

Universidad Nacional de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA GEOLOGICA, MINERA Y METALURGIA



ESTUDIO METALURGICO DE LOS ACEROS DE ALTA RESISTENCIA PARA OLEODUCTOS Y GASEODUCTOS

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO

METALURGISTA

VICTOR EDUARDO TORRES TORRES

PROMOCION 1968 "EDGARDO PONZONI"

LIMA ★ PERU ★ 1975

**A mi querida Madre
y Hermanos.**

**ESTUDIO METALURGICO DE LOS ACEROS
DE ALTA RESISTENCIA PARA OLEODUCTOS Y GASEODUCTOS**

INDICE

SUMARIO

CAPITULO I

1.- INTRODUCCION

CAPITULO II

2.- PROPIEDADES REQUERIDAS

2.1.-Fundamentos

2.2.-Análisis de la Especificación Técnica API Std. 5LX .-

2.2.1.- Procesos de manufactura y materiales empleados

2.2.2.- Análisis Físicos

2.2.3.- Propiedades Físicas

2.2.4.- Pruebas Hidrostáticas e Inspección

2.2.5.- Dimensiones

2.2.6.- Inspección No- Destructiva

2.2.7.- Soldabilidad

2.3.-Análisis de la Especificación Técnica Británica GC/PS/LXI

"Gas Council" Especificación Suplementaria de la API Std.

5LX

2.3.1.- Procesos de manufactura y materiales empleados

2.3.2.- Propiedades Químicas

2.3.3.- Propiedades Físicas

2.3.4.- Pruebas Hidrostáticas e Inspección

2.3.5.- Inspección No- Destructiva

2.3.6.- Dimensiones

2.3.7.- Soldabilidad

CAPITULO III

3.- PARAMETROS IMPORTANTES

3.1.-Análisis Químico y Fabricación del Acero

3.1.1.- Selección del Tipo de Acero

3.1.2.- Fabricación del Acero

3.2.-Microestructura del Material

3.2.1.- Microestructura Básica y el efecto de solución sólida en el aumento de la resistencia del acero

3.2.2.- Precipitación y su efecto en el aumento de la resistencia del acero.

3.2.3.- Tamaño de Grano

3.2.4.- Inclusiones y sus efectos

3.3.-Propiedades Mecánicas del Material

3.3.1.- Propiedades de Tracción

3.3.2.- Tenacidad

3.3.3.- Propiedades mecánicas de la Soldadura

CAPITULO IV

4.- PRODUCCION DE LAS TUBERIAS

4.1.-Tuberías con soldadura Longitudinal

4.1.1.- Producción de Planchas

4.1.1.1.-Laminación Controlada de planchas de Acero tipo C-Mn-Nb

4.1.1.2.-Templado y Revenido de planchas de Acero

4.1.1.3.-Planchas de Acero basado en Ferrita Acicular tipo Mn-Mo-Nb.

4.1.1.4.-Otros métodos de producción de planchas de acero

4.1.2.- Inspección y pruebas del material

4.1.3.- Fabricación y Soldadura

4.2.-Tuberías con soldadura en Espiral

4.2.1.- Producción de Tiras

4.2.2.- Inspección y Prueba del material

4.2.3.- Fabricación y soldadura

4.3.-Tuberías sin Costura

4.3.1.- Producción de Tubos

4.3.2.- Inspección y Pruebas

CAPITULO V

5.- SOLDADURAS DE TUBERIAS "IN SITU "

5.1.-Técnicas de Soldadura y Condiciones Ambientales

5.2.-Electrodos Usados

5.3.-Especificaciones para la Soldadura "IN SITU "

CAPITULO VI

6.- PRUEBAS DE INSPECCION

6.1.-Efecto de Bauschinger

6.2.-Valoración de Pruebas de Tracción

6.3.-Valoración de Pruebas Hidrostáticas

6.4.-Valoración de la Soldabilidad

6.5.-Valoración de Pruebas de Tenacidad

6.6.-Pruebas No- Destructivas

6.7.-Dimensiones y Tolerancias

CAPITULO VII

7.- CORROSION Y PROTECCION DE LAS TUBERIAS EN SERVICIO

CAPITULO VIII

8.- DISCUSION Y CONCLUSIONES

AGRADECIMIENTO

REFERENCIAS

TABLAS

FIGURAS

SUMARIO

Este trabajo concierne al análisis de las variables metalúrgicas para la producción de aceros de alta resistencia usados en oleoductos y gaseoductos.

El transporte de grandes volúmenes de combustible a altas presiones y a bien bajas temperaturas ambientales, hacen que la resistencia, tenacidad y soldabilidad del material sean consideradas propiedades críticas en estas líneas de transmisión.

Ha sido considerada la adición de una unidad de degasificación al vacío, al método convencional de producción de acero en orden de producir un acero limpio de impurezas y así alcanzar exigentes especificaciones para aceros con altas propiedades al impacto.

Los procesos desarrollados para la producción de altamente resistentes y tenaces materiales son analizados críticamente; la máxima explotación de las variables metalúrgicas, dan el acero mas económico. Los métodos de manufactura de tubería determinan el uso de planchas o tiras.

Análisis de ambos métodos de manufactura es tambien hecho.

La soldadura "INSITU " representa un paso crítico en la fabricación del oleoducto o gaseoducto.

Ensayos en las principales etapas de la producción de las tuberías es fundamental para la seguridad de estos en el servicio, ensayos a escala natural o ensayos similares a las condiciones de trabajo del oleoducto, representan el mejor método para la real valoración de las propiedades.

La importancia de los ensayos no- destructivos para la producción de juntas sólidas a través del proceso de proceso de fabricación del oleoducto, tambien ha sido analizado.

CAPITULO I

1.- INTRODUCCION

El consumo de gas natural y petróleo en el mundo, está incrementándose rápidamente y se espera que en 1975, el 25% de la energía total requerida, será cubierta por el gas natural (58). La demanda por energía continua creciendo y la exploración en busca de nuevas reservas se ha dirigido hacia severas regiones tales como el Artico, Siberia, Selvas, Altamar etc, con estremadamente bajas temperaturas, al rededor de -50° C. y difíciles en accesibilidad.

Por estas razones ha sido necesario el desarrollo de tecnologías para el transporte masivo de combustibles hacia las áreas pobladas e industrializadas.

En los últimos 10 años, el promedio anual de oleoductos y gaseoductos construidos en el mundo occidental, sobrepasó los 35,000 Kms., utilizando la fig # 1 como referencia se puede apreciar que solo 7 años atras la producción de tuberías de gran diámetro 762-mm. (30" a 48") comenzó a crecer alcanzando un pico en 1968 debido a la producción de algunos oleoductos o gaseoductos de gran diámetro y de larga distancia; luego en los dos últimos años la curva ha permanecido estacionaria pero se espera que varíe considerablemente en un futuro cercano, debido a los oleoductos y gaseoductos que serán construidos principalmente en Siberia, Alaska Mar del Norte (U.K.) etc.

Al presente, las líneas de transmisión de gran diámetro cuentan con un creciente porcentaje en los proyectos de construcción de oleoductos y gaseoductos. Este hecho es de gran importancia desde la capacidad de transporte ^{que} de una tubería es aproximadamente proporcional al diámetro elevado a la potencia 2.5 (58).

Mayores capacidades de transporte son logradas en tuberías de mayores diámetros y a mayores presiones. Fig # 2 muestra que la capacidad de transporte es casi proporcional a la máxima presión operacional de las tuberías.

De esta manera líneas de transmisión de grandes diámetros combinadas con altas presiones de trabajo incrementan la capacidad de transporte mientras que reducen el costo unitario.

Muchos proyectos de construcción de tuberías de gran diámetro han sido propuestas en diversas partes del mundo (49) " The Canadian Artic ", gaseoducto de 1220 mm. de diámetro y 4,000 kms. de longitud, se extenderá desde Alaska hasta Emerson en Manitoba (frontera USA - Canada).

En la Unión Soviética, varias líneas de 1220 mm. de diámetro es tan en construcción, los Sovieticos están dando consideraciones económicas a gaseoductos de 2,500 mm. de diámetro y 5,800 Km. - de longitud , se supone que esta línea consume aproximadamente- 6 millones de toneladas de acero.

En Inglaterra será construido un Oleoducto submarino de 180 Kms de extensión, seguido de un tramo sobre tierra de 210 kms. de - largo que traerá el petróleo desde el Mar del Norte hasta la re finería de Grangemouth. Esta línea es corta comparada con stan- dares Soviéticos pero tender una tubería submarina es mucho mas desafiante.

Nuevos campos petroleros con severas condiciones climatológicas combina do con grandes distancias, crecientes mercados y necesi- dades económicas enfatizan la necesidad de mejores materiales.

En este sentido mucho trabajo se esta haciendo para producir a- ceros de 517,620 y 690 N/mm² (75,90 y 100 Ksi) de punto de flu- encia para trabajar con presiones en el rango de 10,342 a 13790 KN/m² (1,500 a 2,000 pstg) (78).

En el capítulo # 3, se analizará críticamente los parámetros me talúrgicos para la producción de materiales con propiedades de - alta resistencia, tenacidad y soldabilidad.

Considerando estas propiedades, nuevos procesos han sido desarro- llados para la producción de aceros, teniendo al carbón y manga- neso como principales elementos para incrementar la resistencia y el Niobio y el tratamiento termo-mecánico para el logro de la tenacidad.

Cuando el material trabaja especialmente a bajas temperaturas - ambientales, fracturas de clivaje se propagan más rapido que la velocidad de decompresión de la tubería.

La decompresión del gás, no puede ser mas rapida que la veloci- dad de propagación de una rajadura, en un gaseoducto fracturado la cual es del orden de 411 m/s (1250 ft/sec). De esta forma una suficientemente baja temperatura de transición en un ensayo Charpy "V" o un Drop Weight Tear, test (DWTT) debe ser alcanza- da en orden de diseñar contra la propagación de rajaduras.

En la actualidad es sabido que un requerimiento básico para de sarrollar alta tenacidad es que la limpieza del acero debe ser- mejorada en tanto que la resistencia del acero es elevada, de- esta manera aceros para tuberías de alta resistencia requieren- bajo contenido de azufre y control de la forma de los sulfuros. Tuberías de gran diámetro pueden ser producidas usando el proce- so de soldadura longitudinal, asegurandose de la obtención de -

planchas suficientemente anchas.

En la actualidad el laminado de planchas de 3,000 mm. de ancho está limitado a muy pocos laminadores en el mundo.

Tuberías soldadas en forma de espiral, ofrece una mejor alternativa que incrementar el ancho de los laminadores de planchas. Considerando que la mayoría de fracturas ocurridas en gaseoductos y Oleoductos han empezado de la zona de soldadura, es que han sido desarrolladas técnicas diferentes para producir juntas sólidas; usando electrodos con bajo contenido de hidrógeno o cubriendo el arco eléctrico de la soldadura con CO₂, es que el problema de la rajadura es debido al hidrógeno puede ser eliminado.

Las condiciones ambientales pueden ser muy severas, en estos casos se justifican el uso de costosos materiales que protejan las tuberías contra el ataque corrosivo o el ataque mecánico.

CAPITULO II

2.- PROPIEDADES REQUERIDAS

2.1.-FUNDAMENTOS :

La tendencia de transportar grandes volúmenes de gas o petróleo a través de una tubería ha hecho que el propietario de ésta, sea mucho más cuidadoso con los estándares de seguridad, en aras de asegurar su inversión. De esta manera el productor tiene que cumplir muy exigentes especificaciones controladas por muchos parámetros diferentes, tales como la química del acero, prácticas de desoxidación, proceso de laminado en caliente, fabricación de la tubería y así como también parámetros de diseño, tales como espesor, diámetro, presión de trabajo etc. El propósito fundamental de las especificaciones técnicas es optimizar estos parámetros los que en un oleoducto o gaseoducto de alta resistencia son principalmente: resistencia, tenacidad y soldabilidad. El uso de tenaces y resistentes materiales permite el uso de altas presiones en las tuberías, mientras que el riesgo de fractura es minimizado.

El incentivo económico con el hecho de mejorar el grado de aceros para gaseoductos es mostrado en la tabla I y gráficamente en la fig # 3. El Ahorro por concepto de soldadura "IN SITU" es aproximadamente equivalente al peso de acero ahorrado.

El término "Soldabilidad", puede ser tomado como la relativa facilidad por la cual un metal puede ser soldado para producir juntas satisfactorias, con buenas propiedades mecánicas; esta es una propiedad muy importante en los Oleoductos o Gaseoductos debido a que en su manufactura esta comprometida grandes cantidades de soldadura.

Con el propósito de producir una satisfactoria tubería de alta resistencia para transporte de petróleo o gas, la especificación americana API (American Petroleum Institute) es la más usada por el fabricante; no obstante, esta especificación (API std SLX 19^{ava} edición de marzo de 1973), no incluye ningún requisito "Mandatorio" para especificar la propiedad de tenacidad. En 1969, recién fueron introducidos en los suplementos SR5 y SR6, los ensayos de impacto, Charpy y "Drop Weight Tear Test" (DWTT) respectivamente.

En 1972 "The Gas Council" de Gran Bretaña dió publicación a una especificación suplementaria denominada GC/Ps/LXL, para usarla conjuntamente con la especificación americana API std SLX y que cubre la manufactura de tuberías de alta resistencia

y gran diámetro , usadas en oleoductos y gaseoductos.

En el presente trabajo se consideran solamente las especificaciones técnicas API std 5LX y la "Gas Council" GC/PS/LXI por ser las mas comunmente usadas por el fabricante.

2.2.-ANALISIS DE LA ESPECIFICACION API std 5LX

Esta especificación proporciona estandares para tuberías con mayor resistencia a la tensión y rajadura que para tuberías fabricadas bajo la especificación API std 5L .

No obstante la API std 5LX, esta expresada principalmente en términos de la capacidad del fabricante para producir materiales en la forma convencional y en una planta convencional (2)

En esta especificación están considerados solamente los estandares mínimos para el material y no incluye en forma mandatoria, la propiedad de tenacidad, la cual se considera que es muy importante especialmente para materiales con alta especificación con punto de fluencia, alrededor de 483-692 N/mm² (70,000 100,000 psi).

Los siguientes puntos han sido analizados : (3)

2.2.1.- Proceso de Manufactura y Materiales :

El acero puede fabricarse en Horno de Hogar Abierto; - Horno eléctrico, Horno básico de oxígeno.(LD); el grado de desoxidación del acero no es especificado. Soldadura de arco sumergido es considerado el método mas apropiado para soldadura longitudinal en oleoductos o gaseoductos de gran diámetro y alta resistencia.

Soldadura empleando resistencia eléctrica (ERW). Tambien es recomendado para costuras (soldaduras) longitudinales en tuberías de menos de 508 mm. de diámetro exterior tuberías de este diámetro tambien pueden ser hechas sin costura.(sin soldadura)

2.2.2.- Análisis Químico:

La Tabla II, muestra el análisis químico que debe tener el acero, en la cuchara .

Según esta tabla se puede apreciar que el C y Mn, son los principales elementos usados para alcanzar las propiedades requeridas y que las adiciones están limitadas por la propiedad de soldabilidad, de acuerdo a la formula de carbono equivalente :

$$C.E. = \% C + \frac{\% Mn}{6} \text{ ---- FI}$$

La especificación técnica API std 5LX, permite también el uso de aceros de baja aleación y de alta resistencia (HS-LA), con características similares de soldabilidad a los aceros C-Mn mostrados en la tabla II. Considerando que solamente mínimos valores son especificados para Nb, V y Ti el fabricante puede producir mejores materiales aumentando las cantidades de estos elementos y usando técnicas de laminación modernas; pero el porcentaje de Mn, es limitado a un máximo de 1.45% para aceros del grado X-65 (65,000 Lb/pulg² de punto de fluencia). Debe resaltarse que materiales de alta resistencia, tenaces y de buenas propiedades de soldabilidad pueden ser producidos con más altas cantidades de Mn y con más bajos contenidos de carbón, usando la técnica del laminado controlado (4). El análisis final del acero para oleoductos o gaseoductos, permite las siguientes variaciones :

- Carbón %
 - Tubería sin costura = 0.03 a + 0.04 (no expandida y expandida al frío respectivamente)
 - Tubería soldada + 0.04
- Mn % + 0.10
- P % + 0.10
- S % + 0.10
- Nb % - 0.000
- Vanadio % - 0.01
- Titanio % 0.01

2.2.3.-Propiedades Físicas :

Punto de fluencia, resistencia a la tracción y elongación son los requerimientos de pruebas de tensión en la especificación API std 5LX, para todos los grados de resistencia mostrados en la tabla III.

La máxima permitida relación , punto de fluencia/Resistencia a la tracción es 0.90 para aceros del grado X-65 o más altos y con espesores sobre los 9.52 mm.

Debe ser notado que algunos materiales para oleoductos o gaseoductos son producidos con relaciones Punto de Fluencia/ Resistencia a la tracción de más de 0.90 (5).

La resistencia a la tensión requerida para producir una elongación total de 0.5 % (deformación total), es el ---

principal parámetro para condiciones operacionales .

El punto de fluencia es determinado con un espécimen de todo el espesor del material y transversal a la dirección de la tubería, porque se considera ^{que} en esa dirección esta la máxima presión de trabajo de la tubería. La desventaja es que el espécimen que viene a ser una sección de la tubería, tiene que ser "aplanada" para que sea un espécimen apropiado, creando de esta manera deformaciones de tensión y compresión produciendo cambios en el punto de fluencia del material.

El efecto de Bauschinger, que será discutido en el Capítulo No 6 , es un parámetro que tiene que ser considerado si se usa este tipo de prueba. La prueba de tensión del anillo (The Ring Tension Test), el cual usa una sección completa (anillo), de la tubería para probarla en la dirección transversal, es una prueba más realista para el cálculo del punto de fluencia de la tubería y esta prueba es aceptada por la especificación técnica API-std 5LX, como una alternativa. La prueba de tensión del anillo será discutido con mayor detalle en el Capítulo No 6.

La tenacidad es considerada en términos de la prueba de impacto "Charpy " y del " Drop Weight Tear Test " solamente cuando el comprador lo especifica; ambos requerimientos son opcionales y son aplicables a tuberías soldadas de 508 mm. de diámetro exterior o mayores y en grados de X-52 o más altos. La temperatura de prueba para ambos especímenes deben ser hechos a 0°C ó 10°C; todas las pruebas Charpy no deben mostrar menos de 50% de fractura fibrosa o dúctil y en las pruebas DWTT por lo menos el 80 % deben mostrar una fractura de apariencia fibrosa del 40% del área total.

2.2.4.-Pruebas Hidrostáticas

Cada trozo de tubería deberá soportar, sin "gotear" la presión hidrostática del 90% del punto de fluencia mínimo, durante un lapso de 10 segundos. Esta prueba, hidrostática no tiene necesariamente una relación directa a las presiones de trabajo usados por lo tanto no deberá considerarse como un dato básico para el diseño.

2.2.5.-Dimensiones, Pesos y Longitudes :

Los pesos son calculados en función del diámetro exterior de la tubería y del espesor.

La especificación API std 5LX, proporciona tablas relacionando dimensiones y pesos con pruebas de presiones estándar.

El dimensionamiento del diámetro exterior de la tubería debe ser hecho con una cinta circular.

Debe ser notado que este método no ofrece una seguridad para el control de la ovalidad siendo este un factor importante especialmente cuando la tubería trabaja bajo presiones fluctuantes (2).

Las tolerancias respecto al diámetro exterior del cuerpo de tubería son :

+ 0.75% y - 0.25% del diámetro nominal y para los bordes de la tubería son : + 2.4 mm. y - 0.8 mm.

El espesor de las paredes para tuberías soldadas de tamaños de 20" (508 mm) de diámetro exterior debe estar dentro de las siguientes tolerancias : + 19.5% y -0.8 %

2.2.6.-Inspección No - Destructiva :

La especificación API std 5 LX recomienda tres tipos de pruebas no- destructivas : electromagnética, rayos X y ultrasónica; también aclara que tuberías soldadas con arco sumergido o protegido deben ser inspeccionadas ultrasonicamente o con rayos X. La costura debe ser ultrasonicamente inspeccionada en toda su longitud. Se ha encontrado que la mayoría de rajaduras durante las pruebas hidráulicas han sido originadas de los defectos en la región de la costura (6). Defectos en la región de la costura pueden provenir ya sea de fallas en los filos de la plancha de acero o fallas resultantes de una mala práctica de soldadura; en el primer caso los defectos no están orientados en forma radial y pueden no ser detectados fácilmente con rayos X, lo cual da ventaja al método ultrasónico.

La inspección ultrasónica de los filos de la plancha de acero no es considerada en la especificación americana - API std 5LX.

2.2.7.-Soldabilidad :

Esta propiedad no ha sido considerada en la especificación

API std 5LX y no hay ningún requerimiento específico relativo a la soldabilidad excepto la limitación respecto a la composición química, la cual es solamente un factor que puede tener efectos importantes en la soldabilidad. Ha sido anotado (7) que el rol del hidrógeno, es relacionado en forma directa con las rajaduras de la soldadura y énfasis especial ha sido dado al rol del hidrógeno en las rajaduras. No obstante, la especificación API std 5 LX hace referencia, en sus apéndice A y B a especificaciones para las juntas soldadas y para procedimientos -- de reparación con soldadura.

2.3.-ANÁLISIS DE LA ESPECIFICACION BRITANICA GC/PS/ LXI ,SUPLEMENTARIA DE LA ESPECIFICACION AMERICANA API std 5LX

Esta especificación fue desarrollada con el propósito de tener estándares para controlar las propiedades del oleoducto o gaseoducto de gran diámetro y de alta resistencia ,especialmente para condiciones Británicas; la especificación GC/PS/LXI, parte de la especificación API std 5LX en la mayor parte de postulados, pero hace adiciones en los requerimientos principales para materiales de alta resistencia. Seguidamente se hace un análisis de los siguientes postulados

2.3.1.- Materiales y procesos de manufactura :

La producción de acero es considerada por los mismos métodos especificados en la API std 5LX, pero es considerado el grado de desoxidación; solamente aceros completamente calmados deben ser usados. Los oleoductos o gaseoductos deben ser hechos de planchas de acero y para la costura longitudinal del oleoducto deberá usarse el proceso de soldadura de arco sumergido.

2.3.2.- Propiedades Químicas :

El análisis debe ser como el especificado en el API std 5LX (tabla II) con las siguientes excepciones : - Carbón no debe exceder 0.22 %, Aluminio no debe exceder 0.05 %; Nitrogeno, no debe exceder 0.008 %; y el total de elementos residuales no deben sumar más del 0.8%.

2.3.3.- Propiedades Físicas :

La prueba de tensión debe ser hecha en especímenes transversales; pruebas con especímenes longitudinales no son aceptadas . La prueba de tensión circular usan

do un aro (The ring Tensión Test) .debe ser usado para mediciones de resistencia.

La especificación GC/PS/LXI requiere evidencia que muestre que la tenacidad (fractura toughness) del oleoducto o gaseoducto sea adecuada para las condiciones; la fractura "frágil" es evaluada con el "Drop Weight tear-test " (DWTT) . Investigaciones llevadas a cabo por el Instituto Battelle (6), mostraron una clara correlación entre la velocidad con la que las fracturas se movían en largas tuberías sometidas a presión y el modo de fractura juzgadas por la apariencia de las superficies fracturadas; para condiciones Británicas la especificación GC/PS/LXI, demanda 75 % de fractura dúctil a 0°C de temperatura de prueba.

La fractura dúctil es evaluada por la prueba Charpy usando el criterio de la máxima energía (upper shelf energy). Los especímenes, son tomados transversalmente al eje de la tubería y probados a 0°C. de temperatura. Los resultados pueden ser valorados en términos ya sea de la cantidad de energía absorbida en fracturar el espécimen o en la apariencia de la fractura. Standares de aceptación deben ser tratados con el comprador.

2.3.4.- Prueba Hidrostática :

Clausulas son incluidas para aumentar la posibilidad de detectar rajaduras durante las pruebas.

Cada longitud de tubería debe soportar sin fallar (go-tear), la presión hidrostática del 95% del punto de fluencia mínimo especificado, durante el lapso de 15 seg. Este procedimiento facilita la detección visual de fallas durante la prueba.

2.3.5.- Inspección No - Destructiva

La especificación GC/PS/LXI es mas comprensible que la especificación API std 5LX y demanda la inspección ultrasónica de los filos de las planchas de acero antes de formar la tubería. Inspección ultrasónica es obligatoria para la costura de la tubería. La especificación GC/PS/LXI dice que cuando se use la inspección ultrasónica automática; el material puede ser aceptado solo si el tamaño del defecto es menor que el mostrado en la especificación (8)

2.3. .- Soldabilidad :

La especificación GC/PS/LXI, considera la influencia, el hidrógeno en las rajaduras, así como la composición química como parámetro en la determinación de la soldabilidad. La especificación suplementaria recomienda pruebas destructivas y no- destructivas para asegurar libertad de rajaduras debido al hidrógeno.

2.3.7.- Dimensiones:

La expansión al frío de la tubería, por el método de presión hidrostática determina el diámetro final, por consiguiente el control de la ovalidad de la tubería. El uso del Calibrador Circular, es requerido para chequear la ovalidad de la tubería. Para tuberías de hasta 910 mm. (36") de diámetro exterior y espesores mayores de 9.5 mm (0.375"), el diámetro interno del Calibrador no debe exceder al diámetro exterior nominal en mas de 6.4mm (0.25").

CAPITULO III

3.- PARAMETROS IMPORTANTES

3.1.-ANALISIS QUIMICO Y FABRICACION DE ACERO

3.1.1.- Elección de la aleación del acero .-

El acero, representa el más alto costo en la construcción de un oleoducto , por ende la elección de la composición del acero, es de primordial importancia para la economía del proyecto. Esto comprende la elección de la composición en donde el costo de los aleantes es más que contrabalanceado por el ahorro total del acero requerido. Debe notarse que la relación entre la composición química y propiedades es fuertemente dependiente del tipo de producción a ser usado para las planchas o tiras (bobinas).

Basándonos en el análisis químico dado en la tabla II , el carbón y manganeso, son los elementos que dan la mas alta resistencia al acero al "menor precio".

En el diagrama hierro - carburo de hierro, bajo condiciones de equilibrio, la combinación de ferrita y cementita forman la perlita cuya resistencia aumenta con el incremento del porcentaje de carbón, pero la ductibilidad (expresada por la elongación y la reducción de área) y la resistencia al impacto disminuyen (9), estas relaciones son mostradas cuantitativamente en la fig # 4.

Por consiguiente , los aceros de bajo carbón serán necesarios para alcanzar alta tenacidad mientras que la resistencia puede ser conseguida por otros medios tales como la adición de aleantes o tratamientos termo-mecánicos. etc.

El Manganeso tiene un importante efecto en la aleación-fierro- cementita, éste es capaz de formar el carburo - Mn 3C. Irvine y Pickering (10), han mostrado ya la influencia del manganeso en la resistencia del acero debido al efecto de solución sólida.

Aceros con alto contenido de manganeso, tienden a tener estructuras bainíticas debido al efecto del manganeso en la templabilidad y en disminuir la temperatura de transformación de la fase. $\gamma \rightarrow \alpha$ por lo tanto la ducti-

lidad del acero es apreciablemente "dañada". El alto contenido de manganeso en los aceros, también afectan adversamente la soldabilidad de acuerdo a la fórmula FI (Capítulo I).

Azufre y fósforo, son mantenidos a menos de 0.05 %.

El azufre se combina con hierro para formar FeS , lo que da fragilidad al acero a elevadas temperaturas (9). En presencia de manganeso forma MnS , ya que el manganeso tiene fuerte afinidad por el azufre. De esta manera los malos efectos del FeS pueden ser reducidos por la formación del insoluble MnS , el cual pasa a la escoria o es encontrado como inclusiones en la estructura del acero. Hay tres tipos de inclusiones de MnS (tipo I, II y III) y todos son dependientes del grado de desoxidación que se le da al acero. Esto será discutido en la parte denominada "Inclusiones y sus efectos".

Fósforo en pequeñas cantidades como del 0.05 % se disuelve en la ferrita aumentando la resistencia.

En mayores cantidades, digamos 0.10 %, aumenta aun más la resistencia pero disminuye la ductilidad y las propiedades dinámicas.

El Niobio añadido a los aceros C- Mn, juega dos roles distintos: puede causar endurecimiento por precipitación o refinamiento del grano.

Niobio de esta manera incrementa el punto de fluencia pero la efectividad de estos dos mecanismos, es influenciada por las variables del proceso térmico.

La Fig No 5, muestra que el punto de fluencia aumenta -- con el contenido del Niobio, pero el límite de este efecto alcanza con un niobio de 0.04 % (42) como será discutido en el Capítulo No 4

Vanadio y Titanio, tienen efectos similares al Niobio. Ha sido establecido (11) que el nitruro de vanadio (y como también el carbonitruro) es un precipitado que aumenta notablemente la resistencia pero en un menor grado que el niobio. En cantidades de hasta 0.12%, este elemento aumenta la resistencia del acero sin dañar la soldabilidad o afectar mucho la tenacidad de los aceros de baja aleación y alta resistencia (12). Para alcanzar una re-

sistencia equivalente, la relación de vanadio a niobio es de 4 a 1 aproximadamente, de aquí las limitaciones del vanadio. Este elemento es usado en U.S.A. , Japón , Alemania é Italia que en Gran Bretaña.

Titanio también tiene efectos beneficiosos en la resistencia y tenacidad de los aceros soldables, y también tienen un fuerte efecto desoxidante.

De esta manera su uso es solamente recomendable a aceros altamente desoxidados. Debido a que la especificación API std 5LX , da libertad en la composición de las aleaciones para grados de alta resistencia como en el caso del grado X- 70, los elementos más comunmente usados son : Molibdeno, Nickel, Cromo y Cobre cuyos efectos en la producción de acero para oleoductos serán discutidos en el Capítulo No 4.

Cuidado debe ser tomado en la elección de elementos aleantes ya que la composición de la aleación tiene una influencia importante sobre la soldabilidad. La fórmula del carbono equivalente es la base de la valoración de este factor. La formula de carbono equivalente mas comunmente usada es la producida por la IX, Comisión del Instituto Internacional de la Soldadura (I.I.W) y que posteriormente fuera adoptada por The Lloyd's Register of Shipping (1959).

$$C.E. = \%C + \left[\frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right] \text{ en } \% \text{ (F2)}$$

Esta fórmula es válida para valores de silicio no mayores de 0.35% y Niobio menores de 0.1%.

Para obtener buena soldabilidad el contenido de carbón equivalente de ser menor de 0.40 %.

3.1.2.-Fabricación del Acero :

Cuando el acero ha sido ya refinado a la especificación requerida, el contenido de oxígeno disuelto es usualmente de 0.05 a 0.10 %. Esta es una cantidad apreciable la cual interfiere con el subsecuente tratamiento del acero, debido a la producción de blow holes, cuando este oxígeno se combina con el carbón en solución y forman CO o también por la producción de inclusiones en la forma de óxido de hierro y óxido de manganeso; lo cual puede dañar la facili

dad para trabajar el acero en frío o en caliente y sus propiedades mecánicas. Por consiguiente al momento del sangrado el contenido de oxígeno debe ser reducido a un bajo nivel para producir aceros semi-calmados o calmados, los que son usados en oleoductos. El oxígeno es mas estrictamente controlado en aceros calmados que en semi-calmados, como tambien es la forma de las inclusiones, por consiguiente el acero calmado es preferido pero el acero semi - calmado, da un mejor rendimiento o "Yiel" y esto ofrece ventajas económicas.

Las propiedades mecánicas , particularmente la tenacidad de la tubería y la ductilidad y tenacidad de la soldadura son fuertemente dependientes del volúmen fraccional , del tipo y de la forma de las inclusiones no metálicas presentes en el acero (13). Un cuidadoso control del oxígeno en el acero es muy importante para reducir los desastrosos efectos de las inclusiones no-metálicas.

El carbón disuelto en el hierro, juega un rol importante en mantener al oxígeno a un razonable nivel durante el período de refinado; a una atmosfera de presión, el porcentaje de oxígeno en equilibrio con 0.1% C. es aproximadamente 0.02%, de acuerdo a la fig 6. Bajo las condiciones en las que se fabrica el acero, el carbón no desoxida al acero a un nivel apropiadamente bajo, - por lo que otros elementos desoxidantes son necesarios añadir, tales como el aluminio, titanico, silicio etc. Para alcanzar un nivel bajo de oxígeno (20 ppm), así - como un reducido contenido de azufre se usa el tratamiento del acero al vacío (degasificación al vacío), ya sea por el método RH o DH.

Las grandes cantidades de acero y las ajustadas especificaciones que son necesarias para la producción de oleoductos de alta resistencia y gran diámetro , hacen que el método RH, sea mas ventajoso que el método SKF/ASEA, principalmente por que hay menos limitación en cuanto al volúmen de acero tratado; por el método RH , pueden degasificarse cucharas con acero, de 100 a 200 Ton (14)

3.2.-MICROESTRUCTURA DEL MATERIAL

3.2.1.- Microestructura básica y efecto de solución sólida en el aumento de la resistencia del acero.-

En las primeras etapas de producción de aceros estructurales de alta resistencia, las microestructuras ferríticas-perlíticas, se conseguían con contenidos relativamente altos de carbón (del orden del 0.3%). Aquellos aceros fueron especificados para alcanzar una resistencia a la tracción del orden de 617 N/mm², (40 Ton/mm²) y un punto de fluencia de 355 N/mm² (23 Ton/mm²).

más recientemente han sido desarrollados, aceros templados y revenidos con una microestructura formada por "Martensita Revenida", la cual proporciona una resistencia a la tracción del orden de 1379 N/mm² (200,000 p.s.i.); esta microestructura consiste de carburos esferoidizados o parcialmente esferoidizados, en una matriz de ferrita. Como puede suponerse, también se conseguía alta ductilidad; no obstante que los aceros de alta resistencia templados y revenidos han sido ampliamente usados, los factores que controlan la tenacidad no han sido muy bien esclarecidos (15).

Trabajos recientes (10), han evaluado la contribución a la resistencia de la microestructura ferrítica-perlítica, de los siguientes variables.

- a) Cantidad de perlita
- b) El tamaño de grano de la ferrita
- c) El endurecimiento de la ferrita, debido a la solución sólida.

Cuando el contenido de carbón es incrementado, la proporción de perlita aumenta siendo esta la forma más "barata" de aumentar la resistencia a la tracción, con una pequeña contribución, debido a la disminución del tamaño de grano como se muestra en la fig (7).

Por otro lado la soldabilidad requiere porcentajes bajos de carbón; de esto se desprende naturalmente que el contenido final de carbón y el carbono equivalente son factores que están muy comprometidos en la propiedad de soldabilidad y en la propiedad de resistencia a la tracción. Esta situación puede ser mejorada aprovechando de la ventaja que se obtiene, cuando el porcentaje de manganeso -

está entre 1 y 1.5%. En este caso el manganeso contribuye en el aumento de la resistencia de la ferrita, debido al fenómeno de solución sólida y también reduce el tamaño de grano de la ferrita, mientras se incrementa el porcentaje de perlita (fig No8). Ha sido reportado (10) que el silicio es muy efectivo para aumentar la resistencia de la ferrita, mediante solución sólida, pero también aumenta considerablemente la temperatura de transformación, produciendo una ferrita de grano grueso. Los elementos intersticiales como el carbón y el nitrógeno son los más efectivos en aumentar la resistencia de la ferrita, pero estos elementos son reducidos a un nivel muy bajo de solubilidad, debido a que forman precipitados con el aluminio, niobio, vanadio, titanio; la fig 9 muestra los efectos de los elementos que aumentan la resistencia por solución sólida y también los efectos en las propiedades de impacto.

Ha sido sugerido (10) que si una resistencia mayor es requerida, una estructura bainítica debe ser usada. H. Martensson (16), afirma que ese incremento adicional en resistencia, buenas propiedades de impacto y soldabilidad pueden ser obtenidas en un acero de baja aleación y alta resistencia siempre que la transformación de la austenita, sea bainítica. En ese caso el resultado será un aumento en la resistencia, debido a su fenómeno subestructural con una alta densidad de dislocaciones formadas durante la deformación en forma cortante. Añadiendo manganeso en el orden de 3 a 6 %, a un acero de bajo carbón se obtiene una transformación bainítica y muy difícilmente ferrita pro-entectoide, pero el contenido de carbón debe ser mantenido bajo 0.04% y niobio debe ser añadido para reducir aun más la cantidad de carbón soluble.

La estructura discutida líneas arriba, es también llamada "Ferrita Acicular" y es con este nombre que la "Climax Molybdenum Company", ha desarrollado una estructura similar usando Mn - Mo - Nb (17). La adición combinada de estos elementos causan la formación de una microestructura ferrita-acicular, durante el enfriamiento, después del laminado en caliente; esta estructura proporciona alta resistencia y buena tenacidad; medidas del tamaño de

grano de esta estructura, usando el microscopio de transmisión indican un tamaño de grano ASTM de 13 o menor.

3.2.2.- Aumento de la Resistencia por Precipitación :

La exacta naturaleza cristalográfica del "Nuclei" en aleaciones endurecidas por precipitación, aun no ha sido determinado (18). Aparentemente hay varios mecanismos que endurecen la matriz.

Se cree, de acuerdo al mecanismo de Orowan relativo al movimiento de dislocaciones en un cristal conteniendo partículas precipitadas que un factor importante en la interacción entre las dislocaciones y las partículas precipitadas, es la presencia de "campos de esfuerzos", que rodean a las partículas precipitadas las que aumentan la resistencia de la matriz al movimiento de la dislocación mas próxima.

En las microestructuras ferrita-perlita, los precipitados son los factores mas importantes en aumentar la resistencia, los elementos tales como el niobio, vanadio o titanio, son añadidos para formar precipitados de carburos, nitruros o carbónitruros. Honeycombe (19) ha revisado las características de estos precipitados mostrados en la tabla IV; sus respectivas solubilidades en austenita en función de la temperatura son mostradas en la fig (10). Debido a que el máximo endurecimiento es asociado con un tamaño de partículas óptimo (pequeño) y un correspondiente gran número de partículas precipitadas, algunos elementos han sido eliminados debido a que forman un precipitado grueso. El efecto de endurecimiento como resultado de reducir el tamaño de partícula del carburo de niobio es mostrado en la fig # 11.

3.2.3.- Tamaño de Grano

Irvine et al (20), usando el análisis de regresión múltiple, desarrollo las siguientes relaciones, de los parámetros que afectan el punto de fluencia y la temperatura de transición :

$$Y.S. (N/mm^2) = 69.5 + 32.4\% Mn + 83.4\% Si + 355.2 (\%Ni)^{\frac{1}{2}} + 17.5 d^{-\frac{1}{2}} + \Delta \dots F3$$

$$T_c (^{\circ}C) = -19 + 44 \% Si + 700 (\%Nf^{\frac{1}{2}}) - 11.5 d^{-\frac{1}{2}} + 2.2 (\% perlita) + 0.26 \Delta \dots F4$$

Donde

% Mn, % Si = Manganeso y silicio en el acero

% Nf = Nitrogeno libre en el acero

d(mm) = Tamaño de grano de la ferrita

% Perlita = Porcentaje de constituyente lamelar conteniendo carburo de hierro en el acero.

