



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA EXPERIMENTAL LIBERTADOR**



**INSTITUTO PEDAGÓGICO DE BARQUISIMETO**

**Dr. "LUÍS BELTRÁN PRIETO FIGUEROA"**

**BARQUISIMETO – LARA**

**PROYECTO AVANZADO DE FISICA**

**Determinación de las causas que originaron la fractura repentina de un oleoducto de 26 pulgadas de diámetro, por medio de ensayos metalúrgicos en el laboratorio de metalurgia de PDVSA Occidente.**

**Barquisimeto, Noviembre de 2011**



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA EXPERIMENTAL LIBERTADOR**



**INSTITUTO PEDAGÓGICO DE BARQUISIMETO**

**Dr. "LUÍS BELTRÁN PRIETO FIGUEROA"**

**BARQUISIMETO – LARA**

**PROYECTO AVANZADO DE FISICA**

**Determinación de las causas que originaron la fractura repentina de un oleoducto de 26 pulgadas de diámetro, por medio de ensayos metalúrgicos en el laboratorio de metalurgia de PDVSA Occidente.**

**Autores:**

Mariannelly rojas

Yenny Aranguren

**Tutores:**

**Prof.** Cruz Díaz

**Ing.** Alí Giménez

**Ing.** Eduardo González

**Barquisimeto, Noviembre de 2011**



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA EXPERIMENTAL LIBERTADOR  
INSTITUTO PEDAGÓGICO DE BARQUISIMETO  
“LUÍS BELTRÁN PRIETO FIGUEROA”  
BARQUISIMETO – LARA  
PROYECTO AVANZADO DE FÍSICA**



**Determinación de las causas que originaron la fractura repentina de un oleoducto de 26 pulgadas de diámetro, por medio de ensayos metalúrgicos en el laboratorio de metalurgia de PDVSA Occidente.**

**Autores:** Mariannelly Rojas, Yenny Aranguren.

**Tutores:** Prof. Cruz Díaz, Ing. Alí Giménez, Ing. Eduardo González,

**Fecha:** Noviembre 2011.

### **RESUMEN**

La presente investigación de campo tiene como finalidad determinar las causas que originaron la fractura repentina de un oleoducto de 26 pulgadas de diámetro, por medio de ensayos en el laboratorio de metalurgia de PDVSA Occidente. Dicha investigación se desarrolla bajo la modalidad de proyecto de acción, donde se analizará una muestra fracturada de la tubería (oleoducto), con los materiales y equipos del laboratorio, aplicándose una serie de ensayos (análisis químico del material, los sólidos y líquidos depositados, y análisis mecánico como dureza, tracción y metalografía del material) para obtener los datos necesarios que serán validados por dos (2) expertos en la materia, a dichos datos se les aplicaran las normas (ASTM) que rigen la fabricación y pruebas en los materiales, para verificar las posibles causas, diferenciando entre las referentes al material, al diseño, al mantenimiento y a las operaciones, determinando cuál de éstas fue la —causa raíz|| de la fractura. A partir de los resultados se realiza un informe técnico. Finalmente se realizara la validación técnica con expertos en la temática.

**Descriptores:** Ensayos metalúrgicos, normas, informe técnico.

## INTRODUCCIÓN

En el campo de la ciencia se estudian, describen y analizan fenómenos, los cuales de algún modo u otro son aprovechados por la humanidad ya sea en el campo de la industria, medicina, la tecnología, etcétera. La Física es una de esas ciencias, que gracias a su avance y a los grandes descubrimientos de diversos científicos, se ha vuelto tan importante, en este caso para el desarrollo de la industria petrolera.

El presente trabajo muestra la importancia de la mecánica de los materiales en el trabajo de laboratorio de corrosión y metalurgia de la empresa Petróleo de Venezuela S.A (PDVSA) Occidente, en donde se realizan análisis de las distintas muestras que allí se trabajan. En los análisis Físicos o mecánicos se estudian la dureza, tracción y metalografía del material; además de este, se realizan análisis químico y se estudian los sólidos y líquidos depositados en el material.

En este laboratorio se realizan todos estos ensayos para verificar las posibles causas de las fallas de los materiales metálicos utilizados en la industria petrolera.

En esta oportunidad se determinarán las causas que originaron la fractura repentina de un oleoducto de 26 pulgadas de diámetro, diferenciando entre las referentes al material, al diseño, al mantenimiento y a las operaciones, determinando cuál de éstas fue la —causa raíz|| de la fractura. A partir de los resultados se realiza un informe técnico.

Por otra parte, en el ámbito pedagógico, esta investigación le permite al docente presentar al estudiantado, un sinnúmero de herramientas prácticas que complementan el estudio en el aula. Esta es una muestra de una de las características del docente investigador, ya que se le exige estar actualizado en cuanto a su carrera y de una u otra forma contribuye al desarrollo del país.

## MARCO TEÓRICO

### METALOGRAFÍA

La metalografía se llama a la ciencia que estudia la relación entre la composición, estructura, las propiedades de los metales, las aleaciones y las leyes de sus cambios bajo las sollicitaciones externas: calóricas, químicas, mecánicas, electromagnéticas y radiactivas. De todos los elementos conocidos hasta hoy día más de la mitad son metales. En la figura se muestra la tabla periódica de los elementos, en cuya parte derecha se han separado los elementos no metálicos. Tales elementos, como el Si, Ge, As, Se, Te, Sn, están considerados como elementos intermedios entre los metales y los metaloides.

1 IA 1 H	2 2 He											13 13 Al	14 14 Si	15 15 P	16 16 S	17 17 Cl	18 18 Ar
3 3 Li	4 4 Be											5 5 B	6 6 C	7 7 N	8 8 O	9 9 F	10 10 Ne
11 11 Na	12 12 Mg	3 3 III B	4 4 IV B	5 5 V B	6 6 VI B	7 7 VII B	8 8 VIII B	9 9 VIII B	10 10 VIII B	11 11 IB	12 12 IIB	13 13 Al	14 14 Si	15 15 P	16 16 S	17 17 Cl	18 18 Ar
19 19 K	20 20 Ca	Escandio		23 23 V	24 24 Cr	25 25 Mn	26 26 Fe	27 27 Co	28 28 Ni	29 29 Cu	30 30 Zn	31 31 Ga	32 32 Ge	33 33 As	34 34 Se	35 35 Br	36 36 Kr
37 37 Rb	38 38 Sr	39 39 Y	40 40 Zr	41 41 Nb	42 42 Mo	43 43 Tc	44 44 Ru	45 45 Rh	46 46 Pd	47 47 Ag	48 48 Cd	49 49 In	50 50 Sn	51 51 Sb	52 52 Te	53 53 I	54 54 Xe
55 55 Cs	56 56 Ba	57-70 57-70 Lu	71 71 Hf	72 72 Ta	73 73 W	74 74 Re	75 75 Os	76 76 Ir	77 77 Pt	78 78 Au	79 79 Hg	80 80 Tl	81 81 Pb	82 82 Bi	83 83 Po	84 84 At	85 85 Rn
87 87 Fr	88 88 Ra	89-102 89-102 Lr	103 103 Rf	104 104 Db	105 105 Sg	106 106 Bh	107 107 Hs	108 108 Mt	109 109 Ds	110 110 Uuu	111 111 Uub	112 112 Uut	113 113 Uuq	114 114 Uup	115 115 Uuh		
		57 57 La	58 58 Ce	59 59 Pr	60 60 Nd	61 61 Pm	62 62 Sm	63 63 Eu	64 64 Gd	65 65 Tb	66 66 Dy	67 67 Ho	68 68 Er	69 69 Tm	70 70 Yb		
		89 89 Ac	90 90 Th	91 91 Pa	92 92 U	93 93 Np	94 94 Pu	95 95 Am	96 96 Cm	97 97 Bk	98 98 Cf	99 99 Es	100 100 Fm	101 101 Md	102 102 No		

● No metales   ● Metales alcalinotérreos   ● Otros metales   ● Actínidos   ● Gases nobles  
● Metales alcalinos   ● Metales de transición   ● Halógenos   ● Lantánidos

#### Tabla periódica de los elementos

La tabla periódica de los elementos agrupa a éstos en filas y columnas según sus propiedades químicas. Los elementos aparecen ordenados por su número atómico. Haciendo clic en un elemento de la tabla obtendrá información sobre el nombre, la historia, la configuración electrónica y la masa atómica del mismo. Las masas atómicas entre paréntesis indican la masa del isótopo más estable.

Los metales en estado sólido y parcialmente en estado líquido poseen alta conductividad calórica y eléctrica, tienen un coeficiente positivo de electroresistencia térmica. Con el aumento de la temperatura la resistencia eléctrica de los metales puros crece; una gran cantidad de metales tienen superconductividad; en estos metales a una temperatura cercana al cero absoluto, la resistencia eléctrica cae a saltos hasta una magnitud muy pequeña. Además, todos los metales poseen emisión termoelectrónica, es decir, la propiedad de emitir electrones durante el calentamiento; buena capacidad reflectiva y susceptibilidad a la deformación plástica. Los metales no son transparentes y tienen un brillo metálico muy específico.

Los no metales (metaloides), por regla general, son frágiles y se caracterizan por tener una baja conductividad calórica y un coeficiente negativo de resistencia eléctrica. Todos los metales y aleaciones metálicas son cuerpos cristalinos. Los átomos (iones) están distribuidos dentro de ellos uniforme y periódicamente a diferencia de los cuerpos amorfos, en los cuales los átomos están distribuidos en forma caótica.

