



MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECHANICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECANICO

TITULO: Fabricación de un reómetro de tubo capilar para la investigación de propiedades de transporte de fluidos industriales.

Autor: Angel Ricardo Torres Mayan

Tutor: Ms.C. Héctor Luis Laurencio Alfonso
Ms.C Tomas H Fernández Columbie
Ing. Rodney Martinez Rojas

MOA – 2008
“Año 50 de la Revolución”



RESUMEN

La fabricación de equipos de laboratorio, es una vía esencial de solución a los problemas actuales, que en ocasiones dificultan la realización de investigaciones.

En el presente trabajo se exponen las teorías relacionadas al transporte de fluidos y a las propiedades reológicas de estos; se ha realizado un análisis de las principales investigaciones y trabajos que pueden contribuir al desarrollo de las técnicas empleadas, tanto de fabricación como de la toma de datos en la experimentación con el reómetro fabricado, con el fin de contribuir a la solución del problema planteado. Queda detallada la tecnología que se ha empleado en la fabricación, lo que cuantifica en gran parte el costo de fabricación del reómetro. Se proponen modelos y procedimiento de cálculo apropiado para la toma de datos en la investigación de las propiedades de flujo de fluidos.

Para una mejor comprensión del funcionamiento del equipo se ha ejemplificado con una experimentación realizada con agua, donde se destaca la principal causa de introducción de errores, lo que se le atribuye al control del tiempo. Se analiza las incidencias más significativas, como peligros a la salud humana, causados por los procesos de soldadura.



ABSTRACT

The production of laboratory teams, is an essential road of solution to the current problems that hinder the realization of investigations in occasions.

Presently work the theories related to the transport of fluids are exposed and to the properties reological of these; he/she has been carried out an analysis of the main investigations and works that can contribute to the development of the techniques employees, so much of production as of the taking of data in the experimentation with the manufactured reometer, with the purpose of contributing to the solution of the outlined problem. It is detailed the technology that has been used in the production, what largely quantifies the cost of production of the reometer. They intend models and procedure of appropriate calculation for the taking of data in the investigation of the properties of flow of fluids.

For a better compression of the operation of the team it has been exemplified with an experimentation carried out with water, where of it highlights the main cause of introduction of errors, what is attributed to the control of the time. It is analyzed the most significant incidences, as dangers to the human health, caused by the welding processes.

INDICE	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I. MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO	5
1.2. Revisión Bibliográfica	5
1.3 - Propiedades de los fluidos	12
1.4 – Clasificación reológica de los fluidos	17
1.5- Tipos de reómetros	22
1.6- Descripción de la instalación de compresores del ISMM	24
1.7- Conclusiones del capítulo	25
Capítulo II. MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.1- Introducción	26
2.2- Características de los materiales empleados para la fabricación	26
2.3- Tecnología de fabricación del reómetro	29
2.4 Fundamentación matemática del reómetro.....	31
2.5 - Funcionamiento del reómetro	33
2.6- Conclusiones del capítulo.....	36
Capítulo III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	37
3.1- Introducción	37
3.2- Resultados obtenidos del Funcionamiento del reómetro	37
3.3- Análisis del costo de fabricación.....	39
3.4- Análisis de la incidencia medioambiental y de seguridad laboral ...	41
3.5- Conclusiones del capítulo	47
Conclusiones	48
Recomendaciones	49
Bibliografía.....	50
Anexos.....	53



INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas del siglo XX hubo un incremento notable de productos industriales importantes cuyo flujo no puede ser caracterizado por relaciones newtonianas, tales como son: productos alimenticios, pastas, cremas, mieles finales y cachaza de la industria azucarera, grasas lubricantes, suspensiones minerales, y productos de la biotecnología y de la industria farmacéutica.

En todo proceso tecnológico estos productos son elaborados en diferentes equipos y aparatos, y transportados a través de conductos. El cálculo de los equipos y conductos depende del comportamiento reológico de los diferentes materiales; y dicho comportamiento está grandemente relacionado con la viscosidad y la estructura que forman las partículas. Es por ello que, en la actualidad, el conocimiento acerca del comportamiento no newtoniano de determinados materiales contribuye sustancialmente a la solución de una gran variedad de problemas en la industria moderna. Relacionado a esta necesidad se encuentra la carencia de equipos e instrumentaciones destinadas a este fin en el territorio, que faciliten investigaciones relacionadas a este campo; siendo este el aporte del presente trabajo de diploma.

La industria minero metalúrgica de la región, utilizan diversas formas de transportación, cobrando la importancia primaria el transporte por sistemas por tuberías. Estos sistemas de transporte difundidos mundialmente, cuando operan en los parámetros eficientes son de gran efectividad económica y medioambiental con respecto a los demás sistemas de transporte.

Por todo lo planteado, se requiere de equipamientos que nos permitan determinar los parámetros y propiedades de transporte de los fluidos, a partir de su naturaleza reológica; lo que viabilizaría los cálculos para la determinación de las pérdidas de presión en las líneas y accesorios.

En la actualidad no se cuenta con reómetros, tecnologías y procedimientos que respondan a la práctica del transporte de fluidos, por lo cual este trabajo contribuir de forma indirecta



al funcionamiento eficiente en las instalaciones de los sistemas de transporte en las plantas metalúrgicas.

Teniendo en cuenta las condiciones planteadas de trabajo, es necesario que los equipamientos sean resistentes a todo tipo de fluidos, ya sean ácidos o básicos, abrasivos o blandos; para estas condiciones se ha decidido la utilización de aceros inoxidables, los que son los más utilizados en estos equipamientos a nivel mundial. Por la amplia utilización en la actualidad en todas las esferas de desarrollo industrial: Industrias Niquelíferas, domesticas, medicina, automovilística, constructivas, aeronáutica etc., es que se ha propuesto este tipo de material, para el cual se seccionará la tecnología de fabricación apropiada a este material.

En tal sentido se caracterizan por las siguientes deficiencias:

- Inexistencia de equipamiento para la obtención de las propiedades reológicas de fluidos.
- Desconocimiento del comportamiento de los fluidos, en función de sus propiedades y reológicas.
- Insuficiencia de datos para la proyección, selección y cálculo de los parámetros racionales de transporte.

Situación problemática:

El ajuste de modelos matemáticos que representen el comportamiento de flujo y fenómenos físicos de los sistemas, la simulación con técnicas modernas de sus características y la implementación de nuevas tecnologías es el punto de partida para la eficiencia energética en el sector industrial.

Se encuentra la problemática de que la determinación de las viscosidades, propiedades reológicas y de transporte de líquidos y mezclas no conducen a un método teórico de estimación, sino a técnicas empíricas basadas en la evaluación de algunas constantes determinadas por equipos de laboratorios y los más utilizados son los reómetros.



Dada la situación planteada, se resume que, existe desconocimiento de las propiedades de transporte de los fluidos e hidromezclas, lo que dificulta la correcta selección y diseño de los sistemas de transporte dada la falta de equipamientos de laboratorios; dificultándose la selección de los equipamientos de transporte, dado por las inexactitudes de los datos utilizados en los cálculos; lo que se requiere la fabricación de un reómetro que permita facilitar el análisis del comportamiento de los fluidos contribuyendo a mejoras de los métodos e índices técnicos económicos de los sistemas de transporte de fluidos. Por otra parte el equipo puede ser utilizado en laboratorios de la asignatura Mecánica de los Fluidos, lo cual se contribuirá al desarrollo profesional e investigativo de los estudiantes.

El **problema** lo constituye:

Insuficiencia de equipamientos para determinar las propiedades de transporte de los fluidos industriales más comunes de la región de Moa; los que dificulta establecer el modelo de flujo adecuado para el estudio confiable de proyección, selección y explotación de los sistemas de transporte fluido.

Se establece como **objeto del trabajo**:

El reómetro de tubo capilar para obtención del comportamiento reológico de fluidos.

Dado el problema a resolver se plantea la siguiente: **hipótesis**:

Si se realiza una correcta fabricación del reómetro de tubo capilar, es posible obtener el comportamiento reológico de fluidos industriales con el empleo de tecnologías menos complejas.

Se define como **objetivo del trabajo**:

Fabricar un reómetro de tubo capilar que posibilite la obtención del comportamiento reológico a fluidos industriales, contribuyendo a la realización de investigaciones y prácticas de laboratorios.



Para cumplir el objetivo central, se desarrollaron los siguientes **objetivos específicos**:

- Describir las características de la instalación de compresores del ISMM.
- Realizar la tecnología de fabricación de reómetro.
- Realizar las comprobaciones experimentales del equipo fabricado.
- Exponer los pasos para la obtención de datos con el reómetro.

De acuerdo al objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas del trabajo**:

1. Realizar un estudio bibliográfico referente al tema.
2. Describir las características de los materiales empleados.
3. Realizar la tecnología de fabricación.
4. Descripción de la metodología para la operación con el reómetro.
5. Análisis económico.

Aportes Metodológicos

- Se ilustra la necesidad de utilizar los parámetros que caracterizan el comportamiento reológico de fluidos, en el cálculo y evaluación de sistemas de transporte de materiales no newtonianos por tuberías.
- Se establece un método, para la obtención de los parámetros reológicos de los fluidos.
- El reómetro puede ser utilizado en temas de laboratorios de asignaturas afines de las carreras de Mecánica e Ingeniería Metalúrgica.



MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO

1.1 – Introducción

El marco teórico del objeto de estudio, permite detectar de forma preliminar, las diferentes características y deficiencias que existen entre las investigaciones realizadas, las teorías existentes y los múltiples elementos que están presentes en la investigación. En tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Establecer el estado del arte a partir de la revisión bibliográfica relacionada al tema y proceso en estudio, que soporten como base, la fabricación y el método de operación del reometro de tubo capilar a fabricar.

1.2 – Revisión Bibliográfica

“La teoría de los fluidos deberá basarse necesariamente en la experimentación” (D’Alambert 1744), demostró que no existe resistencia al movimiento de un cuerpo cuando éste se mueve a través de un fluido ideal (no viscoso o invíscido), pero es obvio que esta conclusión no puede aplicarse a los cuerpos que se mueven a través de fluidos reales. Esta discrepancia entre la teoría y el experimento, que se denominó la paradoja de D’Alambert, ha sido ya resuelta. No obstante, demuestra con claridad las limitaciones de la teoría de esa época para la resolución de problema sobre fluidos.

Desde fines del siglo XVIII y a lo largo del siglo XIX, la hidráulica se ve enriquecida por los estudios teóricos y experimentales de Henri Darcy, por su discípulo y continuador H. Bazin y por el médico Jean Poiseulle, interesado en la circulación de la sangre lo que lo llevó al campo de la hidráulica. Además de los científicos anteriores que desarrollaron sus trabajos en Francia, sobresalieron también en Alemania Julios weibach y Gottlieh Hagen. Durante esa época, y en el aspecto teórico se destacan los científicos Lagrange, Helmholtz, Saint-Venatt, Venturi Pitot entre otros.

