

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO
FACULTAD DE QUIMICA

* FRAGILIZACION DE JUNTAS SOLDADAS *

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

Q U I M I C O M E T A L U R G I C O

P R E S E N T A :

G R A C I E L A P A R E D E S E L I A S

FACULTAD DE
QUIMICA

QUERETARO, QRO.

MARZO DE 1991.



BIBLOTECA

No. Adq.

9

No. Titulo

Clas.

No. Adq.

I 50076

No. Titulo

671.5204

Clas.

P227F

Responsables del presente trabajo titulado:

FRAGILIZACION DE JUNTAS SOLDADAS

Asesores

Ing. Víctor Manuel Sánchez C.

M.C. Antonio Deolarte Fou

Querétaro, Qro. Marzo de 1991.

EL PRESENTE TRABAJO SE DESARROLLO CON LA COLABORACION DE INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL (CIDESI) BAJO LA DIRECCION DEL ING. VICTOR MANUEL SANCHEZ C. Y EL M.C. ANTONIO DEOLARTE POU A QUIENES AGRADEZCO SU APOYO, PACIENCIA Y LA CONFIANZA PUESTA EN MI PARA REALIZAR ESTE TRABAJO.

Dedico este trabajo a todos y cada uno de las personas que de una u otra manera me apoyaron para realizarlo.

A mi padre que siempre me dio su apoyo en los momentos difíciles y que me enseñó a tener la fortaleza necesaria para seguir adelante.

A mi madre por sus sacrificios y estímulos.

A mi hijo Víctor Manuel que con su presencia ha llenado de alegría y esperanzas mi vida.

A mi esposo José Manuel por su apoyo.

A mis hermanos Jorge y Gustavo, porque su presencia siempre ha sido importante en mi vida.

A mis grandes amigos por su valioso colaboración para la realización de este trabajo , Sr. José Venegas , Salvador Martínez, Miguel Celado, Martina Hernández, Ma. de Jesús Alcantar, Adriana Reval, José Núñez, Alvaro Campos, Fernando Rosas, Gerardo Castillo, Mauricio Tello Ma. Rosalía Cano, al Ing. Cirilo Noguera, Oscar Barceinos, Miguel Martínez.

A mis amigos y compañeros de la escuela: Alejandro Valdéz, Francisco Pérez, Gabriela Ruiz, Marta Reyes, Ma. teresa Sicilia, Javier Delgado, Jaime Mares, Eva Contreras y a mi gran amiga Sonia Monzalvo Destunis a quien siempre llevó en mi corazón.

I N D I C E	P A G I N A
I.- INTRODUCCION	II
II.- FUNDAMENTO TEORICO	
1.- CLASIFICACION DE FRACTURAS EN SOLDADURA	6
2.- TEORIA GENERAL DE MECANISMOS DE FRACTURA	15
3.- ALISTOS NUMERICOS	21
4.- PRUEBAS DE SUSCEPTIBILIDAD A LA FRACTURA	37
III.- PARTE EXPERIMENTAL	
1.- PRUEBAS REALIZADAS	48
2.- RESULTADOS	48
3.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
IV.- ANEXOS	
1.- GRAFICAS Y DIBUJOS	55
2.- FOTOGRAFIAS	79
3.- TABLAS	85
V.- BIBLIOGRAFIA.	86

FRAGILIZACION DE JUNTAS SOLDADAS

INTRODUCCION

Este trabajo pretende dar a conocer uno de los más importantes defectos que pueden encontrarse en una unión soldada, así como sus causas y la manera de prevenir la presencia de dichos defectos (fracturas).

La soldadura es un proceso de manufactura por medio del cual se unen dos metales. La unión se diseña conociendo una cierta combinación de parámetros requeridos los cuales son determinados por el servicio u operación del equipo. Dentro de los cuales se encuentran:

1.- Las propiedades mecánicas y de tensión mínimas: dobles y propiedades de impacto.

2.- Un grado específico de sonidad de la junta soldada dependiendo del tipo de servicio.

3.- Una designación de esfuerzos tolerable basada en las propiedades del material a las temperaturas de servicio.

4.- Ambiente corrosivo, etc.

La ventaja de la soldadura consiste en que dicho procedimiento posibilita economizar metal, simplificar el proyecto y el cálculo de las construcciones, permite ahorrar tiempo, mano de obra y a final de cuentas permite reducir el costo de la producción.

La desventaja de la soldadura consiste en la presencia de cierto tipo de defectos como lo son:

1.- Porosidad.- La porosidad se refiere al gas atrapado que se libera de algún material sólido, o de la humedad frecuentemente atrapado en el metal de soldadura.

2.- Inclusiones de Escoria.- Este término se usa para describir los óxidos y otros sólidos no metálicos que son atrapados en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base. (línea de fusión). Y generalmente provienen del material que cubre el electrodo o de los fundentes empleados en la operación de soldadura.

3.- Inclusiones de Tungsteno.- En el proceso de soldadura con tungsteno el toque ocasional del electrodo al metal de aporte fundido particularmente en el proceso manual, puede transferir partículas de tungsteno dentro del depósito soldado. Estas inclusiones de tungsteno generalmente son indeseables y para trabajo crítico se especifica el tamaño y el número límite de estas inclusiones.

4.- Fusión Incompleta.- Este término es usado para describir la falta de fusión de todos los límites adyacentes del metal de soldadura o adyacentes al metal de soldadura y el metal base.

5.- Inadecuada Penetración de la Junta.- Esto se refiere a cuando la penetración de la junta es menor que lo especificado.

6.- Socavación.- Este término es usado para describir una cavidad fundida dentro del metal base adyacente al pie de la soldadura y que disminuye en ese punto la sección o espesor requerido.

7.- Fracturas.- Las fracturas resultan de ruptura de metales bajo esfuerzo. Algunas veces grandes, algunas veces son separaciones muy estrechas en el metal de soldadura o adyacente al metal de soldadura y es el defecto sobre el cual se tratará en este trabajo y el cual es uno de los defectos más nocivos y prohibido por la mayoría de las especificaciones.

Dichas fracturas pueden dividirse en dos tipos, fracturas en frío y fracturas en caliente.

La fractura en frío se presenta en el borde de la soldadura y bajo el cordón de la soldadura. Estos sitios son comunes para la fractura en frío y los cuáles son llamados también de borde o fractura debajo del cordón.

La fractura ocurre después de la aplicación de la soldadura en periodos de tiempo de algunas veces días o algunas semanas después de que la soldadura es terminada. El sitio más común para que ocurra la fractura en frío es la zona afectada por el calor. (ZAT) (1)

La fractura en caliente es desarrollada durante la solidificación del metal de soldadura y ocurre durante el enfriamiento entre las temperaturas de líquido y sólido.

Ocurre a temperaturas cercanas al punto de fusión durante o inmediatamente después de efectuar la soldadura. Las fracturas en caliente ocurren en el metal de soldadura y en la zona afectada por el calor, inmediatamente adyacente a la zona de fusión. Las fracturas en caliente son fracturas intergranulares. (2)

FUNDAMENTO TEORICO:

1.-CLASIFICACION DE FRACTURAS DE SOLDADURA

Las dos clasificaciones generales por las cuales todas las fracturas de soldadura pueden ser descritas son:

- 1) Apariencia y Ubicación
- 2) Condiciones de formación

1) Clasificación de fracturas de soldadura por apariencia y ubicación:

Tres diferentes tipos de fracturas ocurren en el metal de soldadura ver (Fig. 1).

a) Fracturas Transversales del Metal de Soldadura:

Estas fracturas son perpendiculares al eje de la soldadura y en algunos casos tienen que ser analizadas cuidadosamente porque pueden prolongarse más allá del metal de soldadura dentro del metal base.

b) Fractura Longitudinal del Metal de Soldadura:

Estas fracturas son predominantes dentro del metal de soldadura

y son regularmente limitadas al centro de la soldadura. Así las fracturas pueden ocurrir como una extensión del cráter de las fracturas formadas al final de la soldadura. Puede también ocurrir como una extensión a través de las capas sucesivas de una fractura que existe en la primera capa depositada.

Si una fractura es formada en la primera capa y no es removida o completamente reparada cuando la capa siguiente es depositada tiende a progresar dentro de la capa anterior y de allí dentro de la próxima capa adyacente y finalmente puede aparecer en la superficie.

c) Fracturas del Cráter:

Siempre que las operaciones de soldadura son interrumpidas existe una tendencia a la formación de fracturas cráter.

Estas fracturas comienzan a formarse y proceden solamente al margen del cráter. De cualquier modo estos pueden ser puntos de comienzo para fracturas longitudinales de soldadura, particularmente cuando ocurren en el cráter que se forma al final de la soldadura.

(3)

d) Fracturas Transversales del Metal Base:

Los tipos de fractura que son transversales a la dirección de soldadura son generalmente asociados con soldaduras de filete en aceros de alta dureza en donde la distancia entre el eje de la soldadura y el eje expuesto de una placa es relativamente pequeño.

e) Fracturas Longitudinales del Metal Base:

Estas fracturas son paralelas a la soldadura y están en el metal base. Estas pueden ser extensiones de fracturas bajo el charco de soldadura. Por soldadura de filete, longitudinal a las fracturas del metal base y pueden ser divididas en dos tipos.

1) Fracturas Salientes.- Las cuales proceden de la punta del filete de la soldadura a través del metal base, algunos veces comienzan de socavaduras.

2) Fracturas de Raíz.- Las cuales proceden de la raíz del filete de soldadura y progresan a través del metal base, ocasionalmente al lado opuesto.

En el caso de surcos de soldadura, las fracturas son más probables que ocurren en la zona afectada por el calor adyacente a la soldadura.

Las fracturas pueden también presentarse en el eje de la soldadura en la zona de fusión entre el metal de soldadura y el metal base.

Generalmente este tipo de fractura está asociada con aceros de alta dureza cuando el metal de soldadura y el metal base son completamente diferentes en composición, con lo cual da como

resultado la formación de aleaciones de propiedades no predecibles en la zona de fusión. (4)

2) Clasificación de fracturas de soldadura por condiciones de formación:

a) Fracturas en caliente:

Las fracturas en soldaduras que son formadas cerca de la temperatura de sólidos son llamadas fracturas en caliente. Si una fractura es abierta a la atmósfera sus superficies son usualmente decoloradas por la oxidación. Las fracturas en caliente pueden ser manifestadas en diferentes aleaciones como : Base Aluminio, Base Niquel, Base Cobre y aceros tanto ferríticos como austeníticos; estas se pueden presentar tanto en el metal de soldadura como en el metal base y siempre son del tipo intergranular. Las fracturas en caliente también pueden ser definidas como separaciones de límites o intergranulares y las cuales se propagan con una disminución de la ductilidad cuando el metal está sujeto a deformación por los esfuerzos que se originan durante la soldadura. Los límites pueden ser entre dendríticos, intergranulares y también se incluyen los llamados límites fantasmas.

No hay fracturas en caliente transgranulares, en el estricto sentido de clivaje, aunque algunas fracturas pueden parecer transgranulares cuando estas son formadas en los límites fantasmas

(Fig. 2) o cuando son originados a lo largo de nuevos emigrados límites de grano.

B. Hensworth y colaboradores han establecido la clasificación de fracturas en caliente mostrada en la fig.3; en la cual son reconocidos dos tipos principales de fracturas en caliente en la soldadura:

Tipo 1 fractura de segregación y tipo 2 fracturas por disminución de ductilidad.

Tipo 1.- Este tipo de fractura en caliente comprende separaciones de límites los cuales ocurren en donde microsegregaciones llevan a la formación de segundas fases distribuidas a lo largo de las superficies en tres dimensiones. De aquí que la fractura sea referida como asociado con películas de bajo fusión. Cuando los elementos los cuales forman las películas son intencionalmente adicionados a la aleación, la fractura es intrínseca como en el caso de aleaciones Al-Sn y aceros al Nb y B. Cuando las películas son formadas por elementos de impurezas ejem. S y P en los aceros, la fractura es extrínseca.

Tipo 2.- Este tipo de fracturas ocurre en límites los cuales están libres de películas, pero con una evidencia de una disminución de la ductilidad (Fig.4), cuando el metal es probado a tensión durante

el enfriamiento que le sigue al calentamiento de simulación a la zona afectada por el calor. Aparece dicha fractura también será referida como fractura por disminución de ductilidad. Este tipo de fractura no es desconocida en el trabajo en caliente de aceros totalmente austeníticos. Cuando consideramos la gráfica ductilidad vs temperatura de prueba (fig 4), la baja ductilidad a la temperatura intermedia no debe ser confundida con la aún menor baja ductilidad que se presenta cerca de la temperatura de sólidos y que es asociada con las películas de líquidos. Como una guía aproximada, la temperatura a la cual ocurre la fractura por disminución de ductilidad es justamente por abajo de la temperatura de recristalización.

Los dos tipos de fractura en caliente (tipo 1 y tipo 2) tanto en la zona afectada por el calor como en el metal de soldadura, pueden ser reconocidos por medio de una minuciosa examinación metalográfica usando microscopio óptico. Sin embargo, cuando la duda persiste las superficies de la fractura deben ser abiertas a temperatura ambiente y examinada por fractografía electrónica (microscopio de barrido). La presencia de películas indicarán inequívocamente fracturas del tipo 1, mientras que la fractura del tipo 2 se mostrará relativamente limpia la superficie de la fractura decorada con bandas escalonadas y / o decoloración térmica. (5)

b) Fracturas en Frio.- Las fracturas en frío son definidas generalmente como aquéllas que ocurren abajo de 400 °F (204 °C), éstas son generalmente transgranulares y pueden ser divididas en dos tipos

generales, a corto tiempo y retardadas.

