



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable con diésel y biodiesel.

OSCAR JAVIER GARCÍA GARCÍA
DIEGO ALEJANDRO CARVAJAL CASTIBLANCO

Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas
Bogotá, Colombia
2019

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable con diésel y biodiesel.

Oscar Javier García García
Diego Alejandro Carvajal Castiblanco

Tesis de investigación presentada(o) como requisito para optar al título de:
Ingeniero mecánico

Director(a):

Msc. Williams Steve Hincapié Campos

Codirector

PhD. Jesús Manuel Gutiérrez Bernal

Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas
Bogotá, Colombia
2019

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Dedicatoria

A cada uno de nuestros familiares que siempre estuvieron brindándonos su apoyo incondicional durante cada etapa del proceso haciendo diariamente más confortable el mismo.

A los compañeros, amigos, instructores y/o de más personas que hicieron parte del proceso evolutivo de nuestra carrera fortaleciendo e incrementando constantemente el campo del conocimiento.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Agradecimientos

Para esta etapa muy importante de nuestras vidas agradecemos profundamente a DIOS por ser ese pilar de apoyo y perseverancia que acompaña a cada uno de nosotros en cada paso que dábamos en este proceso.

A nuestras familias (esposas, hijos, padres, hermanos) por su apoyo incondicional, consejos, compañía y palabras de aliento que siempre son muy importantes para la realización de las metas proyectadas.

A nuestro directos de tesis Williams Steve Hincapié Campos y Codirector Jesús Manuel Gutiérrez Bernal, por sus consejos, acompañamiento continuo, asesorías permanentes y enseñanzas a lo largo de este proceso.

Finalmente, a las personas que estuvieron con nosotros durante el tiempo de formación.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Resumen

Debido a la aplicación de nuevas fuentes de energía en el mundo gracias a los constantes avances de la tecnología y necesidades del planeta, ha surgido la utilización del Biodiesel como alternativa importante en la sustitución de combustible fósil en los motores Diésel ya que se vuelve un componente con grandes ventajas tanto para el equipo como para el medio ambiente.

En esta tesis. Se realizó un estudio con una de las válvulas de un vehículo alimentado por combustible Diésel. (se escogió este tipo de motor debido al gran impacto que contraen estos buses en el sistema integrado de transporte de Bogotá “Sitp-Transmilenio”), esto con el fin de conocer la velocidad de corrosión que se genera en los componentes internos del motor que poseen las mismas características químicas, realizamos un estudio de corrosión en condiciones atmosféricas de presión y temperatura ambiente con los combustibles diésel y biodiesel grado 12 logrando identificar cuál de los dos es menos susceptible a la corrosión, conllevando así a lograr demostrar que el biodiesel al ser biodegradable tiende a tener menores efectos de corrosión en dicho material del cual están comprendidas estas válvulas referente al incrementando de la vida útil de las mismas y los componentes del motor que poseen los mismos elementos químicos.

Para la búsqueda de dichos resultados nos proyectamos dos distintas pruebas para demostrar la afectación del material de estas válvulas con los combustibles elegidos. Se evaluó el comportamiento de este material con Diésel y Biodiesel para establecer la comparativa del accionar de cada uno. Se realizaron ensayos de inmersión a temperatura ambiente y ensayos de corrosión TAFEL. En los ensayos de inmersión, el material estuvo expuesto 720 horas, registrando periódicamente su peso con una balanza de precisión de resolución 0.00001 g.

Palabras claves: válvula, motores, TAFEL, diésel, biodiesel, corrosión.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Abstract

Due to the application of new energy sources in the world thanks to the constant advances in technology and needs of the planet, the use of Biodiesel has emerged as an important alternative in the replacement of fossil fuel in diesel engines as it becomes a component With great advantages for both the equipment and the environment.

In this thesis, a study was carried out with one of the valves of a vehicle of the reference commercial brand --2M that is fueled by diesel fuel, (this type of engine was chosen due to the great impact that these buses contract on the system integrated transport in Bogotá "Sitp-Transmilenio"), in order to know the corrosion that occurs in the engine components that have the same characteristics of the chemical components, we conducted a study of corrosion in them with diesel fuels and Grade 12 biodiesel, identifying which of the two is more susceptible to corrosion, thus leading to demonstrate that biodiesel being biodegradable tends to have less corrosion effects on said material of which These valves are included referring to the increase of the useful life of the same and the components of the motor that it has in the same chemical elements.

For the search of these results, two different tests are projected to demonstrate the involvement of the material of these valves with the chosen fuels. The behavior of this material with Diesel or Biodiesel was evaluated to establish the comparison of the actions of each one. Immersion tests at room temperature and TAFEL corrosion tests were performed. In the immersion tests, the material was exposed for 30 days or 720 hours, periodically recording its weight with a precision balance with a resolution of 0.00001 g. In addition to this.

Keywords: valve, engines, TAFEL, diesel, biodiesel, corrosion.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Tabla de Contenidos

INTRODUCCIÓN.....	14
OBJETIVOS	16
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES.....	17
1.1. Características del diésel y el biodiesel.	18
1.2. Antecedentes o estudios previos corrosión por biodiesel.	22
1.3. Espectroscopia de Energía Dispersiva de rayos X (EDS).	25
1.4. Aceros inoxidables.....	26
1.5. Características y aplicaciones de los tipos de los aceros inoxidables más comunes	29
1.6. Acero 440c inoxidable	32
1.7. Técnicas de corrosión método pérdida de peso	34
1.8. Extrapolación de Tafel	35
1.9. Inspección metalográfica	38
1.10. Preparación de la superficie	42
1.11. Ensayos de dureza.....	42
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	47
2.1. Preparación y alistamiento del material.....	49
2.2. Caracterización del material	52
2.2.1. Caracterización del material método EDS.....	52
2.2.2. Ensayos de micro dureza	52
2.3. Conductividad eléctrica de los combustibles (diésel y biodiesel)	54
2.4. Ensayos de corrosión.	54
2.4.1. Ensayo pérdida de masa por inmersión total a temperatura ambiente.....	54
2.4.2. Ensayo de corrosión TAFEL	56
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
3.1. Resultados de la caracterización del material	60
3.2. Efectos corrosivos diésel y biodiesel sobre el material por método de inmersión total a temperatura ambiente.....	63
3.3. Efectos corrosivos diésel y biodiesel sobre el material por método de corrosión TAFEL.....	69
3.4. Análisis comparativo de los dos tipos de combustibles utilizados.	70
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:	70
5. LISTA DE REFERENCIAS	72
Apéndice	77
6. ANEXOS	79

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades específicas del diésel según norma NTC 1438.....	19
Tabla 2. Requisitos del biodiesel para mezcla con combustibles diésel según norma NTC 5444.....	21
Tabla 3. Resumen de estudios de corrosión por biodiesel sobre aceros inoxidables.[25]	24
Tabla 4. Resultados prueba de dureza material de estudio.	60
Tabla 5 Resultados obtenidos ensayo de corrosión.	63
Tabla 6. Pérdida de masa probetas sumergidas en biodiesel.	65
Tabla 7. Pérdida de masa probetas sumergidas en biodiesel.	66
Tabla 8. Resultados finales porcentaje pérdida de masa del acero 440c inox al contacto de diésel y biodiesel.	67
Tabla 9. Resultados ensayo Tafel.	69
Tabla 10. Tabla de conversión de durezas y resistencia a la tracción.....	79

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Capa pasiva acero inoxidable.[25].....	26
Ilustración 2, Composición química acero 440c inox.[28].....	32
Ilustración 3, propiedades físicas acero 440 inox.[28]	33
Ilustración 4. Comparativa de características entre aceros inox.[28]	33
Ilustración 5.. Gráfica de Tafel y su estructura[30].	36
Ilustración 6.. Determinación de las pendientes de Tafel con la gráfica de Tafel[31].	37
Ilustración 7. Curva de polarización anódica.[32]	38
Ilustración 8. Sección a través de un arco de soldadura a tope.[32]	39
Ilustración 9. Tipos de montaje mecánico [33].....	41
Ilustración 10. Componentes principales en un ensayo de dureza.[36].....	43
Ilustración 11. Expresión gráfica del método de dureza vickers[38].....	45
Ilustración 12. Flujograma de experimentación.....	48
Ilustración 13. Flujograma de procedimiento para la obtención de las probetas de acero inox ASTM 440.	49
Ilustración 14. Corte válvula.....	50
Ilustración 15. Obtención de probetas.	50
Ilustración 16. Esquema Geometría y dimensiones del corte por fresadora de las probetas de acero inoxidable A4.	50
Ilustración 17, Probetas para ensayo de corrosión por medio de pérdida de peso.....	51
Ilustración 18. Proceso de preparación de la muestra.	51
Ilustración 19. Proceso experimental ensayos de micro dureza.	52
Ilustración 20. Resultados huella en superficies de material.	53
Ilustración 21. Materiales utilizados ensayo de corrosión por inmersión total.....	55
Ilustración 22. Proceso de limpieza durante ensayos de pérdida de peso.....	55
Ilustración 23. Datos ensayos de pérdida de peso.....	56
Ilustración 24.Plano ensamble de la probeta [41].....	57
Ilustración 25. Fotografía de ensamble de probeta interior de la celda Faraday.	58
Ilustración 26.Tabla de valores en el software Gamry.	59
Ilustración 27. Lectura grafica TAFEL.....	59
Ilustración 28. Obtención del valor de la resistencia a la tracción del material.[42].....	61
Ilustración 29. Determinación tipo de acero inoxidable.[43]	62
Ilustración 30. Superposición grafica TAFEL	69

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

LISTA DE GRÁFICAS

Grafica 1. Gráfica de porcentaje de pérdida total del peso del material de estudio (acero 440c inox) por cada combustible a temperatura ambiente.....	68
Grafica 2. Gráfica Tasa de corrosión prueba Tafel.....	70

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

INTRODUCCIÓN.

El petróleo es la fuente de energía más importante de la sociedad. El petróleo o sus derivados se usan cada día con mayor frecuencia; proporcionando fuerza, calor y luz; lubricación de la maquinaria (piezas mecánicas) y produce constituyentes para pavimentos, entre otros. El petróleo de origen fósil es el combustible principal usado en la actualidad, el cual se clasifica como líquidos o gaseosos, en los cuales se encuentran Parafinas, Naftenos, Olefinas, Acetilénicos y Aromáticos, en la era moderna se fabrica una gran variedad de productos químicos que hacen más confortable la vida diaria.[1], [2] A pesar de lo indispensable que resulta, el uso extensivo del petróleo está seriamente cuestionado. Uno de los principales problemas es la contaminación ambiental que se atribuye está relacionado con el calentamiento global, por lo cual es necesario hacer un gran esfuerzo para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero. Esta es una de las principales razones del gran interés que se tiene en convertir los recursos disponibles de la biomasa, generados a partir del dióxido de carbono y agua con la ayuda de la fotosíntesis, como una alternativa en la producción de sustancias combustibles. [1], [2]

Las recesiones del petróleo, han impulsado a buscar diferentes fuentes de energías alternativas a los combustibles fósiles a nivel mundial. Estos factores, sumados a la abundancia y diversidad de fuentes de materia prima para producir biocombustibles, en función de las condiciones ambientales, viabilidad comercial y la aptitud agrícola del suelo en cada región, han promovido la implementación acelerada de los biocombustibles a nivel mundial. [1]

En los sistemas de motores convencionales del ciclo diésel, el biodiesel tiende a tener una adaptabilidad y aceptación en los mismos con ciertas características especiales que limitan su aplicación como combustible, tiende a ser más corrosivo. [3], [4] Para el caso de Colombia se usan mezclas con diésel B5, B10 y B12 en países como Alemania permiten la comercialización en estado puro B100 (El valor numérico hace referencia al porcentaje de biodiesel mezclado con diésel, así un B5denota una mezcla de 05% de biodiesel y 95% de diésel fósil).[5] El ministerio de minas y energía decreto el 24 de febrero del 2019 el uso del 12% mínimo de biodiesel en las mezclas del combustible en la resolución 40174.[6]

A partir de las ciencias de los materiales se busca determinar los efectos corrosivos a largo plazo sobre los materiales utilizados en la industria de los combustibles automotrices este es uno de los mayores retos considerando ser el más importante por su alto consumo a nivel comercial.[3][7] Los materiales metálicos han sido objeto de investigaciones en especial el aluminio, bronce, cobre, zinc, aceros que contienen bajo carbono e inoxidables definiendo diferentes grados de degradación en función del metal; también se ha logrado establecer que estos al estar sometidos a presiones, temperaturas altas y flujos turbulentos, se genera una aceleración en los procesos de corrosión como picaduras y desgastes por erosión hasta tal punto que generan afectaciones significativas en las estructuras, la resistencia y la durabilidad de los componentes metálicos.[8]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

El incremento de los vehículos de motor diésel en Colombia en cada año de la década del 2007 al 2017 fue de 15.39% en promedio, se evidencia un aumento en la producción de automotores donde estos ya no están restringiendo en vehículos de carga y transporte de pasajeros como en años anteriores, incluyendo una participación de vehículos utilitarios y domésticos, sumándole el incremento del material particulado (PM) producido por los vehículos diésel, tales como camiones, camionetas, buses y volquetas, los cuales en su mayoría no cuentan con sistemas de control de emisiones siendo el contaminante de mayor preocupación en la ciudad por lo que es necesario incrementar la producción y aplicación del biodiesel en los automotores de motor de ciclo diésel. [9] [10]

De acuerdo a lo manifestado en el anterior párrafo se estableció la norma ASTM 130-12 que trata de la capacidad corrosiva que presentan los metales y polímeros al estar sometidos en contacto con los diferentes combustibles extraídos de fuentes fósiles entre ellas el biodiesel.

Los estudios en las ciencias de los materiales desarrollados han sido limitadas en rendimiento y eficiencia. En las aplicaciones donde es utilizado el biodiesel, se evalúan los recubrimientos que mejoran las capacidades mecánicas, resistivas y térmicas en materiales base y consecuentemente incrementa la vida útil de las partes del mismo material.

Al ver que los estudios actuales de los efectos de corrosión por biodiesel sobre recubrimientos han sido poco desarrollados y publicados en los últimos años generamos nuevas investigaciones que vincula la ciencia de los materiales, el cual ayuda a reducir a futuro la degradación prematura de las fundiciones y las limitantes existentes al uso de biodiesel. [11], [12]

En investigaciones anteriores realizadas sobre los efectos de la corrosión en metales sometidos a contacto directo con el biodiesel se obtuvieron resultados en los cuales dejan ver que estos materiales se corroen más rápido que al usar diésel de origen fósil. [13] Esta investigación plantea determinar la reducción de la corrosión en válvulas de motor Volvo con el biodiesel, disminuir la producción de partículas de dióxido de nitrógeno (NO₂) y partículas de suspensión, estos son los contaminantes principales del aire. [14] En términos del comportamiento corrosivo de materiales metálicos se han desarrollado técnicas diferentes, pérdida de masa por inmersión estática, espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Estas técnicas han logrado determinar los parámetros cuantitativos como la velocidad de la corrosión, la resistencia a la polarización, los métodos mencionados anteriormente constituyen claras diferencias en las condiciones homologas de ensayo, al aplicar las diferentes técnicas de simulación de condiciones de servicios y evaluación de las mismas estas permiten el análisis riguroso de los efectos corrosivos sobre el material. [15]

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, esta investigación plantea una metodología para el desarrollo con el fin de medir la impedancia de un sistema metal combustible.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

OBJETIVOS

GENERAL

Estudiar el comportamiento de los efectos corrosivos del diésel y biodiesel comercial sobre un material extraído de una de las válvulas de escape de un motor diésel.

ESPECÍFICOS

- Establecer mediante EDS (Espectrometría de dispersión de energía de rayos X) la composición química del sustrato.
- Medir la conductividad eléctrica del Diésel y Biodiesel con un medidor de pH/EC/TDS.
- Obtener la micro dureza del sustrato usado.
- Correlacionar los resultados de micro dureza con posibles aceros comercialmente disponibles.
- Determinar la velocidad de corrosión mediante los ensayos de pérdida de peso y corrosión TAFEL con combustible diésel y biodiesel como electrolitos.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y

ANTECEDENTES.

