



UNIVERSIDAD DE MATANZAS
FACULTAD DE CIENCIAS TECNICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Caracterización metalográfica y mecánica de tuberías de producción.

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Perforación de
pozos de petróleo y producción de petróleo.**

Mención: Perforación de pozos de petróleo

Autora: Ing. Yenia de la Caridad Díaz Carrera

Matanzas

2019



UNIVERSIDAD DE MATANZAS
FACULTAD DE CIENCIAS TECNICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



CENTRO POLITÉCNICO DEL
PETRÓLEO
SEDE: VARADERO

Caracterización metalográfica y mecánica de tuberías de producción.

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Perforación de
pozos de petróleo y producción de petróleo.**

Mención: Perforación de pozos de petróleo

Autora: Ing. Yenia de la Caridad Díaz Carrera

Tutores: Dr. C. T. Eduardo Torres Alpízar

Ing. Esp. Ariel Rodríguez Riva

Matanzas

2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Yenía de la Caridad Díaz Carrera declaro que soy el único autor del presente trabajo y autorizo a la Universidad de Matanzas y al Centro Politécnico del Petróleo a hacer el uso que estime pertinente con la información que aparece en el mismo siempre y cuando se respete nuestra autoría.

Nombre y Apellidos. Firma

DEDICATORIA

A mis padres Martha y Andrés por estar siempre ahí para exigirme y apoyarme en todo momento.

A mis tutores Eduardo y Ariel por su dedicación, paciencia y apoyo incondicional.

A mis compañeros de trabajo Sander, Anthia, Tomás, Carlos y Yamila.

A mi familia y amigos en general por su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su amor, paciencia y apoyo en todo momento.

A toda mi familia, en especial a mi hermano Osdelvis y a mi prima Noraisy.

A mis tutores Eduardo y Ariel, por su preocupación, conocimiento y apoyo en todo momento.

En general quisiera agradecer a todas las personas que de una forma u otra han contribuido al desarrollo de este Trabajo de Diploma.

A mis compañeros de trabajo Sander, Anthia, Tomás, Carlos y Yamila.

A todos los compañeros del CIME que me apoyaron, y brindaron toda su ayuda para la realización de este trabajo.

A todos muchas gracias.

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo principal diseñar una metodología para la EPEP-Centro que establezca los pasos a seguir para la caracterización química, metalográfica y de propiedades mecánicas del acero empleado en la fabricación de las tuberías de producción acorde a la norma API 5CT, y que complemente lo establecido en el procedimiento PC-CP/P 2701 de la EPEP-Centro para la compra de materiales y medios; considerando que se han presentado varios casos de severos problemas producto a fallas como fracturas, picaduras o agrietamiento en el acero de las tuberías de producción, provocando averías. Además de la información conocida respecto a las características y propiedades de dichas tuberías, las normas internacionales y las características del petróleo cubano.

Para desarrollar esta investigación fueron aplicados varios ensayos mecánicos, metalográficos y de composición química, los que contribuyeron a determinar los posibles problemas o casos de fallas que pudieran presentarse en las tuberías de producción.

La interpretación de los ensayos realizados posibilitó el esclarecimiento del tipo, características y propiedades del acero de las tuberías de producción que se utilizan en los pozos de la EPEP-Centro. Teniendo esto en cuenta se decide diseñar una metodología para la EPEP-Centro basada en el muestreo y evaluación mediante dichos ensayos atendiendo al procedimiento de Tramitación y Ejecución de Compras en la EPEP-Centro.

SUMMARY

The main objective of this thesis is to design a methodology for the EPEP-Center that establishes the steps to follow for the chemical characterization, metallographic and mechanical properties of the steel used in the manufacture of the production pipes according to the API 5CT standard, and that complements what is established in procedure PC-CP / P 2701 of the EPEP-Center for the purchase of materials and media; considering that there have been several cases of severe problems due to faults such as fractures, pitting or cracking in the steel of the production pipes, causing breakdowns. In addition to the known information regarding the characteristics and properties of said pipes, international standards and characteristics of Cuban oil.

To develop this research several mechanical, metallographic and chemical composition tests were applied, which contributed to determine the possible problems or failure cases that could occur in the production pipes.

The interpretation of the tests carried out enabled the clarification of the type, characteristics and properties of the steel of the production pipes used in the wells of the EPEP-Centro. Taking this into account, it was decided to design a methodology for the EPEP-Center based on the sampling and evaluation by means of these tests attending to the Procedure of Processing and Execution of Purchases in the EPEP-Center.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.	5
1.1 Proceso de Fabricación de Tuberías.	5
1.2 Tipos de Tubería de Revestimiento.	6
1.2.1 Tubería Conductora.	7
1.2.2 Tubería Superficial de Revestimiento.	7
1.2.3 Tubería Intermedia de Revestimiento.	8
1.2.4 Tubería de Revestimiento de Producción.	9
1.2.5 Liner o Tubería Corta de Revestimiento.	10
1.3 Características de las Tuberías de Producción.	11
1.4 Factores que Rigen las Características Mecánicas del Acero:.....	12
1.5 Propiedades Mecánicas del Acero.	13
1.6 Condiciones de Falla.....	14
1.6.1 Esfuerzo de Cedencia (fluencia).	14
1.6.2 Colapso.	15
1.6.3 Estallido.	15
1.6.4 Tensión.	16
1.6.5 Corrosión.	16
1.7 Estándares sobre Tuberías.	16
1.7.1 API.....	17
1.7.2 NACE.	17
1.7.3 ISO.....	17
1.8 Caracterización Físico-Química de Crudos Cubanos de la Franja Norte de Crudos Pesados.	17

1.9 Procedimiento de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro.	18
1.10 Conclusiones Parciales del Capítulo 1.	18
CAPÍTULO 2. PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL. MATERIALES Y MÉTODOS.	20
2.1 Materiales.	20
2.2 Composición Química del Acero.	21
2.3 Ensayo de Dureza.	22
2.3.1 Ensayo de Dureza Brinell para el Niple	22
2.3.2 Ensayo de Dureza Vickers para el Coupling.	23
2.4 Ensayo de Resilencia.	24
2.4.1 Ensayo de Resilencia para el Niple.	25
2.4.2 Ensayo de Resilencia para el Coupling.	26
2.5 Ensayo de Tracción.	26
2.5.1 Ensayo de Tracción para el Niple.	28
2.5.2 Ensayo de Tracción para el Coupling.	29
2.6 Metalografía.	29
2.6.1 Ensayo Metalográfico para el Niple y Coupling.	30
2.7 Conclusiones Parciales del Capítulo 2.	31
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	33
3.2 Análisis de Composición Química de los Materiales Tubulares en Estudio.	33
3.2.1 Composición Química del Niple.	33
3.2.2 Composición Química del Coupling.	34
3.3 Análisis de Ensayo de Dureza.	35
3.3.1 Ensayo de Dureza para el Niple.	35
3.3.2 Ensayo de Dureza para el Coupling.	35

3.4	Análisis de Ensayo de Resilencia.	37
3.4.1	Análisis de Resultados de Ensayo de Resilencia para el nipple J55.	37
3.4.2	Análisis de Resultados de Ensayo de Resilencia para el Coupling Q125.	38
3.5	Análisis de ensayo a tracción.	39
3.5.1	Análisis de Resultados de Ensayo a Tracción para el Niple J55.	39
3.5.2	Análisis de Resultados de Ensayo a Tracción para el Coupling Q125.	39
3.6	Análisis del Ensayo Metalográfico.	40
3.6.1	Distribución y Efecto de los Elementos Aleantes.	40
3.6.2	Inclusiones No Metálicas.	41
3.6.3	Microestructuras de la Muestra Analizada en el Niple J55.	41
3.6.4	Microestructuras de las Muestras Analizadas en el Coupling Q125.	43
3.7	Análisis de Factibilidad Económica.	54
3.7.1	<i>Daño económico promedio por rotura (A).</i>	55
3.7.2	<i>Efecto económico (D).</i>	55
3.8	Metodología Diseñada para la EPEP-Centro.	56
3.9	Conclusiones Parciales del Capítulo 3.	57
	CONCLUSIONES GENERALES.	59
	RECOMENDACIONES.	60
	BIBLIOGRAFÍA.	61
	ANEXOS.	64

INTRODUCCIÓN

El diseño de tuberías de revestimiento y producción ha evolucionado en los últimos 50 años con el fin de propiciar el mejor aprovechamiento sobre estas y fortalecer la práctica de la ingeniería de perforación. De esta manera se ha dado respuesta a los retos de alcanzar mayores profundidades, lo que implica que las tuberías de revestimiento estarán sometidas a mayores presiones y temperaturas.

Como parte de los insumos que demanda un pozo, las tuberías representan un alto porcentaje en el costo del mismo. Se tienen estimaciones generales de que el mismo representa de un 15 al 30% de la inversión total. Por lo tanto, es de suma importancia considerar el costo de las tuberías.

Las bases de todo proceso de ingeniería recaen en los fundamentos técnicos. Sin embargo, se requiere observar sistemáticamente la disminución de los costos asociados en cada proceso. Por lo que en la práctica la ingeniería de perforación, se deben definir y optimizar los materiales tubulares que deben ser empleados en un pozo.

El diseño de un pozo requiere la aplicación y conocimiento de una diversidad de técnicas y procedimientos. Estos, bien aplicados y orientados con la premisa de minimizar costos, conducen a definir las especificaciones de los materiales y parámetros de operación óptimos para aplicar un pozo. Como parte de este proceso, la selección del diseño de las tuberías es una actividad que debe ser recurrente en la práctica de ingeniería de perforación. Cada pozo presenta un comportamiento diferente para su operación y construcción.

Cuando se diseñan las tuberías de revestimiento y de producción, uno de los parámetros que mayormente se toman en cuenta es el límite de fluencia del acero, ya que es una de las variables directas en las ecuaciones de resistencia de los materiales en fenómenos como tensión, compresión, presión interna, y colapso.

Durante las operaciones generadas en la industria petrolera es posible encontrar fallas o deformaciones en las tuberías empleadas. Estas son el resultado de la acción de diversas cargas a lo largo de las operaciones, así como la deficiencia de las garantías operativas como resultado del cumplimiento de su tiempo de vida (fugas o taponamientos). De esta manera, se

busca disminuir y eliminar en lo posible dichos problemas, generándose así de manera satisfactorias las funciones esperadas y establecidas por las empresas o compañías.

En operaciones de campo, transporte así como después de su fabricación las tuberías de producción sufren una serie de daños, lo cual puede afectar a la productividad del pozo, definiéndose de esa manera el éxito o fracaso en una operación de campo dentro de una locación. (*Bravo et al, 2013*).

Es en este punto donde se hace énfasis en que la inspección de las tuberías, después de su fabricación, transporte y ubicación en el pozo es de suma importancia, así como la eficiencia de los profesionales que están a cargo de dichas operaciones de inspección.

En los pozos de petróleo perforados en los últimos años en la franja costera al norte de las provincias Matanzas y Habana se han presentado varios casos de severos problemas producto a fallas como fracturas, picaduras o agrietamiento en el acero de las tuberías de producción, provocando averías que inhabilitan el funcionamiento de los ductos.

A pesar de que la norma del Instituto Americano de Petróleo (API) 5CT correspondiente a la ISO 11960: 2010 establece la obligatoriedad de someter el material de las tuberías de producción a un conjunto de ensayos de propiedades mecánicas, físicas y funcionales, antes de que estas sean puestas en servicio, hasta el momento por parte de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro) no se han realizado pruebas de comprobación a los mismos con el objetivo de comprobar si verdaderamente se corresponden sus propiedades, con los estándares y requerimientos establecidos en las normas internacionales.

Estos aspectos condujeron a la proyección del diseño de investigación siguiente:

Situación Problémica:

Los materiales que se utilizan en la fabricación de las tuberías de producción en la industria petrolera deben poseer un grupo de características desde el punto de vista de su composición química, estructura y propiedades mecánicas establecidos por la norma API 5CT correspondiente a la ISO 11960: 2010, Industria del petróleo y gas natural- Tuberías de acero usado como tuberías de revestimiento o tuberías de producción.

En la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro) la aplicación de lo establecido en la anteriormente referida norma tal y como establece la especificación 5CT de la API no se lleva a cabo de acuerdo a la investigación previa realizada por la autora de la presente tesis. Esto constituye una seria violación de los procedimientos que de manera generalizada se aplican a nivel mundial en la industria petrolera relacionado con la selección de los materiales tubulares de producción.

Problema Investigativo:

No existe una metodología en la EPEP-Centro que permita la caracterización mediante ensayos de composición química, estructura metalográfica y propiedades mecánicas, del material de las tuberías de producción y comprobar si las mismas se corresponden con lo establecido en la norma API 5CT, y que en tal sentido cumplen además con los requisitos necesarios de su designación de servicio.

Hipótesis:

Empleando los ensayos de composición química, metalográficos, y de propiedades mecánicas establecidos por la API 5CT los materiales de las tuberías de producción de la EPEP-Centro será posible caracterizar los mismos y comprobar si satisfacen los requisitos de su designación de servicio.

Objetivo General:

1. Diseñar una metodología para la EPEP-Centro que establezca los pasos a seguir para la caracterización química, metalográfica y de propiedades mecánicas del acero empleado en la fabricación de las tuberías de producción acorde a la norma API 5CT, y que complemente lo establecido en el procedimiento PC-CP/P 2701 establecido por la EPEP-Centro para la compra de materiales y medios.

Objetivos Específicos:

1. Caracterizar el material de las tuberías de producción desde el punto de vista de composición química y estructura metalográfica.
2. Caracterizar los aceros desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas.

Tareas:

1. Selección de las muestras para cada tipo de ensayo a realizar.
2. Determinación de la composición química de las tuberías de producción.
3. Realizar ensayos mecánicos a los materiales.
4. Recopilación y procesamiento de los datos experimentales.
5. Análisis de los resultados.
6. Redacción del procedimiento para la caracterización de los aceros.
7. Análisis económico.

Aportes en el Campo de la Tecnología.

Una metodología para implementar en la gestión productiva de la EPEP Centro, la caracterización de las tuberías de producción de cualquier tipo desde el punto de vista de su composición química, estructura metalográfica y sus propiedades mecánicas, que complemente lo establecido en el procedimiento PC-CP/P 2701 establecido por la EPEP-Centro para la compra de materiales y medios.

CAPÍTULO 1. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.

La perforación de pozos de petróleo persigue dos objetivos principales: Perforar un hoyo hasta la formación petrolífera, e instalar una tubería desde el yacimiento hasta la superficie. Esta tubería, llamada revestimiento se refiere a alcanzar la profundidad total de manera segura, con la cantidad de sargas de revestimiento económicamente efectivas permitiendo la perforación y completación de un pozo, para esto es necesario "delinear" el agujero perforado con tubería de acero. (*Bassante, 2013*).

Los tubos empleados en la industria petrolera deben cumplir con ciertas características geométricas y mecánicas dependiendo de su uso tal y como se refleja en los epígrafes siguientes.

1.1 Proceso de Fabricación de Tuberías.

Debido a la importancia de la tubería de acero en la perforación de pozos petroleros, (*Tena, 2013*), sugiere que la fabricación debe contar con características de calidad extrema, acordes a los riesgos y necesidades manejados en la industria petrolera.

El acero es un metal refinado. Se obtiene a partir de la fundición de un lingote de hierro combinado al mismo tiempo con otros elementos químicos.

Los aceros se dividen en ordinarios y especiales. Los aceros ordinarios contienen tres elementos principales: hierro, carbono y manganeso. El carbono y el manganeso reunidos no representan más del 1.5% del metal. Los aceros ordinarios con el 0.1 a 1.5% de carbono se clasifican como aceros de bajo contenido de carbono.

Los aceros especiales se hacen como los ordinarios, pero se les agregan otros elementos tales como: níquel, cromo, molibdeno, cobre, vanadio y tungsteno.

Tanto los aceros al carbono como los especiales (aceros inoxidable, aceros resistentes a la corrosión y a las altas temperaturas), se producen en hornos eléctricos.

Existen tres procesos de fabricación de tuberías: el proceso sin costura, el proceso con soldadura eléctrica-resistencia y el proceso de soldadura eléctrica instantánea (flash). El proceso más utilizado para suministrar la demanda de tuberías dentro del ámbito de

perforación (diámetros desde 508mm (20") o menores) es sin lugar a dudas la fabricación de tubería sin costura.

La fabricación de tuberías se ha diversificado y extendido para satisfacer la demanda de las diferentes industrias que las utilizan como insumo. Es por ello que en la actualidad obtenemos tuberías con diferentes calidades en los materiales que la componen. Tal es el caso de: tuberías de aluminio, tuberías de fibra de vidrio, tuberías de plástico, etcétera. Cada una de ellas tiene aplicaciones específicas y limitadas por las condiciones del material y de su respuesta en su manejo. (Tena, 2013).

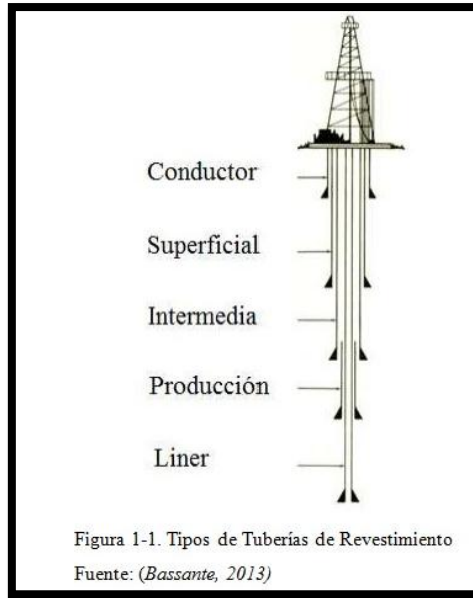
El acero se fabricará por el proceso de horno de solera abierta (Siemens Martin), horno eléctrico, básico al oxígeno, Thomas o cualquier otro proceso aprobado por el comprador. El proceso de fabricación será informado por el fabricante a pedido del comprador.