Las fracturas en frío a corto tiempo son iniciadas durante el enfriamiento a temperatura ambiente después de la soldadura o después de un corto tiempo a temperatura ambiente.

Las fracturas retardadas son iniciadas después de un lapso de tiempo a temperatura ambiente. Periodos de retardo en términos de semanas o meses se han encontrado.

Las fracturas en frío pueden ser manifestadas tanto en el metal de soldadura como en la zona afectada por el calor, siendo su aparición con más frecuencia en ésta última. El hidrógeno es el responsable de la fractura en frío en soldaduras de aceros, y por eso a éste tipo de fracturas también se les conoce como fractura inducida por hidrógeno.

La diferencia entre fractura en frío y la fractura en caliente a temperatura intermedia no se basa tanto en la temperatura a la que ocurren ambos tipos de fracturas si no en la naturaleza del proceso de fractura. La fractura en caliente a temperatura intermedia es el resultado de los efectos de precipitación o segregación del soluto en los límites de grano y el cual resulta en fractura intergranular. La precipitación o segregación de soluto requiere temperaturas arriba de 350 °C. Aún largos periodos de tiempo de exposición a temperaturas menores de 350 °C, son insuficientes para la precipitación o

segregación de casi todos los elementos solutos, con la excepción del hidrógeno. Es por ésto que no es de sorprenderse que la captación de hidrógeno durante la soldadura sea la principal causa de la fractura originada a bajas temperaturas de exposición.

La absorción de hidrógeno por la soldadura nos da por resultado fragilización por hidrógeno, esta reducción de ductilidad ocurre generalmente en los aceros en el rango de -50°C a 150°C .

Mucho del hidrógeno presente en el charco de la soldadura de acero es involucrado durante la solidificación. Puesto que las modificaciones a la química del metal de soldadura pueden prevenir la fractura en frío del metal de soldadura el sitio más común para este tipo de fractura es la zona afectada por el calor. La fractura en la zona afectada por el calor es asociado con bandas ricas en aleación particularmente en inclusiones elongadas de sulfuros. La segregación del soluto, particularmente de carbono, es importante porque ésto puede llevar a la formación de una microestructura mucho más susceptible a la fractura en frío. La microestructura más susceptible a la fractura en frío es la martensita y su formación es favorecida por un alto contenido de aleación (particularmente carbono) y una rápida velocidad de enfriamiento. La fractura en frío se desarrolla como resultado de la acción del hidrógeno sobre una microestructura susceptible.

La captación de hidrógeno y la formación de una microestructura susceptible son únicamente dos de los tres factores requeridos para la fractura en frío. El tercer factor es esfuerzo, el cual en el caso de la soldadura puede ser provisto por esfuerzos residuales. Es común que las fracturas en frío sean manifestadas antes que la pieza sea puesta en servicio y que halla experimentado cargas de operación. (6)

2.- Teoría General de Los Mecanismos de Fractura

Masubuchi y Martin desarrollaron un análisis matemático basado en la teoría de los mecanismos de fractura para determinar la relación entre la distribución de esfuerzos residuales y la tendencia de propagación de la fractura.

Un estudio fue hecho para desarrollar una teoría general de mecanismos de fractura efectuada en un sólido conteniendo un esfuerzo residual por modificación de la teoría de los mecanismos de fractura hechos por Griffith Irwin.

Existe una diferencia básica entre la teoría (Crack Pattern) de los caminos de fractura y la teoría ordinaria de los mecanismos de fractura. en la teoría Crack Pattern el mayor interés es determinar el camino que es estable, en la teoría de mecanismos de fractura el mayor interés es determinar las condiciones que producen la fractura inestable. Es importante reconocer en la teoría de Crack Pattern que

los esfuerzos residuales no se distribuyen uniformemente en el sólido y por esto, la fractura puede ser curva.

Cuando una fractura ocurre en un sólido conteniendo un esfuerzo residual, nuevas superficies fracturadas aparecen y el esfuerzo residual que existe en regiones cercanas a la fractura son parcialmente liberadas. El incremento en la energía de superficie

depende de las propiedades del material y se considera proporcional al área de la superficie de la fractura. Cuando una fractura de longitud l (entre A y B en la figura 5) ocurre en una placa de espesor uniforme, el incremento de la energía de superficie por unidad de espesor de la placa W_s se da por .

$$W_s = 2Fl = 2F \int_A^B ds$$

Donde W_s = Energía requerida para producir la nueva superficie.

y F = aumento de energía requerida para producir una superficie de área unitaria.

$$ds = dx^2 + dy^2 = \text{elemento lineal.}$$

Los principales características de los esfuerzos residuales, son cambios que tienen lugar durante la formación de la fractura son.

1) Puesto que los esfuerzos residuales son relevados, los esfuerzos son considerados elásticos uniformes cuando los esfuerzos residuales son causados por deformación plástica.

2) Si los esfuerzos remanentes actúan en la superficie fracturada después de ocurrida la fractura, los esfuerzos normal y cortante que actúan a lo largo de la fractura deberán ser totalmente

relevados. Consecuentemente, la disminución en energía de deformación elástica de los esfuerzos residuales por unidad de espesor a la ocurrencia de la fractura (W_e) puede ser determinada conociendo los esfuerzos residuales que actúan a lo largo de la fractura antes de la fractura y el desplazamiento relativo de ambos lugares de la fractura o el inicio de la fractura como sigue:

$$W_e = \int_A^B \frac{1}{2} \left(\sigma_n [U_n] + \tau [U_t] \right) ds$$

W_e = Disminución en la energía de deformación elástica.

σ_n , τ = Esfuerzos residuales normal y cortante respectivamente que actuaron a lo largo de la fractura.

$[U_n]$, $[U_t]$ = Desplazamientos relativos de ambos sitios de la fractura en las direcciones normal y tangencial respectivamente.

La disminución en la energía total del sistema U es

$$U = W_e - W_s .$$

Fuesto que los cambios por esfuerzos debidos a la fractura son considerados elásticos, la relación entre el esfuerzo residual a lo

largo de la fractura (σ , τ) y el inicio de la fractura $[V_n]$, $[V_t]$ puede ser determinado analíticamente. Masubuchi y Martin realizaron un análisis de cambios de esfuerzos debido a la formación de fractura. Consecuentemente, la disminución de energía total U , puede ser calculada cuando el camino de la fractura y los esfuerzos residuales que actúan a lo largo de la fractura son conocidos.

Ahora se considera la estabilidad de la fractura. Antes de todo el valor de U deberá ser positivo si se forma la fractura. De cualquier manera, estos pueden ser muy diferentes caminos de fractura entre 2 puntos A y B como se ve por L_1 , L_2 en la figura 6 que pueden satisfacer esta condición. Diferentes valores de la energía disminuyen U_1 , U_2 deberán producirse por los diferentes caminos de fractura. Un camino de fractura puede resultar en un gran valor de U que otros caminos de fractura. El camino de fractura que produce una gran disminución en la energía total es probable que sea el camino preferido entre A y B. La fractura también se extenderá tan largo cuando U aumente por el incremento en la longitud de fractura $[(\delta u / \delta l) > 0]$. La fractura se detendrá cuando $\delta u / \delta l = 0$. La condición

mencionada se ve esquemáticamente en la figura 7. La relación entre la longitud de fractura y la disminución de energía U , se ve por diferentes caminos de fractura. El camino de fractura (incluyendo la longitud de fractura) que corresponde al punto X es más estable que otros caminos de fractura.

El modelo de fractura que produce el máximo valor de U es uno de

los más probables que ocurra.(7)

Análisis de Fracturas Transversales en Soldadura

Es fundamentado en investigaciones experimentales que las fracturas típicas inducidas por hidrógeno son cortas, transversas y adyacentes a la soldadura. Esto también demuestra que las propiedades del material afectan el modelo de la fractura. Cuando el material fue fragilizado severamente por carga de hidrógeno, se formaron grandes fracturas. Cuando el material fue menos fragilizado las fracturas fueron menos predominantes o cortas y más espaciadas. Cuando el material fue tenéz más allá de un cierto límite, la fractura no fue producida durante o después de la carga de hidrógeno.

Las típicas fracturas transversales observadas en la mayoría de las soldaduras fueron cortas, paralelas aproximadamente de igual longitud y espaciadas en aproximadamente los mismos intervalos. Los resultados indican que la distribución de esfuerzos residuales longitudinales tienen las siguientes características.

1) Altos esfuerzos de tensión existen en regiones limitadas en ambos lados de la soldadura.

2) La distribución de esfuerzos residuales a lo largo de la soldadura es uniforme excepto en regiones cercanas al final de la

soldadura.

Estas características fueron probadas con medidas reales de esfuerzos residuales.

Basados en los descubrimientos experimentales, los análisis tienen que ser hechos para fracturas en una placa infinita causada por los esfuerzos residuales como se observa en la curva AA en la figura 8. Se asume que los esfuerzos residuales en la dirección Y se da por $\sigma_y = f(x)$ a lo largo de la dirección X y son uniformes en la dirección Y. Dos tipos de fracturas transversas fueron analizados.

- 1) Una fractura recta simple.
- 2) Fracturas paralelas con igual longitud e igual espaciamento como se ve en la figura 9. (8)

3.- Análisis Numéricos

Los análisis numéricos tienen que ser hechos de la expresión matemática de la distribución de esfuerzos para los dos ecuaciones siguientes.

1) Modificación parabólica para la distribución de esfuerzos.

$$\sigma_y = \sigma_o \left\{ 1 - \left(\frac{x}{f} \right)^2 \right\} e^{-\left(\frac{x}{f} \right) \left(\frac{x}{f} \right)^2} \quad (1)$$

2) Distribución parabólica de esfuerzos.

$$\sigma_y = \sigma_o \left\{ 1 - \left(\frac{x}{f} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

En donde σ_o = esfuerzo máximo en el centro de la soldadura.

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

La distribución de esfuerzos dados por la ecuación 1 se da en la curva BB en la figura 10 la cuál representa la distorsión residual en una soldadura con precisión razonable. La curva CC en la figura 8 representa la distribución de esfuerzos dados por la ecuación 2. La distribución de esfuerzos parabólicos fue usado en un análisis de una fractura transversa corta, y la distribución modificada de esfuerzos parabólicos fue usado en un análisis de una fractura que se extiende dentro de la región en donde los esfuerzos residuales fueron originalmente de compresión.

Unos parámetros dimensionales, μ el endurecimiento relativo de

una soldadura (comparado con fractura transversa), tiene que ser introducida a caracterizar la tendencia a la fractura de una soldadura por inducción de hidrógeno. Los parámetros se determinaron por la distribución de esfuerzos residuales y las propiedades del material como sigue.

$$\mu = \left(\frac{K_c}{K_w} \right)^2$$

En donde K_c = esfuerzo crítico, factor de intensidad del material, mostrado en la ecuación.

$$K_w = \sigma_o \cdot J \cdot \pi \cdot f$$

σ_o = máximo esfuerzo longitudinal residual en el centro de la soldadura.

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

K_w es un parámetro determinado por la distribución de esfuerzos residuales. Masubuchi y Martin designaron K_w , El factor efectivo de intensidad de esfuerzos de la soldadura.

Cuando el material tiene un gran endurecimiento por fractura el valor de μ se incrementa, por esto μ puede ser llamado el endurecimiento relativo de la soldadura.

Los siguientes resultados tienen que obtenerse:

1) Una serie de fracturas resulta cuando el valor p de la soldadura es pequeño aproximadamente 0.02.

2) La fractura no resulta cuando el valor p es grande alrededor de 0.3.

El valor crítico de p es 0.29 para la distribución de esfuerzos parabólico y 0.25 para la distribución de esfuerzos parabólicos modificados.

3) La longitud de la serie de fracturas estables es aproximadamente el mismo como el ancho de la zona de tensión.

4) Cuando una soldadura es extremadamente frágil con un valor p de aproximadamente 0.01 una o pocas fracturas de una serie de fracturas puede fácilmente penetrar dentro de la región en donde los esfuerzos residuales fueron originalmente compresivos.

Los resultados indican que estas son limitaciones en las propiedades del material usado en la prueba de fractura por hidrógeno inducido. El valor de una soldadura antes de la carga de hidrógeno deberá ser aproximadamente mayor que 0.3, de otra manera la fractura puede ocurrir fuera de la carga de hidrógeno. El valor p de la soldadura, de cualquier forma deberá disminuir alrededor de 0.02

durante la carga de hidrógeno para que ocurran las fracturas sistemáticas. Después de que las fracturas por hidrógeno empiezan a formarse, es mejor tener cuidado por un largo tiempo, puesto que las fracturas pueden crecer más allá de la longitud de la fractura estable. (9)

3.- Efectos de la composición Química en Fracturas.

a) Fractura en Caliente

La fractura en caliente puede ser eliminada designando la composición del metal base y del metal de soldadura de acuerdo con las predicciones de Borland de su teoría de fractura super-solidus.