Δ (N/mm²) = Factor de endurecimiento por precipitación

Las ecuaciones F3 y F4, indican que la reducción en el tamaño de grano tiene la doble ventaja de aumentar el punto de fluencia y bajar la temperatura de transición; como resultado, las formas para trabajar el acero se basan principalmente en el control del tamaño de grano para así obtener altos niveles de resistencia y tenacidad. Una relación típica entre el tamaño de grano punto de fluencia y temperatura de transición es mostrada en la fig # 12 .

El tamaño de grano de la ferrita dependerá de (10)

- a) El tamaño de grano original de la austenita, el cual en general controla el número de núcleos de ferrita.
- b) La temperatura de transformación, la que controlará la proporción de nucleación y crecimiento de la ferrita.
- c) Las partículas de segunda fase, desarrolladas ya sea para limitar el crecimiento de grano de la austenita o nuclear la ferrita.

De lo anteriormente expuesto podemos decir que el proceso de trabajado en caliente, o el subsecuente tratamiento térmico del acero son los aspectos vitales para el control del tamaño de grano.

En el amplio sentido de "Grano Refinado", varios tipos de estructuras de sub-grano, son relevantes como se muestra en la tabla V. Este tipo de estructura están contenidas en productos de intermedias o bajas temperaturas de transformación tales como : ferrita acicular, baja bainita y martensita revenida .

3.2.4.- Inclusiones y Efectos :

Las inclusiones no-metálicas se pueden dividir en dos

grupos (21); los de origen nativo (indigenous) y las de origen exógeno (exogenous). Las inclusiones del primer tipo, resultan de las reacciones que tienen lugar en el acero líquido o en la etapa de solidificación, mientras que el tipo exógeno de inclusiones resultan de la incorporación de escorias, refractarios con los que el acero líquido esta en contacto.

En la producción de aceros especiales, el porcentaje de inclusiones puede ser minimizado usando costosas técnicas de tratamiento al vacío; pero para aceros corrientes producidos en grandes cantidades, desafortunadamente las inclusiones deben ser aceptadas como una parte integral del acero.

Las inclusiones pueden convenientemente ser clasificadas en base a sus composiciones en óxidos y sulfuros. Oxidos tales como MnO ; SiO_2 y Al_2O_3 , son formados porque son más estables que los oxidos de fierro otros elementos tales como el niobio, vanadio y titanio son -- también desoxidantes efectivos pero son más caros que manganeso , silicio y aluminio. Sulfuros son el FeS , MnS y más complejos (Mn, Me) S , donde Me , es uno de los elementos del primer período de transición de la tabla periódica de los elementos.

Las características mas importantes de las inclusiones son :

- a) Tamaño : A inclusiones mas largas sus efectos son más nocivos.
- b) Cantidad : A mayores cantidades, sus efectos sobre las propiedades son peores
- c) Morfología: Las inclusiones delgadas y alargadas producidas durante la deformación tiene peores efectos sobre las propiedades mecánicas , que el efecto que producen las inclusiones globulares.
- d) Deformabilidad : Esto varía con la temperatura de trabajado grado y proporción de deformación y tamaño de las inclusiones.

Las inclusiones no- metálicas, no tienen ningún efecto adverso sobre el punto de fluencia (resistencia a la fluencia); el principal efecto de las inclusiones es en la tenacidad (fracture toughness) y se cree --

que estas juegan un papel muy importante en la determinación del nivel de energía mas alta (The upper Shelf Energy Level U.S.E.) debido a que actúan como planos débiles, las inclusiones no-metálicas nuclean "vacíos" delante de fracturas dúctiles que avanzan reduciendo - así la energía requerida para causar la fractura. Los principales tipos de inclusiones de manganeso son (23) :

Tipo I : Globulares con una gran variedad de tamaño. Estos son formados en aceros desoxidados con silicio - donde el contenido de oxígeno en el acero líquido es alto y la solubilidad del azufre es baja.

Tipo II : Estos son encontrados en los bordes de grano primarios en las formas dendríticas eutecticas. Estos son formados en aceros desoxidados con aluminio, donde el contenido del oxígeno es bajo y la solubilidad del azufre es alta.

Tipo III : Estos son formados en aceros los cuales han sido desoxidados con un exceso de aluminio. El contenido de oxígeno es bajo pero la solubilidad de azufre es también baja, debido al aluminio en solución en el acero líquido.

Ha sido demostrado (23) que el grado de desoxidación , es muy importante en la determinación de la forma y distribución de inclusiones de los aceros basados en el carbono y manganeso.

Durante el laminado en caliente, el contenido de oxígeno es el factor que más afecta la plasticidad de -- las inclusiones de sulfuro de manganeso, cuando más - alto el contenido de oxígeno mas baja será la plasticidad (fig # 13). A bajos niveles de oxígeno la plasticidad, de la inclusión de MnS. es también afectada en cierta forma de acuerdo a la relación de manganeso/azufre existente en el acero. A más pequeña esta relación la plasticidad será menor.

Los aceros normales para oleoductos pueden contener - hasta 0.05%, de azufre, estando este elemento presente en forma de inclusiones de sulfuro de manganeso.

Durante el laminado caliente del acero en forma de

planchas, estas inclusiones se deforman en forma de placas elípticas delgadas extremadamente largas con su eje mayor paralelo a la dirección del laminado dando así un efecto perjudicial en la resistencia de la fractura dúctil de los aceros para oleoductos.

La fig (14), ilustra el efecto que las inclusiones alargadas durante el laminado en caliente, ejercen la anisotropía de la máxima energía de impacto (región dúctil) para especímenes Charpy transversales y longitudinales. Esta diferencia es causada principalmente por la presencia de inclusiones alargadas, las que en los especímenes transversales están paralelamente o orientadas al plano de fractura.

Trabajos hechos por L Luyckx et. al. y A. Brownrigg - (24), (25), han mostrado que la forma misma de las inclusiones formadas por sulfuros, pueden ser controladas con adiciones de titanio, zirconio, calcio y metales de la serie, tierras raras (REM) hechas al acero; los sulfuros así formados son compuestos termodinámicamente más estables y se forman de preferencia que el sulfuro de manganeso.

Las figuras (15) y (16) muestran el efecto que la adición de REM, hace sobre las inclusiones.

En aceros con contenidos de azufre hasta 0.025%, una relación cerium/azufre (Ce/S) comprendida entre 1.5 y 2.0, en el producto final, resultará en sulfuros de tierras raras de formas exclusivamente globulares en donde la máxima energía de impacto tomada transversalmente aumentará en un 100%, como está mostrado en la fig # 17; con una relación Ce/S. mayor de 2.00 esta mínima energía tomada transversalmente disminuirá ligeramente. La máxima energía de impacto tomada longitudinalmente no es afectada por la cantidad de tierras raras (REM) que se añada.

Otros elementos tales como zirconio, titanio, magnesio y calcio, forman sulfuros estables de alto punto de fusión y es posible que cada uno de estos elementos puedan ser usados para formar inclusiones que no se alargarían durante el laminado.

Empero otros factores deben ser considerados (24), --

desde que el nitrógeno forma nitruros que son importantes para el aumento de la resistencia, los elementos aditivos para formar sulfuros, deben tener muy poca afinidad por el nitrógeno. En general se deben tomar las siguientes consideraciones: Interacciones de los elementos aditivos, con el oxígeno nitrógeno y carbón; su solubilidad en el acero líquido, presión de vapor, precio y disponibilidad.

La gran afinidad del zirconio por el nitrógeno y su tendencia de formar partículas gruesas, impide el uso de este elemento en aceros laminados en caliente y cuya resistencia haya sido aumentada por nitruros finamente dispersos en la estructura.

Los precipitados ZrC y $Zr_4C_2S_2$, pueden causar fragilidad.

El titánio, como el zirconio, se combina con nitrógeno en el acero líquido; el titanio también forma carburos que pueden causar fragilidad, no obstante este elemento es usado comercialmente para controlar la forma misma del sulfuro.

El bajo punto de fusión y ebullición del magnesio (659° y $1160^{\circ}C$ respectivamente), hace que la adición de este elemento al acero líquido sea extremadamente difícil.

El sulfuro de calcio es más estable que el sulfuro de magnesio, no obstante su solubilidad en acero líquido a presión atmosférica es muy baja.

Para una buena soldabilidad como ha sido sugerido por Watkinson (25), el azufre debe ser bajo (aproximadamente 0.015%) para eliminar toda posibilidad de rajaduras en caliente. Debido a que este fenómeno es intergranular, hay alguna indicación que esta separación de granos es el resultado de la liquefacción de los sulfuros de hierro (FeS). La relación Mn/S debe también ser adecuada para prevenir la combustión o coacción, especialmente en aceros al C-Mn. Examinaciones metalúrgicas, han mostrado que las rajaduras lamelares están asociadas con las inclusiones no-metálicas en la forma de sulfuros de manganeso y silicatos. Mejoras en la morfología de las inclusiones puede con

seguirse usando la técnica de la laminación cruzada. Este método está siendo usado en laminadores para producir planchas de acero de alta calidad. Este método no ha sido desarrollado mucho, porque resulta más fácil controlar la forma de las inclusiones, mediante la adición de aleantes (26)

3.3.- PROPIEDADES MECANICAS DEL MATERIAL

3.3.1.-Propiedades de Tracción :

La manera en la cual el material reacciona cuando se aplican fuerzas, sin deformarse o llegar al punto de ruptura, es considerada muy importante para todas las aplicaciones prácticas, tal es el caso de tuberías. En las propiedades de tracción la resistencia es la habilidad del material para resistir las fuerzas que se le aplican, y la ductibilidad es la habilidad del material para resistir cambios permanentes de forma sin llegar a la ruptura (27) .Tradicionalmente, los valores de la resistencia a la tracción ha sido comunmente usados como base para el diseño. Al presente hay una marcada tendencia de usar valores de resistencia a la fluencia o el punto de fluencia para el diseño de estructuras que están sujetas a cargas estáticas. En materiales para oleoductos , la resistencia a la fluencia es considerada como base para el diseño con la premisa que cualquier deformación apreciable de la tubería destruirá su utilidad; las especificaciones de tensión para medir la ductibilidad están basadas generalmente en experiencias prácticas, ya que la cantidad de ductibilidad (elongación) , en la prueba de tensión que es acompañada por una adecuada ductibilidad en servicio. El material debe tener una adecuada prueba de resistencia en la dirección circunferencial de la tubería, que es la dirección de orientación de los esfuerzos cuando el oleoducto está en servicio.

Con respecto al uso de la resistencia a la fluencia en el diseño, la pregunta puede muy bien ser hecha en el sentido de que, ¿ Como tal propiedad determinada mediante pruebas de tracción en el sentido transversal y horizontal, puede ser usada en el diseño de estructuras las cuales están sujetas a complejas cargas y complejos es-

tados de esfuerzos ? para tener un valor mas realistico de la propiedad de resistencia a la fluencia en oleoductos, es que la prueba de tensión circular (Ring tensión Test), ha sido recientemente adoptada, pero algunos fabricantes todavía prefieren usar pruebas de tensión longitudinales y transversales para valorar la propiedad de resistencia a la fluencia.

3.3.2.-Tenacidad .-

La repentina y completa "falla" de oleoductos u otras estructuras a esfuerzos muy por debajo de sus puntos de fluencia , indican que ademas de las pruebas de tensión hay otras consideraciones que deben ser tomadas en cuenta , para asegurar una completa seguridad de la estructura durante el servicio. Análisis de estas fallas, indican que la fractura usualmente se inicia en incisiones o entalladuras ("NOTCHES") y pueden mostrar un comportamiento ductil o quebradizo (frágil). Una fractura frágil , indica una fractura sin un flujo plastico. La apariencia frágil y de baja energía es causada por la separación de los granos individuales debido al clivaje a lo largo de planos cristalinos definidos.

Este tipo de fractura puede propagarse sobre grandes distancias a velocidades extremadamente altas. Fracturas ductiles ocurren despues de una deformación plástica, debido a una acción de deslizamiento por ejemplo : dos porciones del grano separados por deslizamiento de uno sobre el otro. En este tipo de fractura la velocidad de propagación es relativamente lenta.

El comportamiento de la fractura depende de muchas variables (28); temperatura, razón de deformación, estado de esfuerzos, dimensión y agudeza de la incisión o entalladura. Conforme estas variables son cambiadas puede haber una transición del comportamiento, de ductil a frágil -- por ejemplo : un acero que es dúctil e insensitivo a las incisiones a una determinada temperatura puede ser frágil a una temperatura más baja. El grado al cual estas variables influncian en transición del comportamiento -- dependen de la resistencia del acero.

Temperatura es el factor más importante en la fractura para aceros con niveles de resistencia, considerados en-

los oleoductos de alta resistencia; la apariencia de la fractura a altas temperaturas es dúctil, mientras que a bajas temperaturas la apariencia es frágil y a intermedias o "Temperaturas de transición", la superficie fracturada muestra regiones frágiles y dúctiles. Debido a -- que al presente los oleoductos están siendo construidos en lugares de baja temperatura tales como, Alaska, Siberia, etc. donde la temperatura es del orden de -50°C . los materiales usados deben tener valores bajos de "temperaturas de transición".

La prueba "Charpy, incisión "V", ha sido muy usada para medir la temperatura de transición de la región frágil a la dúctil.

La fig # 18, muestra la curva de transición Charpy para una tubería de acero de especificación LX 60, usada en "The Gas Council" (Inglaterra).

Como puede apreciarse, no hay una sola temperatura en la cual el metal repentinamente se convierta en frágil. Existe una correlación razonable entre la cantidad de área que ha sido fracturada en forma dúctil y la energía utilizada en romper el espécimen; en tanto que la cantidad de fractura dúctil aumenta, la energía absorbida, también aumenta, hasta que es alcanzado un "plateau" correspondiendo a la fractura totalmente dúctil (29). El nivel de energía de este "plateau", es conocido como la máxima energía absorbida (Upper Shelf Energy U.S.E.).

Los materiales para tuberías de alta resistencia requieren valores del impacto para la temperatura de transición que sean más bajos que la menor temperatura de trabajo del material y el U.S.E., debe ser tal que la tenacidad sea alta a la temperatura de trabajo. La energía dúctil "Charpy", es particularmente sensitiva al porcentaje de perlita y al contenido de inclusiones del acero. Otras variables metalúrgicas, tal como el tamaño de grano, tiene muy poco efecto. Análisis de regresión múltiple (30), muestran que el contenido de inclusiones es la variable más importante que afecta a la energía dúctil "Charpy" tal como se muestra en la fig # 19

$$I = \ln \frac{L}{L_n} \dots F_5$$

Donde :

I = Factor de inclusión

L = Longitud de la inclusión

n = Densidad de inclusiones

El porcentaje de fractura dúctil es también considerada como una valoración de tenacidad por ejemplo "The Gas - Council ", recomienda para los aceros de alta resistencia para tuberías, tengan un área de 75%, cuando el espécimen se fractura a 0° C. de temperatura .

Aceros de alta resistencia generalmente tienen menor tenacidad que los aceros de baja resistencia y las estructuras son mas susceptibles a la fractura, las cuales pueden ser valoradas por el análisis basado en los mecanismos lineales de fractura elástica "Linear Elastic Fracture Mechanismg" (LEFM).

Se ha encontrado que esfuerzos elásticos locales en la punta de una fractura son descritos por la letra "K" conocida como el factor de intensidad de esfuerzo. Para los materiales en los cuales la fractura ocurre bajo condiciones elásticas, la fractura ocurre a un valor crítico del factor de intensidad de esfuerzos conocido como "Kc" o parámetro que indica la tenacidad al momento de la fractura (Fractura Toughness).

Como Kc. varía con el espesor del material, se tiene que arriba de ciertos espesores Kc, permanece constante y es denominado con el nombre de "Deformación plana de la tenacidad en la fractura" (Plane strain fracture Toughness) K_{ic} (31).

El análisis del campo de esfuerzos cerca de la punta de la fractura en la fig (20) , muestra que si el esfuerzo aplicado σ_{app} aumenta, se genera una familia de curvas hasta que σ_{app} iguala al esfuerzo de fractura - σ_F . en ese estado :

$$K_{ic} = Y \sigma_F \sqrt{a} \dots F 6$$

Donde :

K_{ic} = Tenacidad en la fractura

Y = Parametro no dimensional en función del sistema de carga y la configuración de la fractura.

TF = Esfuerzo de Fractura

a = Longitud de la Fractura o rajadura

Ha sido establecido que (32) cuanto mas altos sean los valores de K_{Ic} , mas resistente será el material a la fractura frágil. Si la deformación - planar de la tenacidad en la fractura K_{Ic} , es conocida junto con el esfuerzo aplicado a un componente, es posible calcular - el tamaño de la falla necesaria para causar la fractura o a la inversa, conociendo el tamaño máximo y la orientación de la falla presente en un componente, es necesario conocer dos de las siguientes tres cantidades (33)

- a) La deformación planar de la tenacidad en la fractura K_{Ic} .
- b) Los esfuerzos aplicados F .
- c) El tamaño de la falla, a

Una queja común es que la LEFM, es solamente aplicable a materiales los cuales muestran pequeñas cantidades - de plasticidad asociadas con la iniciación de la fractura. En tanto que la tenacidad o ductilidad del material, aumenta la validez de aplicación de la teoría -- del mecanismo lineal de fractura elástica (LEFM) disminuye .

En aceros para oleoductos, digamos con menos de 100 K. s.i. (698 N/mm²), de resistencia a la fluencia , la teoría LEFM no es aplicable excepto bajo cargas de impacto o bajo circunstancias donde la ductilidad es baja, debido a algún efecto de fragilidad (34) . En tales casos la determinación de la fractura puede ser basada en otra teoría la cual utiliza mediciones de plasticidad presentes en la punta de la fractura , esto es el desplazamiento de la brecha de la rajadura o "fractura" Crack - opening displacement (C. O. D).

En la curva de la fig # 21, la cual relaciona la carga con el desplazamiento para una rajadura en un cuerpo; - se muestra que cuando la carga aumenta hasta llegar a la fractura la posición de la curva al momento de la - fractura dependerá de la tenacidad del material y el - tipo de fractura puede variar desde el esencialmente - elástico de material la fractura plastica

del material dúctil.

Para materiales de muy alta resistencia donde muy poca deformación plástica precede a la fractura, Kic. puede resolver la situación pero en rango dúctil la fractura es determinada por inestabilidad plástica. Fig # 22, muestra el fenómeno de la fluencia en la punta de la fractura y el desarrollo del C.O.D. (Desplazamiento de la brecha de la rajadura o fractura).

Bajo condiciones de esfuerzos planares, puede ser mostrado (34) que para una rajadura de 2 a de longitud en un plano infinito, el C.O.D. en la punta de la rajadura es :

$$\bar{\epsilon} \text{ (c.o.d)} = \frac{8\epsilon Y}{\pi} \text{ a log. e. sec. } \frac{\pi T F}{2 T Y} \quad ?$$

Donde :

$\bar{\epsilon}$ = c.o.d. (desplazamiento de la brecha de la rajadura)

ϵY = Deformación

T = Esfuerzo

$T Y$ = Esfuerzo de deformación

a = Longitud de la rajadura.

Valores críticos de $\bar{\epsilon}$ (c.o.d) han sido medidos en especímenes de pequeñas escalas, con el espesor real; estos valores han sido relacionados con fallas ocurridas en estructuras grandes. Fig # 23, muestra típicas mediciones de $\bar{\epsilon}$ en función de la temperatura, para aceros de baja aleación, considerados bajo condiciones estáticas; a bajas temperaturas la resistencia inicial no es desarrollada completamente y la fractura se inicia en forma frágil. A altas temperaturas la fractura ocurre en forma dúctil porque la resistencia inicial se desarrolla plenamente. Figuras # 24 y 25, muestran típicas curvas de cargas versus c.o.d. para especímenes con fracturas frágiles y dúctiles respectivamente. La misma teoría es mostrada en la fig. 26 en el caso de un oleoducto; el desplazamiento en la punta de la rajadura es calculado en función del esfuerzo circunferencial en la tubería para diversos tamaños de rajaduras. Análisis matemáticos (35) y trabajo experimental -- han mostrado que para ciertas condiciones el C.O.D. ,

puede ser relacionado con el parámetro K del mecanismo de fractura elástica; la referida relación es definida por :

$$\frac{K_c}{Y} = \frac{\bar{\epsilon}_c}{Y} \dots\dots F 8$$

Donde :

$\bar{\sigma}_Y$ = Esfuerzo de fluencia del material

$\bar{\epsilon}_Y$ = Deformación de la fluencia

$K_c, \bar{\epsilon}_c$ = Tenacidad en la fractura (fractura Toughness)

3.3.3.- Propiedades mecánicas de la Soldadura :

Cualesquiera sea la microestructura del acero, diversos cambios pueden ocurrir durante el proceso de fabricación especialmente cuando interviene procesos de soldadura. La microestructura de una junta soldada, varía -- desde aquella del material que se suelda, pasando por -- varias zonas afectadas (Heat - affected zones, HAZ) -- hasta aquella producida por la soldadura misma. Cada una de estas regiones tendrá diferentes rangos de temperatura de transición, las cuales se muestran en la fig- 27, en este caso para un acero C- Mn, de 38 mm ($\frac{1}{2}$ ") de espesor .

En una estructura soldada, rajaduras y defectos son fáciles de ocurrir en la zona afectada por el calor (HAZ) o en la soldadura misma y una vez que la rajadura frágil se ha iniciado, esta se propaga al material que se esta soldando; por consiguiente la microestructura de la zona soldada y su respectiva tenacidad, son de primordial importancia .

Una de las principales consecuencias del proceso de soldadura es la negligencia en el control de la operación -- en sí, lo cual puede introducir fallas dentro de la estructura; estas fallas pueden ser : rajaduras, inclusiones de escoria, porosidades, rajaduras en la HAZ , etc. La mayoría de estos defectos ocurren dentro del metal soldado o en la zona afectada por el calor (HAZ) y estos defectos pueden iniciar una fractura frágil que depende principalmente de la microestructura y de la tenacidad en la punta del defecto.

Muchas investigaciones se han llevado a cabo referente -- a la tenacidad (fractura Toughness), de las diversas --

regiones de una unión soldada; pero pocas conclusiones pueden ser sacadas porque hay varios factores que tienen efectos significantes, tales como la microestructura y la composición química del material que se va a soldar, método empleado para soldar, espesor de la región soldada, etc (36).

Procesos de alta temperatura tales como la soldadura tipo "electro - slag ", resulta en un incremento del tamaño de grano en la HAZ (zona afectada por la alta temperatura), lo cual puede reducir la tenacidad o "fractura Toughness " en esa región.

Otra consecuencia de la soldadura que resulta en una pérdida de tenacidad en la HAZ, es el fenómeno de deformación por envejecimiento, lo cual ocurre en las tuberías formadas en frío y donde el calor de la soldadura puede "envejecer " el material ya deformado (37)- como se muestra en la fig 28.

CAPITULO IV

4.- PRODUCCION DE TUBERIAS

4.1.-TUBERIAS LONGITUDINALMENTE SOLDADAS

Las tuberías longitudinalmente soldadas pueden ser producidas ya sea usando planchas o tiras (cintas) dependiendo del diámetro deseado. Nos referiremos solamente a las tuberías de gran diámetro formadas con planchas y soldadas con el método de arco sumergido para formar la costura longitudinal.

4.1.1.- Producción de Planchas :

Varios métodos han sido desarrollados en los últimos años en orden de producir un material apropiado para la producción de tuberías de alta resistencia. Referencia es hecha de los más importantes métodos.

4.1.1.1.- Laminación Controlada de Aceros al C- Mn- Nb :

El término "Laminación controlada", fué inicialmente aplicado a cualquier cédula de laminación en la cual la temperatura final fuera mucho menor que la temperatura de una práctica de normalizado. En esta forma los parámetros metalúrgicos pueden ser explotados al máximo con el fin de obtener un material barato y con un contenido bajo de aleantes un tamaño de grano fino y una superior resistencia así como una buena tenacidad.

El pre-requisito para una ferrita de grano fino, es una austenita de grano fino antes de la transformación. El deseo de controlar el grano de la austenita ha guiado al uso de elementos refinadores de grano tales como el niobio, aluminio, vanadio, titánio, los cuales en pequeñas cantidades forman pequeñas precipitados o carburos y /o nitruros los que se sitúan en los bordes de grano de la austenita previniendo así su crecimiento de grano. Las temperaturas de solubilidad de estos precipitados varían con la cantidad del elemento y con el contenido de carbón - la fig # 29, muestra la temperatura de solubilidad del niobio y del carburo de niobio. La cantidad del niobio en solución en la austenita cambia muy poco con el incremento del niobio total en el caso de que

hubiera presente algún carburo de niobio no disuelto (42). Por consiguiente el límite de solubilidad del niobio, a cualquier temperatura, determina efectivamente la cantidad posible de precipitación (y de posible aumento de resistencia). De acuerdo a Woodhead (42) figuras aproximadas son mostradas en la tabla - VI. Si un acero contiene 0.20 % carbón, tenemos que a 1,200°C.

TOTAL Nb (%)	(%) Nb en Solución
0.04	0.0364
0.06	0.0369
0.08	0.0374
0.10	0.0378

Esto, asumiendo que el compuesto es NbC y que el producto de solubilidad es igual a :

$$K = \exp \left(6.82 - \frac{17300}{T} \right) \dots\dots F9$$

De esta forma para un acero de 0.20% carbón calentado a solamente 1,200°C. para el laminado, no sería beneficioso una cantidad mayor de 0.04% de niobio.

H. MATZUBARA Et al (39), afirma que tanto el refinamiento de la austenita como el TMT (Tratamiento Termomecánico para la deformación de la austenita por debajo de su temperatura de recristalización), son importantes para el refinamiento de la estructura ferrítica, aunque el último factor (TMT), predomina en una excesiva operación de laminación controlada por ejemplo con grandes cantidades de deformación.

Es posible causar aún mayores reducciones en el tamaño final del grano de la ferrita, cambiando la composición del acero y el promedio de enfriamiento. Aumentando el manganeso o el contenido de carbón y la proporción de enfriamiento baja de temperatura de transformación ($\delta \rightarrow \alpha$) de esta forma se aumenta la proporción de nucleación de la ferrita y se restringe el crecimiento de los granos de ferrita.

Una estructura ferrítica de grano fino resultará de una adecuada deformación a bajas temperaturas (40).

La elongación del tamaño de grano de la austenita en la dirección del laminado y el tamaño pequeño del grano en dirección transversal, hacen que los granos de ferrita detengan su crecimiento cuando estos han alcanzado la mitad del espesor de los granos de austenita elongados; adicionalmente, sub-limites de grano producidos por deformación en los granos de austenita pueden actuar como nucleos para la transformación de la ferrita. El cambio en las propiedades mecánicas debido a la cantidad de deformación para una temperatura final constante de 800°C , es mostrada en la fig # 30.

Puede notarse que el tamaño de grano de la ferrita se vuelve mas fino con el aumento del contenido de manganeso, la cantidad de deformación y el contenido de niobio.

La importancia del control correcto de la operación de laminación, puede ser apreciado del hecho que de aceros con 1.5% de manganeso que han sido ligeramente deformados, lo suficiente para producir un fino tamaño de grano de ferrita tuvieron una temperatura de transición alta, mientras que una fuerte deformación produjo una temperatura de transición baja.

La temperatura final es un factor muy importante en la laminación controlada. Bajando la temperatura de acabado de 950°C a 800°C ., decrecen el tamaño de los granos de austenita recristalizada, produciendo así un marcado refinamiento del grano de ferrita, mejorando de esta manera la resistencia a la fluencia y bajando la ^{temperatura} temperatura de transición al impacto, tal como puede ser apreciado en la fig # 31. La influencia del contenido de manganeso, cuando la microestructura es bainítica o ferrítica acicular y donde la temperatura final es alta, puede ser apreciado para bajas temperaturas finales, sin embargo, la microestructura es poligonal ferrítica-perlítica .

La temperatura de deformación y la velocidad de enfriamiento durante y después de la operación de lami

nación controlada, determina las propiedades de las planchas de acero producidas.

Enfriamientos lentos producen una ferrita de grano grueso, lo cual es perjudicial a la resistencia a la fluencia y a la temperatura de transformación.

En tanto que la velocidad de enfriamiento es incrementada, la transformación ($\gamma \rightarrow \alpha$) se llevará a cabo a una proporción mas rápida produciendo una estructura bainítica la cual es relativamente frágil y afecta adversamente las propiedades de impacto.

La velocidad de enfriamiento después del laminado, obviamente será afectada por el espesor final de la plancha; en espesores delgados la velocidad de enfriamiento será rápida y los granos de ferrita serán pequeños mientras que estos serán mayores en planchas más gruesas debido a la lenta velocidad de enfriamiento, tal como puede verse en la fig 32. La interrupción de la operación de laminado, usado en "laminación controlada" sirve no otro propósito metalúrgico que el de alcanzar una temperatura baja, produciendo efectos no deseables, debido a la recristalización, crecimiento del grano y el crecimiento de las partículas que pueden haber precipitado; resultando de esta manera, después de un largo período de interrupción (holding time), una estructura heterogénea y "gruesa" (38), con una consecuente pérdida de beneficios en términos de resistencia a la fluencia y de temperatura de transición al impacto.

El efecto práctico de interrupción del laminado, es la producción de "cuellos de botella", lo cual retrasa la producción. Para minimizar estos efectos adversos la "interrupción", debe llevarse a cabo a las mas bajas temperaturas de iniciación del laminado y el tiempo de interrupción debe ser el mas corto posible. No se debe permitir el crecimiento del grano debido a la recristalización, una vez terminada la operación de laminación.

Cuando los periodos de interrupción largos son inevi-

tables , se debe añadir mas niobio, para así reducir la recristalización y el crecimiento de grano; cualquier excesivo crecimiento de grano producido puede ser remediado bajando apropiadamente la temperatura de acabado (38)

Los valores de energía que determinan la tenacidad son afectados adversamente por el "laminado controlado", la cual tiende a ser más baja en tanto que el grado (cantidad de deformación) de "laminación controlada", es aumentado (fig # 33)

La causa puede ser el incremento de resistencia, debido al "laminado controlado" y la aparición de microfisuras, causadas por el MnS que se vuelve mas alargado a mas bajas temperaturas de laminado (39)

La producción de planchas por el método de "Laminación Controlada " es una técnica que está en desarrollo. La fig 34 resume gráficamente lo que se entiende por laminación controlada hasta 1970 y la tabla VII, muestra los valores obtenidos en relación a propiedades mecánicas.

J.H. Little et al (41), reporta un trabajo reciente sobre "laminación controlada " en aceros al C-Mn-Si-Nb, desoxidados con aluminio y con adiciones de metales de la serie "Tierras Raras " controlando a su vez las inclusiones de óxidos y sulfuros para obtener buenos valores de energía "Charpy" para la tenacidad.

El trabajo es basado sobre un adicional refinamiento de la austenita, controlando el proceso termomecánico, a través del rango austenítico y aplicando seguidamente deformaciones mayores en la zona ($\gamma + \alpha$) o igualmente en la zona α

Ellos reportan el uso de un sistema de enfriamiento fuera del tren de laminación, antes del laminado final y/o el empleo de enfriamiento acelerado en los primeros pases del laminado final con el propósito de minimizar la recristalización y el crecimiento del grano austenítico, durante el periodo de "interrupción" La temperatura antes del laminado final y-

la cantidad de deformación en cada pase, han sido especificados en orden de alcanzar el espesor final del material a la temperatura final apropiada. El laminado o rolado final a temperaturas en las regiones

ha sido empleado para incrementar la resistencia del acero.

Los principios anteriormente mencionados, han sido aplicados en la producción comercial de planchas de 9.5mm a 38 mm de espesor, con los siguientes resultados:

Para planchas de 9.5mm de espesor; con un carbón equivalente de 0.32, la resistencia a la fluencia obtenida fué de 523 N/mm² (75.8 k.s.i.); la energía absorbida por el impacto en especímenes transversales, Charpy "V" (3/4); a una temperatura del -10°c fué de 85 Joules (62.7 Ft-Lb) y una fractura dúctil a -50°c.

Para planchas de 19mm de espesor; 0.03 % de niobio ; 0.08% de vanadio; con un carbón equivalente de 0.37; la deformación grande en la zona $\delta + \epsilon$. La resistencia a la fluencia obtenida fué 623 N/mm² (90 k.s.i.), la energía absorbida en especímenes Charpy con cizalladura tipo "V", fué de 47 Joules a -30°c. y con una fractura dúctil de 50% a una temperatura de transición (FATT) de -40°c.

Los autores aseguran que esta es la mejor combinación de resistencia a la fluencia y tenacidad, obtenida -- por esta nueva técnica.

La composición del acero tratado fué básicamente de 0.1% carbón, 1.4 % manganeso; 0.36% silicio, 0.03% niobio. La temperatura final de laminado de la plancha fué entre 800°c y 600°c. El tamaño de grano alcanzado de 5 μ m y no hubo significativa variación en cuanto al tamaño de grano con esa temperatura final de rolado; mientras que la resistencia a la fluencia aumentó continuamente, debido al endurecimiento por dislocamiento, tal como se muestra en la fig 35.

El promedio de temperaturas de transición con 50% de fractura dúctil, fué de -60°c.

Fuó concluido que las propiedades mecánicas son depen

dientes del tamaño de grano ultrafino. La resistencia adicional obtenida debido al endurecimiento por desplazamiento (ver fig 35), no afectó significativamente a las propiedades de impacto.

Datos recientes de laminación - controlada (43), tomados de trabajos realizados en planchas B.P. X 65 -- (British Petroleum), es mostrado en fig 36. Todos los resultados incluyendo aquellos de planchas normalizadas, han sido corregidas a 0.03 % niobio y 0.25% silicio . Puede apreciarse que para el mismo carbón - equivante mas altos valores de resistencia a la fluencia pueden ser logrados en procesos de laminación controlada que en procesos de normalizado. Los valores de tenacidad obtenidos, debido a la reducción de inclusiones es mostrado en la fig # 37 , donde la curva de transición usando el método de pruebas Battelle Drop Weight, muestra un rango mas amplio de temperaturas y la energía absorbida con el método de prueba -- Charpy, con cizalladura tipo "V", es considerablemente mejorado.

La fig 38, muestra historigramas de planchas B.P. X 65 , con datos de resistencia a la fluencia; el mayor número de planchas procesadas por laminación controlada tienen valores de resistencia de 483 a 518 N/mm² (70-75 k.s.i.) los más altos valores de resistencia a la fluencia corresponden a mas poderosos laminadores . La parte superior de la fig 38, muestra valores de resistencia de planchas que fueron laminadas en un laminador de cuatro rodillos de 4267 mm (168"); la parte inferior, muestra valores de resistencia de planchas que fueron laminadas en un laminador de cuatro rodillos de 3352 mm (132").

4.1.1.2.- Templado y Revenido de planchas .-

La aplicación de la técnica de laminación- controlada a aceros de niobio o vanadio, permite alcanzar alta resistencia a la fluencia y buena tenacidad en planchas para oleoductos y gaseoductos.

No obstante, para incrementar la resistencia es nece-

sario el uso de aleantes costosos o tratamientos de templado y revenido (T & R).

La principal desventaja al desarrollo de aceros T & R. Ha sido la poca facilidad de producción los tipos de materiales usados en T & R son basicamente - aceros de bajo carbón y alto manganeso, con elementos tales como el niobio o vanadio, que al precipitar, aumentan la resistencia del acero. Estos materiales tienen baja tendencia al endurecimiento (Hardenability), y no se transforman a martensita o bainita despúes del templado a menos de 1,000^oc. La bainita puede ser lograda únicamente si el templado se realiza despues de recalentar el material a mas altas temperaturas, 1050^oc y 1150^oc. para aceros al vanadio y niobio respectivamente (44) y esta transformación tiene efectos desastrosos, en las propiedades de impacto. El templado directo de estos aceros resultan en una estructura ferrítica de alta -- densidad de dislocaciones, la cual debido a su morfología a sido denominada "ferrita acicular ". En - un subsecuente revenido las dislocaciones son "apiñadas" por una fina dispersión de precipitados de - endurecimiento secundario que aumenta la resisten-cia a la fluencia.

Ha sido mostrado (45) que para lograr este mejora-miento de propiedades, se debe emplear el templado-directo despúes del laminado en lugar del clásico - recalentamiento y posterior tratamiento de templado y revenido. No obstante que hay que invertir mayor capital en instalar una nueva unidad de templado directamente despues del laminado, tiene la ventaja de - producir mejores materiales ahorrando a su vez tiempo y dinero al no tener necesidad de recalentamiento. Trabajos realizados por British Iron And Steel Research Association (BISRA) , en una serie de aceros de bajo carbón , manganeso, niobio y vanadio, que fue - ron templados y revenidos, han mostrado que el tratamiento de templado despues de operaciones de lamina-

ción- controlada, dieron un substancial mejoramiento- en resistencia y tenacidad comparados a materiales que tuvieron laminación controlada y que fuerón enfriados- al aire, tal como muestra la fig 39, para un acero de- la siguiente composición :carbón 0.7% manganeso 1.46%; niobio 0.09%;nitrógeno 0.02 %.

Irani et al (45) , afirma que aceros al bajo carbón, templados y revenidos, conteniendo niobio o vanadio - muestran estructuras de ferrita acicular, una vez tem- plados después de laminados a 950°c. Sin embargo a mas altas temperaturas de acabado por ejem. 1,000°c -1,050° c., la estructura del producto templado fué bainítica, debido a una austenita mas estable, la que en el tem- plado, transformó, a bajas temperaturas en estructura- bainítica, lo cual sería mas resistente en un subsequeⁿ t. revenido.

El revenido entre 500 a 600°c. da efectos de endureci- miento secundario, debido a la precipitación de carboni- truros(N:£, VN), en dislocaciones, resultando en un - incremento de la resistencia a la fluencia pero con un - desmejoramiento en las propiedades de impacto; esta úl- tima deficiencia puede ser corregida por el refinamien- to del grano, obtenido en la operación de laminación - controlada.

Ha sido reportado (46), que aumentando la temperatura- de revenido de 600°c a 675°c, tuvo poco efecto en la - resistencia mientras que las propiedades de impacto -- fueron adversamente afectadas, debido al crecimiento - de los precipitados de carburo de niobio. Por consiguⁱ ente la mejor combinación de propiedades de resisten - cia e impacto fueron obtenidas en materiales que fueron revenidos a bajas temperaturas.

La tabla VIII muestra las propiedades mecánicas obteni- das con diferentes tratamientos.