En Cuba no comienza un desarrollo de los estudios hidráulicos sino hasta después de la revolución en que dichos estudios constituyen una de las bases principales del progreso científico técnico de nuestro país.



En el desarrollo de la investigación se han consultado diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica ha estado dirigida en dos líneas fundamentales:

- La información relacionada con el enfoque teórico – metodológico, sobre el tema de fluidos no newtonianos desde el punto de vista científico, técnico y práctico que se han efectuado en los últimos años.
- Lo relacionado a la tecnología de fabricación de piezas y propiedades de aceros inoxidables.

El problema de los efectos viscosos de disipación de energía, se empezó a abordar experimentalmente con flujos a baja velocidad en tuberías, independientemente en 1839 por el médico francés Jean Poiseuille, que estaba interesado por las características del flujo de la sangre, y en 1840 por el ingeniero alemán Gotthif Hagen. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos se debió al ingeniero francés Claude Navier en 1827 e, independientemente, al matemático británico George Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se las conoce como *ecuaciones de Navier-Stokes*.

Refiriéndose a la viscosidad de los fluidos y en específico a los no newtonianos, Muchos han sido los autores que abordan esta temática; de vital importancia en el desarrollo de la investigación de fluidos; trabajos como (De la Paz et al., 2002), realiza un estudio reológico de la jalea dentífrica fluida; donde analizan las deformaciones sufridas por la formulación al aplicarle la fuerza de cizalla con un determinado gradiente de velocidad, describiéndose por medio de la curva viscosimétrica y de la de fluidez cómo se deforma el cuerpo al ser sometido a esfuerzos producidos por fuerzas externas, así como la determinación de sus propiedades mecánicas bajo las condiciones de deformación ensayadas. La formulación diseñada resultó estable físicamente, al menos, bajo las condiciones y circunstancias experimentales en que se ensayo, se encuentra como deficiencia, que los autores no estudian el comportamiento reológico del fluido para



variaciones de temperaturas; siendo esta perturbación, de gran influencia en la estructura y propiedades de los fluidos.

A partir de los trabajos descritos por Caldiño et al. (2004), se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada, funciones reológicas de las mezclas agua arcilla que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos. Se corroboró el incremento de la viscosidad con la concentración tanto para mezclas agua-arcilla como agua-arcilla-arena. Se observó y evaluó la influencia de la arena en el valor de la viscosidad; en el rango ensayado, la arena contribuyó en forma significativa a este incremento; se pudo tener en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas como, (pH) y diámetro medio de las partículas de arena, lo que no se tiene en cuenta.

Ivenski (1957), mediante el estudio de los regímenes de movimientos de las mezclas de materiales de la construcción por tuberías de diferentes diámetros estableció, que existe el régimen estructural en los límites de velocidades hasta 0.5 m/s, se observa el régimen estructural, que se acompaña de la rotación de los granos, lo que conlleva a la destrucción de los enlaces estructurales.

En el trabajo de Iakovlev et al. (1961), se exponen los resultados de estudios experimentales, los cuales demuestran que, el movimiento de líquidos estructurales por tuberías se caracteriza por la presencia de un núcleo del flujo, que se mueve con velocidad constante como un cuerpo compacto.

En su trabajo, Barreto (1979), sobre la base de las investigaciones teórico experimental y el análisis de otros autores determinó los parámetros y estableció los regímenes racionales de hidrotransporte de minerales de hierro y concentrados. Elaboró las recomendaciones sobre la modelación de las suspensiones, selección de los regímenes efectivos y la metodología para la determinación de los parámetros de materiales sólidos de alta densidad en flujos de alta densidad (hasta 40 % de sólido por volumen).

Se encuentra como dificultad de los tres trabajos anteriormente descritos, que los autores, no determinan las relaciones de las propiedades reológicas en sus



investigaciones; lo cual dificultaría el ajuste de estas condiciones a otras condiciones de los fluidos estudiados.

El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro del conducto, entre otros aspectos (Ibarz et al., 2001), (Vélez, 2003). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo y/o accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito (Charm, 1971); (Foust et al., 1980); (Macedo et al., 2001). La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano y poco trabajo se ha realizado en fluidos no newtonianos independientes del tiempo (Steffe et al., 1986); (Ibarz et al., 2001); (Vélez, 2003); (Perona, 2003); (Sablani et al., 2003).

En una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar y viscoso, la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes, y/o entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades, en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento. Tanto las laminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye conforme cuando se aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas o láminas imaginarias en movimiento (Welty et al., 1976); (Bandala, 2001).

Si el flujo en la tubería es turbulento, la variación de la velocidad a través del tubo no queda determinada únicamente por la viscosidad, sino que depende de las características que tenga la turbulencia, de las propiedades reológicas y viscoelásticas de los fluidos no newtonianos. La magnitud del esfuerzo cortante viscoso aumenta debido a los remolinos y vórtices que acompañan a la turbulencia, además con paredes ásperas o rugosas, la turbulencia se incrementa aún más (Welty et al., 1976).



Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados, diferentes factores han sido analizados. Las caídas de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama et al. (1980); determinando valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham. En un estudio realizado por García y Steffe (1987), se subraya la importancia que tiene la consideración del esfuerzo de cedencia o umbral de fluencia (t_0) en la correcta predicción de las pérdidas de presión en la tubería; las predicciones del coeficiente de fricción se relacionaron al índice de flujo, y a los números de Reynolds y Hedstrom. Banerjee et al. (1994), determinaron de forma experimental la pérdida de presión (ΔP) en válvulas de compuerta y globo de 12,7 mm; involucrando, el número de Reynolds al manejar fluidos de tipo pseudoplástico generalizado (Re) y los diferentes grados de abertura (δ).

Liu et al. (1998), realizaron el análisis teórico y la modelación del transporte de fluidos no newtonianos (del tipo Herschel-Bulkley, Meter y Cross), tanto en conductos como a través de medios porosos, involucrando tres factores de forma y la viscosidad como necesarios para evaluar las caídas de presión durante el flujo.. Perona (2003), reportó los resultados obtenidos en la transición de régimen laminar a turbulento para purés de frutas diluidos, considerando que las discrepancias observadas en su estudio, pueden atribuirse a los efectos viscoelásticos de los fluidos.

Con el objetivo de determinación del tipo de movimiento que tiene lugar cuando la hidromezcla circula a bajas velocidades con altas concentraciones de sólido, Izquierdo et al. (2001), modeló el hidrotransporte en una instalación semindustrial construida al efecto, se determinaron las propiedades físico-mecánicas del mineral y las propiedades reológicas de la hidromezcla. Quedó demostrada la existencia del régimen estructural de movimiento para la hidromezcla, lo que la enmarca dentro de los fluidos viscoso-plásticos, y se obtuvo gráfica y analíticamente la relación entre el coeficiente de pérdida hidráulica por rozamiento (I) y el número generalizado de Reynolds (Re).



Placencia et al. (2000). Dando realizan pruebas de formulación de emulsiones de petróleo pesado en agua a nivel piloto, se realizan pruebas de reología a diferentes condiciones de concentración de tensoactivo, temperatura y tiempo de almacenamiento. Finalmente para pruebas de flujo, se estudia el comportamiento de la emulsión con el 1% en peso de tensoactivo al ser transportada por una tubería de 1 pulgada.

Mechetti et al. (2000) 1; Mechetti et al.(2000) 2, presentan resultados inéditos en sus estudios de comportamiento reológico de crudos asfálticos bajo la acción de campos eléctricos. Investigando el comportamiento viscosimétrico de un crudo argentino de baja viscosidad con 7% pp. de contenido de asfaltenos, encuentran una dilatancia atípica para un crudo de baja viscosidad relativa y también una anomalía termorreológica (mayor viscosidad para una mayor temperatura). La dilatancia se explica en la literatura por la presencia de partículas cargadas en suspensión coloidal, lo que podría adjudicarse, en este caso, a la presencia de asfaltenos.

Por otro lado, Mechetti et al. (2001) 4, llevaron a cabo estudios electrorreológicos de emulsiones w/o de crudos analizando el comportamiento de la viscosidad en condiciones de flujo para diferentes velocidades de deformación y diferentes intensidades de campo, observando un rompimiento rápido de la emulsión, lo que resulta de gran importancia para el proceso de extracción de agua de crudos.

Chen et al (1994), investigaron el efecto de la aplicación de un campo eléctrico alterno en la estructura de una emulsión w/o, observando la formación de largas cadenas de gotas entre electrodos, que resulta de los dipolos inducidos en las gotas de agua en presencia del campo eléctrico, similar a lo observado en fluidos electrorreológicos. Es decir que las emulsiones w/o se comportarían como fluidos electrorreológicos (Mechetti et al., 2001) 4.

Haoulo et al. (2005) evalúan el efecto de la densidad y de la viscosidad dinámica de la mezcla en la determinación del gradiente de presión longitudinal de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales considerando un fluido pseudo homogéneo. Se evalúan 18 ecuaciones de viscosidad de mezcla y 4



ecuaciones de densidad de mezcla. La combinación de estas ecuaciones de propiedades de mezcla generan 72 modelos, cuya única diferencia es la forma de calcular las propiedades de mezcla. La evaluación del desempeño de los diferentes modelos para determinar el gradiente de presión, se realiza comparando los resultados obtenido por cada modelo con 93 datos experimentales que incluyen los patrones de flujo intermitente, anular, burbuja dispersa y estratificado ondulado.

Ferro et al., (2004) precisa la influencia de determinadas variables en la preparación de emulsiones acuosas de crudo cubano, empleando productos de la pirólisis para su utilización como pinturas asfálticas. En el trabajo experimental a escala de laboratorio se emplearon dos tipos de emulgentes o agentes emulsionantes (P y b), obtenidos de materia prima y condiciones de pirólisis diferentes, observándose que, mientras con el primero se lograban las emulsiones directas y estables, con el segundo se obtienen emulsiones inversas en similares condiciones de preparación. Las emulsiones de baja viscosidad para su uso como pinturas asfálticas se logran con concentraciones de crudo alrededor de 60 %, del emulgente P en el agua superiores a 4 % y su pH entre 6 y 7. Las emulsiones inversas con el emulgente b pueden disminuir su concentración en el agua hasta 3 %. En los estudios reológicos se observaron comportamientos de viscoelasticidad para algunas de las emulsiones formuladas.

Relacionado a los procesos tecnológicos y los materiales inoxidables, podemos citar los trabajos de más afines al tema, los que plantean.