En el anexo 1 se muestra el proceso de fabricación de las tuberías de producción.

1.2 Tipos de Tubería de Revestimiento.

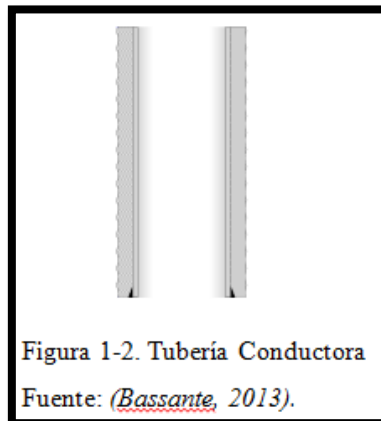
Existen principalmente 5 tipos de tubería de revestimiento instaladas en pozos de tierra. (Bassante, 2013). (Ver figura 1-1).

- Sarta de Conducción.
- Tubería Superficial de Revestimiento.
- Tubería Intermedia de Revestimiento.
- Tubería de Revestimiento de Producción o Explotación.
- Liner.



1.2.1 Tubería Conductora.

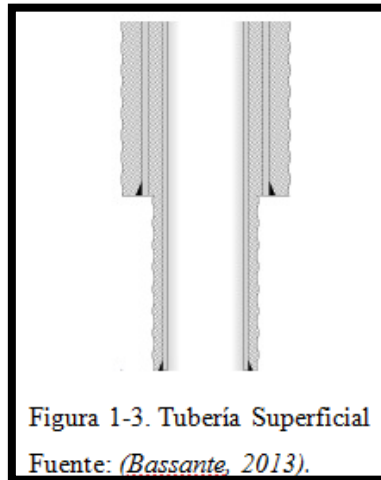
Según el criterio de *Bassante, 2013*, la sarta es utilizada para aislar formaciones no consolidadas, proteger arenas de aguas frescas de ser contaminadas y reviste cualquier depósito poco profundo de gas. Además es usualmente cementada a la superficie en tierra. (Ver figura 1-2).



1.2.2 Tubería Superficial de Revestimiento.

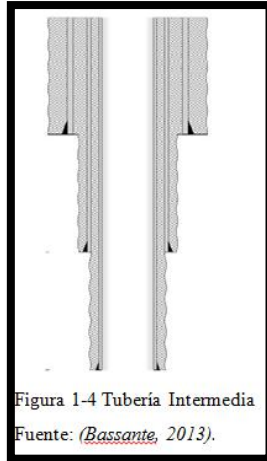
Provee protección contra arremetidas para la perforación más profunda, soporte estructural para el cabezal del pozo y sartas de revestimiento subsecuentes y es muchas veces utilizada para aislar formaciones problemáticas. La sarta se encuentra, ya sea cementada a la superficie

o hasta el interior de la tubería conductora. Su objetivo es permitir la instalación del primer preventor donde se instalan las conexiones superficiales de control y establecer un medio de circulación para el fluido de perforación. Ver figura 1-3. (*Bassante, 2013*).



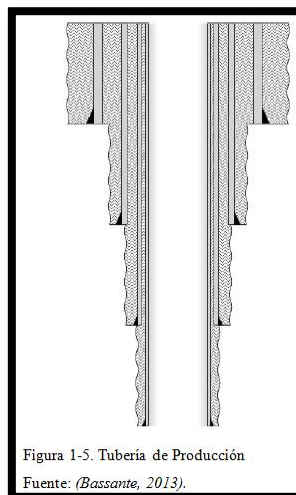
1.2.3 Tubería Intermedia de Revestimiento.

Una vez más esta sarta provee contra arremetidas para la perforación más profunda y aísla formaciones problemáticas que pudieran dañar la seguridad del pozo y/o impedir las operaciones de perforación. Una sarta de tubería intermedia de revestimiento es comúnmente colocada cuando es probable que un pozo encuentre un influjo y/o pérdida de circulación en el agujero descubierto proveyendo de esta manera protección contra arremetidas al mejorar la fuerza del pozo. La altura del cemento es determinada por el requisito del diseño para sellar cualquier zona de hidrocarburo y de flujos de sal. El tope del cemento no necesita estar dentro de la sarta superficial de revestimiento, esto depende de las políticas de las compañías operadoras. (*Bassante, 2013*). (Ver figura 1-4).



1.2.4 Tubería de Revestimiento de Producción.

Según (Bassante, 2013) este es el nombre que se aplica a la tubería de revestimiento que contiene la tubería de producción y podría estar potencialmente expuesta a fluidos del reservorio. La misma podría ser extendida hasta la superficie como una sarta integral o ser combinada de un liner de producción 177.8mm (7") y la tubería de revestimiento de producción anteriormente colocada 244.48mm (9 5/8"). El propósito de la tubería de revestimiento de producción es la de aislar las zonas productoras, permitir el control de reservorio, actuar como un conducto seguro de transición de fluidos/ gas/ condensado, a la superficie y previene influjos de fluidos no deseados. (Ver figura 1-5).



En estudios realizados por (*Castro et al, 2013*), demuestran que estas tuberías también tienen como objetivo principal la instalación de empacadores de producción y accesorios utilizados en la terminación del mismo.

En el diseño de esta tubería se deberá tener especial atención, considerando todos los elementos que intervienen en su programación.

Sus principales funciones son:

- Aislar las formaciones o yacimientos para producir selectivamente.
- Evitar la migración de fluido entre zonas.
- Instalar empacadores y accesorios para la terminación del pozo.
- Servir de aislamiento al equipo de control (cabezal) que se instalará para manejar la producción del pozo.

1.2.5 Liner o Tubería Corta de Revestimiento.

(*Bassante, 2013*), considera que un liner será suspendido, colgado a corta distancia por encima de la zapata del revestidor anterior y será cementada a lo largo de toda su longitud para asegurar un buen sellado al aislar el espacio anular. Muchas veces un empacador de liner pueden ser instalado como una segunda barrera, por precaución. Los liners permiten una perforación más profunda, separar zonas productoras, de formaciones de reservorio y puede también ser instalado para propósitos de la realización de pruebas. (Ver figura 1-6).

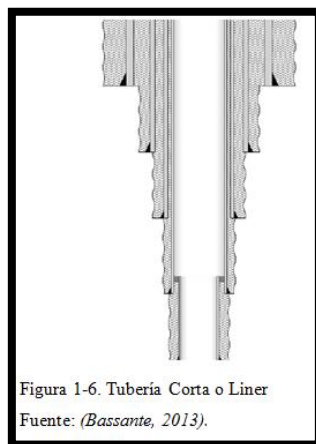


Figura 1-6. Tubería Corta o Liner
Fuente: (*Bassante, 2013*).

Los liners de producción son colocados:

- Para completar el pozo a menor costo.
- Permitir en conducto de producción más grande para proveer un rango de elección para la tubería.

Razones para su utilización, (Castro et al, 2013)

- Control de pozo: el liner permite aislar las zonas de alta o baja presión y terminar o continuar la perforación con fluidos con alta o baja densidad.
- Economía de tubería de revestimiento: se pueden efectuar pruebas de horizontes cercanos a la zapata de la última tubería de revestimiento, a un costo muy bajo debido a la pequeña cantidad de tubería usada, no comparable con una tubería llavada hasta la superficie.
- Rápida instalación: las tuberías de revestimiento cortas pueden colocarse en el intervalo deseado mucho más rápido que las normales ya que una vez conectada la cantidad requerida, esta es introducida con la tubería de perforación.
- Ayuda a corregir el desgaste de la última tubería de revestimiento cementada. Al continuar la perforación existe la posibilidad de desgastar la tubería de revestimiento. Esto se puede corregir mediante una extensión o complemento de una tubería corta.
- Evita volúmenes muy grandes de cemento. Debido a que las tuberías cortas no son cementadas hasta la superficie.
- Auxilia en la hidráulica durante la perforación al permitir utilizar sartas de perforación combinadas, mejora las pérdidas de presión por fricción en la tubería de perforación, durante la profundización del pozo, permitiendo alcanzar mayores profundidades con sartas más resistentes.

1.3 Características de las Tuberías de Producción.

Las características principales que deben de observarse en las tuberías de revestimiento y tuberías de producción son (Bravo et al, 2013):

- Diámetro nominal.
- Peso nominal.
- Grado del acero.
- Drift.

- Resistencia a la tensión.
- Resistencia al colapso.
- Resistencia al estallamiento.
- Rosca.

Los valores de cada una de estas características se muestran en el anexo 2-A.

Las propiedades antes mencionadas están controladas por la composición química del acero utilizado, la misma que los grados API (API, 2004) tienen los siguientes valores.

- Para H-40, J-55, K-55, N-80, la especificación API-5A indica aceros fundidos en hornos eléctricos a crisol abierto, con una tolerancia de contenido máximo de fósforo de 0.040% y azufre al 0.060%.
- Para los grados C-75, L-80, y C-95 la especificación API-5AC presenta valores de Carbono entre 0.15% a 0.75%, Mn 0.30% a 1.90%, Mo de 0.15% a 1.10%, Cr de 0.8% a 14.0%, Ni entre 0.25% a 0.99%, Cu 0.25% a 0.35%, Fósforo (P_{max}) 0.020% y Azufre (S_{max}) 0.010%.
- Para grados P-105 y P-110, la especificación API-5AX establece P_{max} 0.040% y S_{max} 0.060%, Para grados Q-125 la especificación API-5AQ determinar los porcentajes de componentes como sigue: C entre 0.35% a 0.50%; Mn entre 1.00% a 1.90%; Mo entre 0.75% o más; Cr entre 1.20% o más; Ni 0.99%; P_{max} 0.020% a 0.030%; S_{max} 0.010% a 0.020%.

Los Grados de Aceros estandarizados para las tuberías API son: J-55, C-75, L-80, C-95, N-80, P-105 y V-150. Los grados C-75, L-80 y C-95 son diseñados para soportar ambientes ácidos (pozos de producción de hidrocarburos sea gas o petróleo que contienen azufre H_2S).

1.4 Factores que Rigen las Características Mecánicas del Acero:

(Mack *et al*, 2010) plantearon que los factores que rigen las características mecánicas del acero son los siguientes:

- **Composición química elemental.** Es el resultado del análisis químico. La composición química condiciona la constitución físico-química y propiedades de los mismos constituyentes. No es modificable por tratamientos mecánicos o térmicos.

- **Constitución físico-química.** Caracteriza la naturaleza y la proporción de diversas fases, donde la aleación fue formada. Es modificable por tratamientos térmicos reversibles en condiciones del diagrama de equilibrio Fe-C, pero no es modificable por tratamientos mecánicos.
- **Estructura metalográfica.** Se refiere a la morfología y la repartición de constituyentes de aleaciones. Es modificable por tratamientos mecánicos irreversibles y modificables por tratamientos térmicos de modo reversible o irreversible.

1.5 Propiedades Mecánicas del Acero.

(Mack et al, 2010) plantearon también que las propiedades mecánicas tales como rigidez, ductilidad, fragilidad y maquinabilidad, por nombrar algunas, describen el comportamiento del material cuando se somete a cargas. Estas propiedades afectan las características de funcionamiento de los miembros de los sistemas estructurales. A continuación, se mencionan algunas de las propiedades mecánicas más importantes:

- **Resistencia:** es el esfuerzo máximo que un material puede soportar antes de que ocurra la falla.
- **Rigidez:** se dice que una parte es rígida si soporta un gran esfuerzo con una deformación relativamente pequeña. El módulo de elasticidad de un material es una medida de su rigidez.
- **Ductilidad:** es la capacidad de un material para soportar grandes deformaciones inelásticas (plásticas) antes de la fractura. Está asociada con los esfuerzos de tensión y, además, redistribuye los esfuerzos en lugares de concentraciones altas de esfuerzos.
- **Maleabilidad:** es la capacidad de soportar grandes deformaciones inelásticas antes de la fractura. Se asocia con los esfuerzos de compresión.
- **Fragilidad:** es la propiedad opuesta a la ductilidad. Un material frágil se fracturará a deformaciones unitarias relativamente bajas (5%).
- **Resiliencia:** es la capacidad de absorber energía en el intervalo elástico de esfuerzos.
- **Tenacidad:** es la capacidad de absorber energía en el intervalo inelástico de esfuerzos.
- **Dureza:** es una medida de la capacidad del material para resistir rayaduras. Puede modificarse mediante procesos de manufacturas tales como tratamientos térmicos, trabajo en frío, templado y revenido.

- **Maquinabilidad:** es la facilidad con la que el material puede maquinarse mediante operaciones tales como barrenado, fresado, roscado, etc. Puede modificarse con las aleaciones del material con otros elementos, tratamientos térmicos y el estirado en frío.

1.6 Condiciones de Falla.

(Tena, 2013), plantea que el término "falla" se entiende como sinónimo de "fractura". Sin embargo, en el estudio de la mecánica de materiales éste no es el significado usual del término. Se dice que ocurre una falla cuando un miembro cesa de realizar satisfactoriamente la función para lo cual estaba destinado. En el caso de las tuberías colocadas en un pozo, si estas alcanzan cualquier nivel de deformación se debe entender la situación como una condición de falla.

Por lo tanto, una falla en las tuberías es una condición mecánica que refleja la falta de resistencia del material ante la situación y exposición de una carga. Con ello propicia la deformación del tubo. La capacidad de resistencia de una tubería se define como aquella aptitud o condición que ofrece una tubería para reaccionar y evitar cualquier tipo de falla o deformación, ante la acción combinada de cargas.

Las principales fallas de las tuberías son básicamente colapso, estallido, corrosión y tensión. El tratamiento de cada una de las fallas simplifica el estudio y análisis del comportamiento de la resistencia en los materiales.

1.6.1 Esfuerzo de Cedencia (fluencia).

Para entender el comportamiento de falla es necesario definir el concepto de cedencia o fluencia, que es la propiedad o condición del material (en el caso de la tubería es acero) para soportar la deformación elástica, o bien, la resistencia que opone el material a la deformación ante la exposición de una carga.

(Mack et al, 2016), explican que un material alcanza el punto de cedencia cuando experimenta una carga que le provoca una deformación permanente. Es decir, el material se comporta plásticamente. Antes de esta deformación, al liberar la carga, el material recupera su estado original. Se dice entonces que el material es elástico. El punto a partir del cual el material se fractura o se rompe, se dice que alcanza su último valor de resistencia a la cedencia.

El anexo 2-E muestra el comportamiento esfuerzo-deformación para determinar la fluencia o cedencia de un material (acero).

Para establecer la cedencia de un acero, el API recomienda que se realice una prueba de tensión sobre un espécimen. A partir de ésta se debe medir la deformación generada hasta alcanzar la fractura del mismo. Se establece que la cedencia del material es el esfuerzo de tensión aplicado cuando alcanza el 0.5% de deformación. Este valor de deformación es ligeramente superior al límite elástico. Este porcentaje es aplicable para los aceros API denominados H-40, J-55, K-55, N-80, C-75, L-80 y C-95. Para aceros P-110, Q-125, el API considera una deformación del 0.65% para establecer la cedencia de estos materiales.

La cedencia se mide en unidades de fuerza por unidad de área (Pa o MPa), que significa la fuerza aplicada en el área de exposición del material para hacer ceder al mismo. La nomenclatura recomendada por el API para identificar los diferentes tipos de acero se define por una letra seguida por un número. La letra simboliza el tipo de acero, y el número y la magnitud de la cedencia del material expresada en miles de libras por pulgada cuadrada (psi).

El anexo 2-B muestra un resumen de los diferentes aceros o grados API con sus valores de cedencia.

1.6.2 Colapso.

La falla por colapso de una tubería es una condición mecánica. Se origina por el aplastamiento de una tubería por una carga de presión. Ésta actúa sobre las paredes externas de la misma y es superior a su capacidad de resistencia. Es una de las causas más comunes de falla en las tuberías colocadas en un pozo y es un fenómeno de falla más complejo de predecir.

La falla al colapso depende de diversos factores propios de la naturaleza de fabricación del tubo. Dentro de éstos resaltan la cedencia del material, la geometría tubular, imperfecciones (excentricidad, ovalidad) y la condición de esfuerzos en la tubería. (*Cruz et al, 2015*).

1.6.3 Estallido.

La falla por estallamiento de una tubería es una condición mecánica que se genera por la acción de cargas de presión actuando por el interior de la misma. La resistencia que opone el cuerpo del tubo se denomina resistencia al estallamiento. (*Mack et al, 2010*).

1.6.4 Tensión.

La tensión es una condición mecánica (tensionada) de una tubería que puede ocasionar la falla o fractura de la misma. Se origina por la acción de cargas axiales que actúan perpendicularmente sobre el área de la sección transversal del cuerpo del tubo. Las cargas dominantes en esta condición mecánica son los efectos gravitacionales, flotación, flexión y esfuerzos por deformación del material (*Mack et al, 2010*).

1.6.5 Corrosión.

La corrosión es un fenómeno electro-químico. Tiene lugar en las tuberías por efecto de la acción del medio ambiente y la reacción de los constituyentes del material con el que están fabricados los tubos, es decir de acero. Este fenómeno tiene muchas y diversas presentaciones en los aceros. Desde una oxidación hasta lo que actualmente conocemos como agrietamiento por sulfhídrico (SSC). El efecto de deterioro por los estragos de la corrosión en las tuberías se manifiesta por la pérdida de la capacidad de resistencia, que obliga a prevenir estos efectos para evitar las fallas en las tuberías.

