

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

Caracterización de la influencia de la corrosión que puede afectar el proceso de granallado en el acero SAE 5160 utilizado para resortes de ballesta en la industria automotriz.

Wilmar Ferney Barbosa Espinal

Daiver Alberto García Salinas

Trabajo de grado para Optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Alberto David Pertuz Comas,

Ph.D. Ingeniería Mecánica

Codirector

Jorge Guillermo Díaz Rodríguez,

Ph.D. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Wilmar Ferney Barbosa Espinal

Primeramente, doy gracias a Dios por brindarme la oportunidad de culminar este logro.

A nuestro director Alberto David Pertuz Comas, PhD. y codirector Jorge Guillermo Díaz Rodríguez, PhD. que siempre estuvieron ahí para aportarnos, que nos brindaron todo su conocimiento y nos permitieron adquirir nuevos conocimientos y así poder culminar con este proyecto.

A mi familia por todo el apoyo brindado en este arduo proceso de educación, gracias por todos los esfuerzos y sacrificios realizados para poder llevar a cabo todas y cada una de mis metas.

A mi pareja Laura Gamboa por todos esos consejos y el apoyo brindado en cada una de las etapas de este gran proceso.

A Valentina Gamboa, Luis Mateus, Daiver García, Gerardo Martínez, Eduardo Paez, a la familia Uniminex y a todas esas personas que estuvieron para apoyarme, aconsejarme y alentarme a ser mejor cada día.

Solo me resta agradecerles por todo el apoyo brindado, consejos y regaños algunas veces necesarios. Gracias, mil y mil gracias.

Daiver Alberto García Salinas

Principalmente le agradezco a Dios por haberme permitido culminar con este proyecto, por haberme dado la fortaleza para llevar a cabo este proceso y poder uno de mis más anhelados deseos.

A nuestro director Alberto David Pertuz Comas, PhD. y codirector Jorge Guillermo Díaz Rodríguez, PhD. que siempre estuvieron ahí para aportarnos nuevos conocimientos y de esta manera lograr terminar este proyecto.

A mi madre Martha Isabel Salinas morales por el apoyo, la paciencia y el gran amor que me ha brindado en el transcurso de dicho proceso y en la formación como persona. A mi padre Luis Alberto García Sánchez por todo el trabajo y sacrificio que ha hecho en el transcurso de este proceso de formación, por darme la fuerza y buenos consejos para poder lograr mis metas.

A mi hermano Jorman García que siempre me motivo a seguir adelante sin importar las circunstancias.

A mi tío Antonio José García Sánchez por los buenos consejos y siempre estar ahí para ayudarme y darme la mano cuando lo necesite.

A María de los Ángeles Guerrero Navisoy por su apoyo y sus buenos consejos para poder culminar dicho proyecto. Gracias por enseñarme a ser perseverante para lograr las metas propuestas, por último, gracias por toda la motivación a lo largo de esta trayectoria.

A mi compañero de proyecto Wilmar Barbosa que a pesar de tantas dificultades logramos sacar este proceso adelante.

Por último, a todos mis amigos y familiares que han sido un gran apoyo en este proceso y han contribuido a que este trabajo se haya realizado con éxito, les doy mis más sinceros agradecimientos a todos aquellos que nos brindaron todo su compartieron todo su conocimiento.

Agradecimientos

Nuestros más sinceros agradecimientos al parque tecnológico Guatiguará por brindarnos los espacios para realizar cada uno de las pruebas que conllevaron a la culminación de este proyecto, también agradecemos al Grupo de Investigación G.I.C, profesor Darío Yesid Peña, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido LabMIC, profesor Carlos Alberto Villareal, A Imal por suministro de muestras y a todas las personas que brindándonos su conocimiento de una u otra manera aportaron a la culminación de este proyecto.

Tabla de Contenido

_Toc118925610

1. Estado del arte.....	14
1.2. Tipos de suspensiones.....	16
1.3. Otros componentes de suspensión.	20
1.4. Resortes de ballesta.....	23
1.5. Características generales de los resortes de ballesta.	23
1.6. Proceso de manufactura.....	25
1.7. Justificacion y/o planteamiento problema.....	27
2. Objetivo general.....	29
2.1. Objetivos especificos.....	29
3. Marco teorico.....	30
3.1. Fatiga.....	30
3.2. Curva s-n.....	31
3.3. Propiedades mecánicas del acero sae 5160.....	32
3.5. El fenómeno de corrosión.....	39
3.6. Factores que intervienen en el proceso de corrosión.....	41
3.7. Teoría del potencial mixto.	45
3.8. Método potencioestático.	49
4. Metodología.....	51
5. Resultados y análisis.....	67
5.1. Microdureza.....	67

5.2. Corrosión.....	71
5.3. Microscopia.....	73
6. Conclusiones Recomendaciones.	82
Referencias.....	85
Apéndices.....	88

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Tabla de composición química acero SAE 5160</i>	33
Tabla 2 Gestión de trabajo de grado.....	51
Tabla 3 <i>Composición química después del ataque electroquímico sin granalla (No corroída)</i>	76
Tabla 4 <i>Composición química después del ataque electroquímico (Corroída)</i>	78
Tabla 5 <i>Composición química después del ataque electroquímico (Con granalla)</i>	81