Elementos que resultan en la formación de una fase líquida la cual cubre la mayoría de todas las caras del grano durante el crecimiento incrementan la susceptibilidad a la fractura. Por esto, estos elementos deben ser eliminados del metal base y el metal soldado. Agregando elementos que incrementen la longitud del rango crítico de solidificación e incrementen la susceptibilidad a la fractura.

Estos elementos deben ser eliminados lo más posible o restringidos en la composición del material. Desafortunadamente no siempre es posible hacer esto con algunos elementos que son necesarios para la aleación.

La tabla A lista los factores de potencia de fractura relativos de un número de elementos. Un elemento como el azufre (el cuál es el más potente en la tabla) debe ser eliminado a límites muy bajos en aceros de alta resistencia para prevenir las fracturas en el metal base y en el metal de soldadura.

En la tabla A podemos observar que el carbono también tiene un alto potencial para producir la fractura en caliente. Desafortunadamente el carbono no puede ser eliminado de los aceros de alta resistencia ya que es este el principal agente de endurecimiento usado en estos aceros.

En aleaciones reales un segundo elemento puede significar la alteración del efecto esperado de algún elemento.

En aceros un ejemplo es el efecto del manganeso en el azufre si el manganeso se incrementa la efectividad del azufre a producir la fractura en caliente se reduce.

Inagaki sugirió la siguiente fórmula para evaluar la sensibilidad a la fractura en caliente (HCS) de un acero de alta resistencia baja aleación .

$$(HCS) = C \left(S + P + \frac{Si}{25} + Ni / 100 \right) \times 10^3$$

$$3 Mn + Cr + Mo + V$$

La composición química debe ser dada en porcentaje, cuando el valor (HCS) es menor que 4 el acero tienen buena resistencia a la fractura en caliente.

Según Inagaki la siguiente relación también puede usarse para prevenir la fractura en caliente en aceros soldados . (10)

S = 0.035 %

Ni = 1.0 %

Mn = 0.80 %

C = 0.15 %

Mn/S = 35

b) Fractura en frío:

La composición química es un factor extremadamente importante para determinar si un acero es susceptible a fracturarse en frío. El concepto de carbono equivalente es muy usado para evaluar la sensibilidad de una placa a fracturarse en frío.

La relación es válida para aceros baja aleación que dependen de la transformación martensítica para obtener alta resistencia.

El carbono equivalente es un número usado para expresar la composición de un acero y es hecho para conocer el porcentaje de

carbono presente en el acero, un factor para cada elemento de aleación presente. Este factor es obtenido dividiendo el porcentaje de los elementos de aleación presentes por un número el cual tiene que obtenerse experimentalmente para conocer la influencia de los elementos de aleación en las características estudiadas. Una fórmula común de carbono equivalente es:

$$C_e = C + Mn/6 + Ni/20 + Cu /40 + Mo/50 + V/10.$$

Cuando C_e , obtenido por la fórmula anterior, excede a 40 la fractura puede ocurrir. La fractura es también influenciada por el calentamiento de la soldadura y otros factores.

El trabajo en varios tipos de aceros demostro la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno es relacionada a la dureza del acero. Como el incremento de dureza el aumento de esfuerzo requerido para producir la fractura por hidrógeno disminuye. Desde entonces el carbono equivalente puede usarse como un índice de aproximación de la habilidad de endurecimiento de un acero, esto es relacionado a la dureza producida en la zona afectada por el calor de una soldadura.

Esto se muestra en la figura 12. Esta figura muestra la relación entre la dureza de la zona afectada por el calor de una soldadura de placa hecha de acero de varios valores de carbono equivalente.

Las soldaduras fueron hechas en calentamiento simple (energía

total por unidad de longitud de soldadura), cada zona afectada por el calor experimenta el mismo ciclo térmico durante la operación de soldadura prescindiendo de la química del acero. La dureza de la zona afectada por el calor se incrementa casi linealmente como se incrementa el carbono equivalente y se expresa por una simple fórmula como sigue:

$$C_e = C + Mn/4 + Si/4.$$

La figura 12 también contiene una curva para la sensibilidad de la fractura de este grupo de aceros. El índice de fractura usado fue obtenido de pruebas en la placa usando un estándar de condiciones. El espécimen de prueba es una pieza rectangular de placa de alrededor de 2" de ancho y 4" de longitud. La probeta de soldadura es de alrededor de 1 1/2" de longitud. Los especímenes soldados son seccionados longitudinalmente y la longitud de la fractura es medida en la sección longitudinal. La longitud de la fractura entonces es reportado como un porcentaje de la longitud total de la soldadura.

Este es el índice de fractura. Así las pruebas de fractura tienen que hacerse completamente con los estándares y estadísticamente su reproducibilidad tiene que observarse o ser completamente altas. Esta prueba fue originalmente desarrollada para estudiar la susceptibilidad a la fractura de la placa.

Los datos mostrados en la figura 12 indican que la fractura solamente ocurre en estructuras con valores de dureza superiores a las durezas críticas. Por esto, para tener un procedimiento de soldadura el valor del carbono equivalente es la mayoría de las veces crítico y debe ser excedido si la fractura ocurre. (11)

4.- Modos de Prevenir la Fractura.

a) Métodos de Prevenir la Fractura en Frio en Aceros Soldados.

Hay varios métodos para prevenir la fractura en frío. Ellos son:

1) El uso de procesos de bajo hidrógeno.

2) Precalentamiento.

3) Reducción de la junta.

1) Uso de procesos de bajo hidrógeno.- Para soldadura de aceros de alta resistencia los cuales tienden a ser susceptibles de fracturarse en frío, es importante el uso de procesos con bajo hidrógeno. La figura 13 muestra la relación entre la fractura media y el carbono equivalente para tres diferentes tipos de electrodos (ver tabla siguiente).

E 6010 (alta celulosa de sodio).

E 6020 (alto óxido de hierro).

E 6015 (bajo hidruro de sodio).

Las condiciones de soldadura fueron tales que la zona afectada por el calor de las soldaduras de prueba experimentando el mismo ciclo térmico durante la soldadura, sin importar el electrodo usado. Esta es una gran diferencia en la cantidad de hidrógeno en el gas protector producido por los tres electrodos. Para 3/16" de diámetro de los electrodos. El gas protector del E 6010 contiene alrededor de 30 % a 40 % y E 6015 5 % a 10 %.

Los electrodos bajo hidrógeno son muy usados para soldadura de aceros de alta resistencia, consiguientemente vale la pena describir la necesidad de tener cuidado en el uso de electrodos bajo hidrógeno.

El término bajo hidrógeno se desarrolla porque estos electrodos son hechos a un límite máximo de mezcla en la cubierta del electrodo. Estos electrodos no son como se piensa sin hidrógeno. La mezcla específica los máximos contenidos de los electrodos bajo hidrógeno con diferentes niveles de resistencia son :

0.6% para E 7015, E 7016, E 7018

0.4 % para E 80XX

0.2 % para E 100XX y E 110XX

Llevando un control en el contenido de la mezcla en la cubierta del electrodo, teniendo el nivel de hidrógeno en un mínimo por el agua que es una fuente de hidrógeno cuando se disocia en el arco.

El hidrógeno tiene que ser asociado con fracturas bajo el cordón y fracturas de borde. De esta manera es posible tener hidrógeno en un nivel bajo.

Para uso efectivo, los electrodos bajo hidrógeno deberán ser almacenados correctamente y mantenerse secos.

La figura 14 muestra el efecto en el contenido de la mezcla de la exposición a la atmósfera húmeda. Esto sino se conoce el nivel de la mezcla de los electrodos, estos deben ser secos a aproximadamente 800°F (427 °C) antes de usarlos. La porosidad en el comienzo de una soldadura es un indicador de que la cubierta del electrodo tiene cierto contenido de hidrógeno en la muestra. Después de colocar los electrodos en el horno, asegurarse de que se mantengan en el mismo hasta que estén listos para usarse. El soldador es generalmente abastecido con el número justo de electrodos que él espera utilizar en un periodo de 4 hrs.

Si los electrodos se mantienen fuera del horno por un largo tiempo son vueltos a secar. Si el soldador no tiene un contenedor caliente para electrodos, los electrodos deberán ser usados con los

siguientes limites de tiempo:

E 70XX	4hr.
E 80XX	2hr.
E 90XX	1hr.
E 110XX	1/2 hr.

2) Pre calentamiento.

Hay dos razones para efectuar el pre calentamiento. El pre calentamiento reduce al máximo el grado de enfriamiento que ocurre en la zona afectada por el calor durante la soldadura. Esta reducción en el grado de enfriamiento puede primero producir estructuras suaves en la zona afectada por el calor. El otro efecto del pre calentamiento es mantener la temperatura en la zona afectada por el calor sobre una temperatura crítica lo suficiente para permitir la difusión de hidrógeno fuera de la zona durante el enfriamiento. Si esto sucede no habrá fragilidad por hidrógeno en la zona afectada por el calor y consecuentemente, no deberá ocurrir la fractura bajo el cordón.

La figura 15 muestra el efecto del pre calentamiento y post calentamiento en el carbono equivalente crítico para la fractura. Los datos dados en esta figura son tomados de una prueba estandar de fractura bajo el cordón (ver figura 16). Es obvio que para tener una composición química la adición de un drástico pre calentamiento reduce

la tendencia a la fractura debajo del cordón y se incrementa el carbono equivalente crítico.

La efectividad del precalentamiento para incrementar el nivel del carbono equivalente crítico para la fractura debajo del cordón tienen también que demostrarse en la periferia de la soldadura, la prueba hecha en tubo con una resistencia de cedencia de 52 Ksi. En la figura 17 la relación entre la tendencia a la fractura debajo del cordón y la temperatura del tubo se muestra por tres diferentes carbonos equivalentes. El alto carbono equivalente, la alta temperatura de precalentamiento tiene que utilizarse para eliminar la fractura. Estas pruebas son una excelente simulación de una operación de soldadura. El índice de fractura aquí es el porcentaje de alargamiento de 1" de especímenes cubiertos de una soldadura en la periferia de 30" de diámetro del tubo que se ve como una evidencia de la fractura.

3) Disminución de la Junta

La tendencia de que la fractura en frío se incrementa como se incrementa el límite de la junta.

La figura 18 muestra el espécimen de prueba utilizado, la figura 17 muestra la relación entre el espesor de la placa, la longitud de corte y la intensidad de restricción: K_s (Kg/mm).

Las figuras 20 y 21 muestran los resultados de la prueba obtenidos con temperaturas iniciales de 20 °C y 50 °C respectivamente. Se muestra en estas figuras la relación entre Ks y el carbono equivalente P'c.

$$P'c = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + W/10 + 5B + H/60,$$

En donde H = hidrógeno difusible (cm^3) por 100 g del metal de soldadura determinado por un método de sustitución con glicerina. Las figuras 20 y 21 muestran que la deformación crítica de la junta para causar la fractura disminuye como el carbono equivalente se incrementa. (12)

b) Modo de prevenir la fractura en caliente

En general, la fractura en caliente puede ser eliminada por la designación de la composición del metal de soldadura o la placa base.

La tabla A lista el factor de potencia relativo de fractura para un número de elementos.

Puede observarse por estos datos que ciertos elementos los cuales no son normalmente agregados intencionalmente al acero son potentes para producir la fractura en caliente. Un elemento como lo es el azufre (el cual es el más potente en esta tabla) tiene que ser limitado a muy bajos niveles en aceros de alta resistencia para prevenir las

fracturas en el metal soldado y en la zona afectada por el calor. En otras palabras esta tabla muestra que el carbono también tiene una alta potencia para producir la fractura en caliente. Desafortunadamente el carbono no puede ser eliminado de aceros de alta resistencia por que es este el endurecedor primario y agente de resistencia usado en este tipo de aceros.

En aleaciones reales, la presencia de un segundo elemento puede ser significativo para alterar el efecto esperado del elemento dado en aceros, un ejemplo es el efecto del manganeso en el azufre, como el contenido de manganeso en acero se incrementa la efectividad del azufre como un productor de fracturas en caliente es reducida. Inagaki sugiere la siguiente fórmula para evaluar la sensibilidad a la fractura en caliente (HCS) para un acero bajo aleación de alta resistencia.

$$(HCS) = \left[C \left(S + P + Si/25 + Ni/100 \right) \times 10 \right]^{3/4} (Mn + Cr + Mo + Nb)$$

La composición química es dada en porcentajes. Cuando el valor HCS es menor que 4, el acero presenta resistencia contra la fractura en caliente.

De acuerdo con la teoría de Inagaki la siguiente composición química puede también ser usada como referencia para prevenir la fractura en caliente en aceros soldados.

S = 0.0035 %

Ni = 1.0 %

Mn = 0.80 %

C = 0.15 %

Mn/S = 25

(13)

4.- Pruebas de Susceptibilidad a la Fractura.

Un gran número de pruebas de sensibilidad a la fractura han sido desarrolladas y usadas por varios investigadores.

Dentro de los factores que tienen efecto directo en dicha susceptibilidad se encuentran: la composición del metal base, tipo de electrodos y condiciones del procedimiento de soldadura. Más de treinta diferentes pruebas de susceptibilidad a la fractura han sido desarrolladas, la mayoría de ellas fueron diseñadas para simular alguna aplicación particular en la cual la fractura fue encontrada por lo que, se debe analizar concienzudamente la posibilidad de su aplicación cuando algún otro problema diferente este siendo investigado. Otras pruebas han sido desarrolladas como auxilio de la investigación de los fundamentos de la fractura de soldadura.