Los factores que contribuyen a la corrosión SSC son la concentración del H₂S, el nivel pH, la temperatura, el nivel de esfuerzos en la tubería, la cedencia del material, la micro-estructura, el proceso de tratamiento térmico durante la fabricación y las aleaciones que componen al acero. (*Dupal et al, 2012*).

1.7 Estándares sobre Tuberías.

Según explica (*Tena, 2013*) a nivel mundial existen varias organizaciones e instituciones que estudian e investigan, todo lo concerniente al tema de tuberías utilizadas para la industria petrolera.

Dichas instituciones se enfocan principalmente al establecimiento de estándares para la fabricación, uso y prueba de materiales, como un medio de coadyuvar a los ingenieros en la mejor toma de decisiones y a establecer condiciones y recomendaciones para el adecuado aprovechamiento de las tuberías.

1.7.1 API.

Una de las instituciones más serias y de mayor prestigio a nivel internacional y que ha trabajado para la industria petrolera desde 1919, es el American Petroleum Institute (API). En el seno de dicha institución se han forjado una serie de estudios e investigaciones que dieron lugar a lo que actualmente se conoce como boletines o recomendaciones API.

Los estudios sobre tuberías y conexiones que el API ha realizado, ha generado una gran cantidad de referencias, que en muchos de los casos, aplicamos en cada una de las etapas en las que se utilizan las tuberías. Es decir, primeramente los fabricantes producen las tuberías requeridas acorde a las especificaciones de fabricación y pruebas recomendadas por el API. Además, desde un punto de vista de diseño, se utilizan las condiciones de desempeño estipuladas en los boletines y finalmente, se aplican también las recomendaciones para el uso adecuado de las tuberías (*Tena, 2013*).

1.7.2 NACE.

Del mismo modo, existe otra institución que se ha enfocado desde 1943 al estudio e investigación de los efectos de la corrosión sobre una diversidad de materiales, la National Association of Corrosion Engineers (NACE). Esta institución ha generado una serie de recomendaciones y boletines de pruebas de materiales que se aplican sobre los elementos tubulares. Generalmente esta institución emite cada año una revisión actualizada de sus referencias (*Tena, 2013*).

1.7.3 ISO.

A nivel mundial, dentro del marco de globalización de las economías, la International Standard Organization (ISO), organización enfocada a estandarizar procesos con calidad ha avalado o certificado algunos de las recomendaciones y boletines del API, a fin de generalizar su uso en cualquier país (*Tena, 2013*).

1.8 Caracterización Físico-Química de Crudos Cubanos de la Franja Norte de Crudos Pesados.

(*Aguilar et al, 2011*) demostraron que los crudos cubanos de la franja norte de crudos pesados tienen ciertas diferencias según el análisis de sus propiedades físico-químicas. Los más

abundantes poseen alto contenido de asfaltenos, gas y por ciento de azufre (cerca a 7%). Constituyen crudos pesados y extrapesado. Generalmente su color es negro, con elevadas viscosidades y densidades: 0,95 g/ml. En la destilación primaria producen poca nafta y abundante petróleo, quedando asfalto como residuo.

Los grados (°) API oscilan entre 8 y 17 generalmente. Los valores de BSW son bajos, cerca de 0.15%, que sugieren que no está emulsionado. También existen crudos de mayor calidad, con bajo contenido de asfaltenos y bajas viscosidades, libre de agua y sin dificultades para determinar la tensión interfacial.

1.9 Procedimiento de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro.

El procedimiento de Tramitación y Ejecución de Compras de la EPEP-Centro (*PC-CP/P 2701, 2017*) tiene como objetivo establecer las reglas que ordenan el proceso de solicitud, tramitación y ejecución de todas las compras que se ejecutan en la EPEP-Centro, incluyendo las solicitudes de inversiones y operaciones.

El punto 6 del procedimiento está dirigido a las responsabilidades y dentro de esta el 6.9 explica cuáles son las responsabilidades de los especialistas técnicos de las áreas. Una de las responsabilidades de los especialistas técnicos y que está acorde con la investigación es el de efectuar la revisión técnica de los productos a su llegada a los almacenes y en el periodo establecido, así como efectuar las recomendaciones técnicas al detectar no concordancia con lo solicitado.

1.10 Conclusiones Parciales del Capítulo 1.

1. De acuerdo al análisis bibliográfico a partir de la norma API 5CT y las ASTM se establecen como pasos indispensables y de obligatorio cumplimiento la caracterización química, metalográfica y propiedades mecánicas al acero empleado en las tuberías de producción de la EPEP-Centro.
2. Acorde a las características del petróleo que se extrae de los pozos de la EPEP Centro, con un alto contenido de azufre, se recomienda por la Norma API 5CT el empleo de los grados C-75, L-80 y C-95. Estos aceros son diseñados para soportar ambientes

ácidos (pozos de producción de hidrocarburos sea gas o petróleo que contienen azufre H₂S).

3. No existe una metodología que dé respuesta a lo que establece el acápite 6.9 del procedimiento de Tramitación y Ejecución de Compras en la EPEP-Centro, como garantía de la compra de los materiales tubulares de producción.

CAPÍTULO 2. PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL. MATERIALES Y MÉTODOS.

En este capítulo primeramente se realiza una breve caracterización de los materiales tubulares de producción que son el objeto de la investigación. Partiendo de estos se explica cada uno de los ensayos realizados, tales como: composición química, ensayos metalográficos y de propiedades mecánicas establecidos por la norma internacional American Petroleum Institute (API) 5CT. Estos ensayos se desarrollaron en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME) en la Lisa, Habana. Además se hace referencia y se explica también las normas American Society for Testing and Materials (ASTM) que fueron utilizadas para la realización de estos ensayos.

2.1 Materiales.

Para llevar a cabo esta investigación se utilizaron secciones de un niple de 114.30 mm (4 ½") x 12.65 libras/pie (figura 2.1), y un coupling (figura 2.2) de 114.30mm (4 ½") que sufrió fractura longitudinal completa; suministrada por la empresa China Petroleum Technology & Development Corporation Ecuador S.A (CPTDC). Ver anexo 3-A



Figura 2.1: Probetas de Ensayo del Niple.

Fuente: (CESOLCA, 2019).



Figura 2.2: Probetas de Ensayo del Coupling.

Fuente: (CESOLCA, 2019).

2.2 Composición Química del Acero.

La composición elemental de los aceros define en gran medida muchas de sus propiedades (dureza, resistencia a la corrosión, etc.) y es imprescindible para identificar y certificar su calidad.

(Millán, 2016) explicó que existe una enormidad de ataques químicos, para diferentes tipos de metales y situaciones. En general, el ataque es hecho por inmersión o fregado con algodón embebido en el líquido escogido por la región a ser observada, durante algunos segundos hasta que la estructura o defecto sea revelada. Uno de los más usados es el Nital, (ácido nítrico y alcohol), para la gran mayoría de los metales ferrosos. Una guía de los ataques químicos utilizados para revelar las fases y microconstituyentes de metales y aleaciones se pueden ver en la norma ASTM E407 - 07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.

Para la determinación de la composición química en ambos casos (M-1 Niple y M-2 Coupling) se cortó de las tuberías de acero una muestra de dimensión 30mm^2 , las cuales fueron mecanizadas hasta obtener superficies completamente planas; con el objetivo de determinar el contenido de carbono, silicio, manganeso, fósforo, azufre, cromo, níquel y cobre. Para el

análisis se utilizó un Espectrómetro Multicanal Digital modelo Belec Vario Lab 2P N° 171007. Ver anexo 3-B.

2.3 Ensayo de Dureza.

(Torres, 2001) describe que los ensayos de dureza Brinell y Rockwell se basan en la resistencia a la penetración que opone la superficie del cuerpo en examen a una esfera durísima o a una punta de diamante que trata de penetrar bajo una carga preestablecida. La dureza máxima obtenida en el acero martensítico nunca excede una dureza Rockwell C 68 y una Brinell de 745.

Es un ensayo fácil y no destructivo; puede realizarse en cualquier sitio, ya que existen durímetros fácilmente transportables. Una de las ventajas del ensayo de dureza es que los valores entregados pueden usarse para hacer una estimación de la resistencia a la tracción. La dureza superficial puede aumentarse añadiendo al material una capa de carbono, en un tratamiento térmico denominado cementación.

La clasificación y los métodos varían con cada material, dando origen a los números de dureza:

HBN (Hardness **B**rinell Number)

HRA, HRB, HRC ... (Hardness **R**ockwell series A, B, C ...)

HVN (Hardness **V**ickers Number)

En el anexo 4 se detalla el procedimiento y el cálculo de cada uno de estos números estandarizados.

2.3.1 Ensayo de Dureza Brinell para el Niple

Para la determinación del ensayo de dureza Brinell del niple se cortó de la tubería de acero una muestra de dimensiones 100x80 mm y se limpió la superficie con papel de lija. Para realizar el análisis el equipo que se utilizó fue un Durómetro Rockwell–Brinell IBERTEST, con certificado de calibración N_o: 021218-752-002; N_o de serie: 27336; escala (mm/Kgf/s): 2,5/187,5/15; U_{calibración para k =2} (%): ± 0,30 y un rango de medición (Kgf/mm²): 40-300. Ver anexo 3-C.

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E 10-08/ A 956-00 a un total de 5 réplicas efectivas a una temperatura de $24 \pm 1^\circ\text{C}$. La norma ASTM E 10-08/ A 956-00.

La norma ASTM 10-08 contiene descripción del método de ensayo (Método de prueba A) que se refiere a la determinación de la dureza Brinell de materiales metálicos, incluyendo métodos para la verificación de máquinas de ensayo de dureza Brinell (Método de prueba B) y la calibración de la estándar dureza de los bloques de ensayo (Método C).

La norma ASTM A 956-00 es un método de prueba que contiene información sobre la determinación de la dureza Equotip en acero, acero forjado, y hierro forjado (Parte A), incluyendo los métodos de verificación de los durómetros Equotip (Parte B) y la calibración de los bloques de prueba estandarizados (Parte C).

2.3.2 Ensayo de Dureza Vickers para el Coupling.

En el caso del coupling se realizó ensayo de Dureza Vickers, donde se cortó una muestra de dimensiones 100x80mm. Tipo de probeta: plana. Se realizaron 5 réplicas del metal base en la superficie de la muestra a una temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

Para realizar el análisis el equipo que se utilizó fue un Durómetro Vickers Portátil con certificado de calibración N^o: 53-25-03/11; N^o de serie: 21-8; escala (Kgf/mm²): HV10/15; Incertidumbre (%): $\pm 0,33$ y un rango de medición (Kgf/mm²): 28-1224.

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E 92-82 (03)/ E 384-06.

La norma ASTM E 92-82 consiste en un probador de dureza Vickers, donde su diseño de precisión puede producir más clara la sangría. Tiene un amplio campo de medición. Puede equipado con 10x y lente de 20x o 20x y 40x, lente y Lente de 2 piezas pueden ser seleccionadas de acuerdo a requerimiento del usuario. Equipado con pantalla LCD Digital Microscopio; directamente puede mostrar métodos de medición, fuerza de ensayo, la sangría, la longitud, el valor de dureza, tiempo de permanencia de la prueba la fuerza y el número de medición, y cuenta con un sistema de control de bucle cerrado. Las pruebas de controles de Microchip dan fuerza para carga y descarga de permanencia y el sensor real.

La ASTM define la prueba de dureza E 384 como pruebas de dureza que se han encontrado para la evaluación de materiales, control de calidad de los procesos de fabricación e investigación y desarrollo. Este método de prueba incluye un análisis de las posibles fuentes de errores que pueden ocurrir durante Knoop y pruebas de Vickers y cómo estos factores afectan a la precisión, repetibilidad y reproducibilidad de los resultados de las pruebas. Básicamente la prueba de Vicker consiste en, un método para medir la dureza de los materiales. Sus cargas van de 5 a 125 kilopondios cinco). Su penetrador es una pirámide de diamante con un ángulo base de 136° .

2.4 Ensayo de Resilencia.

(Torres, 2001) plantea que el ensayo Charpy permite calcular cuánta energía logra disipar una probeta al ser golpeada por un pesado péndulo en caída libre (Figura 2.3-a). El ensayo entrega valores en Joules, y éstos pueden diferir fuertemente a diferentes temperaturas. La Figura 2.3-b permite evaluar la diferencia entre probetas antes y después del ensayo.

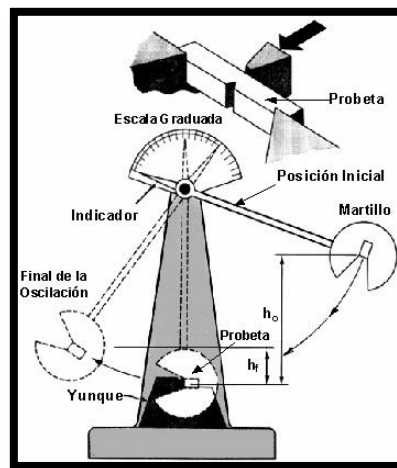


Figura 2.3-a: Máquina Para Pruebas de Impacto

Fuente: (Torres, 2001)

El ensayo de impacto consiste en dejar caer un pesado péndulo, el cual a su paso golpea una probeta que tiene forma paralelepípeda ubicada en la base de la máquina.

La probeta posee un entalle estándar para facilitar el inicio de la fisura; este entalle recibe el nombre de V-Notch. Luego de golpear la probeta, el péndulo sigue su camino alcanzando una

cierta altura que depende de la cantidad de energía disipada al golpear. Las probetas que fallan en forma frágil se rompen en dos mitades, en cambio aquellas con mayor ductilidad se doblan sin romperse. Este comportamiento es muy dependiente de la temperatura y la composición química, esto obliga a realizar el ensayo con probetas a distinta temperatura, para evaluar la existencia de una "temperatura de transición dúctil-frágil".

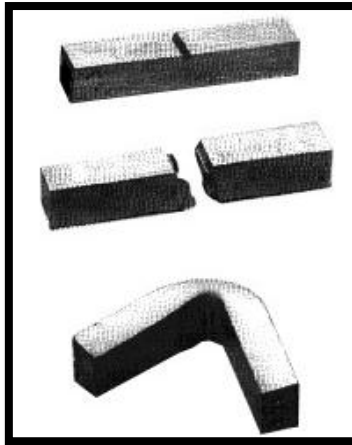


Figura 2.3-b: Probeta Antes y Después del Ensayo de Impacto.

Fuente: (Torres, 2001)

2.4.1 Ensayo de Resiliencia para el Niple.

Para la determinación del ensayo de resiliencia en el niple fueron extraídas 5 probetas respecto al eje principal del tubo (M-1); las cuales fueron mecanizadas hasta obtener superficies completamente planas. Debido a la curvatura y al espesor del tubo, las probetas tienen un espesor final de 5 mm (espesor reducido). Los ensayos de las probetas que corresponden a la muestra M-1 (5 réplicas) fueron realizados a temperatura ambiente (24 ± 1 °C). Todas las probetas contaban con una entalla en V para iniciar la fractura.

Para realizar el análisis el equipo que se utilizó fue un KM-30, con certificado de verificación N_o: 53-22-1; N_o de serie: 2010; escala (J): 300; U_{calibración para k =2} (%): $\pm 0,31$ y un rango de medición (J): 0-300. Ver anexo 3-D.

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM A370. El uso principal de estos métodos es la prueba para determinar las propiedades mecánicas del acero, acero inoxidable, aleaciones y productos relacionados para la evaluación de la conformidad de

los productos. Además pueden ser utilizados en las pruebas de aceptación de entrada de material por el comprador o evaluación de los componentes de servicio después de la exposición.

2.4.2 Ensayo de Resiliencia para el Coupling.

Para la determinación del ensayo de resiliencia del coupling fueron extraídas 5 probetas respecto al eje principal del tubo (M-2); las cuales fueron mecanizadas hasta obtener superficies completamente planas. Debido a la curvatura y al espesor del tubo, las probetas tienen un espesor final de 5 mm (espesor reducido). Los ensayos de las probetas que corresponden a la muestra M-2 (5 réplicas) fueron realizados a temperatura ambiente (24 ± 1 °C). Todas las probetas contaban con una entalla en V para iniciar la fractura. El criterio de aceptación es la energía absorbida por la rotura por impacto a temperatura ambiente mayor o igual a 14J para probetas transversales de espesor reducido $\frac{1}{2}$.

Para realizar el análisis el equipo que se utilizó fue un KM-30, con certificado de verificación N_o: 53-22-1; N_o de serie: 2010; escala (J): 300; U_{calibración} para $k = 2$ (%): $\pm 0,31$ y un rango de medición (J): 0-300.

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM A370. El uso principal de estos métodos es la prueba para determinar las propiedades mecánicas del acero, acero inoxidable, aleaciones y productos relacionados para la evaluación de la conformidad de los productos. Además pueden ser utilizados en las pruebas de aceptación de entrada de material por el comprador o evaluación de los componentes de servicio después de la exposición.

2.5 Ensayo de Tracción.

Según (Torres, 2001) para conocer las cargas que pueden soportar los materiales, se efectúan ensayos para medir su comportamiento en distintas situaciones. El ensayo destructivo más importante es el ensayo de tracción, en donde se coloca una probeta en una máquina de ensayo consistente de dos mordazas, una fija y otra móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil.

Un esquema de la máquina de ensayo de tracción se muestra en la Figura 2.4.

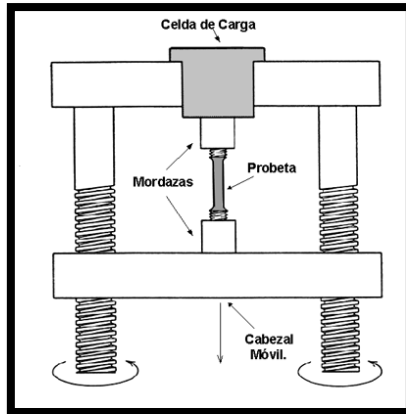


Figura 2.4: Máquina de Ensayo de Tracción.