Puede ser apreciado que valores Charpy, concizalladura en "V", a 0°c, para bajas temperaturas de revenido, -- son ligeramente menores que para altas temperaturas de revenido.

Trabajos de laboratorio en BISRA (46), mostraron que los efectos negativos del nitrógeno en las propiedades de impacto en aceros al bajo carbón, pueden ser disminuidos, removiéndolo el nitrógeno de la solución, de esta forma es necesario añadir aluminio a los aceros que contienen niobio o vanadio.

El bajo contenido de carbón en aceros templados y revenidos, da bajo carbón equivalente, el cual es necesario para buena soldabilidad. Ha sido establecido (47) que aceros T & R, necesitan ser más limpios que aceros templados o normalizados, especialmente en planchas gruesas, ya que las inclusiones pueden actuar como concentradores de esfuerzos durante el proceso de templeado y revenido, pudiendo iniciar pequeñas fisuras.

4.1.1.3.- Aceros Basados en estructuras "Ferrítica - Acicular"

Mn- Mo- Nb. .-

Una alternativa en la producción de aceros de alta resistencia con buenas propiedades de tenacidad y soldabilidad, es el acero Mn-Mo-Nb desarrollado por "Climax Molybdenum Company" y otros (48) (49).

Esta es una estructura de grano fino con alta resistencia y tenacidad que puede ser obtenida en planchas de más de 12.7mm de espesor, enfriadas al aire. El molibdeno y el manganeso, reducen la temperatura de transformación y previenen la formación de ferrita poligonal gruesa; en su lugar se forma la ferrita acicular durante el enfriamiento y después del laminado en caliente lo cual proporciona alta resistencia y buena tenacidad, debido a su grano fino y a la alta densidad de dislocaciones.

El rango del análisis químico usado en este acero, es como sigue: carbón hasta 0.06%, manganeso de 1.3% a 2.2%; molibdeno de 0.2% a 0.4%; niobio de 0.03 % a 0.1 %; metales del grupo de tierras raras es también usado para el control de las inclusiones. Si el acero, después de laminado en caliente es subsecuentemente "envejecido" a más o menos 540 ó 680°C, para permitir un incremento de resistencia debido a los precipitados de Nb,

(CN). **Nb**, mejores valores de resistencia se lograrían.

El molibdeno, es la adición mas importante, sus efectos en la resistencia a la fluencia y a la tenacidad son mostrados en la fig 40; la microestructura del metal base, es una mezcla de ferrita poligonal gruesa y fina pero cuando el molibdeno es añadido, la microestructura se vuelve "acicular".

La temperatura de recalentamiento de planchones (Slabs) para la producción de planchas junto con la cantidad de deformación durante el laminado en caliente y la temperatura de reducción, determinan la condición de la austenita, antes de la transformación $\gamma \rightarrow \alpha$ (48). La fig 41, muestra que reduciendo la temperatura de recalentamiento a 1260°C . primeramente causa un pequeño cambio en la resistencia a la fluencia, pero a su vez baja la temperatura de transición.

Eventualmente la resistencia a la fluencia, baja tremendamente, probablemente debido al cambio en la microestructura, de ferrita acicular a ferrita poligonal -- donde la temperatura de transición es bajada, esto se atribuye al refinamiento del grano ya que la baja temperatura de recalentamiento del planchón (Slab), produce un grano austenítico fino, y por consiguiente un grano ferrítico también fino. Esto se puede ilustrar mejor con los planchones de acero libres de molibdeno y que son recalentados a una temperatura mas baja.

Es reportado (48) que algunos aceros tipo Mn-Mo-Nb, con adiciones de "mischmetal" (0.025 a 0.027 % de Cerio), fueron recalentados a 1260°C . y laminados a planchas de diferentes espesores (12.7 mm a 14.2mm) y a diferentes temperaturas finales de laminación. Mejores propiedades mecánicas fueron obtenidas a bajas temperaturas finales (fig 42). Temperaturas finales de laminación menores de 700°C , no fueron empleadas porque el acero tipo Mn-Mo-Nb empieza a transformarse en ferrita acicular, ligeramente mas abajo de 700°C ($1,300^{\circ}\text{F}$). Ventajas de la laminación controlada (finalizando la laminación abajo de 870°C) son tambien ganadas des púes del "envejecimiento" lo cual produce un ligero

mejoramiento en las propiedades de impacto y aumenta considerablemente la resistencia a la fluencia a 103- N/mm² o más.

La práctica usual de rolado con una temperatura final entre 954°C y 982°C (1750° y 1800° F), produce una resistencia a la fluencia de mas o menos 520 N/mm² -- con un 50% de fractura dúctil correspondiente a una temperatura de transición de mas o menos -18°C (0°F). Disminuyendo la temperatura de rolado a 760°C (1400°F) no produce cambios en la resistencia a la fluencia, pero baja la temperatura de transición mas abajo de -70°C (-100°F).

El espesor de la plancha, influencia en las propiedades mecánicas aumentando el espesor de la plancha disminuye ligeramente la resistencia a la fluencia; no fueron reportados, los efectos del espesor de la plancha en la temperatura de transición al impacto (48). Para aceros tipo Mn-Mo-Nb, con una temperatura de recalentamiento del planchón de 1260°C (2,300°F), deformaciones de mas o menos 20% por pase, temperatura de acabado de 760°C (1400°F) y envejecimiento a 620°C -- (1150°F), por espacio de 1 hora; es posible producir comercialmente, planchas con una resistencia a la fluencia de 553 N/mm² (80 k.s.i.) y temperaturas de transición al impacto menores de -70°C. (-100°F).

El niobio tiene un efecto beneficioso en el fenómeno de envejecimiento. Trabajo de laboratorio (48), indicó que una temperatura de envejecimiento de 620°C (1150°F) por espacio de 1 hora, produjo la mejor combinación de resistencia y tenacidad.

Mas altas temperaturas y mas cortos tiempos de envejecimiento, pueden ser usados comercialmente, pero temperaturas de envejecimiento mayores a 677°C (1250°F) aumentan la temperatura de transición al impacto.

4.1.1.4.- Otros métodos para la producción de Planchas .-

Muchos tipos de aceros están siendo desarrollados y propuestos, para cumplir con los requerimientos de los aceros para oleoductos; entre los mas importantes

están :

a) "Acero Nicuage" Tipo 2 (IN-787): Se trata de un proceso de "endurecimiento por envejecimiento" inventado por "International Nickel Company" (5) (50), forma la base del acero tipo Nicuage (Ni-Cu-Nb), endurecido por envejecimiento pero modificado por pequeñas adiciones de cromo y molibdeno para incrementar la resistencia y la tenacidad.

Este acero fué diseñado inicialmente para satisfacer los requerimientos de los materiales para usarse en gaseoductos, especialmente para condiciones de baja temperatura.

La composición química es la siguiente: carbón 0.05 % max; Nickel 0.7 a 1.0%; Cobre 1.0 a 1.3%; Niobio - 0.05%; Cromo 0.06%; Molibdeno 0.15 a 0.30%; Manganeso 0.4 a 0.65% y Silicio 0.2 a 0.35%. El acero "base" (Ni-Cu-Nb) es ferrítico y combina los fenómenos de endurecimiento por envejecimiento (endurecimiento por precipitación en la ferrita) debido al cobre y el de refinamiento de grano debido al niobio. Pruebas hechas por P.P. Hydrean et, al (50), mostraron que adiciones de 0.7 a 1.0 % de níquel es adecuado para la prevención de puntos calientes (Hot Shortness), debido a la presencia del cobre en el acero.

Para aplicaciones estructurales y construcciones de oleoductos, el tratamiento térmico del material simplemente consiste en envejecer el material soldado, a 590°C. durante 1 hora: el normalizado a 900°C antes del envejecimiento es recomendado para planchas de 25 mm ó mas de espesor.

En la producción de planchas, el inicio del rolado a bajas temperaturas, menores de 1,260°C (2300°F) da buena combinación de resistencia y tenacidad.

Trabajo de laboratorio (50), ha mostrado que la temperatura de transición es disminuida a mas bajas temperaturas finales de laminación (815°C o 1,500°F) no obstante la resistencia a la fluencia es incrementada

muy ligeramente. Tal como en el caso de los aceros tipo C-Mn-Nb, donde la mejor combinación de propiedades es obtenida con grandes cantidades de deformación a bajas temperaturas.

Se ha reportado que el acero Nicuage Tipo 2 (5), tiene excelente soldabilidad en juntas o uniones hechas usando la soldadura manual de arco, soldadura manual de arco, soldadura de arco sumergido en planchas de espesores hasta por lo menos 30mm. La tabla X, muestra las propiedades mecánicas obtenidas usando la soldadura de arco sumergido y la tabla XI, usando el método de soldadura manual de arco.

b) Rolado o laminación continuada :

Este es un proceso continuo de tratamiento termo-mecánico (TMT), desarrollado para aceros al bajo carbono y aceros con baja aleación (51) y que considera la operación de deformación en la región austenítica, la región austenítica-perlítica y la región perlítica-ferrítica, correlacionando esta deformación con el tiempo en las dos últimas regiones, con el propósito de evitar la recristalización completa de granos ya deformados.

El procedimiento del rolado de este proceso comparado con otros, es mostrado esquemáticamente en la fig 43. El proceso de rolado continuado, no solo incrementa la resistencia a la fluencia sino también disminuye la temperatura de transición tal como se muestra en la fig 44.

El mecanismo responsable por esta combinación deseada de resistencia y tenacidad es el siguiente (51):

- 1.- Refinamiento del grano, de la austenita y de la ferrita por las fuertes y repetidas deformaciones. El grano fino ha sido establecido como un fuerte contribuyente a la resistencia y la tenacidad.
- 2.- Recuperación Dinámica (Dynamic Recovery), produciendo una estructura poligonal fina. La estructura de la celda formada con deformaciones a - -

480°C (900°F) contiene densas y enredadas dislocaciones en los bordes de la celda y una alta densidad de dislocaciones dentro de las celdas.

3.- Textura cristalográfica resultante del proceso de transformación. Se encontró que esta textura cristalográfica fué principalmente de una orientación "cubica esquinada" por ejemplo : $\{111\} = \langle 110 \rangle$ cuya intensidad aumentó con la disminución en la temperatura de acabado y el aumento en la cantidad de reducción en la zona ferrítica. La tenacidad aumentó con el incremento de esta textura cristalográfica. Los dos problemas operacionales asociados con la técnica del rolado continuado son : 1) Pesadas cargas de laminación, debido a la deformación a bajas temperaturas 2) Tiempos largos necesarios para enfriar las planchas a estas bajas temperaturas de laminación.

Es reportado que (51), el primer problema puede ser solucionado reemplazando las pesadas reducciones a bajas temperaturas por varios pases rápidos de bajas reducciones. El segundo problema puede ser resuelto usando camas auxiliares de enfriamiento y/o acelerado enfriamiento por agua o vapor de agua.

Nota : No ha sido posible obtener mayor información adicional de los siguientes procesos d, d, e, y, f.

c) Nippon Kokan K.K. Acero X70 - "Ferrita Acicular"

Es basado en la microestructura ferrítica Acicular, producida bajo condiciones de Laminación -- Controlada. Ofrece una resistencia a la fluencia de 540 N/mm² y 50% de fractura dúctil con una temperatura de transición de -84°C en planchas de 15.8 mm. de espesor. Estas propiedades son obtenidas de una alta deformación (60%) a temperaturas inferiores de 900°C. El análisis químico es mostrado en la tabla XII así como los análisis químicos de los procesos siguientes.

d) Nippon Kokan K.K. Aceros X 70-Perlita - Reducida

La Resistencia a la fluencia obtenida es de 50 -

kg/mm², con un CVN (Charpy Vnotch) de 50%, FATT (Fractura Appearance Transición Temperatura), esto es : el impacto por el método Charpy con cizalladura en "V", produce una fractura de apariencia dúctil de 50% del area correspondiente a una temperatura de transición de -72°c en planchas de 12.7mm de espesor.

e) Hoesch "Novar" Acero X-70 "Perlita Reducida".-
La resistencia a la fluencia es de 54 Kg./mm² y la tenacidad Transversal a 20°c. es de 4.2Kg-m (30 ft-Lb). Las propiedades de estos aceros son altamente dependientes de las velocidades de enfriamiento después del laminado.

f) August Thyssen .Acero de bajo carbón al Titanio :
Adiciones de titanio proporciona refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y controla la forma de las inclusiones de sulfuros, pero requiere de aceros completamente desoxidados. La aleación ha sido producida para satisfacer los requerimientos del acero tipo X-70 en planchas de 8 mm de espesor; las pruebas mecánicas indican un CVN de 50% de fractura dúctil correspondiente a una temperatura de transición de -15°c a -20°c; la energía absorbida por el impacto es de 28 Kg-m (200 ft-lb).

4.1.2.-INSPECCION Y PRUEBA DE LAS PLANCHAS .-

Los filos de las planchas son inspeccionados ultrasónicamente para la detección de laminaciones, previniendo la incorporación de defectos que puedan iniciar fracturas. La superficie de las planchas es inspeccionada generalmente con aparatos impulsadores de ondas, para la detección de costuras, hoyos, desgajaduras, etc. que pueden actuar como cizalladuras artificiales. Varios intentos han sido hechos para mecanizar la inspección de planchas (27). Algunas plantas de laminación, están equipadas con facilidades para la completa inspección ultrasónica donde los bordes y el centro de la plancha son inspeccionados simultaneamente.

Pruebas de las propiedades mecánicas de la plancha, es también importante, las propiedades de tensión e impacto son convencionalmente transversales a la dirección del rolado. Para obtener aprobación de su acero, el producto de planchas puede hacer pruebas de soldadura con especímenes longitudinales y transversales tal como lo indica la especificación americana A.P.I y otros.

4.1.3.-FABRICACION Y SOLDADURA.-

El método de soldadura, mas común para la producción de oleoductos y gaseoductos de gran diámetro es el de soldadura de arco-sumergido (SAW"ó submerged-arc welding"). La tubería con costura longitudinal tiene ventajas y desventajas.

Las ventajas son principalmente:

- a) La longitud de la soldadura es minimizada.
- b) La tubería es facil de formar.
- c) Relativamente, altos indices de producción son logrados

Las desventajas son:

- a) La dirección de la plancha es normal a la dirección del mayor esfuerzo de tensión.
- b) La longitud de la tubería es limitada a la longitud de la plancha de que se dispone.
- c) Tiene una severa tendencia a la deformación (ovalidad) debido a la forma como se forma.

Los pasos principales en la manufactura de este tipo de tuberías son (27) (52) (53): Esquileo; planeamiento; Rizado; Doblado; Soldadura; Expansión y Acabado. Fig. 45, muestra la secuencia de operaciones para la producción de operaciones para la producción de una Tubería de 25.4mm. de espesor, de 1423mm (56") de diámetro, soldada en longitudes de 18.9 metros, en la siderúrgica Nippon Kokan-- (Japón) (53).

En la operación de esquileo y aplanamiento, una máquina esquiladora se encarga de cortar en forma cuadrada la parte delantera y posterior de la plancha, Los costados son cortados a bisel como preparación de la plancha para la soldadura, los filos son limpiados para de esta forma producir una soldadura limpia.

El rizado consiste en doblar los filos de los costados de la plancha con el fin de evitar superficies planas cerca de la costura longitudinal de la tubería. Para esta operación la Nippon K. usa una prensa de 1.500 Ton. de capacidad. El doblado de la plancha a tuberías se realiza en dos etapas; primeramente a la plancha se le da la forma de "U" y luego es prensada hidráulicamente para darle la forma de "O", quedando lista para la soldadura. La Nippon Kókan, usa una prensa de 40,000 Ton. de capacidad, para esta última operación. Subsecuentemente, la parte interior y exterior es limpiada con agua caliente a presión con el fin de remover cualquier sustancia grasosa que pueda perjudicar la operación de soldadura.

En la soldadura por el método de arco sumergido, la coalescencia es producida por el calor de arco eléctrico de los electrodos al contacto con el material que se suelda. La soldadura es cubierta por una capa de material fusible que se deposita sobre el material.

El calor producido por el arco, funde el material fusible, el cual se mantiene fundido por el continuo flujo de corriente; luego el electrodo se funde y queda depositado como material de relleno. Este material de relleno en el estado fundido, desplaza al material fusible y forma así la soldadura. Máquinas soldadoras especialmente diseñadas, tienen la triple función de depositar el material fusible a lo largo de la unión que se va a soldar; alimentar el electrodo y transmitir el flujo de corriente a los electrodos.

Las máquinas para la soldadura externa e interna son usualmente de una cabeza y dos electrodos (arco delantero y arco posterior) P.W. Ramsey et al (54) reportó el uso de una máquina soldadora de una cabeza con tres electrodos (arco delantero, arco medio y arco posterior) que puede producir soldaduras mucho más rápidas; mas o menos 75% mas rápidas que de una cabeza con dos electrodos.

El diámetro final de la tubería es obtenido con la operación de expansión hidráulica o mecánica. En la expansión hidráulica la tubería es colocada en una máquina de expansión, la cual cuenta con abrazaderas que aseguran la tubería, luego --

se la llena con agua a presión y se produce la expansión hasta los límites que marcan las abrazaderas. Esta operación, también sirve como un test. hidráulico.

En la expansión mecánica, consiste en introducir a la tubería un dispositivo cilíndrico que se puede expandir hasta el diámetro interno deseado para la tubería.

Nippon Kokan, escogió el tipo de expansión mecánica, debido a las siguientes ventajas, comparado con el método de -- expansión hidráulica:

- a) Mas alta eficiencia para la expansión de tuberías de -- gran diámetro.
- b) Facilita la manufactura de tubería, cuando el cliente especifica el diámetro interior.
- c) Mejora la redondez de la tubería.
- d) Mejor uniformidad en la configuración de la tubería en toda su extensión sin causar defectos, especialmente en los extremos.

Como última operación de fabricación de las tuberías para oleoductos, está la inspección ultrasónica o radiográfica (lo cual se discutirá en el capítulo IV) y por último el -- biselado de los bordes para la operación de soldadura "In Situ".

4.2.- TUBERIAS SOLDADAS EN ESPIRAL

4.2.1.- Producción de Tiras (Strip):

La combinación de deformación con tratamiento térmico, tratamiento termo-mecánico, es también aplicable (como en la producción de planchas) a la producción de tiras para oleoductos de alta resistencia y alta tenacidad. Probablemente el método mas promisorio para el control del tamaño del grano en la producción de tiras, es el -- control de la velocidad de enfriamiento del producto en la zona anterior a la de enbobinado. En este caso, el principal efecto es asociado con el control de la velocidad de enfriamiento a travez de la transformación, antes del embobinado (55). Sin embargo la velocidad de -- enfriamiento en la zona de la austenita, puede también ser importante, especialmente cuando el enfriamiento es realizado inmediatamente despues de la deformación plástica.

Los principales variables en el tratamiento termo-mecánico que afectan las propiedades finales de la tira son:
(22)

- a) Cantidad y velocidad de la deformación.
- b) Temperatura final.
- c) Tiempo demorado entre la deformación; velocidad de enfriamiento y temperatura de embobinado.

La deformación en un laminador en caliente, múltiple, puede conducir a diferencias en estructura, cuando la operación es hecha en incrementos separados por tiempos de retención diferentes a diferentes temperaturas. También puede ser mostrado (22), que la deformación debe ser completa, arriba de la temperatura crítica superior. Tal práctica permite que el acero rolado pase a través de la fase de transformación después de que todo el trabajo en caliente es finalizado, produciendo así un grano de ferrita fino equiaxial y uniforme.

La práctica de enfriamiento empleada, determina fundamentalmente las propiedades del acero. Cuando la operación de rolado finaliza arriba de la temperatura crítica superior, se obtiene granos uniformes de ferrita y el enfriamiento en la mesa transportadora determina las características de precipitación de los carburos y hasta cierta forma, el tamaño de grano.

La velocidad de enfriamiento en la mesa transportadora de salida y la temperatura de embobinado, ambas tienen un marcado efecto en la microestructura formada y en la cantidad y tamaño de partícula de los precipitados (55). La fig 46 muestra, para un acero determinado, el efecto de estos factores en las propiedades de resistencia a la fluencia y tenacidad; puede verse que óptimas propiedades se obtiene solo con aumentar la velocidad de enfriamiento y a bajas temperaturas de embobinado. Investigaciones mostraron (55), que aceros con diferentes análisis químicos requieren diferentes condiciones de enfriamiento, si es que óptimas propiedades quieren ser obtenidas.

El embobinamiento a aproximadamente 650°c. (1,200° F.), produce un carburo fino esferoidal disperso en una matriz

de ferrita fina, resultando así una bobina dura y de excelente ductilidad. Igualmente, templados drásticos producen varios estados de transformación del carburo, incluyendo la martensita (12). El efecto de las diferentes -- temperaturas de enbobinado en las propiedades mecánicas es mostrado en la fig. 47; puede ser apreciado que el enbobinado abajo de 595 ° c. (1,100 F.) puede ser logrado, resultando un material con mejores propiedades.

Para una tira (strip), de mayor espesor (12.7mm), como -- en el caso de tiras para tuberías es necesario obtener un tamaño de grano fino de austenita en la salida del último laminador, pero también es muy importante minimizar la -- demora antes de la operación de enbobinado y tener un -- sistema variable de enfriamiento donde la velocidad de enfriamiento mas rápida sea lograda al comienzo de la meza de enfriamiento.

Varios métodos han sido desarrollados para la operación de enfriamiento en la mesa de salida, cada uno con sus ventajas y desventajas; el enfriamiento por agua es el -- mas comunmente usado. (chorros de agua, tanques, chorros de agua a alta presión, flujos laminares de agua). La -- principal desventaja (56), con el enfriamiento por agua, puede ser la dificultad en controlar el enfriamiento, carencia de uniformidad en los efectos debido al enfriamiento y la necesidad de grandes volúmenes de agua fría.

Na Nippon Kokan K.K. (56) ha desarrollado un método, que dice tener igual o mejor eficiencia que el enfriamiento con chorros de agua a alta presión, con un bajo consumo de agua fría y con una gran capacidad de proporcionar un buen control sobre un gran rango.

El método consiste en crear una llovizna o niebla, al inyectar un pequeño volumen de líquido en un flujo gaseoso e inyectar la niebla o llovizna atomizada, en una lanza estrangulada para el caso de un flujo de velocidad subsónica o en una lanza convergente-divergente para el caso de un flujo ultrasónico. El flujo emitido es dirigido sobre la superficie de la tira o plancha a ser enfriada; una lanza "ranurada", es recomendada cuando lanzas --

múltiples, son requeridas para dar un enfriamiento uniforme en el sentido transversal de la tira o plancha. También es reportado (56), que los siguientes factores influencian la eficiencia del enfriamiento; la presión del aire, la proporción agua/aire, el ángulo de inclinación de la lanza y la velocidad del chorro de llovizna; siendo los dos primeros los factores mas importantes. La -- fig. 48, muestra el mejoramiento en la resistencia a la fluencia (para diferentes espesores), que puede ser logrado con el uso de este nuevo método.

4.2.2.-Inspección y Prueba del Material.

En los modernos laminadores de tiras en caliente han sido incorporados varios elementos de control automático con el fin de ayudar a los operadores, en producir una tira de buena calidad. La tira (superficie, ancho, espesor, temperatura de acabado etc.), es controlada en diferentes lugares de la línea de producción y la localización de los equipos de inspección, han sido mas o menos, estandarizados (12).

Los mas modernos laminadores de tiras en caliente (tal -- como el laminador continuo de 84 pulgadas, en la Siderúrgica Gary U.S.A. (12), usan en el último laminador un medidor de ancho y un medidor de rayos X, para el espesor. Un cilindro laminador de contornos accionado hidráulicamente es instalado en cada uno de tres últimos laminadores del "Stand", para ayudar al operador a controlar la uniformidad del espesor en los costados de la tira.

Un medidor de rayos X para el ancho y el espesor es instalado en el último pase.

La prueba de las propiedades mecánicas de la tira pueden ser las mismas que la prueba para las planchas; pruebas de tracción e impactos son convencionalmente transversales a la dirección del rolado, pero pruebas o test longitudinales pueden ser especificados, pruebas de soldadura pueden también llevarse a cabo como en el caso de -- planchas.

La principal desventaja en controlar la tira en comparación con planchas, es que debido al sistema de producción

las propiedades de la plancha son chequeadas con mas frecuencia. En la tira las propiedades mecánicas son chequeadas solamente al principio y al final de esta forma es mucho mas difícil evaluar las propiedades, digamos en la lí-
ta de la tira.

4.2.3.-Fabricación y soldadura.

El desarrollo de técnicas de rolado para tiras ha hecho posible la producción de oleoductos de alta resistencia soldados en espiral. Un caso típico es la fábrica de tuberías "Spencer" (Inglaterra), que produce tuberías soldadas en espiral de resistencia hasta de API x-60, con -- diámetro hasta 1067mm y 12.7mm de espesor. No obstante es el criterio común de los dueños y productores de oleoductos (26) la preferencia de oleoductos soldados en espiral para usos de baja resistencia y tuberías soldadas longitudinalmente para oleoductos de alta resistencia. Hoy en día es posible desde el punto de vista económico, la manufactura de tuberías soldadas en espiral, hasta un diámetro de 2032mm. a 2540mm (57) (58). El diámetro máxi-
mo de la tubería soldada longitudinalmente esta limitada por el ancho de la plancha, mientras que en tuberías soldadas en forma de espiral es diámetro es prácticamente "ilimitado".

El diámetro de la tubería soldada en espiral no está directamente limitado al ancho de la tira, pero aumentando el diámetro, la longitud de la soldadura también aumenta (fig 49), lo cual significa mayor costo de producción. La "Costura" de la tubería en espiral es mas larga que de la tubería soldada longitudinalmente en una proporción de 13:1 a 2.1:1 y la proporción práctica ancho/diámetro de -- la tubería en espiral es 2.0:1 hasta 2.5:1.

La producción de la tubería soldada en espiral tiene lugar en una sola instalación y en forma continua. El material desenbobinado pasa a traves de una serie de rodillos aplanadores y luego a travez de una máquina soldadora que une los terminales. Los costados de la tira son -- luego preparados en un número de etapas separadas, como sigue: a) Recorte de la tira con cizallas circulares b)-

aplanamiento para obtener una soldadura suave en forma de V, doble V ó Y. c) Pre-doblado de los costados para prevenir la ovalidad de la tubería en la zona de la costura.

La tira es formada en tubería espiral por una máquina con serie de cilindros rolaadores. (57) (58).

Una vez que la tubería es formada, se suelda exteriormente e interiormente con el método de arriba hacia abajo -- (downhill), utilizando dos estaciones de soldadura de arco-sumergido. Inmediatamente despues de la soldadura externa, viene la estación continua ultrasónica que detecta los defectos durante la manufactura de la tubería. Una estación cortadora es incorporada en la línea de fabricación, para cortar la tubería en predeterminados tamaños de hasta 30 m. (100 ft) de largo.

La tubería en espiral es finalmente inspeccionada por rayos X y probada hidráulicamente. La fig 50, muestra esquemáticamente los pasos seguidos en la manufactura de -- tuberías en espiral.

Las ventajas y desventajas de tuberías en espiral pueden sumarse como sigue:

Ventajas:

- a) Tuberías pueden ser producidas hasta de 2540mm. de -- diámetro.
- b) El componente de direccionalidad de la tira está cerca a la dirección del mayor esfuerzo.
- c) Longitudes de tuberías pueden variar hasta de 30m.-- (100ft) de largo.
- d) Existe la posibilidad de manufacturar la tubería "In Situ". Esto significa que las tiras pueden ser preparadas y soldadas, localmente necesitandose, solamente el transporte de las bobinas.

Esta es una ventaja muy importante, ya que el transporte de la tubería (preformada) es limitada por su volumen, mas que por su peso.

Desventajas:

- a) Producción lenta.
- b) Se requiere de considerable experiencia y mucha téc-

nica para producir tiras dentro del límite superior e inferior de resistencia que es frecuentemente especificado.

c) Es difícil de controlar las propiedades mecánicas a lo largo de la tira. Debido a esto, este proceso (tuberías soldadas en espiral) no es muy aceptado para oleoductos y gaseoductos de alta resistencia.

4.3.-TUBERIAS SIN COSTURA

4.3.1.-Producción de la tubería:

El método mas común para la producción de tuberías sin costura de pequeño y mediano diámetro, es el proceso forjado o proceso "Pilger" y no hay otro proceso que pueda adecuadamente cubrir la producción de este rango de tubos, 152.4mm a 457.2mm (59").

El máximo diámetro que se puede obtener con este proceso, es una limitación para el uso de este tipo de tuberías en oleoductos y gaseoductos de gran diámetro. No obstante con la incorporación de la técnica del templado y revenido en la línea de producción de una planta "Pilger", se puede producir tubos de alta resistencia, buena tenacidad y buenas propiedades para soldadura, usados para calderos de presión, tuberías de transmisión de gas o petróleo etc. El proceso de producción (60), (61), usa generalmente un lingote octogonal como material inicial. El lingote es calentado hasta 1300oc, y luego punzado para hacer un hueco en el centro de mas o menos la mitad de su diámetro original.

Luego el octágono ahuecado es transportado a una máquina alargadora (Rotary piercing), para producir un cilindro de pared delgada.

La máquina alargadora es básicamente un par de cilindros en forma de barriles con guías superior e inferior. El cilindro de pared delgada es calentado a 1050oc.-1100oc., de temperatura y luego transferido a la máquina Pilger. Una barra-mandrill, es insertada a través del hueco del cilindro, así el cilindro es levantado por el mandrill, hasta la altura del alimentador Pilger. La máquina Pilger, consiste en dos unidades principales, el alimentador y el pistón. El alimentador tiene movimientos hacia adelante

y hacia atrás, producidos hidráulicamente. El pistón es empujado hacia adelante por medio de aire comprimido y es detenido para sincronizar su movimiento por medio de cilindros, los que producen el movimiento de retroceso del pistón.

El laminador Pilger, tiene dos cilindros en forma cóncava, los cuales tienen un perfil que es dividido en cuatro arcos: la boca campana; el pase acabador; el arco que libera al cilindro; y el arco que se separa completamente del cilindro.

La acción combinada de cada uno de estos cuatro arcos con el mandríl alimentador, es la que produce la tubería a partir del cilindro ahuecado.

Debido a la severidad de esta operación de forjado, los aceros usados deben tener buenas propiedades con respecto a la solidez interna; por esta razón el acero usado debe ser semi-calmado o calmado.

Trabajo de laboratorio en Clydesdale (British Steel Corporation) (62), con aceros al C-Mn-Nb con diferentes adiciones de aluminio, templados a 920oc. y revenidos a 650oc, han mostrado (fig. 51), que las propiedades mecánicas obtenidas, son mejoradas con mayores adiciones de aluminio. La temperatura de templado, también afecta las propiedades mecánicas lo mismo que el proceso de producción usado -- (Tabla XIII).

Valores de las propiedades mecánicas obtenidas en la producción de tuberías son mostrados en la fig 52.

4.3.2.-Inspección y Pruebas.

La inspección de tuberías sin costura es llevada a cabo a través del proceso (61). Técnicas de prueba no-destruktiva automática y ultrasónica son usadas extensivamente para la detección de imperfecciones; lo mismo que el chequeo del espesor de la tubería.

Los tubos son probados hidráulicamente a una presión específica, de acuerdo al tamaño de la tubería y el grado del acero. Pruebas mecánicas de tensión, de resistencia a la fluencia y de elongación, es hecha con especímenes de cada colada. Pruebas de tenacidad usualmente no es requerida por el comprador.

CAPITULO V

5. SOLDADURA DE LA TUBERIA "IN SITU"

5.1.- TECNICAS DE SOLDADURA Y CONDICIONES AMBIENTALES:

Con la creciente demanda de construcción de oleoductos y gaseoductos, el proceso de soldadura eléctrica ha reemplazado a la soldadura de fusión hecha con lanzas de oxígeno y acetileno, lo cual fué muy lento, difícil de controlar y muy propenso a la contaminación atmosférica.

Dentro de los procesos de soldadura eléctrica, el mas importante es el proceso manual "metal-arco".

El arco eléctrico es producido entre el material a soldar y el electrodo de acero de composición apropiada. El metal requerido para llenar el espacio entre las dos tuberías a soldar, es el obtenido de los electrodos mismos.

El método "Stovepipe", o método de estufa, es el mas común usado en la construcción de líneas de transmisión de gas o petróleo -- (Oleoducto o Gaseoductos). Este método emplea el proceso "Down-hill", o soldadura de arriba hacia abajo (de las 12 a las 6) y usa electrodos de tipo celulósicos. El método "Stovepipe", permite alcanzar alta proporción de deposición por tanto es mas económica. La operación de soldadura es como sigue (14):

Las juntas son alineadas con una grampa interna; la preparación de las juntas o filos de las tuberías es hecha de acuerdo al -- standard A.P.I. el cual da un ángulo de inclinación de 60°, con una separación entre filos de tubería de 1.6mm + 0.8mm a 0mm.

El primer paso o hilera de soldadura, hecha desde fuera de la tubería, será verticalmente y de arriba hacia abajo, usando electrodos de 4mm.

Cuadrantes opuestos deben ser soldados simultaneamente para -- igualar esfuerzos.

Se usa generalmente una velocidad de deposición de 500mm/minuto y una corriente de 135 a 165 amperios.

La segunda hilera o paso "Paso caliente", es hecha con mayor -- amparaje (180-210), soldando cuadrantes opuestos simultaneamente y con electrodos de 4mm.

Esta hilera de soldadura "caliente", sirve para refinar el tamaño de grano obtenido con el primer paso y a su vez "revenir"

la zona caliente afectada (Heatafected zone-HAZ), del primer paso o hilera.

Después del "paso caliente", siguen varias deposiciones para completar la soldadura; en esta operación se usan electrodos mas gruesos (4.8mm) a una velocidad de deposición mas lenta (250-400mm/minutos).

La última hilera es hecha a baja velocidad (200mm/minuto) y a baja corriente (160-180 amperios). Es hecha repartiendo la deposición a ambos lados (1.6mm a cada lado), con el fin de reforzar la costura.

La principal desventaja (63) de usar el método de "Stovepipe, es que requiere de electrodos recubiertos con celulosa que liberan grandes cantidades de hidrógeno". La solución a este problema sería usando electrodos de bajo contenido de hidrógeno, pero la principal desventaja es que este tipo de electrodos tienen una escoria muy fluida por lo tanto es muy difícil la soldadura por el método "Downhill" (de arriba hacia abajo); con el método de abajo hacia arriba (uphill), se necesitaría bajas corrientes lo que produciría bajas proporciones de soldadura y por lo tanto la producción sería baja.

Uno de los problemas mas serios en la soldadura de tuberías para oleoductos, es el problema de rajadura debido al contenido de hidrógeno (7).

El Hidrógeno se lo obtiene de los electrodos celulósicos usados en el método de soldadura "Stovepipe". El metal soldado y la plancha adyacente se vuelven susceptibles a la rajadura por hidrógeno, cuando la temperatura es superior a 800oc. y luego se enfría rápidamente para formar "martensita" (tal como sucede en el proceso de la soldadura). Las temperaturas en la soldadura "In Situ", puede fácilmente bajar hasta abajo de 200oc, a no ser que se tomen medidas preventivas especiales.

Se afirma (7), que diferentes factores, tales como la tubería misma, el procedimiento de soldadura, y las condiciones ambientales del lugar, tienen una fuerte influencia en la rajadura por hidrógeno.

El espesor de la tubería es influyente en la susceptibilidad a la rajadura; en diferentes formas. Metalúrgicamente, cuanto mayores son las chances de obtener en la zona soldada la inde-

seable estructura martensítica tal como se puede apreciar en la fig 53. La tubería de mayor espesor extraerá mas rápidamente el calor de la soldadura de una tubería de menor espesor. Por consiguiente el pre-calentamiento antes de la soldadura es muy beneficioso especialmente para tuberías de mayor espesor. Debe hacerse notar que el problema de rajadura es concerniente solamente con las primeras hileras de soldadura, ya que el calor producido por estas es beneficioso para los efectos que pueden producir las posteriores hileras de soldadura.

Para bajas temperaturas ambientales, tales como en Alaska y -- Siberia, donde el calor de las primeras hileras de soldadura se enfría rápidamente, se hace necesario el pre-calentamiento cuando se usa electrodos celulósicos. Es reportado (7) (64) que el pre-calentamiento es necesario cuando se sueldan tuberías X-60 de 16.5mm (0.65") de espesor, bajo condiciones ambientales de la Gran Bretaña.

El pre-calentamiento ofrece 3 principales ventajas:

- a) El acero es secado por una secuencia calorífica modesta.
- b) Si se le calienta y mantiene arriba de los 200oc el acero no pasará a la zona crítica de temperatura (ver fig.53).
- c) Reduciendo la velocidad de enfriamiento despues de la operación de soldadura, reduce la probabilidad de formación de martensita y también permite que el hidrógeno atrapado en el metal, se libere. Pre-calentamiento puede también ser empleado para reducir la dureza de la zona afectada por el calor (HAZ), la cual tiende a enfriarse rapidamente volviendo de mas dura que la soldadura misma

Un método alternativo que baja la cantidad de hidrógeno que pasa dentro de la zona soldada es cubriendo el arco metálico con CO₂, como una medida de protección contra el contacto atmosférico (64).

Este proceso está empezando a usarse en oleoductos; este puede ser automático o semi-automático.

En el proceso CO₂. el electrodo es relativamente un alambre delgado el cual es alimentado continuamente desde un carrete hacia una "pistola" soldadora. El CO₂, es también alimentado a traves della misma "Pistola" soldadora. El equipo usado es un tanto -- complicado y requiere precauciones especiales así como operadores adiestrados.

Ha sido estimado (63), que el contenido de hidrogeno del metal soldado con el proceso CO_2 , es menor 2 ml/100 gr. en comparación con 15 ml/100 gr. del proceso que usa electrodos celulósicos. De aqui se deduce que si se usa el método de soldadura por CO_2 , puede no ser necesario el pre-calentamiento ya que este se hace principalmente para prevenir las rajaduras debido al hidrógeno.

Con el proceso CO_2 , es posible soldar sin pre-calentaren temperaturas ambientales menores de $-30^{\circ} C$; solo si el carbón equivalente es matenido bajo 0.38%; con un carbón equivalente superior a 0.40% es recomendable calentar la tubería a $0^{\circ} C$.

Es necesaria la protección de las juntas o uniones de los fuertes vientos.

Ha sido reportado (65) que vientos con velocidades de hasta 5 a 6 Km. por hora, pueden ser tolerados sin que afecten seriamente la protección del arco, mientras que la soldadura con CO_2 , con brizas de velocidades mayores a 2 Km por hora afectan la protección del arco, necesitando se mas CO_2 , para proteger mejor el arco, creando así el peligro de un torbellino de aire, (por ejemplo, entrada de aire en el flujo de CO_2). Este problema puede ser resuelto usando una especie de tolva móvil para proteger el trabajo de la solda de los vientos. No obstante, el método de soldadura CO_2 por ser un proceso de bajo contenido de hidrógeno, esta ganando popularidad y ofrece considerable promesa para el futuro.