Las características más importantes que debe tener una prueba de susceptibilidad a la fractura son:

- Posibilidad de mostrar correlación directa entre las condiciones de manufactura y el comportamiento en servicio.
- Poder reproducir los resultados con cierta libertad de variación dado el elemento humano.
- Sensibilidad a pequeños cambios en una de las variables de prueba.

- Capacidad de mostrar los efectos de varias variables en el procedimiento de soldadura.

- Preparación económica de los especímenes y la ejecución de la prueba.

- Aplicación a todos los procesos de soldadura.

Es de suponerse que hasta la fecha no se ha desarrollado ninguna prueba que llene todos los requisitos antes mencionados, sin embargo, lo más importante es poder seleccionar una prueba que se acerque a las condiciones reales y presentes del problema a resolver.

a) Descripción de las pruebas de susceptibilidad a la fractura.

1) Prueba de fractura bajo cordón longitudinal (longitudinal Bead Weld Underhead - Cracking test).- Es una prueba sencilla que fue desarrollada en el Instituto Battelle Memorial para determinar la sensibilidad de los aceros a la fractura debajo del cordón: pequeños bloques de 2" x 3" cortados en dirección del rolado del material a ser investigado, y se deposita un cordón de soldadura de 1 1/4" de longitud como es mostrado en la figura 16. El cordón es depositado con un electrodo E 6010 de 1/8" de diámetro, una corriente de 100 amp. a 24-26 volts, y una velocidad de 10"/min. (15000 ft/pulg); el bloque es precalentado normalmente a 70°F. Un minuto después que ha sido depositada la soldadura se introduce la probeta en un baño líquido a la misma temperatura de precalentamiento, es sacado del baño y

envejecido por 24 hrs. a temperatura ambiente para después ser tratado térmicamente a 1100 °F durante una hora. Es después cortado con disco o sierra y es inspeccionado el espécimen mediante una metalografía para detectar la presencia de fractura. La longitud total de fracturas es expresada en porcentaje con respecto a la longitud del cordón.

Esta prueba es muy útil para comparar la susceptibilidad de este tipo de fractura en diferentes coladas de acero, pero no da información de los efectos de restricción o esforzamiento.

2) Prueba de Severidad Térmica Controlada.- El diseño del espécimen mostrado en la figura 22, de esta prueba esta basado en la suposición de que la extensión de la fractura en la zona afectada por el calor depende principalmente de la velocidad de enfriamiento hasta 572°F aproximadamente, medida en la zona afectada por el calor adyacente a la línea de fusión. Si la velocidad crítica de enfriamiento es excedida para una combinación dada de electrodo placa base, se supone que se manifestará fractura independientemente del esforzamiento externo aplicado. La prueba de severidad térmica controlada consiste de dos placas, una cuadrada y otra rectangular como lo muestra la figura 22. La soldadura de prueba del lado derecho del espécimen es llamada la soldadura bitérmica porque la transferencia de calor será en dos sentidos únicamente, mientras que la soldadura de la izquierda se le llama tritérmica dado que la disipación de calor será en tres diferentes direcciones. Se debe

asegurar el contacto de los dos placas por medio de rectificadas.

Después que el espécimen es ensamblado y se ha enfriado a temperatura ambiente, la soldadura bitérmica es depositada, se deja enfriar nuevamente y la soldadura tritérmica es depositada. Después de 72 horas a temperatura ambiente, el grado de fracturación es determinado midiendo la longitud de fractura en tres especímenes metalográficos cortados del espécimen.

El número de severidad térmica, TSN, es calculado de las siguientes fórmulas:

$$TSN = 4(t + b), \text{ para soldadura bitérmica.}$$

$$TSN = 4(t + 2b), \text{ para soldadura tritérmica.}$$

Por medio de una serie de pruebas es factible deducir la susceptibilidad a la fractura para un acero y electrodos dados en función de TSN.

3) Prueba cruciforme. La prueba cruciforme; figura 23, es esencialmente una modificación del espécimen doble junta en I que es usada para estudios de metal de soldadura. Sin embargo, esta prueba es usada para diferenciar entre las tendencias de fractura de varias coladas en carcasa de acero. La prueba esta diseñada para evaluar la fractura en la zona afectada por el calor. Pero ha sido criticada por

ser más sensible a las condiciones de prueba que a las diferencias de susceptibilidad a la fractura. La posibilidad de difusión de hidrógeno de un filete a otro ha sido cuestionado. Antes que los filetes de soldadura sean depositados, el ensamble es punteado y armado usando candados para asegurar un buen armado. Cada filete es depositado de acuerdo a la secuencia mostrada a una temperatura de precalentamiento determinado y constante. Después de soldar el espécimen es envejecido 48 horas a temperatura ambiente y relevado de esfuerzos a 1150 °F (780 °C) por dos horas; el espécimen es inspeccionado de fracturas y seccionado para examinación metalográfica.

4) Prueba esforzada de Lehigh. Esta prueba figura 24, es usada para estudiar cuantitativamente el grado de esforzamiento necesario para producir fractura en el metal de soldadura. El grado de esforzamiento es variado por el cambio de la longitud de las ranuras ubicadas en la orilla de la placa. El grado de esforzamiento o restricción es expresado numéricamente por el ancho del espécimen entre los puntos de las ranuras medida en pulgadas, o dos veces la dimensión X. La intensidad límite de esforzamiento es expresado como el ancho con el cual fue manifestada la fractura, para dar suficiente esforzamiento que causa fractura en placas delgadas, la longitud de la ranura es usualmente reducida de 5 pulgadas a 3 pulgadas. Las variables que pueden ser estudiadas incluyen el metal base, metal de aporte, precalentamiento, postcalentamiento, calor aplicado y los efectos de multipasos. La fractura es usualmente detectada por examinación de secciones transversales de la soldadura.

7) Prueba de Fractura en frío en Y.- Esta prueba de fractura en frío es de las más usadas en la actualidad para medir la susceptibilidad a la fractura en frío y su prevención. Fue desarrollado por Ito y Bessyo. La prueba consiste en la aplicación de soldadura en el bisel en Y según se muestra en la figura 18. La soldadura se verá sometida a un autoesforzamiento que producirá la fractura y se podrá calcular el porcentaje de fractura superficial, transversal y de raíz. A partir de este dato más el conocimiento del carbono equivalente (Pcm) del metal base, el contenido de hidrógeno H_{cm} en el metal de soldadura ($H_{cm} / 100 \text{ gr}$), el espesor de la sección a soldar y el calor aplicado, es factible producir y prevenir la fractura en frío de la estructura o equipo en cuestión.

B) Prueba de Fractura de Autoesforzamiento rígido.- Esta prueba conocida más por las iniciales RRC, fue desarrollada por un grupo de investigadores japoneses. La figura 27 muestra esquemáticamente la prueba RRC. Cuando una cierta longitud de una junta a tope (llamada longitud de restricción, 'L' se mantiene constante por medios adecuados de fijación, esfuerzos de reacción en la junta se incrementan conforme a la junta se contrae después de la soldadura. El valor de los esfuerzos de reacción se incrementan conforme 'L' disminuye, suponiendo que otros parámetros tales como calor aplicado, espesor de metal base, etc., son los mismos cuando L es muy pequeño la fuerza de reacción en el metal de soldadura se incrementa a valores muy grandes tan pronto como la soldadura es terminada y el metal de soldadura puede fracturarse, como es mostrado por las curvas A', B' en

la figura 27. Cuando 'L' es más grande, las fuerzas de reacción incrementan de acuerdo a lo mostrado por la curva C'. Y la soldadura puede no fracturarse inmediatamente después de la soldadura, pero puede ocurrir fractura retardada cuando el metal base es acero de alta resistencia. Cuando 'L' es lo suficientemente grande, no ocurre fractura como lo muestra la curva D'. En la prueba RRC, la intensidad de restricción K_s (Kg/mm) es :

$K_s = E h/l$; donde E = Módulo de Young, h = Espesor de la placa base y l = longitud de restricción (14).

9) Prueba de Implante .- La prueba de implante fue desarrollada por Granjon y otros en el Instituto de Soudure en Francia. Se entiende por implante un espécimen cilíndrico del material en estudio el cual se fijará libremente dentro de un agujero especialmente barrenado en una placa de soporte del mismo y otro material. Si la conductividad térmica de la placa soporte es idéntica a la del implante, este sufrirá el mismo ciclo térmico que la placa cuando el cordón de soldadura sea aplicado. Consecuentemente, todos los fenómenos asociados con el ciclo térmico pueden ser reproducidos sobre esta pequeña y práctica muestra, el implante. La figura 28 enumera las observaciones y determinaciones que son posibles hacer por la aplicación de este método.

La consideración básica, la cual justifica el método del Implante se basa en el hecho de que a la misma distancia desde el cordón de soldadura sobre la placa (figura 28), los ciclos de calor

en el punto B del Implante y el punto A de la placa soporte son los mismos. En particular, los mismos resultados ocurren en los puntos A y B si es medido, como función de la energía de la soldadura, los tiempos de enfriamiento ejemplo entre 800 °C y 500 °C. Cuando la prueba de Implante es usada para el estudio de fractura en frío, es usado un espécimen con una ranura en "V". Después del depósito del cordón de soldadura, el espécimen es sujeto a una carga de tensión de valor constante. El esfuerzo de fractura en relación a la sección transversal en el fondo de la ranura es usado como criterio para expresar la susceptibilidad a la fractura. La figura 28 muestra una presentación esquemática del aparato usado para esta prueba. Por medio de este, el implante puede ser cargado casi inmediatamente de la soldadura, cuando todavía esta tibia o posteriormente. Es también posible registrar la carga durante la prueba para determinar el momento y consecuentemente la temperatura a la cual la fractura ocurre y también el valor del esfuerzo y como se desarrolla (15).

10) Prueba de Fractura en Caliente Murex.- Es posible medir la susceptibilidad a la fractura en caliente aplicando una deformación plástica en la zona de la soldadura mientras se solidifica. Bajo estas condiciones se desarrolla la prueba de fractura en caliente Murex. La cual es mostrada en la figura 29. Las dos piezas son rotadas una con respecto a la otra a varias velocidades durante el proceso de soldadura. A mayor velocidad de rotación mayor el esfuerzo impuesto a la soldadura durante su depósito. El grado de fracturación en caliente como función del esfuerzo inducido es observado viculamente o

por seccionamiento. (16)

11) Prueba de Varestraint y Transvarestraint.- La prueba de Varestraint (restricción variable), fue desarrollada por Savage y Lundin para evaluar la tendencia a la fractura en caliente de una junta de soldadura. La prueba permite la evaluación de la soldabilidad del metal base y la determinación de la influencia del proceso de soldadura en particular sobre la susceptibilidad a la fractura en caliente. El procedimiento de prueba de Varestraint utiliza un espécimen soportado como se muestra en la figura 30. Una soldadura es depositada (o "Bead on Plate") de izquierda a derecha y cuando el arco pasa por el punto marcado con "A" una carga aplicada neumáticamente por medio de un dado dobla al espécimen hacia abajo instantáneamente para conformar al radio de curvatura del dado removible de radio R. Mientras el arco viaja hasta el punto C en donde es interrumpido. Bajo condiciones normales la fractura en caliente del metal de soldadura es producida únicamente dentro de una región relativamente angosta, directamente a un lado de la posición instantánea de la interface sólido - líquido a la orilla del charro de soldadura. Microfisuración en la zona afectada por el calor es normalmente observada únicamente en la región a un lado del charro de soldadura del punto en donde fue aplicada la carga. Por esta parte la examinación metalográfica se debe tomar para observación de la longitud de soldadura adecuada. Puesto que el esforzamiento inherente que tiene un espécimen rectangular es muy bajo para causar fractura en ausencia de carga externa, el mínimo esfuerzo inducido requerido para

causar fractura, en unas condiciones dadas de procedimiento de soldadura, nos da un índice cuantitativo de la susceptibilidad a la fractura, ver figura 30. (17)

P A R T E E X P E R I M E N T A L

PARTE EXPERIMENTAL

La prueba que se realizó fue la de fractura en 'Y' por ser más sencilla su reproducibilidad en el taller, ya que las otras pruebas que se nombran anteriormente requieren de equipo más especializado para su realización.

Esta prueba se podría usar para conocer la susceptibilidad a la fractura de la junta soldada.

RESULTADOS

NUMERO DE MUESTRA	LONGITUD DE LA FRACTURA
PRIMERA	2.00 mm
SEGUNDA	1.89 mm
TERCERA	1.94 mm

DATOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA

$$C = \frac{f \cdot 100(\%)}{L}$$

f = radio de fractura superficial.