Fuente: (Torres, 2001)

La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas poseen un plotter que grafica en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída.

El anexo 2-F muestra el gráfico obtenido en una máquina de ensayo de tracción para un acero.

Las curvas tienen una primera parte lineal llamada zona elástica, en donde la probeta se comporta como un resorte: si se quita la carga en esa zona, la probeta regresa a su longitud inicial.

Se tiene entonces que en la **zona elástica** se cumple:

$$F = K (L - L_0)$$

F: Fuerza

K: cte del resorte

L: longitud bajo carga

L_0 : longitud inicial

Cuando la curva se desvía de la recta inicial, el material alcanza el **punto de fluencia**, desde aquí el material comienza a adquirir una deformación permanente. A partir de este punto, si se quita la carga la probeta quedaría más larga que al principio. Deja de ser válida nuestra

fórmula $F = K (L - L_0)$ y se define que ha comenzado la **zona plástica** del ensayo de tracción. El valor límite entre la zona elástica y la zona plástica es el **punto de fluencia** (yield point) y la fuerza que lo produjo la designamos como:

$$F = F_{yp} \text{ (yield point)}$$

Luego de la fluencia sigue una parte inestable, que depende de cada acero, para llegar a un máximo en $F = F_{m\acute{a}x}$. Entre $F = F_{yp}$ y $F = F_{m\acute{a}x}$ la probeta se alarga en forma permanente y repartida, a lo largo de toda su longitud. En $F = F_{m\acute{a}x}$ la probeta muestra su punto débil, concentrando la deformación en una zona en la cual se forma un cuello.

La deformación se concentra en la zona del cuello, provocando que la carga deje de subir. Al adelgazarse la probeta la carga queda aplicada en menor área, provocando la ruptura.

El anexo 2-G muestra la forma de la probeta al inicio, al momento de llegar a la carga máxima y luego de la ruptura.

2.5.1 Ensayo de Tracción para el Niple.

Para la determinación del ensayo de tracción en el Niple fueron extraídas 3 probetas con su eje principal perpendicular a la dirección de laminación; las cuales fueron mecanizadas hasta obtener superficies completamente planas. La longitud inicial entre puntos fue de 50 mm (previo a cada ensayo). Todos los ensayos de tracción se realizaron a una temperatura de 24 ± 1 °C. (Ver anexo 3-E).

Para realizar el análisis el equipo que se utilizó fue una Máquina Universal de Fuerza P-20, con certificado de verificación N_o: 021218-752-001; N_o de serie: 1221; escala (tf): 10,0; U calibración para $k = 2$ (%): $\pm 0,37$ y un rango de medición (Tf): 0-10,0.

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E 8M-2004 que consiste en Métodos de Prueba Estándar para Pruebas de Tensión de Materiales Metálicos. Estas pruebas de tensión proporcionan información sobre la resistencia y la ductilidad de los materiales en tracción uniaxial. Esta información puede ser útil en las comparaciones de los materiales, el desarrollo de aleación, control de calidad y diseño en determinadas circunstancias. Los resultados de las pruebas de tensión de las muestras a máquina a las dimensiones normalizadas de las partes seleccionadas de una pieza o material no del todo

pueden representar la fuerza y propiedades de ductilidad del producto final completo o su comportamiento en servicio en diferentes ambientes.

2.5.2 Ensayo de Tracción para el Coupling.

Para la determinación del ensayo de tracción en el coupling fueron extraídas 3 probetas con su eje principal perpendicular a la dirección de laminación; las cuales fueron mecanizadas hasta obtener superficies completamente planas. La longitud inicial entre puntos fue de 50 mm (previo a cada ensayo). Todos los ensayos de tracción se realizaron a una temperatura de 24 ± 1 °C.

Para realizar el análisis el equipo que se utilizó fue una Máquina Universal de Fuerza P-20, con certificado de verificación N^o: 021218-752-001; N^o de serie: 1221; escala (tf): 10,0; U calibración para $k=2$ (%): $\pm 0,37$ y un rango de medición (Tf): 0-20,0.

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E 8M-2004 que consiste en Métodos de Prueba Estándar para Pruebas de Tensión de Materiales Metálicos. Estas pruebas de tensión proporcionan información sobre la resistencia y la ductilidad de los materiales en tracción uniaxial. Esta información puede ser útil en las comparaciones de los materiales, el desarrollo de aleación, control de calidad y diseño en determinadas circunstancias. Los resultados de las pruebas de tensión de las muestras a máquina a las dimensiones normalizadas de las partes seleccionadas de una pieza o material no del todo pueden representar la fuerza y propiedades de ductilidad del producto final completo o su comportamiento en servicio en diferentes ambientes.

2.6 Metalografía.

La metalografía es la ciencia que estudia las características micro estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas, químicas y mecánicas. Mucha es la información que puede suministrar un examen metalográfico, para ello es necesario obtener muestras que sean representativas y que no presenten alteraciones debidas a la extracción y/o preparación metalográfica (*ASTM A 370, 2004*).

2.6.1 Ensayo Metalográfico para el Niple y Coupling.

Para determinar la metalografía del Niple se realizó la observación de la microestructura del material de estudio; para ello la superficie seleccionada de la muestra fue sometida a desbaste y pulido con incremento progresivo del número de grano (de 80 a 1200) hasta su terminación con pasta de diamante para lograr el acabado espejo. La superficie así preparada fue desengrasada con acetona de calidad técnica y sometida al ataque químico con nital 2%, seguido de enjuague y secado final. La observación de la superficie del metal ensayado (una muestra para el niple y dos muestras para el coupling) se realizó con aumentos x100 y/o x500.

Para realizar el análisis el equipo que se utilizó fue un Microscopio Óptico-Metalográfico (Figura 2.5). Marca: “Carl Zeiss”. Modelo: Neophot 30. Lentes Planocromáticas HD (3.2x / 0.60 ∞ / -A; 12.5x / 0.25 ∞ / -A); HD 25x / 0.50 ∞ / 0 -A; (50x / 0.90 ∞ / -A); HD HI 100x / 1.30 ∞ / 0 -A; Cámara de vídeo Panasonic color CCTv wv – CP 474.

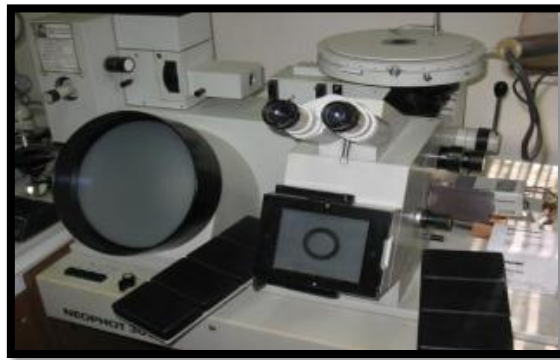


Figura 2.5: Microscopio Óptico-Metalográfico.

Fuente: (CESOLCA, 2019).

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en las normas ASTM E 407-2007, ASTM E 3-01(reaprobada en 2007) y la ASTM E 112-10.

La norma ASTM E 407 es un método de ataque de una muestra de metal para revelar su microestructura. Especifica qué productos químicos de ataque (por lo general ácidos) y los trámites necesarios para revelar la microestructura de los diferentes tipos de metales. De acero de carbono tiene varias estructuras, tales como ferrita, perlita y martensita en función de cómo se distribuye el carbono en el material. Las diferencias en la microestructura son importantes

porque pueden ayudar a determinar si un metal se ha sometido a los productos químicos corrosivos, es más suave o más duro en la superficie, se ha deformado, fue soldado correctamente, o se ha sobrecalentado.

La norma ASTM E 3-01(reaprobada en 2007) está relacionada con el examen metalográfico, el cual revela los componentes y la estructura de los metales y sus aleaciones por medio de un microscopio electrónico de barrido o en la luz óptica. En casos especiales, el objetivo de la exploración puede requerir el desarrollo de menos detalle que en otros casos, pero, bajo casi todas las condiciones, la adecuada selección y preparación de la muestra es de gran importancia.

Los métodos de ensayo en la norma ASTM E 112-10 cubren los procedimientos de estimación y reglas para expresar el tamaño de grano de todos los metales que consisten en su totalidad, o principalmente, de una sola fase. El tamaño de grano de las muestras con dos fases, o una fase y un componente, se puede medir usando una combinación de dos métodos, una medida de la fracción de volumen de la fase y una intersección o el recuento de planimétrica. Los métodos de ensayo también se pueden utilizar para cualquier estructura que tienen una apariencia similar a las de las estructuras metálicas.

2.7 Conclusiones Parciales del Capítulo 2.

- 1 A los materiales tubulares de producción (niple y coupling de 114.30mm (4 1/2") x 12.65 lb/pie) se le realizarán análisis de composición química, estructura metalográfica y propiedades mecánicas según la norma API 5CT.
- 2 Para el análisis de composición química de ambas muestras se utilizará un Espectrómetro Multicanal Digital modelo Belec Vario Lab 2P N° 171007.
- 3 En el niple se realizará ensayo de dureza Brinell utilizando un Durómetro Rockwell–Brinell IBERTEST a un total de 5 réplicas efectivas a temperatura de $24 \pm 1^{\circ}\text{C}$, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E 10-08/ A 956-00.
- 4 En el coupling se realizará ensayo de Dureza Vickers utilizando un Durómetro Vickers Portátil a un total de 5 réplicas a temperatura de $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E 92-82 (03)/ E 384-06.

- 5 El equipo utilizado para realizar el ensayo de resiliencia a ambos materiales será un KM-30, a temperatura ambiente de 24 ± 1 °C, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM A370. El niple con un total de 5 réplicas y el coupling 5 réplicas.
- 6 El equipo utilizado para realizar el ensayo de tracción a ambos materiales es una Máquina Universal de Fuerza P-20, a temperatura ambiente de 24 ± 1 °C, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E 8M-2004, a un total de 3 réplicas en ambos casos.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

En este capítulo se muestran y analizan los resultados que se obtienen en la investigación. Además se realiza una metodología para la EPEP-Centro basada en el muestreo y evaluación mediante ensayos de composición química, estructura metalográfica y propiedades mecánicas de los materiales tubulares de producción atendiendo al procedimiento de Tramitación y Ejecución de Compras en la EPEP-Centro, donde se tengan en cuenta la inspección de los materiales tubulares de producción recibidos.

3.2 Análisis de Composición Química de los Materiales Tubulares en Estudio.

3.2.1 Composición Química del Niple.

La tabla 3.2 muestra la composición química nominal establecida en la norma API 5A y la tabla 3.1 presenta los resultados del análisis químico efectuado a la muestra M-1 (niple) en estudio, a modo de comparación.

Del análisis químico realizado se demostró que el acero del niple estudiado se corresponde con el J55 en la norma API 5CT porque cumple con los porcentajes máximos permisibles de los elementos químicos establecidos (Tabla 3.1). Según los resultados de la tabla 3.1, el niple J55 tiene 0.34% de carbono por lo cual se clasifica como acero de medio contenido de carbono (ver anexo 2-C) y bajo aleado (ver anexo 2-D) ya que el contenido de elementos de aleación no supera el 1%. El contenido mínimo de los elementos químicos: cromo, molibdeno y níquel son tan pequeños (0.05%) que no se pueden considerar como aleación.

Tabla 3.1: Composición Química del Niple en Estudio.

Composición química (%) de una muestra. Muestra de tubo.											
No. De muestra	No de Identificación	C ± %6	Si ± %5	Mn ± %2	P ± %2	S ± %5	Cr ± %8	Ni ± %5	Mo ± %5	Cu ± %5	Material/norma
M-1	Niple 4 1/2" x 12.65 lb/pie	0.34	0.01	0.70	0.001	0.006	0.03	0.01	0.01	0.06	Cumple

Tabla 3.2: Composición Química Nominal Establecida en la Norma API 5CT.

Acero	Porcentaje en peso										
	C	S	Si	Mn	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al
J-55	0.34-0.39	≤ 0.015	0.20-0.35	0.5-1.00	≤ 0.020	≤ 0.15	≤ 0.02	≤ 0.20	-	-	≤ 0.020

3.2.2 Composición Química del Coupling.

Del análisis químico realizado se demostró que el acero del coupling estudiado se corresponde con el Q125 en la norma API 5CT porque cumple con los porcentajes máximos permisibles de los elementos químicos establecidos (tabla 3.3). La tabla 3.4 muestra la composición química nominal establecida en la norma API 5A y la tabla 3.3 muestra los resultados del análisis químico efectuado a la muestra M-2 (coupling) en estudio, a modo de comparación.

Según los resultados que se muestran en la tabla 3.3 el coupling Q125 por su contenido de carbono (0.35%) se clasifica como acero de medio contenido de carbono (ver anexo 2-C) y de mediana aleación ya que el contenido de Cr, Mn, Si y S superan el 3% (ver anexo 2-D).

Tabla 3.3: Composición Química del Coupling en Estudio.

Composición química (%) de una muestra. Muestra de tubo.											
No. De muestra	No de Identificación	C ± %6	Si ± %5	Mn ± %2	P ± %2	S ± %5	Cr ± %8	Ni ± %5	Mo ± %5	Cu ± %5	Material/norma
M-2	Coupling	0.35	0.75	1.32	0.020	0.099	1.45	0.95	0.80	1.25	Q125/API 5CT

Tabla 3.4: Composición Química Nominal Establecida en la Norma API 5 CT para Acero Q125.

Composición química, porcentaje en peso. Acero Q125								
C	Mn	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	Si
0.350	1.350	0.850	1.500	0.990	-	0.020	0.010	-

3.3 Análisis de Ensayo de Dureza.

3.3.1 Ensayo de Dureza para el Niple.

La composición química de los aceros está estrechamente relacionada con la dureza de los mismos. A medida que aumenta el contenido de carbono aumenta la dureza en los aceros.

Para el acero J55 según los resultados de composición química obtenidos, el contenido de carbono es $\pm 0.34\%$ por lo que es un acero de medio % de carbono y a su vez tiene mayor resistencia y dureza, disminuyendo su deformabilidad. Su respuesta al temple depende del % de C y Mn; los de mayor contenido tienen mayor respuesta de núcleo. Los de más alto % de Mn, se endurecen más convenientemente en el núcleo y en la capa. La maquinabilidad de estos aceros mejora con el forjado o normalizado, y disminuye con el recocido (Torres, 2001).

Los resultados de dureza obtenidos en la tabla 3.5 para el niple J55 es de 182HB, por lo que cumple con lo establecido por la norma API 5CT ya que es $\leq 241\text{HB}$.

Tabla 3.5: Resultados del Ensayo de Dureza para el Niple J55.

MUESTRA	IDENTIFICACION	MEDICIONES HB (Kgf/mm ²)					DUREZA HB ^{1,2} (Kgf/mm ²)			
							Min.	Máx.	Media	$\pm u_{exp}$
M-1	Niple 4 1/2" x 12.65 libras/pie	182	182	182	182	182	180	183	182	2

3.3.2 Ensayo de Dureza para el Coupling.

El acero Q125 por su composición química es un acero con medio % de carbono y de mediana aleación. Según los resultados de la tabla 3.6 para las muestras analizadas el promedio de dureza es de 384HV equivalente a 361HB.

De acuerdo a la bibliografía (Guliaev, 1983), los aceros de medio % de carbono tienen la capacidad de endurecimiento por tratamiento térmico, aunque en este caso las tuberías de producción se explotan con la dureza de suministro. El contenido de C y Mn, depende de una serie de factores. Por ejemplo, cuando se desea incrementar las propiedades mecánicas, la sección o la templabilidad, normalmente se incrementa el % de C, de Mn o de ambos. Los de menor % de carbono se utilizan para piezas deformadas en frío, aunque los estampados se encuentran limitados a doblados suaves, y generalmente llevan un recocido o normalizado previo. Los de mayor % de C, deben ser normalizados después de forjados para

mejorar su maquinabilidad. Dependiendo del nivel de propiedades necesarias, pueden ser o no tratadas térmicamente. Son más resistentes que los aceros bajos en carbono pero menos dúctiles y maleables.

Tabla 3.6: Resultados del Ensayo de Dureza para el Coupling Q125.

MUESTRA	IDENTIFICACION	MEDICIONES HV (kgf/mm ²)					DUREZA HV ^{1,2} (Kgf/mm ²)				DUREZA HB equiv. ^{1,2} (Kgf/mm ²)	
		5	4	3	2	1	Mín.	Max.	Med.	±Uexp.	Med.	±Uexp.
M2-A	Cerca rotura-lado A	380	370	370	376	376	370	380	374	7	359	4
M2-B	Cerca rotura-lado B	380	380	394	394	376	376	394	385	19	368	13
M2	Lejos de la rotura	397	394	387	401	397	387	401	395	14	380	10

Según (Guliáev, 1983), muchas características de las dislocaciones son importantes en relación con las propiedades mecánicas del metal. Entre ellas se encuentra, el campo de tensiones que existe alrededor de ellas, cuya influencia es determinante tanto en su movilidad como en su facilidad de multiplicación.

Cuando los metales se deforman plásticamente, una pequeña fracción de la energía de deformación (un 5%) se disipa en forma de calor. La mayor proporción se acumula como energía de deformación asociada a las dislocaciones. Las distorsiones del enrejado alrededor de las dislocaciones, imponen a todos los planos atómicos vecinos a esfuerzos de compresión, de tracción o de cizallamiento.

Durante la deformación plástica, el número de dislocaciones se incrementa de forma dramática. Una fuente importante de nuevas dislocaciones lo constituyen las dislocaciones ya existentes. Estas dislocaciones, se desplazan bajo la acción de las cargas de cizallamiento aplicadas a lo largo del plano de deslizamiento, y en la dirección de deslizamiento.