5.2.- ELECTRODOS USADOS:

Los electrodos son clasificados de acuerdo al método de soldadura usado: electrodos cubiertos usados por el método de soldadura de arco "Stovepipe"; y alambres usados por el método de soldadura de arco protegido con CO_2 .

Los electrodos que se encuentran en el mercado son principalmente aquellos producidos de acuerdo a las especificaciones mas comunes, las cuales son: American Welding Society (AWS) y la American Society for Testing Materials (ASTM); tambien existen la British Specification (B.S); DIN (Alemana), etc.

El tipo de electrodo incluido en la API std. 1104 (12-edición, Diciembre 1971) y en la especificación de la British Gas Council (BGC/PS/P2) son:

a) Electrodos incluidos en el A.P.I. std. 1104 (66):

- Electrodos de aceros dulce, cubiertos, para soldadura de arco: AWS A5.1
Electrodo de acero de baja aleación, cubiertas, para soldadura de arco AWS A5.5
- Barras de fierro y acero para soldadura por gas; AWS A5.2
- Electrodos de acero dulce y fundentes para soldadura por arco sumergido; AWS A5.17
- Electrodos de acero dulce para soldaduras por gas Arco -- AWS A5.18
- Electrodos de acero dulce para soldadura de arco con fundente A5.20

b) Electrodos incluidos en la BGC/ps/p2 (67):

Electrodos cubiertos; BS 639, de acero dulce y acero de mediana resistencia para soldadura manual de arco; electrodos de acero dulce, cubiertos para soldadura por arco ASTM-233 64 T; electrodos cubiertos para soldadura por arco, de aceros de baja aleación ASTM-316 64T; alambres para soldadura por CO₂; alambres para soldadura, doblemente desoxidados con Mn y Si, conteniendo $\frac{1}{2}$ % de molibdeno.

Los electrodos que contienen molibdeno y níquel, son preferidos para la soldadura de oleoductos en condiciones ambientales severas (baja temperatura). El níquel proporciona la requerida resistencia y tenacidad en la soldadura de la junta o unión, mientras que el molibdeno contraresta cualquier efecto adverso a la tenacidad.

5.3.- Especificaciones para la soldadura "In situ".-

Las especificaciones que han sido consideradas son: La API std. 1104 (12^a edición, diciembre 1971), standard para soldadura de oleoductos y facilidades relacionadas, y la British Gas Corporation PS/P2 (Febrero 1971) especificaciones para soldadura -- "In Situ" de oleoductos de acero. El propósito del API std. -- 1104 (66) es de presentar los métodos para la producción de -- soldaduras de alta calidad, por soldadores calificados, usando procedimientos de soldadura aprobados, lo mismo que materiales y equipo. Similáramente son presentados los métodos para la inspección radiográfica y de pruebas físicas hechas por técnicos calificados.

Los puntos mas importantes considerados en el API std 1104 son:

- a) Especificaciones para materiales de relleno; electrodos; alambres y gases protectores.
- b) Especificaciones para procedimientos de soldadura y pruebas de las juntas soldadas; pruebas de resistencia a la tensión, pruebas de doblado.
- c) Especificaciones para la calificación de soldadores.
- d) Especificaciones para la preparación de juntas; alineamientos, condiciones ambientales; posiciones para efectuar la soldadura Pre-calentamientos; Pos-calentamiento.
- e) Especificaciones para las pruebas e inspección; estándares de aceptabilidad; pruebas no-destructivas; procedimiento radiográfico. ect.

La especificación BSC/RS/P2, está basada generalmente en la API std 1104 (67), con la intención de reemplazar a esta en lo que se refiere al método de soldadura e inspección de oleoductos de acero.

Los puntos considerados son similares a los que considera la API std 1104, pero con dos partes principales relacionadas a la soldadura e Inspección; a) Soldadura: Especificación para materiales de soldadura (electrodos, gases, equipo); Especificación para procedimiento de soldadura y pruebas mecánicas; Macro-examinación; Dureza; Prueba Charpy; Especificación para calificación de soldadores; Especificación relativo a la preparación para la soldadura "In Situ" (alineamiento, Pre-calentamiento, soldadura, reparación). b) Inspección: Especificación para standard de -- aceptabilidad.

CAPITULO VI

6.- PRUEBAS DE INSPECCION

6.1.- EFEECTO BAUSCHINGER

Cuando se extrae un trozo de latubería y se lo golpea para aplanarlo y obtener así el espécimen de tracción API, la deformación que sufre el espécimen debido a la compresión, reduce la resistencia a la fluencia debido al efecto "Bauschinger"; mientras que el trabajo en frío adicional hecho en la parte interior del espécimen, aumenta la resistencia a la fluencia. En adición a esto, esfuerzos residuales son introducidos lo cual, complica mas aun el comportamiento de deformación de los especímenes.

La explicación mas probable del efecto "Bauschinger" es aquella dada por Orowan (63), que atribuye dicho efecto a la interacción entre las dislocaciones afectadas y la distancia promedio a traves de la cual las dislocaciones se mueven durante la deformación inicial y como la densidad de dislocación aumenta con una reducción en tamaño de grano, se desprende que el efecto "Bauschinger" será mayor en los aceros de grano fino y de alta resistencia. Gokyu et.al. (68) explica la dependencia del efecto "Bauschinger" del tamaño de grano, diciendo: "El borde de grano forma una barrera para el pasaje de las dislocaciones" Una comparación entre el espécimen API aplanado y el espécimen hidráulicamente (ring expansion test), muestra (69), que los valores del esfuerzo de fluencia obtenidos son mas bajos cuando se usa el primer tipo de test que cuando se usa el segundo tipo -- de test (fig 54).

Cuando el esfuerzo de fluencia del material es en exceso de 310 N/mm² (45,000 p.s.i.), las disparidades de valores de esfuerzo de fluencia obtenidos, aumentan conforme aumentan los niveles -- de esfuerzos de fluencia.

Resultados obtenidos (68), comparando el valor de la resistencia a la fluencia obtenido con el espécimen aplanado y el obtenido con el espécimen expandido hidráulicamente, muestran una diferencia de mas o menos 4 Kg/mm² entre los dos tests, tal como -- puede ser visto en la fig 55.

6.2.- Valoración de las pruebas de Tracción:

Cuando la plancha es convertida a tubería, las propiedades mecánicas, tales como el esfuerzo a la fluencia, sobrevienen un cambio (68), que de acuerdo con las propiedades de tracción transversales de la tubería según el método de tracción estipulado -- por la A.P.I., no son las mismas a como son en las tuberías, -- simplemente porque la tubería es aplanada en frío.

Investigaciones de las variaciones de resistencia a la fluencia cuando la plancha es transformada en tubería, han sido llevadas a cabo en tuberías de gran diámetro, soldadas por el método de arco sumergido (68). Los resultados de estas investigaciones para la distribución de la resistencia a la fluencia a través de -- todo el espesor de la tubería, antes y después de la expansión, son mostradas en la fig. 56 y fig 57 respectivamente.

La distribución de valores de resistencia a la fluencia de la tubería de acero, antes de ser expandida es relativamente uniforme a través de todo el espesor, pero estos valores son mas bajos (mas o menos en 10 Kg/mm²) comparado con la resistencia a la -- fluencia de la plancha de acero la cual es 48Kg/mm²}; este fenómeno es debido al efecto Bauschinger. Nominalmente la distribución de valores de resistencia a la fluencia en la parte externa de la tubería por estar sujeta a deformaciones de compresión, debido al aplanamiento es bajo y uniforme. Pero la resistencia a la fluencia del interior de la tubería que esta sujeta a deformaciones de tracción, es aumentada remarcablemente debido al endurecimiento por trabajado (Workhardening).

La distribución de resistencia a la fluencia de tubería de acero después de expandida, es relativamente uniforme; pero comparada con el de la tubería antes de ser expandida, el nivel de -- fluencia aumenta en 10Kg/mm² aproximadamente y este valor es muy cercano al de la resistencia a la fluencia de la plancha de acero. Se vé claramente que este fenómeno es causado por el endurecimiento por el trabajo, debido a la expansión.

También puede notarse que la distribución de los valores de fluencia, después de aplanar la tubería ya expandida son muy diferentes de aquellos valores de fluencia tomados antes de la expansión. El valoramiento de las variaciones de valores de fluencia en una tubería de acero, es mostrada en la fig 58, para antes y después de la expansión.

Cuando la tubería de acero antes de ser expandida, es aplanada, la resistencia a la fluencia en la parte interior, aumenta considerablemente, tal como es indicada por la parte achurada del lado izquierdo de la fig 58. Pero como la reducción de la resistencia a la fluencia causada por el efecto Bauschinger es grande el valor de la resistencia a la fluencia es menor que el de la plancha de acero, el cual en este caso es también de 48Kg/mm². Cuando la tubería de acero después de ser expandida es aplanada, el aumento de la resistencia a la fluencia en la parte interior de la tubería sujeta a esfuerzos de tensión, debido al aplanamiento la resistencia a la fluencia es reducida, debido al efecto Bauschinger, tal como puede apreciarse en la -porción achurada del lado derecho de la fig 58.

La fig 59, ilustra la variación en los valores de resistencia a la fluencia los que pueden ser obtenidos al formar la plancha en tubería; el acero tiene un tamaño de grado ASTM, de 10 a 13.

El cambio en resistencia a la fluencia de una plancha BP x 65 (British Petroleum de 65,000 P.s.i) cuando es transformada en tubería, es mostrada en fig 60.

Estos resultados fueron tomados de la sección laminadores de la fábrica Dalsell (British Steel Corporation-Special Steel División), que laminan planchas B.P x 65 y luego son transportadas a la fábrica Hartlepool (British Steel Corporation-Steel Tubes División), en donde se forman en tuberías.

6.3.-Valoración de la Prueba Hidrostática.-

Es necesario determinar si la tubería puede soportar la presión que se le aplica en la práctica.

La prueba de presión hidrostática de acuerdo a la especificación API, es determinada de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$P. (p.s.i) = \frac{2 \text{ st} \dots\dots F.10}{D}$$

Donde: P= Presión de prueba.

S= Porcentaje de la mínima resistencia a la fluencia, especificada.

T= Espesor de la tubería.

D= Diámetro exterior de la tubería.

El valor de "S" según la especificación API es de 90% y según la

especificación suplementaria "Gas Council" (British), el valor de "S", es de 95% de la mínima resistencia a la fluencia especificada.

Es reportador (70), que se está incrementando el número de compañías que están realizando pruebas hidrostáticas hasta la fluencia actual, como una prueba de pre-servicio de la tubería. Performances del servicio de tuberías probadas de esta forma, ha sido reportadas que son enteramente satisfactorias.

Los defectos tales como imperfecciones de superficie, o pequeñas cizalladuras introducidas durante la construcción de tuberías, pueden ser eliminados durante la prueba hidrostática.

Investigaciones han sido llevadas a cabo (70), para establecer una relación cuantitativa, entre el nivel de la prueba (test), hidrostático y el cambio en propiedades mecánicas y el tamaño y número de defectos que han sido eliminados.

Cuando se probó a la fluencia actual una tubería de acero tipo X-52 de 347.2 Km (217 millas) de longitud de 762mm (30") de diámetro y de 9mm, (0.375") de espesor y fué calculado que mas del 99% de la tubería cedía 1/4 % o menos, y solamente el 0.005% o sea 6 metros de los 347.2 Kms. cedían de 3/4 % a 1%. Fué deducido que la fluencia empleando dicha técnica (prueba a la fluencia actual), es muy limitada y esta bien distribuida. Estas pequeñas cantidades de cedencia o fluencia, provenientes de la prueba, no cambian mucho las propiedades mecánicas; el cambio en la temperatura de transición resultado del trabajado en frío, no es mas de unos pocos grados.

Cuando se hace pruebas hasta la fluencia actual, se eliminan muchos defectos y estos se vuelven mas pequeños cuando las presiones de prueba son mayores.

Los defectos en la tubería, crean tensiones internas que son mecánicamente liberadas probablemente porque las altas presiones son las causantes de la fluencia o cedencia de los defectos pequeños resultando en la liberación de tensiones residuales y quizás se crean también esfuerzos de compresión que son favorables (70).

6.4.-Valoración de la Prueba de Soldabilidad.

El mejor método para valorar la performance de una construcción dada, es el de simular casos identicos y luego examinar los resultados. Debido a la casi ilimitada cantidad de metales y métodos,--

Las pruebas de soldabilidad, son muy numerosas. El método de soldadura juega un papel muy importante en la producción de una unión o junta satisfactoria.

Antes de que la soldabilidad pueda ser valorada en relación a un método particular, es necesario considerar el grado de tolerancia (operacionales u metalúrgicas), y el tipo de prueba que será apropiado a la circunstancia (71).

Cualquier valoración de soldabilidad debe incluir algún estimado de la eficiencia mecánica de la unión. Con este propósito los tipos de test considerados por la API y (AS Council son:

- a) Test de Impacto ; para valorar latencia de la junta soldada y su resistencia a la fractura frágil a la temperatura del test.
- b) Test "Nick Break" ; para examinar la fractura del metal soldado y evaluar los defectos tales como porosidades, inclusiones de escoria, etc. que puedan ser aceptados.
- c) Test de Tracción; para tener un valor cuantitativo de la resistencia de la unión soldada.
- d) Test de Doblado; para la evaluación de rajaduras ya sea en la solda misma o en la zona afectada por el calor (HAZ).

Si se quiere hacer una valoración mas exacta de la soldabilidad es esencial hacer tambien una valoración metalúrgica de la solda que comprenda el estudio de la macrosección y apariencia de la solda; el estudio de la microsección; microestructura y composición de la parte soldada.

Una buena valoración de soldabilidad debe incluir tambien, el examen visual de la solda, su tamaño, apariencia y carancia de defectos.

La mayoría de test de soldabilidad estan diseñados para verificar que la junta soldada este libre de defectos; el defecto mas serio en cualquier solda es la rajadura. Debido a que las rajaduras son usualmente asociadas con alguna forma de esfuerzos, no es sorprendente encontrar que muchos de los tests, incorporan esfuerzos en una u otra forma (72).

Las rajaduras en aceros soldados, son usualmente producidas durante el enfriamiento; por esto el control de enfriamiento debe ser requisito en cualquier test diseñado a evaluar la tendencia de un material a rajarse en la zona afectada por el calor.

El test que controla la severidad térmica (control thermal seve-

rity- CTS),hasido diseñado paravalorar la tendencia alarajadura ; este test particular es muy importante especialmente durante la soldadura "in situ" ,bajo severas condiciones climatológicas tal como el clima frígido del Artico.

Existen también diferentes tests para evaluar las características de fracturas de los metales soldados .

Los principales tests considerados son:(73) (ver fig.61).

a) Test Drop Weight Bulge (DWB);El especimen soldado es cortado y expuesto al impacto de un peso masivo soltado desde una distancia preseleccionada.La solda puede ser provada a las temperaturas deseadas bajo condiciones de carga controlables.

b) Test Delta;fué desarrollado parasatisfacer la necesidad de un especimen de prueba el cual incluyera la posibilidad de pruebas en condiciones estáticas o de bajas velocidades de cargas,usando un especimen que sea el prototipo de las condiciones .Una característica especial del especimen es su sensibilidad a las condiciones de la soldaduray a varios niveles de fractura,tendencia que puede ser mostrada por los elementos en la operación de solda,(la zona afectada por el calor,material que se esta soldando y la solda misma).

c) Test "Drop Weight Nil-Ductility Transition Temperature";fué originalmente desarrollado para planchas.En el test,una dinámica e inestable rajadura generada en la zona frágil del comienzo de la solda,es presentada(puesta en contacto) con el material que se esta soldando.Este test puede ser usado a varias temperaturas. Bajo condiciones de deformación plástica limitada en el test,una rajadura se extendera significativamente o no dependiendo del material y la temperatura del test.

6.5.-Valoración de la Tenacidad en los tests de Fractura.-

La correlación entre tests de laboratorio y tests a full escala es el mejor método para evaluar los valores de la tenacidad en los test de fractura obtenidos en el laboratorio.

Dos tipos de experimentos a "full-scala" han sido realizados(74) con el fin de conocer las características de la fractura en una tubería(oleoducto).

a) El test "West Jefferson":Usa longitudes cortas de tubería;6mts. (20 pies) a la cual se le aplica un liquido a alta presión.Este tipo de test ofrece la oportunidad de obtener valores de fractura

a "full-escala. La fractura es iniciada en una cizalladura hecha en forma de "V", situada longitudinalmente a la tubería.

La temperatura en el test es obtenida, circulando agua a un intercambiador de calor externo a la tubería.

b),-El test "Atenas": Este test, es realizado en una tubería enterrada la cual es presionada con gas natural. Las condiciones de este test son las mismas que las condiciones de un gaseoducto en servicio. Consiste en una tubería de 204m. (673pies), en la que una sección de 45m. (150pies) es sometida al test. Una cizalladura o ranura tipo V, de 300 a 400mm. (12 a 16 pulgadas) es hecha a lo largo de la tubería y la cual sirve para la iniciación de a fractura.

Del resultado de los tests, fotografías hechas con films a alta velocidad (fig 62), ilustran el brusco cambio en las características de propagación de la fractura a ciertas temperaturas de transición. También muestra la diferencia entre las facturas dúctiles y frágiles. La fractura ductiles son relativamente lentas y usualmente se curvan en forma de espiral al final de la propagación y justo antes de detenerse. Las fracturas frágiles son relativamente rápidas y usualmente se propagan simultaneamente en varias rajaduras.

La apariencia de la superficie de la fractura se relaciona también con la velocidad y temperatura; la velocidad y apariencia de fractura, ambas tienen bruscas transiciones con la temperatura.

A sido reportado (75), que los valores obtenidos en los test a full-escala, descritos anteriormente han sido usados para correlacionarlos con los test, Charpy (cizalladura tipo "V") y el Drop Weight Tear Tests (DWTT), que son los métodos de pruebas de laboratorios mas comunes para la valorización de la tenacidad en la fractura. Fig (63), representa la relación que ha sido observada entre el comportamiento de la propagación de la fractura en tests a full-escala y los métodos de laboratorios Charpy y DWTT. para una tubería de 762mm de diámetro, 9.52mm de espesor, hecha con un acero semi-calmado. Puede verse que el test DWTT y el test a Full-escala, estan en buena armonía con respecto a la temperatura de transición. Ha sido reportado(75), que cuando se usa el test Charpy, para

predecir el comportamiento a full-scala, primeramente es necesario el uso de correlaciones estadísticas; también, con el test DWTT, las variaciones de porcentaje de área dúctil, con la velocidad de fractura han mostrado buena correlación con el test a full-scala, no teniendo en cuenta el tipo de acero usado.

En un intento estadístico para especificar valores para la tenacidad en la fractura, han sido producidos histogramas representativos. El resultado obtenido en la computadora, usando estos histogramas, fué una curva de longitudes de fracturas versus el promedio de la tenacidad en la fractura, lo cual indicó que un nivel promedio de 85% de área dúctil de tenacidad en la fractura en pruebas Charpy o DWTT, predicen la detención de una fractura en caso de que esta fuera iniciada.

No obstante ha sido reportado que el test DWTT parece no ser de confianza; una prueba es que en un oleoducto de U.S.A., se ha producido una fractura teniendo esta el 100% de área dúctil, la fractura se produjo a niveles bajos de esfuerzos (63). Además el uso de 85% de área dúctil, requiere de tuberías de gran espesor. Diferentes tests indican que en aceros tipo C-Mn de grano fino con espesores de 1217mm el criterio DWTT del 85% de áreas dúctil no puede ser logrado con certeza a bajas temperaturas por ejemplo, a -10°C. Por esto, la ductilidad del espécimen cazallado, permite reducir el valor requerido para el método Charpy, pero necesitando un cuidadoso estimado de cada parte del oleoducto (Zona afectada por el calor, zona soldada, material soldado).

Resultados típicos (63), apropiados para aplicaciones en el Ártico, muestran que valores de C.O.D (Crack opening displacement) ó desplazamiento de la rajadura, en todas las partes de la construcción son mantenidas abajo de -300g. (fig 64 y 65. Los valores Charpy tipo "V", tomados de las mismas zonas donde fueron tomadas las de C.O.D. son dadas en la fig (66).

6.6.-Pruebas NO-destructivas:

Existen tres principales métodos de test no-destructivo, comúnmente usados en oleoductos y los cuales son complementados con la inspección visual (7).

a) Inspección Radiográfica: Rayos X o Gamma pueden ser usa-

dos, es reportado que los rayos x producen una película mucho mas clara de la solda que los rayos Gamma, con los siguientes beneficios; primeramente, las rajaduras muy finas pueden ser detectadas por los rayos X pero no por los rayos Gamma. En segundo lugar, otros defectos que pueden -- presentarse, son mas claramente definidos usando rayos X.

La técnica de la inspección radiográfica de oleoductos se ha desarrollado considerablemente. Se ha comenzado a usar la técnica panorámica que consiste en montar equipos radiográficos en trolleys especiales que viajan por el interior del oleoducto de gran diámetro. Con el advenimiento de esta nueva técnica, The Gas Council (Inglesa), ha cambiado su inspección a 100% radiográfica con el uso complementario de la técnica ultrasónica, cuando se considera necesario (64).

b) Inspección Ultrasónica: Es una técnica particularmente muy sensitiva para detectar rajaduras muy finas. Esta técnica utiliza la capacidad de cualquier superficie aire-metal -- que reflejan rayos de ultrasónido. Técnicas de transmisión comprende la medición de la intensidad de la señal que puede pasar a travez de la solda; las grietas o fallas son indicadas por una reducción en la intensidad del rayo transmitido.

Actualmente la técnica ultrasónica es usada principalmente (7):

- 1) Para valorar la interpretación de defectos encuadrados por métodos radiográficos.
- 2) En el exámen de soldas, en posiciones en las que una rajadura puede producirse debido al manipuleo de la tubería, rajaduras herméticas, finas fallas, paralelas a la superficie de la plancha que pueden no ser detectadas por metodos radiográficos, deben ser detectadas por el método ultrasónico.
- 3) Para examinar soldas hechas con procesos de arco protegido, defectos peculiares de este proceso son dificiles de detectar por métodos radiográficos.
- 4) Inspección Magnética: Detección de rajaduras con partículas magnéticas, es el método de inspección no-destructivo, mas económico, el método usa un polvo fino magnético, el que ha-

ce resaltar los defectos que se muestran como rayas en el campo magnético.

Este método es usado en oleoductos o gaseoductos de gran diámetro ya que para llevar a cabo la inspección total de las zonas soldadas es necesario hacerlo también desde dentro de la tubería. La principal ventaja de este proceso es que es menos dependiente de la pericia del operador.

Con el uso de técnicas radiográficas y ultrasónicas, la pericia del operador es un factor muy importante, ya que la detección y aceptación de defectos depende principalmente del criterio del operador.

Muchos esfuerzos han sido hechos por The Gas Council (Ingles), para asegurarse de que todos los inspectores posean un nivel adecuado de habilidad técnica.

6.7.-Dimensiones y Tolerancia:

Los principales defectos asociados con la geometría de la tubería son: la ovalidad, el desnivel en la unión de la plancha. Es reportado, que estos defectos pueden estar relacionados con la fractura debido a la fatiga de la tubería y que la duración de la fatiga puede predecirse si las mediciones de estas variables son disponibles (2).

Los especificaciones A.P.I.(3) y Gas Council (8), dan tolerancias para la ovalidad y el desnivel en la unión de la plancha o tubería (La ovalidad es relacionada con los bordes de la tuberías), La ovalidad y el diámetro de los bordes de la tubería, son muy importantes para la soldadura de juntas, La especificación API-SIX proporciona tablas relacionando dimensiones y tolerancias para diferentes diámetros de tubería.

CAPITULO VII

7. CORROSION Y PROTECCION DEL OLEODUCTO EN SERVICIO:

Los oleoductos o gaseoductos en servicio, están expuestos a medio ambientes agresivos que pueden causar desgastes de las paredes y ultimamente rajaduras.

El método de proyección del oleoducto es variable y depende del medio ambiente donde este está expuesto. La tubería puede estar sujeta a ataques mecánicos o corrosivos; el choque de cualquier objeto contra la tubería puede causar cizalladuras que pueden guiar a fracturas. La contribución mas importante al desgaste del material proviene del ataque corrosivo.

Gas natural y gas hecho industrialmente no crean problemas de corrosión interna (64).

Consecuentemente el principal uso de protección interior aplicado en la fábrica de tuberías es para prevenir la corrosión ocurrida en el tiempo entre la manufactura y el transporte al lugar de servicio.

No obstante la tubería puede ser tratada internamente usando resinas ó pinturas bituminosas (76). Ha sido sugerido que latécnica mas simple para minimizar la corrosión en tuberías de fierro o acero, comprende el procedimiento de revestimiento, conjuntamente con protección catódica.

La elección del material de revestimiento es grande y este es empleado por diferentes razones, tales como por apariencia estética, o para modificar un tanto la superficie a la vez que sirve de protección.

Las principales propiedades deseadas en un material de revestimiento protectorio son (77):

- a) El espesor del revestimiento debe ser lo suficiente para evitar el contacto de la tubería de acero con el medio ambiente.
- b) Para minimizar el daño, el material de revestimiento debe ser tenaz y la adhesión del material al acero debe ser bueno para prevenir desprendimientos.
- c) El revestimiento debe ser impermeable al agua (líquida o vapor) y a agentes desoxidantes.
- d) En casos donde protección catódica es usada, el material de re-

vestimiento debe poseer una alta resistividad eléctrica.

La elección del material de revestimiento ultimadamente depende de factores de seguridad y económicos.

Los principales tipos de materiales protectores usados son: Inorgánicos no-metálicos; metálicos y orgánicos, los no-metálicos tales como el cemento y concreto son razonablemente fuertes mecánicamente y son usados principalmente en oleoductos on-shore -- (el peso del concreto mantiene a la tubería siempre sumergida y la resistencia puede protegerla de choques de lanchas, vapores, etc.) Revestimientos metálicos a base de zinc y aluminio son usados para proteger la tubería de atmosferas corrosivas. Revestimientos orgánicos bituminosos, o plasticos son los materiales protectores mas comunes. Se debe resaltar que los materiales orgánicos son relativamente débiles y el que usa estos materiales debe prepararse a -- aceptar la posibilidad de un ataque corrosivo en las áreas afectadas mecánicamente o controlar la corrosión modificando el medio ambiente o adoptando la protección catódica. Cuando se usa el revestimiento orgánico, usualmente la tubería de acero es limpiada con chorros de agua a alta presión, con el fin de remover las cáscaras metálicas, luego es sumergida en un tanque de ácido fosfórico diluido y caliente para proporcionar a la tubería de acero, un revestimiento el cual se adhiere fuertemente al acero, que proporciona una superficie adecuada para el posterior revestimiento bituminoso. Comercialmente pueden ser obtenidos, diferentes tipos de revestimiento anticorrosivos, a prueba de agua, a prueba de vapor de agua y de alta densidad de revestimiento; los cuales ofrecen buenas propiedades de resistencia a la tracción, dieléctricos, buena resistencia al impacto y que trabajan eficientemente a bajas temperaturas (76).

Algunas veces la operación de protección de una tubería, es complicada y también costosa, tal es el caso del Oleoducto submarino del Mar del Norte (Gran Bretaña), el cual usa un acero grado X-65 de 19mm de espesor y 813mm de diámetro. Es reportado (76), que los principales pasos tomados para la operación de protección de la tubería son: La tubería es sumergida en un tanque de agua caliente antes de ser preparada, luego se le aplica un revestimiento anticorrosivo, que consiste en una envoltura interior del material

de fibra^{da} vidrio y otras exterior de fibra de vidrio impregnada con alquitrán. Despues de esta operación, se coloca un armazón de varillas de acero de refuerzo así como brazaletes de zinc, luego un revestimiento de concreto. Las varillas de acero de refuerzo son de 8mm de diámetro.

Es reportado que con este proceso, puede ser logrado un revestimiento de 60 a 80mm de espesor con una buena resistencia al impacto.

CAPITULO VIII

8. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los nuevos descubrimientos de yacimientos de gas y petróleo, el creciente mercado y factores económicos han movido la tecnología hacia la producción de materiales baratos y altamente confiables para Gaseoductos y Oleoductos.

Un oleoducto o gaseoducto representan una gran inversión y una falla en estas líneas de transmisión puede ser catastrófica, especialmente en áreas pobladas. Seguridad es el principal factor -- requerido por el comprador del oleoducto; con el propósito de satisfacer plenamente este factor, el diseño del oleoducto tiene que estar basado en tres parametros fundamentales; resistencia, tenacidad y soldabilidad.

El diseño óptimo de estos tres parámetros, es considerado en la -- especificación para el Oleoducto. La especificación API, (American Petroleum Institute), es la mas usada, especialmente para materiales de bajo grado. Pero para aplicaciones severas, el material necesita un cuidadoso diseño de tenacidad en la fractura (Fracture Toughness), la especificación API Std. 5IX, no tiene requerimientos mandatorios para especificaciones de tenacidad, por consiguiente, con el fin de satisfacer los requerimientos de tenacidad. Varias instituciones tales como la Gas Council (Gran Bretaña), han desarrollado sus propias especificaciones o han hecho correcciones y adiciones a la especificación API.

El control de análisis químicos, las técnicas de fabricación de acero y de rolado son de mucha importancia en los aceros de alta resistencia, buena tenacidad y solubilidad.

La explotación máxima de las variables metalúrgicas tales como la solución sólida, precipitación y tamaño de grano, para el aumento de resistencia, es la forma mas económica para mejorar las propiedades requeridas en un acero para oleoducto.

El contenido de carbón debe ser mantenido tan bajo como sea posible. Esto trae como resultado una substancial caída en la temperatura de transición al impacto y mejora de la soldabilidad. Las propiedades de tenacidad y soldabilidad del acero al bajo carbón pueden ser aún mejoradas empleando la técnica de decarburización

al vacío. Se sugiere el método R.H., cuando se produzca el acero por el método L.D.

La fabricación de acero en los hornos de arco electricos, tienen la ventaja que en ellos puede conseguir un acero de mas bajo carbón y azufre.

El manganeso baja la temperatura de transformación ~~X-X~~ y esto conduce a una dispersión mas fina del precipitado (CN), el cual produce un alto endurecimiento. Cuando el contenido de manganeso es mayor del 2.0%, el producto de transformación es bainítico con propiedades de impacto y soldabilidad muy pobres a menos que el contenido de carbón sea reducido a menos del 0.05%.

Cuando pequeñas cantidades de niobio, vanadio o titanio son introducidas en los aceros tipo C-Mn, la resistencia a la fluencia y la resistencia a la tensión son considerablemente incrementadas, principalmente debido al mecanismo de refinamiento del grano seguido de un endurecimiento por precipitación (en forma de finos carbonitruros), de los elementos refinadores de grano. El niobio es el refinador de grano mas potente así como también es un elemento que endurece cuando precipita, siempre que pueda mantenerse en solución durante el rolado en caliente; por consiguiente esto se consigue en la técnica de la laminación controlada.

Laminación controlada es el proceso mas "barato" para la producción de planchas, porque explota al máximo los parámetros metalúrgicos, sin el uso de aleaciones costosas para el logro de materiales con alta resistencia, buena tenacidad y soldabilidad.

Cuando se producen aceros tipo C-Mn-Si-Nb, tratados con tierras raras, con un bajo carbón equivalente (0.33-0.36) por el método de laminación controlada, se pueden alcanzar las siguientes propiedades.

(para una plancha de 9.5mm de espesor).

Resistencia a la fluencia, 72-75 K.S.I. (500-520N/mm²).

Resistencia a la tracción (máxima), 84-85 K.S.I (580-590 N/mm²)

- Resistencia al impacto, Charpy (transversal) a -10oc, 60-65pies-Libras.

El acero tipo Mn-Mo-Nb, ferritico acicular es inherentemente de grano fino debido a su relativamente baja temperatura de transformación y en adición porque contiene una subestructura con alta densidad de dislocación, lo cual hace esta microestructura apro-

piada para la producción de aceros para oleoductos. La adición de aleantes hacen de este tipo de acero, mas costoso que el que se logra con laminación controlada; pero puede considerarse como un método alternativo para los aceros del alta resistencia para oleoductos.

Mejores propiedades de resistencia y tenacidad pueden ser logrados con el proceso de "Templado y Revenido", que con los procesos de laminación controlada y ferrita acicular, pero es requiere de un equipo adicional lo cual hace un proceso economicamente menos atractivo.

Las tuberías pueden ser soldadas longitudinalmente o en espiral. Las soldadas longitudinalmente ofrecen mas garantías para operaciones a altas presiones debido a que mejores propiedades mecánicas pueden lograrse en planchas que en tiras o cintas, además que la plancha es mejor inspeccionada.

Menor cantidad de soldadura, es usada en las tuberías longitudinalmente soldadas que en las soldadas en espiral por lo tanto hay menos probabilidades de fallas o fagaduras. La homogeneidad de las propiedades en una plancha pueden ser mantenidas hasta un rango mayor de espesor. La tira con un espesor mayor de 12.7mm (0.5 pulgadas), tienen dificultades en el embobinado y la microestructura no será la misma ya que la tira tiene que ser calentada para un facil embobinamiento. Debido a las limitaciones en la producción industrial de planchas anchas, es que la soldadura en espiral es el método alternativo más económico para la producción de oleoductos de gran diámetro para operaciones de mediana presión.

La rajadura debida al hidrógeno y la composición química, son los factores mas importantes en la soldabilidad, la protección del arco de soldadura con Gas CO_2 . es preferida al uso de electrodos celulósicos, el alto contenido de hidrógeno de los electrodos, celulósicos es dañino para la soldabilidad, y se requeriría pre-calentar la tubería lo cual representa gasto adicional.

Para bajas temperaturas ambientales, menores de $-30^{\circ}C$, el proceso de soldadura con CO_2 no requiere precalentamiento.

La soldadura "In situ", es el factor que controla el avance de la construcción de oleoductos; por lo tanto está siendo considerado un proceso automático para solda de juntas y es muy probable que

todo esto juega un papel importante en el futuro. Los valores de los tests, en especímenes que representen condiciones actuales de trabajo del oleoducto o gaseoducto son los mas representativos para la valoración de las propiedades.

Con el uso de aceros de grano fino y de alta resistencia a la tensión para oleoductos, valores de 6 a 12% de diferencia pueden ser aceptados entre el test, de tracción y el test de expansión circular y se piensa que tal diferencia es suficiente para justificar la medición de la resistencia a la fluencia, ya sea aplicando el test de expansión circular o el uso de una constante de racionalización.

Los tests de impacto Charpy (Cizalladura tipo 'V') y Drop Weight Tear (D.W.T.T.) son relevantes en la mediciones de tenacidad para prevenir fallas de naturaleza frágil, que de suceder en servicio pueden ser catastróficas. Un alto nivel de energía "Charpy", es requerido para el diseño en contra de fallas de fractura de naturaleza -- "Ductil".

Las inclusiones de sulfuros (Tamaño, frecuencia, forma), dan la mayor influencia sobre el comportamiento de la fractura. Análisis de regresión múltiple ha mostrado que el factor de inclusión (I), es la variable mas importante que afecta la energía máxima "Charpy", para determinar la fractura de naturaleza dúctil.

La zona afectada por el calor es la parte mas crítica en la zona soldada y tecnicas de soldadura, deben ser mejoradas, con el objeto de obtener propiedades similares en la zona soldada, afectada por el calor y en el material que se está soldando.

Para las costuras de las tuberías son sugeridas pruebas de mecanismos de fractura que proporcionen datos de desplazamiento de la rajadura cuando estas se abren (Crack opening displacement-C.O.D.), Se prevé que con el uso de aceros de alto punto de fluencia y alta relación, resistencia a la fluencia/ máxima resistencia a la tensión, el parametro KIC, tendrá que ser usado en un futuro cercano para la valoración de la tenacidad.

Un buen control de calidad usando tests no-destructivos es esencial para minimizar los costos. Los métodos ultrasónicos y radiográficos son de garantía, siendo el primero el mas sensitivo para la detección de rajaduras finas o fallas delgadas paralelas

a la superficie del oleoducto.

El acero usado en la manufactura del oleoducto exige un balance metalúrgico fino para poder alcanzar la combinación necesaria de resistencia, tenacidad y soldabilidad. Otros materiales están siendo considerados los cuales también pueden tener las propiedades necesarias exigidas para los oleoductos; tal el caso del fierro dúctil esferoidal. Las ventajas del fierro dúctil esferoidal provienen del costo bajo del material, de la facilidad y rapidez con que puede tenderse la tubería y de la mayor resistencia a la corrosión. La principal limitación para el uso de este material en las líneas de transmisión de Gas o Petróleo es que al presente la soldadura de fierro dúctil esferoidal no es practicada y las juntas o "Nipples" disponibles no pueden ser usadas para soportar presiones mayores de 1378 KN/m² (200lb. por pulgada cuadrada). Para líneas de transmisión de Gas ó Petróleo que operan a presiones de mas de 6895KN/m² (1000lb/pulg²) el acero está sin ningún competidor serio.

A G R A D E C I M I E N T O

El autor desea agradecer al Profesor Arthur G. Quarrell al Dr. Ray Brook y al Dr. J. Whiteman de la Universidad de Sheffield en Inglaterra, por su ayuda y guía durante el curso de Tecnología del Fierro y Acero, tomado en la Facultad de Metalurgia de esa Universidad, en el año académico de 1973.

Sin el interés y cooperación de algunos miembros de varios centros de investigación y producción de la Corporación Británica del Acero (British Steel Corporation) particularmente los señores R.R. Preston; J.H. Littles, J. Kyle y K. Ramderson, este -- trabajo no hubiera sido completado.

Asimismo el autor desea agradecer, las enseñanzas recibidas de los profesores del Dpto. de Metalurgia de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

REFERENCIAS

1. W.L. Mercer 7th International Pipeline Engineering & Convention- London- June 1973.
2. R.T. Weiner et al The Gas Council Research Communication GC194.
3. American Petroleum Institute Specification (API std 5LX) March 1973.
4. M. Civallero 7th International Pipeline Engineering & Convention- London- June 1973.
5. A.G. Hayness 7th International Pipeline Engineering & Convention- London- June 1973.
6. A.R. Duffy Symposium of Line Pipe Research.
American Gas Association, Catalogue No. L-30000, 1966.
7. W.L. Mercer and D. Needham The Gas Council Research Communication GC158.
8. Gas Council Specification GC/PS/LXI- 1972.
9. D.S. Clack and W.R. Varney Physical Metallurgy for Engineers, page 128.
10. K.J. Irvine and F.B. Pickering J. Iron and Steel Institute 201 1963. page 944.
11. J.J. Irani et al Iron and Steel Institute Publ. 104 page 112.
12. The Making, Shaping and Treatment of Steel, page 1155.
13. A.A. Aronson et al Welding Journal Suppl. November 1969, page 473-S.
14. Fabrication of Large Diameter Pipeline. Case Study. IST Course 1972- University of Sheffield.
15. H. Ohtani et al Trans. ISIJ Vol. 12 1972, page 118.
16. H. Martensson Trans. ISIJ Vol II 1971, page 1073.
17. R.L. Cryderman Publication- Climax Molybdenum Company.
Et al.