La fragilización en caliente de aceros austeníticos es un fenómeno muy investigado desde la década de los 50. Roturas catastróficas producidas en tuberías, depósitos, recipientes a presión, equipos para el trasiego de fluidos y otros muy comunes en plantas químicas, energéticas y metalúrgicas, han dado lugar a que se destinen cuantiosos medios y recursos al estudio de la relación entre el carácter de la rotura de elementos fabricados de aceros austeníticos inoxidables (Lai., 1992).

(Viswanathan, R. y J, 1999) establece que para relaciones de Cr/Ni inferiores a 1.6 existe gran probabilidad de ocurrencia de grietas a elevadas temperaturas en



uniones soldadas de aceros inoxidables austeníticos, (Shah et al., 1990) concuerda con otros autores en la ocurrencia de grietas en estos aceros en el proceso de solidificación y que estas se producen predominantemente por la segregación de pequeñas cantidades de mezclas de fase acompañadas de tensiones de contracción. Aunque el autor considera que la presencia de Molibdeno reduce considerablemente este efecto.

Dentro del total de la producción mundial de aceros inoxidables, el 52 % pertenece a los aceros austeníticos inoxidables al cromo-níquel. La selección de estos materiales para aplicaciones que implican resistencia a la corrosión a altas temperaturas requiere de un conocimiento profundo sobre los mecanismos y la cinética de la formación de capas superficiales, su composición química, estructura, mecanismos de difusión, etc. Todos estos factores y otros que están estrechamente relacionados con las propiedades mecánicas y estructurales a altas temperaturas permiten la adecuación del acero para usos específicos (De Meyer et al., 2001).

1.3 - Propiedades de los fluidos

La rama de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento, constituye la Mecánica de los Fluidos y la hidráulica. En la estática de los fluidos, el peso específico es la propiedad importante, mientras que en el flujo de fluidos, la densidad y la viscosidad son las que predominan. Cuando tiene lugar una compresibilidad apreciable es necesario considerar los principios de la termodinámica. Al intervenir presiones manométricas negativas, la tensión de vapor adquiere importancia, y la tensión superficial afecta a la estática o cinemática de los fluidos cuando las secciones de paso son pequeñas.

Los fluidos son sustancias que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen. Cuando están en equilibrio no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma.



Los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases.

Líquidos: son prácticamente incompresibles, ocupan un volumen definido y tienen superficies libres.

Gases: son compresibles, se expansionan hasta ocupar todas las partes del recipiente que los contenga.

Densidad de un fluido:

La densidad de una sustancia se define como su masa por unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

La unidad de medida en el S.I. de Unidades es kg/m^3 , también se utiliza frecuentemente la unidad g/cm^3 .

Peso específico:

Peso específico se define como su peso por unidad de volumen, se encuentra relacionado con la densidad por:

$$Y = \rho \cdot g \quad (1.2)$$

En los líquidos puede considerarse constante para las variaciones ordinarias de presión.

Se pueden calcular a través de la ecuación de estado de los gases $PV = nRT$ como $P = \rho \cdot R \cdot T$

$$Y = \frac{P \cdot g}{R \cdot T} \quad (1.3)$$

Volumen específico

Es el volumen por unidad de masa y es por lo tanto el recíproco de la densidad.

$$V = \frac{1}{\rho} \quad (1.4)$$



Gravedad específica

Se suele designar como SG y se define como la relación de la densidad del fluido entre la densidad del agua a una temperatura dada. Normalmente esa temperatura es 4°C, y a esta temperatura la densidad del agua es 1000kg/m³.

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad (1.5)$$

Viscosidad de un fluido

Es aquella propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes. La viscosidad se debe primordialmente a las interacciones entre las moléculas del fluido.

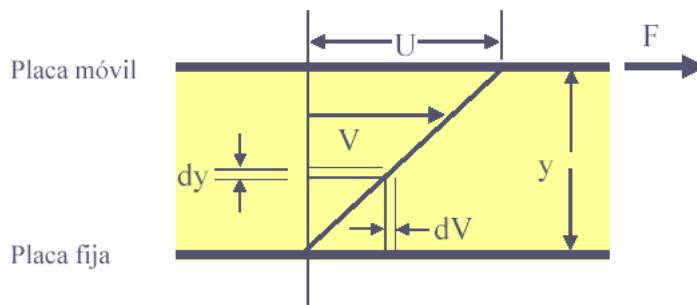


Figura 1.1. Placas de los fluidos.

Otro coeficiente de viscosidad, llamado viscosidad cinemática, viene definido por

$$\nu = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.6)$$

Presión de vapor

Cuando tiene lugar el fenómeno de la evaporación dentro de un espacio cerrado, la presión parcial a que dan lugar las moléculas de vapor se llama presión de vapor. Depende de la temperatura, aumentando con ella.

Tensión superficial

La tensión superficial (σ) de un líquido es el trabajo que debe realizarse para llevar moléculas en número suficiente desde el interior del líquido hasta la superficie para crear una nueva unidad de superficie (J/m²). Este trabajo es numéricamente igual a



la fuerza tangencial de contracción que actuase sobre una línea hipotética de longitud unitaria situada en la superficie, y

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta L} (N / m) \quad (1.7)$$

Las unidades son en m^2/s . En los líquidos la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura, pero no se ve afectada apreciablemente por las variaciones de presión. En los gases la viscosidad absoluta aumenta al aumentar la temperatura, pero casi no varía con la presión. Como el peso específico de los gases varía con la presión (a temperatura constante), la viscosidad cinemática es inversamente proporcional a la presión.

Capilaridad

Es la elevación o descenso de un líquido en un tubo capilar vienen producidos por la tensión superficial dependiendo de las magnitudes relativas de la cohesión y de la adhesión del líquido a las paredes del tubo. Los líquidos ascienden por tubos que mojan (cohesión < adhesión) y descienden por tubos que no mojan (cohesión > adhesión). La capilaridad tiene importancia en tubos estrechos <10mm, para valores mayores de 12mm es despreciable. Propiedades de los fluidos.

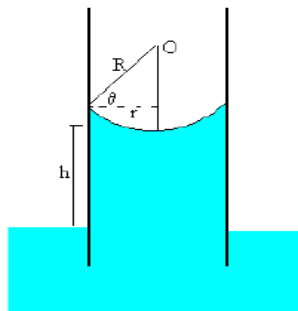


Figura 1.2. Capilaridad de los fluidos.

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{r \cdot g \cdot \rho} \cdot \cos \theta \quad (1.8)$$



$$E = \frac{dp}{-dv/v} \quad (1.9)$$

1. El principio de conservación de la masa, a partir del cual se establece la ecuación de continuidad.
2. El principio de la energía cinética, a partir del cual se deducen ciertas ecuaciones aplicables al flujo.
3. El principio de la cantidad de movimiento, a partir del cual se deducen las ecuaciones para calcular las fuerzas dinámicas ejercidas por los fluidos en movimiento. El flujo de los fluidos puede ser permanente o no permanente; uniforme o no uniforme; laminar o turbulento; unidimensional, bidimensional o tridimensional y rotacional o irrotacional.

Flujo laminar: El flujo laminar se da cuando las partículas fluidas se mueven siguiendo trayectorias paralelas, formando el conjunto de ellas capas o láminas. Los módulos de las velocidades de capas adyacentes no tienen el mismo valor. El flujo laminar está gobernado por la ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular, es decir, la tensión cortante es igual al producto de la viscosidad del fluido por el gradiente de las velocidades o bien $\tau = \mu dv/dy$. La viscosidad del fluido es la magnitud física predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a la turbulencia.

Flujo turbulento: En el flujo turbulento las partículas fluidas se mueven de forma desordenada en todas las direcciones.

$$\tau = (\mu + \eta) \cdot \frac{dv}{dv}. \quad (1.10)$$

Donde μ representa los efectos debidos a la viscosidad y η tiene en cuenta los efectos debidos a la turbulencia.

1.4 – Clasificación reológica de los fluidos

Desde el punto de vista reológico los fluidos se clasifican en dos grupos.

- 1- Newtonianos
- 2- No newtonianos

En los fluidos newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante, siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad. La experiencia demuestra que todos los gases y líquidos homogéneos de baja viscosidad se comportan como fluidos Newtonianos; la viscosidad de estos fluidos es constante respecto a los cambios en la magnitud del esfuerzo cortante y del gradiente de velocidad.

Los fluidos no Newtonianos presentan como característica fundamental el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad, y por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aun cuando se mantenga la temperatura y otras condiciones constantes. Según la variación de la viscosidad los materiales no Newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos.





2- De viscosidad dependiente del tiempo.

- Tixotrópicos: La viscosidad de estos materiales disminuye con el tiempo, cuando están sometidas a un gradiente de velocidad determinado, se comportan reológicamente como pseudoplásticos, plásticos ideales y reales.
- Reopécticos: La viscosidad de estos aumenta con el tiempo, para un gradiente de velocidad determinado.

1 – Visco - elásticos ó de Maxwell

Estos materiales exhiben propiedades viscosas y elásticas, los cuales fluyen bajo la acción del esfuerzo cortante, aunque la deformación es continua no resulta totalmente irreversible, de manera que al cesar la acción del esfuerzo el material restablece en parte su forma, semejante al comportamiento de los cuerpos elásticos sólidos.

1.4.1 – Curvas de flujo

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos Newtonianos y no Newtonianos, las que se denominan *curvas de flujo*.

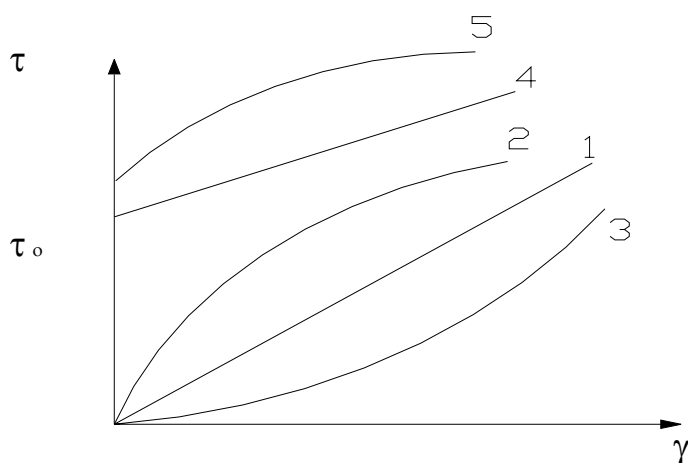


Figura 1.3: Curvas de flujo típica: 1- Newtonianos; 2- Seudoplásticos; 3- Dilatantes; 4- Plástico ideal (Bingham); 5- Plástico real.