Se aborda este capítulo con una descripción de los combustibles utilizados (diésel y biodiesel), los cuales fueron usados como medio de corrosión en el desarrollo de este proyecto y una revisión de los estudios publicados en los combustibles antes mencionados, así mismo, se establecen las características de la composición química del material extraído de las válvulas de escape (acero 440c inox) utilizadas en un motor diésel comercial, las cuales fueron expuestas para determinar su efecto corrosivo y los fundamentos teóricos del proceso de corrosión implementados.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

1.1. Características del diésel y el biodiesel.

Los combustibles de origen fósil están clasificados en líquidos y gaseosos los cuales son usados en la era moderna como principales fuentes de energía estos son usados para impulsar el desarrollo de la industria y las comodidades de la vida moderna, entre los cuales encontramos parafinas, Naftenos, Olefinas, Acetilénicos y Aromáticos.[16]

La norma técnica colombiana (NTC 1438) el cual trata del petróleo y sus derivados en especial de los combustibles utilizados en motores diésel establece las propiedades y componentes químicos del combustible diese comercializado en Colombia, como lo mostramos en la Tabla 1. Para Colombia se clasifico el diésel siendo un combustible fósil que no puede superar el 0,05 % de azufre en masa, esto con la finalidad de minimizar los riesgos y la contaminación ambiental, por lo que es necesario realizar modificaciones en el comportamiento del diésel, así mismo, los materiales que sean de compuestos ferrosos y no ferrosos, este combustible genera efectos corrosivos mínimos y se obtiene una medida observando los efectos sobre una lámina de cobre donde el azufre es el reactivo principal. [17]

El biodiesel de origen renovable es usado como combustible alternativo del diésel, generalmente se define una mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos, los cuales se generan debido a una reacción química donde se rompe la molécula de los triglicéridos, se rompe el glicerol de los ácidos grasos [18]. Del aceite de palma provienen los triglicéridos "*Elaeis guineensis*" (Materia principal utilizada en Colombia por sus adaptabilidad y gran rendimiento). Se genera una solución dividiendo el triglicérido en esterres de ácidos grasos generando la disminución de la viscosidad e incrementando la volatilidad. Sin la necesidad de modificar las estructuras de los motores diésel convencionales es posible la utilización de este combustible alternativo que posee características físico químicas homólogas al diésel. [19]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Tabla 1. Propiedades específicas del diésel según norma NTC 1438

DIÉSEL CORRIENTE (ACPM)				
PROPIEDADES	METODO (ASTM)	UNIDADES	ESPECIFICACIÓN	
			MINIMO	MAXIMO
Número ácido ⁽²⁾	D664	Mg KOH/, máx	-	0,3
Contenido de azufre ⁽⁴⁾	D2622, ó D4294, ó D1552, ó D1266	% masa	-	0,45
Contenido de aromáticos	D5186 ó D1319	% Vol.	-	35
Índice de cetano	D4737 ó D976	Adimensional	45	-
Número de cetano	D163	Adimensional	45	-
Corrosión al cobre 3h a 50 °C	D130	Clasificación	-	2
Color ASTM	D1500		-	3,0
Micro_carbón residual (10% en fondos)	D4530	% masa	-	0,2
Gravedad API	D4052 ó D287 ó NTC 5758	° API	Reportar	Reportar
Viscosidad Cinemática a 40°C	D445	mm ² /s	1,9	5,0
Propiedades de destilación	D86		-	-
Punto inicial de Ebullición		°C	Reportar	-
Temp. 50% Destilado		°C	-	Reportar
Temp. 90% Destilado		°C	-	360
Punto final de ebullición		°C	-	390
Agua y sediment	D1796 ó D2709	% vol	-	0,05
Punto de fluidez	D5949 ó D97	°C	-	3 ⁽³⁾
Temperatura de obturación del filtro (CFPP) ⁽⁵⁾	D6371 ó EN 116	°C	Reportar	Reportar
Punto de nube/ enturbiamiento ⁽⁵⁾	D2500 ISO3015	°C	Reportar	Reportar
Punto de Inflamación	D93	°C	52	
Contenido de cenizas	D482	%masa	-	0,01
Contenido de Biodiesel (Alqui esters de ácidos grasos)	EN 14078	%vol	-	10
Lubricidad	ASTM D6079	Mm	-	450
Estabilidad a la oxidación	ASTM D2275	mg/100 mL	-	2,5
Estabilidad ala oxidación	EN 15751	H	20	-
Estabilidad térmica	ASTM D6468	% de reflectancia a 90 min	70	-

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

En la era moderna el biodiesel presenta algunas ventajas ambientales como la reducción de emisiones de gas carbono, de material particulado y óxido de azufre, al tener propiedades lubricantes evita la presencia de elementos como el azufre en el caso del diésel.[20]

En Colombia al igual que en diferentes países se ha desarrollado regulaciones para el desarrollo e implementación del biodiesel. La resolución 40666 de agosto de 2019 emitida por el Ministerio de agricultura y desarrollo rural, Ministerio de minas y energía y Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Establece que el contenido máximo de biocombustible para uso en los motores diésel fósil es del 12% [21] De la misma manera en la (Tabla 2) podremos ver la NTC5444 que fue expedida por el Incontec.

La norma ASTM 130 establece como método de cuantificación de corrosión por combustibles y en este caso el biodiesel es 1^a indicando el menor grado de corrosividad, sin embargo, esta norma no permite evaluar la acción corrosiva del biodiesel, siendo la acción de la descomposición de los elementos derivados de azufre sobre una placa de cobre (útil en combustibles de cadenas saturadas y con contenido de azufre como el diésel de origen fósil). El biodiesel no contiene azufre en su composición química por lo que es difícil establecer una métrica comparativa [22]. Existen una gran cantidad de fuentes de materia primas para la producción del biodiesel como son la soya, palma, girasol, entre otros.[5]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Tabla 2. Requisitos del biodiesel para mezcla con combustibles diésel según norma NTC 5444.

BODIESEL PARA MEZCLAS CON COMBUSTIBLE DIESEL			
PROPIEDADES	UNIDADES	REQUISITO	METODO ENSAYO
Densidad a 15°	<i>kg/m³</i>	860-900	ASTM D4052 - ISO12185-ISO3675 (3)
Número de cetano	Cetanos	55 mínimo	ASTM D613 - ISO 5165
Viscosidad (cinemática a 40 °C)	<i>mm²/s</i>	3,5 - 50	ASTM D445 -ISO 3104
Contenido de agua	mg/kg	500 máximo	ASTM E203-ISO 12937
Contaminación total	mg/kg	24 máximo	EN 12662
Punto de inflamación	°C	120 mínimo	ISO 2719 (4, 5)-ISO 3679(6)
Contenido de metanol	% en masa	0,2 máximo	EN 14110
Corrosión en lámina de cobre	Unidad	Clase 1	ASTM D130-ISO 2160
Estabilidad a la oxidación (2)	Horas	12 mínimo	EN 14112-EN 15751
Cenizas sulfatadas	% en masa	0.02 máximo	ASTM D874 ISO 3987
Número ácido	mg de KOH/g	0,5 máximo	ASTM D664-EN 14104
Índice de yodo	gr yodo/100	120 máximo	EN 14111
Punto de fluidez	°C	Reportar (1)	ASTM D97
Punto de nube/ enturbiamiento	°C	Reportar (1)	ASTM D2500-ISO 3015
Contenido de fosforo	mg/kg	4,0 máximo	ASTM D4951/Plasma-masas EN 14107
Contenido de Na + K	mg/kg	5,0 máximo	EN 14108/ EN 14109 EN 14538
Contenido de Ca + Mg	mg/kg	5,0 máximo	EN 14538
Contenido de éster	% en masa	96,5 mínimo	EN 14103
Contenido de alquil éster de ácido linolénico	% en masa	12,0 máximo	EN 14103
Contenido de glicerina libre	% en masa	0,02 máximo	ASTM D6584 EN 14105/ EN 14106
Contenido de glicerina total	% en masa	0.25 máximo	ASTM D 6584 EN 14105
Contenido de monoglicéridos	% en masa	0,70 máximo	ASTM D 6584 EN 14105
Contenido dedigliceridos	% en masa	0.20 máximo	ASTM D 6584 EN 14105
Contenido de triglicéridos	% en masa	0.20 máximo	ASTM D 6584 EN 14105
Filtrabilidad en frio	s	reportar (7)	ASTM D750 1

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

1.2. Antecedentes o estudios previos corrosión por biodiesel.

En la actualidad algunos trabajos son encontrados en la gran cantidad de literatura, estos evaluando la corrosión causada por biodiesel o por mezclas con diésel. Los trabajos muestran de manera general, parámetros de corrosión evaluados a partir de análisis de microscopia superficial, ensayos ASTM 130 y gravimétricos en su gran mayoría. A continuación, se presentan una serie de investigaciones que evalúan la compatibilidad de biodiesel con diferentes materiales usados en motores diésel, empleando principalmente la norma ASTM 130 y técnicas de inmersión en estado estático. Los resultados obtenidos son variados, y abordan principalmente temas como corrosión, recubrimientos de tipo térmico y desempeño mecánico.

Se puede entender por corrosión metálica el proceso en el cual un metal pasa de estado metálico a combinado (producto de corrosión), por efecto de la interacción con el medio, que puede ser de naturaleza química o electroquímica y puede estar o no asociada a esfuerzos mecánicos.[22]

En términos de corrosión ha sido evaluado biodiesel de diferentes materias primas producidos en condiciones controladas de laboratorio y con porcentajes de impurezas muy bajos, las fuentes son principalmente canola, palma, soya, girasol entre otros. En estas investigaciones se utilizó como referencia diésel de origen fósil. La técnica de evaluación de la corrosión fue el ensayo de inmersión estática, demostrando en general una mayor naturaleza corrosiva del biodiesel frente al diésel.

La literatura estableció que las principales causas de la proliferación de la corrosión relacionados a la calidad del biodiesel sobre metales no ferrosos como aluminio son la baja estabilidad, oxidación por formación de ácidos carboxílicos, presencia de agua libre, crecimiento microbiológico y aumento de la conductividad iónica del biodiesel.

Materiales como bronce, latón, cobre, zinc, plomo, estaño, hierro y níquel, son metales que se pueden oxidar al contacto con biodiesel formando sedimentos [22]. De igual manera, fue investigada la corrosión en diferentes materiales usados en la fabricación de las principales partes de la cámara de combustión, como son acero inoxidable 316, hierro fundido gris, cobre y latón a diferentes porcentajes de mezcla de biodiesel y diésel, encontrando como resultado un aumento de la corrosión proporcional al aumento del contenido de biodiesel en la mezcla.[23]

Se evidenciaron indicios de problemas de corrosión en materiales no ferrosos como aluminio y recubrimientos a base de zinc, relacionados a la baja estabilidad a la

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

oxidación, que provoca la formación de ácidos carboxílicos, principalmente el ácido fórmico proveniente de los esteres metílicos o ácido de esteres etílicos, que atacan los metales constituyentes de los motores y sistemas de inyección electrónica [22]

En cuanto al desgaste de componentes metálicos usados en la fabricación de vehículos con biodiesel como combustible, se realizaron una serie de estudios de laboratorio, demostrando que a corto plazo el biodiesel ofrece propiedades benéficas en términos de mayor lubricidad, menor desgaste y fricción. Sin embargo, a mediano plazo la oxidación del biodiesel y las altas temperaturas afectaron negativamente las propiedades tribológicas de estos componentes mostrando mayor deterioro.

Investigaciones recientes mostraron que independientemente de la materia prima usada en la producción de biodiesel este proporciona inicialmente una mejor lubricación que el diésel, pero en pruebas de larga duración pierde su lubricidad debido a su naturaleza corrosiva y oxidativa, acelerando el desgaste de las partes del motor. Su auto-oxidación, naturaleza higroscópica, mayor conductividad térmica y solvencia fueron las principales causantes del aumento de la corrosión y degradación [24].

En la Tabla 3, se presentó un resumen de la literatura consultada relacionada a los efectos corrosivos de biodiesel específicamente en materias primas relacionadas con el acero inoxidable (ya que esta es la materia prima base de esta tesis), identificando el material evaluado, el tipo de combustible, la técnica y los parámetros utilizados, así como los resultados obtenidos de forma general. [25]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Tabla 3. Resumen de estudios de corrosión por biodiesel sobre aceros inoxidables.[25]

Material	Referencia	Combustible	Ensayo	Resultados
Inox, Fundición, Cobre, Latón	Geller, Adams, Goodrum, (2008). [32]	Biodiesel de grasa animal B20 y B80	Pérdida de masa a 311K, durante 7200h de ensayo.	B80 presentó mayor porcentaje de masa perdida. Cobre, latón y fundición sufrieron corrosión. Se observó corrosión por picaduras.
Cobre, aluminio y acero inoxidable	Fazal, Haseeb, Masjuki, (2010) [33]	Diesel y Biodiesel de palma	Velocidad de corrosión a 353K por 1200h.	La vel. de corrosión se duplico para las muestras en contacto con biodiesel. Se obtuvieron valores de 0,58 y 0,2 mpy para cobre y aluminio respectivamente. Se evidenciaron picaduras.
Acero, Inoxidable, aluminio, cobre, latón, zinc.	Pacifico (2012), [25]	Biodiesel de soya	Velocidad de corrosión μm por año, a 328K, por 408h, con adición de oxígeno constante.	Zinc, latón y cobre presentan alta reactividad al combustible (19 a 12 μm por año). Aluminio, estaño y aceros presentan una baja reactividad (> 2 μm por año)
Cobre, acero, inoxidable, aluminio	Hua, Xu, Hu, Pan, (2012) [34]	Diesel y Biodiesel de colza.	Velocidad de corrosión a 316K por 1440h.	El diesel fue menor a 0,0037 mpy. El biodiesel presentó valores de 0,02334 mpy para el cobre y el acero. Aluminio e inoxidable no mostraron diferencias.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

1.3. Espectroscopia de Energía Dispersiva de rayos X (EDS).

Espectrometría de dispersión de energía o (EDS por sus siglas en inglés), es un análisis de composición química de la estructura del material destacando la materia prima del cual se encuentra compuesto el elemento mediante el uso de excitación por rayos X.

Los rayos X intensos y de longitud de onda sintonizable son típicamente generados con sincrotrones. En un material, los rayos X pueden sufrir una pérdida de energía en comparación con el haz de luz que entra. Esta pérdida de energía del haz re-emergente refleja una excitación interna del sistema atómico, de forma análoga a la conocida espectrometría Raman que se utiliza ampliamente en la región óptica. En la región de los rayos X hay suficiente energía para producir cambios en el estado electrónico (transiciones entre orbitales, lo que contrasta con la región óptica, donde la pérdida de energía es a menudo debida a los cambios en el estado de rotación o los grados de libertad vibracionales). Por ejemplo, en la región ultraligera de los rayos X (por debajo de aproximadamente 1 k eV).

Podemos pensar en el proceso fotón-dentro-fotón-fuera como un evento de dispersión. Cuando la energía del rayo X corresponde a la energía de enlace de un nivel electrónico básico, este proceso de dispersión potencia su resonancia en muchos órdenes de magnitud

Debido a la amplia separación de energías orbitales de los niveles básicos, es posible seleccionar un determinado átomo de interés. Así, se puede obtener información valiosa sobre la estructura electrónica local de sistemas complejos, y los cálculos teóricos son relativamente sencillos de realizar.

Su funcionamiento corresponde al detectar un pulso de carga proporcional a la energía emitida por el rayo x, el pulso detectado es reconocido como voltaje, mostrando en el amplificador y así sucesivamente analizando cada pulso mostrando una lectura gráfica donde es representada por picos. [26]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

1.4. Aceros inoxidables

La mayoría de los metales se oxidan, por ejemplo, la plata se pone negra, el aluminio cambia a blanco, el cobre cambia a verde y ordinariamente el acero cambia a rojo. En el caso de acero, el hierro presente se combina con el oxígeno del aire para formar óxidos de hierro o “herrumbre”. A principios del siglo XX algunos metalurgistas descubrieron que adicionando poco más de 10% de cromo al acero, éste no presentaba herrumbre bajo condiciones normales; la razón de ello es que el cromo suele unirse primeramente con el oxígeno del aire para formar una delgada película transparente de óxido de cromo sobre la superficie del acero y excluye la oxidación adicional del acero inoxidable. Esta película se llama capa pasiva. En el caso de que ocurra daño mecánico o químico, esta película es auto reparable en presencia de oxígeno.

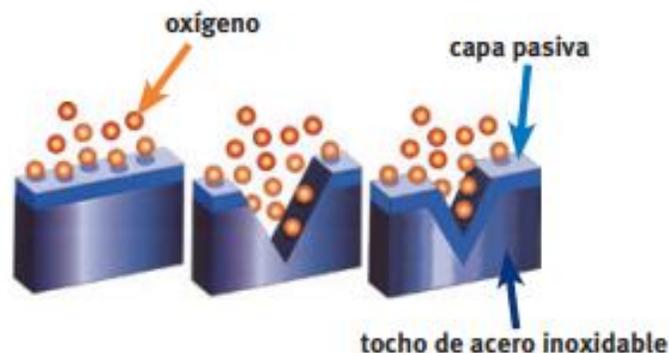


Ilustración 1. Capa pasiva acero inoxidable.[25]

El acero inoxidable es esencialmente un acero de bajo carbono, el cual contiene como mínimo un aproximado 10.5% de cromo en peso, lo que le hace un material resistente a la corrosión.