Los metales son cuerpos policristalinos, compuestos de una gran cantidad de cristales finos orientados ( $10^{-1}$ — $10^{-4}$  cm.) en diferente forma unos con respecto a otros. En dependencia de la cristalización éstos tienen forma irregular y a diferencia de los cristales de forma regular se llaman cristalitas o granos de metal.

Los metales puros tienen baja resistencia y en una serie de casos no garantizan las propiedades físico-químicas y de ingeniería requeridas. Por eso, éstos se emplean muy raramente en la técnica. Tienen un uso más amplio las aleaciones.

Las aleaciones se obtienen por fusión o sinterización de dos o más metales o de metales con metaloide. Ellos poseen propiedades características, propias del estado metálico. Las sustancias que forman la aleación se llaman componentes.

La aleación puede estar compuesta de dos o más componentes. Para examinar la estructura, transformaciones y propiedades de los metales y aleaciones se han introducido las nociones de "fase" y "estructura". Se llama fase la parte homogénea del sistema (del metal o la aleación), que posee una misma composición, iguales propiedades físicas y químicas y una superficie interfásica separada de los demás

partes del sistema. Por ejemplo, el metal líquido homogéneo (aleación) es un sistema monofásico. La mezcla de dos cristales distintos por su composición y estructura, separados por la superficie de interfase, o bien la presencia simultánea de aleación líquida (metal) y cristales es un sistema bifásico. Por estructura se entiende la estructura del metal o de la aleación. Se distinguen: 1) la macroestructura, que es la estructura del metal o de la aleación, observada a simple vista o con un aumento insignificante (de 30 a 40 veces); 2) la microestructura, que es la estructura del metal o de la aleación, observada con la ayuda de un microscopio a elevados aumentos. La microestructura da una idea sobre la distribución mutua de las fases, su forma y dimensiones. Se llaman componentes estructurales de la aleación las partes aisladas de la aleación, que al ser observados al microscopio poseen igual estructura con las particularidades características propias de ellas.

### **Metalurgia:**

La metalurgia es la técnica de la obtención y tratamiento de los metales desde minerales metálicos hasta los no metálicos. También estudia la producción de aleaciones, el control de calidad de los procesos vinculados así como su control contra la corrosión. Además de relacionarse con la industria metalúrgica.

### **Procesos metalúrgicos:**

Los procesos metalúrgicos comprenden las siguientes fases:

- Obtención del metal a partir del mineral que lo contiene en estado natural, separándolo de la ganga;
- El afino, enriquecimiento o purificación: eliminación de las impurezas que quedan en el metal;
- Elaboración de aleaciones;
- Otros tratamientos del metal para facilitar su uso.

**Corrosión:**

La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión. Otros materiales no metálicos también sufren corrosión mediante otros mecanismos. El proceso de corrosión es natural y espontáneo.

Por otra parte, la corrosión puede darse mediante una reacción química (oxido-reducción) en la que intervienen tres factores: la pieza manufacturada, el ambiente y el agua, o por medio de una reacción electroquímica.

Los factores más conocidos son las alteraciones químicas de los metales a causa del aire, como la herrumbre del hierro y el acero o la formación de pátina verde en el cobre y sus aleaciones (bronce, latón). Sin embargo, la corrosión es un fenómeno mucho más amplio que afecta a todos los materiales (metales, cerámicas, polímeros, etc.) y todos los ambientes (medios acuosos, atmósfera, alta temperatura, etc.).

Es importante conocer que la corrosión es un problema industrial importante, pues puede causar accidentes (ruptura de una pieza) y, además, representa un costo importante, ya que se calcula que cada pocos segundos se disuelven 5 toneladas de acero en el mundo, procedentes de unos cuantos nanómetros o picómetros, invisibles en cada pieza pero que, multiplicados por la cantidad de acero que existe en el mundo, constituyen una cantidad importante.

La corrosión es un campo de las ciencias de materiales que involucra a la vez nociones de química y de física (físico-química).



Oxidación del metal.

Lo que provoca la corrosión es un flujo eléctrico masivo generado por las diferencias químicas entre las piezas implicadas. La corrosión es un fenómeno electroquímico. Una corriente de electrones se establece cuando existe una diferencia de potenciales entre un punto y otro. Cuando desde una especie química se ceden y migran electrones hacia otra especie, se dice que la especie que los emite se comporta como un ánodo y se verifica la oxidación, y aquella que los recibe se comporta como un cátodo y en ella se verifica la reducción.

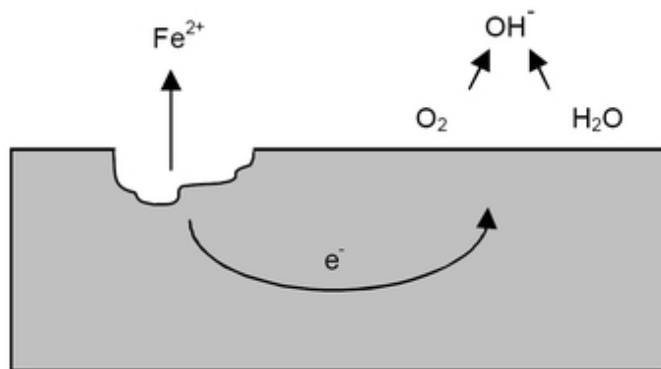
Para que esto ocurra entre las especies, debe existir un diferencial electroquímico. Si separamos una especie y su semireacción, se le denominará semipar electroquímico; si juntamos ambos semipares, se formará un par electroquímico. Cada semipar está asociado a un potencial de reducción (antiguamente se manejaba el concepto de potencial de oxidación). Aquel metal o especie química que exhiba un potencial de reducción más positivo procederá como una reducción y, viceversa, aquél que exhiba un potencial de reducción más negativo procederá como una oxidación.

Para que haya corrosión electroquímica, además del ánodo y el cátodo, debe haber un electrólito (por esta razón, también se suele llamar corrosión húmeda, aunque el electrólito también puede ser sólido). La transmisión de cargas eléctricas es por electrones del ánodo al cátodo (por medio del metal) y por iones en el electrólito.

Este par de metales constituye la llamada pila galvánica, en donde la especie que se oxida (ánodo) cede sus electrones y la especie que se reduce (cátodo) acepta electrones. Al formarse la pila galvánica, el cátodo se polariza negativamente, mientras el ánodo se polariza positivamente.

En un medio acuoso, la oxidación del medio se verifica mediante un electrodo especial, llamado electrodo ORP, que mide en milivoltios la conductancia del medio. La corrosión metálica química es por ataque directo del medio agresivo al metal, oxidándolo, y el intercambio de electrones se produce sin necesidad de la formación del par galvánico.

La manera de corrosión de los metales es un fenómeno natural que ocurre debido a la inestabilidad termodinámica de la mayoría de los metales. En efecto, salvo raras excepciones (el oro, el hierro de origen meteorítico), los metales están presentes en la Tierra en forma de óxidos, en los minerales (como la bauxita si es aluminio o la hematita si es hierro). Desde la prehistoria, toda la metalurgia ha consistido en reducir los óxidos en bajos hornos, luego en altos hornos, para fabricar el metal. La corrosión, de hecho, es el regreso del metal a su estado natural, el óxido.



Esquema de oxidación del hierro, ejemplo de corrosión del tipo polarizada.

### **Protección catódica**

La protección catódica es una técnica de control de la corrosión, que está siendo aplicada cada día con mayor éxito en el mundo entero, en que cada día se hacen necesarias nuevas instalaciones de ductos para transportar petróleo, productos

terminados, agua; así como para tanques de almacenamientos, cables eléctricos y telefónicos enterrados y otras instalaciones importantes.

En la práctica se puede aplicar protección catódica en metales como acero, cobre, plomo, latón, y aluminio, contra la corrosión en todos los suelos y, en casi todos los medios acuosos. De igual manera, se puede eliminar el agrietamiento por corrosión bajo tensiones por corrosión, corrosión intergranular, picaduras o tanques generalizados.

Como condición fundamental las estructuras componentes del objeto a proteger y del elemento de sacrificio o ayuda, deben mantenerse en contacto eléctrico e inmerso en un electrolito.

Aproximadamente la protección catódica presenta sus primeros avances, en el año 1824, en que Sir. Humphrey Davy, recomienda la protección del cobre de las embarcaciones, uniéndolo con hierro o zinc; habiéndose obtenido una apreciable reducción del ataque al cobre, a pesar de que se presentó el problema de ensuciamiento por la proliferación de organismos marinos, habiéndose rechazado el sistema por problemas de navegación.

En 1850 y después de un largo período de estancamiento la marina Canadiense mediante un empleo adecuado de pinturas con antiorganismos y anticorrosivos demostró que era factible la protección catódica de embarcaciones con mucha economía en los costos y en el mantenimiento.

### **Fundamento de la protección catódica**

Luego de analizadas algunas condiciones especialmente desde el punto de vista electroquímico dando como resultado la realidad física de la corrosión, después de estudiar la existencia y comportamiento de áreas específicas como Ánodo-Cátodo-Electrólito y el mecanismo mismo de movimiento de electrones y iones, llega a ser obvio que si cada fracción del metal expuesto de una tubería o una estructura construida de tal forma de coleccionar corriente, dicha estructura no se corroerá porque sería un cátodo.