18. R.E. Red-Hill Physical Metallurgy Principles, page 246.
19. J.H. Gross Iron and Steel Institute S.P. 145, 1971, page 136.
20. K.J. Irvine et al J. Iron and Steel Institute 205 1967, page 161.
21. R. Kiessling and "Non-Metallic Inclusions" Part III.
N. Lange Iron and Steel Institute Publ. 115, 1968, page 51.
22. R.L. Plaut Production of High-Strength Strip.
M. Met. Thesis 1972.
23. J. H. Little and Iron and Steel Institute Publ. 145, 1971, page 182.
W.J.Henderson
24. L. Luyckx et al Metallurgical Transactions Vol I,
Dec. 1970, page 3341.
25. A. Brownrigg and J. Iron and Steel Institute Dec. 1970, page 1078.
26. K. Randerson Private Communication.
27. The Making, Shaping and Treatment of Steel, page 1240.
28. The Making, Shaping, and treatment of Steel, page 1246.
29. R.T. Weiner et al The Gas Council Research Communication, GC194, page 11.
30. J.E. Hood and J. Iron and Steel Institute, May 1973, page 369.
R.M. Jamieson
31. R.M. Burdeking Welding Research Suppl. March 1968, page 129-S.
32. F.P. Bullen Metals Australia- Paper I. July 1972, page 179.
33. J.R. Griffiths Metals Australia- Paper 2. July 1972, page 187.
34. E.E. Banks Metals Australia- Paper 3. July 1972, page 186.
35. E.E. Banks Metals Australia- Paper 3. July 1972, page 190.

53. B. Sakai and N. Takahashi Nippon Kokan Technical Report, Overseas, December 1970, page 21.
54. P. W. Ramsey et al Welding Journal, October 1972, page 695.
55. W. von dem Esche et al. Transactions ISIJ Vol II 1971, page 1096.
56. Publication of the Technical Research Center of Nippon Kokan KK. Metals and Materials Vol. 7. March 1973, page 121.
57. H. Grohs Pipeline Industry, Sept. 1971, page 31.
58. H. Grohs Iron and Steel Engineer, Jan. 1973, page 93.
59. F.G. Carter Iron and Steel Institute Publ. 135, page 93.
60. A. Stirrat Iron and Steel Institute Publ. 135, page 77.
61. Private Visit to Clydesdale Works, Steel Tubes Division, British Steel Corporation.
62. J. Kyle and R.H. Hart Private Communication.
63. H.C. Cottom and D.B. Thomas. Iron and Steel Institute Publ. 135, page 37.
64. R.D. Emmory and R.B. Gibbon Iron and Steel Institute Publ. 135, page 27.
65. C. Bates Gas Council Research Communication GC158. April 1970, page 279.
66. API std 1104, 12th Edition December 1971.
67. British Gas Corporation, BG/PS/P2, February 1971.
68. S. Hasebe et al The Sumitomo Search No 7, May 1972. page 47.
T.C. Harrison J. Iron and Steel Institute, May 1972, page 334.
et al
70. A.R. Duffy Symposium on Line Pipe Research. American Gas Association Catalogue L 30000, page 139.

71. J.G. Tweeddale Welding and Fabrication Vol. III, page 77.
72. M.D. Jackson Welding Methods and Metallurgy, page 354.
73. L.J. McGeady Welding Research Suppl. December 1968, pag-
563-S.
74. A.R. Duffy Symposium on Line Pipe Research.
American Gas Association Catalogue
L30000, page 83.
75. R.J. Eiber Symposium on Line Pipe Research.
American Gas Association Catalogue L30000,
page 83.
76. 7th International Pipeline Engineering and Convention- London-
June 1973. Private Communication Producers.
77. R.V. Riley and Iron and Steel Institute Publ 135, page 47.
C.E. Shanahan
78. A.G. Barkow Metallurgical Society Conference,
Chicago U.S.A., 1962. Vol.16, page 133 .

TABLAS Y FIGURAS

TABLA I (ref. 49)

REQUERIMIENTOS DE ACERO EN LBS. Y \$ POR MILLA DE GASEODUCTO
GRADOS CRECIENTES

GRADO	X- 52	X- 60	X- 65	X- 70	X- 75	X- 80
ESPESOR REQUERIDO (Pulg.)	.970	.840	.775	.720	.675	.630
PESO ECONOMIZADO (Tons/Milla)						
POR ESCOGER EL GRADO SGTE.	0	164	92	71	60	58
ECONOMIA EN \$ POR MILLA						
POR ESCOGER EL GRADO SGTE.		49,200	27,600	21,300	18,000	17,000

GASEODUCTO DE 48 pulg. (1220 mm) DIAMETRO, OPERANDO A 1680 Lbs/pulg². (114 atm)

TABLA II (ref 3)

A P I Std. SLX
ANALISIS QUIMICO REQUERIDO

PROCESOS DE LA MANUFACTURA.	GRADO	C (%) Max.	Mn (%) Max.	P (%) Max.	S (%) Max.	Nb (%) Max.	V (%) Max.	Ti (%) Max.
SIN COSTURA NO EXPANDIDO	X-42	0.29	1.25	0.04	0.05	-	-	-
NO EXPANDIDO	X-46,X-52	0.31	1.35	0.04	0.05	-	-	-
EXPANDIDO EN FRIO	X-42,X-46 X-52	0.29	1.25	0.04	0.05	-	-	-
NO EXPANDIDO Y EXPANDIDO EN FRIO	X-56,X-60	0.26	1.35	0.04	0.05	0.005	0.002	0.03
NO EXPANDIDO Y EXPANDIDO EN FRIO	X-65,X-70	-	Por	acuerdo	-	-	-	-
CON COSTURA NO EXPANDIDO	X-42	0.28	1.25	0.04	0.05	-	-	-
NO EXPANDIDO	X-46,X-52	0.30	1.35	0.04	0.05	-	-	-
EXPANDIDO EN FRIO	X-42,x-46 X-52	0.28	1.25	0.04	0.05	-	-	-
NO EXPANDIDO Y EXPANDIDO EN FRIO	X-56,x-60	0.26	1.35	0.04	0.05	0.005	0.02	0.03
NO EXPANDIDO Y EXPANDIDO EN FRIO	X-65	0.26	1.40	0.04	0.05	0.005	0.02	-
NO EXPANDIDO Y EXPANDIDO EN FRIO	X-70	0.23	1.60	0.04	0.05	-	-	-

TABLA III (ref 3)

A P I Std. 5 LX
PROPIEDADES FISICAS REQUERIDAS

GRADO	Resistencia a la Fluencia		Resistencia a la Tensión		ELONGACION Mínima en 2 pulgadas (50.8 mm)
	Lb/pulg2	Kg/mm2	Lbs/pulg2	Kg/mm2	
X-42	42,000	29.5	60,000	42.2	
X-46	46,000	32.5	63,000	44.3	
X-52	52,000	36.6	66,000 72,000	46.4 50.6	VER NOTA
X-56	56,000	39.2	71,000 75,000	49.9 52.7	
X-60	60,000	42.2	75,000 78,000	52.7 54.8	
X-65	65,000	45.7	77,000 80,000	54.1 56.2	
X-70	70,000	49.2	82,000	57.6	

NOTA : La elongación mínima en 2 pulgadas (50.8 mm) deberá ser determinada de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$e = 625,000 \frac{A^{0.2}}{U^{0.9}}$$

DONDE : e = Elongación mínima en 2 pulgadas (50.80mm)

A = Area seccional del espécimen en pulgadas cuadradas

U = Específica resistencia a la tensión ,lbs. por pulgadas cuadradas

TABLA IV (Ref 38)

Efectividad de varias aleaciones de Carburo como incrementadores de la resistencia de la ferrita por efecto de precipitación interfásica

CARBURO	CALOR DE FORMACION	SOLUBILIDAD EN AUSTENITA	CARBURO COMO PRECIPITADO INTERFASICO	CARACTERISTICAS DE DISPERSION
TiC.	43.9	baja	100 %	muy fina
TaC.	38	baja	100 %	muy fina
NbC.	32	baja	100 %	muy fina
VC.	24	media	100 %	muy fina
Mo ₂ C.	11	media	50 %	fina
W ₆ C.	-	media	75 %	gruesa
Cr ₂₃ C.	4.5	alta	75 %	gruesa

TABLA V (ref T. Araki ISIJ. Vol. II 19.11)

Procesos de aumento de resistencia y elementos aleantes en el desarrollo de aceros de alta resistencia, soldables.

(1) TIPOS NO TRATADOS TERMICAMENTE :

Acero Ferrítico- perlítico (0.2%C, Si, Mn...) → Corrosión atmosférica resistente al uso : Cr
Cu + Ni, Mo, Ti, Zr.

Acero de grano fino (" " " ")
adiciones para refinar el grano (Nb, V, Al, Ti, Zr, (Be)) + (N)

Aceros libres de perlita (~ 0.05% C) + (") + (")
carbón reducido, incremento de aleantes + (solución sólida substitucional Ni, Mn, No, Cr, Cu)

Laminación Controlada (Tratamiento termo- mecánico)
enfriamiento rápido y continuo.

Acero de ferrita acicular o acero bainítico de alta resistencia.
Alto contenido (Mn, Ni, Mo....) + (")

(2) TIPOS TRATADOS TERMICAMENTE

Aceros martensíticos revenidos (o bainíticos de bajo carbón)
Poco aleados : (Ni, Mn, Cr, Cu, Mo), (B), (Al, V, N) → (usados a bajas temperaturas : alto Ni.)

+ Adición doble { Reacción doble de Carburo
Endurecimiento por envejecimiento substitucional
Cu-M₃-C, Ni-Cu- Ni- Al (+ Nb, V, CxN y)

Carbo- (nitruro) doble
Mo- Nb-C, Nb, Cr- C, Ti- Mo- C.

Elementos aleantes que aumentan la tenacidad + (")
Alto contenido (Ni, Co, Mo, Mn.)

TABLA VI (ref. 42)

TEMP.	C. 10 % C.	0.15% C.	0.20% C.
1200°C.	0.072 Nb.	0.048 Nb.	0.036 Nb.
1250°C.	0.105 Nb.	0.071 Nb.	0.053 Nb.
1300°C.	0.15 Nb.	0.102 Nb.	0.077 Nb.

TABLA VII (ref. 41)

RANGOS DE PROPIEDADES TÍPICAS OBTENIDAS EN LAMINACION CONTROLADA HASTA 1970

Rangos de composición	Rangos de espesores de planchas (mm)	Resistencia a la fluencia N/mm ²	Tenacidad temp. °C. para :	
			27 J.	50% FATT
Carbono equivalente : 0.35- 0.39	17.8 - 25.4	428	-45	- 50
		483	-70	- 70
% Nb. 0.027- 0.037	12.4 17.8	417	-35	- 20
% Si: 0.22- 0.33.		530	-100	-110
Carbono equivalente : 0.39 - 0.46	10.2 18.0	445	-25	- 25
		573	-100	-115
% Nb : 0.037- 0.058				
% Si : 0.24 - 0.40				

$$\text{Valor de Carbono equivalente} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

TABLA VIII (ref 44)

PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO (Mn- Nb) : TEMPLADO EN AGUA DESDE LAS TEMPERATURAS FINALES DE LAMINACION , 950°C y 750°C REVENIDOS SUBSECUENTEMENTE.

TRATAMIENTO	DATOS DE TENSION				DATOS DE IMPACTO		
	LYP/ 0.2% Ps. Tens/ pulg ²	UTS. Tons/ pulg ²	R.de Area o/o	Elong. o/o	LYP UTS	T°C 40lb. pie	Charpy " V " 0°C lb- pie
950 Templado agua	35.6	50.6	73.2	27.0	0.64	-78	145
+ revenido 550°C/hora	41.2	46.6	75.7	34.8	0.88	-75	> 126
+ revenido 600°C/hora	43.6	48.6	75.7	30.5	0.90	-55	> 80
+ revenido 675°C/hora	40.8	44.9	76.9	29.1	0.91	-52	160
750 Templado agua	33.4	51.2	74.1	27.7	0.59	<-140	180
+ revenido 550°C/hora	39.4	43.7	77.8	27.8	0.90	-135	180
+ revenido 600°C/hora	39.9	44.3	75.7	31.2	0.90	-99	170
+ revenido 675°C/hora	36.6	41.4	77.2	28.4	0.88	-88	180

NOTA : LYP = LowerYield Point

PS = Proof Stress

UTS = Ultimate Tensile Stress.

TABLA IX (ref. 5)

PROPIEDADES MECANICAS DE LA PLANCHA DEL ACERO NICUAGE TIPO 2 HECHO EN UN HORNO ELECTRICO DE 100 Ton.

Sección mm.	Resistencia a fluencia Kg/mm ² .	U.T.S. Kg/mm ²	Impacto en Charpy "V" Kg/cm ² -46°c.		Kg/cm ² -46°c.		
			20°c. Long.	Trans.	Long.	Transv.	
<u>Rolado (R) y Rolado más envejecido 1 hora a 590°c. (R.A.) :</u>							
4.8 R	54	65	20	-	19	-	
4.8 RA	72	73	18	-	18	-	
6.4 R	50	64	24	-	23	-	
6.4 RA	68	71	22	-	20	-	
9.5 R	46	61	25	16	22	11	
9.5 RA	65	68	25	15	25	7.3	
13 R	52	64	26	15	16	8.4	
13 RA	65	69	23	14	10	7.4	
19 R	43	62	19	-	6.7	-	
19 RA	58	70	19	12	8.8	2.8	
<u>Normalizado 1 Hora a 900°c. (N) Normalizado más envejecido 1 hora 59°c. (NA)</u>							
9.5 NA	55	60	16	-	15	-	
32 N	34	51	51	-	20	-	
32 NA	50	57	41	32	32	20	
51 N	33	51	41	-	26	-	
51 NA	50	56	41	26	32	19	
<u>Templado y envejecido (1 hora 900°c. y 1 hora 650°c.) (QA)</u>							
9.5 QA	63	67	-	18	-	20	
13 QA	58	63	-	20	-	20	
19 QA	54	60	-	24	-	23	
32 QA	52	59	-	28	-	26	
51 QA	48	55	-	28	-	22	

TABLA X (ref. 5)

PROPIEDADES MECANICAS DE SOLDADURAS CON ARCO SUMERGIDO EN PLANCHAS
12.5 mm DE ESPESOR

	Rolado en caliente Soldadura	Rolado en caliente Soldadura, más envejecido.*	Rolado en caliente más envejecido.* luego soldadura.	Rolado en caliente más envejecido* luego soldadura y re-envejecido.*
0.2 % Y.S. Kg/mm ²	55	64	57	60
U.T.S. Kg/mm ²	65	67	66	64
Elongación % 25 mm.	36	23	33	31
Charpy "V" Kgm/ cm ² .				
<u>SOLDAD</u>				
20°C	16.2	10.4	18.3	13.8
-18°C	11.4	6.7	15.2	5.7
-45°C	5.4	4.0	6.2	2.1
-75°C	2.8	2.6	3.3	1.0
<u>ZONA AFECTADA POR CALOR</u>				
20°C	17.8	19.4	18.5	15.4
-18°C	16.4	16.4	19.7	18.7
-45°C	9.0	9.5	14.2	14.2
-73°C	5.5	10.0	3.8	14.2

* 1 hora 650°c.

TABLA XI (ref. 5)

PROPIEDADES MECANICAS DE SOLDADURAS CON ARCO METALICO MANUAL EN PLANCHAS

DE 12.5 mm DE ESPESOR

ELECTRODO	Rolado en caliente Soldado	Rolado en caliente envejecido*soldado	Rolado en caliente envejecido*soldado reenvejecido.	Rolado en caliente envejecido*soldado	Rolado en caliente envejecido*soldado re-envejecido.
<u>ELECTRODO</u>	E 8016- CI	E. 8016- CI	E 8016- CI	E 9018 M.	E 9018 M.
0.2 % Y.S. Kg/mm ²	49	58	60	54	58
U.T.S. Kg/mm ²	59	68	66	67	65
Elongacion %.					
25 mm. CHARPY "V" Kg/cm ² .	11	33	40	18	38
<u>SOLD.</u>					
20°c.	13.0	13.5	16.4	19.6	21.5
- 18°c.	11.2	10.0	11.1	14.3	17.3
- 45°c.	8.6	7.8	7.8	11.1	5.4
- 73°c.	5.9	5.2	4.3	3.1	1.2
<u>ZONA AFECTADA POR CALOR</u>					
20°c.	15.4	17.1	18.5	18.5	20.4
- 18°c.	15.2	13.7	15.6	17.7	15.6
- 45°c.	21.1	13.7	11.8	12.1	14.9
- 73°c.	2.6	9.3	6.7	9.7	6.9

* 1 hora 650°c.

E 8016- CI (bajo hidrogeno - potasio) 0.05 C, 2.4 Ni, 0.8 Mn.

E 9018 M (bajo hidrogeno - polvo de hierro) 0.04 C, 1-65 Ni, 1-0Mn, 0.3 Mo.

TABLA XII (ref. 49)

COMPOSICION QUIMICA DE OTROS TIPOS DE ACERO PARA OLEODUCTOS y/o GASEODUCTOS (% peso)

	C	Si	Mn	P	S	CU	Cr	Ni	Nb	V	Ti
NIPPON KOKAN K.K. ACICULAR	.060	.32	1.62	.013	.005	.27	.27	.16	.035		
NIPPON KOKAN K.K.	.08	.21	1.34	.014	.005	-	.20	-	.032	-	-
HOESCH NOVAR	.10	.33	1.25	.026	.017	-	-	-	.03	.06	-
AUGUST THYSSEN ACERO AL TITANIO	.06	.20	.80	.006	.012	-	-	-	-	-	.12

TABLA XIII (ref. 62)

ACEROS DE ALTA RESISTENCIA TEMPLADOS Y REVENIDOS PARA OLEODUCTOS y/o GASEODUCTOS
 TRATAMIENTO EN LABORATORIO CON PLANCHAS DE 1/2" DE ESPESOR
 (Nitrogeno - 0.012 - 0.020 %)

TIPO DE ACERO	CONDICION	PROPIEDADES DE TENSION			PROPIEDADES DE IMPACTO		
		Resistencia a la Fluencia (Ksi)	Resistencia a la tensión (Ksi)	Elongación (%)	F.A.T.T. °C	Charpy "V" max. (pie lb.)	Charpy "V" 50% (pie-lb)
C-Mn- Nb (bajo Al) 121	Normalizado	56.6	74.8	35	- 45	135	70
	T&R. 600°C	72.9	87.3	25	- 70	140	120
	T&R 650°C	71.6	84.4	27	- 86	150	140
C-Mn- Nb (Al) 123	Normalizado	62.6	72.1	31	- 60	140	80
	T&R 600°C	91.0	97.0	20	- 80	130	120
	T&R 650°C	77.7	90.0	22	- 95	145	130

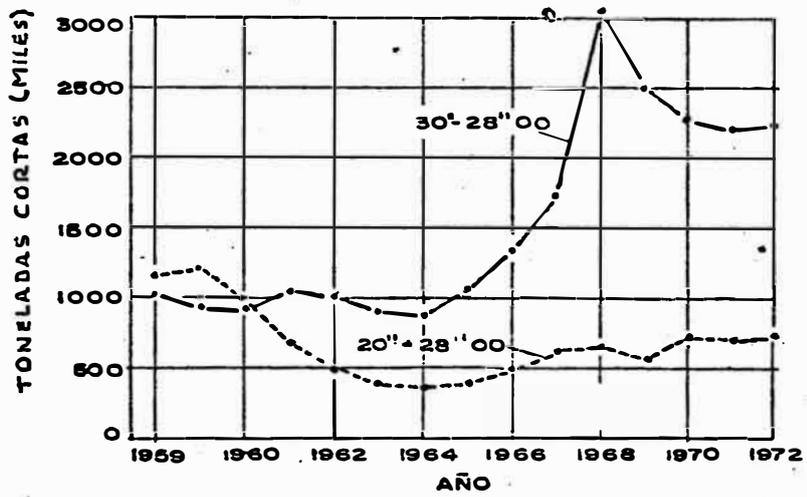
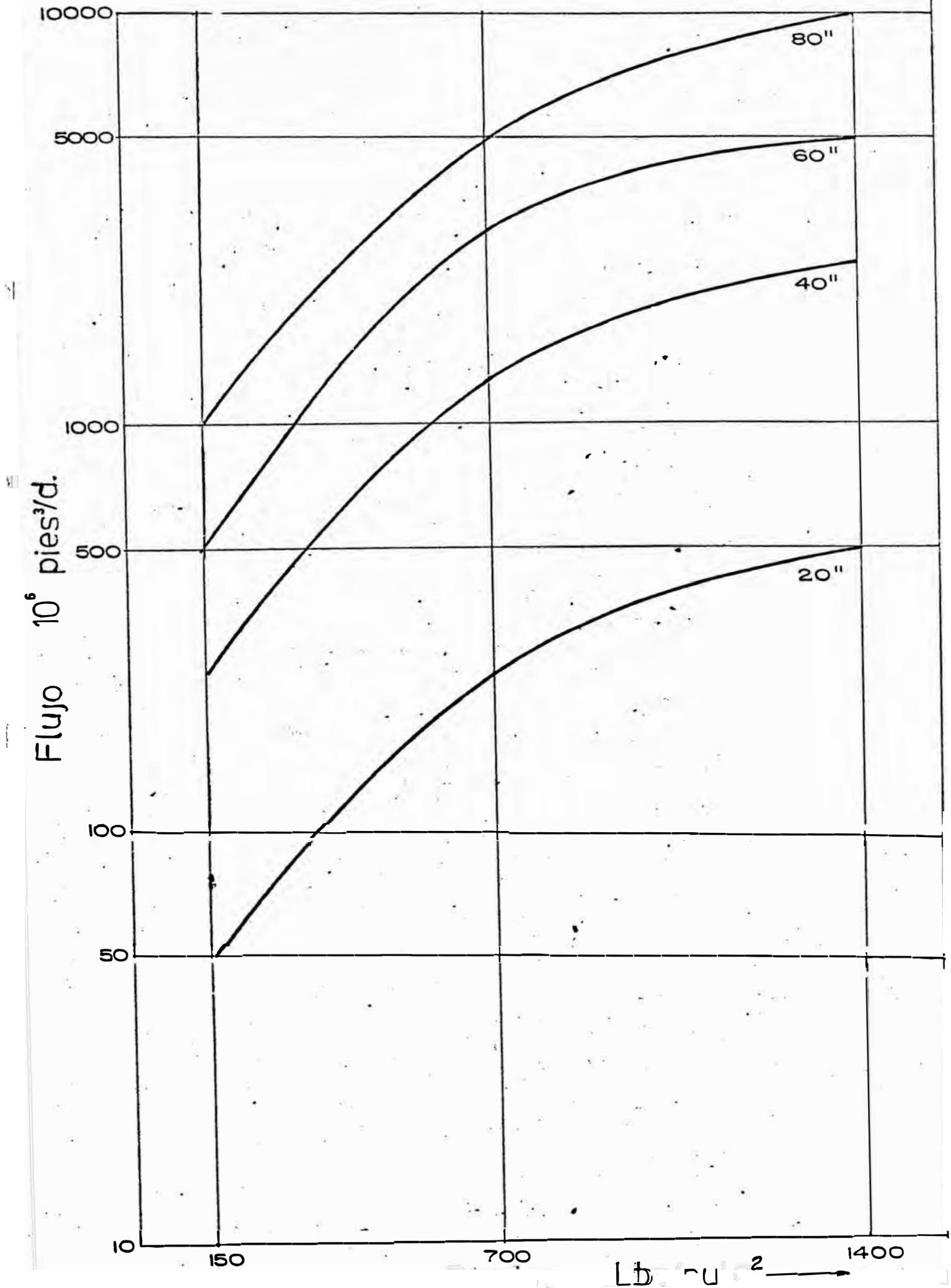


Fig. 1 Construcción de Oleoductos y Gaseoductos en el Hemisferio Occidental (ref.58)

Fig. 2 CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE TUBERIAS EN FUNCION DEL DIAMETRO Y PRESION (Basado en Fig. 2 Ref. 58).



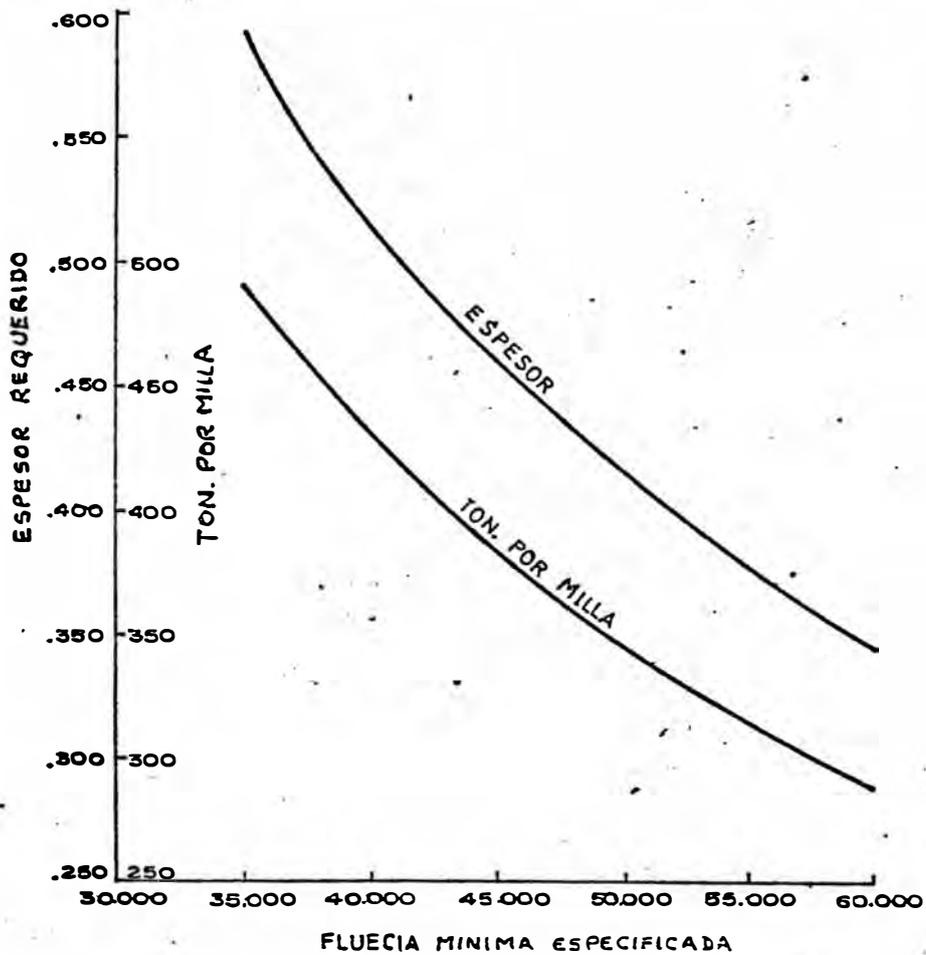


Fig.3 Reducción en material con el aumento de resistencia en tuberías de 30 pulg. OD. y 1,000 psig. de presión operativa. (ref.78)

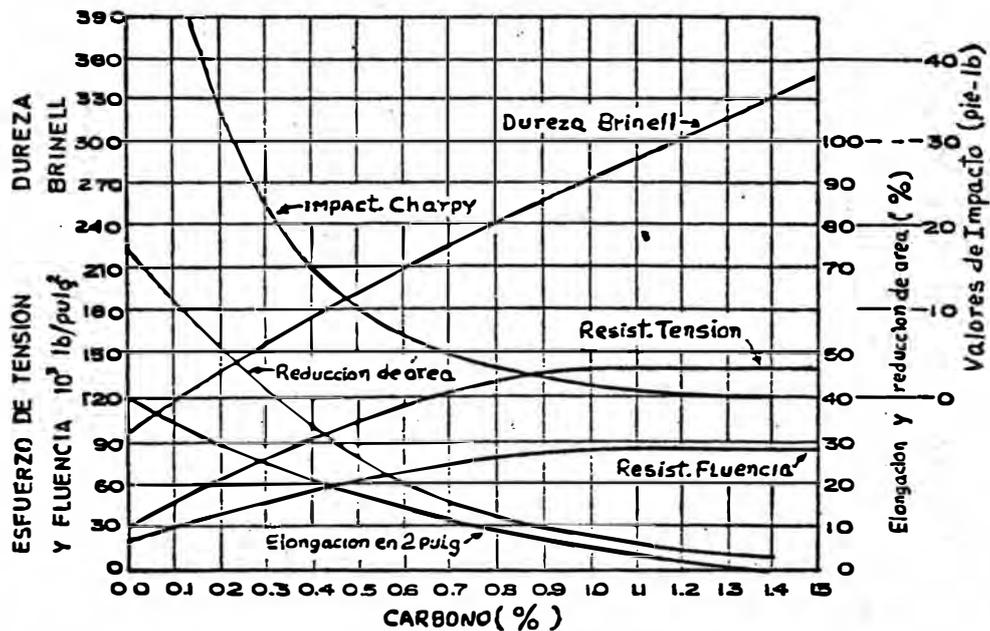


Fig.4 Efecto del carbón en las propiedades mecánicas de un acero trabajado en caliente. (ref.9)

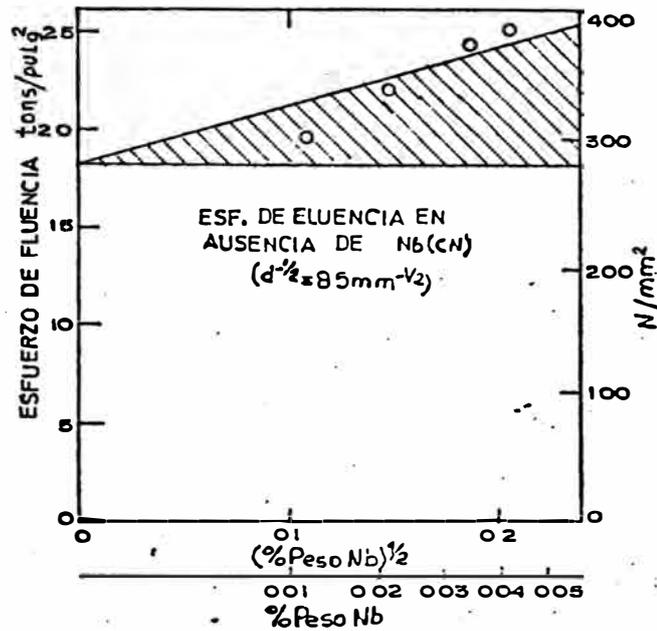


Fig.5 Efecto del Nb. en el esfuerzo a la fluencia. (ref.22)

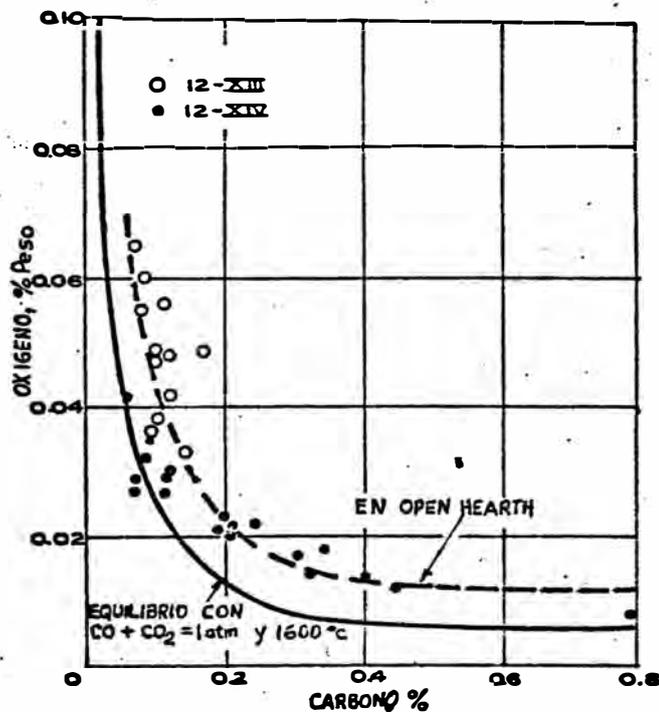


Fig.6 Relación carbono/oxígeno bajo condiciones de equilibrio ($P_{CO} + P_{CO_2} = 1 \text{atm.}$ y 1600°C) y en coladas Open-hearth. (ref.12)

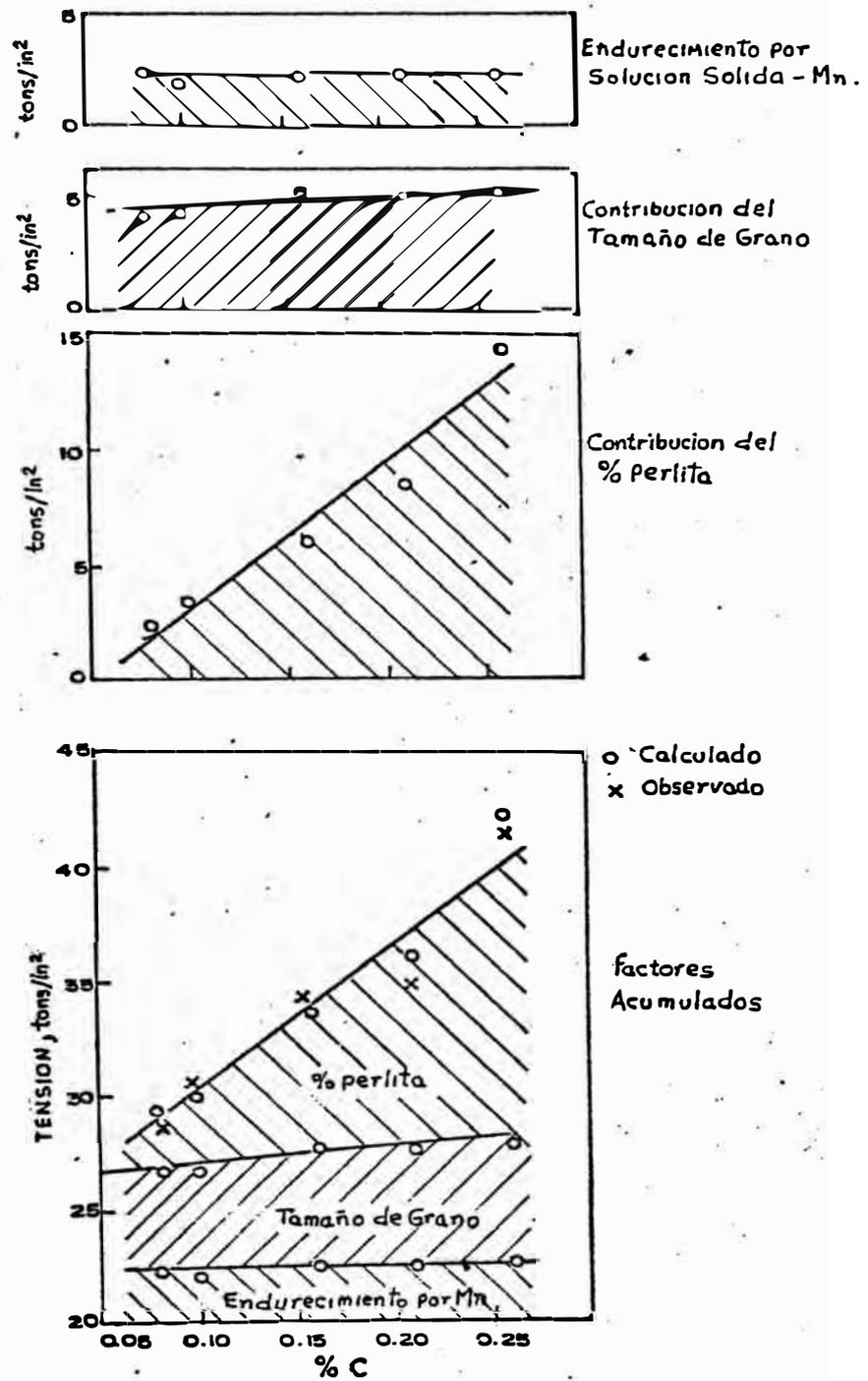


Fig.7 El efecto de C, en la resistencia a la tensión en aceros 1.0%Mn normalizados. (ref.10)

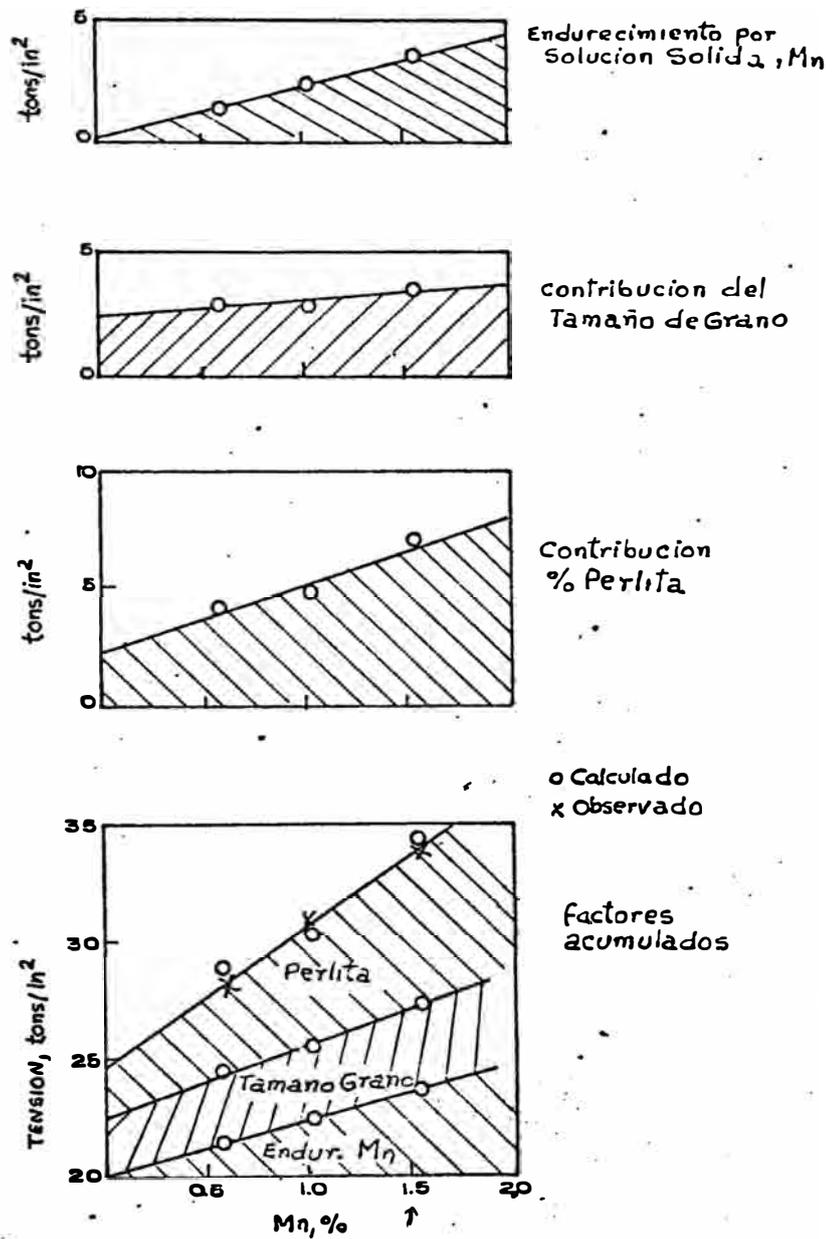


Fig.8 El efecto de Mn en la resistencia a la tensión en aceros 0.15% C. recocidos. (ref.10)