Las curvas de flujo son útiles, fundamentalmente, en el diseño de equipos o en la evaluación de instalaciones ya construidas, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que un material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro conocido, para determinar si un equipo ya construido (con el fin de transportar o elaborar un material determinado) puede ser usado con otro material diferente: para clasificar los materiales reológicamente y encontrar el modelo adecuado, para comparar características estructurales o de calidad de un mismo producto obtenido sin producciones **batch** y que hayan sido fabricadas sustituyendo a un componente por otro.

1.4.2- Factores que influyen sobre el comportamiento reológico

La viscosidad de los líquidos a temperaturas inferiores a la normal de ebullición no esta muy afectada para valores moderados de la misma; a presiones muy elevadas la viscosidad puede aumentar considerablemente. Al parecer, este ultimo crece con la complejidad molecular, pero no se tiene ningún método seguro de estimación de la viscosidad y en general de las propiedades reológicas de los líquidos a bajas temperaturas y elevadas presiones, (Costa, 1984).

- Efecto de las propiedades superficiales

En las suspensiones coloidales cuya fase dispersa posee un área superficial grande, el efecto de las propiedades de superficie desempeñan un papel muy importante. Ello se debe, fundamentalmente, a que el comportamiento reológico es afectado grandemente por la densidad de carga superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, ya que estas variables, influyen sobre la interacción neta entre las partículas.

La interacción neta es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo. El componente atractivo viene dado por las fuerzas de atracción del Van der Waals y no es sensible a los fenómenos superficiales. El componente repulsivo, se debe a las fuerzas repulsivas eléctricas, que rodean a las partículas (repulsión de Born).

Cuando la interacción neta es repulsiva se observa un comportamiento newtoniano de la suspensión, en cambio, cuando la interacción neta es atractiva la suspensión puede exhibir un comportamiento pseudoplástico o plástico, debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura espacial. En los trabajos con pulpas lateríticas de Cerpa et al. (1997), Cerpa et al (1998), Cerpa et al (1999), así como de Boger et al. (1990) y con suspensiones de líquido se ilustra la relación entre los fenómenos de la Química de Superficie y la reología. No se han encontrado trabajos sobre las emulsiones de crudo cubano que traten sobre estos aspectos.

Teniendo en cuenta todo lo hasta aquí explicado, resulta evidente que los efectos de las propiedades superficiales sobre la reología de las emulsiones coloidales y petróleo es un fenómeno de carácter universal, de manera que los principios que rigen estos procesos pueden ser aplicados independientemente del tipo de petróleo que forme la dispersión.

- Efecto de la temperatura.

En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. Se ha comprobado que la disminución de la viscosidad puede deberse a dos efectos (Garcell, 1993),

- Disminución de la viscosidad del medio dispersante.
- Debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de líquidos se representa bien mediante la ecuación de Andrade (Reid Y Sherwood, 1966; Laurencio et al., 2007).

$$\mu_m = C \cdot e^{B \cdot T} \quad (1.1)$$

En la que T es la temperatura; C y B son constantes, cuyos valores dependen de las unidades de μ y de T .



De acuerdo con la ecuación 1.1 la viscosidad de los líquidos disminuye exponencialmente con el aumento de la temperatura.

- Efecto del pH.

En las suspensiones con características coloidales, se manifiestan grandemente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales. En las suspensiones minerales, en la que la distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas se manifiestan también estos fenómenos, los cuales son altamente dependientes del pH de la suspensión. Para pH cercanos al punto isoeléctrico, el equilibrio atracción – repulsión entre partículas se desplaza hacia la atracción debido al predominio de las fuerzas de Van der Waals. En estas condiciones la suspensión incrementa su inestabilidad y muestra los máximos valores de viscosidad, debido a la formación de estructuras más fuertes. A pH alejado del i.e.p., son más importantes las fuerzas de repulsión de carácter electrostático entre las partículas.

1.5- Tipos de reómetros

Los reómetros son viscosímetros especiales que se han diseñado y comercializado para realizar fundamentalmente la caracterización reológica de distintos materiales.

Los reómetros más utilizados son: (a) los de tubo, y (b) los rotacionales. Actualmente, los que mas se comercializan son los reómetros rotacionales, entre los cuales se encuentran los siguientes: (1) de cilindros concéntricos; (2) de cilindro en medio infinito; y (3) de cono y plato. (Ver anexo 1 y 2)

Para obtener las curvas de flujo de los materiales, los reómetros deben operar en régimen laminar.

Reómetros de tubo

Los reómetros de tubo se basan en la medición de la caída de presión asociada al flujo laminar del fluido a través de un tubo, el cual, por lo general, es de sección circular, hidráulicamente liso, y con una relación longitud / diámetro grande. El ΔP a través del tubo permite calcular el esfuerzo cortante, τ ; y con la magnitud del



flujo volumétrico se estima la velocidad de deformación $\dot{\gamma}$. La descripción de estos reómetros, y los métodos de ensayo y corrección de errores de medición se pueden encontrar en diversas fuentes, tales como el método de Bagley [7] y el método de Fredrickson [3]. Estos métodos no serán tratados en estas notas. Los reómetros de tubo son de gran utilidad para las mediciones reológicas de dispersiones que sedimentan muy fácilmente. El tubo en la instalación puede estar dispuesto horizontal o verticalmente.

Reómetros rotacionales

Los reómetros rotacionales son los más difundidos y comercializados en la actualidad. Los últimos modelos ofertados por las firmas que los fabrican, por lo general, pueden ser acoplados a computadoras personales, y disponen de los softwares necesarios que facilitan la ejecución de los ensayos experimentales y la elaboración y presentación de las curvas de flujo. Estos reómetros se ofertan en tres tipos o modelos:

1. De cilindros concéntricos.
2. De cilindro rotor en medio infinito.
3. De cono y plato.

Los modelos más utilizados son los dos primeros. En la figura 10 se muestra la diversidad de tipos para el modelo de cilindros concéntricos, así como el de cono y plato. Estos dos modelos se caracterizan por poseer una holgura entre los cilindros relativamente estrecha. El reómetro de cilindros concéntricos se utiliza, preferentemente, para mediciones con líquidos homogéneos y dispersiones de partículas relativamente pequeñas que prácticamente no sedimenten. En el anexo 2 se muestra el modelo de cilindro rotor en medio infinito (el diámetro del recipiente o cilindro exterior es relativamente grande en comparación con el del cilindro interior). Este modelo se emplea para hacer mediciones de viscosidad “in situ”.



En los reómetros de cilindros concéntricos, por lo general el cilindro interior o rotor gira a distintas velocidades angulares, Ω , mientras que el cilindro exterior permanece estático. El eje del rotor se conecta a resortes que permiten medir el torque, T , que es necesario aplicar para vencer la resistencia al flujo del líquido contenido entre los dos cilindros. Así, el esfuerzo cortante, evaluado para la superficie del rotor, viene dado por:

Al igual que en los reómetros de tubo, en los rotacionales la expresión del esfuerzo cortante τ es independiente de la naturaleza reológica del fluido;

mientras que la expresión de $\dot{\gamma}$ es función de los parámetros reológicos del modelo ajustado a los datos de la curva de flujo.

1.6- Descripción de la instalación de compresores del ISMM

La instalación de compresores del ISMM, cuenta con dos compresores de embolo bietápicos enfriados por aire de fabricación soviética, con un caudal nominal de 30 m³/min a la presión de 8 bar, estos tienen mas de 15 años de instalados (Anexo I).

Cuentan con la pizarra de mando para la parte eléctrica de control y fuerza. Esta constituida fundamentalmente por un interruptor de fuerza, y un arrancador magnético, los cuales pueden sufrir un deterioro en sus unidades de contacto y apagachispas, al accionarlo de forma frecuente. Su estado general se valorara de regular.

En el sistema no existen medidores de flujo. Se cuenta con un tanque de presión de 10 Mpa de presión de almacenamiento. El mismo posee una válvula de seguridad ajustable con contrapeso.

La regulación de la capacidad del compresor con vista a garantizar una presión estable, se realiza mediante la descarga del aire a la atmósfera lo que provoca un alto consumo de energía empleada para comprimir este, el cual no se aprovecha.



Otras deficiencias detectadas son:

- Falta de mantenimiento de los filtros de aire en la aspiración
- Tuberías de descarga con alto grado de corrosión interna.
- Falta de lubricación del compresor 2.
- Los compresores no tienen registradores de temperatura.

1.7- Conclusiones del capítulo

- En el ISMM no se cuenta con instrumentos ni equipos de laboratorios que posibiliten el estudio reológico de fluidos; se ha hecho referencia en general, al estudio de las propiedades superficiales y de flujo de suspensiones acuosas con partículas, pulpas minerales (de lateritas férricas, bentonitas, arcilla, cemento, etc.).
- Es insuficiente la información acerca de métodos y metodológicas de fabricación y uso de reómetros de tubos capilares, de ahí la necesidad del estudio previo de comportamiento de fluidos y materiales empleados para la correcta fabricación.



MATERIALES Y MÉTODOS

2.1- Introducción

Los métodos de fabricación de reómetros, deben estar relacionados estrechamente con los conocimientos teóricos acerca del comportamiento y propiedades de flujo, para contribuir a la selección de métodos apropiados para la resolución de problemas asociados al flujo de fluidos; en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Establecer la tecnología de fabricación, materiales empleados y métodos de toma de datos con el reómetro a fabricar.

2.2- Características de los materiales empleados para la fabricación

En todo proceso de fabricación es necesario el control de materiales empleados, lo que facilita en gran medida la organización del trabajo y precisar en el análisis económico en que se incurre en el proceso. En la tabla 2.1 se resume los materiales y la cantidad de cada tipo, empleado en la fabricación del reómetro.

Tabla 2.1. Materiales empleados.

Nº	Descripción	U. de Med.	Cantidad
1	Válvula de bola inoxidable 1/2'	U	2,00
2	Válvula de bola inoxidable 1'	U	2,00
3	Tubo inoxidable ϕ 150 mm	m	0,50
4	Platillo inoxidable ϕ 150 mm	U	2,00
5	Manguera 3/8' de 6 m	U	1,00
6	Tornillo M20x80 con tuerca	U	8,00
7	Tornillo M12x50 con tuerca	U	4,00
8	Plancha inoxidable de 4mm	m	0,15
9	Tubo inoxidable 1'	m	0,20
10	Platillo de acero ϕ 40 mm	U	2,00
11	Tubo inoxidable de 1/2'	m	0,30
12	Tubo inoxidable ϕ 1/4'	m	2,00
13	Electrodo E- 316 2.4 mm	Kg.	1
14	Manómetro de presión	U	ISMM



2.2.1- Características del acero AISI 316

Los aceros inoxidable son aleaciones de hierro con un mínimo de un 10,5% de cromo. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 316 es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío. Se añade molibdeno para aumentar la resistencia a la corrosión especialmente en entornos que contienen cloruros. El bajo contenido en carbono de la aleación 316L otorga una mejor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas.