La protección catódica realiza exactamente lo expuesto forzando la corriente de una fuente externa, sobre toda la superficie de la estructura. Mientras que la cantidad de corriente que fluye, sea ajustada apropiadamente venciendo la corriente de corrosión y, descargándose desde todas las áreas anódicas, existirá un flujo neto de corriente sobre la superficie, llegando a ser toda la superficie un cátodo. Para que la corriente sea forzada sobre la estructura, es necesario que la diferencia de potencial del sistema aplicado sea mayor que la diferencia de potencial de las microceldas de corrosión originales.

La protección catódica funciona gracias a la descarga de corriente desde una cama de ánodos hacia tierra y dichos materiales están sujetos a corrosión, por lo que es deseable que dichos materiales se desgasten (se corroan) a menores velocidades que los materiales que protegemos.

Teóricamente, se establece que el mecanismo consiste en polarizar el cátodo, llevándolo mediante el empleo de una corriente externa, más allá del potencial de corrosión, hasta alcanzar por lo menos el potencial del ánodo en circuito abierto, adquiriendo ambos el mismo potencial eliminándose la corrosión del sitio, por lo que se considera que la protección catódica es una técnica de Polarización catódica.

La protección catódica no elimina la corrosión, éste remueve la corrosión de la estructura a ser protegida y la concentra en un punto donde se descarga la corriente. Para su funcionamiento práctico requiere de un electrodo auxiliar (ánodo), una fuente de corriente continua cuyo terminal positivo se conecta al electrodo auxiliar y el terminal negativo a la estructura a proteger, fluyendo la corriente desde el electrodo a través del electrólito llegando a la estructura.

Influyen en los detalles de diseño y construcción parámetro de geometría y tamaño de la estructura y de los ánodos, la resistividad del medio electrólito, la fuente de corriente, etc.

### **Resistencia de los Materiales:**

La Resistencia de Materiales clásica es una disciplina de la ingeniería mecánica y la ingeniería estructural que estudia los sólidos deformables mediante

modelos simplificados. La resistencia de un elemento se define como su capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo.

Un modelo de resistencia de materiales establece una relación entre las fuerzas aplicadas, también llamadas cargas o acciones, y los esfuerzos y desplazamientos inducidos por ellas. Típicamente las simplificaciones geométricas y las restricciones impuestas sobre el modo de aplicación de las cargas hacen que el campo de deformaciones y tensiones sean sencillos de calcular.

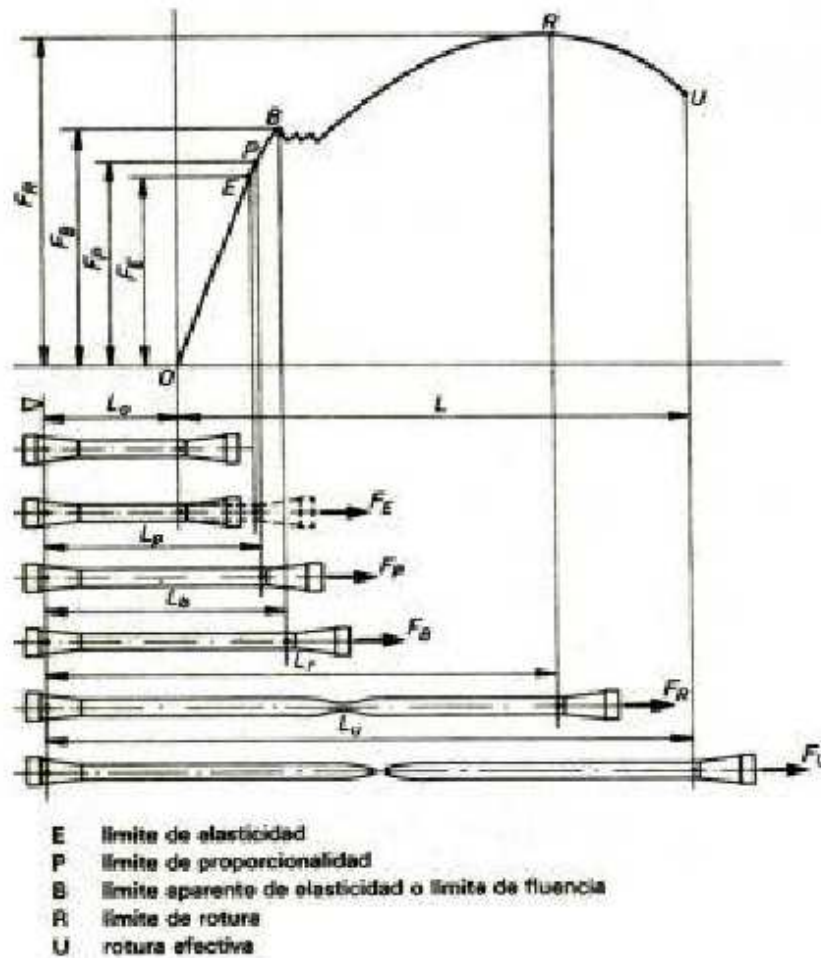
### ***Ensayo de tracción***

A menudo se realizan una serie de pruebas a los materiales (fundamentalmente metales) para ver su comportamiento, a estas pruebas se les llama ensayos. A partir de estos, se puede determinar:

- Sus características para una posible utilización
- Los defectos de las piezas ya terminadas.

El ensayo de tracción es el más importante y el más empleado de todos. Se realiza con probetas de dimensiones normalizadas, que se someten a esfuerzos de tracción progresivamente crecientes, en dirección longitudinal, hasta producir su rotura.

El ensayo de tracción permite estudiar el alargamiento de la probeta en función de la fuerza o carga actuante. La forma del diagrama depende del material a ensayar. En la imagen podemos ver un diagrama característico de un material dúctil y maleable, como el acero extrasuave.



Período 1. **ALARGAMIENTOS ELÁSTICOS**. Los alargamientos son pequeños y proporcionales a los esfuerzos. Cuando el esfuerzo cesa la probeta recupera su estado inicial. **ZONA ELÁSTICA**.

Período 2. **ALARGAMIENTOS PERMANENTES**. Los alargamientos son grandes, cuando cesa la fuerza, la deformación permanece. **ZONA PLÁSTICA**.

Período 3. **ALARGAMIENTOS LOCALIZADOS**. Cuando la carga llega a cierto valor, el alargamiento se localiza en una zona concreta (hacia el centro de la probeta) llamada **ZONA DE ESTRICCIÓN**. Finaliza en rotura.

## MARCO METODOLÓGICO

### Materiales Utilizados para esta investigación:

- Banco de Fotos
- Cortadora Manual
- Cortadora de disco de diamante
- Lupa estereoscópica
- Equipos Buehler:
  - Montadora de Baquelita
  - Devastadora Manual
  - Pulidora de disco
  - Ataque químico (Vidroreloj)
- Equipos Spectrotest
- Equipo Leco
- Equipo Innov-X-Sistem Alfa 2000
- Equipo Willson
- Equipo Instron

### Descripción de los Materiales:

#### Espectro test

El espectrómetro móvil de arco y chispa modelo SpectroTest es de tercera generación. Este aparato, de Spectro Hispania, es capaz de analizar carbono y elementos ultravioleta como P, S, B, Sn y As en metales de base Fe, Al, Co, Cu, Mg, Ni, Pb, Sn, Ti y Zn.

Spectrotest de arco y chispa OES, analiza el nitrógeno y carbono en acero. El analizador móvil de metales es aún más flexible, con una sonda de muestreo más pequeña y compacta. Además, puede abordar ahora dos nuevas aplicaciones: la medición de carbono en aceros de baja aleación, empleando descargas de arco, y la

determinación del contenido de nitrógeno en aceros dúplex.



La innovación más importante es la sonda de muestreo, que es considerablemente menor, más ligera y más compacta que su predecesor. Con el diámetro reducido de la sonda de muestreo es posible analizar superficies de muestra en lugares de difícil acceso, por ejemplo, en paquetes de barras y rollos de alambre. La sonda estándar puede utilizarse para una identificación rápida de la calidad con excitación de arco, así como para análisis detallado con excitación por chispa. El resultado se muestra en la pantalla integrada tras sólo tres segundos en modo separación y tras cinco segundos en modo análisis.

### **Determinador de Azufre y Carbono en muestras Orgánicas**

Determinador de Azufre y Carbono en muestras Orgánicas.



El SC-144DR Mide el Azufre y el Carbono en forma simultánea o individualmente. No requiere ningún producto químico peligroso. Los resultados del análisis son exactos y con una gran velocidad (menos de 3 minutos).

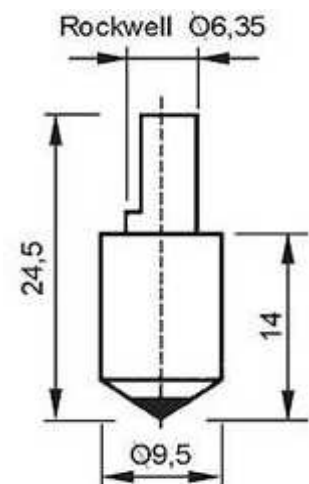
Posee una PC con sistema Windows® lo que le da una mayor flexibilidad de uso pudiendo cargar parámetros particulares para cada operación.

### **Análisis químico por emisión de rayos x**



El Innov-x-system alfa 2000 proporciona la caracterización cualitativa y cuantitativa del material para la detección, la identificación, el Control de calidad, el control de procedimiento, el cumplimiento regulatorio y la investigación y desarrollo de metales y aleaciones, extrayendo la geología de la muestra.