Proceso de fabricación

Inicia con la fusión de hierro, chatarra y ferro-aleaciones de acuerdo al grado de acero inoxidable a preparar; continúa con la refinación del acero para eliminar impurezas y reducir el contenido de carbono; posteriormente el acero líquido se cuela en continuo, se corta en planchones y se forman los rollos rolados en caliente. El proceso termina con el molino de laminación en frío, recocido y limpieza.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Clasificación de los aceros inoxidables

El acero inoxidable puede ser clasificado en cinco familias diferentes; cuatro de ellas corresponden a las particulares estructuras cristalinas formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita y dúplex (austenita mas ferrita); mientras que la quinta son las aleaciones endurecidas por precipitación, que están basadas más en el tipo de tratamiento térmico usado que en la estructura cristalina.

Aceros inoxidables martensíticos

Son la primera rama de los aceros inoxidables simplemente al cromo. Representan una porción de la serie 400, sus características son:

- Moderada resistencia a la corrosión
- Endurecibles por tratamiento térmico y por lo tanto se pueden desarrollar altos niveles de resistencia mecánica y dureza
- Son magnéticos
- Debido al alto contenido de carbono y a la naturaleza de su dureza, es de pobre soldabilidad

Los Martensíticos son esencialmente aleaciones de cromo y carbono. El contenido de cromo es generalmente de 10.5 a 18% y el de carbono es alto, alcanzando valores de hasta 1.2%.

Aceros inoxidables ferríticos

Estos aceros inoxidables de la serie 400 AISI (American Iron & Steel Institute) mantienen una estructura ferrítica estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión, sus características son:

- Resistencia a la corrosión de moderada a buena, la cual se incrementa con el contenido de cromo y algunas aleaciones de molibdeno
- Endurecidos moderadamente por trabajo en frío: no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico
- Son magnéticos Su soldabilidad es pobre por lo que generalmente se eliminan las uniones por soldadura a calibres delgados.
- Usualmente se les aplica un tratamiento de recocido con lo que obtienen mayor suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

- Debido a su pobre dureza, el uso se limita generalmente a procesos de formado en frío.

Los Ferríticos son esencialmente aleaciones con cromo. El contenido de cromo es usualmente de 10.5 a 30%, pero contenidos limitados de carbono del orden de 0.08%. Algunos grados pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio que promueven diferentes características.

Aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos constituyen la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integra las series 200 y 300 AISI. Su popularidad se debe a su excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión. Sus características son las siguientes:

- Excelente resistencia a la corrosión
- Endurecidos por trabajo en frío y no por tratamiento térmico
- Excelente soldabilidad
- Excelente factor de higiene y limpieza Formado sencillo y de fácil transformación
- Tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas
- Son no magnéticos

Los Austeníticos se obtienen adicionando elementos formadores de austenita, tales como níquel, manganeso y nitrógeno. El contenido de cromo generalmente varía del 16 al 26% y su contenido de carbono es del rango de 0.03 al 0.08%. El cromo proporciona una resistencia a la oxidación en temperaturas aproximadas de 650° C en una variedad de ambientes.

Aceros inoxidables dúplex

Son aleaciones cromo-níquel-molibdeno, sus características son las siguientes:

- Son magnéticos
- No pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos
- Buena soldabilidad
- La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión en ambientes con iones de cloruro.

Los dúplex tienen un contenido de cromo de entre 18 y 26% y de níquel de 4.5 a 6.5%. La adición de elementos de nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno imparten ciertas características de resistencia a la corrosión.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

1.5. Características y aplicaciones de los tipos de los aceros inoxidables más comunes

Martensíticos

403.- Es primariamente empleado en partes críticas de maquinaria sometida a altos - esfuerzos y donde se requiere, además buena resistencia al calor, corrosión, desgaste abrasivo o erosión.

410.- Es de propósito general y el tipo más usado de la familia martensítica debido a sus atractivas características y su bajo costo. Se emplea en tuercas, tornillos, cubiertos, herramientas de cocina, partes de horno a bajas temperaturas, equipo para refinación de petróleo, vajillas, partes para turbinas a gas o vapor, etc. Tiene un coeficiente de expansión poco menor que el del acero al carbono, mientras que la conductividad térmica es casi la mitad correspondiente al valor para el acero al carbono. Puede desarrollar una excelente combinación de resistencia mecánica y dureza mediante adecuado tratamiento térmico. En la condición de recocido, es dúctil y es una buena opción para formado y otras operaciones de transformación donde el uso final está destinado a ambientes moderadamente corrosivos.

416.- Otra versión del tipo 410, donde el azufre o el selenio son adicionados para - producir las mejores características de maquinabilidad de la clase martensítica, tiene menor desempeño en ductilidad y formabilidad que el 410. Se utiliza en conectores, cerraduras, cabezas de palos de golf, partes de bombas, flechas, partes para válvulas, etc.

420.- Es una modificación del 410, con alto contenido de carbono, que le permite alcanzar mayor dureza y mayor resistencia al desgaste aunque menor resistencia a la corrosión. Se utiliza para instrumentos dentales y quirúrgicos, hojas de cuchillos, moldes, herramientas, etc.

422.- Diseñado para el servicio a temperaturas de hasta 650° C, combinando resistencia mecánica. Presenta maquinabilidad de mediana a baja.

431.- Diseñado para obtener altas propiedades mecánicas mediante tratamiento térmico junto con buena resistencia al impacto. Empleado para fabricar conectores, cerraduras, partes para transportadores, equipo marino, flechas de propelas, flechas de bombas, resoles, etc.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

440.- Utilizados en donde se requiere una alta y extremada dureza, resistencia a la abrasión y buena resistencia a la corrosión. De baja maquinabilidad. Sus principales aplicaciones son: cuchillería, partes resistentes al secado, equipo quirúrgico, inyectores, etc.

Ferríticos

405.- Conocido como un grado soldable del tipo 410 se utiliza en partes resistentes al calor, equipo para refinación de calor, racks para templado de acero. La información aquí plasmada se proporciona al destinatario con fines exclusivamente informativos, el presente documento no implicará responsabilidad u obligación alguna por parte del publicador.

409.- Es un acero estructural de uso general, es utilizado en aplicaciones que no requieren alta calidad de apariencia. Se usa para fabricar silenciadores y convertidores catalíticos para automóviles, cajas de tráiler, tanques de fertilizantes, contenedores.

430.- Es el más popular de los aceros inoxidables simplemente al cromo. Es un acero de propósito general, es dúctil y tiene buenas características de formabilidad, tiene buena resistencia a la corrosión. Es ideal para muebles y decoración interior. Se utiliza para adornos y molduras automotrices, materiales de construcción, equipo químico de proceso, cremalleras, partes para quemadores, adornos interiores arquitectónicos y paneles, adornos y equipos de cocina, equipo para proceso de ácido nítrico, aparatos científicos, etc.

434.- Es una variación del tipo 430 que contiene molibdeno y niobio que incrementan la resistencia a la corrosión, es particularmente ventajosa para usos automotrices exteriores.

446.- Contiene el máximo contenido de cromo de toda la familia ferrítica, por lo que tiene la mayor resistencia a la corrosión de su clase, se recomienda para uso en atmósferas de comportamiento azufroso a altas temperaturas (1000° C). No debe ser utilizado en aplicaciones en donde se requiera alta resistencia mecánica. Se utiliza para la fabricación de bases para tubos de rayos X, partes de quemadores, tubos para pirómetros, válvulas y conectores, etc.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Austeníticos

301.- Menor resistencia a la corrosión que otros aceros de la serie 300. Puede ser fácilmente formado y ofrece buenas propiedades de soldabilidad. Utilizado en partes de aviones, adornos arquitectónicos, cajas de ferrocarril y de trailer, cubiertas de rines, equipos para procesamiento de alimentos.

303.- Especial para propósitos de maquinado, buena resistencia a la oxidación en ambientes de hasta 900° C. Se emplea para cortes pesados. Se usa para la fabricación de partes para bombas, bushings, partes maquinadas y flechas.

304.- Todo propósito, tiene propiedades adecuadas para gran cantidad de aplicaciones. Se recomienda para construcciones ligeras soldadas que requieran buena resistencia a la corrosión. Tiene buen desempeño en temperaturas elevadas (800 a 900° C) y buenas propiedades mecánicas. Es recomendable cuando se requiera soldar altos espesores de material. Algunas aplicaciones son equipo químico de proceso, accesorios para aviones, remaches, equipo para hospitales, etc.

309.- Poseen alta resistencia mecánica, tenacidad y excelente resistencia a la oxidación en temperaturas de hasta 1000° C. Calentadores de aire, equipo químico de proceso, partes de quemadores de turbinas de gas e intercambiadores de calor son algunas de las aplicaciones más comunes fabricadas con este tipo de acero.

310.- Es frecuentemente usado en servicios de alta temperatura. Se utiliza para - fabricar calentadores de aire, equipo para tratamiento térmico de aceros, equipo químico de procesos, etc. La información aquí plasmada se proporciona al destinatario con fines exclusivamente informativos, el presente documento no implicará responsabilidad u obligación alguna por parte del publicador.

316.- Resistente a la corrosión frente a diversos químicos agresivos, ácidos y atmósfera salina. Se utiliza para adornos arquitectónicos, equipo para el procesamiento de alimentos, farmacéutico, fotográfico, textil, etc.

321.- Es similar al 304, pero contiene una adición de titanio equivalente a cinco veces el contenido de carbono. Las principales aplicaciones de este acero son recipientes a presión y almacenamiento, partes de motores de jet, equipo químico de proceso, etc. [27]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

1.6. Acero 440c inoxidable

El acero 440C INOX es un acero inoxidable martensítico al alto carbón, diseñado para ofrecer una combinación de alta resistencia al desgaste y una moderada resistencia a la corrosión en ambientes medios. Alcanza durezas cercanas a 60 HRC y ofrece una buena retención del filo.

En la siguiente ilustración se muestra su composición química.

COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO

C	Mn	Si	Cr	Mo	S
1.05	0.45	0.40	17.50	0.70	<0.030

Ilustración 2, Composición química acero 440c inox.[28]

APLICACIONES TÍPICAS

- Baleros
- Herramientas Quirúrgicas
- Insertos para Moldes
- Válvulas de Aguja
- Partes para Bombas
- Cuchillería de Cocina
- Cubiertos de Mesa
- Cuchillas Industriales
- Tijeras

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

PROPIEDADES FÍSICAS

Módulo de Elasticidad 29×10^6 psi (200 GPa)
Densidad 0.275 lbs./in³ (7.62 g/cm³)

Conductividad Térmica

	BTU/hr-ft-°F	W/m-°K
210°F (100°C)	14.0	24.2

Coefficiente de Dilatación Térmica

	in/in/°F	mm/mm/°C
68-392°F (20-200°C)	5.8×10^{-6}	10.0×10^{-6}
68-1112°F (20-600°C)	6.2×10^{-6}	11.2×10^{-6}

Ilustración 3, propiedades físicas acero 440 inox.[28]

□ Tenacidad ■ Resistencia al Desgaste ▨ Resistencia a Corrosión

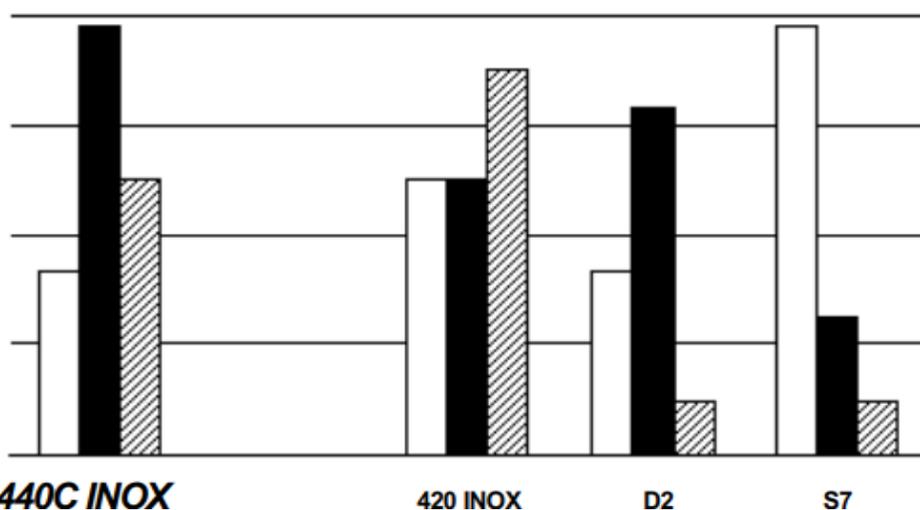


Ilustración 4. Comparativa de características entre aceros inox.[28]

Comparativa de características el acero 440c inox respecto a otros materiales similares. 440C INOX se surte en estado recocido a una dureza aprox. de BHN 250, para facilitar el maquinado. Un tratamiento térmico adecuado es necesario para desarrollar la resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas.[28]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

1.7. Técnicas de corrosión método pérdida de peso

Históricamente, la medición de la pérdida de peso de un material en contacto con una disolución corrosiva, fue la primera manera de tener una evaluación cuantitativa del proceso de corrosión. Después, se relacionó la cantidad de material disuelta por corrosión en un tiempo dado, con la densidad y area del material en cuestión para poder calcular la pérdida de espesor del material por unidad de tiempo, de la siguiente manera.

$$\frac{gFe}{hr} \cdot \frac{1cm^3Fe}{7.8g.Fe} \cdot \frac{1}{Area (cm^2)} = \frac{cm.de\ penetración}{hr}$$

Ecuación 2, ecuación método pérdida de peso por corrosión.

Así, surgieron unidades de penetración de ataque muy conocidas, como mpy (mili pulgadas por año), o (micras por año). Es de tomar en cuenta que las unidades de penetración por tiempo, suponen que la corrosión es uniforme (es decir, que afecta a toda la superficie geométrica). Esto trae como consecuencia que si la corrosión no es uniforme (por picaduras, por ejemplo), donde se ataca una pequeña zona del material, las velocidades de corrosión reportadas serán más bajas a las que en realidad se observen dentro de la picadura y, por lo tanto, la falla por picadura se dará antes del plazo marcado para la

corrosión uniforme. Hay que recalcar que, si bien por este método se puede evaluar la velocidad de disolución del metal en un medio dado, no proporciona idea alguna sobre el mecanismo de la corrosión, ni es posible hacer predicciones teóricas acerca de materiales nuevos. Otra de las limitaciones prácticas de este método es que su sensibilidad está limitada a la sensibilidad de la balanza, por lo que los ensayos realizados son siempre en condiciones de ataque muy severos (que no siempre representan las condiciones reales de corrosión) y siempre son destructivos. Por último, es importante remarcar que los valores de corrosión obtenidos por este método son valores promedio y no se tiene acceso a conocer los cambios de la velocidad de corrosión en cada momento, perdiendo valiosa información sobre la cinética misma del proceso de corrosión.[29]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

1.8. Extrapolación de Tafel

Los métodos electroquímicos para determinar “velocidad de corrosión” de metales se basan en ensayos de polarización. Presentan varias ventajas en relación al método de Pérdida de Peso:

- *Poco gasto de tiempo* para realizar las medidas experimentales: las medidas convencionales por pérdida de peso requieren largos períodos (días o meses). Por polarización electroquímica puede obtenerse una medida semicontinua y rápida de la velocidad de corrosión, lo que resulta muy útil tanto en estudios cinéticos como para monitorear la corrosión en procesos de planta.

- *Alta sensibilidad*: a nivel de laboratorio no es necesario trabajar en condiciones que favorezcan la corrosión (por ejemplo, no es necesario un aumento de temperatura).

Para determinar velocidades de corrosión de materiales metálicos por “Polarización Electroquímica” se conocen dos métodos derivados de la teoría del potencial mixto:

- Extrapolación de Tafel
- Resistencia de Polarización

La técnica de extrapolación de Tafel, proporciona otra forma de determinar la velocidad de corrosión de una muestra metálica, de igual forma se puede expresar en unidades de velocidad de penetración o en unidades de velocidad de pérdida de masa. Con las gráficas de Tafel, se puede determinar el tipo de cinética que controla la velocidad de la reacción electroquímica (control por activación o control por difusión).

La técnica de extrapolación de Tafel se aplica en un intervalo de -250 mV a $+250$ mV alrededor del E_{corr} .