Tabla 2.2. Propiedades del acero AISI 316.

Propiedades Eléctricas	
Resistividad Eléctrica ($\mu\text{Ohm/cm}$)	70-78
Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm^3)	7,96
Punto de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)	1370-1400
Propiedades Mecánicas	
Alargamiento (%)	<60
Dureza Brinell	160-190
Impacto Izod (J m^{-1})	20-136
Módulo de Elasticidad (GPa)	190-210
Resistencia a la Tracción (MPa)	460-860
Propiedades Térmicas	
Coefficiente de Expansión Térmica a 20-100 $^{\circ}\text{C}$ ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	16-18
Conductividad Térmica a 23C ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	16,3

La composición química estándar de este acero según Databook 1988 y editada por la American Society for Metals, Según el Alloy Casting Institute (ACI), muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System – UNS, de la American Society for testing Materials – ASTM y la SAE, se refleja a continuación en la tabla 2.3.



Tabla 2.3. Composición química estándar del acero AISI 316.

Tipo	% Cr	% Ni	% C	% Mn	% Mo
316 L	16-18	10-14	0.08	2.0	2.3

2.2.2- Características de la máquina de soldar empleada

La máquina o equipo de trabajo que se empleo en el proceso de soldadura del reómetro fue la Máquina de Soldar Diesel Modelo Big-BLUE. Moto generador Miller BIG BLUE 500 PTCC (Figura 2.1), para soldadura manual con electrodo revestido, TIG y corte y ranurado con electrodo de carbón cobrizado. Serie 907179 la cual se destino a la planta para lograr una mayor disponibilidad para acometer las reparaciones. En el área, contamos con una de estas máquinas ya que el personal de la misma se encarga de realizar todos los trabajos de Pailería y Soldadura en la planta. Esta máquina garantiza la buena calidad de los trabajos y además, disminuye los costos de reparación y fabricación.

Además de la maquina se contó con los siguientes accesorios; Careta para soldar con pantalla móvil, Tenaza para soldar de 500 amperes, Cepillo de acero manual, Marcador blanco tipo jabón para metal, Cable porta electrodo No. (0-1)



Figura 2.1: Máquina de combustión para soldar.



2.3- Tecnología de fabricación del reómetro

Durante el proceso de fabricación o de reparación de estructuras soldadas, se vive cara a cara con la distorsión de la soldadura, que afectan la integridad y comportamiento durante el servicio de la estructura. Por lo que es necesario seleccionar los pasos adecuados para la correcta elaboración de la unión soldada. Para la realización de los procesos de soldadura se emplearon las siguientes ecuaciones.

2.3.1- Cálculo de la cantidad de electrodos para la soldadura

$$C_E = \frac{S \cdot L_c}{10^6} \cdot \delta(1,2) \quad (2.1)$$

Donde:

C_E = Cantidad de electrodos en; kg.

S = Area de la sección transversal de la pieza en; mm^2

L_c = Longitud a soldar en; mm

δ = Peso específico; kg/dm^3

10^6 = Factor de conversión

1,2 = Coeficiente del factor de pérdidas por salpicaduras, aprovechamiento del electrodo, calentamiento.

2.3.2- Cálculo del tiempo principal de soldadura

Es el tiempo que emplea el operario en el cumplimiento de su actividad productiva.

$$t_0 = \frac{\delta(F)L_c}{K_H \cdot I} \text{ min} \quad (2.2)$$

Donde:

t_0 = tiempo principal de soldadura; min

δ = Peso específico; kg/dm^3

K_H = Coeficiente de depósito (8,9 - 9,5)

I = Intensidad de corriente; Amp

$I = K \cdot d_{\text{elect}}$ - $K = (30-50)$

F = Area de la sección transversal del cordón; mm^2

$F_1 = (6-8) \cdot d_{\text{elect}}$

Para la primera pasada.

$F_2 = (8-12) \cdot d_{\text{elect}}$

Demás pasadas.



2.4 Fundamentación matemática del reómetro

La finalidad de esta práctica es definir y trazar la curva reológica o reograma de un fluido determinado, mediante una serie de parámetros que se determinarán experimentalmente en el Laboratorio.

Dada una tubería de sección recta circular, se determinará el reograma de un fluido estudiando la relación entre la tensión tangencial τ y la velocidad de deformación angular: $\dot{\gamma}$ de modo que a efectos prácticos el reograma del fluido estudiado es la curva dada para $\tau = f(\dot{\gamma})$.

En general, para fluidos no newtonianos independientes del tiempo, y exceptuando a los plásticos de Bingham, podemos considerar válida la ecuación de Ostwald -De Waele, descrita en el capítulo I.

La ecuación de Ostwald, al ser genérica, no nos llevaría en el laboratorio a ningún resultado, por lo que buscaremos en el laboratorio una expresión más concreta de dicha ecuación, en la que figuren parámetros que nosotros podamos determinar en el laboratorio. Para ello nos basaremos en los estudios de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed, los cuales llegaron a unas expresiones válidas para todo fluido no newtoniano independiente del tiempo (relacionado en la figura 2.2), expresiones en las cuales todos los parámetros se pueden hallar experimentalmente, excepto dos que determinaremos mediante la representación en papel logarítmico de la función (Laurencio, 2007).

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4L} = f\left(\frac{8u}{D}\right) \quad (2.6)$$

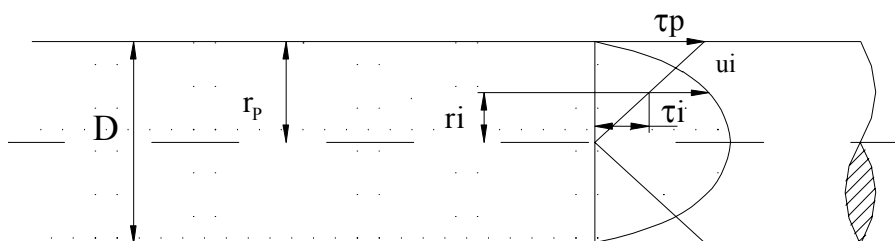


Figura 2.2: Flujo de un fluido no newtoniano, independiente del tiempo, por una tubería de sección circular y diámetro igual a D.



Donde:

t_p : Tensión tangencial en la pared del tubo.

u_i : Velocidad en un punto genérico de radio r_i .

τ_i : Tensión tangencial en un punto genérico de radio r_i .

D : Diámetro de la tubería

El primer término de esta expresión es el valor de la tensión tangencial en la pared de un tubo, para todo fluido no newtoniano, independiente del tiempo y de acuerdo con los estudios de Rabinowisch-Mooney.

$$\tau_p = \frac{D \cdot \Delta p}{4 \cdot L} \quad . \quad (2.7)$$

Donde:

D : Diámetro de la tubería.

L : Longitud de la tubería.

ΔP : Diferencia de presión entre la entrada y la salida.

El gradiente de velocidad se puede expresar en función de la velocidad media del fluido en la sección recta, u , y del índice de comportamiento al flujo n .

$$\dot{\gamma} = \frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8u}{D} \quad . \quad (2.8)$$

Todos los parámetros son medibles experimentalmente menos n y k' que salen de representar en papel log-log la función recogida en la expresión.

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4L} = f\left(\frac{8u}{D}\right) \quad . \quad (2.9)$$

La función representada es una recta de pendiente n y de ordenada en el origen k' : (Figura 2.3).

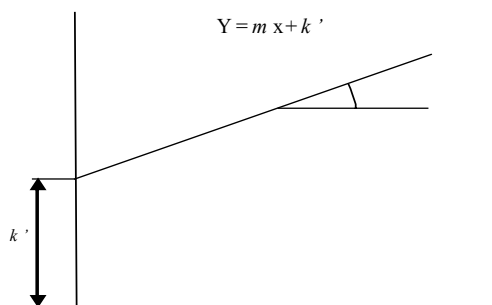


Figura 2.3. Representación de $\frac{D \cdot \Delta P}{4L} = f\left(\frac{8u}{D}\right)$



El valor de la constante k de la expresión de Ostwald se obtiene de la expresión.

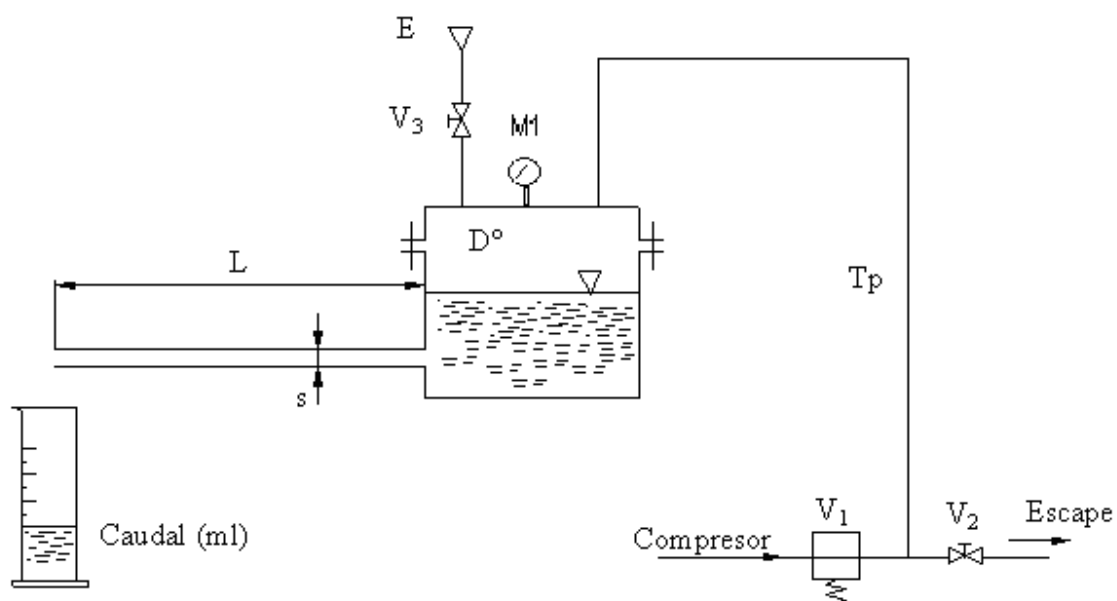
2.5 - Funcionamiento del reómetro

El esquema detallado de la instalación aparece en la figura 2.4, donde D° es un depósito hermético de acero inoxidable en el cual se introduce el fluido problema, a través del embudo E, que está comunicado con el depósito mediante la válvula V3. La presión se transmite al depósito mediante la tubería Tp, gracias a la válvula V1, midiéndose dicha presión con un transductor de presión conectado al indicador digital ID.

El manómetro M1, mide la presión relativa entre 0 y 6 bar. (ver en el anexo II).