### **Equipos Wilson**



Descripción: Durómetro Rockwell

Numero de bien: 090992

Modelo/Tipo: 5YR PLRB

Marca: Wilson

Serial: 148

Escalas **Rockwell** regulares

Fuerza de ensayo preliminar 98.07N (10kgf)

Escala	Penetrador	Fuerza de ensayo	Aplicación
A	Diamante	588.4 N (60 kgf)	Acero endurecido, Carburo cementado, acero laminado fino, cobre
D	Diamante	980.7 N (100 kgf)	Acero endurecido, Carburo cementado, acero laminado fino, cobre
C	Diamante	1471 N (150 kgf)	Acero endurecido, Carburo cementado, acero laminado fino, cobre
F	Bola de acero diámetro 1/16"	588.4 N (60 kgf)	Acero recocido, metal para rodamientos, aleaciones de aluminio duro, bronce, cobre-berilico, bronce al fósforo
B	Bola de acero diámetro 1/16"	980.7 N (100 kgf)	Acero recocido, metal para rodamientos, aleaciones de aluminio duro, bronce, cobre-berilico, bronce al fósforo
G	Bola de acero diámetro 1/16"	1471 N (150 kgf)	Acero recocido, metal para rodamientos, aleaciones de aluminio duro, bronce, cobre-berilico, bronce al fósforo
H	Bola de acero diámetro 1/8"	588.4 N (60 kgf)	Metal para rodamientos, Piedra de afilar
E	Bola de acero diámetro 1/8"	980.7 N (100 kgf)	Metal para rodamientos, Piedra de afilar
K	Bola de acero diámetro 1/8"	1471 N (150 kgf)	Metal para rodamientos, Piedra de afilar
P	Bola de acero diámetro 1/4"	588.4 N (60 kgf)	Metal extra fino (aluminio, zinc, plomo)
M	Bola de acero diámetro 1/4"	980.7 N (100 kgf)	Metal extra fino (aluminio, zinc, plomo)
L	Bola de acero diámetro 1/4"	1471 N (150 kgf)	Metal extra fino (aluminio, zinc, plomo)
R	Bola de acero diámetro 1/2"	588.4 N (60 kgf)	Latón, plásticos, cartón
S	Bola de acero diámetro 1/2"	980.7 N (100 kgf)	Latón, plásticos, cartón
V	Bola de acero diámetro 1/2"	1471 N (150 kgf)	Latón, plásticos, cartón

Escalas **Rockwell** superficiales

Fuerza de ensayo preliminar 29.4N (3kgf)

Escala	Penetrador	Fuerza de ensayo	Aplicación
HR15N	Diamante 120°	147 N (15 kgf)	Acero nitrificado, acero laminado fino, tuberías, acero para corte, piezas pequeñas
HR30N	Diamante 120°	294 N (30 kgf)	Acero nitrificado, acero laminado fino, tuberías, acero para corte, piezas pequeñas
HR45N	Diamante 120°	441 N (45 kgf)	Acero nitrificado, acero laminado fino, tuberías, acero para corte, piezas pequeñas
HR15T	Bola de acero diámetro 1/16"	147 N (15 kgf)	Acero blando, bronce, latón, tuberías, aleaciones de aluminio
HR30T	Bola de acero diámetro 1/16"	294 N (30 kgf)	Acero blando, bronce, latón, tuberías, aleaciones de aluminio
HR45T	Bola de acero diámetro 1/16"	441 N (45 kgf)	Acero blando, bronce, latón, tuberías, aleaciones de aluminio
HR15W	Bola de acero diámetro 1/8"	147 N (15 kgf)	Acero blando, bronce al bismuto
HR30W	Bola de acero diámetro 1/8"	294 N (30 kgf)	Acero blando, bronce al bismuto
HR45W	Bola de acero diámetro 1/8"	441 N (45 kgf)	Acero blando, bronce al bismuto
HR15X	Bola de acero diámetro 1/4"	147 N (15 kgf)	Acero blando, plásticos etc..
HR30X	Bola de acero diámetro 1/4"	294 N (30 kgf)	Acero blando, plásticos etc..
HR45X	Bola de acero diámetro 1/4"	441 N (45 kgf)	Acero blando, plásticos etc..
HR15Y	Bola de acero diámetro 1/2"	147 N (15 kgf)	Acero blando, plásticos etc..
HR30Y	Bola de acero diámetro 1/2"	294 N (30 kgf)	Acero blando, plásticos etc..
HR45Y	Bola de acero diámetro 1/2"	441 N (45 kgf)	Acero blando, plásticos etc..

## **Equipos Instron Ensayo de tracción**



Los sistemas de ensayo de suelo 5980 están diseñados para tener precisión, ser duraderos y ofrecer la flexibilidad necesaria para los cambiantes requisitos. Están diseñados con características estándar y opcionales que aumentan la eficacia de los ensayos y mejoran la experiencia del operador. Los modelos de suelo 5980 son bastidores sólidos y con mucho uso que se utilizan en sectores para ensayos de metales y aleaciones de alta resistencia, materiales compuestos avanzados, estructuras aeroespaciales y de automoción, pernos, pasadores y placas de acero. Los bastidores están disponibles con capacidades de carga de 100, 150, 250, 400 y 600 kN; hay diversas variaciones para adaptarse a los requisitos de recorrido ampliado o un espacio de ensayo con anchura extra

## **Equipos Buehler (Ensayo Metalográfico)**

### **Secuencia completa para la preparación de una muestra metalográfica.**

La preparación de la probeta (muestra) consiste, en general, en obtener primero una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de papeles de esmeril de finura de grano creciente o realizando este desbaste con discos adecuados sobre los que se deposita un abrasivo, terminando con un pulido fino y final sobre discos provistos de paños. El final de la operación es la obtención de una superficie especular que es la requerida para, después, efectuar el ataque y observar adecuadamente la estructura.

**Selección de muestras:** La elección de la muestra que ha de ser examinada al microscopio es de gran importancia, ya que ha de lograrse una probeta representativa del material a examinar.

**Corte:** Siempre que sea posible, las probetas deben tener un tamaño conveniente y cómodo de manejar. Las probetas de superficie muy grande pueden requerir tiempos de pulido excesivamente largos, mientras las demasiado pequeñas tienden a redondearse durante el desbaste, obteniéndose superficies preparadas curvas con los bordes estropeados.

**Montaje de probetas metalográficas:** Cuando las muestras metalográficas son pequeñas o de una forma que no permite un manejo fácil en las operaciones de desbaste y pulido, como ocurre, por ejemplo con virutas, alambres, varillas y tubos pequeños, chapas, secciones delgadas, etc. Es necesario montarlas en un material adecuado para hacer posible la preparación.

**Montajes Fusibles:** Existen muchos materiales fusibles que son adecuados, con algunas limitaciones, para el montaje de probetas metalográficas, tales como el azufre, el lacre, los plásticos dentales y las aleaciones de bajo punto de fusión. Los puntos de fusión de estos materiales difieren mucho, y debe seleccionarse el necesario para que el calentamiento requerido no altere la estructura de la probeta.

**Montaje En Plásticos Sintéticos:** El montaje de las probetas pequeñas en materiales plásticos sintéticos, como la baquelita, lucita, etc., es uno de los métodos más satisfactorios que se emplean hoy para facilitar el manejo de tales probetas. La manipulación es sencilla; pero como es preciso aplicar calor y presión simultáneamente, se requiere una prensa montadora especial.



Plástico sintético para el montaje de muestras

**Resinas termoendurecibles:** Los plásticos termoendurecibles como la baquelita y los compuestos de anilina y formaldehídos, son los más populares entre

los empleados para montar probetas metalográficas. Los polvos de moldeo de baquelita se encuentran en el comercio en gran variedad de colores, y esta circunstancia es de interés, por que simplifica la identificación y archivo de las probetas.

Los plásticos termoendurecibles, a diferencia de las resinas termoplásticas, endurecen durante el moldeo a la temperatura y presión adecuada por que sufren un cambio químico. El estado más duro adquirido ya no se altera por la temperatura, aun que esta se aproxime a la que pueda causar la carbonización de la resina. Para la mayoría de los polvos de moldeo de bakelita, la temperatura máxima requerida para el endurecimiento es de 135 a 150 °C, juntamente con una presión de 2500 a 3500 libras por pulgada cuadrada.

### **Pulido mecánico**

Consiste en una serie de procedimientos que permiten obtener una probeta metálica plenamente preparada para su estudio metalográfico.

**Desbaste Tosco:** La superficie que haya de observarse se debe de hacer primero plana mediante un desbaste grosero. Cuando el área es grande, se puede terminar en un tiempo muy corto si se le gira ligeramente mientras se desbasta. Ni durante el desbaste grosero, ni durante los posteriores, intermedio y final, se debe aplicar la probeta contra el medio abrasivo con presión demasiado grande. La presión excesiva no sólo produce rayas muy profundas, difíciles de eliminar después, sino que también distorsiona intensamente el metal de la superficie de la probeta. La distorsión del metal superficial no se puede evitar enteramente, pero se puede aminorar mucho mediante técnicas adecuadas de desbaste y pulido; la presión de contacto en las operaciones citadas debe mantenerse baja, y en todo caso, el metal distorsionado se elimina mediante varios ciclos de pulido y ataque. Biselando los bordes de la probeta durante el desgaste grosero se evitan roturas y desgarrones de papeles y paños en las operaciones posteriores. Cuando la superficie es completamente plana y se han eliminado sus irregularidades, se da por terminado el desbaste grosero.