La ilustración presentada a continuación, muestra la estructura y las partes principales que componen una gráfica de Tafel. La dirección positiva del potencial del electrodo de trabajo, indica una condición de oxidación progresiva en dicho electrodo (curva de polarización anódica). La dirección positiva es también llamada dirección noble, porque los potenciales de corrosión de los metales más nobles, tal como el oro, son más positivos que los metales base o pasivos. La dirección negativa del potencial del electrodo de trabajo, a menudo llamada la dirección activa, está asociada con la reducción (curva de polarización catódica) y consecuentemente con los potenciales de corrosión de metales activos, tales como el magnesio.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

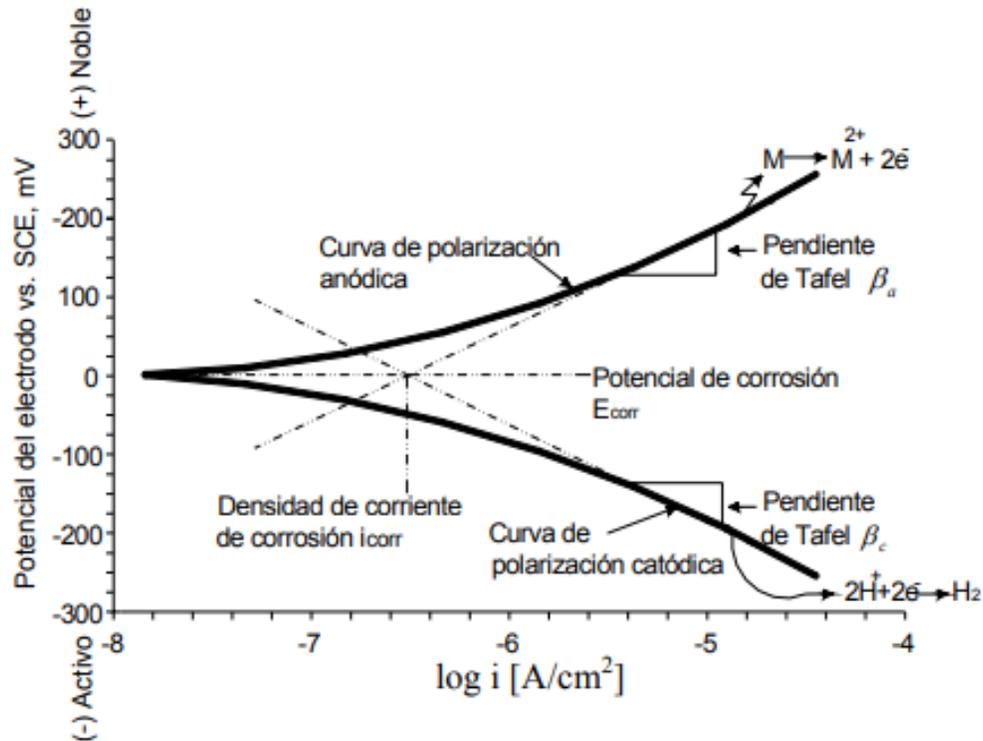


Ilustración 5.. Gráfica de Tafel y su estructura[30].

Es recomendable que en el eje de los potenciales, se indique el electrodo de referencia utilizado contra el cual se midieron los potenciales. Cuando el potencial es graficado contra el logaritmo de la densidad de corriente, sólo los valores absolutos de la densidad de corriente pueden ser graficados [30]

La ilustración 5 también muestra las pendientes de Tafel β_a y β_c , éstas tienen unidades de Volts por década, donde una década es un orden de magnitud de densidad de $\log i$ [A/cm²] corriente. La ilustración 6 nos muestra como estimar la pendiente catódica de Tafel (β_c).

En este ejemplo la pendiente catódica de Tafel (β_c) es:

$$\beta_c = (0.125 \text{ Volts}) / (1 \text{ década}), = 0.125 \text{ Volts/década} = 125 \text{ mV/década.}$$

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

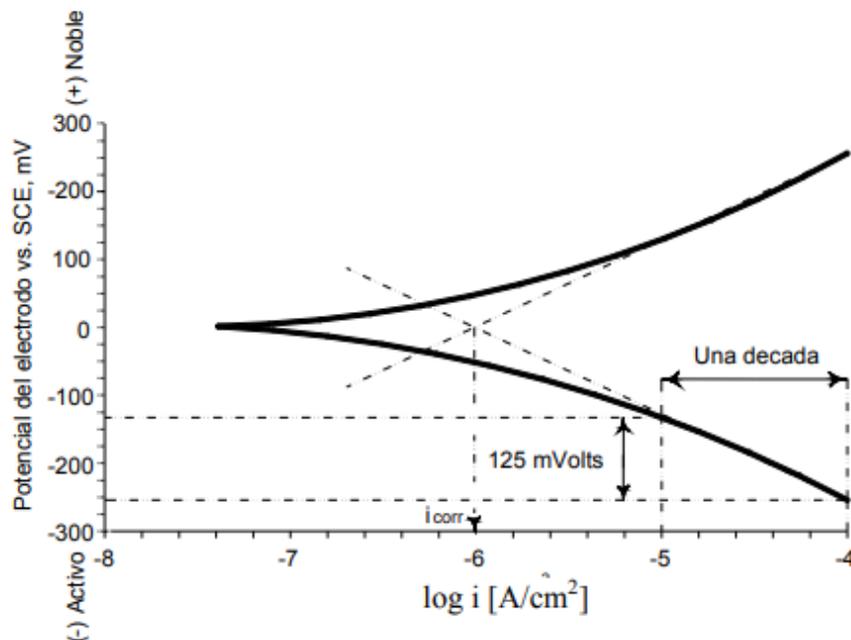


Ilustración 6.. Determinación de las pendientes de Tafel con la gráfica de Tafel[31].

Los valores de las pendientes de Tafel pueden ser usadas en los datos de polarización lineal cuando se desea mayor precisión en las velocidades de corrosión.

La densidad de corriente de corrosión es leída directamente desde una gráfica de Tafel sin la necesidad de calcular las pendientes de Tafel o usar la ecuación de Stern-Geary. Las ilustraciones anteriores muestran la extrapolación de las partes lineales de las curvas de polarización (anódica y catódica) para obtener la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}). La densidad de corriente de corrosión puede ser convertida a velocidad de corrosión.[31]

La extrapolación de Tafel requiere un único proceso electroquímico cuya etapa determinante de la velocidad sea la transferencia de carga (control por activación).

Se trabaja con curvas de polarización experimentales (en estado estacionario) y aparentes, pues no se ajustan exactamente al proceso de corrosión, ya que para su registro es necesario sacar al sistema del equilibrio.

La extrapolación de la región de Tafel permite conocer E_{corr} y I_{corr} .

Cuando el metal en contacto con un medio alcanza el potencial de corrosión la corriente neta (I_{neta}) es cero, puesto que $|I_{anódica}| = |I_{catódica}|$, y como ambas tienen signos opuestos resulta

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

$$I_{\text{neta}} = I_{\text{anódica}} + I_{\text{catódica}} = 0$$

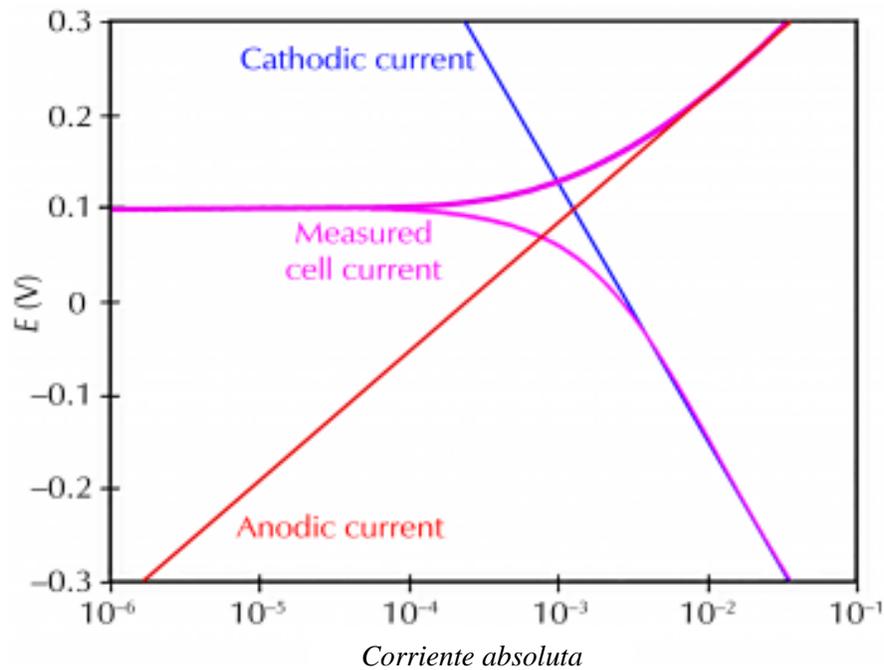


Ilustración 7. Curva de polarización anódica.[32]

En general, la curva de polarización anódica, frecuentemente, presenta falta de linealidad debido a diversos factores:

- Disolución anódica irreversible del metal
- La disolución anódica causa contaminación de la solución antes de completar la curva de polarización
- La superficie puede cambiar de rugosidad al disolverse o al depositarse sobre el metal los productos de corrosión.[32]

1.9. Inspección metalográfica

La metalografía es una disciplina de la ciencia que se encarga de examinar y determinar los componentes en una muestra de metal, haciendo uso de Varios niveles de magnificación que pueden ir desde 20x hasta 1'000.000x (1)

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

El estudio de metalografía comprende en gran parte la observación de granos, la dirección, el tamaño y la composición de los mismos; estas microestructuras pueden ser observadas en un rango entre $10^{(-8)}$ m y $10^{(-2)}$ m. El estudio de metalografía puede integrarse en dos subdivisiones: Análisis macroscópico y Análisis microscópico.

Análisis macroscópico

El análisis macroscópico es aquel que se puede realizar a simple vista, es decir sin necesidad de microscopio.

El rango de tamaño como se puede ver en la ilustración 6 inicia en $10^{(-3)}$ m en adelante. El análisis macroscópico se puede usar en:

- Líneas de flujo en materiales forjados.
- Capas en herramientas endurecidas por medio de tratamiento térmico.
- Zonas resultado del proceso de soldadura.
- Granos en algunos materiales con tamaño de grano visible.
- Marcas de maquinado.
- Grietas y ralladuras.
- Orientación de la fractura en fallas.

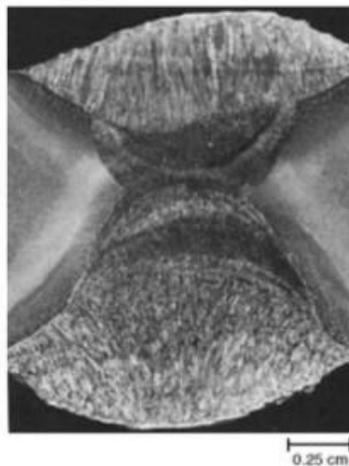


Ilustración 8. Sección a través de un arco de soldadura a tope.[32]

Análisis microscópico

Aquel tipo de análisis que no se puede realizar a simple vista, (menor a $10^{(-3)}$ m). Observar las estructuras microscópicas en materiales ayuda a comprender el comportamiento de los mismos.

El análisis microscópico se puede usar en:

- Tamaño de grano.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

- Límites de grano y dislocaciones.
- Análisis micro estructural.
- Distribución de fases en aleaciones.

Ensayo de metalografía

La preparación de una muestra consiste en los pasos necesarios para poder analizar la misma de forma correcta. Específicamente se describen a continuación, los pasos para la preparación de muestras observadas en microscopio.[32]

Seccionar

Consiste en remover una muestra del material analizado, teniendo en cuenta las convenciones en tamaño y qué tan representativa es dicha porción del total a analizar. Este primer paso es usado para otras prácticas además de la metalografía, por ejemplo, ensayos de dureza.[32]

Montaje de la muestra

Consiste en proporcionar una base que sostenga la muestra, lo anterior brinda facilidad de uso. Por ejemplo, en la manipulación de especímenes pequeños o cortantes. Es importante tener en cuenta que, antes de realizar el montaje se debe limpiar la muestra según su naturaleza. Por ejemplo, muestras con óxido (el cual no es objeto de estudio) deben ser limpiadas químicamente, por otro lado, la limpieza física es adecuada y casi siempre necesaria.[32]

Tipos de montaje:

- **MONTAJE MECÁNICO:** Montaje en abrazaderas de diferentes tipos. Es un tipo de montaje sencillo, pues no requiere maquinaria especializada.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

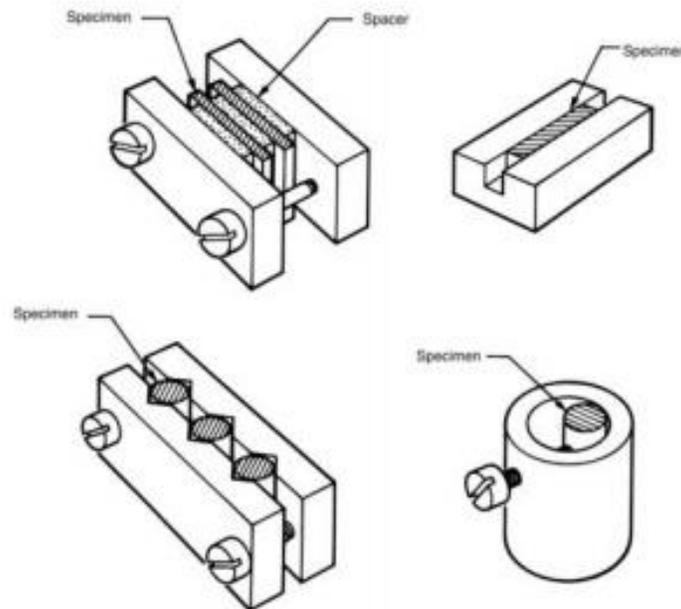


Ilustración 9. Tipos de montaje mecánico [33]

- **MONTAJE EN PLÁSTICO:**

Es el tipo de montaje más usado. Básicamente se usan dos formas para montaje en plástico:

- Moldeo por compresión o montaje en caliente: Requiere de calor, presión y por tanto algún tipo de prensa especializada.
- Montaje en frío: Se realiza vertiendo encima de la muestra, dos mezclas líquidas poliméricas que se solidifican al reaccionar a temperatura ambiente.[33]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

1.10. Preparación de la superficie

Durante el montaje de muestras generalmente el objeto de estudio es solamente una superficie, los tipos de preparación son:

- MAQUINADO: Uso de herramientas con filos de diferentes formas, ejemplo torneado y fresado.
 - RECTIFICADO Y ABRASIÓN: Arreglo de partículas abrasivas fijas que actúan como herramientas de corte.
 - PULIMENTO: Arreglo de partículas abrasivas suspendidas entre las fibras de un paño
- Para la preparación de superficies típicamente se utiliza una secuencia de maquinado o rectificado y luego de pulimento. La operación se compone de distintas etapas que van incrementando su fineza para proporcionar un mejor acabado[34]

Ataque químico.

Luego de la última pasada de pulimento, la superficie es tratada químicamente. El ataque químico es un proceso de corrosión controlada de la muestra, se realiza sumergiendo la superficie en algún tipo de solución adecuada. La solución química usada depende del material que compone la muestra, la temperatura y tiempo del ataque, el efecto deseado en la superficie entre otros[34]

1.11. Ensayos de dureza

La dureza es una condición de la superficie del material, no representa ninguna propiedad de la materia y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material. Si bien, es un término que nos da idea de solidez o firmeza, no existe una definición única acerca la dureza y se la suele definir arbitrariamente en relación al método particular que se utiliza para la determinación de su valor. De esta manera algunas definiciones son[35]

- 1) Resistencia a la indentación permanente bajo cargas estáticas o dinámicas (dureza por penetración)
- 2) Absorción de energía bajo cargas de impacto o dinámicas (dureza por rebote)
- 3) Resistencia a la abrasión (dureza por desgaste)
- 4) Resistencia al rayado (dureza por rayado).