En el tubo T de acero inoxidable, de diámetro D y longitud L, se basa el estudio para la determinación del reograma del fluido problema.



2.5.1 Metodología de toma de datos

Conociendo el diámetro del tubo (D), su longitud (L) y como el caudal será igual a:

$$Q = u \cdot S . \quad . . . \quad (2.11)$$

u : Velocidad media.

S : Sección del tubo: $S = \pi \cdot D^2 / 4$

$$u = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}. \quad . \quad . \quad .(2.12)$$



Conocida la velocidad se calculan las siguientes relaciones:

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4 \cdot L} = Y_i \text{ [Pa]}. \quad \dots \quad (2.13)$$

$$\frac{8 \cdot u}{D} = X_i \text{ [s}^{-1}\text{]}. \quad \dots \quad (2.14)$$

El término ΔP es la diferencia de presión entre la entrada y la salida del dispositivo (medida en Pascales).

A continuación se representa $\log (X_i)$ en función de $\log (Y_i)$, ajustando una recta del tipo $y = mx + b$ en el que la pendiente m es n y la ordenada en el origen b es k' , pudiéndose obtener por tanto:

$$k = k' \cdot \left(\frac{4n}{3n + 1} \right)^n. \quad \dots \quad (2.15)$$

Con todo ello se obtendrá la curva reológica que será de la forma $\tau = k (\dot{\gamma})^n$

- Presentación y tratamiento de los resultados.

Se deberán presentar los datos experimentales tal como fueron obtenidos en el Laboratorio. Además se realizará una tabla de resultados parecida a la siguiente:

Tabla 2.4. Presentación y tratamiento de los resultados.

ΔP (bar)	ΔP (Pa)	V (m ³)	t (s)	Q (m ³ / s)	$\frac{D \cdot \Delta P}{4L}$ (Pa)	$\frac{8 \cdot u}{D}$ (s ⁻¹)

Al mismo tiempo, se realizarán las gráficas pertinentes, y en el caso de ajuste de rectas de regresión se presentarán los valores obtenidos y el coeficiente de correlación. Este procedimiento a sido automatizado en una Hoja de cálculo de EXCEL mostrada en el ANEXO 4, lo que viabiliza el proceso de experimentación.



2.6- Conclusiones del capítulo

- Se establece la tecnología de fabricación del reómetro de acuerdo a los materiales y métodos empleados, en el que se dan las características de los materiales más utilizados.
- Según la literatura consultada, en la soldabilidad del acero AISI 316L es necesario el empleo del diagrama de Schaeffler ya que este interrelaciona la composición química del metal base y del electrodo con la estructura metalográfica de los mismos.
- Quedan expuestos, los modelos matemáticos de la operación de sistemas de flujo en los procedimientos metodológicos tradicionales y los materiales y métodos que se emplean en la investigación y obtención de los parámetros reológicos.



ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1- Introducción

La evaluación final de un proyecto o investigación, es de primordial importancia para establecer, en que medida esta ha contribuido al desarrollo. El correcto análisis, permite sentar las bases para futuros trabajos que se desarrollen sobre la temática; de ahí su significativa relación con la economía, la sociedad y el medio ambiente.

Se establece como **objetivo** del capitulo; exponer los resultados económicos e incidencias medio ambientales, tenias en cuenta en la fabricación del reómetro.

3.2- Resultados obtenidos del Funcionamiento del reómetro

A modo de prueba se realizaron 10 corridas experimentales con el fin de demostrar el funcionamiento del reómetro. En las mediciones se tomaron las caídas de presiones (presiones registradas por el manómetro), el volumen de líquido en la probeta y el tiempo de llenado. Con la ayuda de la hoja de calculo de Excel (anexo IV) se calcularon los parámetros necesarios para la obtención del comportamiento reológico. Estos resultados se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados experimentales y calculados.

N°	dP (kgf/cm ²)	dP (Pa)	V (mL)	V (m ³)	t (s)	Q (m ³ / s)	v (m/s)	τ (Pa)	γ (s ⁻¹)
1	0,061	5982,06	670	0,0007	9	7,4444E-05	2,63427	4,48654	3512,35878
2	0,072	7060,79	850	0,0009	10	0,000085	3,00778	5,29559	4010,37981
3	0,081	7943,39	800	0,0008	8	0,0001	3,53857	5,95754	4718,09389
4	0,09	8825,99	900	0,0009	9	0,0001	3,53857	6,61949	4718,09389
5	0,09	8825,99	780	0,0008	5	0,000156	5,52017	6,61949	7360,22647
6	0,095	9316,32	950	0,001	8	0,00011875	4,20205	6,98724	5602,73649
7	0,094	9218,25	900	0,0009	7	0,00012857	4,54959	6,91369	6066,12072
8	0,15	14710	950	0,001	4	0,0002375	8,4041	11,0325	11205,473
9	0,16	15690,6	1100	0,0011	5	0,00022	7,78485	11,768	10379,8066

En la figura 3.1 y 3.2 se han graficado las dependencias, caída de presión en función de la velocidad y esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad.

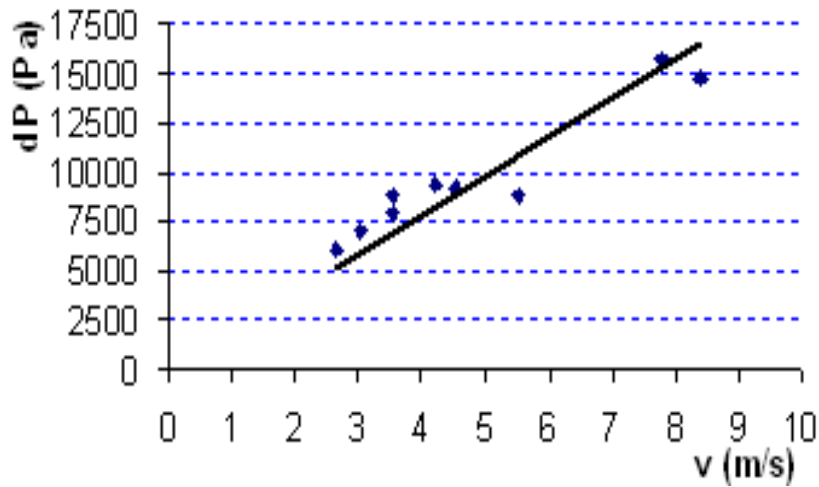


Figura 3.1. Caída de presión en función de la velocidad.

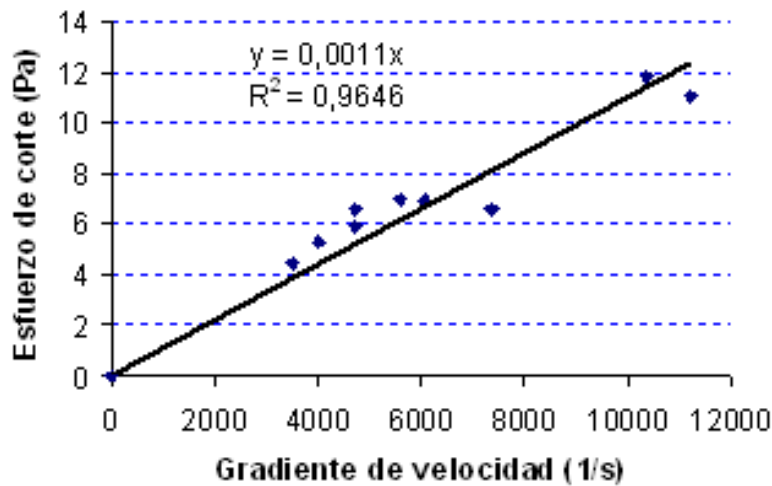


Figura 3.2. Reograma del fluido.

En los dos gráficos la dispersión a sido asociada los errores de medición del tiempo de llenado, para el mismo en otras mediciones se debe utilizar un cronometro en ves de reloj, lo que disminuirá el valor de los errores. Otra vía de mitigar los errores es el aumento de replicas experimentales. Según el ajuste de los datos se obtuvo el modelo siguiente.

$$\tau = 0.0011 \cdot \frac{dv}{dy} \quad (3.1)$$

Este se corresponde con un fluido newtoniano, donde el coeficiente dinámico de viscosidad se corresponde a $\mu = 0,001 \text{ Pa.s}$, correspondiéndose con la viscosidad del agua para las condiciones experimentadas.



Los datos de la figura 3.2, se han ajustado a una línea recta, siendo esta la opción de ajuste más acertada que se corresponde con un fluido newtoniano, lo que se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3. Formato de línea de tendencia.

3.3- Análisis del costo de fabricación

El Procedimiento de Soldadura constituye el punto de partida para establecer los costos de soldadura. Dicho procedimiento, para tener valor debe incluir los detalles geométricos de la unión soldada, los que permiten establecer la cantidad de metal que es necesario depositar durante la soldadura de dicha unión. El procedimiento debe incluir además el proceso de soldadura, el tipo de metal de aporte empleado y el régimen de soldadura, entre otros aspectos. La metodología de cálculo desarrollada se encuentra en el anexo # 5, los resultados se demuestran en la tabla 3.2

Tabla 3.2. Resultados del calculo del proceso de soldadura.

Cantidad de electrodos Ec.2.1	Tiempo principal de soldadura Ec.2.2	Potencia térmica completa Ec.2.3	Potencia térmica efectiva Ec.2.4	Energía específica Ec.2.5
1 kg	60 minutos	432 Kcal./s	324kcal.w/s	216 cal/cm.

La tecnología de reacondicionamiento de la pieza se encuentra en los anexos 6 y7.



- Cálculo de costo y consumo de soldadura.

Es habitual que quien tiene que efectuar o presupuestar un trabajo de soldadura de unión de un recipiente, una estructura o una construcción en particular, se vea en el problema de calcular cuanto material de aporte (varillas, alambres, fundentes, electrodos, etc.) necesita y muchas veces también el costo total de dicho trabajo.

$$C_{sk} = \frac{M}{J} + \frac{C}{D.B} + \frac{E.U.I}{1000.D} + \frac{A}{D.B} \$ / kg . \quad . \quad . \quad .(3.2)$$

Donde:

C_s = Costo total por kg de metal depositado; \$/Kg.

M = Costo del material de aporte; \$/Kg.

J = Rendimiento del material o eficiencia del proceso; %

C = Costo de la mano de obra directa; \$/h

D = Velocidad de deposición; Kg./h

B = Factor de marcha u operatividad; %

E = Costo de la energía eléctrica; \$/Kwh.

U = Tensión; V

I = Intensidad de corriente; Amp

A = Costos indirectos (MO indirecta, amortización, seguro, etc.); \$

- El tiempo de servicio del puesto de trabajo (T_{spt}), se tomará entre un 3-5% del tiempo operativo.
- El tiempo de descanso del obrero (T_{dnp}), se tomará entre un 5-15% del tiempo operativo.
- Para gasto de MOI, se toma aproximadamente un 30% del tiempo operativo, excepto para el tratamiento térmico.