Posteriormente el papel de esmeril se coloca sobre una placa o sobre cualquier superficie bien plana y limpia. La probeta se mueve longitudinalmente de un lado a otro del papel comprimiéndola con una presión suave; la dirección del movimiento se mantiene constante, para que todas las rayas producidas sean paralelas. El final de la operación sobre un papel está determinado por la desaparición de las rayas producidas por el desbaste grosero o el papel anterior, y para poder reconocerlo fácilmente se opera en forma que las nuevas rayas sean perpendiculares a las anteriores; así es más fácil ver cuándo estas nuevas rayas sustituyen totalmente a las anteriores más gruesas.

Para desbastar muchas probetas de aleaciones tratadas térmicamente, y en particular muchos de los metales blandos, es conveniente impregnar los papeles de esmeril con un lubricante adecuado. Para este fin se han puesto muchos líquidos, tales como aceites, gasolina, soluciones de parafina en queroseno, jabones líquidos, glicerina, y mezclas de glicerina y agua.

Estos lubricantes disminuyen la fluencia superficial de los metales blandos y evitan la modificación estructural superficial de las tratadas térmicamente, al actuar como refrigerantes, mejorándose los resultados que se obtendrían desbastando en seco.

**Desbaste Fino:** El desbaste final o fino se realiza de la misma forma que el desbaste intermedio, pasando del papel de esmeril empleado al número 00; en general se utilizan dos papeles, que son el número 00 y el 000. Cada vez que se cambia de papel se opera en la forma descrita anteriormente, a fin de obtener rayas nuevas perpendiculares a las anteriores. Cuando la observación visual demuestra que sólo existen las rayas producidas por el último papel empleado y se han eliminado totalmente las anteriores, la probeta está en condiciones de ser pulida.

**Pulido Tosco:** El objetivo es hacer desaparecer las rayas finas producidas en la última operación de desbaste. El disco de la pulidora empleado en esta operación se cubre, generalmente, con paño de lana, paño de billar o una lona de poco peso, y se le hace girar a unas 400 a 500 rpm. Como abrasivo se emplea pasta de diamante más aceite, o productos equivalentes.

Para realizar un pulido preliminar se mantiene la probeta desbastada, firmemente, sobre el disco que gira, y durante la operación se mueve continuamente desde el centro al borde del disco, y a la inversa. Si es necesario, se añade de cuando en cuando suspensión del abrasivo, que contengan unos 15g por cada 100cc de agua o aceite. Si la cantidad de abrasivo que hay sobre el disco es suficiente, pero se seca el paño, se añade agua clara en la cantidad necesaria.

Para que la operación vaya bien es necesario observar con cuidado la humedad del paño. Si se humedece demasiado, la acción pulidora del combinado paño-abrasivo se retarda mucho, y si se seca en exceso, la probeta se mancha.

El pulido preliminar dura de unos 2 a 5 minutos, y al terminarse, se lava bien la probeta con agua corriente, se la enjuaga con un poco para quitar todos los detritos y el abrasivo adherido, y se le humedece con alcohol etílico o alcohol isopropílico, secándola después en aire caliente.

Las probetas bien preparadas, después del desbaste y el pulido preliminar, muestran solamente las rayas características de la pasta de diamante.

**Pasta De Diamante:** El abrasivo que más se aproxima al ideal es el polvo de diamante no adulterado y bien clasificado. Se ha empleado mucho en el pasado para preparar probetas de aleaciones muy duras, tales como carburos sinterizados de wolframio o boro y recientemente se ha extendido su uso, con gran éxito, para el pulido de las aleaciones y metales más comunes.

**Pulido Fino:** Esta operación tiene por finalidad eliminar las rayas producidas en el pulido preliminar y dar lugar, por último, a una superficie pulida uniformemente y libre de rayas. Según el metal o aleación que se pule, se emplea uno de los abrasivos citados anteriormente – alúmina levigada, óxido de magnesio, óxido crómico. Para la mayoría de las probetas metalográficas, la alúmina levigada da un resultado magnífico y se reconoce por todos como el abrasivo de empleo más universal en el pulido final.

Durante el pulido se aplica a la probeta una presión moderada y se la mueve continuamente del centro a la periferia del disco. Eventualmente, y en particular al final de la operación, se gira la probeta en sentido contrario al de la rotación del

disco. Esta operación modifica continuamente la dirección del pulido y evita la formación de colas de cometa. Tales formaciones son inevitables cuando se pule en una sola dirección, por que se arrancan más o menos las inclusiones, se abrasiona el metal adyacente y aparecen picaduras y huecos dejados por dichas inclusiones. Para evitar la distorsión del metal, se debe suspender el pulido fino en cuanto las rayas ya no son observables a 100 aumentos, no apareciendo tampoco colas de cometa. Si persisten las rayas finas, se puede continuar el pulido final; es, sin embargo, más probable que se obtengan resultados mejores repitiendo el pulido preliminar antes de terminar el pulido final. La probeta pulida puede atacarse inmediatamente después o se puede guardar para usarla más tarde y examinarla sin ataque. En cualquier caso, la superficie de la probeta debe protegerse de la oxidación y otros efectos perjudiciales atmosféricos.

**Alúmina:** La alúmina (óxido de aluminio) es, probablemente, el abrasivo más satisfactorio y universal desde el punto de vista metalográfico. El comercio lo proporciona en forma de pastas o suspensiones acuosas. La alúmina existe en tres formas cristalográficas distintas: alfa, beta y gamma. De ellas, la alfa y la gamma son las más empleadas como abrasivos. Algunos tipos de polvo seco de alúmina, aunque se adquieren como levigados, es preciso volver a levigarlos para obtener la debida finura y uniformidad de las partículas. La levigación consiste, sencillamente, en suspender una cantidad pequeña de alúmina en agua limpia, empleando un vaso alto adecuado.

### **Ataque Químico**

Ahora se estudia el ataque necesario para hacer visibles las características estructurales, discutiendo los principios en que se basa y las técnicas por las que se lleva a cabo. Una probeta no atacada revela pocos o ningún detalle estructural, a pesar de lo cual es de gran interés porque permite observar detalles que ya son visibles tales como los defectos superficiales y las inclusiones no metálicas.

El objeto de mayoría de las investigaciones metalográficas es determinar las características estructurales verdaderas de la probeta, es necesario que los diferentes constituyentes estructurales queden delineados con precisión y claridad. Esto se logra

sometiendo a la probeta a la acción química de un reactivo apropiado en unas condiciones cuidadosamente controladas.

En las aleaciones compuestas de varias fases los constituyentes se hacen visibles por el ataque diferencial o el manchado de uno o varios de dichos constituyentes, como consecuencia, principalmente de las diferencias de composición química, que traen consigo diferencias en las velocidades de disolución.

<b>Reactivos de ataque para examen microscópico</b>		
<b>Reactivo de ataque</b>	<b>Composición</b>	<b>Usos</b>
Acido Nítrico (Nital)	Acido Nítrico 5 cc Alcohol etílico 95 cc	Aceros y hierros
Acido Pírico (Picral)	Acido pírico 4gm Alcohol etílico 100 ml	Aceros de baja aleación
Cloruro férrico y ácido hidroclicóric	Cloruro férrico 5gm ácido hidroclicóric 50 ml agua 100 ml	Aceros asuteníticos al níquel y aceros inoxidable
Persulfato de amonio	Persulfato de amonio 10 gm Agua 90 ml	Cobre, latón, bronce aluminico, níquel, plata
Acido hidroflicóric	Acido hidroflicóric 0.5 ml Agua 99.5 ml	Aluminio y sus aleaciones

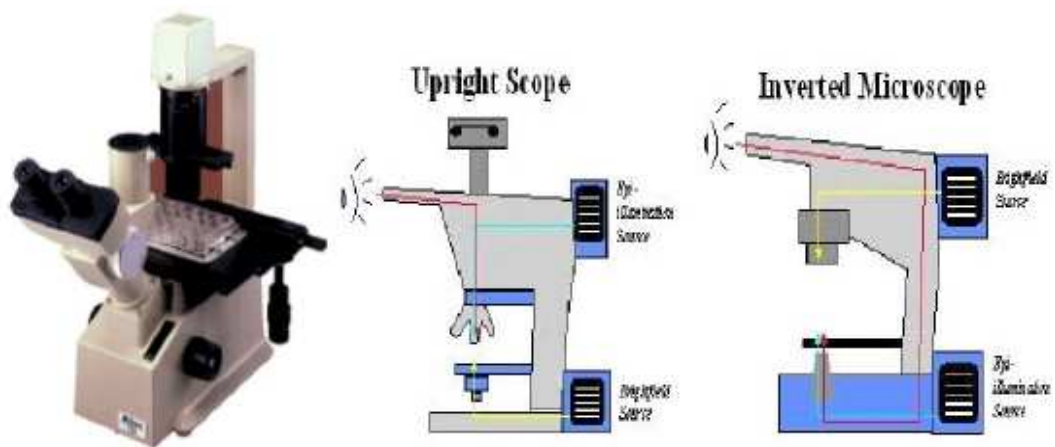
TABLA DE LOS REACTIVOS MÁS UTILIZADOS PARA DISTINTOS METALES

### **Análisis microscópico**

Una vez obtenida una muestra del metal a observarse como un brillo similar al de un espejo se procede a la colocación sobre un microscopio que permitirá realizar el acercamiento ideal para el estudio de las distintas estructuras granulares que poseen los distintos metales. Este estudio permitirá conocer si los elementos con los que cuenta un metal puro o una aleación son los de acuerdo a las necesidades se requiera para efectuar cualquier tipo de trabajo.