Independientemente de las definiciones enumeradas, en general, se entiende por dureza la propiedad que tienen los materiales de resistir la penetración de un indentador bajo carga. En este sentido definiremos dureza como la resistencia de un material a la deformación plástica localizada.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

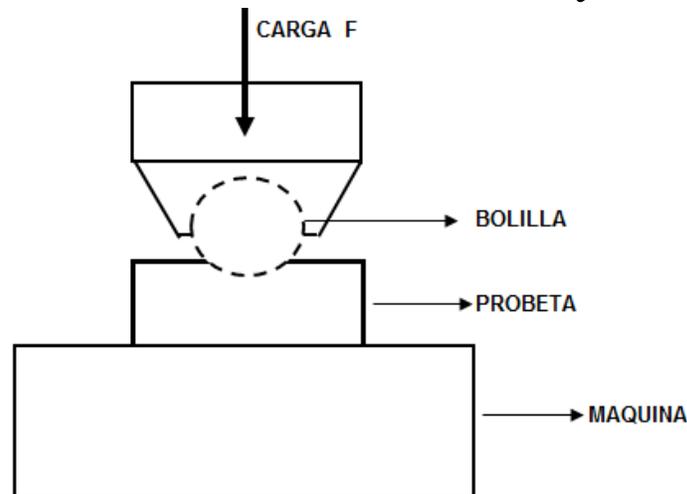


Ilustración 10. Componentes principales en un ensayo de dureza.[36]

Los diferentes métodos desarrollados para medir la dureza en general consisten en producir una deformación local, en el material que se ensaya, a través de un indentador. Los valores obtenidos son siempre dependientes del método y las condiciones en las que se ensaya por lo que para que un valor de dureza sea útil y permita su comparación debe estar acompañada de la indicación del método utilizado y las condiciones del ensayo.

Los diferentes métodos utilizados para obtener los valores de dureza se pueden clasificar en dos grandes grupos según la forma de aplicación de la carga:

- Ensayos estáticos, en los que la carga se aplica en forma estática o cuasi-estática. En este caso un indentador se presiona contra la superficie de ensayo con una carga que se aplica en forma relativamente lenta. En general la medida de dureza en este tipo de ensayo resulta del cociente de la carga aplicada y el área de la huella que deja el indentador en la superficie, como es el caso de los métodos Brinell, Vickers y Knoop, o bien es una medida de la profundidad de la indentación como en el ensayo Rockwell.
- Ensayos dinámicos, en los que la carga se aplica en forma de impacto. En general el indentador es lanzado sobre la superficie a ensayar con energía conocida y el valor de dureza se obtiene a partir de la energía de rebote del penetrador luego de impactar en la muestra, como sucede en el método de Shore y en el de Leeb, ambos conocidos como métodos de dureza por rebote. Si bien se pueden clasificar

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

en este grupo métodos como el de Poldi, o uno mucho más moderno como el UCI Ultrasonic Contact Impedance, los de rebote son los más representativos de los ensayos dinámicos de dureza. En los ensayos dinámicos los resultados obtenidos son dependientes de las propiedades elásticas del material que se ensaya y en general los valores son comparables entre materiales en los que dichas propiedades son iguales, o bien se requiere la calibración del instrumento antes de ensayar un material cuyo módulo elástico es desconocido. En general se mide dureza cuando se ha establecido una correlación entre la dureza y alguna otra propiedad del material, como por ejemplo la resistencia a la abrasión o al desgaste, la resistencia a la tracción, etc. Sin embargo, debe advertirse que dichas correlaciones son aplicables en forma muy cuidadosa sobre un rango acotado de materiales sobre los cuales se conoce, empíricamente, las condiciones en que se cumple la relación entre la propiedad buscada y el valor de la dureza.

En general se puede utilizar la medición de dureza para:

- evaluar la efectividad de un tratamiento térmico
- evaluar la resistencia al desgaste de un material
- evaluar la maquinabilidad del material
- obtener una idea de la resistencia a la tracción de un material. Los ensayos de dureza son junto con la tracción son los más utilizados en la selección y control de calidad de los materiales.[36]

El empleo de los ensayos de dureza como instrumento de clasificación y control de calidad en las líneas de producción ha sido favorecido gracias a la automatización de los ciclos de medición de los métodos tradicionales tales como el Rockwell o el Brinell. En este sentido existen aparatos que permiten ciclos automáticos de medición muy rápidos en los que prácticamente no se requiere la intervención del operador. Además, el avance de la microelectrónica y el software embebido han permitido el desarrollo de instrumentos medidores de dureza portátiles muy fáciles y rápidos de utilizar, que permiten la medición de piezas y lugares en los que los métodos tradicionales no son aplicables.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Ensayo de micro dureza vickers

Este método consiste en hacer, sobre la superficie de una probeta, una huella con un penetrador en forma de pirámide recta de base cuadrada, con determinado ángulo en el vértice, y medir la diagonal de dicha huella después de quitar la carga F (ver ilustración).

La dureza Vickers o también denominada micro dureza vickers se define como el cociente de la carga de ensayo por el área de la huella, que se considera como una pirámide recta de base cuadrada y con el mismo ángulo en el vértice que el penetrador. El tipo de prueba de dureza Vickers es muy similar a tipo Brinell, aunque la prueba Vickers utiliza un penetrador piramidal de diamante con ángulo de 130° entre sus caras y con base cuadrada.

El número de dureza Vickers HV está dado por la relación entre la fuerza aplicada y la superficie de la huella de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$HV = \frac{F}{A}$$

Ecuación 3. Para determinar la dureza vickers.

Donde:

F: fuerza aplicada en N

D: promedio de las diagonales en mm.[37]

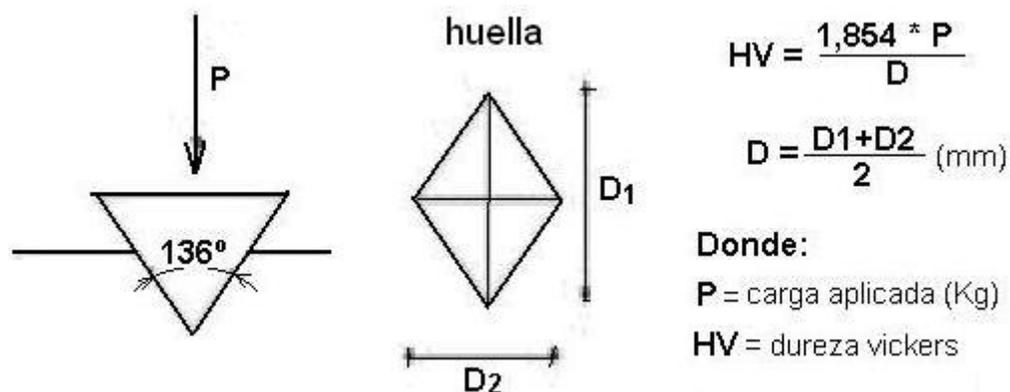


Ilustración 11. Expresión gráfica del método de dureza vickers[38]

Este método es muy difundido ya que permite medir dureza en prácticamente todos los materiales metálicos independientemente del estado en que se encuentren y de su espesor.[39]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

En este tipo de ensayo, un penetrador de diamante muy pequeño y de geometría piramidal cuadrada de diamante con ángulo 136° , es forzado en la superficie de la muestra.

Las cargas aplicadas son mucho menores que en las técnicas Brinell y Rockwell. La marca resultante se observa al microscopio y se mide la longitud de las diagonales de la huella generada; esta medida es entonces convertida en un número de dureza, mediante la expresión $2 d \sqrt{1.854P} HV =$ donde P es la carga en kgf y d la media de las dos diagonales de la huella, en mm.[39]

Es necesario que la superficie de la muestra haya sido preparada cuidadosamente (mediante desbaste y pulido) para poder asegurar una huella que pueda ser medida con exactitud. La dureza Vickers se designa por HV, y tiene muy poca variación en función de la carga aplicada. Para expresar el valor de dureza Vickers, se realiza citando las siglas HV seguido de la carga utilizada, P, y del tiempo de permanencia, t, separado por barras, por ejemplo: [n HVP/t].[38]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se ilustra el curso de investigación que se desarrolló, las técnicas que se utilizaron y la información obtenida con el fin de cumplir los objetivos planteados.

La fase experimental se desarrolló en dos etapas como se muestra en el flujograma de experimentación. La primera etapa comprendió preparación y caracterización de materiales y los ensayos de pérdida de masa por inmersión, a fin de cumplir con el primer objetivo específico planteado en esta investigación, que fue caracterizar el tipo de material que se utiliza en los motores de combustión interna a base de diésel. La segunda etapa comprendió el desarrollo de corrosión en combustible diésel y biodiesel, para el material evaluado tanto por la técnica de inmersión bajo las mismas condiciones de temperatura, así como espectroscopia de impedancia electroquímica cumpliendo con los otros objetivos planteados.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

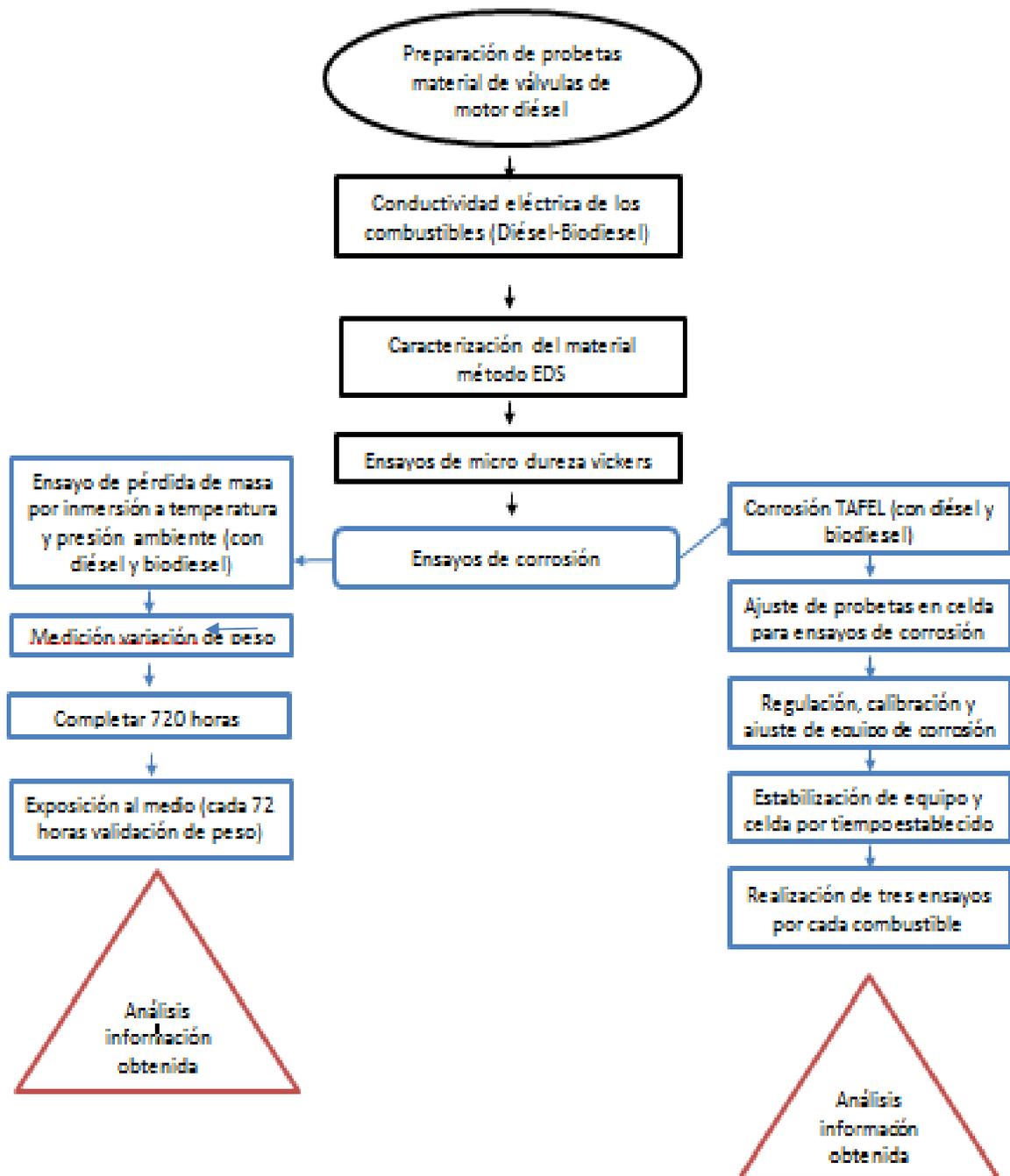


Ilustración 12. Flujograma de experimentación

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

2.1. Preparación y alistamiento del material

El material de estudio fue un acero inoxidable de clase *ASTM 440* (para el cual se entrará más en detalles en el siguiente numeral) extraídas de uno de los componentes utilizados en motores de combustión interna como lo son las válvulas de escape de un motor diésel. Estas se obtuvieron de un par de válvulas de escape del mismo motor de combustión con el fin de lograr una uniformidad en sus propiedades fisicoquímicas lo más parecidas posible. En total se obtuvieron 8 probetas.

El proceso seguido para la obtención de estas probetas, es mostrado en el siguiente flujograma.

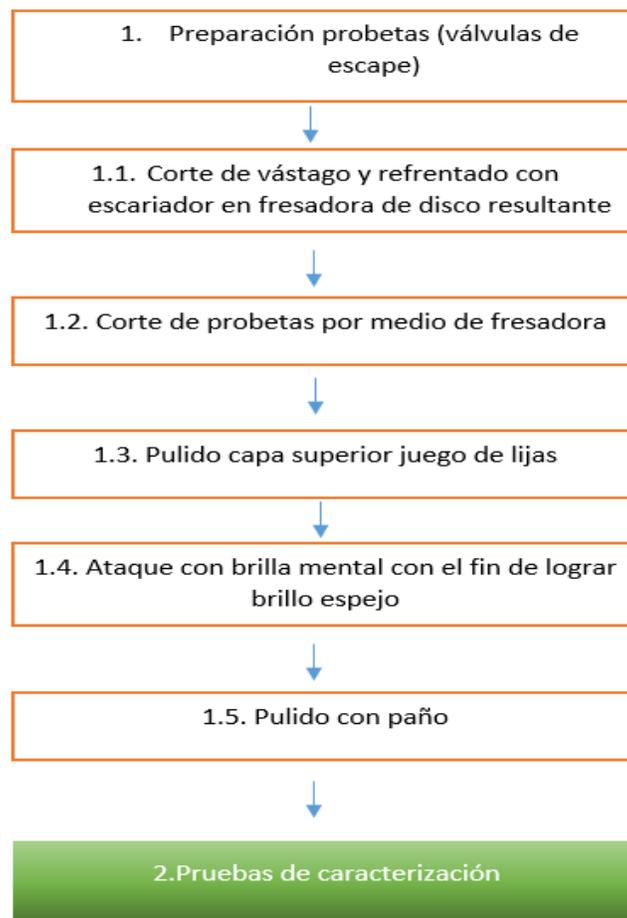


Ilustración 13. Flujograma de procedimiento para la obtención de las probetas de acero inox ASTM 440.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Alistamiento de probetas para proceso experimental



Ilustración 14. Corte válvula.

De cada válvula de escape se sacaron 4 probetas, cuatro de estas fueron cortadas en partes iguales con disco especial para su nivelación en fresadora con escariador.



Ilustración 15. Obtención de probetas.

Estas primeras piezas fueron destinadas para el ensayo de corrosión TAFEL, contemplaban las siguientes medidas y geometría:



Ilustración 16. Esquema Geometría y dimensiones del corte por fresadora de las probetas de acero inoxidable A4.

Las otras cuatro probetas fueron destinadas para la realización del ensayo de pérdida de masa por inmersión a temperatura ambiente, debido a que en este ensayo se tomó los

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

resultados en forma de porcentaje de pérdida de masa no fue necesario regalarle dimensiones precisas a cada probeta.



Ilustración 17, Probetas para ensayo de corrosión por medio de pérdida de peso.

Luego de este proceso, las probetas fueron pulidas con un juego de lijas desde el número 80 hasta el número 1600, a continuación, atacadas con brilla metal buscando una limpieza total de la capa superior de cada probeta y así mismo su brillo espejo y posteriormente llevadas a paño con agua hasta llegar a un acabado superficial ideal. Después de este procedimiento, las probetas quedaron listas para el procedimiento predecesor (realización EDS) y así continuar con los ensayos de corrosión.



Ilustración 18. Proceso de preparación de la muestra.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

2.2. Caracterización del material

Una vez realizado todo el procedimiento de preparación de probetas y además de pasarlas por un proceso de preparación de la superficie, se procedió a realizar las pruebas EDS y los ensayos de micro dureza o la también llamada dureza vickers con el fin de aclarar e identificar el tipo y la clase material que se estaba trabajando para así esclarecer y comprender los resultados obtenidos más adelante.

2.2.1. Caracterización del material método EDS

En el ensayo realizado para la caracterización del material, el resultado arrojado nos mostró que el contenido de carbono era mayor al 20%, esto nos da a entender que esta técnica es poco eficiente para determinar los componentes químicos en este material, se debe a que el equipo utilizado no está en las condiciones de definir la composición de los sustratos. Debido a esto se realizó otro tipo de técnica (micro dureza) con el fin de relacionar resultados y aproximar el tipo de material.