L = Longitud del cordón de la soldadura de prueba

$$f = 5.33 \text{ mm}$$

$$L = 100 \text{ mm}$$

$$C = \frac{5.33 \text{ mm} \cdot 100(\%)}{100 \text{ mm}}$$

$$C = 5.33 \%$$

$$C = \frac{H_c \cdot 100(\%)}{H}$$

H = radio de fractura en el área

H = Espesor mínimo del cordón de soldadura de prueba

Hc = Altura de la fractura de raíz

$T_0 = 1440 \times F_c - 407$ (temperatura de precalentamiento para 10% de fractura o menos)

$$T_0 = 1440 \times 0.5234 - 407 = 346.676$$

$T_0 = 1440 \times P_c - 425$ (temperatura de precalentamiento para 50% de fractura o menos)

$$T_0 = 1440 \times 0.5234 - 425 = 328.676$$

ANALISIS QUIMICO DEL METAL BASE

C = 0.12

Mn = 0.50

P = 0.02

S = 0.02

Si = 0.30

Cr = 5.15

Ni = 0.53

H = 2 cc/100 g

3. CONCLUSIONES DE LA PARTE EXPERIMENTAL.

El material que se utilizó para realizar la prueba de fractura en Y fue un SA-387 Gr 5 clase II del cual se tiene la composición química siguiente:

C = 0.12

Mn = 0.50

P = 0.02

S = 0.02

Si = 0.30

Cr = 5.15

Mo = 0.52

H = 2 cc/100 g (conforme a la norma iso 3690 y

JIS Z 3113-1975)

Teniendo un análisis metalográfico que se reportó más adelante. El material se soldó con un electrodo E 3018 (bajo hidrógeno y 1.5 Cr, 0.5 Mo).

Se soldó el material sin precalentar y se dejó por un periodo de 18 hrs, después de este tiempo se realizó la inspección con líquidos penetrantes para observar y medir las fracturas que se pudieran presentar en la superficie. Después de esto la probeta se cortó en 5 trozos de igual tamaño para poder observar fracturas que no hubieron salido a la superficie.

Se midieron las fracturas con ayuda de un vernier a la escala del

microscópico y de esta forma podemos conocer la longitud de la fractura para de esta manera poder calcular la temperatura de precalentamiento y poderla comparar contra los tablos en los cuales observamos que para el material con que se trabajó la temperatura que se calculó está en el límite superior que marca los tablas para este material, ya que también es importante considerar el espesor de la placa.

De esta manera podemos decir que:

- El contenido de hidrógeno en la soldadura debe ser lo menor posible.

- El grado de enfriamiento de la zona afectada por el calor debe ser controlada para evitar la formación de martensita.

Y para lograr esto tenemos que:

1.- Asegurarnos que la pieza de trabajo este libre de grasa.

2.- Asegurarnos que los electrodos esten secos.

3.- Tener cuidado al cambiar los electrodos cuando se este soldando.

4.- Usar una cantidad de calor y temperatura de precalentamiento apropiados, y controlar el grado de enfriamiento de la zona afectada por el calor.

5.- Controlar la temperatura de interpaño y el calor después de la soldadura.

CONCLUSIONES GENERALES

Los tres tipos de fractura; en caliente, de temperatura intermedia y fractura en frío pueden ocurrir en determinado momento en un material y por esto es importante tomar en cuenta:

- La composición química del material.
- La presencia de impurezas.
- Las condiciones de soldadura, calor, velocidad, temperatura, temperatura de intereso, y el control de la introducción de hidrógeno.

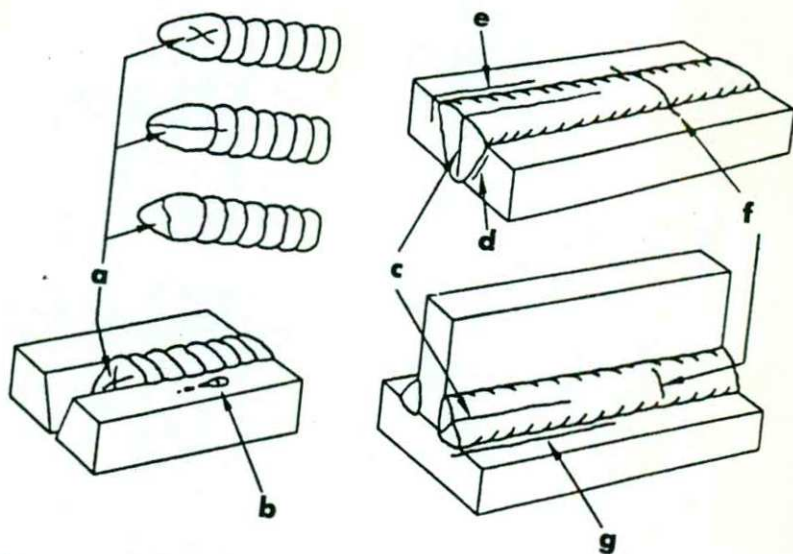
Sin embargo, algunas condiciones que pueden evitar algún tipo de fractura pueden promover otras. Una alta temperatura disminuye el grado de enfriamiento y disminuye la tendencia a la fractura en frío. Desafortunadamente esto produce un crecimiento del grano y también aumenta el tamaño del charco de soldadura, reduciendo el gradiente de temperatura en el líquido e incrementando la tendencia a la fractura en caliente. El calentamiento de temperatura intermedia desecha el hidrógeno y disminuye la tendencia de la fractura en frío, pero también puede causar fractura de recalentamiento.

Las condiciones de soldadura para prevenir la fractura deberán ser basadas en un cierto balance para evitar la fractura en frío, la fractura de temperatura intermedia y la fractura en caliente.

Cada material a soldar deberá ser considerado de manera particular, conociendo la composición exacta y la geometría de la soldadura.

A N E X O S

GRAFICAS Y DIBUJOS
 FRACTURAS EN LAS JUNTAS SOLDADAS



- a: Fractura crater
- b: Golpe del arco
- c: Fracturas longitudinales
- d: Fractura debajo del cordón
- e: Fractura de borde
- f: Fractura transversa
- g: Fractura de borde

FIG. 1. Tomado del libro Analysis of Welded Structures Residual Stresses, Distortion and their Consequences Cap. XIV.

EJEMPLOS DE FRACTURA DE ALTA TEMPERATURA
APARENTE TRANSGRANULAR

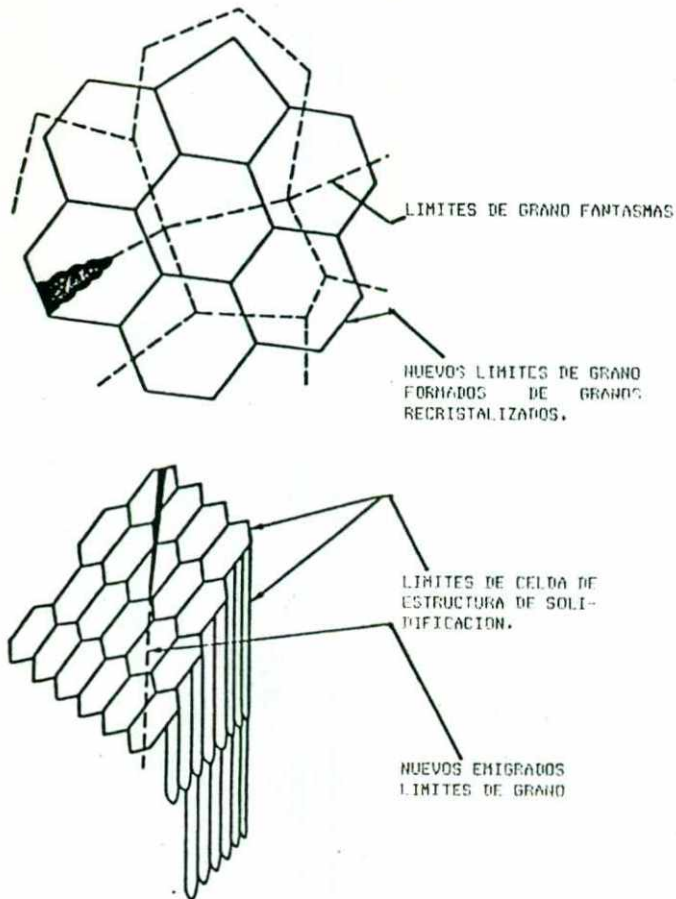
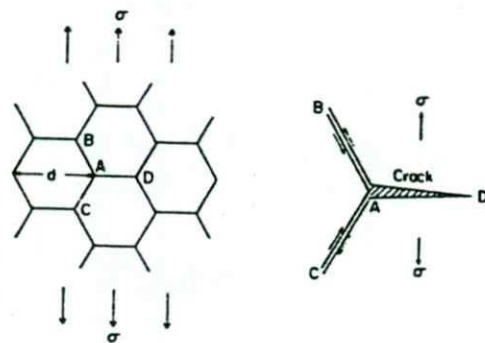


FIG. 2 Tomado de classification and definition of high temperature welding cracks in alloys.

FORMACION DE FRACTURA INTERGRANULAR EN LA ZONA AFECTADA
 POR EL CALOR ADYACENTE A LA LINEA DE FUSION.



IDEALIZACION DE
 CONDICIONES DE
 ESFUERZOS.

FRACTURA INTERGRANULAR

FIG. 3. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses, distortion and their consequences. Cap. XIV.

REPRESENTACION ESQUEMATICA DE DOS RANGOS DE TEMPERATURA EN LOS
CUALES LA BAJA DUCTILIDAD CONDUCE A FRACTURAS DURANTE LA
SOLDADURA

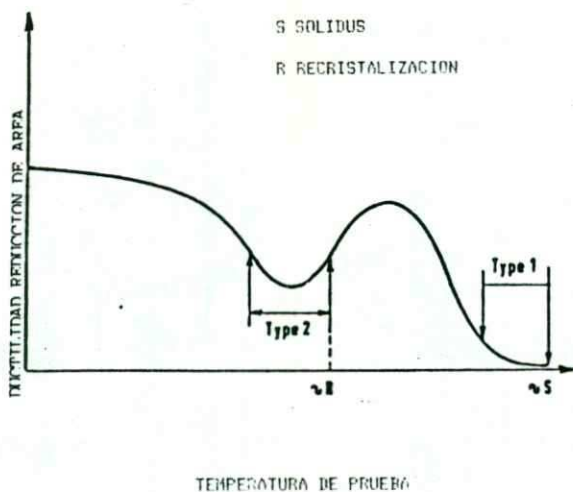


FIG. 4 Tomado de clasificacion and definition of high temperature welding cracks in alloys.

OCURRENCIA DE UNA FRACTURA EN UN CUERPO
CONTENIENDO ESFUERZOS RESIDUALES

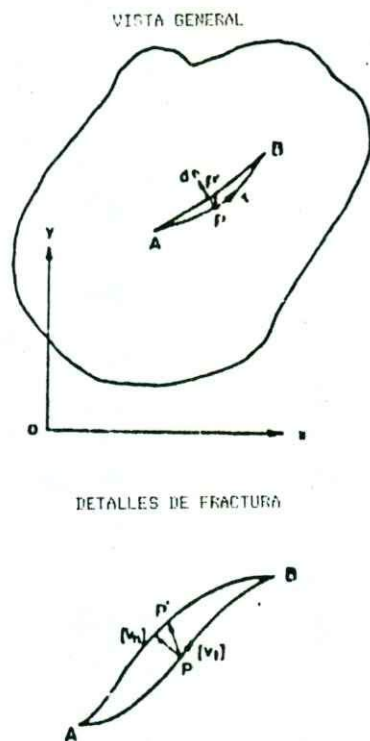


FIG. 5. Tomado del libro Analysis of welder structures residual stresses, distortion and their consequences Cap. XII.

DETERMINACION DE LA FRACTURA MAS ESTABLE

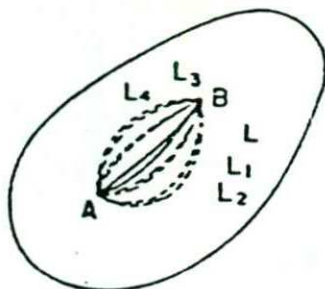


FIG. 6.

DIFERENTES CAMINOS DE FRACTURA

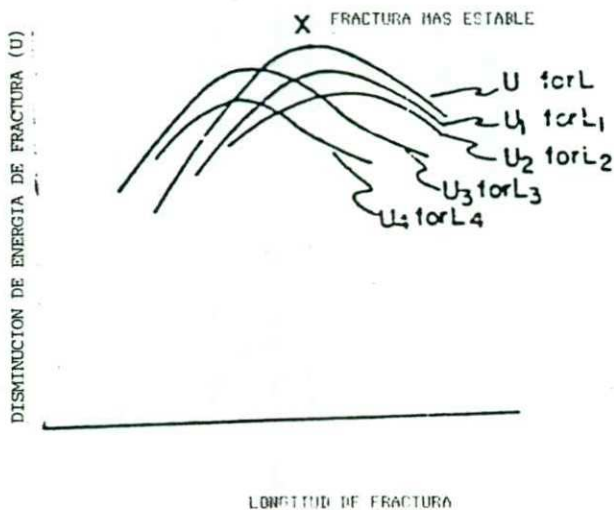
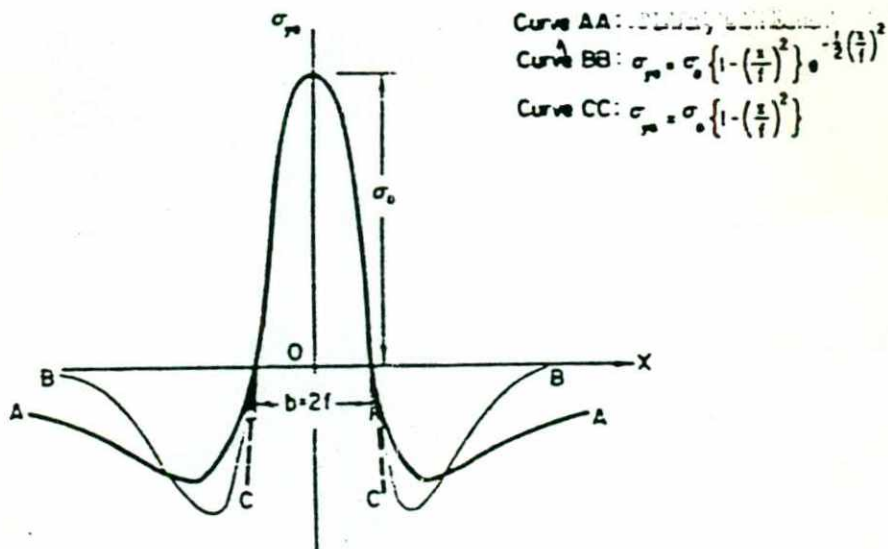


FIG. 7. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses, distortion and their consequences. Cap. XII.