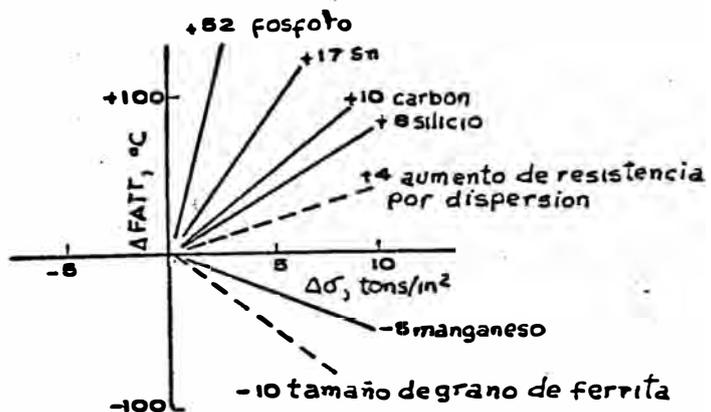


Fig.9 Mecanismos que aumentan la resistencia y sus efectos en la fragilidad. (ref.20)

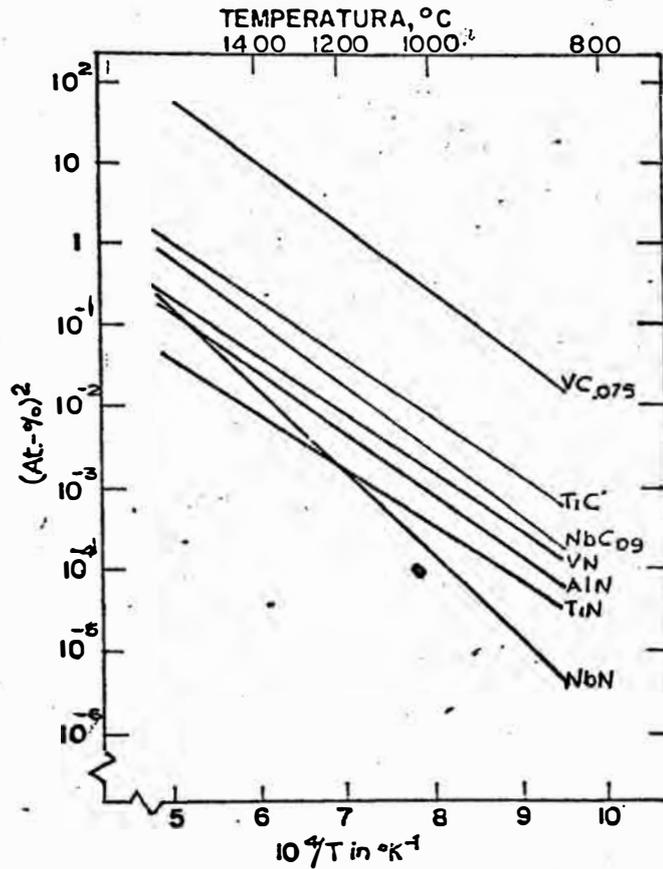


Fig.10 Solubilidades de Carburos y Nitruros en austenita (según Aronsson). (ref.38)

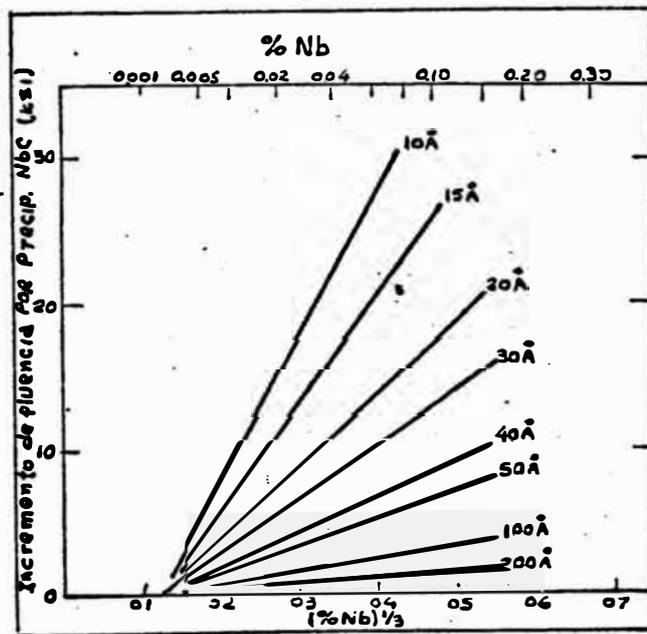


Fig.11 Efecto del tamaño de partícula en precipitados de NbC₆, que aumentan la resistencia. (ref.22)

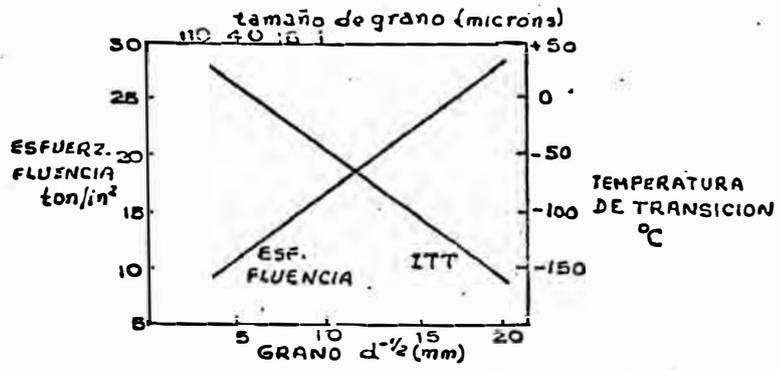


Fig.12 Efecto del tamaño de grano de la ferrita en el esfuerzo a la fluencia y la ITT (0.1%; 0.5% Mn, 0.2%Si, 0.006%N) (ref.22)

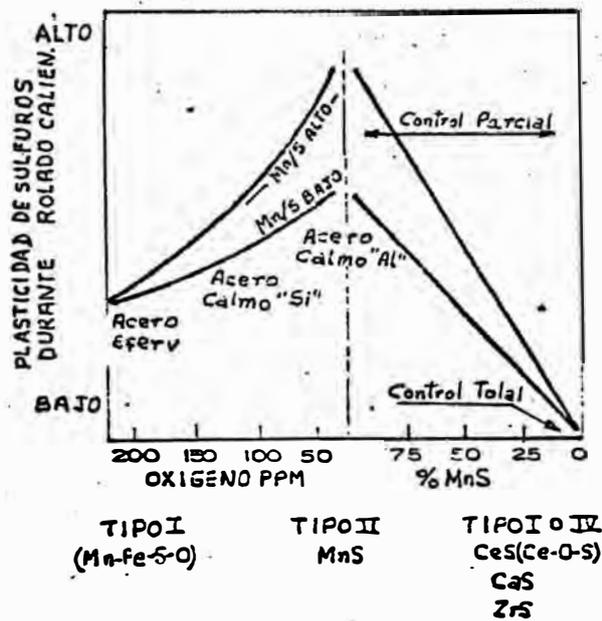


Fig.13 Efecto del contenido de oxígeno, Mn/s y el modificador de sulfuros, en la plasticidad de sulfuros durante el rolado en caliente. (ref.24)

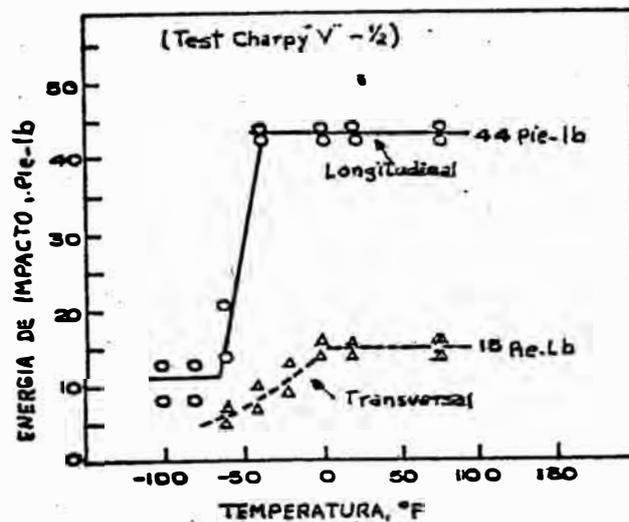
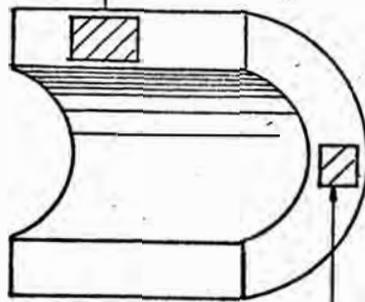
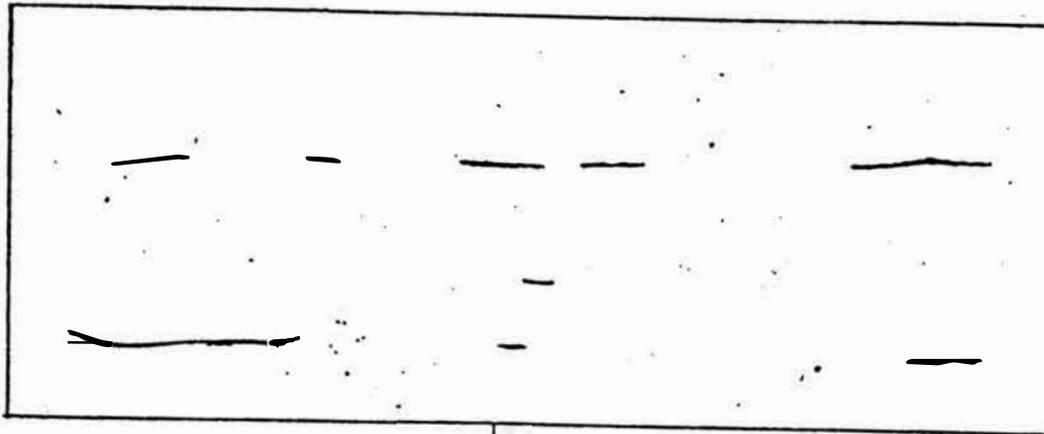


Fig.14 Curvas típicas para aceros HSLA. (ref.24)



SULFUROS DE MANGANESO EN
SECCION LONG. Y TRANSVERS. (X500)

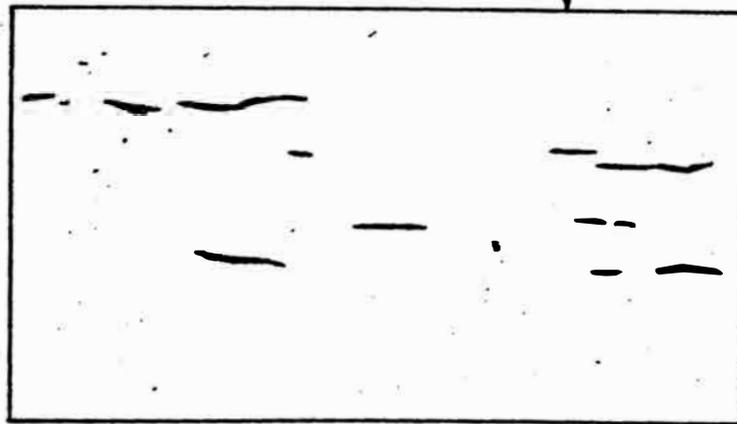
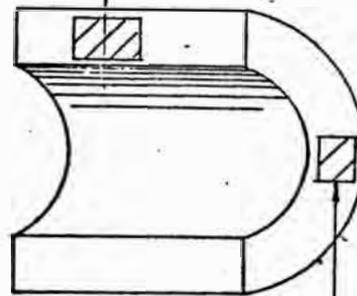
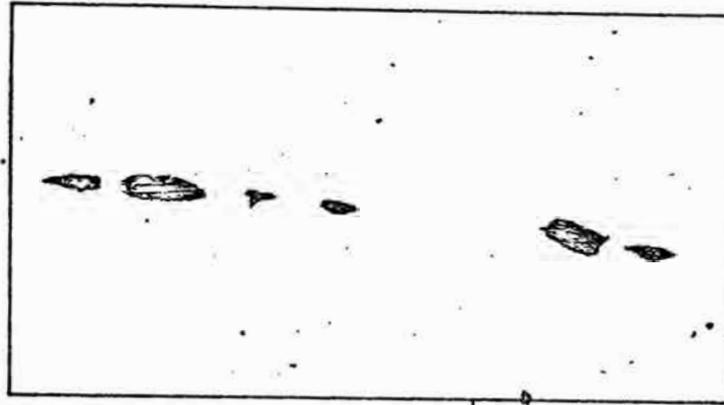


Fig. 15 (ref.2)



Sulfuros de metales raros
en seccion transv. y long.(X500)

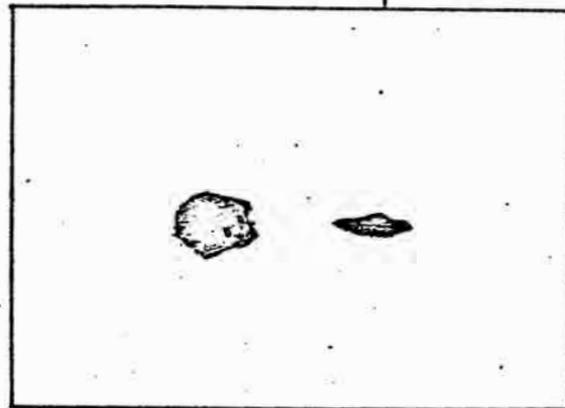


Fig. 16 (ref.2)

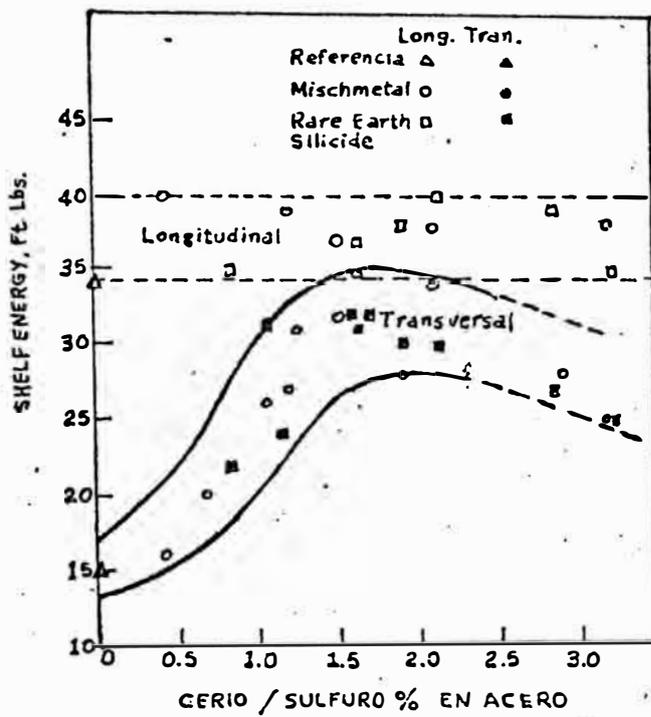


Fig.17 Relación entre la máxima energía dúctil determinada en especímenes Charpy "V" Longitudinales y Transversales y la relación Ce/S.(ref.24)

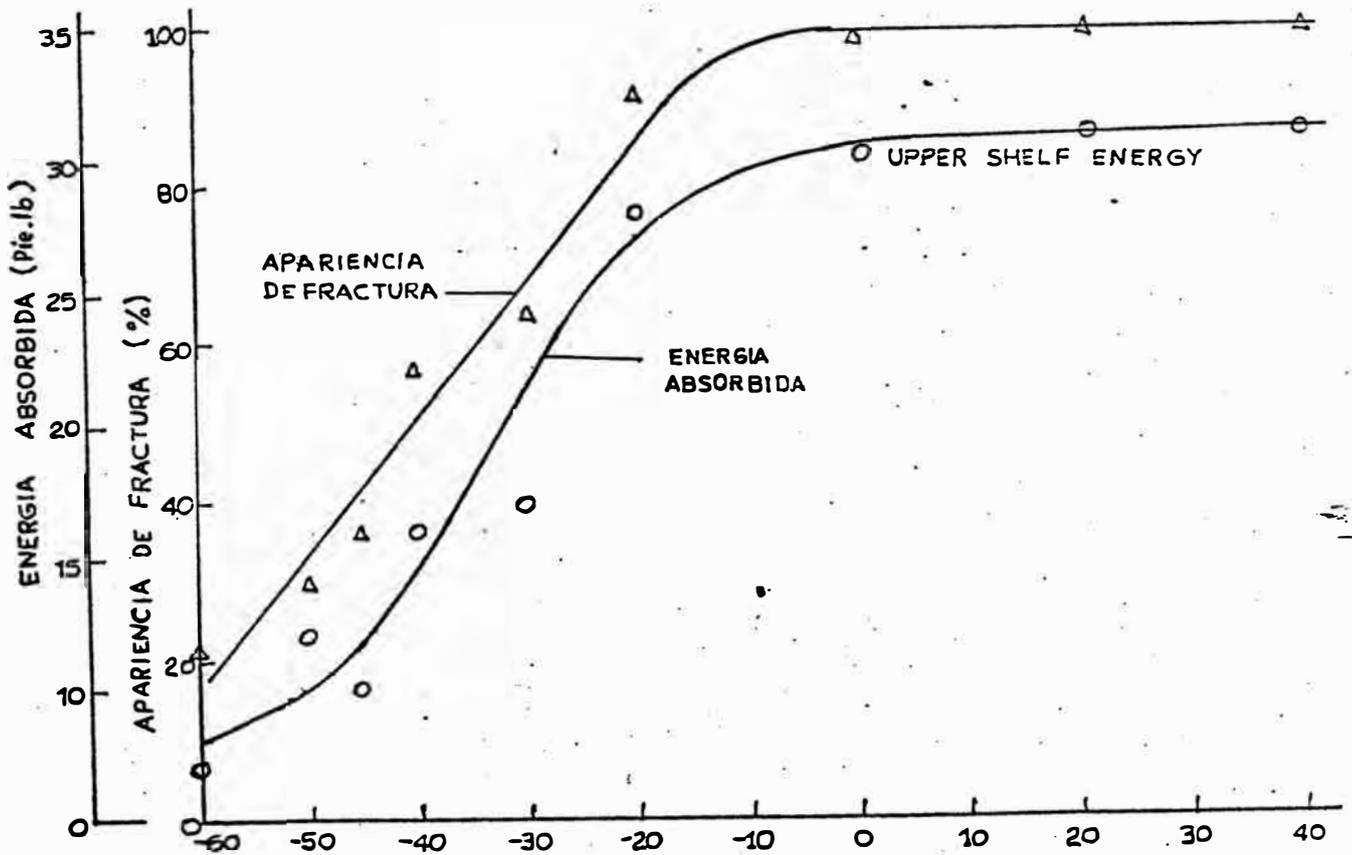


Fig.18 Curva de transición Charpy para aceros de gasoducto, LX 60 (Gas Council) para 1,972. (ref.2)

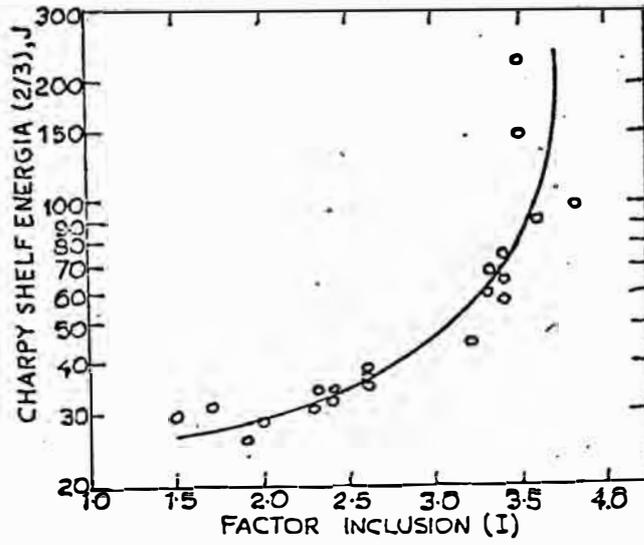


Fig.19 Efecto del factor de inclusión en la máxima energía dúctil Charpy. (ref.30)

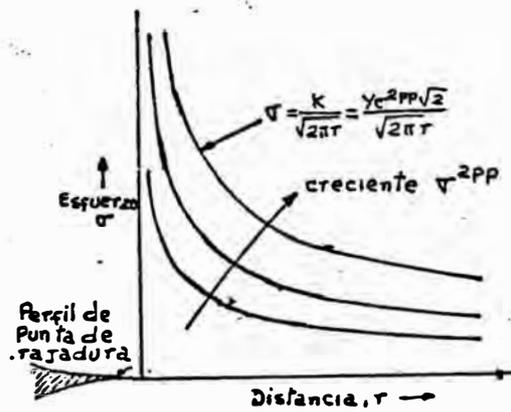


Fig.20 Distribución de esfuerzos delante de una rajadura.(ref.33)

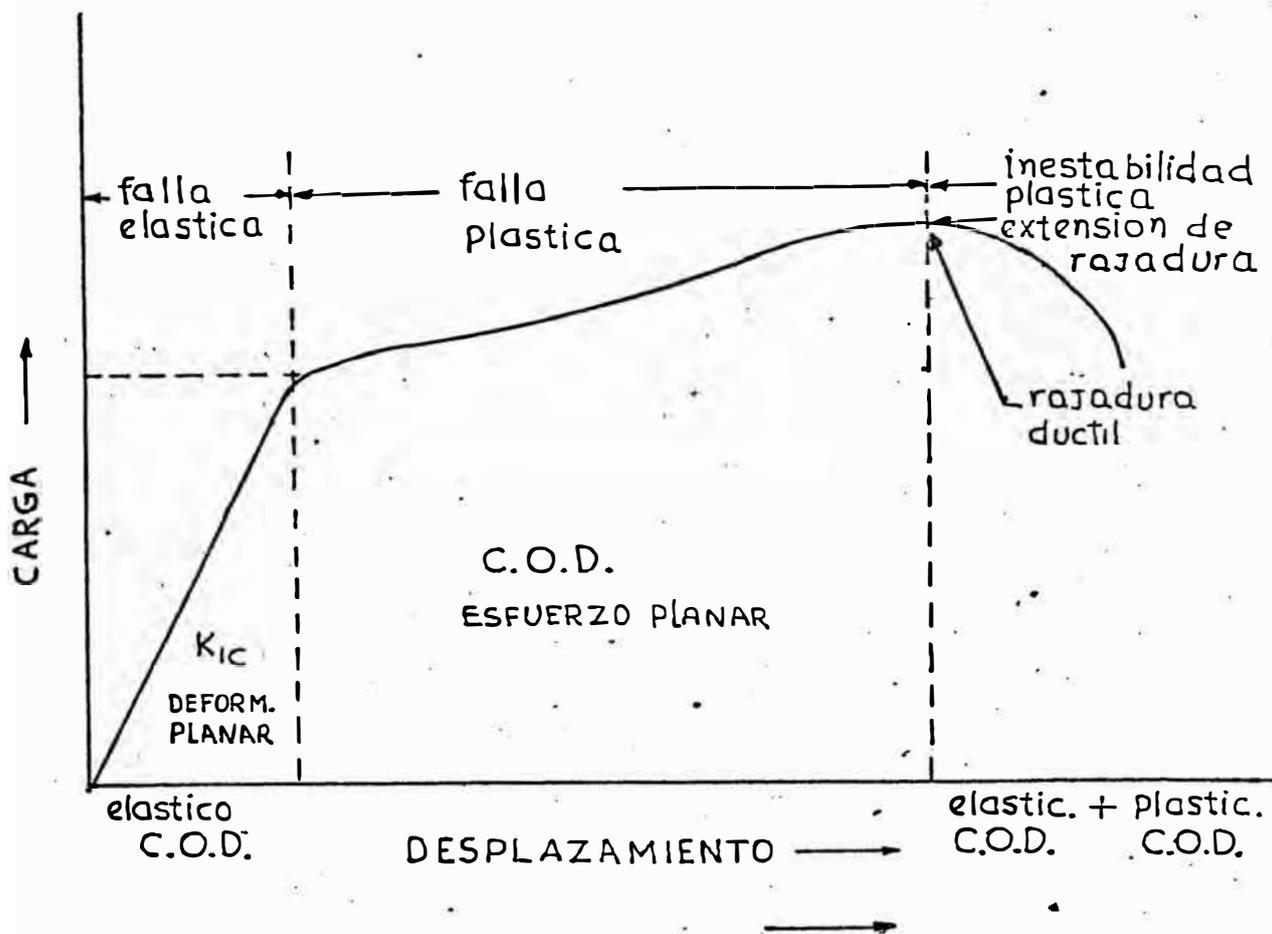


Fig. 21 Diagrama generalizado indicando el rango de interés del C.O.D. (desplazamiento normal de la rajadura) (ref. 34)

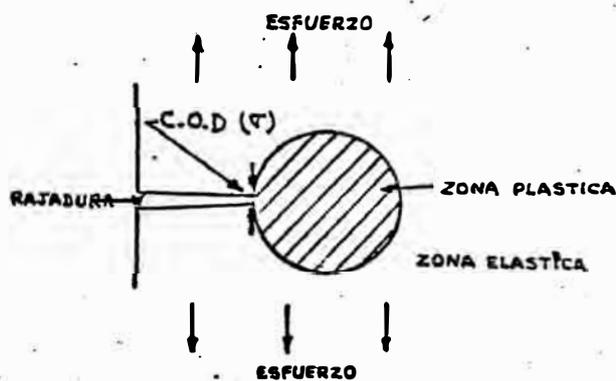


Fig. 22 Formación de la zona plástica asociada con el C.O.D. (ref. 34)

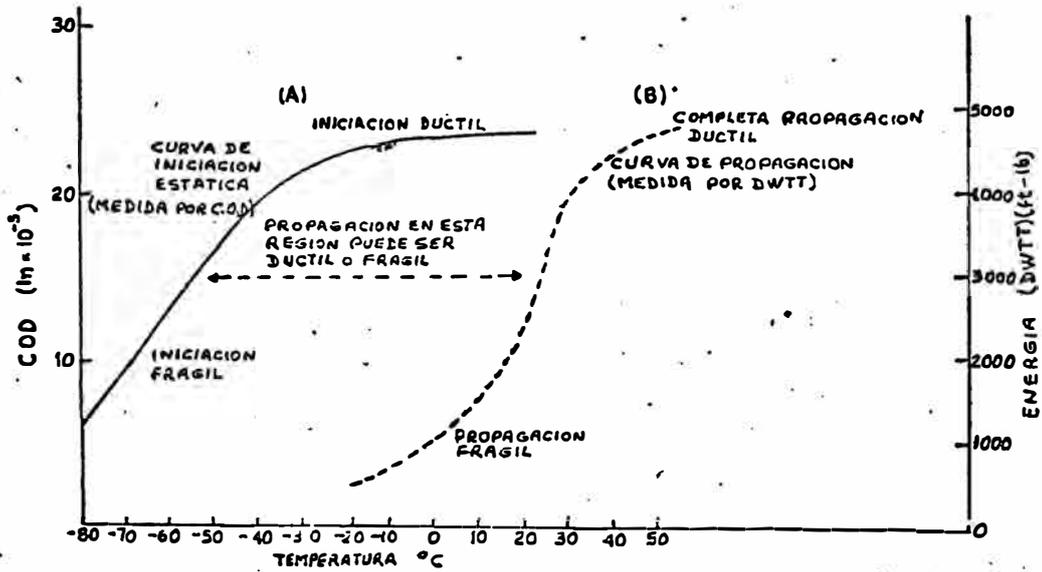


Fig.23 Curvas de iniciación y propagación para un acero de baja aleación. (ref.35)

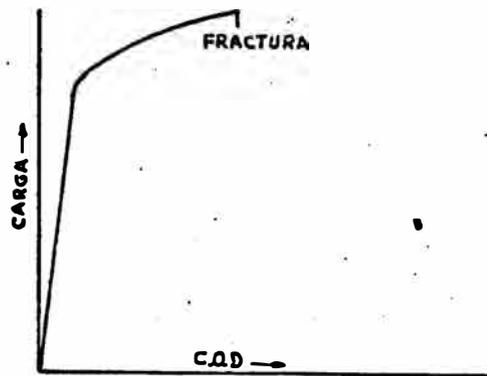


Fig.24 Curva típica de carga /COD. para especímenes que muestran una falla en clivaje.(ref.35)

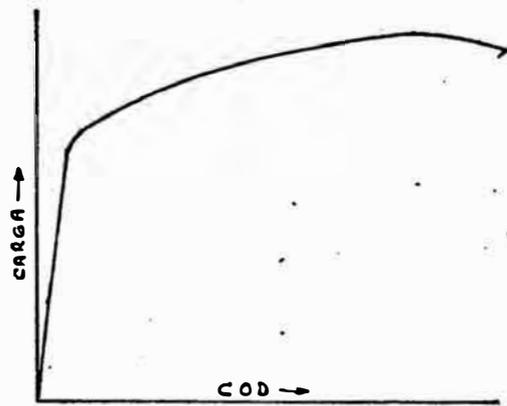


Fig. 25 Curva típica de Carga/COD para especímenes mostrando una carga máxima y una falla dúctil. (ref. 35)

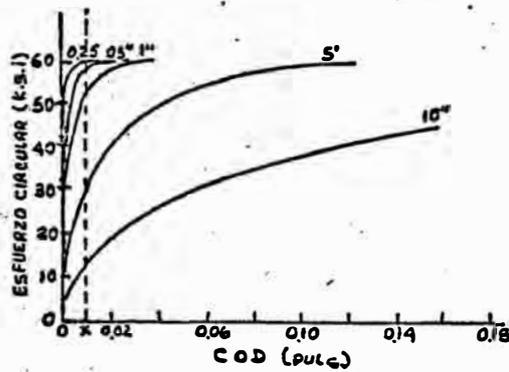


Fig. 26 Variación del COD con el esfuerzo radial para una serie de defectos en el espesor de una tubería (30 "día x 0.4" de espesor).

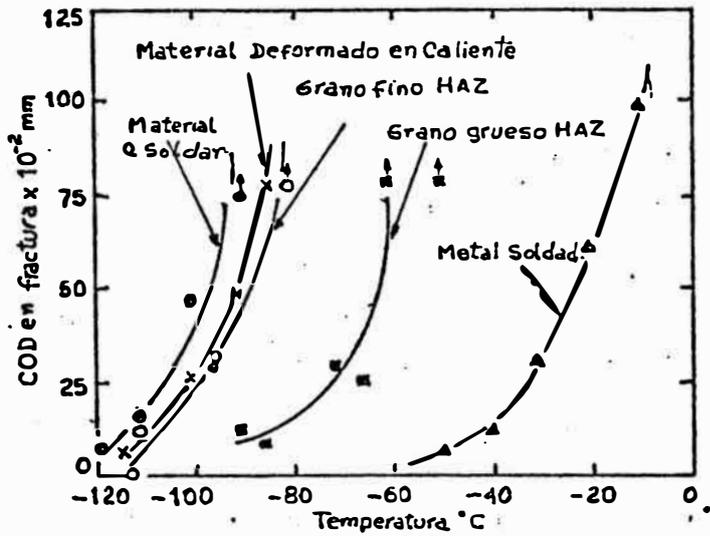


Fig.27 Resultados de un test de doblado COD en un material para soldar, HAZ y soldadura para un acero C-Mn (ref.37).

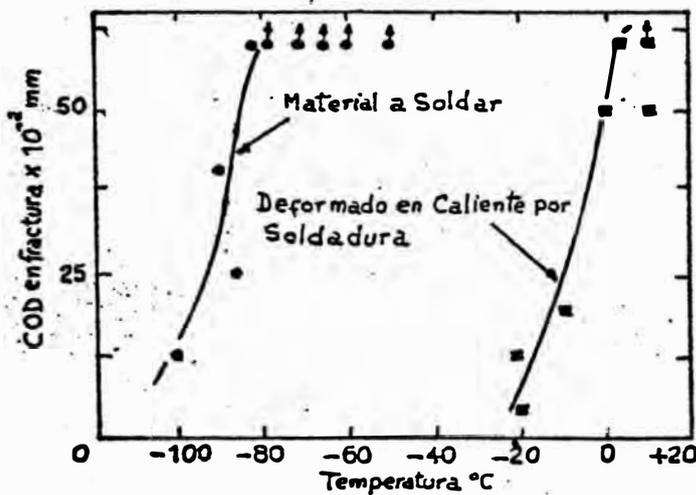


Fig.28 Efecto de la deformación por envejecimiento en un test de doblado COD (especimen cuadrado de 10mm), para un acero C-Mn. (ref. 37).

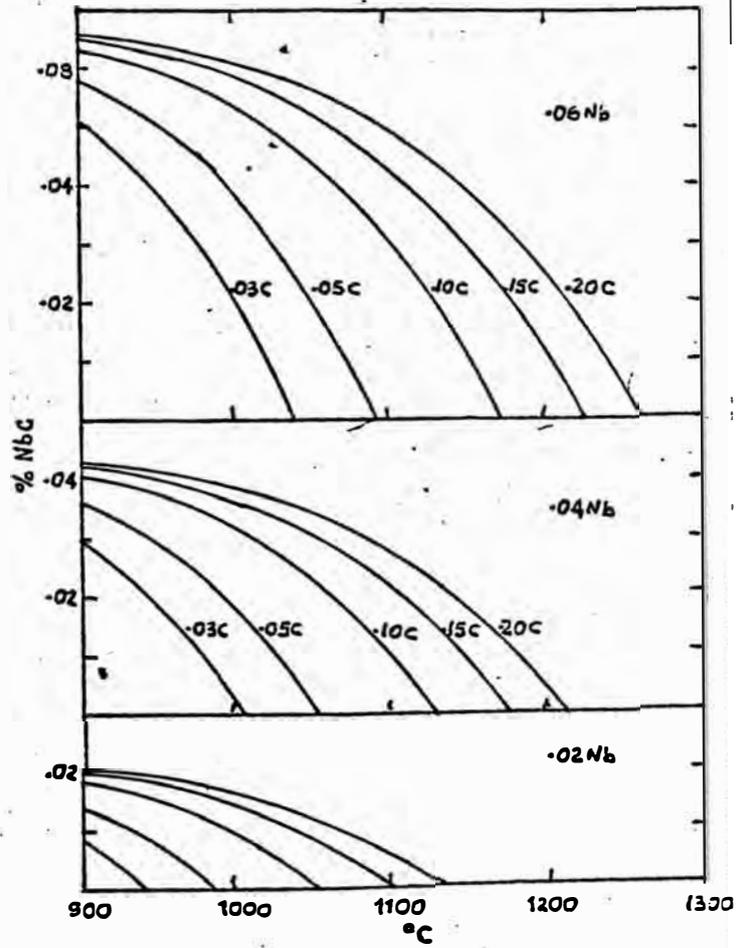
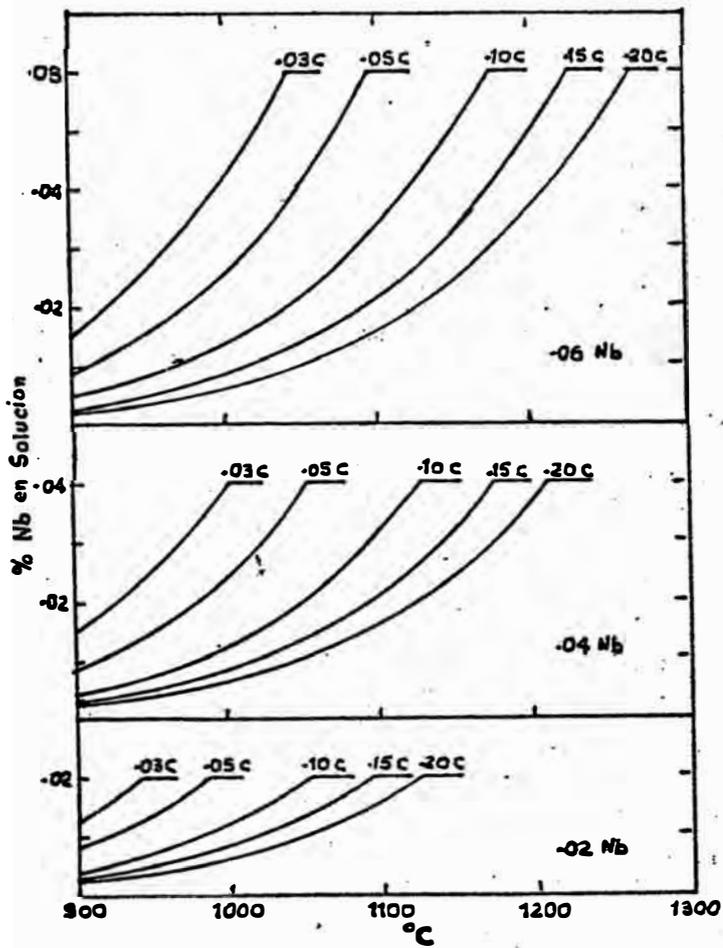
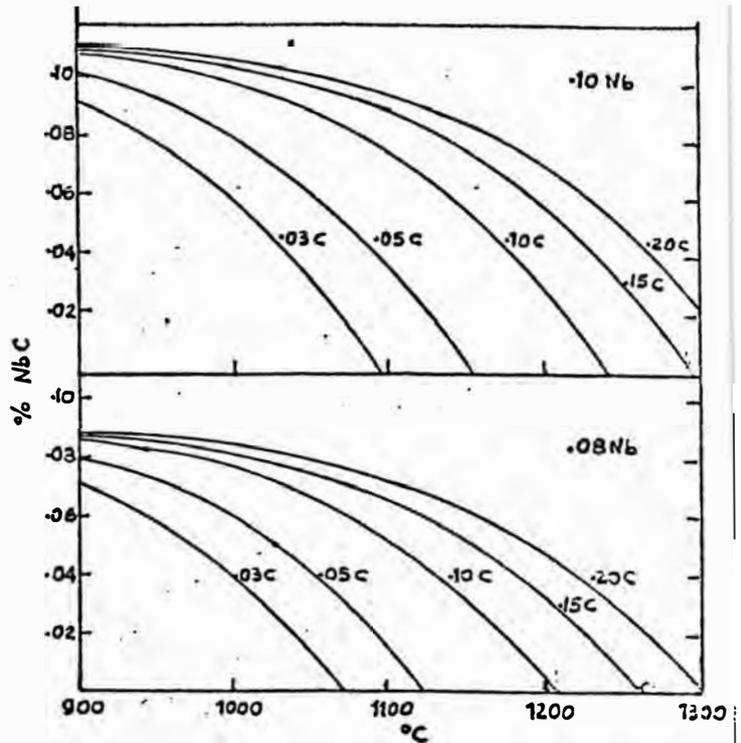
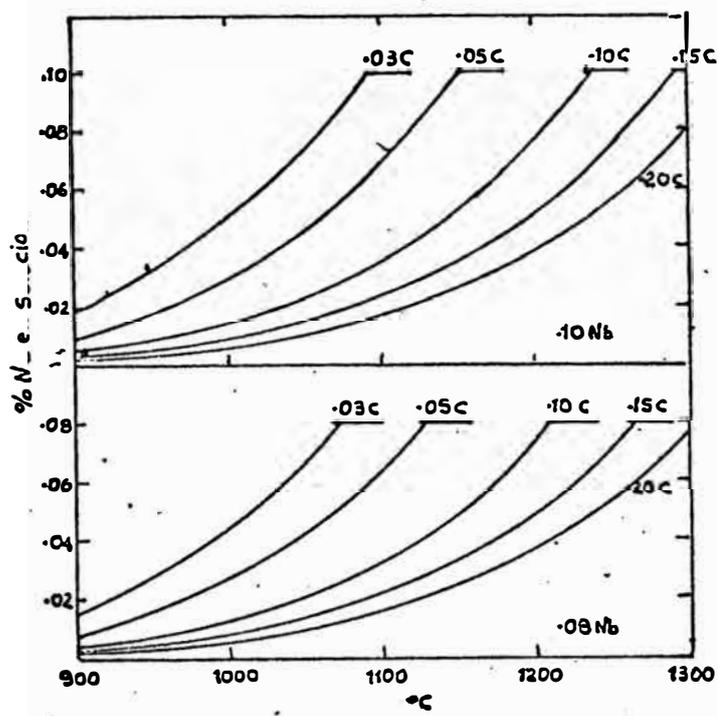


Fig.29 Solubilidad del Nb y NbC. (ref.42)

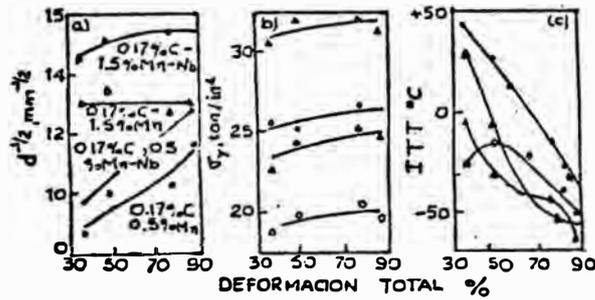


Fig. 30 Efecto de la deformación total en las propiedades y el tamaño de grano. (ref.40)

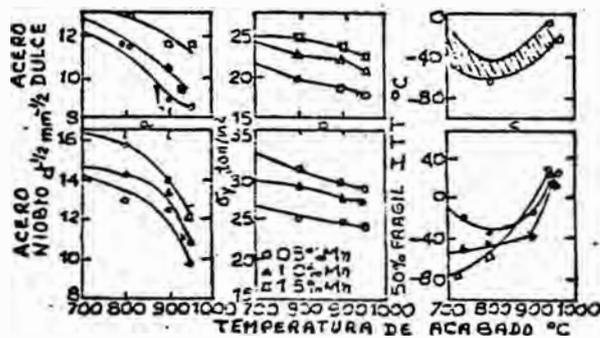
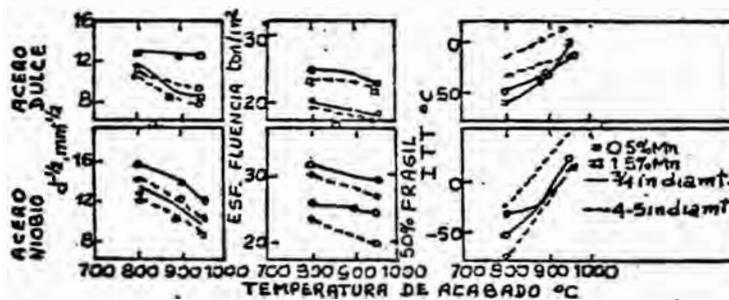


Fig. 31 Efecto de la temperatura final de laminado en las propiedades y el tamaño de grano de la ferrita. (ref.40)



- a) Tamaño de grano de ferrita,
- b) Resistencia a la fluencia
- c) Temperatura de transición al impacto.