2.2.2. Ensayos de micro dureza

Como se menciona en el numeral 1.4.4, Este método consiste en hacer, sobre la superficie de una probeta, una huella con un penetrador en forma de pirámide recta de base cuadrada, con determinado ángulo en el vértice, y medir la diagonal de dicha huella después de quitar la carga F.



Ilustración 19. Proceso experimental ensayos de micro dureza.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

De manera genérica y resumida, los pasos que se siguieron para llevar a cabo el ensayo de micro dureza con el cual se identificó el tipo de material son:

- 1°. Preparación de la pieza o probeta a ensayar: limpiar, aplanar y pulir; proceso de metalografía.
- 2°. Colocación de la base de sujeción sobre la que se colocará la probeta
- 3°. Establecimiento del nivel de la carga adecuada que hay que aplicar sobre la probeta.
- 4°. Colocación del indentador adecuado al tamaño de la probeta.
- 5°. Regulación del tiempo de aplicación de la carga.
- 6°. Posteriormente, se acerca el indentador a ras sobre la superficie de la probeta.
- 7°. Aplicamos la carga durante el tiempo estipulado.
- 8°. Transcurrido este tiempo se quita la carga.
- 9°. Se mide la superficie de la huella creada en la superficie de la probeta para obtener el valor de su dureza.

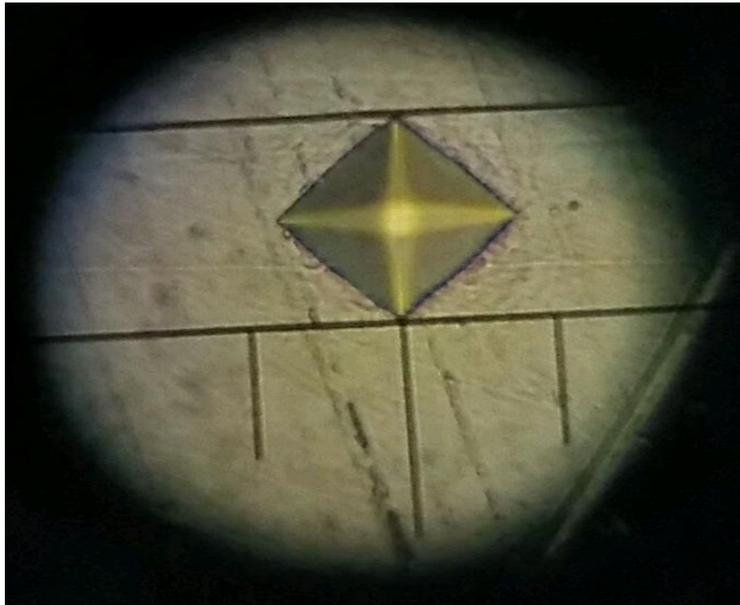


Ilustración 20. Resultados huella en superficies de material.

Para este proceso, se realizaron 11 tomas de micro dureza sobre el material con el fin de estar lo más cerca posible de la dureza real del mismo; los resultados y el manejo de los mismos son mostrados en el ítem de análisis y resultados **(3.1)**.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

2.3. Conductividad eléctrica de los combustibles (diésel y biodiesel)

Al realizar los estudios de conductividad eléctrica de los dos combustibles, se determinó que el equipo utilizado no tiene la sensibilidad suficiente para esta actividad, sin embargo, en antecedentes encontrados en la literatura se puede encontrar que la técnica si se puede realizar para estas sustancias.

2.4. Ensayos de corrosión.

Como se había contemplado en la ilustración 19 para los ensayos de corrosión en esta tesis, se han propuesto dos experimentos diferentes con el fin de mostrar los efectos corrosivos de los dos tipos de combustible expuestos para este proyecto (diésel y biodiesel).

Los combustibles diésel y biodiesel utilizados en el desarrollo de este proyecto fueron obtenidos en distribuidores avalados por el ministerio de minas y energías de la república de Colombia. En concordancia cumpliendo a cabalidad las normas NTC 1438 para el diésel relacionado en la tabla 1 y en la norma NTC 5444 para el biodiesel en la tabla, el diésel utilizado en la investigación fue suministrado por la empresa terpel, y el biodiesel con 12% de mezcla del mismo fue suministrado por el distribuidor de combustible biomax.

2.4.1. Ensayo pérdida de masa por inmersión total a temperatura ambiente.

Para la realización de los ensayos de pérdida de masa por inmersión a temperatura ambiente, inicialmente fueron seleccionadas 4 muestras del material a experimentar (estas fueron elegidas durante el proceso de preparación de probetas) con cada combustible; dos de ellas sumergidas en diésel y las otras dos en biodiesel, esto con el fin de tener variedad de resultados y así la coincidencia dentro de los mismos.

Este ensayo se realizó con recipientes de plástico. Se sumergen las probetas dentro del recipiente acompañadas de una cantidad considerable de combustible de los dos tipos esto durante las 720 horas planteadas inicialmente. Los recipientes son puestos dentro de un envase en vidrio el cual estaba en contacto con la temperatura ambiente.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Los recipientes utilizados son transparentes con el fin de tener un control sobre el nivel de cantidad de los combustibles para así garantizar que las probetas estuvieran totalmente sumergidas a lo largo del ensayo.



Ilustración 21. Materiales utilizados ensayo de corrosión por inmersión total.

En este ensayo, se tomaron medidas en el peso de cada probeta por periodos de cuarenta y ocho (48) horas, más exactamente estas medidas fueron tomadas los días martes y viernes de cada semana; luego de cada medición, como rutina, se hizo limpieza de las probetas en un baño liquido de desengrasante industrial, esto con el fin de dejar cada probeta totalmente sin residuos del combustible para de esta manera poderlo cambiar y empezar el conteo nuevamente.



Ilustración 22. Proceso de limpieza durante ensayos de pérdida de peso.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Luego de cada limpieza, se realizaron la toma de medidas en una balanza de precisión con una resolución de 0.00001 g. Por último, luego de realizada la medición de masa, las probetas se sumergirán nuevamente dentro de su recipiente con su medio (combustible) corrosivo respectivo.



Ilustración 23. Datos ensayos de pérdida de peso.

Para empezar el experimento, se tomarán los datos iniciales de masa luego de la limpieza. Se realizaron tres repeticiones para garantizar una respetabilidad de los resultados. Las combinaciones de mediciones obtenidas en este experimento fueron diligenciadas en el formato indicado.

2.4.2. Ensayo de corrosión TAFEL

Al usar el método de la prueba TAFEL determinamos la velocidad de corrosión del acero inoxidable **440C** el cual utilizamos en el desarrollo de esta investigación.

Empleamos una pieza metálica que comprende aproximadamente de los componentes carbono (C), manganeso (Mn), silicio (Si), cromo (Cr), molibdeno (Mo) y azufre (S) en el cual el área analizada se sometió a una solución acuosa de cloruro de sodio al 2.0% mediante la extrapolación de las pendientes de TAFEL.

Materiales.

- Electrodo.
- Trabajo: acero inoxidable **A4** montado sobre una recámara fabricada en nailon con una superficie de 0.64cm^2 .
- Auxiliar: Electrodo de carbono obtenido de un electrodo para soldadura.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

- Celda: celda de corrosión de dos bocas fabricada de teflón.
- Referencia: electrodo de plata cloruro de plata
 $\text{AgCl} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Cl}^-$ $\text{Ag}/\text{AgCl}, \text{Cl}^-$ [40]
- Equipo
- Potenciostato: gamry interface 1000

Variables que debíamos controlar.

Electrodo de trabajo vs electrodo de referencia

La corriente que circula a través del electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar.

El parámetro experimental: superficie de electrodo de trabajo 0.64cm^2 .

Procedimiento experimental.

1. Preparación de los materiales.

Electrodo de trabajo: la superficie del electrodo usado se prepara previamente lijándolo con un papel lija número 120, 600 y 1000 con el fin de dejarlo tipo espejo.

2. Se preparó la celda realizamos el montaje correspondiente donde tomamos el electrodo de trabajo en la recámara y le medimos continuidad con un multímetro Fluke 19 multimeter, al iniciar los ensayos presentamos inconvenientes de conductividad, las muestras utilizadas en esta investigación no quedaban totalmente aseguradas con las paredes de la recámara afectando así los resultados buscados.
3. A continuación de verificar la conductividad realizamos el montaje en la celda de Faraday dejando estabilizar por un periodo de 30 minutos antes de realizar los análisis de corrosión.
4. Realizamos la conexión de los electrodos de acuerdo al siguiente plano como referencia.

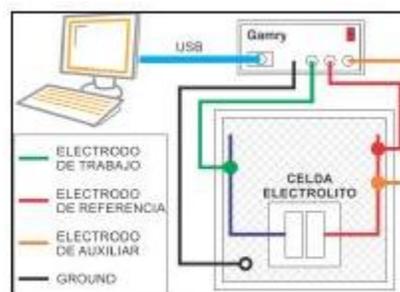


Ilustración 24. Plano ensamble de la probeta [41].

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

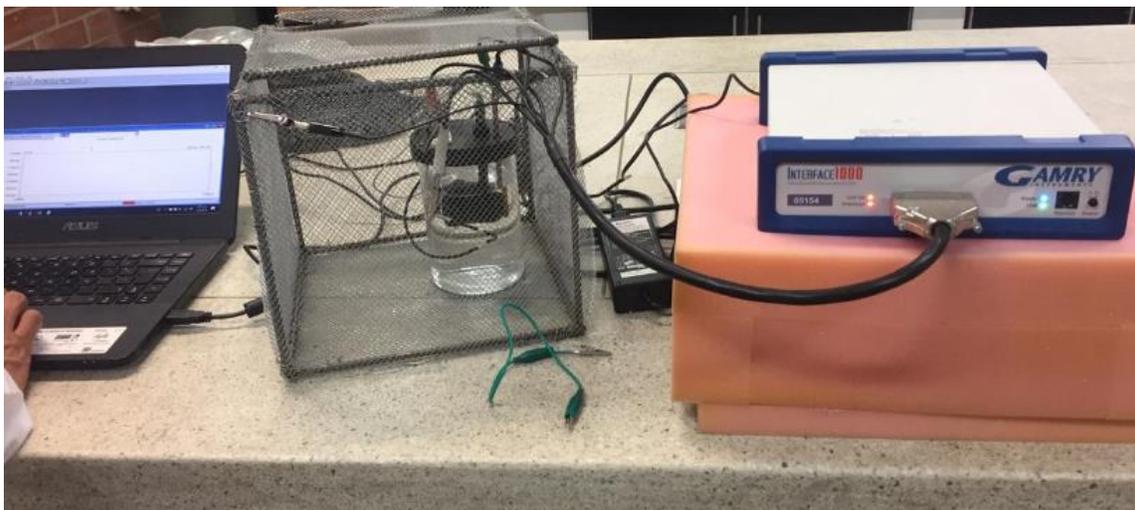


Ilustración 25. Fotografía de ensamble de probeta interior de la celda Faraday.

5. Verificación de las conexiones que los electrodos (referencia, trabajo y auxiliar), se encontraran correctamente unidos con el potenciostato: Encendimos el potenciostato y se establecen las condiciones iniciales de prueba

File Tools Window Help Potentiodynamic Common Tools Quick Help			
Chart Experimental Setup Experimental Notes Open Circuit Voltage Hardware Settings Tafel Quick Integration Min/Max			
Initial E (V)	<input type="text" value="-0,5"/>	<input type="radio"/> vs. E _{ref}	<input checked="" type="radio"/> vs. E _{gc}
Final E (V)	<input type="text" value="0,8"/>	<input type="radio"/> vs. E _{ref}	<input checked="" type="radio"/> vs. E _{gc}
Test Identifier	<input type="text" value="Prueba 2 Valvula pulida H2O + NaCl Oscar tesis"/>		
Date	<input type="text" value="13/5/2019"/>		
Time	<input type="text" value="17:03:54"/>		
Scan Rate (mV/s)	<input type="text" value="1"/>		
Sample Period (s)	<input type="text" value="1"/>		
Sample Area (cm ²)	<input type="text" value="0,031416"/>		
Density (g/cm ³)	<input type="text" value="7,87"/>		
Equiv. Wt	<input type="text" value="27,92"/>		
Conditioning	<input type="checkbox"/> Qff	<input type="text" value="15"/> Time(s)	<input type="text" value="0"/> E(V)
Init. Delay	<input type="checkbox"/> Qff	<input type="text" value="300"/> Time(s)	<input type="text" value="0,1"/> Stab.(mV/s)
IR Comp	<input type="checkbox"/> Qff		
Equil. Time (s)	<input type="text" value="0"/>		
Open Circuit (V)	<input type="text" value="-0,397687"/>		

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Ilustración 26. Tabla de valores en el software Gamry.

Iniciamos el programa de análisis con el fin de obtener una gráfica de escala logarítmica de acuerdo a la siguiente imagen.

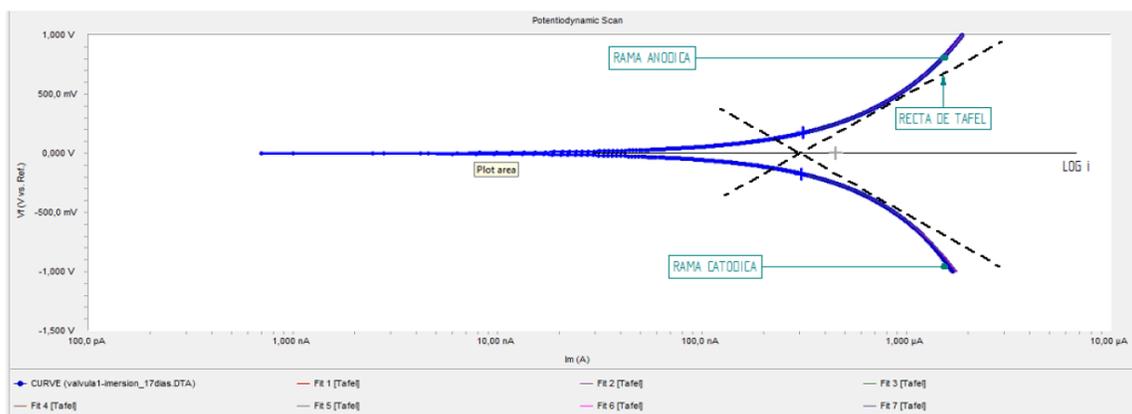


Ilustración 27. Lectura grafica TAFEL

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los análisis y resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación. Inicialmente se presenta la caracterización del material que fue base del estudio de este proyecto, abarcando aspectos generales como composición, dureza y desgaste. Adicionalmente, la caracterización permitió establecer los parámetros de referencia para los ensayos de corrosión.

Con el fin de medir los efectos corrosivos del biodiesel y el diésel sobre el acero inoxidable A4 se realizaron dos tipos de ensayos. El primer ensayo se hizo una prueba de inmersión total de las muestras a temperatura ambiente y ausencia de luz solar para la medición de la pérdida de masa y en el segundo ensayo, se buscó validar mediante el método de corrosión TAFEL, el comportamiento que se presenta en la interface biodiesel y diésel superficie de fundición del material. Los datos obtenidos por cada ensayo fueron analizados utilizando el método de regresión lineal en el primer experimento. Todos los tratamientos estadísticos realizados como fin encontrar la correlación entre las características corrosivas de cada combustible sobre el material interpretando las mediciones correspondientes.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

3.1. Resultados de la caracterización del material

Una vez realizados, uno a uno, los ensayos de micro dureza sobre el material de prueba, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 4. Resultados prueba de dureza material de estudio.

Ensayo	Dureza (HV)
1	410,3
2	345,2
3	342,2
4	356,1
5	406
6	407,1
7	406,4
8	338,8
9	407,8
10	413,8
11	366,4

Con base en estos resultados, a continuación, se muestra el paso a paso con el que se determinó el tipo de material que se está trabajando:

- De los valores obtenidos en cada ensayo se sacó un promedio con el fin de generalizar un poco los resultados y, además, a este valor se le añadió su respectivo error experimental, el valor resultante es **340,83 ± 2,87 HV**.
- Como es de conocerse, una de las propiedades mecánicas de los aceros en general es la resistencia a la tracción (Máximo esfuerzo de tracción que un cuerpo puede soportar antes de romperse), obteniendo este valor con base en el valor promedio obtenido de los ensayos de dureza pudo hacerse posible la identificación del tipo de material que se estaba trabajando.