ESFUERZOS RESIDUALES Y FRACTURAS TRANSVERASAS

$$\sigma = f(x)$$

$$y_0$$



DISTRIBUCION DE ESFUERZOS RESIDUALES LONGITUDINALES.

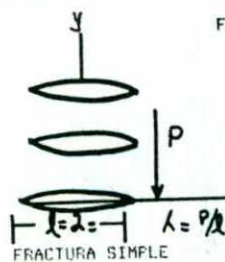


FIG. 9.

FIG. 8

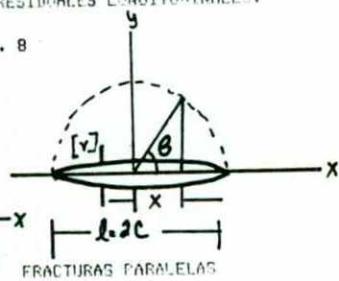


FIG. 10.

Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences Cap. XII.

RELACION ENTRE DUREZA DEBAJO DEL CORDON, FRACTURA
DEBAJO DEL CORDON Y CARBONO EQUIVALENTE

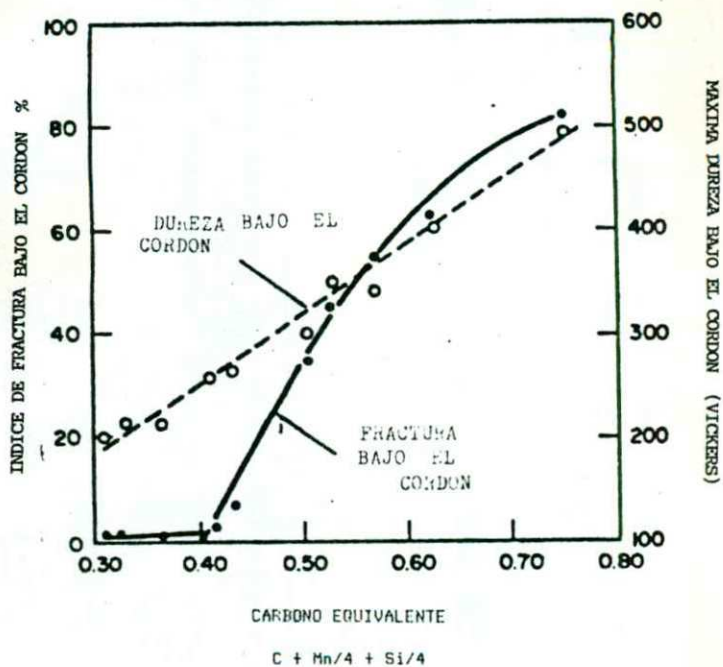
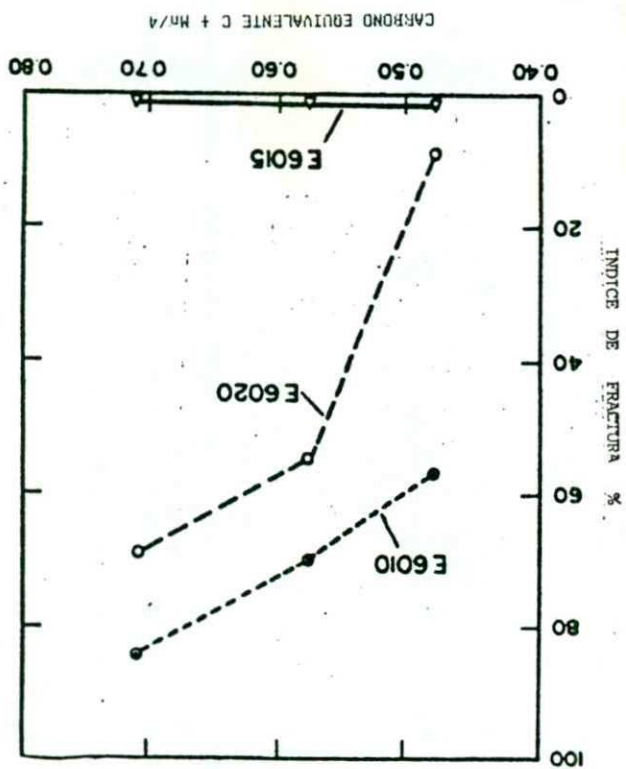


FIG. 12 Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Cap. XIV.

FIG. 13. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences.



RELACION ENTRE CARBONO EQUIVALENTE Y FRACTURA DEBAJO DEL CORDON
PARA 3 TIPOS DE ELECTRODOS

HUMEDAD RECOGIDA PARA ELECTRODOS A 75 F E-111018-6
 EXPUESTOS A UNA ATMOSFERA DE 90 % DE HUMEDAD RELATIVA

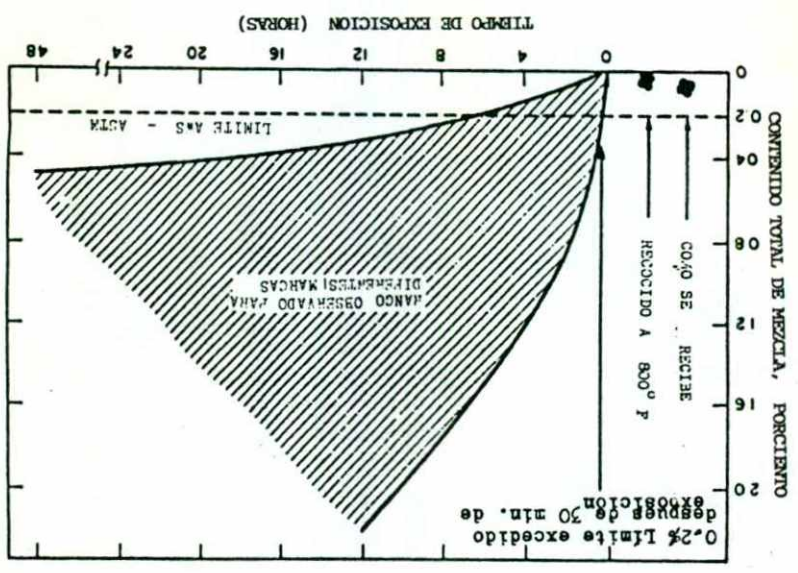
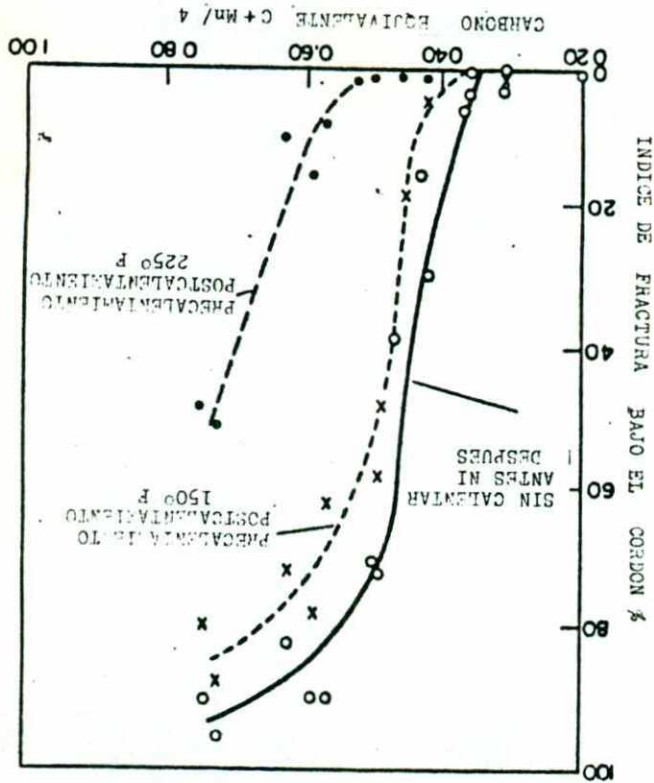


FIG. 14 Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Cap. XIV.

FIG. 15. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Cap. XIV



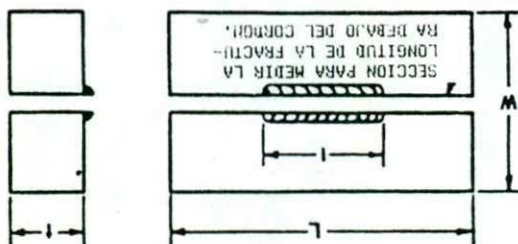
EFFECTO DE PRECALENTAMIENTO Y POSTCALENTAMIENTO EN CARBONO EQUIVALENTE CRITICO PARA PRUEBAS EN PLACA

FIG. 16. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Cap. XIV.

PERO PUEDE USARSE TEMPERATURA
 DEPOSITADA A TEMPERATURA AMBIENTE
 CORDON, EL CORDON ES GENERALMENTE
 INVESTIGACIONES EN FRACTURA BAJO EL
 PEQUEÑAS DIMENSIONES USADAS EN
 SURCADA CON PRECALENTAMIENTO.

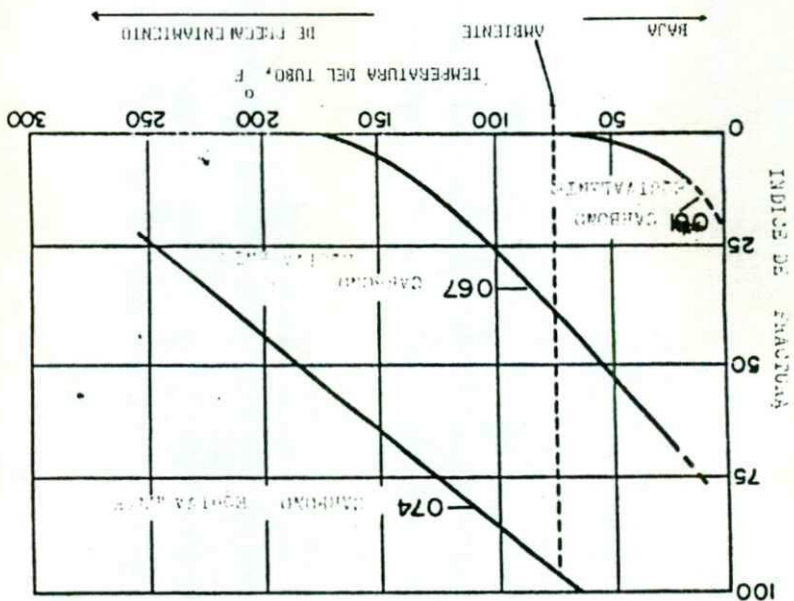
1	L	W	1
3	6	3	Plate 1
1-1/4	3	2	Plate 1

DIMENSIONES IN.



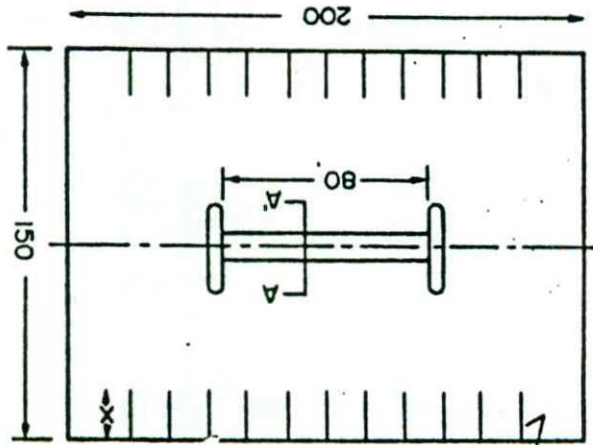
PRUEBA DE FRACTURA BAJO CORDON LONGITUDINAL

FIG. 17. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Cap. XIV.

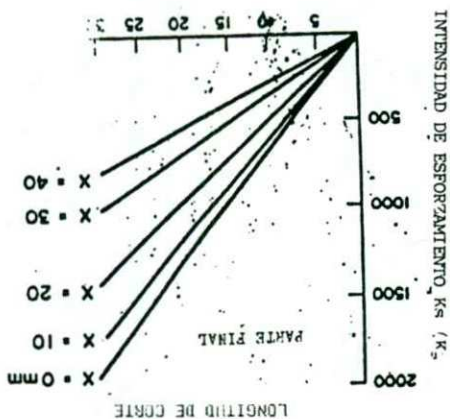
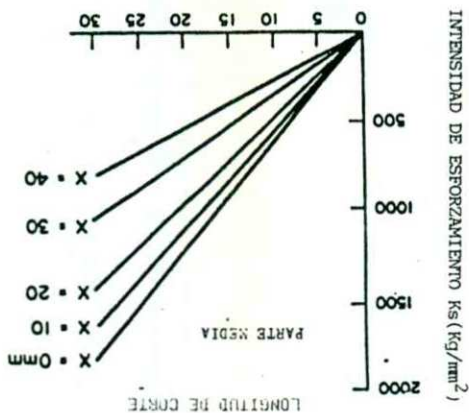


EFEECTO DE TEMPERATURA EN LA FRACTURA DE LA
JUNTA CIRCUNFERENCIAL DEL TUBO

FIG. 18. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Cap. XIV.