**- Costo de materiales empleados.**

En la tabla 3.3 se resumen los costos de materiales empleados en la fabricación, lo que permite tener en cuenta los gastos en materiales.

Tabla 3.3. Costo de materiales empleados.

Nº	Descripción	U. de Med.	Cantidad	MN	MLC	Total
1	Válvula de bola inoxidable 1/2´	U	2,00	8,78	8,78	17,56
2	Válvula de bola inoxidable 1´	U	2,00	20,25	20,25	40,50
3	Tubo inoxidable ϕ 150 mm	m	0,50	41,00	41,00	20,50
4	Platillo inoxidable ϕ 150 mm	U	2,00	94,50	94,50	189,00
5	Manguera 3/8´ de 6 m	U	1,00	10,70	10,70	10,70
6	Tornillo M20x80 con tuerca	U	8,00	2,50	2,50	20,00
7	Tornillo M12x50 con tuerca	U	4,00	0,90	0,90	3,60
8	Plancha inoxidable de 4mm	m	0,15	300,00	300,00	45,00
9	Tubo inoxidable 1´	m	0,20	52,00	52,00	10,40
10	Platillo de acero ϕ 40 mm	U	2,00	4,90	4,90	9,80
11	Tubo inoxidable de 1/2´	m	0,30	40,00	40,00	12,00
12	Tubo inoxidable ϕ 1/4´	m	2,00	15,00	15,00	30,00
13	Electrodos E 316 x2.4	Kg.	1	10.75	10.75	21.50
14	Mano de obra	u	1	1.42		1.42
15	Energía	Kw./h	216	-	56	56

3.4- Análisis de la incidencia medioambiental y de seguridad laboral

Los rayos invisibles ultravioletas, producidos por el arco eléctrico influyen perjudicialmente en la vista del obrero. Si miramos sin protegernos a la luz del arco durante 5 - 10 minutos, después de 1 -2 horas sentiremos unos dolores muy fuertes en los ojos, comienza el lagrimeo, se inflaman los párpados, etc. En este caso será necesario dirigirse al médico.

La prolongada acción de los otros rayos invisibles (infrarrojos), que también son producidos por el arco eléctrico, provoca enfermedades de la vista muy serias.

Para proteger la vista del soldador se usan unas caretas y cascos especiales con cristales protectores. Esos cristales no dejan pasar por ejemplo los rayos ultravioletas, y la filtración de los rayos infrarrojos es muy pequeña aproximadamente de 0,1 a 3 % de la cantidad total.

Para proteger al personal que nos rodea de la acción de los rayos del arco eléctrico, los lugares donde se efectúa la soldadura se deben proteger con pantallas impenetrables, con cabinas de lona u otro material teniendo una altura de 1,8 metros. Para mejorar la ventilación en el interior de la cabina las paredes no se llevan hasta el piso en unos 25 - 30



cm. Para disminuir la diferencia de la luminosidad de la luz, sería mejor que las paredes de la cabina se pinten en colores claros mates (en gris, azul, verde, amarillo) y aumentar la iluminación artificial en el puesto de trabajo.

- Contaminación del aire con el polvo y con los vapores y gases nocivos.

En el proceso de la soldadura a causa de la oxidación de los vapores del metal se forman polvos. En la zona próxima a la llama del arco eléctrico la cantidad de polvo puede alcanzar 130 mg/m^3 de aire. En los talleres de soldadura el contenido de polvo en el aire no debe ser mayor de 5 mg/m^3 de aire. El contenido del óxido de nitrógeno en el aire no debe ser mayor de 3 mg/m^3 . Durante la soldadura, además de los óxidos de nitrógeno, se forma el óxido de carbono, el cual no debe ser mayor de $10 - 20 \text{ mg/m}^3$ de aire. Para eliminar el polvo y los gases nocivos (óxidos de cobre, de manganeso, fluoruros), sobre los puestos permanentes de la soldadura se hacen unos aspiradores locales con la instalación de campanas de ventilación.

La cantidad de aire aspirada de cada puesto de soldar, debe ser de $4\,000$ a $6\,000 \text{ m}^3$ por cada kilogramos de electrodos consumidos. Es particularmente perjudicial la soldadura que se efectúa en el interior de recipientes, donde se acumula una gran cantidad de polvo y gases nocivos. En este caso para mejorar la ventilación al recipiente se le suministra aire puro. Mejores resultados ofrecen el suministro de aire de ventilación directamente a la zona de respiración del soldador, suministrando el aire por una manguera a la careta del soldador, la cual posee una empuñadura hueca y doble cristales. Durante la soldadura en caliente, es imprescindible instalar campanas de tiro, para extraer los productos de combustión de los hornos y pozos calentadores. La soldadura de zinc, del latón y del plomo se debe efectuar con caretas para protegerse de la aspiración de esos óxidos y vapores que desprenden el zinc, cobre y plomo.



3.4.1- Técnicas de seguridad antes, durante y después de la jornada laboral

Al soldador se le prohíbe.

- Mirar al arco de la soldadura sin protegerse los ojos, así como usar espejuelos sin pantalla.
- Soldar próximo a materiales combustibles.
- Unir o colocar los cables de soldaduras junto con mangueras de oxicorte y tubería bajo presión o altas temperaturas, así como próximo a balones de oxígeno y acetileno.
- Arreglar el circuito de baja tensión cuando el circuito este conectado.
- Soldar recipientes o tuberías bajo presión.
- Soldar y cortar en recipientes con las compuertas cerradas.
- Tirar y dejar de observar la tenaza eléctrica bajo tensión eléctrica.
- Cortar y colgar piezas colgantes.
- Desconectar el cable de la soldadura dándole tirones sin acercarse al reóstato.
- Ejecutar trabajos de soldaduras fuera del área destinada al efecto sin la autorización de la administración del área donde labora.
- Trabajar cerca de otras personas, limitar el puesto de trabajo.
- Conectar y reparar la maquina de soldar.
- Trabajar la máquina de esmeril cuando existe mucha separación entre el apoyo y la piedra de esmeril, no más de 3 mm.
- Trabajar con esligas que tengas más de 10 alambres partidos distribuidos al azar o 5 partidos en un mismo torón.
- Trabajar bajo los efectos de drogas o algún medicamento que impidan el desarrollo normal de trabajo.



Requisitos de seguridad antes de comenzar el trabajo.

- Solicitar vía libre y permiso de seguridad en caso de que lo requiera.
- Utilizar equipos de extinción de incendios adecuados en lugares de posible incendio.
- Delimitar el área de trabajo.
- Revisar el buen estado técnico de los medios de protección personal como: cascos, guantes de soldar, caretas antigas con filtro para amoniaco, botas de gomas, faja de fuerza, cinturón de seguridad, caretas de soldar, delantal, manga y polaina para soldar, traje de protección química.
- Revisar el estado técnico de la maquina de soldar y sus accesorios como cables de soldar y tenazas el cual debe estar bueno.
- Chequear la toma a tierra de la maquina la cual debe ser la correcta.
- Revisar el estado técnico de los medios de izaje y eslingas el cual debe ser bueno.
- Comprobar que el equipo donde se vaya a realizar el trabajo este limpio, drenado y libre de contaminantes.
- Revisar el puesto de trabajo y convencerse que están preparadas todas las condiciones de seguridad.
- Chequear el correcto alumbrado del área y el puesto de trabajo.

Requisitos de seguridad durante el trabajo.

- Prestar la debida atención durante la realización de su trabajo y no distraer a los demás.
- La maquina de soldar se colocara lo mas cerca posible de la toma de corriente para evitar que la extensión eléctrica de alto voltaje pueda ser dañado con el trasiego de los materiales.
- Utilizar todos los medios de protección personal descrito en el punto anterior
- Realizar una selección adecuada del cristal en dependencia del tipo de material a trabajar y del amperaje necesario.
- Comprobar el buen estado técnico de los andamios (barandas, pasamanos, escaleras y plataformas) al realizar trabajos en alturas.
- Soportar las líneas donde se realiza el trabajo para evitar caídas de las mismas..



- Cuando se realicen labores de ajuste, medición y pruebas manuales en las cercanías de partes móviles de los medios de trabajo tener previsto dispositivos o medidas especiales para garantizar la seguridad.
- Usar cinturón de seguridad en trabajo que así lo requieren (altura de mayor de 3 m), en lugares de poca área de apoyo, piso resbaladizo, trabajo en exteriores.
- Para levantar cargas, se deben usar eslingas en buen estado técnico con los dispositivos de sujeción requeridos y lograr el centro de gravedad de la carga.
- Las piezas de trabajo deben colocarse lugares seguros que no obstruyan las vías de acceso.
- No se pondrá nunca sobre una carga izada, para guiar la misma utilice las sogas.
- Durante las pruebas de los equipos a alta velocidad, no debe situarse en el sentido de rotación de estos sino frente al eje.
- Cuando se realicen pruebas en equipos que trabajen a altas presiones de vapor, agua caliente, gases deben mantenerse a distancia que no ofrezca peligro hasta que se avise por el operador del equipo el establecimiento del régimen normal de trabajo a su parada para la corrección del posible defecto.
- Al realizar trabajos en tuberías, bombas que contengan ácido, usar trajes contra ácido y espejuelos para evitar el contacto con los mismos.
- Cumplir las medidas dispuestos en relación con la preservación del lugar y la notificación inmediata al ocurrir un accidente, incendio, explosión o avería.
- No arrancara ni parara ningún equipo sin autorización.
- En caso de presentar defectos los equipos de trabajos y herramientas comunicarlo al jefe de inmediato.
- No usar las mangueras de aire comprimido para la limpieza de las ropas o secado de manos.
- En caso de deficiencias en los equipos, debe comunicárselo de inmediato al J' de brigada.
- Las superficies de las mesas y bancos de trabajo deberán estar libres de grasas, las mesas y bancos de trabajo se mantendrán debidamente ordenados y libres de limallas, objetos innecesarios, derrames, grasas, aceites, etc.