## Microscopio Invertido

Como su nombre lo dice un microscopio invertido está al revés comparado con un microscopio convencional. La fuente de luz y el condensador están sobre la plataforma apuntando hacia abajo. Los objetivos y la torrecilla están debajo de la plataforma apuntando hacia arriba. Las únicas cosas que están en disposición corriente son el tubo binocular o trinocular, así mismo la muestra es colocada sobre la plataforma o platina mecánica.



Microscopio invertido

## Microscopia Electrónica de Barrido

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope), es aquel que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. También produce imágenes de alta resolución, que significa que características espacialmente cercanas en la muestra pueden ser examinadas a una alta magnificación. La preparación de las muestras es relativamente fácil pues la mayoría de SEMs sólo requieren que estas sean conductoras.

En el microscopio electrónico de barrido la muestra generalmente es recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el oro para darle propiedades conductoras a la muestra. Posteriormente es barrida con los electrones acelerados que viajan a través del cañón. Un detector mide la cantidad de

electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones, proyectados en una imagen de TV o una imagen digital. Su resolución está entre 4 y 20 nm, dependiendo del microscopio. Inventado en 1931 por Ernst Ruska, permite una aproximación profunda al mundo atómico. Permite obtener imágenes de gran resolución en materiales pétreos, metálicos y orgánicos. La luz se sustituye por un haz de electrones, las lentes por electroimanes y las muestras se hacen conductoras metalizando su superficie.

En el microscopio electrónico de barrido es necesario acelerar los electrones en un campo eléctrico, para aprovechar de esta manera su comportamiento ondulatorio, lo cual se lleva a cabo en la columna del microscopio, donde se aceleran por una diferencia de potencial de 1,000 a 30,000 voltios. Los electrones acelerados por un voltaje pequeño son utilizados para muestras muy sensibles, como podrían ser las muestras biológicas sin preparación adicional, o muestras muy aislantes. Los altos voltajes se utilizan para muestras metálicas, ya que éstas en general no sufren daños como las biológicas, y de esta manera se aprovecha la menor longitud de onda para tener una mejor resolución. Los electrones acelerados salen del cañón, y son enfocados por las lentes condensadora y objetiva, cuya función es reducir la imagen del filamento, de manera que incida en la muestra un haz de electrones lo más pequeño posible (para así tener una mejor resolución). Con las bobinas deflectoras se barre este fino haz de electrones sobre la muestra, punto por punto y línea por línea.

Cuando el haz incide sobre la muestra, se producen muchas interacciones entre los electrones del mismo haz, y los átomos de la muestra; puede haber por ejemplo, electrones rebotados como las bolas de billar. Por otra parte, la energía que pierden los electrones al "Chocar" contra la muestra puede hacer que otros electrones salgan despedidos (electrones secundarios), y producir rayos X, electrones Auger, etc. El más común de éstos es el que detecta electrones secundarios, y es con el que se hacen la mayoría de las imágenes de microscopios de barrido.

## **PROCEDIMIENTOS REALIZADOS**

El primer paso de este trabajo de investigación se basó en una charla dada a las estudiantes de pregrado de física, esto por parte del personal que labora en el laboratorio de corrosión y metalurgia de PDVSA-Occidente. Con la finalidad de corroborar el conocimiento de las estudiantes con respecto a la resistencia de los materiales, a la metalografía, a la corrosión, entre otros procesos propios de la física que allí se trabajan. El personal del laboratorio preparó la charla básica de diversos estudios que allí se realizan brindando la oportunidad de tomar como referencia, una de las muestras de tubería de un oleoducto de 26" para el análisis.

Es importante resaltar que por no pertenecer al equipo de trabajo de PDVSA, fue permitido solo la observación de dichos procedimientos y ensayos; estos fueron ejecutados por los tutores asignados a la visita de las bachilleres. Por lo tanto, solo se observó la ejecución de los ensayos en la muestra y a partir de los datos obtenidos se redactó un informe técnico tutorado por el Ing. Ali Giménez, donde se muestran las posibles conclusiones a las que llegaron las bachilleres acerca de lo observado en las fallas que provocó la ruptura del oleoducto.

Entre los ensayos se encuentran:

- Preparación de muestra para diversos ensayos
- Inspección visual macroscópica
- Análisis químico por espectrometría de chispa (equipo spectrotest)
- Análisis químico por balance de masas (equipo leco)
- Análisis químico por emisión de rayos x (equipo innov-x-system alfa 2000)
- Ensayo de dureza Rockwell B y C (equipo Wilson)
- Ensayo de tracción (equipo instron)
- Ensayo metalográfico (equipos Buehler)

Para el estudio de cualquier muestra que se trabaja en el laboratorio de corrosión y metalurgia de PDVSA Occidente, el primer paso es la observación e inspección visual macroscópica. Al momento de presentar la muestra se observó una grieta en el tubo de manera longitudinal generada de adentro hacia afuera, esta grieta es llamada

comúnmente —boca de sapo||, además de ello, se pudo visualizar que la tubería no presentaba ningún recubrimiento, dando lugar a la formación de unas manchas sobre la superficie del tubo, las que comúnmente se conocen como óxido, también se observó que el grosor de la tubería en la grieta era de menor espesor que en la parte media de la tubería.

Luego de observar minuciosamente la tubería, se preparan las muestras para los diversos ensayos de los análisis metalográficos. El análisis químico por espectrometría de chispa es uno de ellos, aquí se toma un pequeño diferencial de la tubería y se coloca en la boquilla, donde es bombardeado por un chorro de electrones que dejan una marca en la superficie siendo analizada por la computadora que está conectada a la pistola que produce el chorro de electrones; al esperar unos segundos, se presentaba en la pantalla el espectro con la composición química del material, dando el porcentaje de las aleaciones que posee.

Otras de las pruebas que se realizaron fue el ensayo de dureza de Rockwell B y C, trabajando con un durómetro fijo de Wilson, este aparato tiene una base donde se coloca la muestra y luego se le aplica una fuerza con la ayuda de un gato hidráulico integrado en la máquina, permitiendo observar una pequeña marca en la muestra, y una medición en la máquina que es verificada en una tabla.

En la sala metalográfica, se prepara una de las muestras montándose en baquelita para una mejor manipulación de la misma, luego se procede a devastar manualmente con lijas de diferentes grosores, comenzando con la más gruesa y terminando con la más fina en la cual se debe observar la superficie lisa. Posteriormente, se pasa por los discos de pulido donde se le coloca óxido de aluminio, esto es para eliminar las rayas que dejan las lijas. Estos discos de pulido logran que la muestra se vea como un espejo. Teniendo ya la muestra suavizada (devastada y pulida), se le hace un ataque, que no es más que añadirle un químico por tres segundos (que para el caso de los aceros es ácido nítrico disuelto en alcohol al 90% ), esto es con la finalidad de que la muestra se corra y así se pueda visualizar en el microscopio de dureza.

Finalmente se pasa a la sala óptica, donde se observa la microestructura del material, que es la cédula de identidad del mismo, mediante el microscopio de dureza

y el microscopio invertido. Al obtener todas estas observaciones y apegándose a las normas API y ASTM, se procede a redactar el informe técnico con las respectivas conclusiones.



**Para:** Supervisor del Laboratorio de Metalurgia y Corrosión: Ing. Eduardo González,  
Tutor de Investigación: Ing. Alí Giménez.

**De:** Estudiantes de la sección 9FI01 de Proyecto Avanzado de Física:  
Br. Yenny Aranguren y Br. Mariannelly Rojas.

**Fecha:** 06/01/2012

**Asunto:** ANÁLISIS CAUSA RAZ DE FALLA EN OLEODUCTO DE 26" ULE-AMUAY

Anexo a esta comunicación, encontrará para su consideración y fines consiguientes los resultados obtenidos del análisis de falla del Oleoducto de 26" Ulé-Amuay. Dicho sistema de tubería presentó filtración en fecha 23/07/11, lo cual trajo como consecuencia la paralización de las operaciones de transporte de crudo hacia el Complejo Refinador Paraguaná (CRP)

El análisis de falla se enfocó desde el punto de vista metalúrgico y se fundamentó en la ejecución de las siguientes acciones:

- Inspección visual
- Evaluación de la composición química del material de la tubería
- Evaluación de propiedades mecánicas del material de la tubería
- Evaluación de la microestructura del material de la tubería
- Evaluación de esfuerzos y espesor mínimo.
- Evaluación del Sistema de Protección Catódica.

Con base en los resultados obtenidos se tienen las siguientes conclusiones:

1. Causa Inmediata: La falla del Oleoducto de 26" se originó debido a que la tubería no soportó las condiciones operacionales del sistema, producto de la pérdida de espesor inducida por un proceso de corrosión externa generalizada de carácter puntual.

2. Causa Raíz: Aplicación inadecuada del plan de mantenimiento preventivo/correctivo continuo que permita detectar y corregir anomalías para la operación normal y segura de la red de distribución de crudo.

3. Causas Contribuyentes: Deficiencias en la operatividad del sistema de protección catódica, deterioro del sistema de revestimiento y suelo altamente corrosivo.

4. El material presenta condiciones normales para el servicio al cual está sometido, cumpliendo los requisitos establecidos por la Norma API 5L para el grado estudiado (Grado X-52).

5. Desde el punto de vista metalúrgico el material presenta condiciones aptas para el servicio al cual está sometido, cumpliendo los requisitos establecidos por la Norma de diseño API 5L para el grado estudiado (Grado X-52).