La tabla 10, mostrada en el anexo, es una tabla de conversiones la cual entrelaza valores de dureza con valores de resistencia a la tracción, esta tabla fue obtenida por medio de la compañía llamada **LUTZ BLADES EXCTLY**, entidad especializada en la fabricación de cuchillas y cuchillos a base de acero inoxidable desde el año 1992.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

- Ya enfocados en la tabla obtenida, se buscó el valor más cercano al valor obtenido ($340,83 \pm 2,87 \text{ HV}$) promediado de los resultados de los ensayos de micro dureza, luego de identificado este valor de dureza se determina el valor relacionado con la resistencia a la tracción que se comprende para esta dureza.[42]

Dureza Brinell		Resistencia a la tracción	Dureza Rockwell		Dureza Vickers	Dureza Shore
Ø mm	HB	MPa	HRc	HRb	HV	D
3,20	363	1226	37	-	365	52
3,25	353	1187	36	-	353	51
3,30	341	1148	35	-	341	50
3,35	331	1118	34	-	331	49
3,40	321	1079	33	-	321	48
3,45	311	1050	31	-	311	46
3,50	302	1020	30	-	302	45
3,55	294	991	29	-	294	44

Ilustración 28. Obtención del valor de la resistencia a la tracción del material.[42]

- El valor más cercano al promediado en la tabla es 341 HV para la dureza, siguiendo esa línea, el valor de la resistencia a la tracción es de 1148 MPa; ya determinados estos valores, con ayuda de otra de las tablas bases suministradas por fabricantes de productos en aceros inoxidables determinaremos el tipo de material que se puso a prueba en esta tesis.

La tabla en la cual se determinó el tipo de material, fue suministrada por la compañía **Thyssenkrupp materials ibérica**, luego de haberse obtenido el valor de la resistencia a la tracción (1148 MPa), se procede a buscar este valor en la tabla ya mencionada para así determinar el tipo de material.[43]

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiésel

440C	0,05	0,70	1,50	0,04	0,030	16,00-18,00	0,40-0,80			A	285	-	
-	0,05	0,70	1,50	0,04	0,015	12,00-14,00	3,5-4,50	0,30-0,70	N>0,020	A	320	-	máx 1100
										QT 650	-	520	650-830
										QT 780	-	620	780-980
										QT 900	-	800	900-1100
-	0,06	0,70	1,50	0,04	0,030	15,00-17,00	4,00-6,00	0,80-1,50	N>0,020	A	320	-	máx 1100
										QT 760	-	550	760-960
										QT 900	-	700	900-1100
630	0,07	0,70	1,50	0,04	0,030	15,00-17,00	3,00-5,00	0,60	Cu:3,00-5,00 Nb: 5 x C0,45	AT	360	-	máx 1200
										P800	-	520	800-950
										P930	-	720	930-1100
										P960	-	790	960-1160
										P1070	-	1000	1070-1270

Ilustración 29. Determinación tipo de acero inoxidable.[43]

- Se determinó, con base en la tabla ya mencionada, que el material utilizado como materia prima en esta tesis es un **acero inoxidable** de referencia **ASTM 440C**.
- Para corroborar que este material si concuerde con el utilizado, se hizo una comparación entre las aplicaciones del material encontrado por tabla y del uso al que estaba expuesto el trabajado en este proyecto.
- Las aplicaciones y características del acero inoxidable ASTM 440 es utilizado donde se requieran altas temperaturas y extrema dureza este acero es resistente a la abrasión y posee gran resistencia a la corrosión. De baja maquinabilidad. Las principales aplicaciones son: cuchillería, partes resistentes al secado, equipos quirúrgicos, inyectores, etc
- Como se ha mencionado durante todo el contenido de la tesis, este material fue extraído de unas válvulas de un motor diésel, concentrándonos en el uso que se le da en estas válvulas, estas están expuestas a altas temperaturas, por su trabajo natural deben tener extrema dureza lo cual genera baja maquinabilidad, esto mencionado se pudo determinar en el proceso de alistamiento de las probetas, además de esto también durante el proceso experimental de corrosión se percató que el materia era muy resistente a la corrosión (datos que se mostraran en el siguiente ítem) tal cual como lo mencionan en sus características. Por esta seria de similitudes se confirmó que el material utilizado es el **ACERO INOX ASTM 440c**.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

3.2. Efectos corrosivos diésel y biodiesel sobre el material por método de inmersión total a temperatura ambiente.

El ensayo de corrosión a temperatura ambiente consistió en la inmersión total de las probetas del material que es puesto a prueba (acero inoxidable ASTM 440) en cada uno de los dos combustibles destinados para este fin (diésel y biodiesel) por un periodo de tiempo controlado como esta propuesto en el numeral 1.6. Con el fin de conocer el porcentaje de pérdida de masa de las probetas se utilizó una balanza de precisión la cual comprende una resolución o precisión de 0.00001 g. se realizaron tres repeticiones por medición para asegurar la repetitividad y confiabilidad de las mediciones obtenidas. Antes de realizar cada medición las probetas fueron sometidas a un proceso de limpieza para el cual fue utilizado un desengrasante industrial con el fin de quitar cualquier impureza que influye en los valores de masa reales.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos

Tabla 5 Resultados obtenidos ensayo de corrosión.

	MUESTRA	PROMEDIO	FECHA	DIAS EN INMERSION	ERROR EXPERIMENTAL
ENSAYO MASA INICIAL	BIODIESEL 1	7,24408	14/06/2019		6,66667E ⁻⁰⁶
	BIODIESEL 2	6,93266			1,34715E ⁻⁰⁵
	DIESEL 1	8,52937			1,20185E ⁻⁰⁵
	DIESEL 2	7,55370			5,09175E ⁻⁰⁶
ENSAYO INMERSION 1	BIODIESEL 1	7,24406	18/06/2019	4	5,09175E ⁻⁰⁶
	BIODIESEL 2	6,93264			5,09175E ⁻⁰⁶
	DIESEL 1	8,52933			5,7735E ⁻⁰⁶
	DIESEL 2	7,55367			5,09175E ⁻⁰⁶
ENSAYO INMERSION 2	BIODIESEL 1	7,24398	21/06/2019	3	1,73205E ⁻⁰⁵
	BIODIESEL 2	6,93257			1,57527E ⁻⁰⁵
	DIESEL 1	8,52923			8,81917E ⁻⁰⁶
	DIESEL 2	7,55353			3,372E ⁻⁰⁵
ENSAYO	BIODIESEL 1	7,24392	25/06/2019	4	1,01835E ⁻⁰⁵

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

INMERSION 3	BIODIESEL 2	6,93256			$2,72845E^{-05}$
	DIESEL 1	8,52910			$2,26895E^{-05}$
	DIESEL 2	7,55346			$1,76383E^{-05}$
ENSAYO INMERSION 4	BIODIESEL 1	7,24385	28/06/2019	3	$1,67774E^{-05}$
	BIODIESEL 2	6,93252			$1,89541E^{-05}$
	DIESEL 1	8,52886			$1,07152E^{-05}$
	DIESEL 2	7,55331			$3,849E^{-06}$
ENSAYO INMERSION 5	BIODIESEL 1	7,24387	2/07/2019	4	$1,57527E^{-05}$
	BIODIESEL 2	6,93253			$1,64429E^{-05}$
	DIESEL 1	8,52884			$1,71053E^{-05}$
	DIESEL 2	7,55327			$5,09175E^{-06}$
ENSAYO INMERSION 6	BIODIESEL 1	7,24391	5/07/2019	3	$1,07152E^{-05}$
	BIODIESEL 2	6,93246			$1,20185E^{-05}$
	DIESEL 1	8,52881			$1,52753E^{-05}$
	DIESEL 2	7,55326			$6,93889E^{-06}$
ENSAYO INMERSION 7	BIODIESEL 1	7,24388	9/07/2019	4	$2,45704E^{-05}$
	BIODIESEL 2	6,93247			$3,38296E^{-05}$
	DIESEL 1	8,52882			$1,34715E^{-05}$
	DIESEL 2	7,55327			$1,17063E^{-05}$
ENSAYO INMERSION 8	BIODIESEL 1	7,24386	12/07/2019	3	$2,00924E^{-05}$
	BIODIESEL 2	6,93253			$1,76383E^{-05}$
	DIESEL 1	8,52881			$1,64429E^{-05}$
	DIESEL 2	7,55325			$1,5396E^{-05}$
ENSAYO INMERSION FINAL	BIODIESEL 1	7,24387	16/07/2019	4	$2E^{-05}$
	BIODIESEL 2	6,93249			$1,07152E^{-05}$
	DIESEL 1	8,52881			$1,01835E^{-05}$
	DIESEL 2	7,55324			$1,85592E^{-05}$

Después de realizado el experimento y tomadas las mediciones de la pérdida total de masa se procedió a sacar el promedio de porcentaje de la masa perdida para cada combinación probeta – Biodiesel y probeta – diésel con la siguiente formula.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Porcentaje de masa total = (Masa inicial – Masa final) * 100%

Luego de realizados los cálculos, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Promedio de Porcentajes de pérdida de masa probetas sumergidas en biodiesel.

Tabla 6. Pérdida de masa probetas sumergidas en biodiesel.

DATOS GRAFICA MUESTRA BIODIESEL 1			DATOS GRAFICA MUESTRA BIODIESEL 2		
FECHAS ENSAYO	DIAS	% PERDIDA DE MASA	FECHAS ENSAYO	DIAS	% PERDIDA DE MASA
18/06/2019	4	0,002	18/06/2019	4	0,002
21/06/2019	7	0,010	21/06/2019	7	0,008
25/06/2019	11	0,016	25/06/2019	11	0,010
28/06/2019	14	0,023	28/06/2019	14	0,014
2/07/2019	18	0,021	2/07/2019	18	0,013
5/07/2019	21	0,017	5/07/2019	21	0,020
9/07/2019	25	0,020	9/07/2019	25	0,019
12/07/2019	28	0,022	12/07/2019	28	0,013
16/07/2019	32	0,021	16/07/2019	32	0,017

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

- Promedio de Porcentajes de pérdida de masa probetas sumergidas en diésel.

Tabla 7. Pérdida de masa probetas sumergidas en biodiesel.

DATOS GRAFICA MUESTRA DIESEL 1			DATOS GRAFICA MUESTRA DIESEL 2		
FECHAS ENSAYO	DIAS	% PERDIDA DE MASA	FECHAS ENSAYO	DIAS	% PERDIDA DE MASA
18/06/2019	4	0,004	18/06/2019	4	0,004
21/06/2019	7	0,014	21/06/2019	7	0,017
25/06/2019	11	0,027	25/06/2019	11	0,024
28/06/2019	14	0,051	28/06/2019	14	0,040
2/07/2019	18	0,053	2/07/2019	18	0,043
5/07/2019	21	0,056	5/07/2019	21	0,045
9/07/2019	25	0,055	9/07/2019	25	0,044
12/07/2019	28	0,056	12/07/2019	28	0,045
16/07/2019	32	0,056	16/07/2019	32	0,046

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Ya promediados los valores de pérdida de masa para cada probeta, se realizó otro promedio, este basado en el combustible utilizado, para así obtener un solo resultado de pérdida de masa con el diésel y el otro con el biodiesel; recordar que por esta situación se tomó la pérdida de masa total en forma de porcentaje ya que como las probetas no eran iguales en dimensiones por este método era posible poderlas comparar y así obtener resultados coherentes.

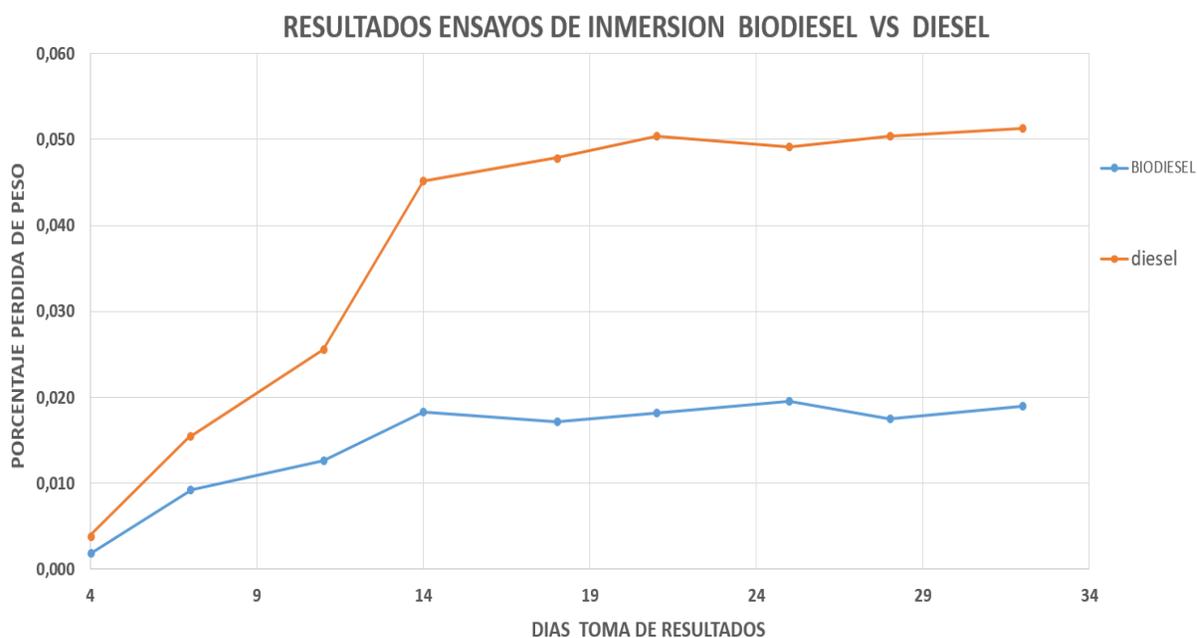
En la siguiente tabla se muestran los resultados finales obtenidos de la pérdida de masa en porcentaje para cada combustible sobre el acero 440c inox, durante, el periodo de tiempo determinado para este ensayo de corrosión.

Tabla 8. Resultados finales porcentaje pérdida de masa del acero 440c inox al contacto de diésel y biodiesel.

PROMEDIOS FINALES PERDIDA DE MASA POR PORCENTAJE			
BIODIESEL		DIESEL	
DIAS	PROMEDIO	DIAS	PROMEDIO
4	0,002	4	0,004
7	0,009	7	0,015
11	0,013	11	0,026
14	0,018	14	0,045
18	0,017	18	0,048
21	0,018	21	0,050
25	0,019	25	0,049
28	0,018	28	0,050
32	0,019	32	0,051

Los porcentajes finales obtenidos después del tiempo total de ensayo son mostrados en la gráfica lo cual hará una lectura más comprensiva de estos, así mismo aclara el panorama a la respuesta del objetivo principal de esta tesis.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel



Grafica 1. Gráfica de porcentaje de pérdida total del peso del material de estudio (acero 440c inox) por cada combustible a temperatura ambiente.

En la gráfica, se puede observar que el Diésel fue el combustible que presentó el mayor valor de pérdida de masa sobre el material, con un valor máximo de casi 0,051% de su peso inicial. El Biodiesel se reaccionó sobre el material con menos intensidad generando una pérdida de masa con un valor máximo de 0,019 % del peso inicial del material.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

3.3. Efectos corrosivos diésel y biodiesel sobre el material por método de corrosión TAFEL.

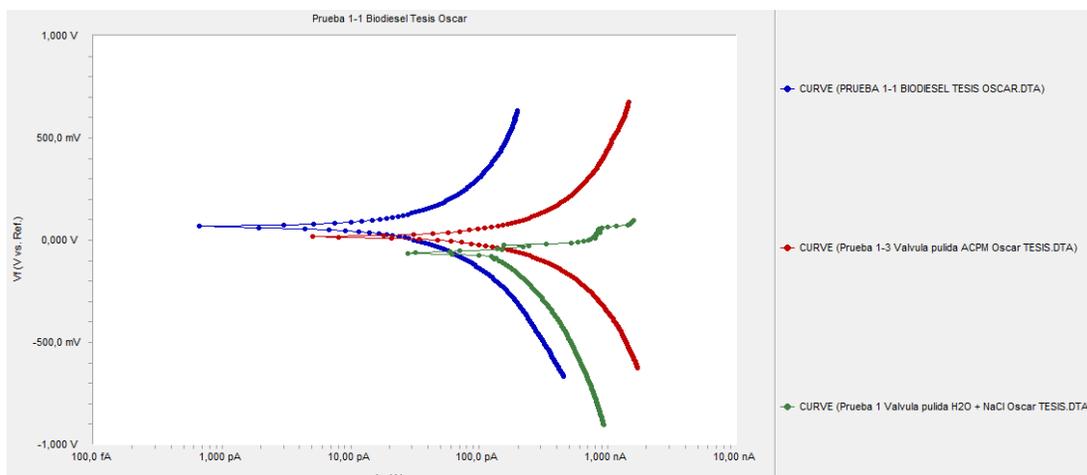


Ilustración 30. Superposición grafica TAFEL

En la gráfica anterior podemos observar la relación de las tres probetas que fueron utilizadas con el procedimiento TAFEL clasificándolas de la siguiente manera.