Es por ello que, para la comprensión de los mecanismos de fortalecimiento de los metales, es importante conocer la relación entre el movimiento de las dislocaciones y el comportamiento

mecánico de los metales. Porque, una deformación macroscópica trae aparejada el movimiento de un gran número de dislocaciones, la facilidad del metal para deformarse plásticamente, depende de la facilidad con que se desplacen las dislocaciones.

Desde que la dureza y la resistencia (a la rotura y a la fluencia), son relacionadas con la facilidad de desplazamiento de las dislocaciones, puede elevarse la resistencia mecánica a través de mecanismos que reduzcan el movimiento de las dislocaciones. Este frenaje al movimiento, se logra a través de la reducción del tamaño de grano, las soluciones sólidas, la precipitación de segundas fases, y a través del endurecimiento por deformación plástica (acritud).

La densidad de dislocaciones aumenta en el metal como resultado del trabajo en frío, a través de la multiplicación de las dislocaciones existentes previamente. Según (Guliáev, 1983), el movimiento de un par de dislocaciones genera el movimiento de centenares y centenares de ellas. Consecuentemente la distancia promedio de separación entre las dislocaciones disminuye. Este fenómeno provoca el apilamiento de estos defectos.

3.4 Análisis de Ensayo de Resilencia.

3.4.1 Análisis de Resultados de Ensayo de Resilencia para el niple J55.

Como se puede observar en la tabla 3.7 de las 5 probetas solo 2 rompieron de forma completa (sub-muestras M-1.1 y M-1.3). Asumiendo estas 2 réplicas como válidas (de acuerdo a *CESOLCA, 2019*), los valores de energía absorbida superan el límite mínimo a temperatura ambiente para el acero grado J55 según la norma API 5CT. Por lo tanto el niple satisface ese requerimiento.

Tabla 3.7. Resultados del Ensayo de Resilencia para Acero J55.

MUESTRA	IDENTIFICACIÓN	REPL.	ÁREA SECCIÓN ROTURAS (cm ²)	ENERGÍA ABSORBIDA, (J)		ENERGÍA ESPECÍFICA ABSORBIDA (J/cm ²)		INSPECCIÓN VISUAL
				W _a	± U _c	W _{a-eq}	± U _c	
M-1	Tubo	.1	0,429	16	1	37	2	Rotura total, 50% S fractura frágil
		.2	0,443	50	1	113	2	Rotura parcial, 35% S fractura frágil
		.3	0,425	16	1	38	2	Rotura total, 60% S fractura frágil
		.4	0,427	55	1	129	2	Rotura parcial, 35% S fractura frágil
		.5	0,427	55	1	129	2	Rotura parcial, 40% S fractura frágil
		Prom.	0.430	36	7	84	16	-

3.4.2 Análisis de Resultados de Ensayo de Resilencia para el Coupling Q125.

La tabla 3.8 muestra las 5 probetas ensayadas, todas rompieron de forma completa con valores muy similares de energía absorbida y en ningún caso esta es inferior a 24J. Los valores de energía absorbida superan el límite mínimo a temperatura ambiente para el acero grado Q125 según la norma API 5CT y por lo tanto la muestra M-2 satisface ese requerimiento.

Tabla 3.8. Resultados del Ensayo de Resilencia Para el Coupling Q125.

MUESTRA	IDENTIFICACIÓN	REPLI.	ÁREA SECCIÓN ROTURAS S (cm ²)	ENERGÍA ABSORBIDA, (J)		ENERGÍA ESPECÍFICA ABSORBIDA (J/cm ²)		INSPECCIÓN VISUAL
				W _a	± U _c	W _{a-eq}	± U _c	
M-2	Coupling	.1	0,424	27	1	64	2	Rotura total, 40% S fractura frágil
		.2	0,421	28	1	66	2	Rotura total, 50% S fractura frágil
		.3	0,422	26	1	62	2	Rotura total, 40% S fractura frágil
		.4	0,425	29	1	68	2	Rotura total, 50% S fractura frágil
		.5	0,417	24	1	58	2	Rotura total, 50% S fractura frágil
		Prom.	0,422	27	1	64	1	-

3.5 Análisis de ensayo a tracción.

3.5.1 Análisis de Resultados de Ensayo a Tracción para el Niple J55.

Los criterios de aceptación normativos (*API 5CT, 2010*) para el acero J55 son:

$379\text{Mpa} \leq R_{fl} \leq 551\text{Mpa}$, y $R_m \geq 517\text{Mpa}$; para una sección transversal de las probetas de 96 mm^2 o 0.15in^2 $A_{l0=50\text{mm}} \geq 18\%$.

Los resultados de la tabla 3.9 muestran que los intervalos más probables resultantes de límite de fluencia, de resistencia máxima a la rotura y de elongación final relativa de cada una de las réplicas de la muestra M-1, satisfacen los requisitos de la norma API 5CT para el acero con grado J55.

Tabla 3.9. Resultados del Ensayo de Tracción para Acero J55.

Muestra	IDENTIFICACIÓN	Réplica	LIMITE DE FLUENCIA Rfl (Mpa)		RESISTENCIA MÁXIMA, Rm (Mpa)		ELONGACIÓN FINAL, Alo=50mm (%)		ESTRICCIÓN, (%)	
			Rfl	±Uexp	Rm	±Uexp	A50	±Uexp	Z	±Uexp
M-1	Niple 4 1/2" x 12.65 lb/pie	1	486	3	571	3	20	0	46	0
		2	486	3	568	3	22	0	39	0
		3	478	3	572	3	22	0	43	0
		Prom.	483	3	571	3	21	0	43	0

3.5.2 Análisis de Resultados de Ensayo a Tracción para el Coupling Q125.

Los criterios de aceptación normativos (*API 5CT, 2010*) para el acero Q125 son:

$862\text{Mpa} \leq R_{0.65\%} \leq 1034\text{Mpa}$, y $R_m \geq 931\text{Mpa}$; para una sección transversal de las probetas de 110 mm^2 $A_{l0=50\text{mm}} \geq 11\%$.

Los resultados de la tabla 3.10 muestran que los intervalos más probables resultantes de límite de fluencia, de resistencia máxima a la rotura y de elongación final relativa de cada una de las réplicas de la muestra M-2, satisfacen los requisitos de la norma API 5CT para el acero con grado Q125.

Tabla 3.10. Resultados del Ensayo de Tracción para el Coupling Q125.

Muestra	IDENTIFICACIÓN	Réplica	LIMITE DE FLUENCIA R _{fl} (Mpa)		RESISTENCIA MÁXIMA, R _m (Mpa)		ELONGACIÓN FINAL, A ₅₀ =50mm (%)		ESTRICCIÓN, (%)	
			R _{fl}	±U _{exp}	R _m	±U _{exp}	A ₅₀	±U _{exp}	Z	±U _{exp}
M-2	Coupling	1	1154	18	1255	6	14	0	52	0
		2	1156	18	1259	6	13	0	53	0
		3	1158	18	1270	6	12	0	47	0
		Prom.	1156	18	1261	6	13	0	51	0

3.6 Análisis del Ensayo Metalográfico.

3.6.1 Distribución y Efecto de los Elementos Aleantes.

La presencia de elementos de aleación: Cr, Ni, Mo, W, etc. no se puede determinar en el examen microscópico, porque las estructuras perlíticas, bainíticas, martensítica, etc, son exactamente iguales en un acero al C común o en aceros aleados. En cambio, después de idénticos tratamientos térmicos, las estructuras finales obtenidas serán distintas. Por ejemplo, un acero de 0,30 % C calentado a 850° C y enfriado al aire, da una estructura ferrito perlítica; en cambio, en un acero con 0,30 % C, 1,25 % Cr, 5 % Ni, 0,60 % Mo, con el mismo tratamiento, resultará martensita como estructura final. No obstante, examinadas aisladamente, no se puede distinguir si esas estructuras provienen de un acero al C o de uno aleado (*Larre, 2017*).

Los diferentes elementos aleantes se pueden encontrar en los aceros recocidos, en alguna de estas formas:

- Disueltos en la ferrita, como Ni, Cr, Mn, Cu, Al, Si, P.
- Combinados con el C: tienen tendencia a formar carburos, simples, dobles o compuestos; como Cr, Mo, Mn, W y V.
- Combinados con otros elementos: formando inclusiones no metálicas. El Si y el Al forman silicatos y aluminatos o silicoaluminatos de Ca, Fe, Mn y Cr. El Mn forma silicatos y sulfuros.
- Dispersos formando fases raras, como el Cu cuando su porcentaje supera el 0,75 %.

3.6.2 Inclusiones No Metálicas

Según (Larre, 2017) las inclusiones no metálicas interrumpen la continuidad de la estructura y disminuyen la resistencia de los aceros. Pueden ser de tres tipos: sulfuros, óxidos y silicatos. Dentro de los sulfuros, el más importante es el SMn, que es plástico, de color gris paloma y se deforma y alarga por forja y laminación. Es menos perjudicial que los óxidos y silicatos.

Los óxidos provienen de una oxidación muy intensa y el exceso de desoxidantes. La alúmina (Al_2O_3) es consecuencia de un exceso de Al agregado como desoxidante. Los óxidos constituyen las inclusiones más comunes; la Al_2O_3 , es muy dura y frágil, se rompe y dispersa con la forja y la laminación.

Los silicatos provienen de escorias no muy fluidas, por temperatura insuficiente del horno, lo que provoca su emulsión en el resto de la masa líquida. Son las inclusiones más peligrosas porque reducen las buenas características del acero. Se alargan y rompen por laminación y forja.

Hay elementos, como el hidrógeno, que no se distinguen, pero que aparecen en todos los aceros, disminuyendo sus propiedades mecánicas. En algunos casos forma puntos brillantes llamados "ojos de pescado" (fish eyes), que confieren mucha fragilidad a la estructura.

El fósforo en exceso, forma un eutéctico llamado steadita, que está compuesto por CFe_3 y PFe_3 en matriz ferrítica, es muy frágil.

3.6.3 Microestructuras de la Muestra Analizada en el Niple J55.

En el análisis microestructural de la muestra M-1 se puede observar en el material de la muestra antes de atacar (figura 3.1) inclusiones del tipo D correspondientes a óxidos globulares con $i = 1,5$ y un diámetro $> 3\mu m$ hasta $8\mu m$.

➤ **Muestra M-1**

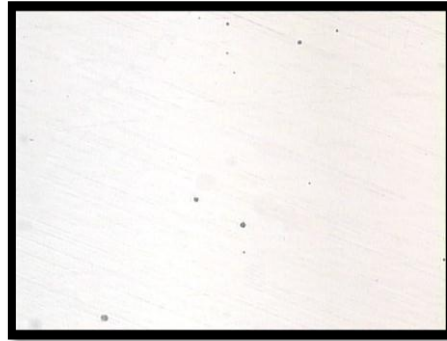


Figura 3.1: Inclusiones No Metálicas Tipo D. Observación a 100x.

Después de atacado el material (figura 3.2 y 3.3) con Nital al 2%, se observa una estructura ferrítico – perlítica donde la perlita está distribuida uniformemente en forma de bandas en la matriz ferrítica, con un aproximado de 35% de perlita y 65% ferrita. El grano que se observa es fino con tamaño 9 - 9 1/2 según ASTM.

Se puede observar que el material sufrió una deformación plástica ya que los granos tienden a orientarse hacia una misma dirección. Debido a esto las piezas de fundición que contengan huecos pueden sufrir agrietamiento durante un conformado mecánico posterior. Las aleaciones que han sido endurecidas por alteraciones de la estructura cristalina se vuelven "frágiles" y pueden fracturarse durante un conformado posterior (*Guliaev, 1983*).

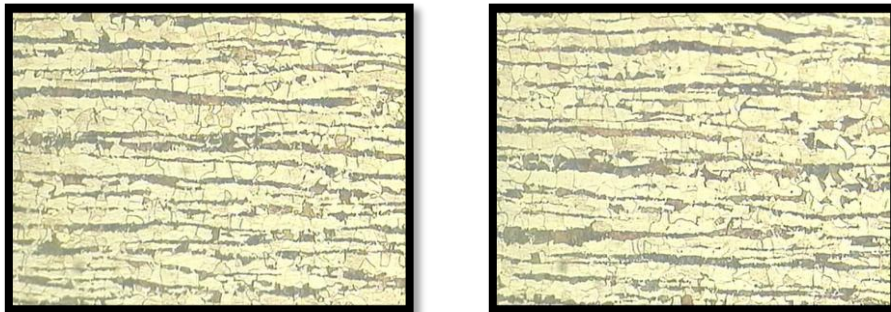


Figura 3.2: Microestructura Ferrítico - Perlítica en Bandas. Observación a 100x.

La microestructura consiste en ferrita y perlita. Por tanto, son relativamente blandos y poco resistentes pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad. Otro grupo de aceros de bajo contenido en carbono son los de *alta resistencia y baja aleación*. Contienen concentraciones

variables de Cu, V, Ni y Mo totalizando $\approx 10\%$ en peso. Poseen mucha más resistencia mecánica, que puede aumentar por tratamiento térmico y mantienen las propiedades de fácil mecanizado.

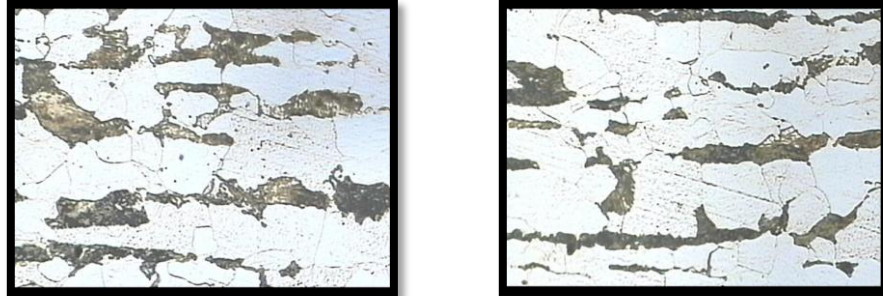


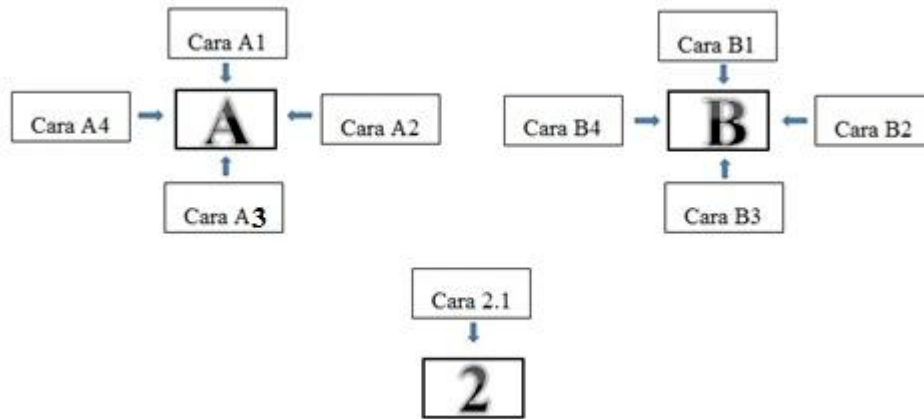
Figura 3.3: Microestructura Ferrítico - Perlítica en Bandas. Observación a 500x.

3.6.4 Microestructuras de las Muestras Analizadas en el Coupling Q125.

En la tabla 3.11 se muestra cómo fueron identificadas las caras de la muestra del coupling en estudio.

Tabla 3.11: Identificación de las muestras

Muestra No.	Identificación
M-2	Cara A1 (Rotura)
	Cara A2
	Cara A3
	Cara A4
	Cara B1 (Rotura)
	Cara B2
	Cara B3
	Cara B4
	Cara 2.1 Lejos de zona de rotura M-2



➤ **Cara A1**



Figura 3.4: Inclusiones No Metálicas del Tipo D (óxidos globulares). Observaciones a 100x.

En la figura 3.4 y 3.5 de la cara A1 se obtuvo como resultado la presencia de inclusiones metálicas del tipo D presentes, sin ataque químico, a escala de observaciones de 100x y 500x respectivamente.

El agrietamiento en la zona de rotura que se observa en la figura 3.5 puede estar precedido de una deformación plástica es decir por el movimiento de las **dislocaciones**.

En el proceso de deformación algunas dislocaciones se acumulan junto a obstáculos infranqueables para ellas (inclusiones, límites de granos, maclas, dislocaciones sedentarias, etc.).

Cuando las dislocaciones se acumulan pueden formarse discontinuidades en el metal es decir microgrietas. Estas microgrietas recién formadas serán a su vez obstáculos para el movimiento

de las dislocaciones y la subsiguiente acumulación de estas; es decir la continuación de la deformación plástica ocasionará el crecimiento de la grieta.

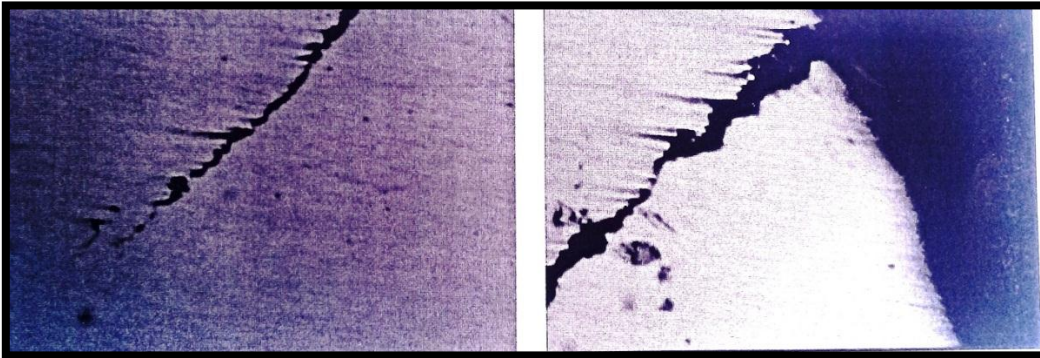


Figura 3.5: Agrietamiento en Zona de Rotura. Observaciones a 500x.