# INFORME TÉCNICO

ANÁLISIS CAUSA RAIZ DE FALLA EN OLEODUCTO DE 26|| ULE-AMUAY

**Equipo de trabajo:**

Yenny Aranguren

Mariannelly Rojas

**Revisado por:**

Ing. Alí Giménez

Maracaibo, Diciembre de 2011



### **RESUMEN:**

La morfología de la falla (boca de sapo) permite establecer que el espesor remanente no resistió la presión interna de la tubería; esto se comprueba a través del mecanismo de fractura, con inicio frágil en el mínimo espesor, evidenciado además por el ángulo de fractura y prolongación dúctil hacia los dos extremos. La tubería presentó considerable pérdida de espesor debido a un proceso corrosivo externo asociado a fallas en el sistema de revestimiento, adicionalmente el sistema de protección catódica ha trabajado de manera deficiente en los últimos años.

**Palabras claves:** Falla, corrosión generalizada, protección catódica, revestimiento

## INTRODUCCIÓN

En fecha 23/07/2011 se presentó una fuga en Oleoducto de Ø 26|| Ule-Amuay lo cual trajo como consecuencia la paralización de las operaciones de transporte de crudo hacia el Complejo Refinador Paraguaná (CRP). A solicitud del Supervisor de Laboratorio de Metalurgia y Corrosión, se procedió a realizar el estudio de causa raíz de la falla correspondiente tomando en consideración fallas previas ocurridas en estos sistemas.

Este informe está enfocado a estudiar la causa raíz de falla y los factores que causaron la corrosión del Oleoducto Ulé-Amuay. En este caso se utilizaron herramientas avanzadas de laboratorio como la Microscopía Electrónica de Barrido, ensayos químicos de los sólidos depositados en la pared exterior de la tubería, y análisis para determinar las condiciones químicas y mecánicas del material de la tubería del Oleoducto.

## DATOS DE REFERENCIA

Los datos de referencia, se muestran en la Tabla siguiente:

**Tabla N° 2.** Datos de la línea

DATOS GENERALES DE LA TUBERÍA	
Identificación del tramo de tubería:	Oleoducto Ulé – Amuay
Año de Construcción:	1952
Longitud Total del Tendido:	230 Km.
Volumen del Fluido Transportado:	250 MBPD
Capacidad máxima de la línea:	470 MBPD
Fecha de la última inspección instrumentada:	2002
Diámetro nominal (pulgadas):	26
Material según registros:	API 5L X-52
Revestimiento:	Alquitrán de hulla
Sistema de Protección Catódica:	Corriente Impresa
Fluido de trabajo:	Crudo
Presión máxima de Operación:	950 psi

## NORMAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADAS

- API 5L —Specification for line pipe||, Forty second edition (2006).
- NACE INTERNATIONAL, THE CORROSION SOCIETY. Basic Corrosion Course. January 2001

## ACTIVIDADES REALIZADAS

### 1.1.Inspección Visual y Dimensional

- La falla observada en la tubería es del tipo boca de sapo, con labios de corte hacia afuera, cuyas dimensiones son 1100 mm en sentido longitudinal, una abertura máxima de 190 mm y un espesor remanente mínimo medido de 1 mm a lo largo de 20 mm en el centro de la fractura. Ver Foto N° 1.
- En el interior de la tubería, no se observaron indicios de pérdida de espesor por procesos de corrosión – erosión. Ver Foto N° 2.



Foto N° 1: Fractura tipo boca de sapo.



Foto N° 2: Vista interior de la tubería.

### 1.2.Evaluación química del material de la tubería.

Los resultados del análisis Químico indican que el material se asemeja a una tubería de acero al carbono del tipo API 5L Gr. X 52 con la composición descrita a continuación.

**Tabla N° 4.** Composición Química del material de la tubería.

Composición (%)			Identificación
Fe	Mn	C	
99,1	0,48	0,24	API 5L Gr. X 52

### 1.3.Ensayo de dureza del material.

Los parámetros de dureza se muestran en la Tabla N° 5, observándose que esta estaba dentro de lo especificado por la norma de fabricación.

**Tabla N° 5.** Ensayo de Dureza del material de la tubería.

Durezas (HRB)				Resistencia equivalente	Según API 5L
1	2	3	Promedio		
80	82	82	81	75 Ksi	66 ksi

### 1.4.Evaluación de la Microestructura del Material de la Tubería

Por medio de una metalografía realizada en el Laboratorio, en dos zonas, una cercana y la otra alejada de la fractura se determinó que la microestructura (perlita y ferrita homogéneas) del material de la tubería se encuentra en buenas condiciones generales, sin defectos microestructurales ni partículas de segunda fase.

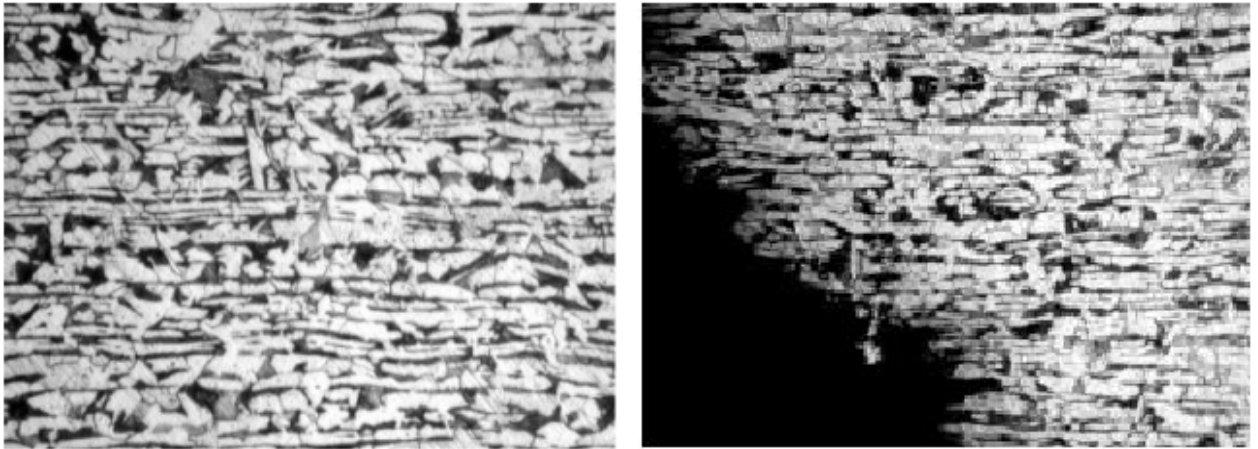


Foto: Izquierda: Microestructura cercana a la Falla / Derecha: Microestructura alejada de la falla.

### **1.5. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).**

Se realizó un ensayo MEB al lugar de la fractura de la tubería, del cual se tienen los siguientes comentarios:

- Se observó una capa de óxido de hierro con desprendimiento localizado y sólidos adheridos.

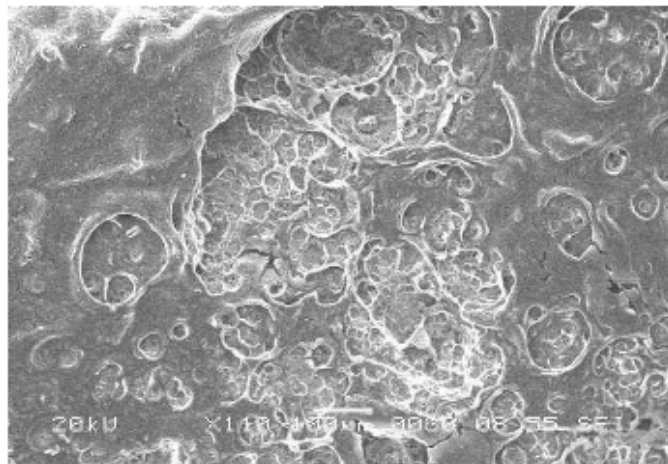


Foto: Capa de óxidos con desprendimientos puntuales

- Se observó el desprendimiento de partículas de segunda fase que contribuyeron a la aceleración del proceso corrosivo externo.
- Se detectó que los óxidos depositados corresponden a óxidos de hierro

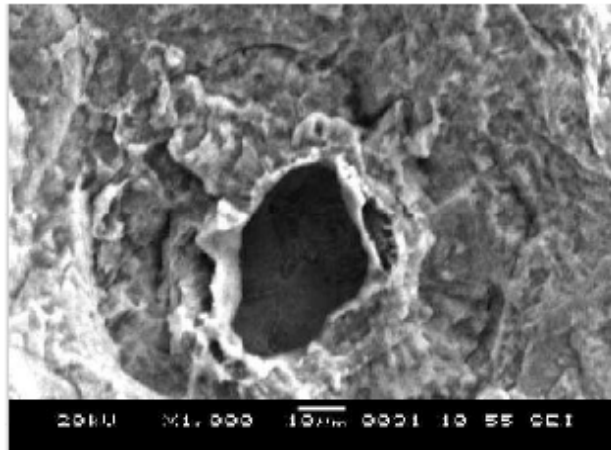


Foto: Agujero generado por desprendimiento de partícula de segunda fase en el material

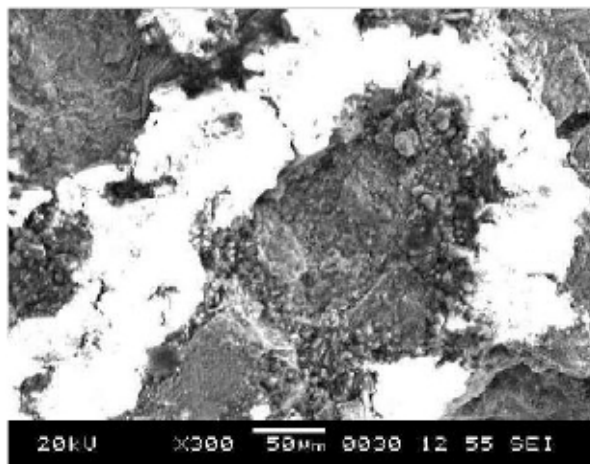


Foto: Capa de óxidos con desprendimientos puntuales

### **1.6. Caracterización Físico Química del Sólido en la Zona de Falla**

Como se puede observar en la Tabla N° 6, el sólido adherido en el exterior de la tubería presenta 32,40% de hidrocarburos totales (29,03% de Alifáticos y 3,37% de

Asfáltenos) y 67,60 % de sólidos inorgánicos y con base a la prueba de solubilidad realizada con HCl al 15% la materia inorgánica libre de hidrocarburos presenta insolubilidad en un 55,83 %.