Fig. 32 Efecto del enfriamiento en las propiedades y el tamaño de grano de ferrita. (ref.40)

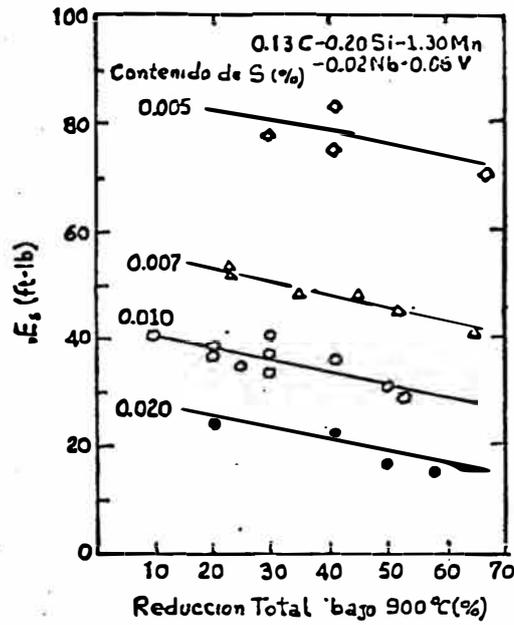


Fig.33 Efecto del grado de laminación controlada en la máxima energía dúctil en especimen transversal (espesor 14mm) (ref.39)

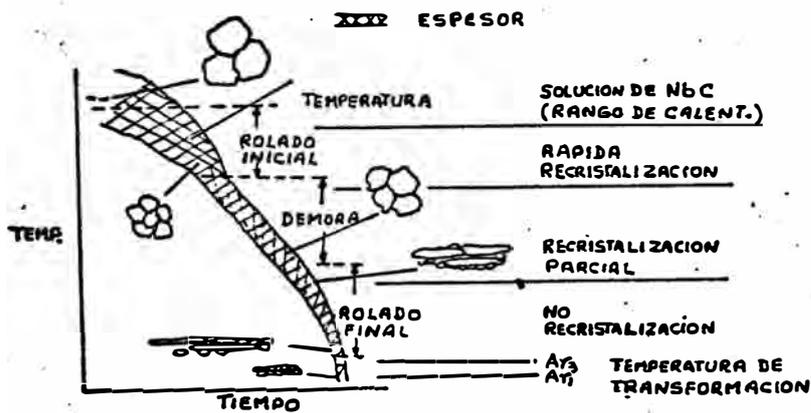
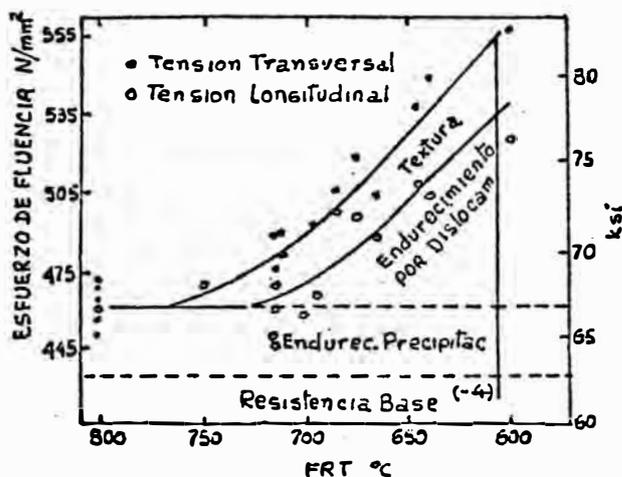


Fig.34 Representación esquemática del proceso de rolado, hasta 1,970. (ref.41)

Fig.35 Esfuerzo de fluencia versus temperatura final de rodado para especimenes longitudinales y transversales. (ref.41)



C-Si-Mn-Nb PLANCHA CORREGIDA A 0.25% Si, 0.030% Nb

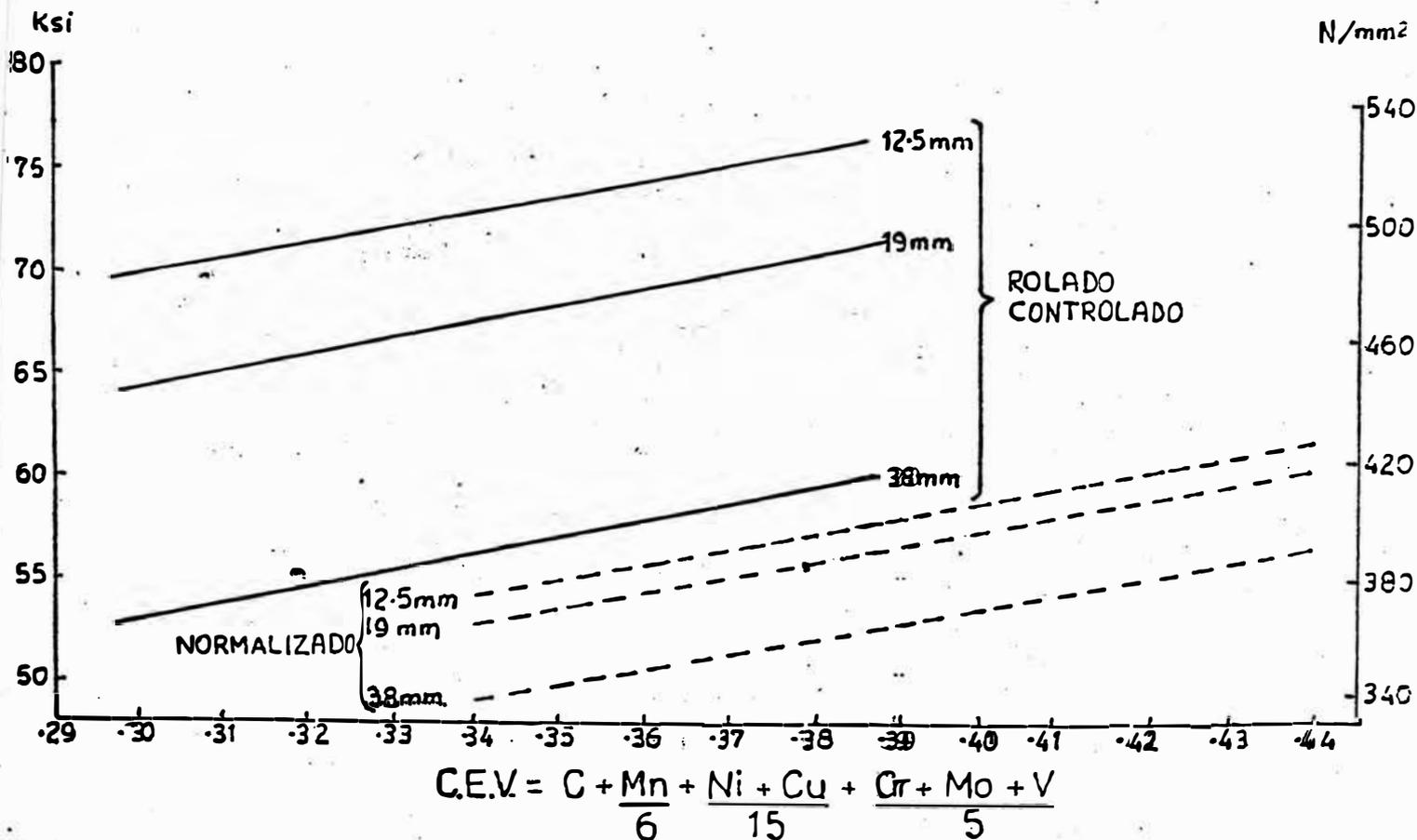


Fig.36 Esfuerzo de fluencia versus valores de carbón equivalente en condiciones de Normalización y Rodado controlado. (ref.43).

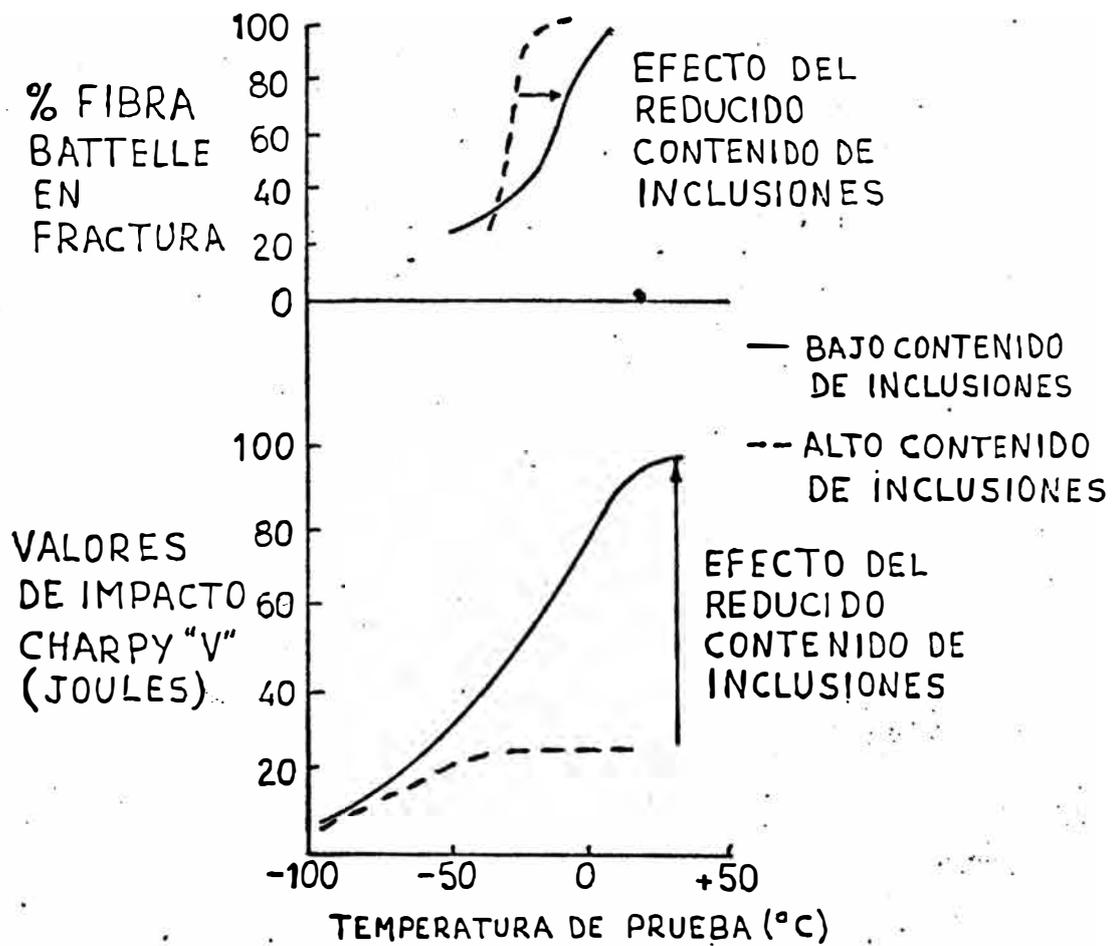


Fig 337 Efecto del control de inclusiones en pruebas transversales Charpy "V" y Battelle Drop Weight. (ref.43)

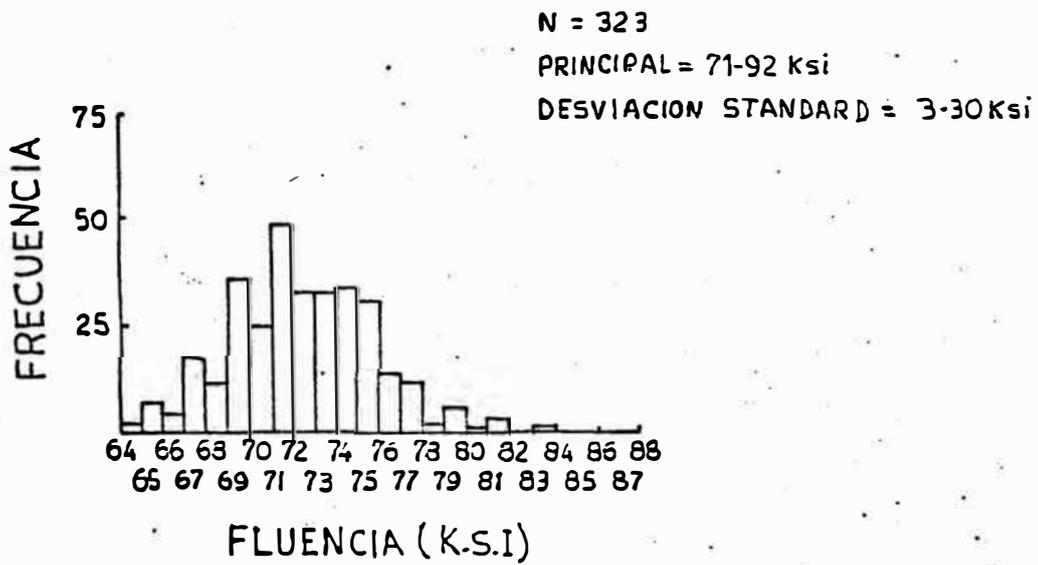
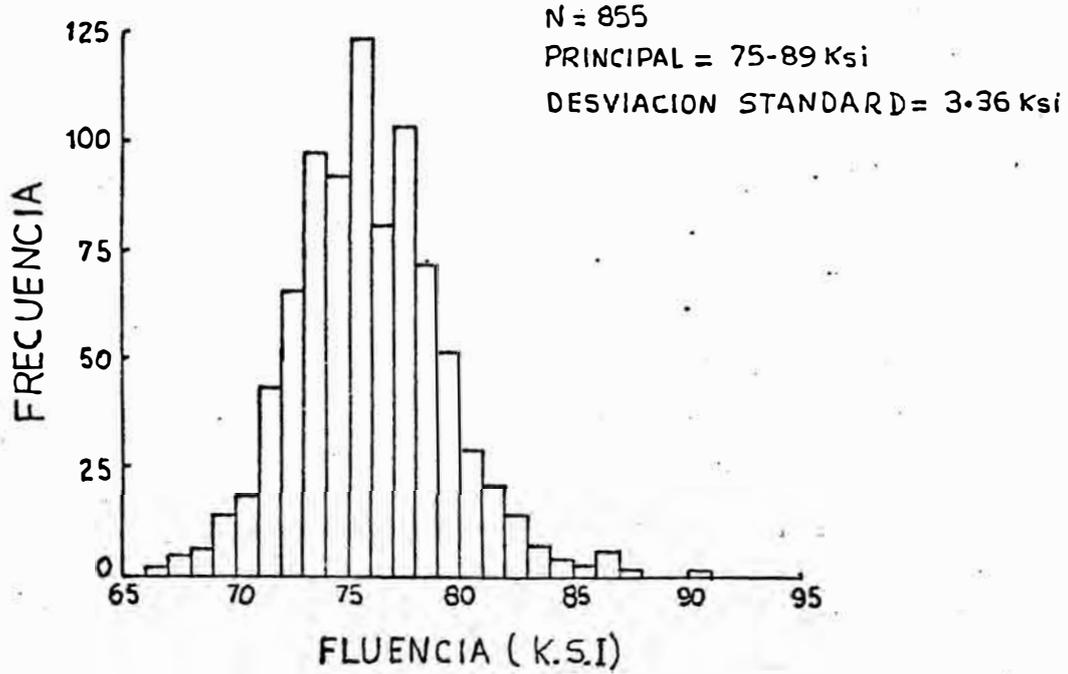


Fig.38 Histogramas de datos de esfuerzo de fluencia para materiales BP X 65. (ref.43) -

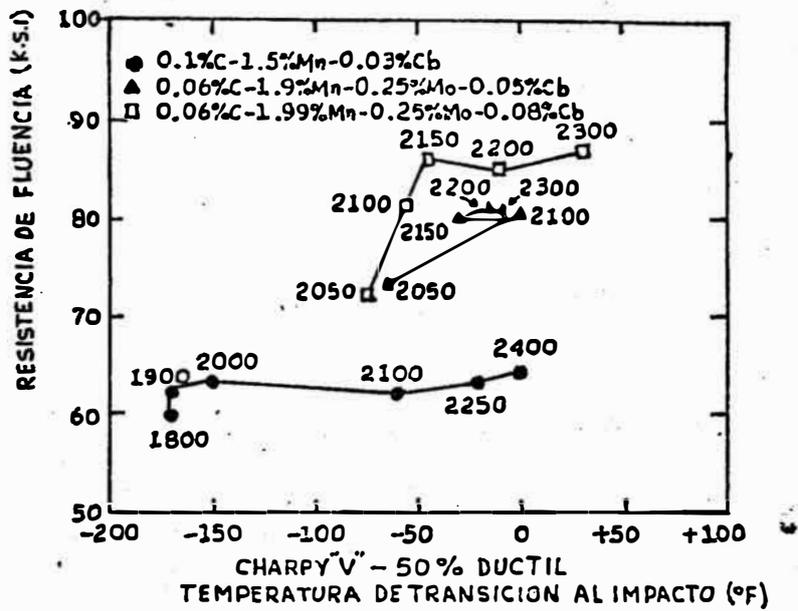


Fig. 41 Efecto de la temperatura de Austenitización en las propiedades mecánicas en planchas 1/2 pulgadas de aceros Mn-Mo-Nb y C-Mn-Nb. (ref.48)

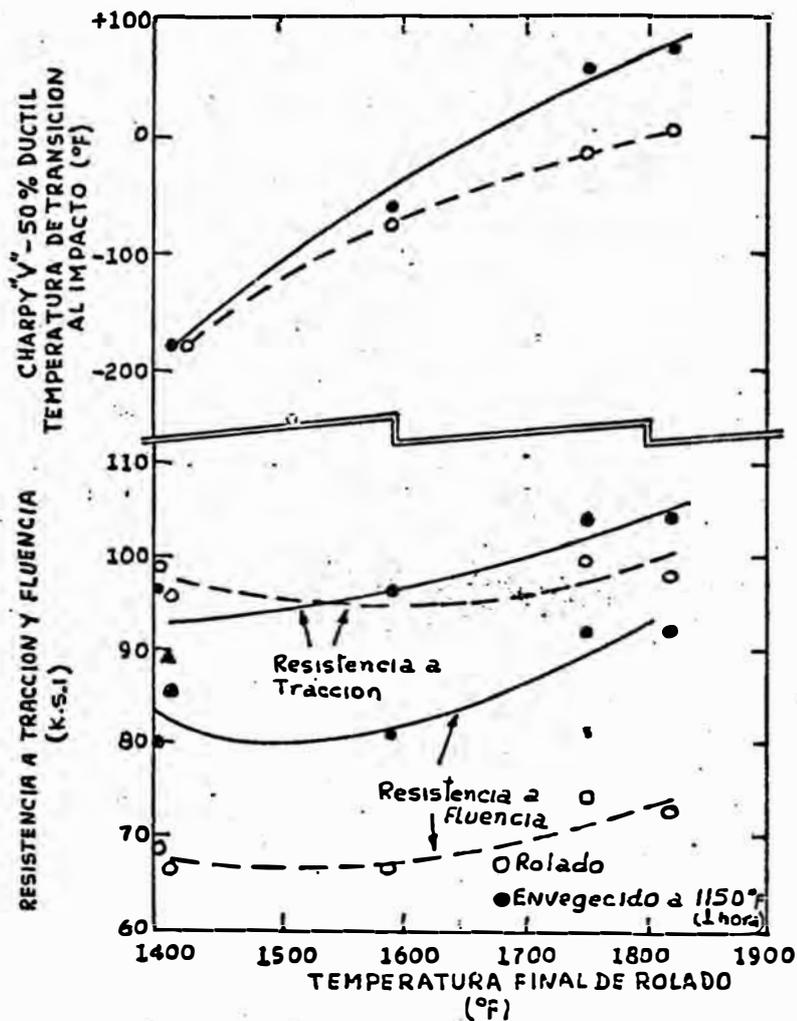


Fig. 42 Efecto de la temperatura final de relado en las propiedades de tensión e impacto para planchas comerciales de acero de 0.50Plg.-- (0.06%c, 1.8%Mn 0.3%Mo y 0.1% Nb). (ref.48)

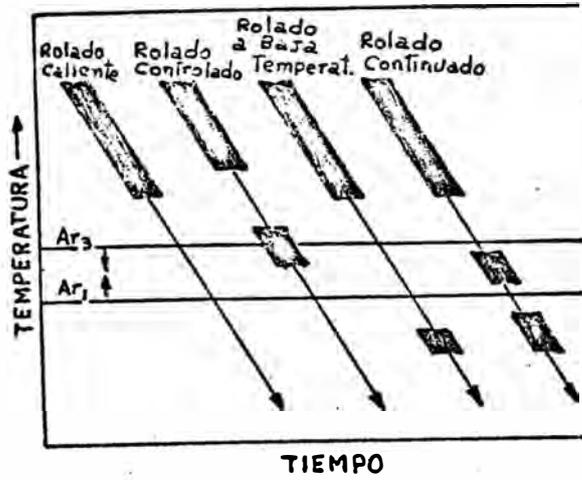


Fig.43 Laminado continuado versus otras prácticas (ref.51)

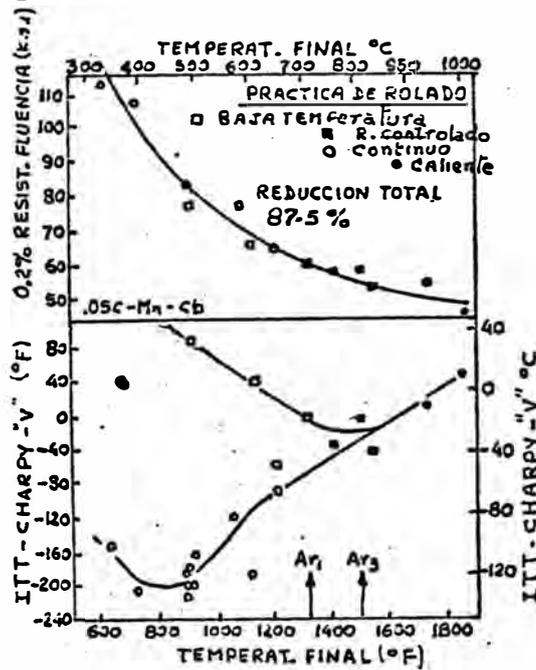


Fig.44 Efecto de la temperatura final en el esfuerzo de fluencia y temperatura de transición "Charpy" de planchas --roladas por varios procesos. (ref.51)

PROCESO DE MANUFACTURA DE LAS TUBERIAS

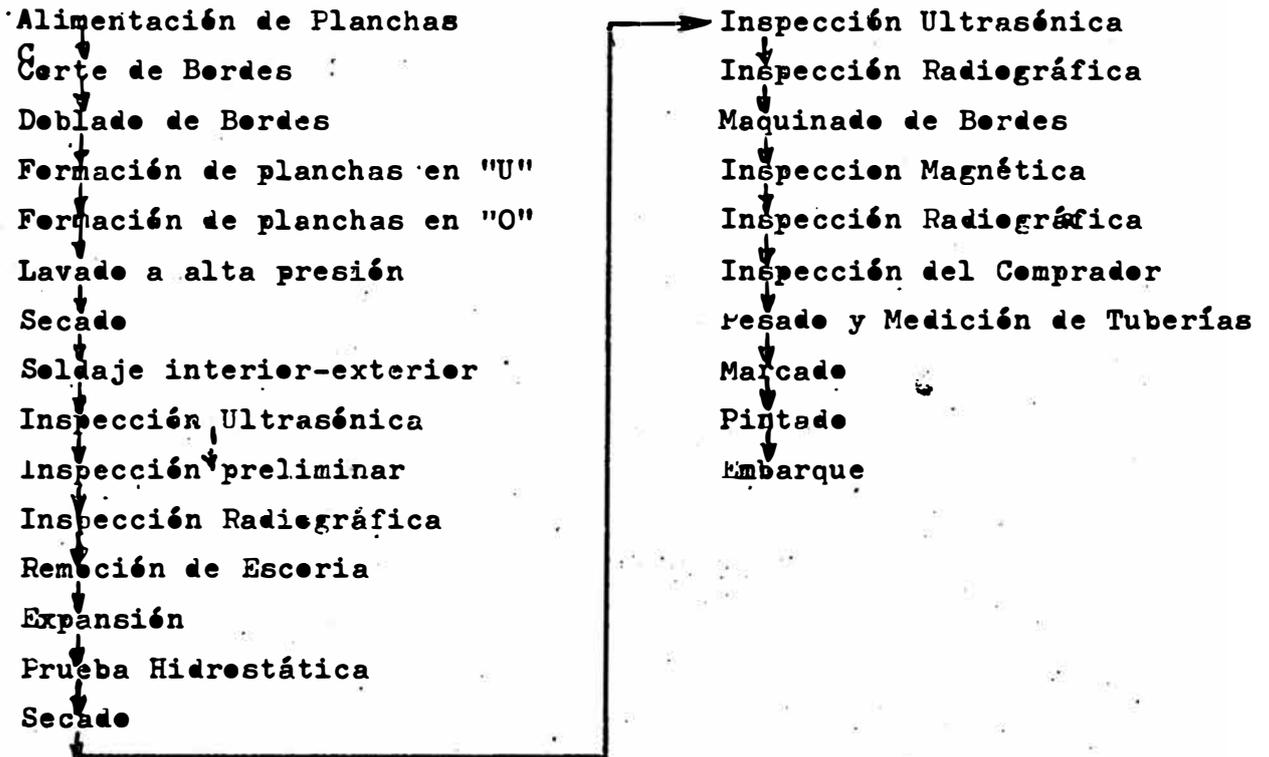


Fig 45 (ref.53)

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Co	% Al	% N	% V
0.03	0.35	1.27	0.015	0.017	0.11	0.03	0.010	0.11

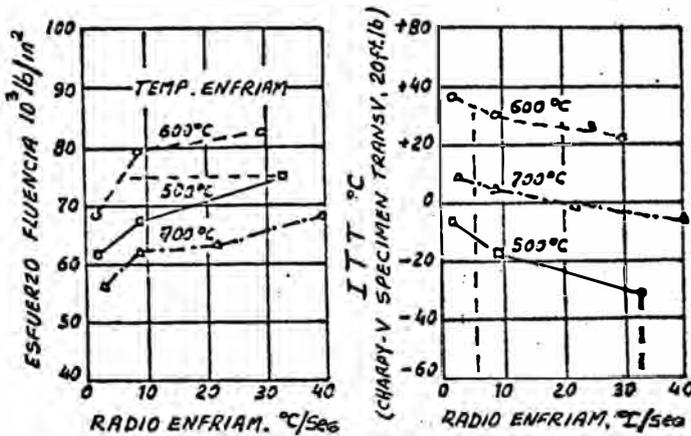
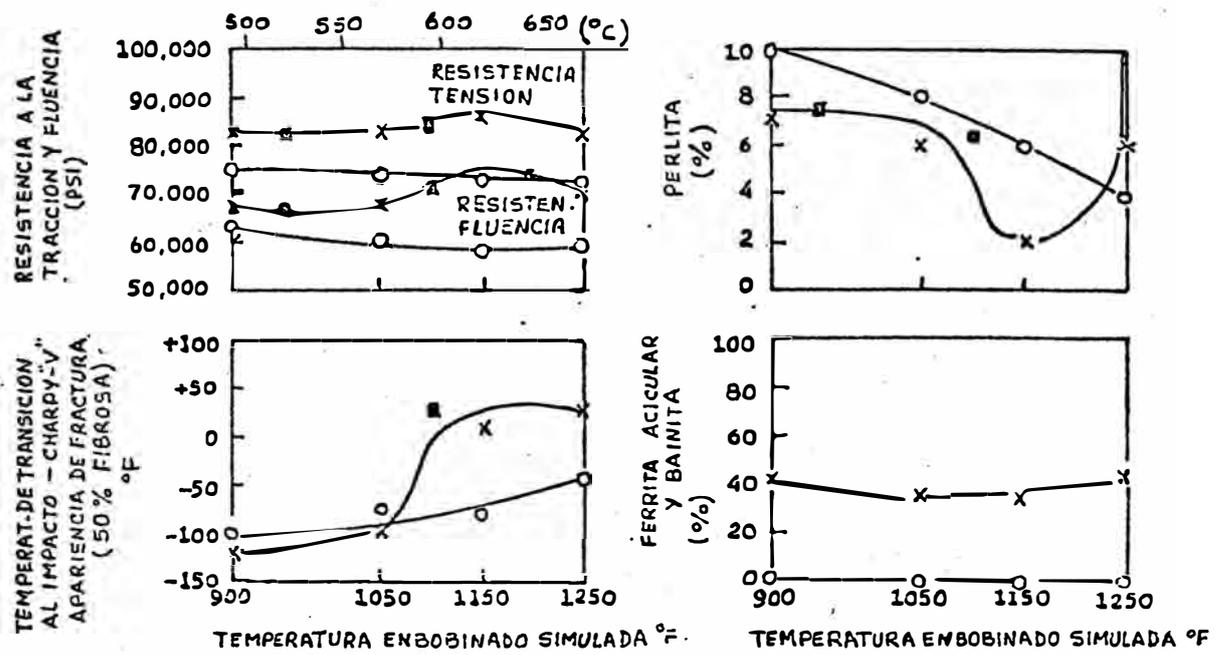


Fig.46 Influencia del enfriamiento (despues del rolado) en la resistencia a la fluencia y a la temperatura de transición al impacto (espezer de la tira ,0.394 pulg.) (ref.55)



○ Acero 0.10% C, 0.56% Mn, 0.10% Si, 0.032% Cb
 x Acero 0.10% C, 0.65% Mn, 0.11% Si, 0.30% Mo, 0.038% Cb
 ■ Acero 0.10% C, 0.66% Mn, 0.11% Si, 0.30% Mo, 0.035% Cb

Fig. 47 Efecto de la temperatura de enbobinado en las propiedades mecánicas y la fracción perlita/ferrita (ref.22)

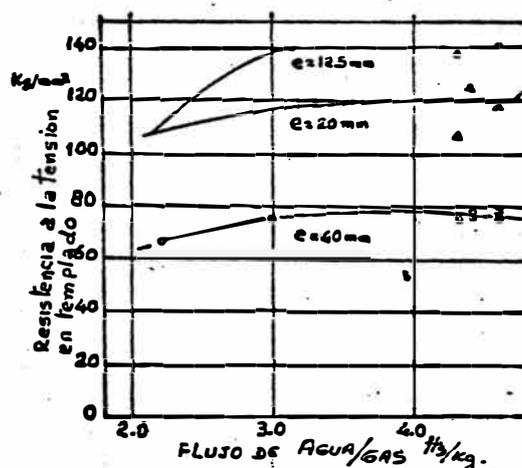


Fig.48 Relación entre la resistencia a la tensión y el flujo Agua/Gas en el templeado (ref,56)

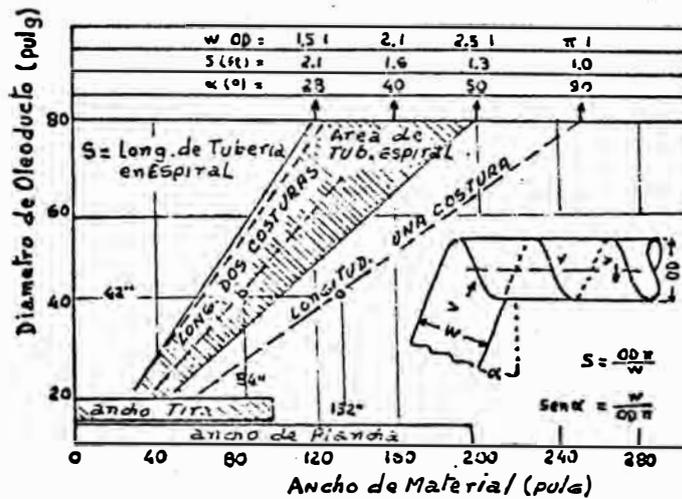


Fig.49 Ancho Tira/Plancha en relación al diámetro de la tubería. Comparación de Sistemas Longitudinal y Espiral (ref.49)

Fig.50 Dibujo esquemático de la secuencia de operaciones en la manufactura de tuberías en Espiral (ref.57)