- Azul para la probeta con biodiesel.
- Rojo para la probeta con biodiesel.
- Verde para la probeta con sal.

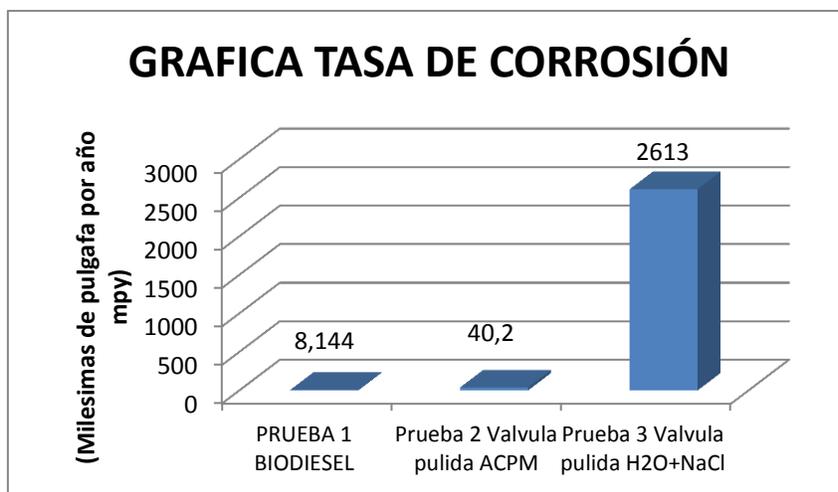
La curva azul presenta mayor resistencia a la corrosión generando picos muy abiertos tanto en la curva anódica y curva catódica demostrando que el material en cierto punto se pasiva, mientras que la curva verde nos mostró gran variación o picos de corriente dejándonos ver que la solución NaCl logra una mayor corrosión frente a los dos combustibles.

Tabla 9. Resultados ensayo Tafel.

Sustrato tratado con:	Beta A (V/decada)	Beta C (V/decada)	Intensidad eléctrica	Potencial eléctrico	Tasa de Corrosión (mpy)
PRUEBA 1 BIODIESEL	16,77e6 V/decade	2,823 V/decade	560,0 pA	65,80 mV	8,144e-3 mpy
Prueba 2 Válvula pulida ACPM	9,036 V/decade	3,494 V/decade	2,760 nA	14,50 mV	40,20e-3 mpy
Prueba 3 Válvula pulida H2O+NaCl	84,70e-3 V/decade	22,35 V/decade	18000 nA	-240,0 mV	261,3e-3 mpy

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

3.4. Análisis comparativo de los dos tipos de combustibles utilizados.



Grafica 2. Gráfica Tasa de corrosión prueba Tafel.

En la gráfica anterior podemos ver que al biodiesel al no tener una cantidad significativa de azufre como el diésel tiende a tener la menor pérdida de material, y la solución NaCl por sus compuestos es la que produce una gran pérdida de material respecto a los combustibles.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

En esta experimentación se obtuvo una relación significativa entre la composición de los dos tipos de combustible comercial más utilizado en vehículos diésel y el proceso de corrosión que se presenta en el acero inoxidable 440C.

CONCLUSIONES

- En el ensayo realizado para la caracterización del material (EDS) el resultado arrojado nos mostró que el contenido de carbono era mayor al 20%, esto nos da a entender que esta técnica es poco eficiente para determinar los componentes químicos, dado que el equipo utilizado no está en las condiciones de definir la composición de los sustratos. Es de recalcar, que se relacionó esta técnica y sus resultados con los ensayos de micro dureza para poder así aproximar que tipo de material se utilizó.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

- Al realizar los estudios de conductividad eléctrica de los dos combustibles, se determinó que el equipo utilizado no tiene la sensibilidad suficiente para esta actividad, sin embargo, en antecedentes encontrados en la literatura se puede encontrar que la técnica si se puede realizar.
- Se puede concluir que el Biodiesel es un combustible menos corrosivo según la NTC 1438, 5444, debido a que contiene menos partículas de azufre gracias a su gran cantidad de componentes orgánicos, a comparación del diésel debido a que para este los componentes son derivados del crudo.
- En relación a la velocidad de corrosión, se puede deducir que el diésel por sus características es el que tiene magnitudes más altas en este valor. Esto se relaciona a la gran cantidad de azufre que comprende este combustible en su composición química, el azufre al reaccionar con el oxígeno genera una sustancia denominada óxido de azufre (SO_2), el cual por ser un óxido, deterioró con mayor velocidad la capa pasiva generada por el material, aumentando la tasa de corrosión casi tres veces a comparación de la generada por el otro combustible (Biodiesel).
- De acuerdo con los resultados obtenidos en el desarrollo del ensayo TAFEL nos mostró que el acero inox 440 c es un acero muy resistente a la corrosión y tiende a generar una pasivación, esto sucede gracias a la gran cantidad de cromo contenido en la estructura química de este material.
- Respecto a los estudios realizados con el acero inoxidable 440C, el cual es utilizado en gran parte de la industria de componentes de automotores, nos permitió ver que es un material altamente resistente a la corrosión debido a la poca cantidad de carbono encontrado en su composición química. Por eso mismo garantiza una buena productividad en su área de utilización.

RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de metalografía y EDS (Espectrometría de dispersión de energía de rayos X) con el fin de comprobar y analizar más a fondo el tipo de material a estudiar y los resultados obtenidos durante los procesos de experimentación.
- Realizar un estudio de corrosión del acero inoxidable 440c con exposición a temperaturas elevadas y otro tipo de ambientes para asociar el comportamiento real de lo que puede suceder en una cámara de combustión en funcionamiento.
- Hacer estudios complementarios de la composición del Biodiesel después del proceso de corrosión para verificar su composición en ese punto.
- Ejecutar experimentos de corrosión TAFEL e inmersión con más materiales que estén expuestos al Biodiesel y biodiesel dentro de la industria y demás aplicaciones.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

5. LISTA DE REFERENCIAS

- [1] WORLD ENERGY COUNCIL, “Survey of Energy Resources,” Londres, 2007.
- [2] E. J. de S. Parente, “Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado,” Brasil: Tecbio, 2003.
- [3] M. A. Fazal, A. Haseeb, and H. Masjuki., “NoDegradation of automotive materials in palm biodiesel Title,” in *Energy*, 40th ed., 2012, pp. 76–83.
- [4] M. A. Fazal, A. Haseeb, and H. Masjuki., “An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability,” in *Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance*, 2011, pp. 1314–1324.
- [5] A. Haseeb, M. Fazal, and H. Jahirul, “Compatibility of automotive materials in biodiesel,” *Fuel*, vol. 90, pp. 922–931, 2011.
- [6] M. D. M. Y. ENERGÍA, “RESOLUCIÓN 40174 DE 24 DE FEBRERO DE 2019,” 2019.
- [7] I. Atadashi, M. Aroua, and A. A. Aziz, “Renewable and Sustainable Energy Reviews,” in *High quality biodiesel and its diesel engine application: A review*, vol. 14, 2010, pp. 1999–2008.
- [8] M. A. Fazal, A. Haseeb, and H. Masjuki, “Energy,” in *Effect of temperature on the corrosion behavior of mild steel upon exposure to palm biodiesel*, 2011, pp. 3328–3334.
- [9] “Ministerio de Transporte,” *Transporte en Cifras - Estadísticas 2017*, 2019.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

[Online]. Available: www.mintransporte.gov.co.

- [10] F. Guevara *et al.*, “Comunicado técnico a propósito de la emergencia por mala calidad del aire en Bogotá.”
- [11] S. Pehan., M. S. Jerman, M. Kegl, and B. Kegl, “Biodiesel influence on tribology characteristics of a diesel engine,” vol. 88, no. Fuel, pp. 970–979, 2009.
- [12] G. C. M., V. B. M., and S. M., “Degradation of nitrile rubber fuel hose by biodiesel use,” *Energy*, pp. 364–369, 2014.
- [13] A. Akita, “Estudo eletroquímico da corrosividade de biodiesel para aço carbono e outros materiais metálicos usados em veículos automotores.,” Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita filbo, 2013.
- [14] X. Querol, A. Alastuey, T. Moreno, and M. del M. Viana, “Calidad del aire urbano, salud y tráfico rodado,” vol. 1, Barcelona, España, 2006.
- [15] A. G3, “Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.,” in *International ASTM*, 2010, p. 89.
- [16] Y. A. Çengel and M. A. Boles, “ENERGÍA Y AMBIENTE,” in *TERMODINÁMICA*, 7th ed., 2012, pp. 86–91.
- [17] P. N. Benjumea, J. R. Agudelo, and A. Y. Benavidez, “ANÁLISIS DE CALIDAD DE LOS BIOGASOLEOS DE ACEITE DE PALMA E HIGUERILLA,” pp. 11–21, 2004.
- [18] Ayhan Demirbas, *Biodiesel A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. SpringerVerlag London Limited, 2008.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

- [19] T. O. E. Piamba, “Estudo do desempenho do grupo motor-gerador alimentado com diferentes misturas diesel-biocombustíveis e avaliação de emissões.” Universidade Federal Fluminense, 2009.
- [20] M. Lapuerta, O. Armas, and R. F. Jose, “Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions.”» *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, pp. 198–223, 2008.
- [21] ministerio de minas y energia y ministerio de ambiente y desarrollo sostenible Ministerio de agricultura y desarrollo rural, “RESOLUCIÓN NÚMERO 4-0666.” Bogotá, 2019.
- [22] I. Pacifico A, *Avaliacao da corrosividade do biodiesel por tecnicas gravimetricas y electroquimicas.*,. Sao Paulo, 2012.
- [23] D. P. Geller, T. T. Adams, J. W. Goodrum, and J. Pendergrass, “Storage stability of poultry fat and diesel fuel mixtures: specific gravity and viscosity,” in *Fuel*, n^o 87, 2008, pp. 92–102.
- [24] M. A. Fazal, A. Haseeb, and H. Masjuki, “Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials,” in *Fuel Processing Technology*, 91st ed., 2010, pp. 1308–1315.
- [25] E. Hua, Y. Xu, X. Hu, and L. Pan, “Corrosion behaviors of metals in biodiesel from rapeseed oil and methanol,” in *Renewable Energy*, 37th ed., 2012, pp. 371–378.
- [26] G. Pérez, “ESPECTROMETRIA,” *Espectrometría de rayos X*. [Online]. Available: https://www.espectrometria.com/espectrometra_de_rayos_x.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

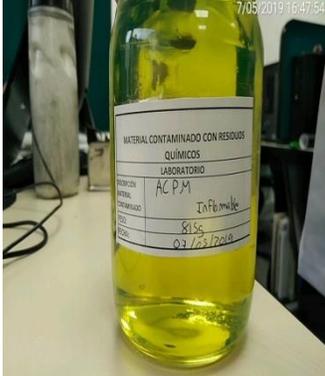
- [27] S. L. Bonnet Suministros y Maquinarias, “bonnet,” *Clasificación de los aceros inoxidables*, 2019. [Online]. Available: <http://www.bonnet.es/Utilidades/ClasificacionAcerosInoxidables.aspx>.
- [28] S. A. de C. V. Servicio Industrial, “Acero SISA 440C INOX.” Aceros Especiales Grados Herramienta y Maquinaria Aceros SISA-MET® de Metalurgia en Polvo (PM), Piezas Industriales Forjadas, Mexico D.F., 2012.
- [29] LlonguerasMendoza, W. L. G. P. R. L. J. Avila, and J. Genescá, “No TitleTres métodos para evaluar una velocidad de corrosión,” Ciudad de México, 1991.
- [30] Juan Genescá Llogueras, “Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión,” Ciudad Universitaria, 2002.
- [31] A. E. M. Castro, “IMPLANTACIÓN IÓNICA POR PLASMA EN TITANIO Y ACEROS INOXIDABLES USADOS EN PRÓTESIS E INSTRUMENTAL MÉDICO.,” Toluca México.
- [32] “DEGRADACIÓN Y PROTECCIÓN DE MATERIALES 2016, laboratorio 1, DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN,” 2016.
- [33] P. Products and P. Products, “Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test 1,” pp. 1–10, 2019.
- [34] ASM Handbook Committee, “Metallography and Microstructures,” in *ASM International, 2004. ASM HANDBOOK*, 10th ed., 2004.
- [35] E.H.Davis, E.G.Troxell, and W.C.Wiskocil, “Ensaye e Inspección de los Materiales en Ingeniería,” *McGRAW-HILL.*, pp. 73–80, 1964.

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

- [36] Santos E, Y. D., J. R. O., and R. U. V, “Acerca del ensayo de dureza,” pp. 73–80, 2001.
- [37] A. E. Ramírez, “Trazabilidad y Unificación de las escalas de dureza,” México.
- [38] W. . Callister, “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.”
- [39] C. y T. de los Materiales, “ENSAYOS MECÁNICOS I: DUREZA,” vol. PRACTICA 6.
- [40] J. ÁVILA and J. GENESCÁ, “<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>,” *MÁS ALLÁ DE LA HERRUMBRE II. LA LUCHA CONTRA LA CORROSIÓN*, 1989. [Online]. Available: [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/masal la2.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/masal%20la2.htm).
- [41] GAMry Instruments, “Redefining High Value Electrochemistry.”
- [42] L. B. Exactly, “Guía de la lámina.”
- [43] ThyssenKrupp materiales Ibérica, “Inoxidables y Aluminio.”

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

Apéndice

		
MEDIDOR PORTÁTIL DE TEMPERATURA Y PH/EC/TDS	ACPM	BIODIESEL
		
EQUIPO GAMRY 1000	ELECTRODO DE CARBON	RECAMARA DE MUESTRAS
		
PROBETA	DUROMETRO BRINELL	VALVULAS DE MOTOR

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

		
PREPARACIÓN MUESTRAS	INTERIOR DE RECAMARA	
		
RECUBRIMIENTO DE CONDUCTOR	RECAMARA Y TAPA	CONDUCTOR ELECTRODO DE TRABAJO
		
TAPA	VALVULA ATACADA NaCl	MONTAJE CON ACPM

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel

6. ANEXOS

Tabla 10. Tabla de conversión de durezas y resistencia a la tracción.

Dureza Brinell							Dureza Brinell						
Dureza Brinell		Resisten- cia a la tracción	Dureza Rockwell		Dureza Vickers	Dureza Shore	Dureza Brinell		Resisten- cia a la tracción	Dureza Rockwell		Dureza Vickers	Dureza Shore
ø mm	HB	MPa	HRc	HRb	HV	D	ø mm	HB	MPa	HRc	HRb	HV	D
-	-	-	68	-	940	105	3,20	363	1226	37	-	365	52
2,30	712	-	67	-	903	104	3,25	353	1187	36	-	353	51
2,30	697	-	66	-	870	103	3,30	341	1148	35	-	341	50
2,35	682	-	65	-	840	102	3,35	331	1118	34	-	331	49
2,37	668	-	64	-	813	100	3,40	321	1079	33	-	321	48
2,40	653	-	63	-	787	98	3,45	311	1050	31	-	311	46
2,43	639	-	62	-	762	96	3,50	302	1020	30	-	302	45
2,45	624	-	61	-	738	93	3,55	294	991	29	-	294	44
2,48	611	-	60	-	715	91	3,60	285	961	28	-	285	43
2,51	595	-	59	-	693	89	3,65	277	932	27	-	277	42
2,54	582	-	58	-	672	87	3,70	269	902	26	-	269	41
2,57	568	-	57	-	652	84	3,75	262	873	25	-	262	40
2,60	555	2148	56	-	632	82	3,80	255	853	24	-	255	39
2,63	542	2089	55	-	612	80	3,85	248	834	23	-	248	38
2,66	530	2011	54	-	593	78	3,90	241	814	21	-	241	37
2,69	517	1933	53	-	575	76	3,95	235	795	20	-	235	36
2,72	507	1874	52	-	558	74	4,00	229	775	19	100	229	-
2,75	495	1815	51	-	542	72	4,05	223	755	18	99	223	35
2,78	485	1756	50	-	526	70	4,10	217	735	17	98	217	-
2,81	473	1687	49	-	510	68	4,15	212	716	16	97	212	34
2,85	462	1638	48	-	495	67	4,20	207	696	15	96	207	33
2,88	451	1579	47	-	480	65	4,25	201	677	14	95	201	-
2,91	440	1530	46	-	466	64	4,30	197	667	13	94	197	32
2,95	429	1472	44	-	449	62	4,35	192	647	12	93	192	31
3,00	415	1413	42	-	429	60							
3,05	401	1364	41	-	410	58							
3,10	388	1315	40	-	393	56							
3,15	376	1265	39	-	379	54							

Análisis de corrosión en el acero 440c inoxidable utilizando combustibles diésel y biodiesel