- No use los cilindros, los mismos si están llenos o vacíos como rodillos, soporte o cualquier otro uso que no sea el contenedor.
- No haga variaciones o toque lo que no debe en los dispositivos de seguridad de las válvulas y cilindros.
- Use los cilindros en una posición vertical y asegúrelos para que no sean volteados accidentalmente.
- Cerciórese de que la rosca de unión de un regulador corresponda con aquella del conducto de salida de la válvula del cilindro. No fuerce las conexiones que no ajustan.
- Para abrir las válvulas de los cilindros no provista de ruedas de manos para su accionamiento manual, use siempre llaves especiales debidamente aprobadas para este tipo de trabajo.
- Antes de hacer la conexión con una válvula de salida, permítale un pequeño desalojo a la válvula por un instante abriendo la llave $\frac{1}{4}$ de vuelta para limpiar la apertura de partícula de polvos o suciedad. No haga esto a válvulas de cilindro de hidrógeno. Siempre apunte la apertura de la válvula en dirección contraria a su propio cuerpo o al de otra persona.
- No intente detener una filtración o salidero entre cilindro y regulador apretando la tuerca de conexión, sin antes cerrar bien la válvula del cilindro.
- Los cilindros de gases combustibles en que ocurran salideros, deben quitarles del servicio inmediatamente y manipularse como sigue: Cierre la válvula y lleve el cilindro al exterior bien lejos de cualesquiera fuentes de ignición. Póngale una etiqueta apropiada al cilindro y notifique al responsable correspondiente. Un regulador unido a la válvula puede ser usado temporalmente para detener el salidero a través del asiento de la válvula. Si el salidero ocurre en el tapón fusible u otro dispositivo de seguridad saque el cilindro al exterior, bien lejos de cualquier fuente de ignición; Abra la válvula del cilindro ligeramente y permita escapar el gas combustible despacio. Póngale una etiqueta adecuada, en lugar visible.
- Nunca use grasa o aceite como lubricantes en válvulas o accesorios de un cilindro de oxígeno.



Requisitos de seguridad al finalizar el trabajo.

- Cuando el soldador termina su trabajo debe dejar el área limpia y ordenada.
- Organizar y limpiar los medios de trabajo, guardar los mismos en un lugar seguro.
- Informar a los superiores la terminación de su trabajo y los problemas detectados durante el mismo.
- Informar si la puesta en marcha del equipo no ocasiona daño a la economía o causa un accidente lamentable.
- Se bañará como medida de aseo personal y se cambiará la ropa.

3.5- Conclusiones del capítulo

1. Quedaron establecidos los resultados preliminares de las pruebas realizadas al reómetro en el ISMM.
2. Se realiza el análisis económico de los gastos incurridos en el proceso de fabricación del reómetro; siendo el costo total de \$486.56 y 487.98 CUC.
3. Se valoraron los peligros relacionados con la ejecución de los trabajos de soldadura y su impacto en el medio ambiente.



CONCLUSIONES

1. Teniendo en cuenta las características del acero AISI 316, se elaboro la tecnología de fabricación y soldadura con el fin de obtener una mejor soldabilidad y acabado del instrumento.
2. Con este equipo se puede experimentar el estudio tanto de fluidos newtonianos y no newtonianos para los cuales en este trabajo se especifica la metodología de toma de datos y obtención de resultados.
3. Con la fabricación del reómetro de tubo capilar se ha garantizado la obtención de datos experimentales para fluidos industriales. Para el mismo se ha realizado la comprobación con agua donde se obtuvieron resultados con errores menores que 0.0011%
4. El costo de fabricación teniendo en cuenta la mano de obra y materia empleado fue de \$ 487.98 que indica el ingreso económico de este equipo al ISMMM.



RECOMENDACIONES

1. Según lo establecido en este trabajo tomando como referencia lo planteado por otros autores se debe tener en cuenta para el caso de la realización de soldaduras del equipo usar electrodo de los menores diámetros posibles (2.4) que evita el calentamiento y aparición de grietas.
2. Utilizar para el estudio reológico de cualquier fluido la tabla dinámica en Excel la cual facilita la obtención de datos de forma mas simplificada.
3. Para la operación con el reómetro se debe tomar como medida de precaución que se trabaja con altas presiones, por lo que se debe examinar las uniones y accesorios antes de la puesta en marcha.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Banerjee T.P., M.Das y S.K. Das. *Non-Newtonian Liquid Flow Through Globe and Gate Valves*. Canadian Journal of Chemical Engineering: 72 (Abril), 207-211 (1994).
2. Bandala M. *Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos*. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México , 2001.
3. Caldiño V. I., Salgado M. G. *Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México. VII Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica. (2004).
4. Chen, T.Y., Mohammed, R.A., Bailey, A.I., Luckham, P.F., Y Taylor, S.E., *Dewatering of crude oil emulsions. Emulsion resolution by the application of an electric field, Colloids and Surfaces: Physicochemical and Engineering Aspects*, 83, 273-284, 1994.
5. De Meyer, M.; D. Toch y B. C. De Cooman: The characterisation of retained austenite in trip steels by X-Ray Diffraction. En: Proceedings of 41th Mechanical Working and Steel Processing Conference. Baltimore, MD. 2001. Vol. XXXXVII. Págs: 483-491
6. Dumov, S. I.: Tecnología de soldadura eléctrica por fusión. Ed. Construcción de Maquinaria. 1987. 461 pp.
7. Ferro, A., *Estudio de la sustitución de las pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente P*. Tesis de Maestría, Universidad de
8. García E.J. y. Steffe J.F., *Comparison of Friction Factor Equations for Non-Newtonian Fluids in Pipe Flow*. Journal of Food Process Engineering: 9, 93-120, 1987.
9. Ibarz A., J. Vélez y G. Barbosa. Transporte de Alimentos Fluidos a Traves de Tuberías. Inéditos: 60 hojas. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
10. Ibenskii, G.B. *Transporte de las mezclas de materiales para la construcción por tuberías*. Moscú: Gosstroishdat, 1957.
11. Izquierdo, P.R. *Estudio de la instalación de hidrotransporte a presión de la pulpa laterítica de la Emp. Cmdte Pedro Soto Alba*. Revista Minería y Geología, 1989, (3): 16-22.
12. Izquierdo P. R., Turro B. A., Nikolaev A., *Hidrotransporte del mineral laterítico en regimen estructural*. Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez ,Revista Minería y Geología Vol . XVII I, No. 2, 2001, ISSN 0258 5979 pag. 53 – 59.
13. Liang, C., *Experimental Study of the Effect of Magnetic Treatment on Crude Oil in a Pipeline*, Oil & Gas Storage Transp., V 9, No. 1, 1990.



14. Lai, G. Y.: Heat Resistant Materials for Furnace Parts, Trays and Fixtures: Heat treating. ASM Handbook, Ohio: ASM International Vol. 1. 1992. Págs: 510-518.
15. Macedo C., Martínez J. y Vélez. J., *Diseño, Construcción y Validación de una Unidad Piloto Para el Manejo de Fluidos Newtonianos*. Información Tecnológica: 12 (6), 169-176, 2001.
16. Mechetti M., Fornés A., Maturano S. y Zapana L., *Efecto electrorreológico en crudos argentinos*, Congreso Producción 2000 y III Workshop Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú. Misiones, Argentina, 2000.
17. Mechetti, M. y Zapana L., *Estudios electrorreológicos de fluidos basados en dispersiones de asfaltenos*, Congreso Producción 2000 y III Workshop Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú. Misiones, Argentina, 2000.
18. Mechetti, M. y Zapana L., *Estudio comparativo de actividad electrorreológica en petróleos argentinos*, I Encuentro Internacional de Física aplicada a la Industria del Petróleo y IV Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada, Bucaramanga, Colombia, 2000.
19. Mechetti M., Rodríguez L., CASTAÑEDA, M. y Pelaez C., *Informe ICP*, Ecopetrol, julio 2001.
20. Nakayama T., E. Niwa y I. Hamada., *Pipe Transportation of Minced Fish Paste*. Journal of Food Science: 45 (4), 844-847 (1980). Om N., Loginapaulo V. y Cavado A., *Composición de los petróleos pesados cubanos*, CEINPET, Oil & Gas Journal Latinoamérica, Volumen 10, numero 1, enero / febrero, 2004.
21. Placencia A. y Martínez D., *Formulación de Emulsiones de Petróleo Pesado en Agua a Nivel Piloto y Estudio de las Pérdidas Friccionales en Tubería*, Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico PETROECUADOR. Quito – Ecuador, 2000.
22. Perona P., *An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids*. Journal of Food Engineering: 60, 137-145, 2003.
23. Rodríguez, Hector. "Metalurgia de la soldadura". Editorial Pueblo y Educación 1983. 613 pp
24. Sablani S.S. y Shayya W.H., *Neural Network Based Non-Iterative Calculation of the Friction Factor for Power Law Fluids*: 57, 327-335, 2003.



25. Shah, B. K.; A. K. Shina; P. K. Rastogi y P. G. Kulkarni: Effect of prior cold work on low temperature sensitisation susceptibility of austenitic stainless steel AISI 304. En: Materials Science and technology, Vol (6). Febrero 1990. Págs: 157-160.
26. Vélez J., *Apuntes de Ingeniería de Alimentos I*. Universidad de las Américas, Puebla, México. Inéditos, 2003.
27. Viswanathan, R. y J. Nutting: Advanced heat-resistant steels for power generation, London: The Institute of Materials, 1999.
28. Welty J.R., R.E. Wilson y Wicks C.E., *Fundamentals of momentum, Heat and Mass Transfer*, Ed. J. Wiley and Sons. Nueva York, EUA. pp. 202-219, 1976.

Anexo V

Tecnología de fabricación del geómetro.

2.1. Calculo de cantidad de electrodos para la Soldadura

$$C_E = \frac{S.Lc}{10^6} \cdot \delta(1,2) .$$

$$C_E = \frac{4mm * 2481mm * 8.85 * 1.2}{10^6} .$$

$$C_E = 1 \text{ kg}$$

2.2. Calculo del tiempo principal de soldadura.

$$t_o = \frac{\delta(F)Lc}{K_H \cdot I} \text{min} .$$

$$t_o = \frac{8.85(19.2) * 2481mm}{(9.5) * 72A} .$$

$$t_o = 60 \text{ min}$$

2.3. Potencia termica completa

$$Q_{comp} = 0,24 \cdot K \cdot I_{arco} \cdot U_{arco} .$$

$$Q_{comp} = 0.24 * 1 * 72 \text{ A} * 25V$$

$$Q_{comp} = 432 \text{ K cal W/seg}$$

2.4. Potencia termica efectiva

$$Q_{effect} = 0,24 \cdot K \cdot I_{arco} \cdot U_{arco} \cdot \eta .$$

$$Q_{effect} = 0.24 * 1 * 72 \text{ A} * 0.75V$$

$$Q_{effect} = 324 \text{ K cal W/seg}$$

2.5. Potencia termica especifica

$$q_{esp} = \frac{0,24 \cdot K \cdot I_{arc} \cdot U_{arc} \cdot \eta}{V_{sol}} ; \text{cal} / \text{cm} .$$

$$q_{esp} = \frac{0,24 * 1 * 72A * 25V * 0.75}{1.5} .$$

$$q_{esp} = 216 \text{ Cal/cm}$$