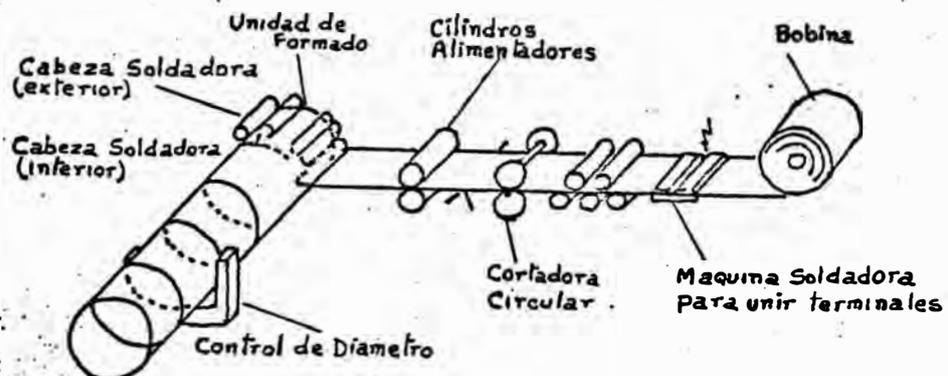
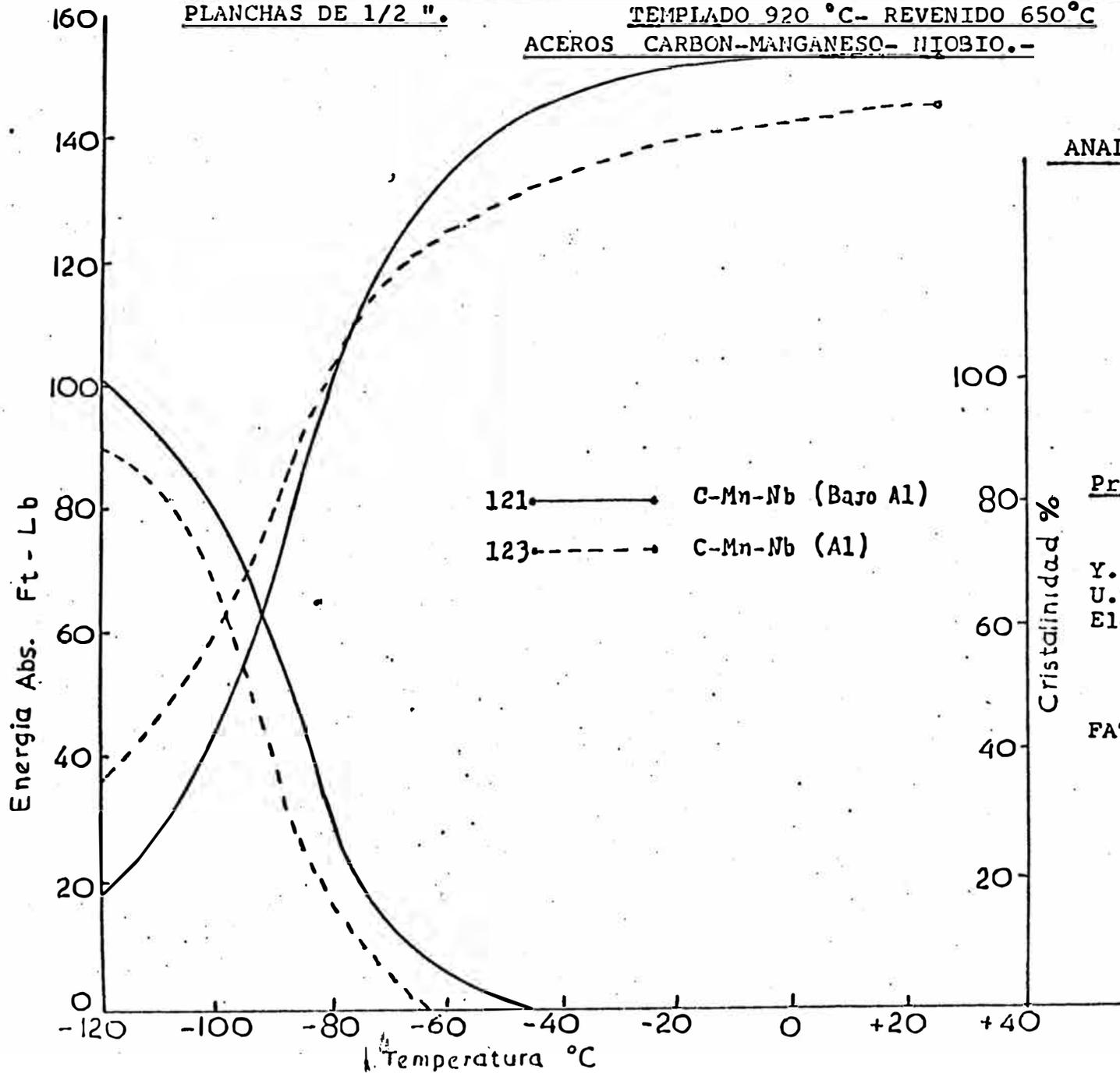


FIG. 51- TUBERIAS T & R DE ALTA RESISTENCIA A LA FLUENCIA - TRATAMIENTO DE LABORATORIO PARA PLANCHAS DE 1/2 ".
 TEMPLADO 920 °C- REVENIDO 650°C (ref. 62)

ACEROS CARBON-MANGANESO-NIOBIO.-



ANALISIS

	%	121	123
C	-	.14	.15
Mn	-	1.09	1.31
Si	-	.12	.16
S	-	.016	.014
P	-	.026	.024
Nb	-	.054	.041
N ₂	-	.02	.013
Sol Al	-	.004	.019

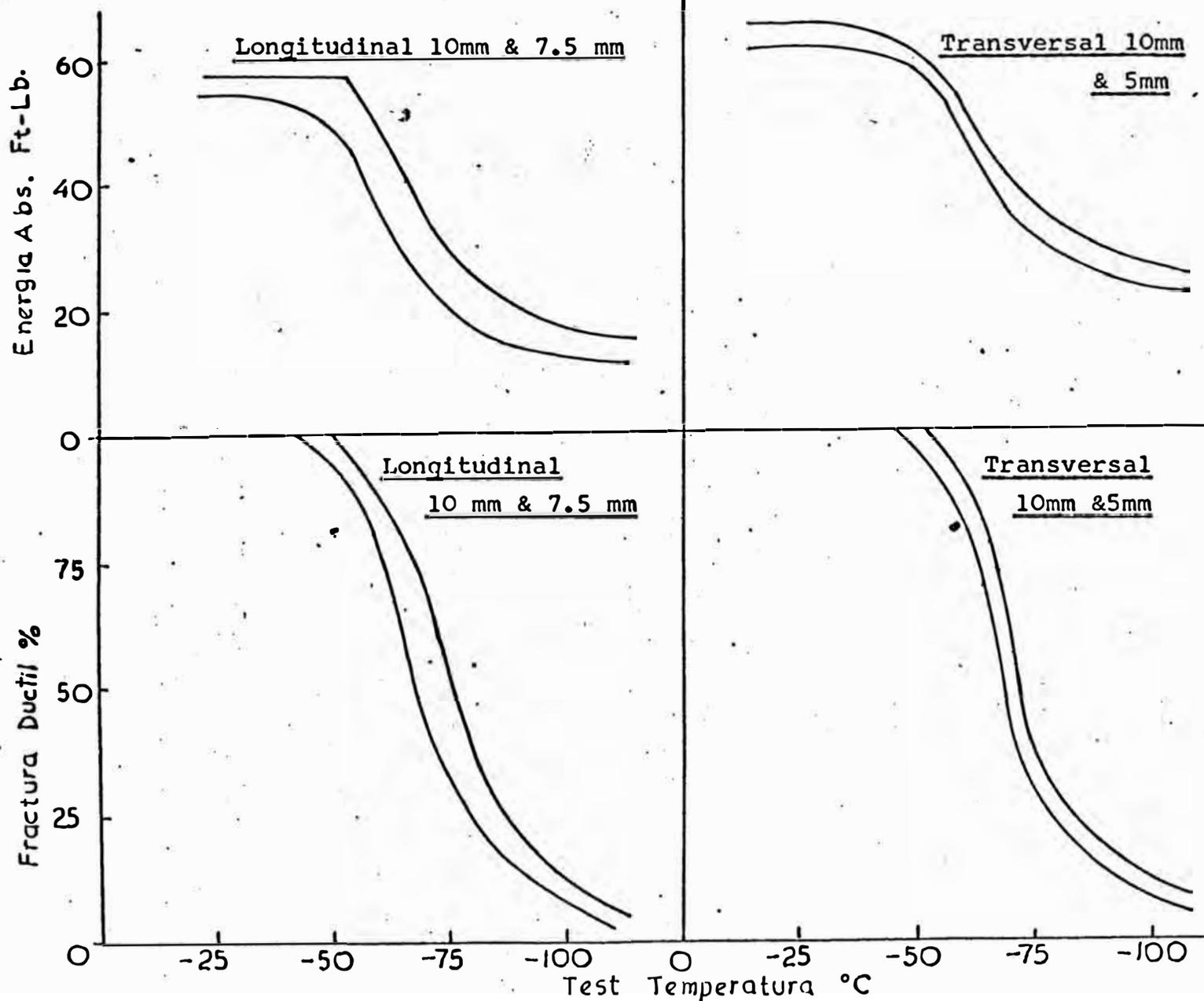
Propiedades de Tensión

	121	123
Y.S. (ksi)	71.6	77.7
U.T.S. (ksi)	84.4	90.0
Elong. (5.65)	27.	22.

	121	123
FATT - °C	-86	-95

Cristalinidad %

FIG.52-DATOS DE RESISTENCIA AL IMPACTO- CHARPY "V" - (TUBERIAS DE PRODUCCION).- (ref.62)



Dimensión: 10 3/4 x 375"

Templado : 920 ° C

Revenido : 600 ° C

Período : 2 Min. 6 sec.

Velocidad de Templado : 15 r.p.m.

ANALISIS:(%)

C - .15

Mn - 1.06

Si - .19

S - .023

P - .013

V - .06

AL - .024

Propiedades de Tensión

Y.S. (ksi)	U.T.S. (ksi)	Elong. (% 2")
81.9	94.3	40
78.6	92.0	36
<u>79.9</u>	<u>92.7</u>	<u>36</u>
<u>80.1</u>	<u>93.0</u>	<u>37</u>

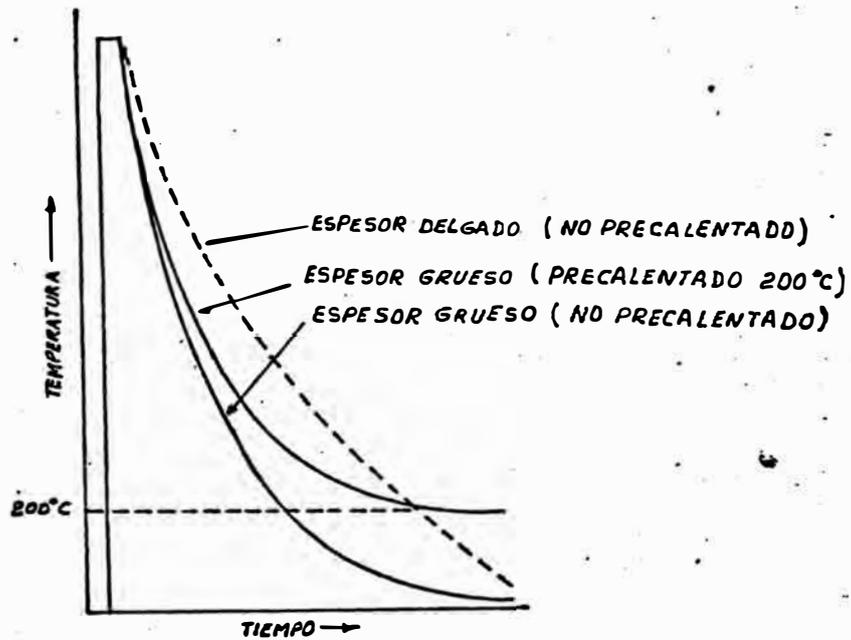


Fig. 53. Curvas Temperatura/Tiempo en la zona afectada por el calor en el primer paso de soldadura (ref.7)

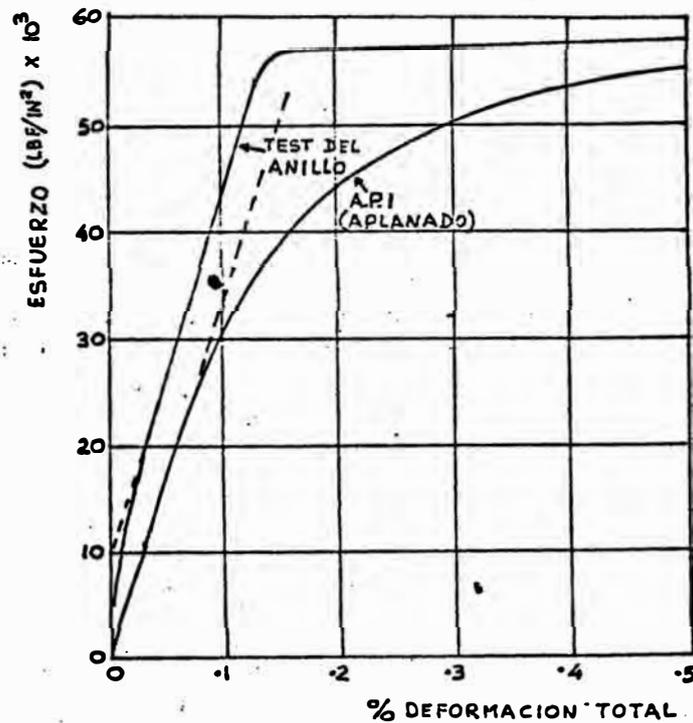


Fig. 54. Comparación entre API y la prueba de tensión del "anillo" en especímenes cortados de una tubería de 30" diámetro de un material API 5L-X-52 (ref. A. Carruthers, Engineering June 1971)

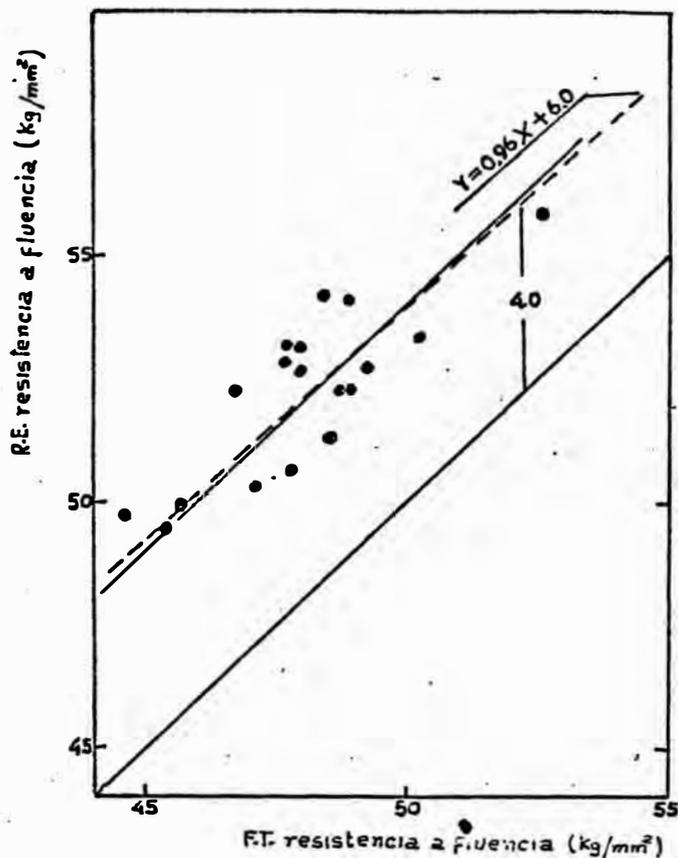


Fig.55 Ejemplo de la relación entre FT y RE resistencia a la fluencia en tuberías de gran diámetro (ref.68)

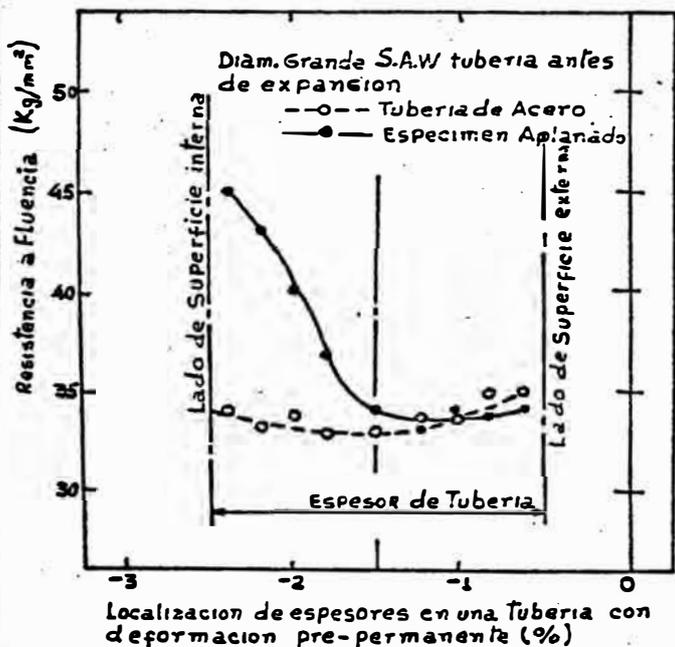


Fig.56 Ejemplo de la distribución de resistencia a la fluencia y localización en el espesor en una tubería y en un espécimen aplanado (ref.68)

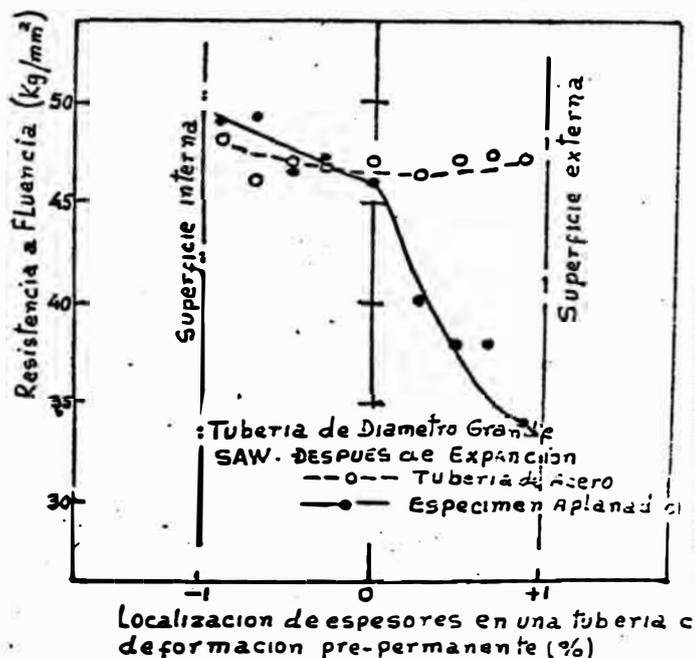


Fig.57 Ejemplo de la distribución de resistencia a la fluencia y localización en el espesor en una tubería y en un espécimen aplanado (ref.68)

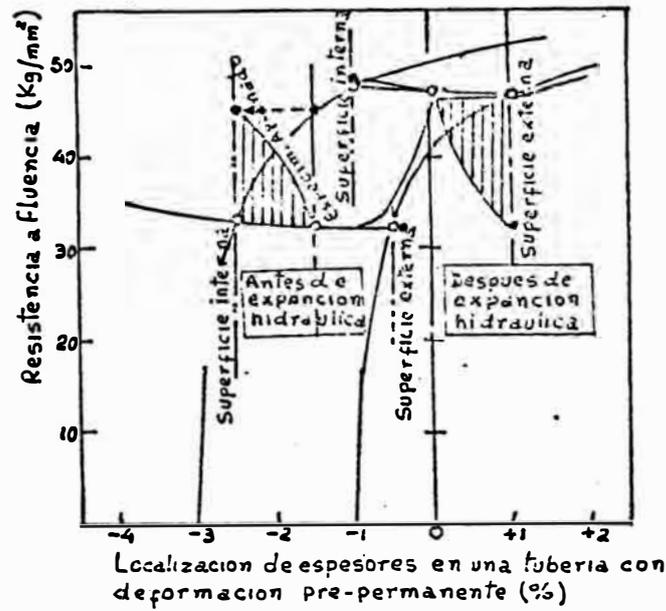


Fig.58 Valoración de las variaciones de resistencia a la fluencia en tuberías de acero de gran diámetro (ref.68)

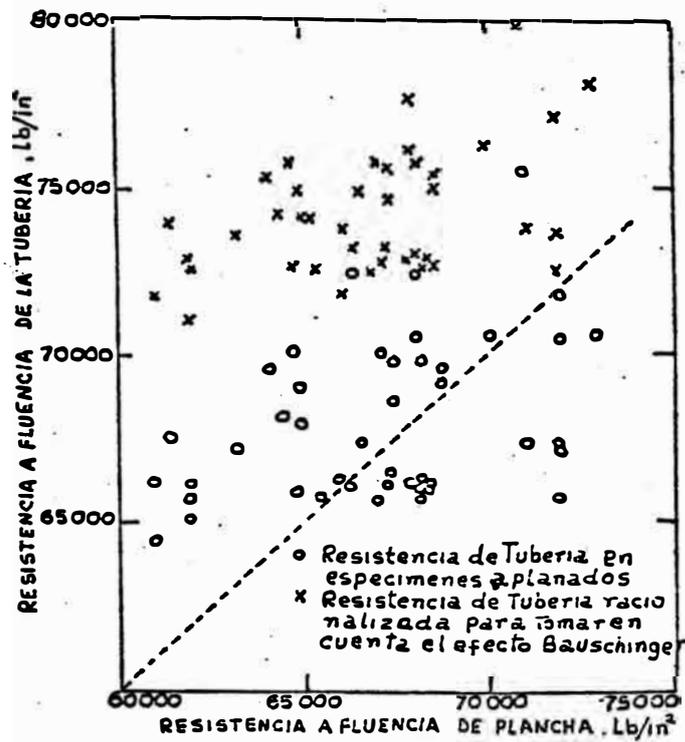


Fig.59 Resistencia de la plancha vs. tubería (especímenes aplanados API) (ref.63)

CAMBIO DE ESF. DE FLUENCIA = $-0.734 E.de F. + 51.618$
 (TUBERIA-PLANCHA)
 95% CL $\pm 5.09 K.s.i$

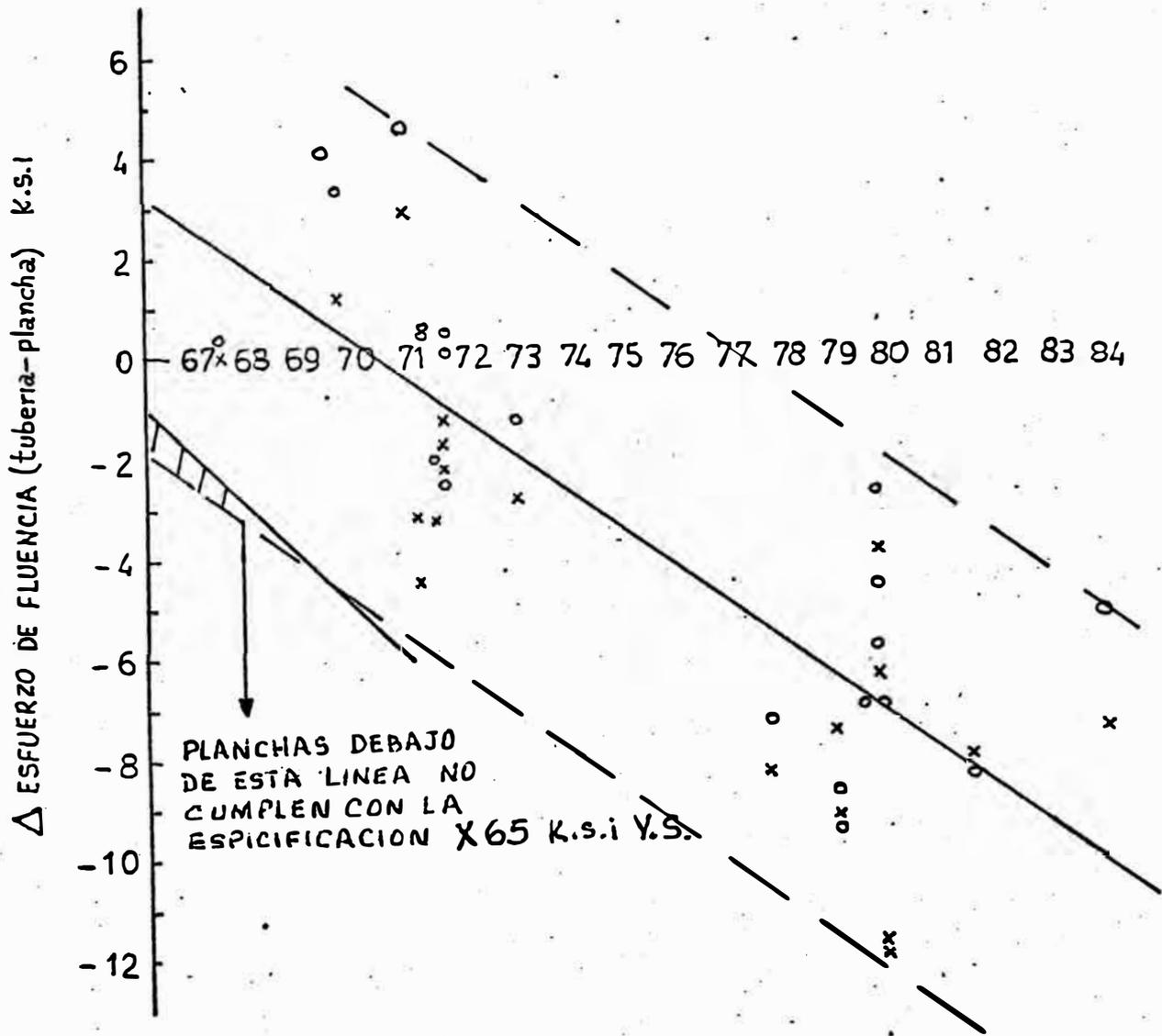
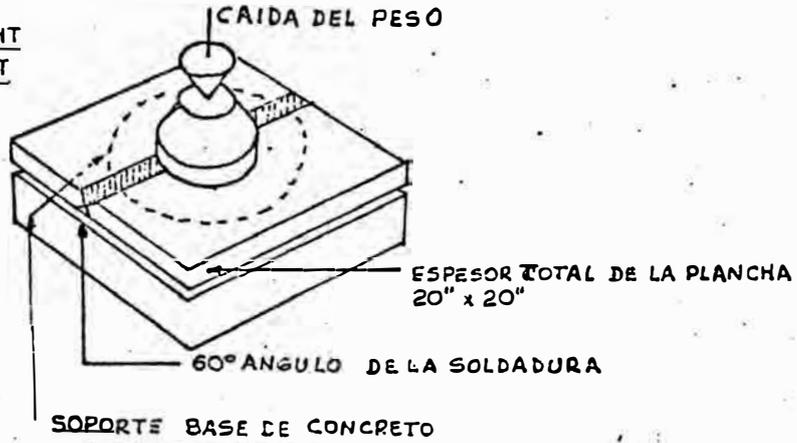
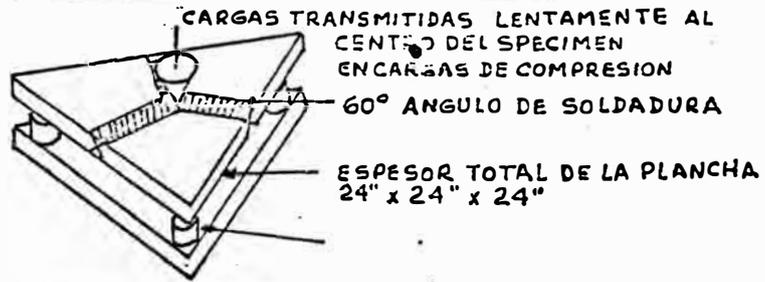


Fig 60 Cambio en el esfuerzo a la fluencia de una plancha BP X-65 a tubería (ref.43)

DROP WEIGHT
BULGE TEST



DELTA
SPECIMEN
TEST



DROP WEIGHT
TEST
MODIFICADO
PARA TEST
DE LINEA DE
FUSION

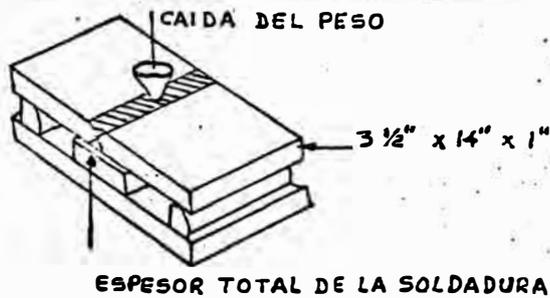
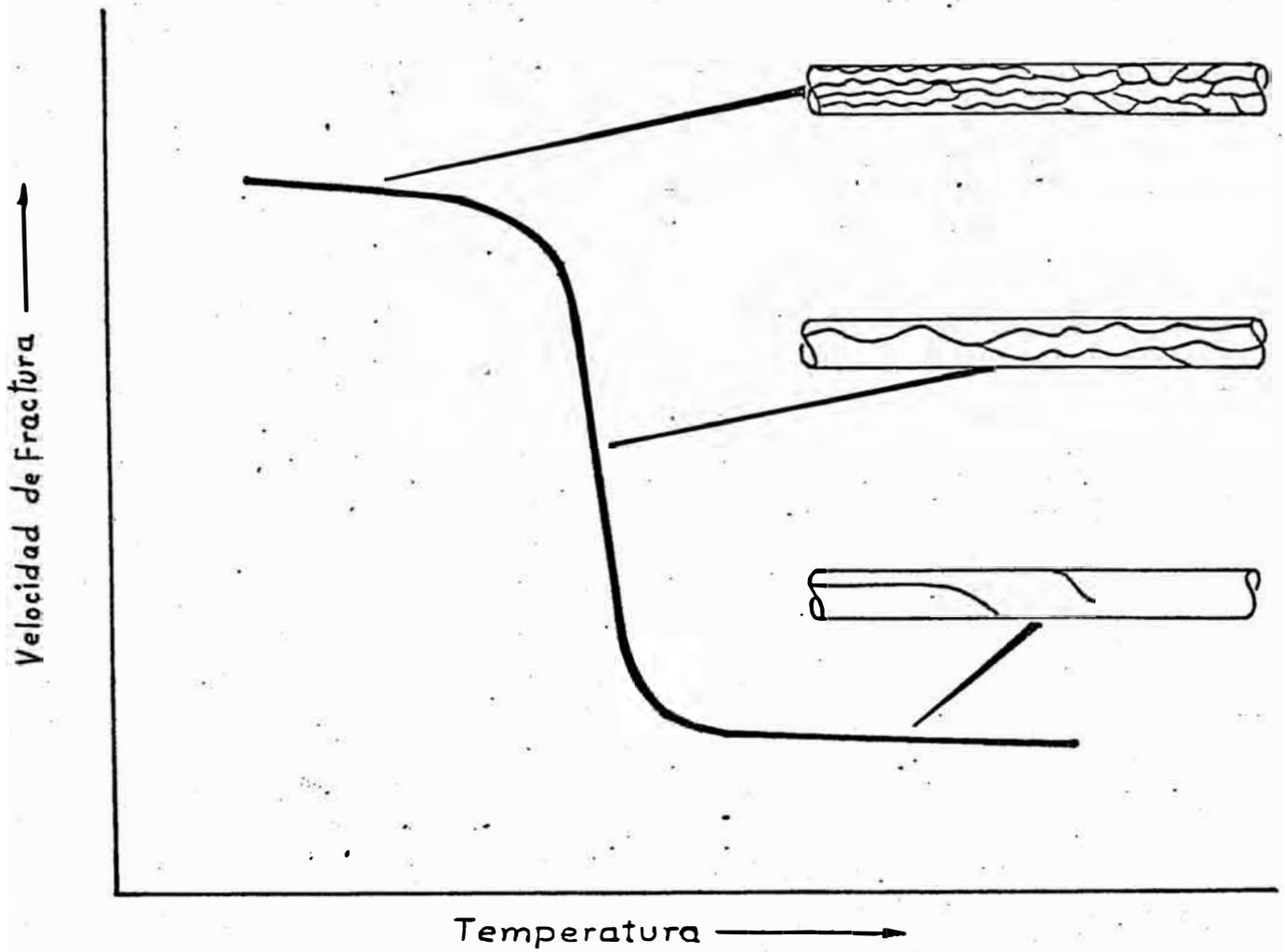


Fig. 61

Esquematzación de la preparación
y pruebas de especímenes (ref.73)



COMPORTAMIENTO A FULL-SCALA

Fig.62 Relación general mostrando la Temperatura de Transición a Full-escala. (ref.74)

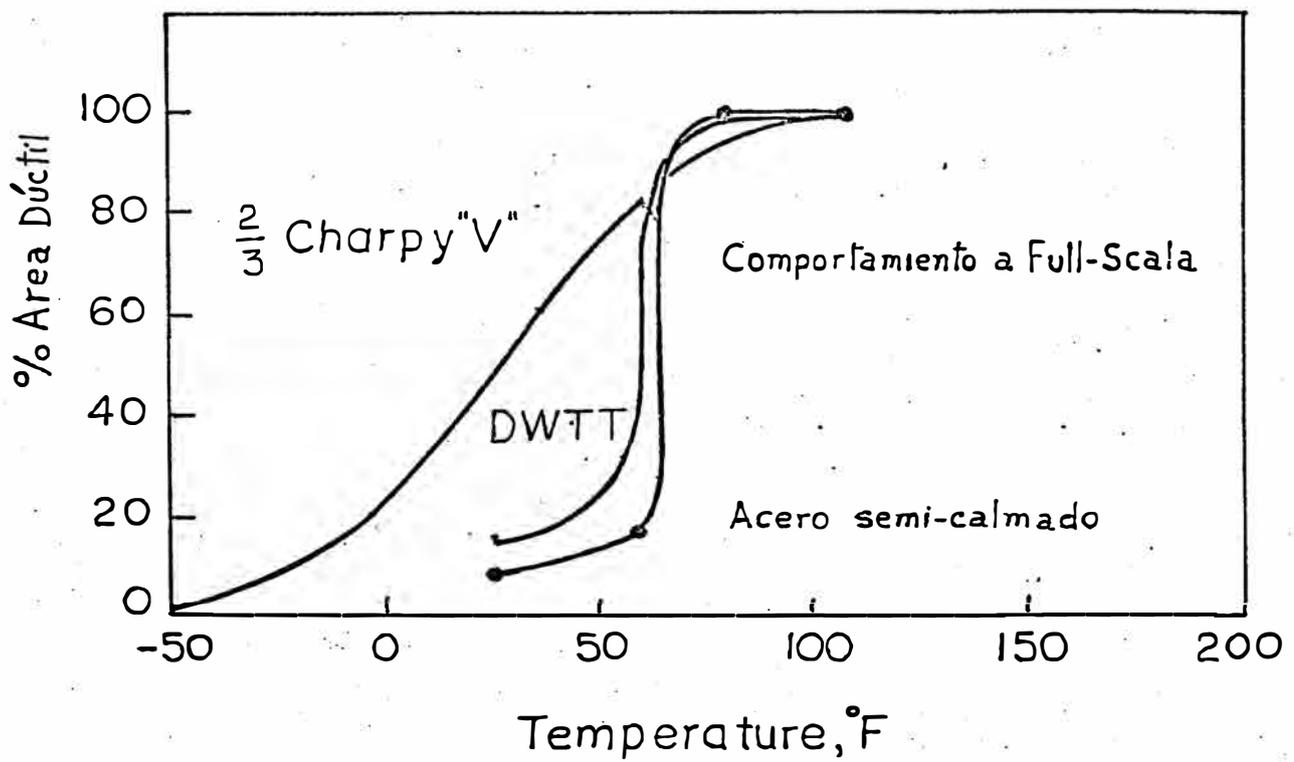


Fig.63. Relación general entre especímenes Charpy "V" 2/3 DWTT y comportamiento de la propagación de una rajadura para materiales de acero semi-calmado (ref.74)

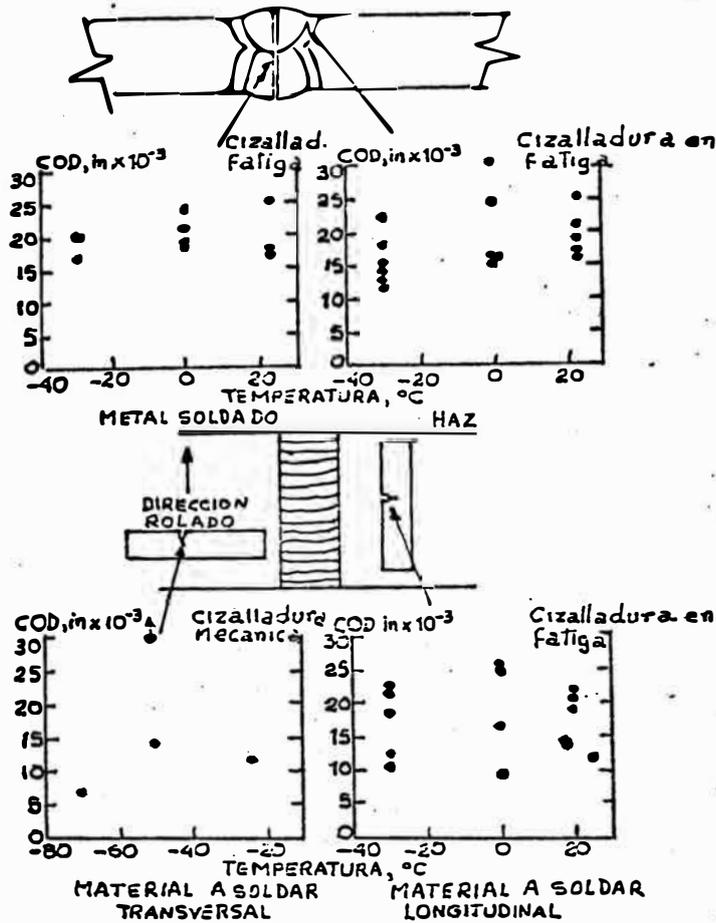
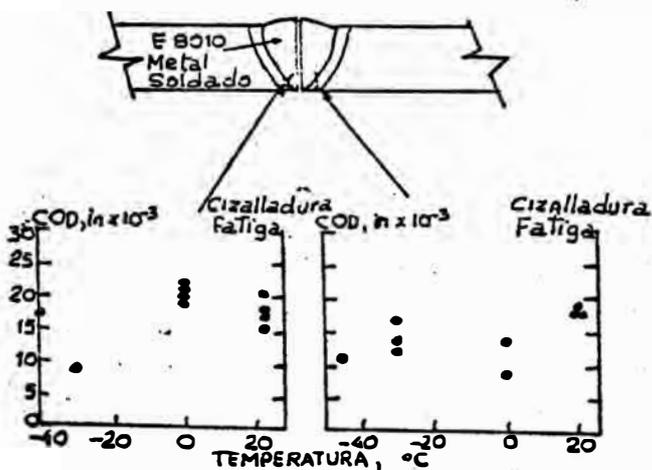


Fig.64 Evaluación de COD para materiales de Tuberías. (ref. 63)



Evaluación de COD para Soldajes de Conterno Fig.65. (ref.63)

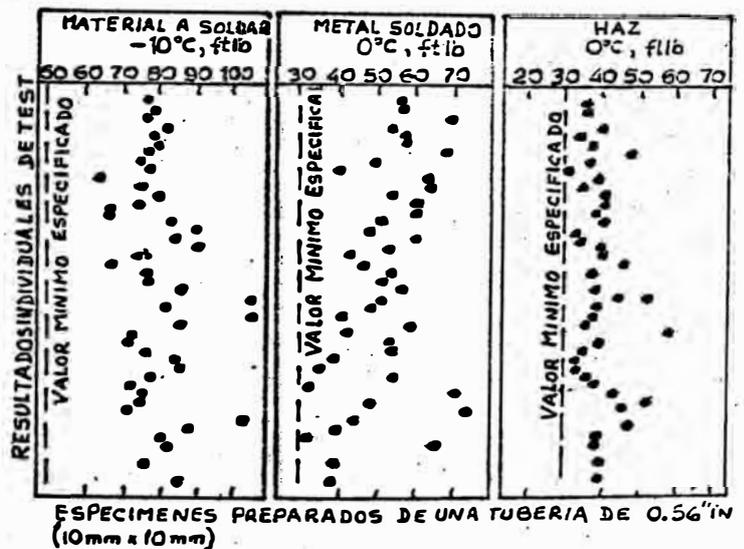


Fig.66 Resultados de test de impacto Charpy "V" para tuberías longitudinales (en solda) ilustrando el rango de expansión (ref.63)

encuadernación



av. francisco pizarro 585, block 4 dpto. 101 - rímac