En la figura 3.6 y 3.7 el análisis se realizó con ataque químico Nital. Se puede observar cómo se propaga la grieta en la matriz perlítica. La misma se puede considerar como una fractura frágil y no dúctil ya que la misma no se detiene sino que alcanza la dimensión crítica provocando la rotura del material.

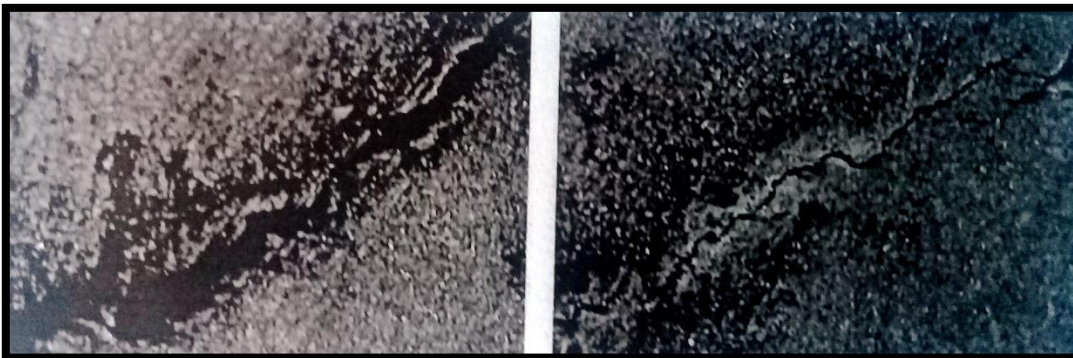


Figura 3.6: Agrietamiento en Zona de Rotura. Observación a 100x.

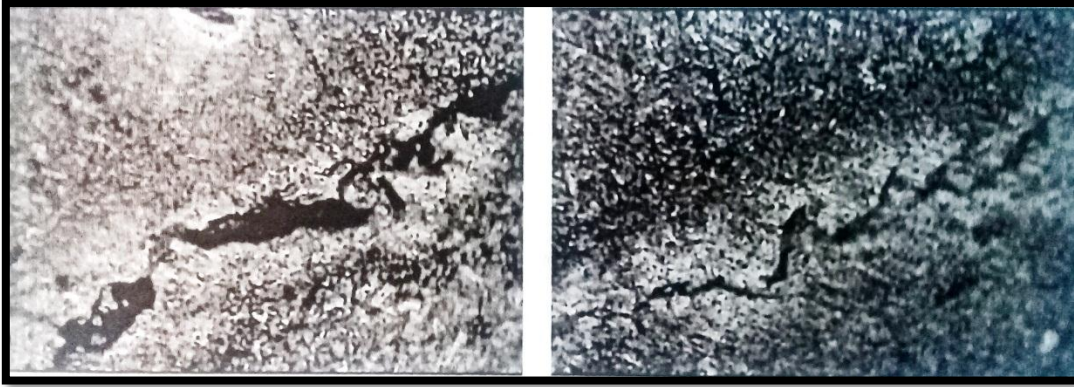


Figura 3.7: Agrietamiento en Zona de Rotura. Observación a 500x.

➤ **Cara A2**

En la cara A2 la figura 3.8 muestra una matriz martensítica, utilizando ataque químico Nital, a observaciones de 100x. Esta matriz martensítica pudo haber sido producto de enfriamiento rápido (temple) hasta una temperatura próxima a la ambiente del acero austenizado, lo que le da mucha dureza pero es metaestable, no se pueden calentar a alta temperatura. Esta resulta como una estructura de no equilibrio de la transformación de la austenita pero sin difusión de carbono, y tiene lugar al enfriar muy rápidamente para evitar la difusión del carbono. Se puede considerar como una transformación competitiva a la de perlita y bainita. Aunque esta transformación no es muy bien conocida se sabe que se transforma desde austenita hasta martensita. La presencia de martensita elevará la tendencia a la fragilidad del acero del coupling, y es una de las posibles causas de rotura en estas piezas. Este defecto metalúrgico pudiera servir de base a una reclamación a los suministradores.

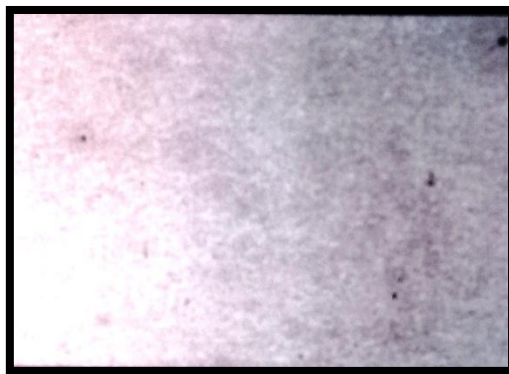


Figura 3.8: Matriz Martensítica. Observación a 100x.

En la figura 3.9 se observa agrietamiento alejado de la zona de rotura, rodeado de una posible fase frágil. La matriz en esta zona tiene una coloración oscura y se caracteriza por ser perlítica. La observación fue a 500x y con análisis químico Nital.

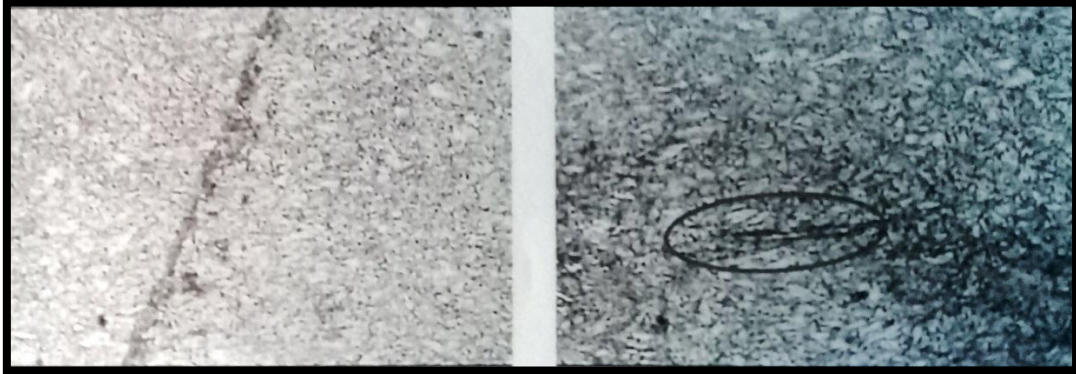


Figura 3.9: Agrietamiento Alejado de Zona de Rotura. Observación a 500x.

➤ **Cara A3**

En la cara A3 de la figura 3.10 se obtuvo como resultado la presencia de inclusiones no metálicas del tipo D, sin análisis químico Nital a escala de observación de 100x.

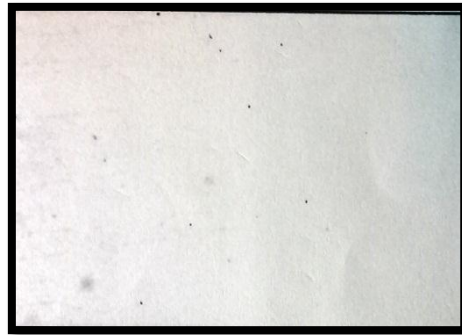
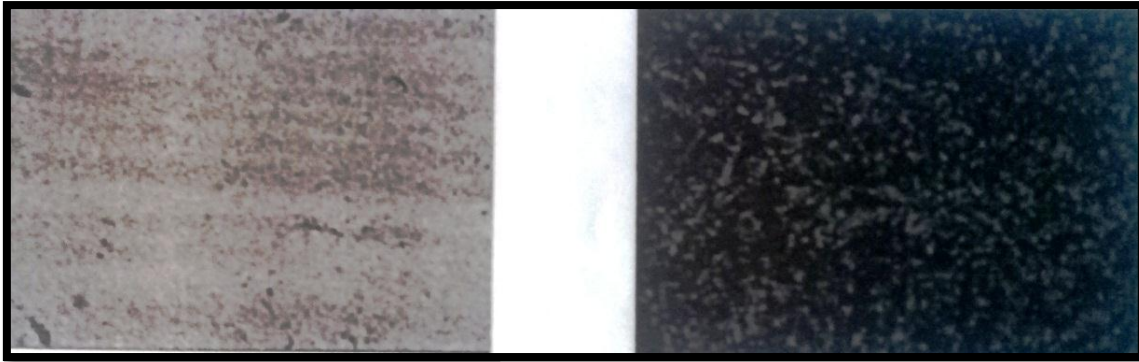


Figura 3.10: Inclusiones No Metálicas del Tipo D. Observación a 100x.



**Figura 3.11: Matriz Perlítica.
Observación a 100x.**

**Figura 3.12: Matriz Perlítica.
Observación a 500x.**

En las figuras 3.11 y 3.12 de la cara A3 predomina la matriz perlítica constituida por granos finos de color oscuro mezclados con granos de ferrita, ambas con ataque químico Nital a escala de observaciones de 100x y 500x respectivamente.

La perlita es un constituyente que aparece siempre que haya un enfriamiento lento, por debajo de los 720°C.

➤ **Cara A4**

Las figuras 3.13 y 3.14 de la cara A4 están constituidas por matriz perlítica, de granos finos y coloración oscura. En ambas figuras se observan cavidades y se les realizaron ataque químico Nital, a observación de 100x y 500x respectivamente.

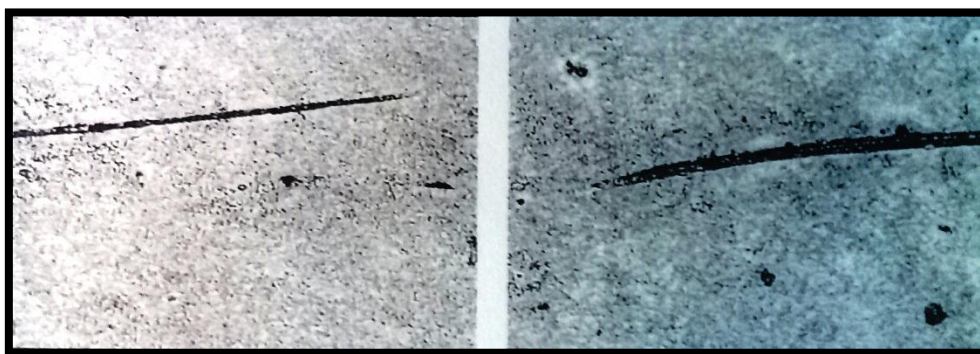


Figura 3.13. Matriz Perlítica. Observación a 100x.

En la cara A4 al igual que en la cara A2 se observan agrietamiento rodeado de una posible fase frágil.

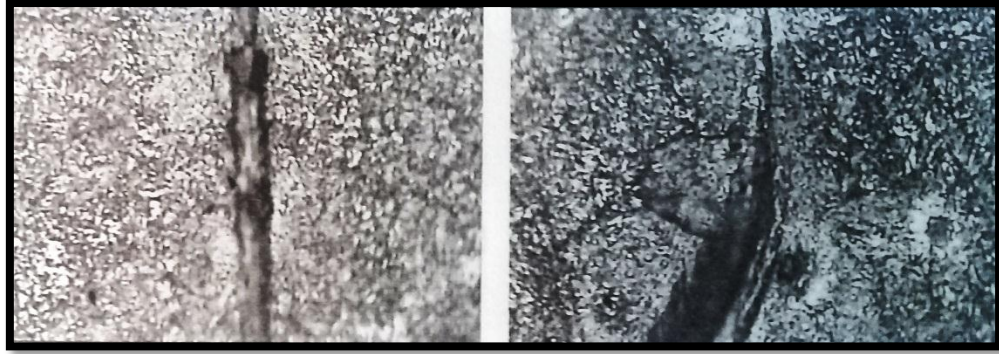


Figura 3.14. Matriz Perlítica. Observación a 500x.

➤ **Cara B1 (Rotura)**

Según los resultados obtenidos en la figura 3.15 de la cara B1, están presentes inclusiones no metálicas del tipo D, sin ataque químico Nital a observaciones de 100x.

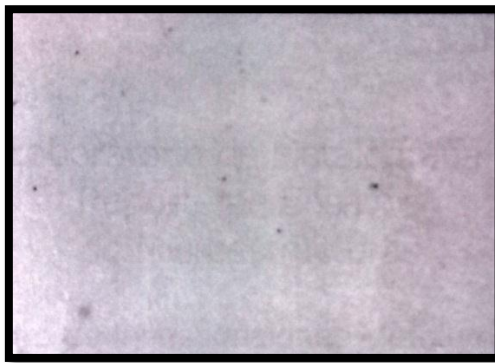


Figura 3.15. Inclusiones No Metálicas del Tipo D. Observación a 100x.

En la figura 3.16 se vuelve a presentar agrietamiento en la zona de rotura, similar a la cara A1.

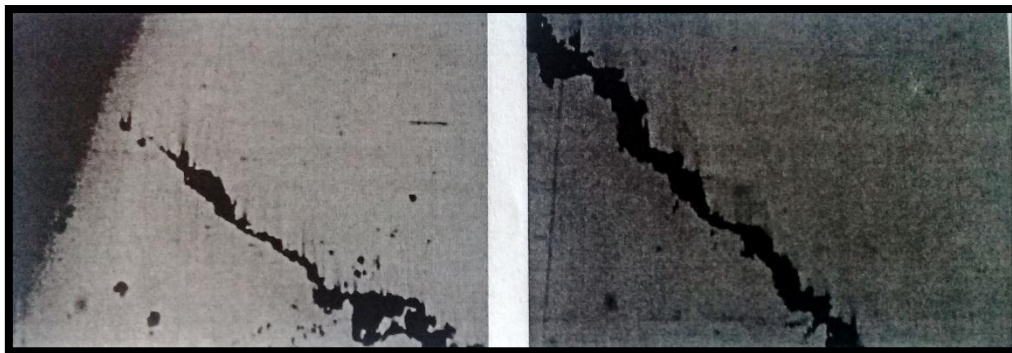


Figura 3.16. Agrietamiento en Zona de Rotura. Observación a 500x.

Las imágenes que se observan en las figuras 3.17 y 3.18 están atacadas con Nital al 2%, a observaciones de 100x y 500x respectivamente; donde se revela una coloración muy oscura de los granos correspondiente a una matriz perlítica en presencia de inclusiones cerca de la zona agrietada.

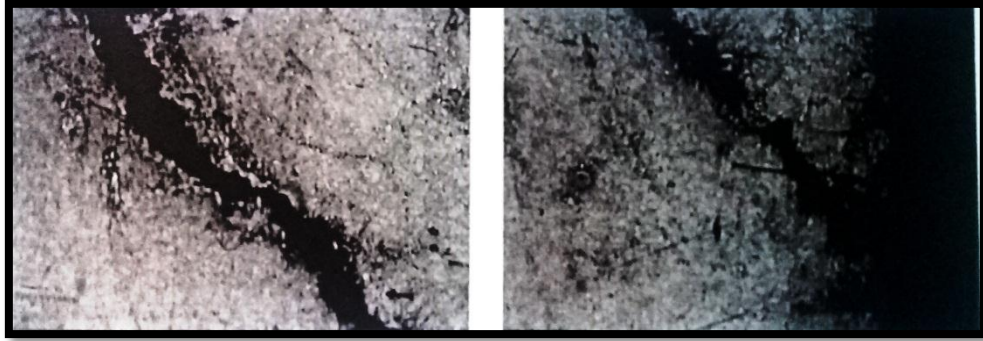


Figura 3.17. Matriz Perlítica. Observación a 100x.

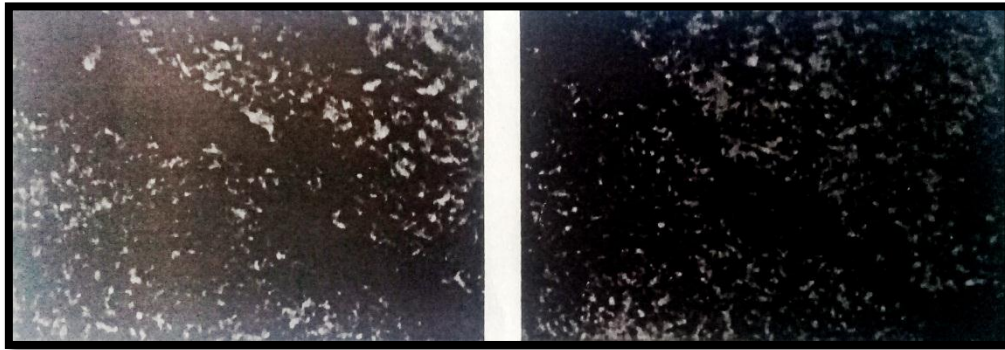


Figura 3.18. Matriz Perlítica. Observación a 500x.