**Tabla N° 6.** Resultados de los análisis físico químico del sólido encontrados en la zona de Falla.

<b>ANÁLISIS</b>	<b>RESULTADOS</b>
Hidrocarburos Alifáticos (% P/P)	29,03
Hidrocarburos Asfáltenos (% P/P)	3,37
Muestra Insoluble en HCL al 15% (% P/P)	55,83
Óxidos, como Óxidos de Hierro( % P/P)	10,91
Carbonatos, como Carbonato de Calcio (% P/P)	0,45
Carbonatos, como Carbonato de Magnesio (% P/P)	0,37
Ión Cloruro Presente (% P/P)	0,00

### **1.7.Evaluación Sistema de Protección Catódica**

El transformador /rectificador (71004) de Protección Catódica se encuentra operando con una señal de salida de 18 Voltios y 46 Amperios, el Oleoducto de 26|| presentó para el momento de la evaluación en sitio, un valor de potencial de referencia de -0,844 mV medido con respecto al electrodo de Cobre Sulfato de Cobre (Cu/CuSO4) en el lugar donde ocurrió la falla.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Haciendo una revisión detallada tanto de la información obtenida durante la evaluación visual, los ensayos de Laboratorios y de la evaluación de los agentes asociados al entorno, se tiene lo siguiente:

- La morfología de la falla (boca de sapo) permite establecer que el espesor remanente no resistió la presión interna de la tubería; esto se comprueba a través del mecanismo de fractura, con inicio frágil en el mínimo espesor, evidenciado además por el ángulo de fractura y prolongación dúctil hacia los dos extremos.
- La tubería presentó considerable pérdida de espesor debido a un proceso corrosivo externo asociado a fallas en el sistema de revestimiento (Alquitrán de Hulla), el cual se fue deteriorando con el transcurso del tiempo (40 años de Exposición) perdiendo sus propiedades (adherencia y dureza) y por ende exponiendo el sustrato al medio, el cual es un suelo arenoso húmedo con una resistividad promedio de 368 Ohm-Cm considerado este como un ambiente altamente corrosivo, adicionalmente el sistema de protección catódica ha trabajado de manera deficiente en los últimos años, la combinación de estos factores generó un ambiente propicio para el desarrollo del proceso corrosivo observado.
- Por medio de la técnica EDS del Microscopía Electrónica de Barrido (Ver anexo 4) se detectó que los sólidos adheridos a la superficie de la tubería en el lado exterior corresponden principalmente a Óxidos de hierro (Fe: 49,08% y O: 36,16%) formados durante el proceso de corrosión; parte de estos óxidos se desprendían dejando dicha superficie expuesta para la formación de nuevos óxidos.
- No se encontraron defectos microestructurales ni indicios de degradación en el material de la tubería que pudieran haber incidido en la falla, los ensayos de dureza y de análisis químico indican que el material cumplía con lo especificado en su Norma de fabricación (API 5L Grado B).

## CONCLUSIONES

En base en los resultados obtenidos se tienen las siguientes conclusiones:

- **Causa Inmediata:** La falla del Oleoducto de 26|| se originó debido a que la tubería no soportó las condiciones operacionales del sistema, producto de la pérdida de espesor inducida por un proceso de corrosión externa generalizada de carácter puntual.
- **Causa Raíz:** Aplicación inadecuada del plan de mantenimiento preventivo/correctivo continuo que permita detectar y corregir anomalías para la operación normal y segura de la red de distribución de crudo.
- **Causas Contribuyentes:** Deficiencia en la operatividad del sistema de protección catódica, deterioro del sistema de revestimiento y presencia de un electrolito altamente corrosivo.
- El material presenta condiciones normales para el servicio al cual está sometido, cumpliendo los requisitos establecidos por la Norma API 5L para el grado estudiado (Grado X-52).



## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.**

Después de esta maravillosa experiencia que se vivió en la visita al laboratorio de corrosión y metalurgia de PDVSA Occidente, se concluye que:

- Los procesos tecnológicos e industriales están ligados al desarrollo de la ciencia, en este caso de la física, donde la educación juega un papel muy importante para el desarrollo óptimo de un país, ya que se necesita fomentar la investigación en todo ámbito. Si los docentes se preparan en el campo de la investigación se abren muchas puertas no solo para su desarrollo profesional, sino también para brindarle herramientas, ejemplos, oportunidades de cambio a sus estudiantes.
- En el desarrollo de esta investigación se evidenció que en el laboratorio visitado hay existencia de equipos importantes dañados y arrumados, convirtiéndose en una debilidad para esta industria ya que al dañarse un equipo simplemente se pide otro, y no hay un incentivo de inventiva que se le brinde a los trabajadores para lograr la recuperación de los equipos, los cuales son muy costosos. Es allí cuando las universidades deberían preparar a los futuros profesionales en el área de investigación- acción, para que de esta manera se le dé solución a las diferentes problemáticas que se encuentran en las empresas.
- Por otra parte, se observó que la física está presente en todas partes y quien más le saca provecho es la industria, esto se evidencia en el uso de las telecomunicaciones, las ingenierías metalúrgica, mecánica, eléctrica, electrónica, entre otras, es por ello que está en las manos de los docentes de las ciencias naturales, en especial a los de física, mostrar que la física no solo está en los libros, que se pone en práctica los conocimientos que se adquieren en esta materia tanto en el nivel básico como el universitario.
- La empresa debe trabajar de la mano con la educación, no solo en el momento de las pasantías, sino desde que comienza el desarrollo académico del estudiantado, esta colaboración debe brindarse tanto de manera

económica como institucional, permitiendo visitas guiadas donde los interesados puedan manipular y poner en práctica los conocimientos en la medida de lo posible. Si esto se cumpliera, mas individuos quisieran prepararse verdaderamente para mejorar la calidad de vida, calidad profesional y esto lleva al desarrollo del país, en cuanto a tecnología y conocimiento se refiere.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Brent L. Adams. (2004). ASM, Metals Handbook Volume 09 - Metallography And Microstructures.

Erickson. William H. (1992). ASM Metals HandBook Volume 03 - Alloy Phase Diagrams.

KEHL, GEORGE. (1994). Fundamentos de la práctica metalográfica, Traducido del Inglés por Peter Jackson, Quinta Edición. México DF.

MARKS. (1995) Manual del Ingeniero Mecánico. Tomo I y II. Traducido del inglés por Francisco G. Noriega. Tercera Edición en español. Naucalpan de Juárez, Estado de México. McGRAW-HILL,

MOTT, Robert L.(1992), Diseño de elementos de máquinas. Traducido del inglés por Arturo Córdova Just. Segunda edición, México DF, México. PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA, S.A.

NORTON, R. L. (1999) Diseño de Máquinas. Traducido del inglés por Ing. Gabriel Sánchez García. Primera Edición. México. PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA, S.A.

SHIGLEY, J. E. y MISCHKE, C. R.(2002) Diseño en Ingeniería Mecánica. Traducido del inglés por Javier León Cárdenas. 6ta. Ed. México. McGRAW-HILL.

SMITH, WILLIAM F. (1997)Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Traducido del inglés por Jesús Martín Gil. Segunda Edición. España. McGRAW-HILL.

## **SITIOS DE INTERNET**

[www.buehler.com](http://www.buehler.com) , USA, 2012.

[www.uncu.edu.ar/TPMetalografia.pdf](http://www.uncu.edu.ar/TPMetalografia.pdf), Argentina, 2012.

# **Anexos**

## LABORATORIO DE CORROSIÓN Y METALURGIA PDVSA-OCCIDENTE

### SALA ÓPTICA



Banco de Fotos



Lupa Estereoscópica



Microscopio de Dureza

### SALA METALOGRAFICA



Máquina Montadora de Baquelita



Máquina Devastadora Manual



Pulidora de Disco



Vista de la Pulidora de Disco

## IDENTIFICACIÓN DE ALEACIONES



Vista de la Sala de Identificación



Hornos de Inducción

## ENSAYOS MECÁNICOS



Ensayo de dureza Rockwell B y C  
(equipo Wilson)



Ensayo de tracción (equipo instron)

## TALLER



Cortadora eléctrica



Cortadora manual



Cortadora punta de diamante



Muestras

### **MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEB)**





**De Izquierda a derecha:** Br. Mariannelly Rojas, T.S.U. Hugo García (Jefe de Lab. De Corrosión y Metalurgia), Br. Yenny Aranguren, Ing. Eduardo González (Supervisor del Lab. De Metalurgia) Ing. Alí Giménez (Tutor de la visita)

## **FOTOGRAFÍAS DE LA RUPTURA DEL OLEODUCTO DE 26”**