PRUEBA DE FRACTURA DE RANURA EN "Y"

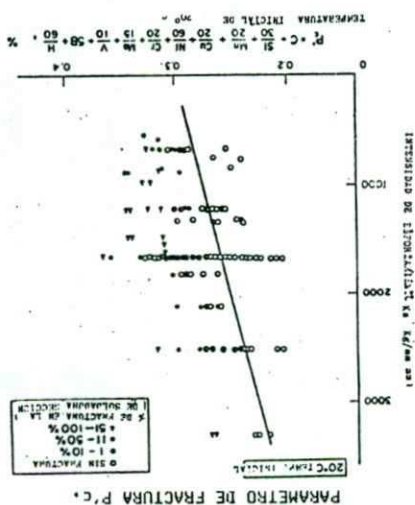
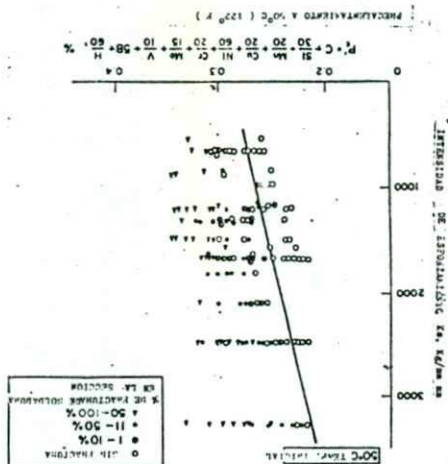


RELACION ENTRE LA INTENSIDAD DE ESFORZAMIENTO,
 ESPESO DE LA PLACA Y LA LONGITUD.

Tomado del libro Analysis of
 welded structures residual
 stresses and their con-secuen-
 ces. Cap. XIV.

FIG. 19.

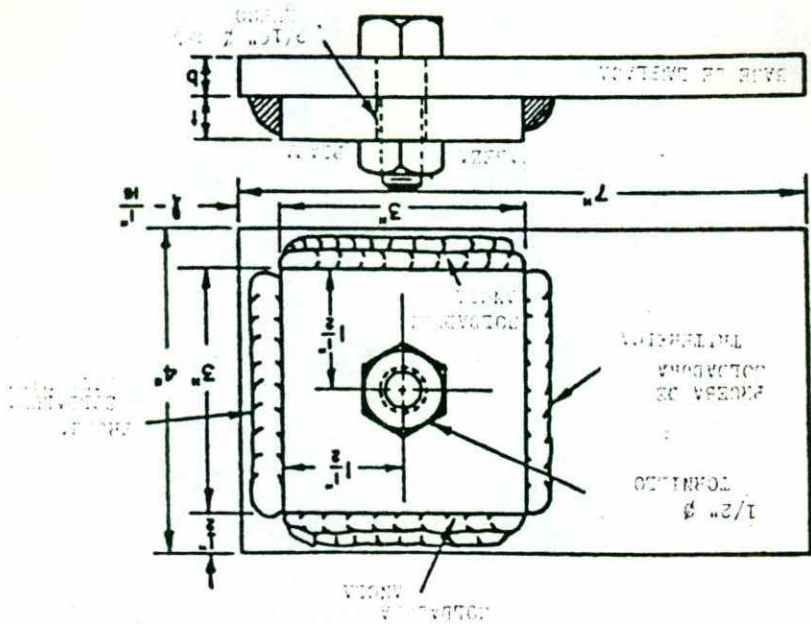
FIG. 20 Y 21. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Cap. XIV.



RELACION ENTRE LA INTENSIDAD DE ESFORZAMIENTO K_s Y

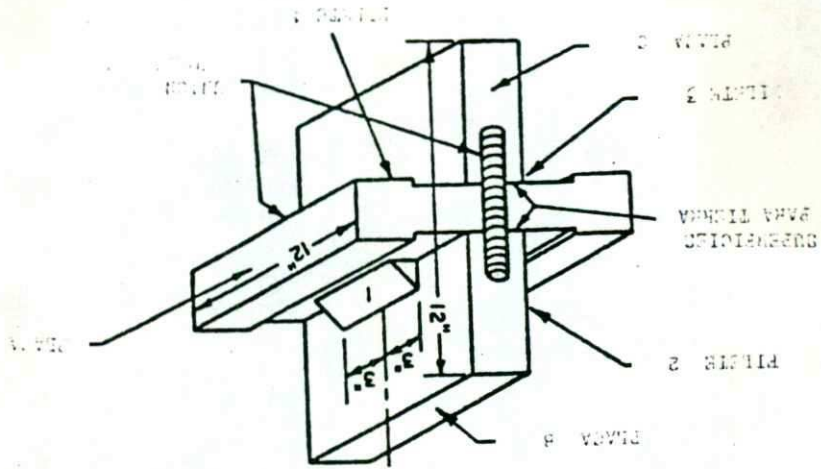
PARAMETRO DE FRACTURA P', C.

FIG. 22. Tomado del libro Weldability of steels. Cap. IX.



ESPECIMEN DE PRUEBA DE LA SEVERIDAD TERMICA CONTROLADA

FIG. 23 Tomado del libro Weldability of steels. Cap. IX.



ESPECIMEN DE PRUEBA CRUCIFORME

FIG. 24. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Cap. XIV.

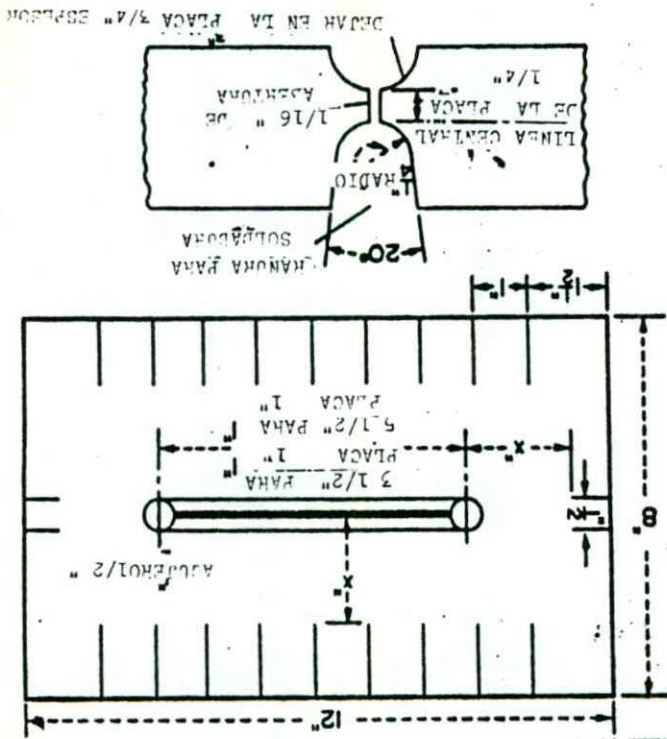


FIG. 25 Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Ca. XIV.

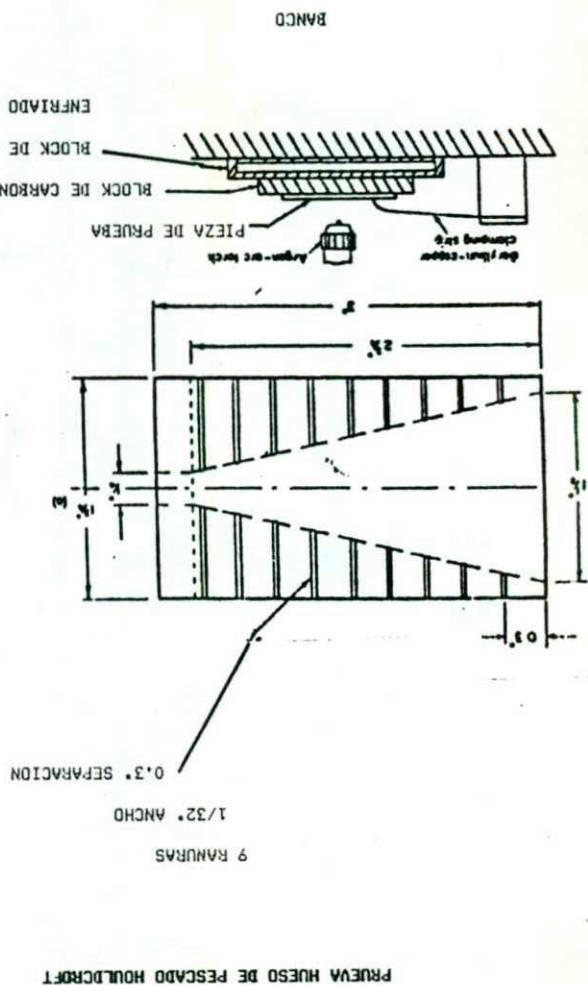
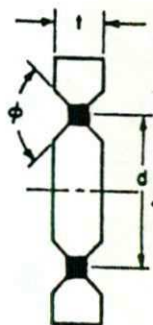
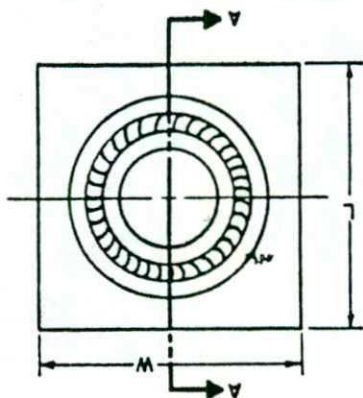


FIG. 26. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Cap. XIV.



LAS DIMENSIONES VARIAN GRANDEMENTE
PERO LAS DIMENSIONES QUE SE MUESTRAN
SON RECOMENDADAS PARA PLACAS DE 1/4"
LAS PRUEBAS SON HECHAS AL AIRE O A
TEMPERATURA AMBIENTE O CDH
TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO.

5	6	7	8	9	10
18	12	9C	Var.	2	0.076
L	W	φ	D	l	
ALFABETICAMENTE					

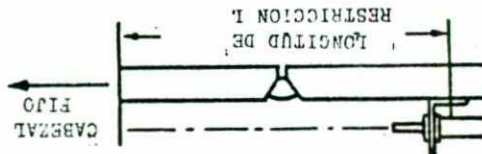


ESPECIMEN DE PRUEBA DEL PARCHO CIRCULAR

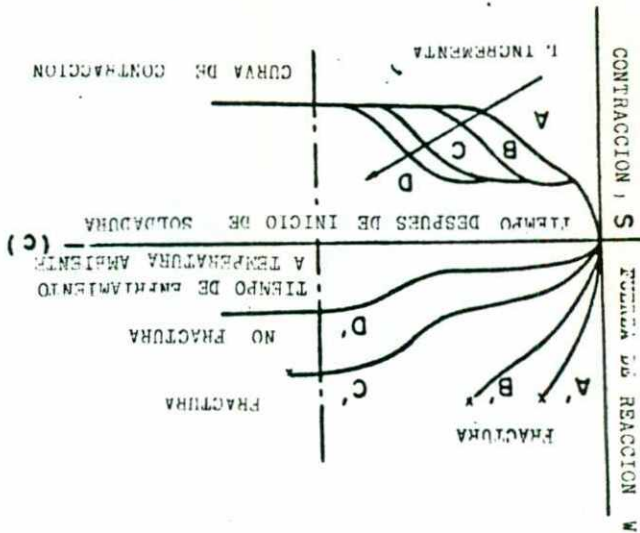
PRUEBA DE FRACTURA DE AUTOESFORZAMIENTO RIGIDO



SOLDADURA A TOPE
BAJO RESTRICION



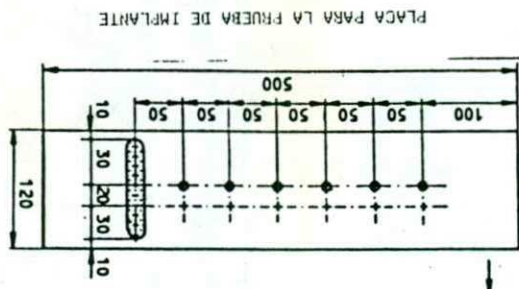
METODO DE LA PRUEBA RRC



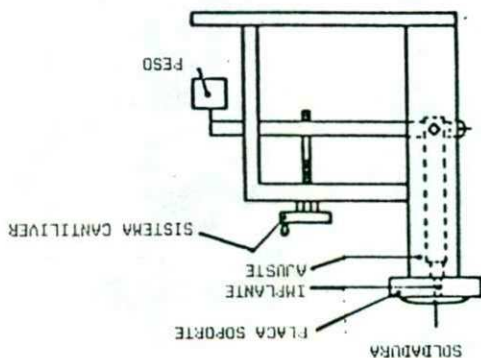
RESULTADOS TIPO DE PRUEBA

FIG. 27. Tomado del libro Analysis of welded structures residual stresses and their consequences. Cap. XIV.

FIG. 28. Tomado de la publicación Recomendation for the use of implant test as a complementary information tes an the cold cracking susceptibility during the welding of steels.