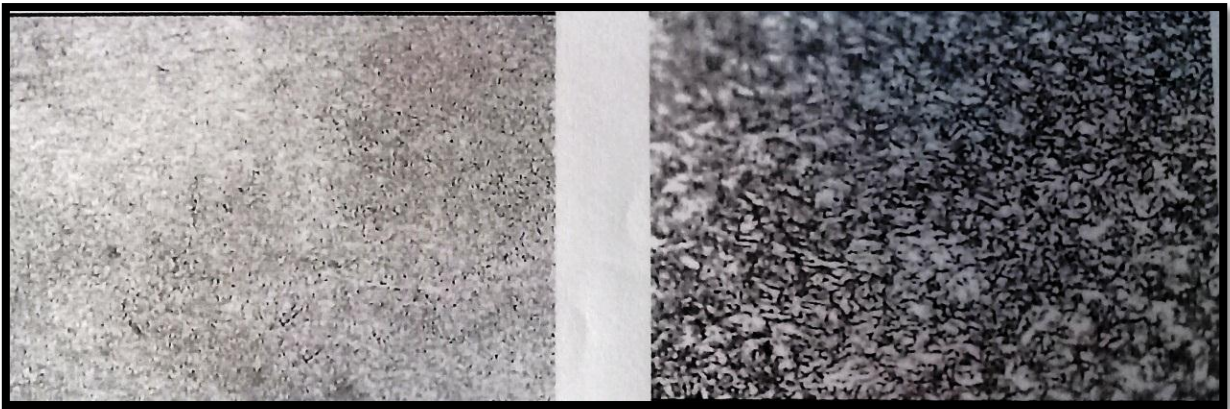
➤ **Cara B2**

Según los resultados obtenidos de la cara B2, la figura 3.19 muestra la presencia de inclusiones no metálicas del tipo D, sin ataque químico Nital a observaciones de 100x.



Figura 3.19: Inclusiones No Metálicas del Tipo D. Observación a 100x.

Las imágenes que se observan en las figuras 3.20 y 3.21 están atacadas con Nital al 2%, a observaciones de 100x y 500x respectivamente. La matriz es perlítica.



**Figura 3.20: Matriz Perlítica.
Observación a 100x.**

**Figura 3.21: Matriz Perlítica.
Observación a 500x.**

➤ Cara B3

En la figura 3.22 de la cara B3 se observan inclusiones no metálicas del tipo D, sin ataque químico Nital a observaciones de 100x.

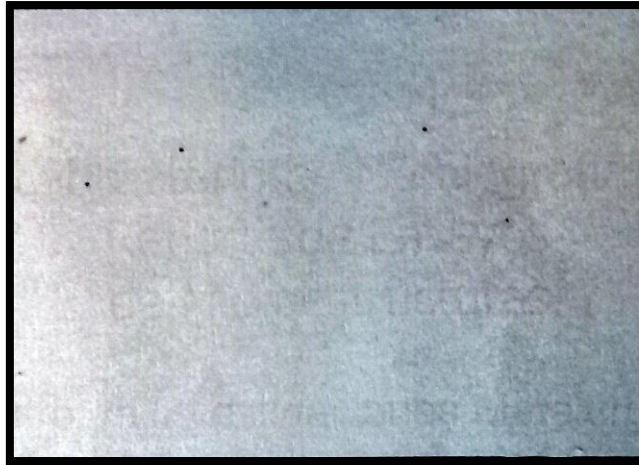
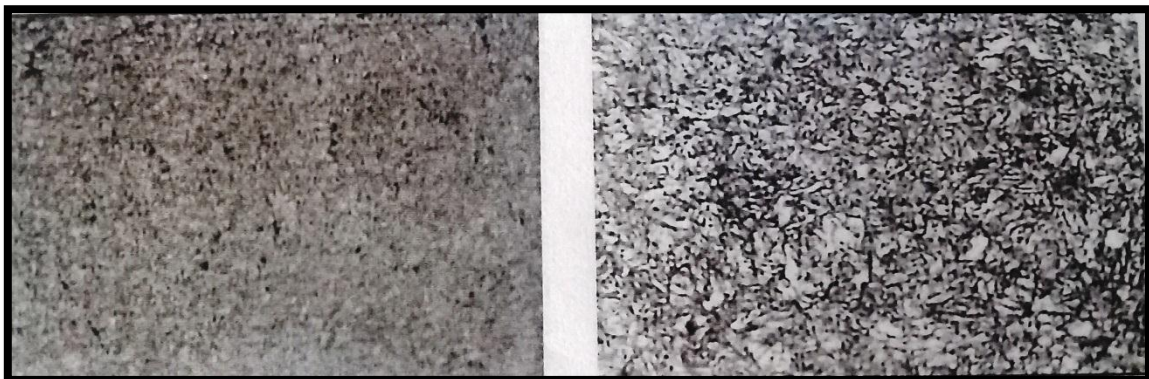


Figura 3.22: Inclusiones No Metálicas del Tipo D. Observación a 100x.

Las imágenes que se observan en las figuras 3.23 y 3.24 están atacadas con Nital al 2%, a observaciones de 100x y 500x respectivamente. La matriz es perlítica.



**Figura 3.23: Matriz Perlítica.
Observación a 100x.**

**Figura 3.24: Matriz Perlítica.
Observación a 100x.**

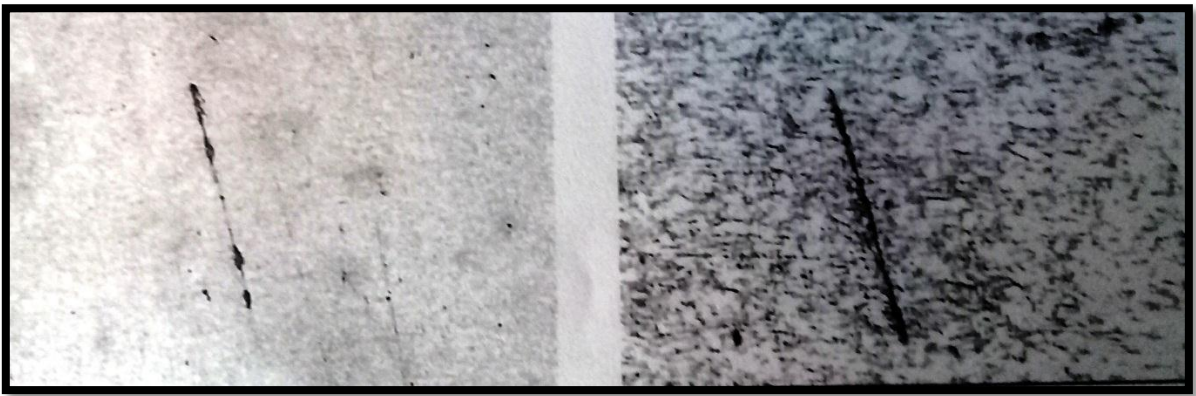
➤ **Cara B4**

Según los resultados obtenidos de la cara B4, en la figura 3.25 con ataque químico Nital a observaciones de 100x se observa defecto en el material, considerándose como una posible microgrieta la cual no está asociada a defecto de la estructura del metal.



Figura 3.25: Posible Microgrieta. Observación a 100x.

En las figuras 3.26 y 3.27 atacadas con Nital a observaciones de 100x y 500x respectivamente, se puede observar que existe agrietamiento lejos de la zona de rotura, en presencia de matriz perlítica.



**Figura 3.26: Matriz Perlítica.
Observación a 100x.**

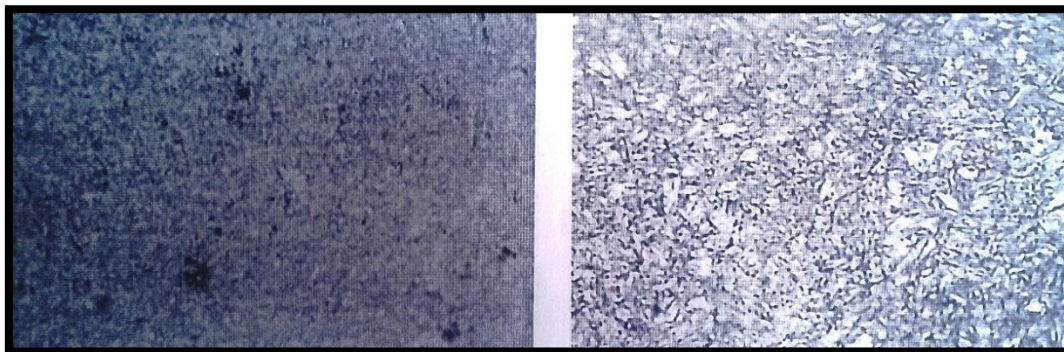
**Figura 3.27: Matriz Perlítica.
Observación a 500x.**

➤ **Cara 2.1**



Figura 3.28: Inclusiones no metálicas del tipo D. Observación a 100x.

En la cara 2.1 figura 3.28 se observan inclusiones no metálicas del tipo D, sin ataque químico Nital a observaciones de 100x. Mientras que en la figura 3.29 y 3.30 con observaciones de 100x y 500x respectivamente, la matriz que predomina es perlítica.



**Figura 3.29: Matriz Perlítica.
Observación a 100x.**

**Figura 3.30: Matriz Perlítica.
Observación a 500x.**

3.7 Análisis de Factibilidad Económica.

Para la realización del análisis económico se tomó como ejemplo el pozo Canasí 12, en el cual se produjo una avería por rotura de la tubería de producción. Se tomó como promedio de producción diaria del pozo 150m^3 , precio del barril de petróleo \$72 y número de muestras a ensayar 2. Se consideró el valor de la moneda de 1 dólar igual a 1 CUP. A continuación se muestran los resultados del análisis de factibilidad económica.

3.7.1 Daño económico promedio por rotura (A).

Teniendo en cuenta el costo total de reparación (B) y las pérdidas de producción (C) producto de dicha avería, obtenemos que:

$$A = B + C$$

$$A = \$213088 + \$543168$$

$$A = \$756256$$

B = Costo de brigada de Completamiento y Tool Master + costo de operaciones diarias en el tiempo de reparación.

C = Días de atraso de producción • barriles no producidos • precio del petróleo.

$$150\text{m}^3 = 137 \text{ Ton} = 943 \text{ barriles.}$$

3.7.2 Efecto económico (D).

Teniendo en cuenta el daño económico promedio por rotura (A) y el costo de experimentación (E), obtenemos que:

$$D = A - E$$

$$D = \$756256 - \$5767$$

$$D = \$750489$$

E = Costo de experimentación, (para los experimentos efectuados durante la tesis).

Tomando en cuenta la norma cubana (NC) ISO 2859-1: 2003, (NC, 2003) que trata sobre el Procedimiento de Muestreo para la Inspección por Atributos, es que se decide calcular el efecto económico para un muestreo simple en inspección normal de un lote de tuberías de producción de 6000m (656 tubos), el número de muestra a ensayar según la NC es de 8. Tomando en cuenta que cada muestra incluye un coupling y un niple, el costo total de experimentación en este caso sería el resultado de multiplicar el costo del experimento de la tesis por 8. Por lo tanto obtenemos que:

$$D = \$756\,265 - (\$5767 \cdot 8)$$

$$D = \$710129$$

Como el cálculo del efecto económico arroja un valor positivo, se puede concluir que es económicamente factible realizar el muestreo de las tuberías de producción y que su ejecución en el caso del pozo Canasí 12 hubiese ahorrado a la EPEP – Centro una cifra de \$ 710129 (CUP).

3.8 Metodología Diseñada para la EPEP-Centro.

La metodología propuesta para la EPEP-Centro particularmente al Grupo de Terminación y Completamiento de Pozos, consiste en una serie de pasos a seguir de obligatorio cumplimiento para la inspección técnica de las tuberías de producción a su llegada a los puertos de nuestro país o a los almacenes.

1. **Seleccionar la Cantidad de Materiales Tubulares (muestras) a Ensayar:** Para determinar la cantidad de muestras a ensayar se tiene que hacer a partir de la norma cubana (NC) ISO 2859-1/2003, "Procedimientos de Muestreo para la Inspección por Atributos", mediante el muestreo simple aleatorio, teniendo en cuenta la cantidad de lotes o sub-lotes de tuberías compradas por la EPEP-Centro.
2. **Preparación de las Probetas:** Una vez seleccionada las muestras el siguiente paso es preparar las probetas. En dependencia de los ensayos que se pretenden realizar estas probetas tienen diferentes dimensiones, pero todas se realizan a partir de las normas ASTM correspondientes a dichos ensayos.
3. **Realización del Ensayo de Composición Química:** Como se explica en el epígrafe 2.2, este ensayo es de vital importancia ya que la composición elemental de los aceros define en gran medida muchas de sus propiedades (dureza, resistencia a la corrosión, etc.) y es imprescindible para identificar y certificar su calidad. Este ensayo se realiza utilizando un Espectrómetro Multicanal Digital.
4. **Realización del Ensayo de Dureza Brinell:** El ensayo de dureza es un ensayo fácil y no destructivo. Se realiza a partir de la norma ASTM E 10-08 / A956 -00 y mediante un Durómetro Rockwell-Brinell. En el sub-epígrafe 2.3.1 se detalla este ensayo.
5. **Realización del Ensayo de Dureza Vickers:** Este ensayo de dureza se realiza a partir de la norma ASTM E 92-8(03) / E 384-06, con la ayuda del Durómetro Vickers.

En el caso de esta investigación se aplicó para 5 réplicas. En el sub-epígrafe 2.3.2 explica este ensayo.

6. **Realización del Ensayo de Tracción:** El ensayo de tracción es un ensayo destructivo y se utiliza para conocer las cargas que pueden soportar los materiales. Se realiza a partir de la norma ASTM E 8M- 2004, con la ayuda de una Máquina Universal de Fuerza P-20. En los sub-epígrafes 2.5.1 y 2.5.2 aparece más detallado este ensayo.
7. **Realización del Ensayo de Resiliencia o Impacto:** Determina si los materiales son frágiles o dúctiles. Este comportamiento está asociado a la temperatura y composición química que presentan estos materiales. El ensayo se realiza siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM A 370, y utilizando como equipo un KM-30 para 5 probetas. Este ensayo se explica en epígrafe 2.4.
8. **Realización del ensayo metalográfico:** Este ensayo se aplica para caracterizar la micro estructura de los metales o aleaciones, por lo que es de vital importancia su aplicación en las tuberías de producción. El ensayo se realiza siguiendo el procedimiento descrito en las normas ASTM E 407-2007, ASTM E 3-01 (2007) y ASTM E 112-10. El equipo que se utiliza es el Microscopio Óptico-Metalográfico. En el epígrafe 2.6 se detalla con más claridad dicho ensayo.
9. **Comparación de los resultados con la API 5CT:** Este último paso consistirá en la comparación de los resultados experimentales obtenidos en los diferentes ensayos, con los valores establecidos en la API 5CT de propiedades mecánicas, de composición química y estructuras metalográficas, para cada uno de los materiales metálicos en este caso aceros, definidos para la fabricación de tuberías de producción.

3.9 Conclusiones Parciales del Capítulo 3.

1. Los ensayos de composición química demostraron que el acero del niple se corresponde con el acero grado J55, y el del coupling se corresponde con el acero grado Q125, según la norma API 5CT.
2. El acero del coupling correspondiente con el grado Q125 de la norma API 5CT, aunque se recomienda para el trabajo en yacimientos de petróleos pesados,

presentó problemas de agrietamiento debido a la presencia de inclusiones no metálicas del tipo D, y formación de zonas de estructuras martensíticas, identificadas durante el ensayo metalográfico.

3. El acero J55 caracterizado durante el trabajo investigativo no se recomienda para tuberías de producción en pozos de petróleo con alto contenido de azufre, como es el caso del petróleo de los pozos de los yacimientos cubanos.
4. El cálculo económico demostró que en el caso del daño económico provocado por la rotura de un pozo, en caso de que se hubieran efectuado los ensayos establecidos en la API5CT, en caso de la reparación del pozo Canasí 12 el efecto económico favorable hubiese sido equivalente a un monto monetario de 710 129 CUP.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se diseñó una metodología en la EPEP-Centro que permite la caracterización mediante ensayos de composición química, estructura metalográfica y propiedades mecánicas, del material de las tuberías de producción y comprobar si las mismas se corresponden con lo establecido en la norma API 5CT, que complementa lo establecido en el procedimiento PC-CP/P 2701 establecido por la EPEP-Centro para la compra de materiales y medios.
2. Los ensayos de caracterización (composición química, estructura metalográfica y propiedades mecánicas), de las tuberías de producción (coupling y niple) permitieron comprobar que el material de los couplings y los niples empleados en la EPEP Centro estaban compuestos por los aceros Q125 y J55 de la API 5CT respectivamente.
3. El acero del coupling correspondiente con el grado Q125 de la norma API 5CT, aunque se recomienda para el trabajo en yacimientos de petróleos pesados, presentó problemas de agrietamiento debido a la presencia de inclusiones no metálicas del tipo D, y formación de zonas de estructuras martensíticas, identificadas durante el ensayo metalográfico.
4. El acero J55 caracterizado durante el trabajo investigativo no se recomienda para tuberías de producción en pozos de petróleo con alto contenido de azufre, como es el caso del petróleo de los pozos de los yacimientos cubanos.
5. El cálculo económico demostró la factibilidad de la implementación en la EPEP Centro de la metodología propuesta en la presente tesis, y que complementaría lo establecido en el procedimiento PC-CP/P 2701 establecido por la EPEP-Centro para la compra de materiales y medios.

RECOMENDACIONES

1. Implementar de manera inmediata la metodología propuesta en la presente tesis, y que complementarí lo establecido en el procedimiento PC-CP/P 2701 establecido por la EPEP-Centro para la compra de materiales y medios.
2. Implementar de manera inmediata la metodología propuesta en la presente tesis para las tuberías de perforación.
3. Comprar tuberías de producción de los grados C-75, L-80, C-95 y P-110; que son diseñados según la API 5CT para soportar ambientes ácidos (pozos de producción de hidrocarburos sea gas o petróleo que contienen azufre H₂S).
4. Incluir en un futuro a la metodología diseñada ensayos de corrosión que permitan evaluar la resistencia a la corrosión de las tuberías de producción acorde a los valores establecidos en la API – 5CT.

BIBLIOGRAFÍA

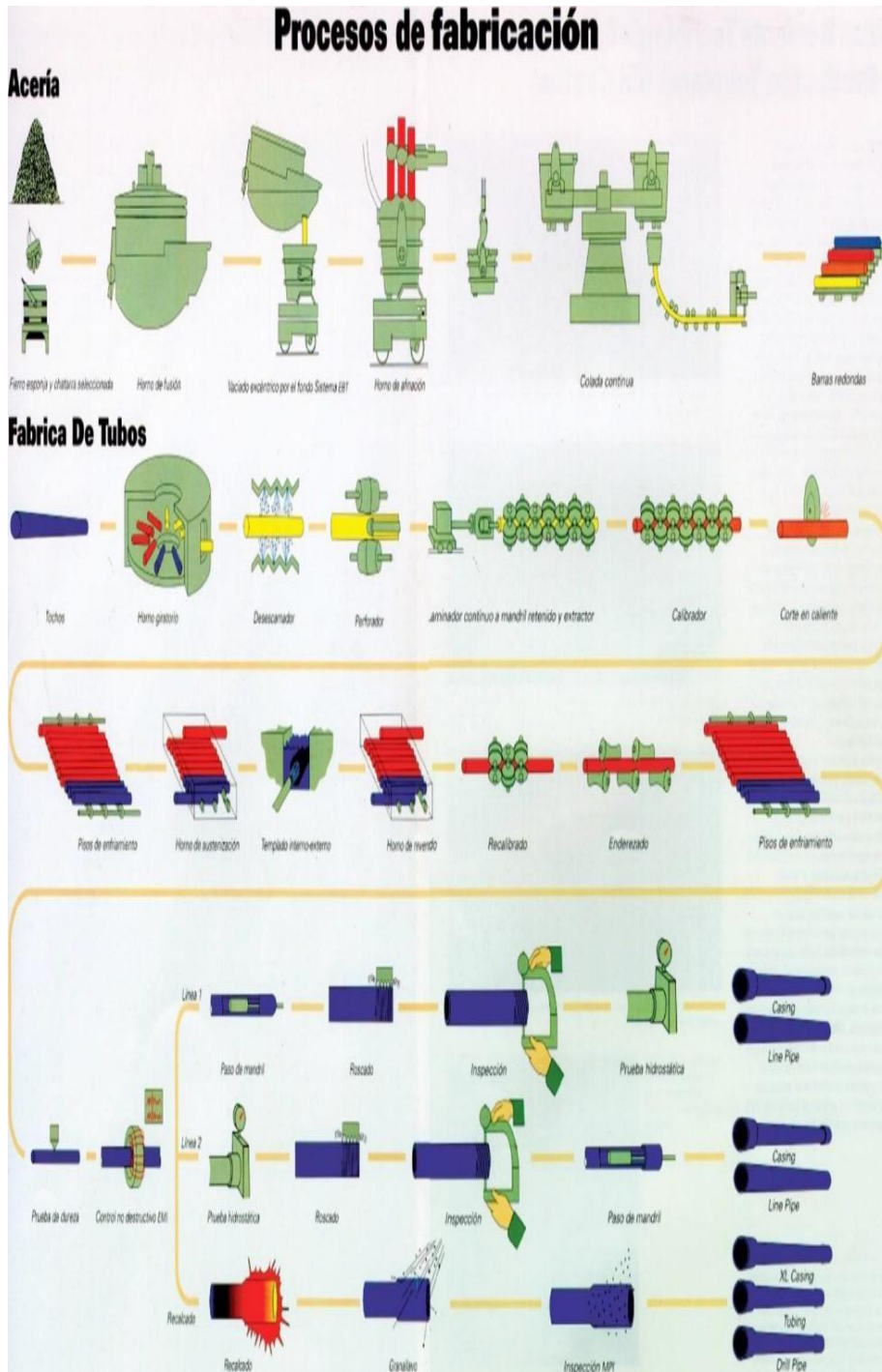
1. Aguilar, Laura., Sandoval, Félix David., Oliva, Yahima., López, Onix., 2011. “Caracterización Físico-Química de Crudos Cubanos de las Estructuras en Evaluación del Bloque VIIA de la Franja Norte de Crudos Pesados”. Disponible en la World Wide Web en <http://www.scribd.com/doc/6164000/PRUEBAS-MECANICAS>.
2. Aadnoy, B.S., Kaarstad, E., 2006. “Theory and Application of Buoyancy in Wells”, SPE/IADC 101795 presented at the SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Bangkok, Thailand.
3. American Petroleum Institute (API), 2010. “Specification for Casing and Tubing API 5CT”. Novena edición. Washington. Editorial API Publishing Services.
4. ASTM A 370, 2004. “Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”. United States. Editorial ASTM Publishing Services.
5. ASTM E 8M, 2004. “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”. United States. Editorial ASTM Publishing Services.
6. ASTM E 407, 2007. “Microetching Metals and Alloys”. United States. Editorial ASTM Publishing Services.
7. ASTM E 3 – 01, reprobada en 2007. “Preparation of Metallographic Specimens”. United States. Editorial ASTM Publishing Services.
8. ASTM E 112-10. “Standard Test Methods for Determining Average Grain Size”. United States. Editorial ASTM Publishing Services.
9. ASTM E 92- 83, reprobada en 2003. “Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials”. United States. Editorial ASTM Publishing Services.
10. ASTM E 23, 2007. “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”. United States. Editorial ASTM Publishing Services.
11. Bassante, Alfonsina, 2013. “Evaluación y Optimización de Tuberías de Revestimiento Para Pozos a Perforar en los Campos Shushufindi y Oso”.
12. Bravo, C.A., García, I., Leal, A., Mendoza, J.A., Santiago, E.A., and Uribe, J.S., 2013, “Capacidad de Resistencia de Tuberías Petroleras”.

13. British Steel Corporation Tubes Division, 2009. "Colour Code Marking for Casing and Tubing".
14. Castro, Y., Illan, C.A., Lugo, K., Meza, L.M., and Mondragón, T., 2013, "Guía de Diseño Para el Asentamiento y Diseño de Tuberías de Revestimiento".
15. CESOLCA, 2019. "Informe Técnico". N° de Orden: 9072/19 y 9073/19. Centro de Investigaciones Metalúrgica.
16. Cruz, E., Baker, R., York, P., & Ring, L., 2007. "Mitigating Sub-Salt Rubble Zones Using High Collapse, Cost Effective Solid Expandable Monobore Systems". Offshore Technology Conference, OTC-19008-PP. Houston, Texas. Recuperado el 30 de Abril de 2015.
17. Dupal, K., Naquin, C., Daigle, C., Cook, L., & York, P., 2012. "Well Design with Expandable Tubulars Reduces Costs and Increases Success in Deepwater Applications". Deep Offshore Technology.
18. Guliaev, A.P., 1983. "Metalografía", Tomo I. Segunda edición. Editorial MIR.Moscú.
19. Larre, Va, 2017. "Estructuras del Acero". Basado en el texto del ing. Larre, Va. Metalografía y Tratamientos Térmicos.
20. Mack, R. D., Filippov, A., Kendziora, L., & Ring, L., 2010. NACE Standard. "In-situ expansion of casing and tubing - Effect on Mechanical Properties and Resistance to Sulfide Stress Cracking, 00164".
21. Mack, R. D., McCoy, T., & Ring, L., Julio de 2016. "How In Situ Expansion Affects Casing and Tubing Properties".
22. Millán, Simón, 2016. "Procedimientos de Mecanizado". Madrid: Editorial Paraninfo. ISBN 84-9732-428-5.
23. Mitchell, Bill, 1995. "Advanced Oilwell Drilling Engineering".
24. Norma Cubana (NC) ISO 2859-1, 2003. Procedimiento de Muestreo para la Inspección por Atributos. Publicada por la ISO, 1999.
25. PC-CP/P 2701, 2017. "Tramitación y Ejecución de Compras en la EPEP-Centro".
26. PEMEX, 2015, Archivo PDF.- "Exploración y Producción. Guía de diseño de aparejos de producciones". PEMEX UPMP.
27. Schlumberger, 2005. "IPM Casing and Tubing Design Standard". Houston.

28. Tena, Arturo, 2013. “Nueva Tecnología de Tubería Expandible en la Perforación de Pozos”.
29. Tenaris Marketing Communications, 2009. Prontuario Tamsa. Segunda Revisión, México.
30. Torres Alpizar, Eduardo, 2001. Sitio Web de Ciencias de los Materiales. Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad de Matanzas.
31. Viking Engineering, L.C., 2013. Tubular Desing Tecnology Training. Houston.

ANEXOS

Anexo 1.



Proceso de fabricación de las tuberías

Anexo 2.

A)

Características geométricas y mecánicas de la tubería de revestimiento y tubería de producción.

Diámetro Nominal (pg)	Peso Nominal (lb/pie)	Grado	Diámetro Drift (pg)	Diámetro interior (pg)	Resistencia al colapso (psi)	Tensión *(lbf)
4 1/2	9.50	H-40	3.965	4.090	2760	111
	11.60	K-55	3.875	4.052	4010	165
	15.10	P-110	3.701	3.826	14350	485
5	11.50	J-55	4.435	4.560	3060	182
	15.00	N-80	4.283	4.408	7250	350
	24.10	P-110	3.875	4.000	19800	778
5 1/2	14.00	J-55	4.887	5.012	3120	222
	17.00	K-55	4.767	4.892	4910	273
	20.00	P-110	4.653	4.778	11100	641
6 5/8	20.00	H-40	5.924	6.049	2520	229
	24.00	C-90	5.796	5.921	6140	624
	24.00	P-110	5.796	5.921	6730	763
7	17.00	H-40	6.413	6.538	1420	196

Diámetro Nominal (pg)	Peso Nominal (lb/pie)	Grado	Diámetro Drift (pg)	Diámetro interior (pg)	Resistencia al colapso (psi)	Tensión *(lbf)
	23.00	L-80	6.241	6.366	3830	532
	35.00	P-110	5.879	6.004	13020	1119
7 5/8	47.10	N-80	6.250	6.375	12040	1100
	26.40	C-95	6.844	6.969	3710	714
	29.70	P-110	6.750	6.875	5350	940
8 5/8	24.00	K-55	7.972	8.097	1370	381
	36.00	L-80	7.700	7.825	4100	827
	49.00	P-110	7.386	7.511	10750	1553

B)**Grados API del acero**

°API	Esfuerzo cedente (Ksi)		Resistencia Última a la Tensión Mínima (Ksi)	Elongación Mínima (%)
	Mínimo	Máximo		
H-40	40	80	60	29.5
J-55	55	80	75	24.0
K-65	55	80	95	19.5
N-80	80	110	100	18.5
L-80	80	95	95	19.5
C-90	90	105	100	18.5
C-95	95	110	105	18.5
T-95	95	110	105	18.0
P-110	110	140	125	15.0
Q-125	125	150	135	18.0

C)

Clasificación del acero según el contenido de carbono (%)	
< 0.29	bajo
0,3 - 0.59	medio
> 0.6	alto

Fuente: (Guliaev, 1983)

Elaborado por: autora

D)

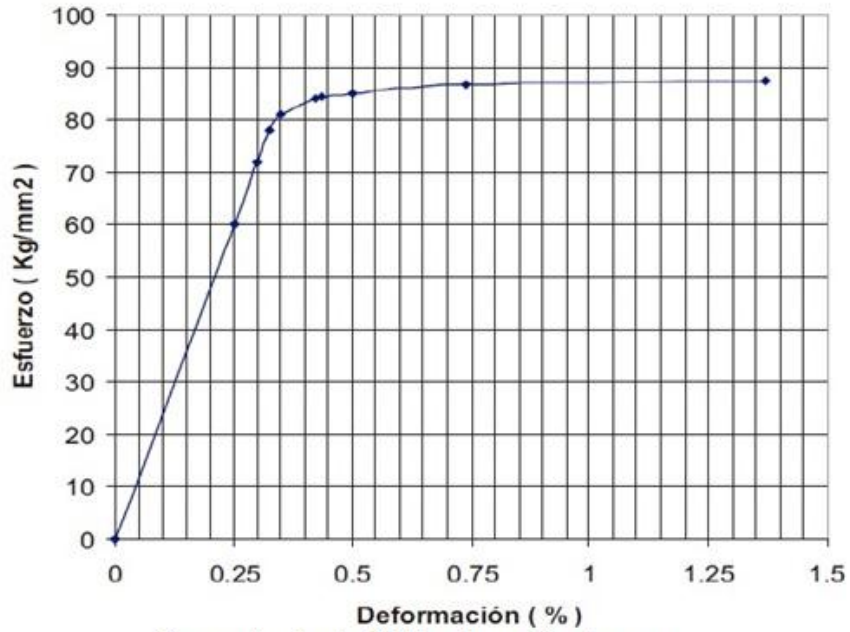
Clasificación del acero según suma total de elementos de aleación en %	
de 1 a 3%	bajo
entre 3 y 6 %	medio
Mayor de 6%	alto

Fuente: (Guliaev, 1983)

Elaborado por: autora

E)

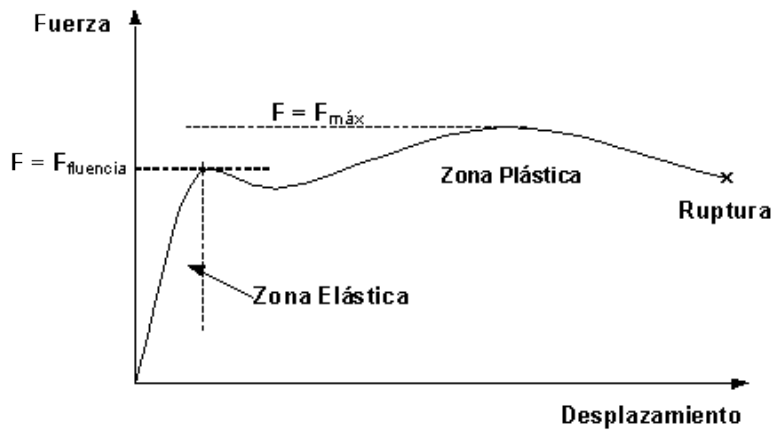
Esfuerzo - Deformación



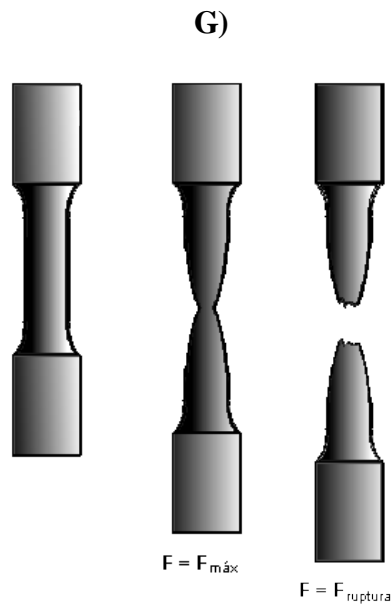
Comportamiento elástico de un tubo de acero

F)

ENSAYO DE TRACCIÓN



Curva Fuerza-Deformación de un acero.



Probeta al inicio, al momento de llegar a la carga máxima y luego de la ruptura.

Anexo 3

A)



Niple (M-1) y Coupling (M-2)

B)



Espectrómetro Multicanal Digital modelo Belec Vario Lab 2P N° 171007.

C)



Durómetro Rockwell-Brinell IBERTEST

D)



Equipo KM-30 para determinar ensayo de resiliencia

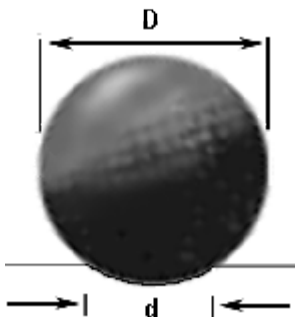
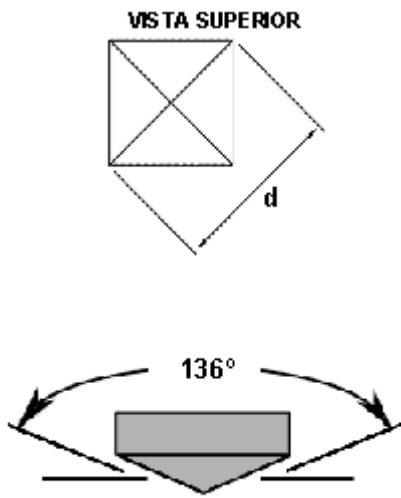
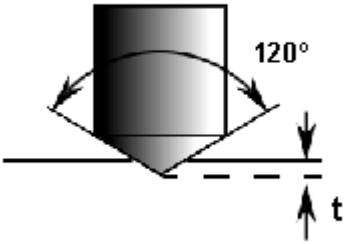
E)



Ensayo de tracción

Anexo 4

Procedimiento y cálculo de cada uno de los números de dureza estandarizados.

<p>Ensayo BRINELL.</p> <p>Indentador: Esfera de 10mm de acero o carburo de tungsteno.</p> <p>Carga = P</p> $\text{Fórmula: HBN} = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$	
<p>Ensayo VICKERS</p> <p>Indentador: Pirámide de diamante</p> <p>Carga = P</p> $\text{Fórmula: HVN} = 1,72 \frac{P}{d^2}$	
<p>Ensayo ROCKWELL A, C, D</p> <p>Indentador: Cono de diamante (HRA, HRC, HRD)</p> <p>Carga:</p> <p>$P_A = 60\text{Kg}$ $P_C = 150\text{Kg}$ $P_D = 100\text{Kg}$</p> <p>Formula: HRA, HRC, HRD = 100 - 500t</p>	

Ensayo ROCKWELL B, F, G, E

Indentador:

Esfera de acero $f = 1/16$
"
(HRB, HRF, HRG)

Esfera de acero $f = 1/8$ "
(HRE)

Carga:

$P_B = 100\text{Kg}$
 $P_F = 60\text{Kg}$
 $P_G = 150\text{Kg}$
 $P_E = 100\text{Kg}$

Formula: HRB, HRF, HRG, HRE = $130 - 500t$