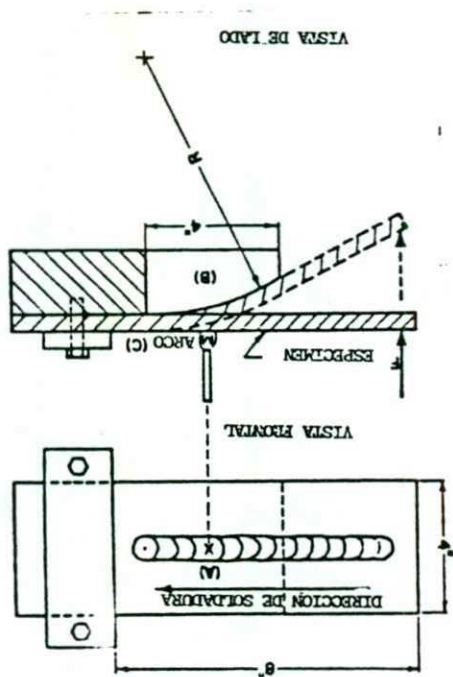


DIRECCION DE SOLDADURA



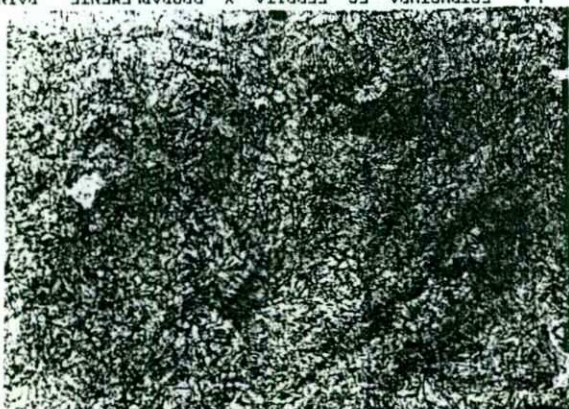
REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL APARATO
PARA REALIZAR LA PRUEBA DE IMPLANTE

FIG. 29 Y 30. Tomado del libro Weldability of steels. Cap. IX.



PRUEBA DE VARESTRAINI Y TRANSVARESTRAINI

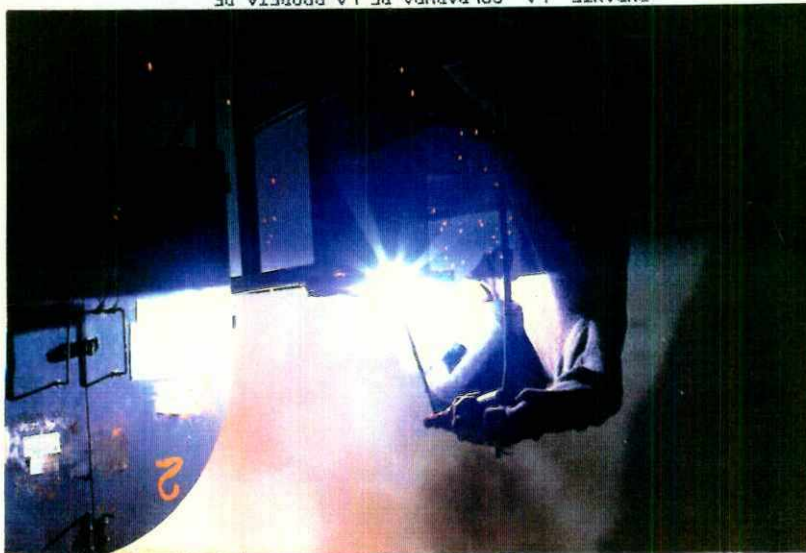
LA ESTRUCTURA ES FERRITA Y PROBABLEMENTE BAINITA SUPERIOR, (ATACADA CON NITAL 4%), AUMENTOS: 200X.



ANALISIS METALOGRAFICO DEL METAL BASE (SA 387 Gr. 5 CLASE II)

FRACTURA EN "Y".

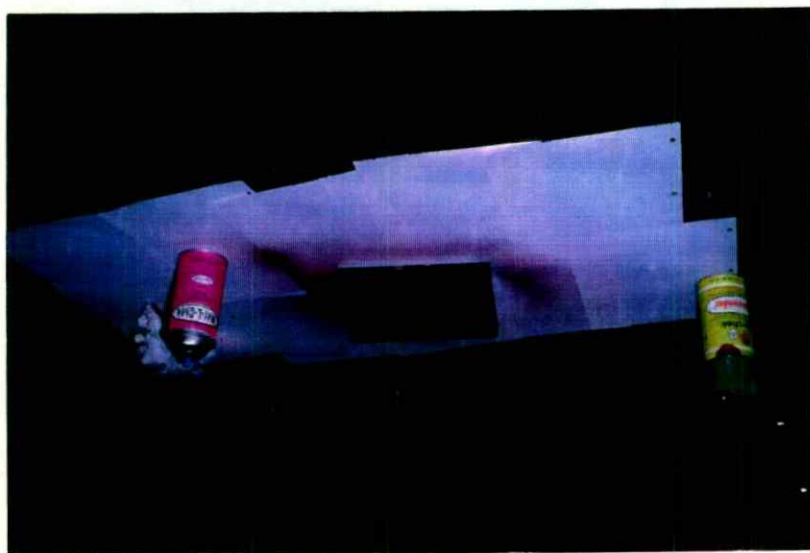
DURANTE LA SOLDADURA DE LA PROBETA DE



PROBETA PARA LA PRUEBA DE FRACURA EN "Y".

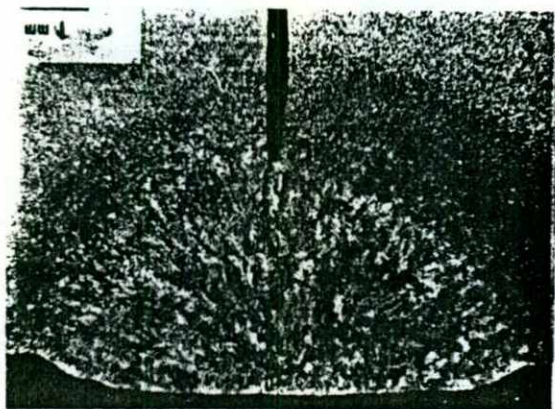


FOTOGRAFIAS

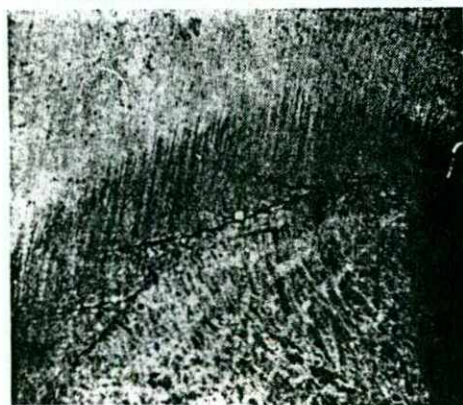


PRUEBAS CON LIQUIDOS PENETRANTES.

FRACURA DE RAIZ. (AUMENTO: 50X).

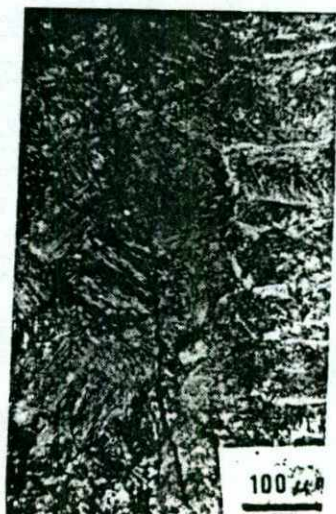
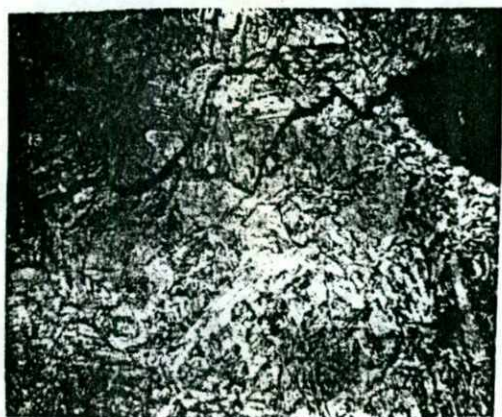


FRACURA SUPERFICIAL. (AUMENTO: 50X)



FRACURAS QUE SE PRESENTARON EN LA PRODETA.

FRACTURAS DE RAIZ. (AUMENTO: 200X)



EJEMPLOS DE FRACTURAS EN CALIENTE. (AUMENTO: 50X)

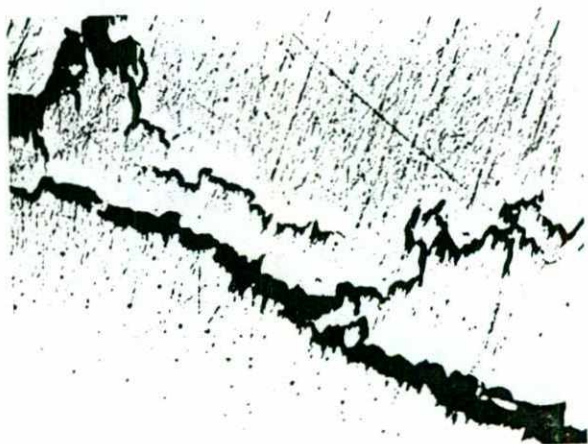
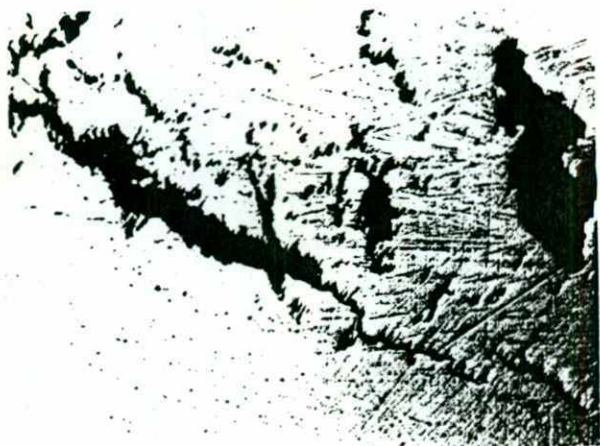


TABLA A
 FACTORES DE POTENCIA RELATIVOS DE FRACTURA
 DE UN NUMERO DE ELEMENTOS

POTENCIA RELATIVA DE FRACTURA.	% EN PESO
Si	1.75
P	121.1
Ti	13.8
As	40.2
Sn	16.8
Sb	5.04
Al	1.52
C	322.0
Cu	3.61
Mn	26.2
Co	0.30
Ni	2.93
Cb	28.8
Ta	13.0
B	917.0
S	925.0
Zr	15.2

B I B L I O G R A F I A

BIBLIOGRAFIA

- THE PROCEDURE HANDBOOK OF ARC WELDING
TWELFTH EDITION
THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY
CLEVELAND, OHIO.
- MODERN WELDING TECHNOLOGY
HOWARD B. CARY
AMERICAN WELDING SOCIETY
PRENTICE-HALL INC. ENGLEWOOD CLIFFS, NEW JERSEY
- DEFECTOS Y ROTURAS EN RECIPIENTES A PRESION Y TUBERIAS
HELMUTH THIELSCH
URMO, S.A. DE EDICIONES.
- MANUAL DEL SOLDADOR DE METALES
SOLDADURA AL ARCO VOLTAICO
GUILLERMO FERNANDEZ FLORES
EDITORIAL CECSA.
- DESIGN OF WELDED STRUCTURES
THE JAMES F. LINCOLN ARC WELDING FOUNDATION
CLEVELAND, OHIO
BY OMER W. BLODGETT
- BRAZING
PH. ROBERTS
PUBLISHED FOR THE DESING COUNCIL,
THE BRITISH STANDARS INSTITUTION AND THE COUNCIL OF
ENGINEERING INSTITUTION BY OXFORD UNIVERSITY PRESS

- METALS HANDBOOK
NINTH EDITION
VOLUMEN VI
WELDING, BRAZING AND SOLDERING
AMERICAN SOCIETY FOR METALS
- METALS HANDBOOK
NINTH EDITION
VOLUMEN XII
FRACTOGRAPHY
AMERICAN SOCIETY FOR METALS
- TECHNICAL STANDAR OF FABRICATING STEEL STRUCTURES
OCTUBER, 1975
TEXTO NUMERO 001.
PLANT AND MACHINERY DIVISION
ENGINEERING DIVISIONS GROUP NIPPON STEEL CORPORATION.

R E F E R E N C I A S

- (1), (2) Analysis of Welded Structures Residual Stresses, Distortion, and their Consequence.

Koichi Masubuchi, Massachusetts Institute of Technology U.S.A.

International Series on Materials Science and Technology Volume 37

Capitulo XIV.

Pergamon Press.

- (3), (4) Ibid.

- (5) Clasification and Definition of High temperature Welding Cracks in Alloys.

B. Hensworth, T. Bomiszewski and N. F. Eaton.

February 1969.

- (6) Ibid.

- (7) Ibid. Capitulo XII.

- (8), (9) Ibid.

- (10), (11), (12), (13) Ibid.

- (14) Weldability of Steel:

Robert A. Stout, W. D'orville Doty. Tercera Edición.

- (15) Recommendation for the use of implant test as a complementary information test on the cold cracking susceptibility during the welding of the steels.

International Institute of Welding, French Delegation.

- (16), (17) Ibid. Capitulo XIV.