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Suspensión de doble puente trasero.</i>	15
Figura 2	<i>Suspensión de eje rígido.</i>	17
Figura 3	<i>Suspensión de paralelogramo deformable.</i>	18
Figura 4	<i>Suspensión McPherson.</i>	19
Figura 5	<i>Suspensión neumática controlada.</i>	21
Figura 6	<i>Suspensión hidroneumática.</i>	22
Figura 7	<i>Proceso de fabricación de hojas de resortes de ballesta.</i>	26
Figura 8	<i>Curva S-N.</i>	31
Figura 9	<i>Técnica de granallado.</i>	34
Figura 10	<i>Efecto del granallado.</i>	35
Figura 11	<i>Cobertura total granallado.</i>	38
Figura 12	<i>Cobertura parcial de granallado.</i>	38
Figura 13	<i>Diagrama para una celda electroquímica.</i>	40
Figura 14	<i>Serie galvánica para algunos metales y aleaciones comunes.</i>	41
Figura 15	<i>Curvas electroquímicas de aceros inoxidable en presencia o no de corrosión por picadura.</i>	43
Figura 16	<i>Curvas de polarización.</i>	48
Figura 17	<i>Instalación de potencióstato (celda electroquímica).</i>	50
Figura 18	<i>Muestras Acero SAE 5160.</i>	53
Figura 19	<i>Máquina para pulir Buehler.</i>	54
Figura 20	<i>Muestras pulidas y montadas en el Microscopio óptico.</i>	55
Figura 21	<i>Microestructura del acero SAE 5160 con granalla (magnificación 100X).</i>	56
Figura 22	<i>Microestructura del acero SAE 5160 sin granalla (magnificación 100X).</i>	56

Figura 23 <i>Maquina UMT (Izquierda), Maquina aplicando la fuerza en la muestra (Derecha).....</i>	57
Figura 24 <i>Esquemático de una indentación Vickers y nomenclatura usada</i>	58
Figura 25 <i>Detalle de las probetas sin y con granalla.</i>	59
Figura 26 <i>Geometría del área de contacto entre la probeta y la solución</i>	59
Figura 27 <i>Celda electroquímica usada.</i>	60
Figura 28 <i>Electrodo plata - cloruro de plata.....</i>	61
Figura 29 <i>Contraelectrodo de grafito.</i>	62
Figura 30 <i>Llenado de la celda electroquímica para ensayo.....</i>	63
Figura 31 <i>Paleta de conexiones.....</i>	63
Figura 32 <i>Montaje y conexión del potencióstato/galvanostato Gamry 600 con celda electroquímica.</i>	64
Figura 33 <i>Datos ingresados en el programa para la realización de los ensayos.....</i>	65
Figura 34 <i>Microscopio QUANTA FEG 650.....</i>	66
Figura 35 <i>Programación de la maquina UMT.....</i>	67
Figura 36 <i>Datos tomados de las diagonales.....</i>	68
Figura 37 <i>Dureza Vickers a diferentes profundidades del borde para una muestra con granalla.....</i>	69
Figura 38 <i>Dureza Vickers a diferentes profundidades del borde para una muestra sin granalla.....</i>	70
Figura 39 <i>Potencial de corrosión para el acero 5160 con y sin granalla</i>	72
Figura 40 <i>Probeta sin granalla vista desde el microscopio (en el área no corroída).</i>	74
Figura 41 <i>Grafica de composición química del acero SAE 5160 después del ataque electroquímico sin granalla (No corroída).....</i>	75
Figura 42 <i>Probeta sin granalla vista desde el microscopio. (en el área corroída).....</i>	77

Figura 43 *Grafica de composición química del acero SAE 5160 después del ataque electroquímico (Corroída)*. 78

Figura 44 *Probeta con granalla vista desde el microscopio*. 79

Figura 45 *Grafica de composición química del acero SAE 5160 después del ataque electroquímico (Con granalla)*. 80

Tabla de apéndices

Apéndice A. Datos de profundidad de muestra con granallado..... 88

Resumen

Título: Caracterización de la influencia de la corrosión que puede afectar el proceso de granallado en el acero SAE 5160 utilizado para resortes de ballesta en la industria automotriz.

Autor: Wilmar Ferney Barbosa Espinal y Daiver Alberto García Salinas

Palabras Clave: Granallado, Resorte de ballesta, Corrosión

Descripción: En la industria automotriz uno de los mayores retos al momento de diseñar un vehículo, el cual brinde confort, seguridad y gran economía al usuario final se encuentra en el sistema de suspensión.

Los sistemas de suspensión han ido mejorando con el pasar de los tiempos, aunque todavía se utilizan los diseños iniciales entre los cuales encontramos los resortes de ballestas.

El sistema de suspensión de resorte de ballesta está conformado por hojas cóncavas o convexas organizadas de tal manera que contrarresta los diversos movimientos ocasionados por las irregularidades y condiciones de los lugares por los cuales transita el vehículo, evitando de esta manera que se transmita movimientos fuertes a la cabina de conducción.

En el proceso de fabricación de los resortes de ballesta se realiza una serie de procesos, entre los cuales encontramos un tratamiento superficial definido como granallado. El granallado es un proceso superficial en el cual, por medio esperas de diámetros muy pequeños y lanzadas a gran velocidad, se le brinda mayor resistencia del material al generar una compresión superficial. Incrementando la resistencia del material a las tensiones generadas por los de movimientos bruscos en el vehículo.

Este proceso no solo mejora las propiedades mecánicas del material, sino que también afecta las propiedades electroquímicas de este. La influencia de la corrosión afecta el proceso de granallado y por ende afecta el acero por el cual está compuesto. Para analizar los cambios de las propiedades del acero se realizan una serie de ensayos que nos conducirán a caracterizar el nivel de corrosión que es generada en este tipo de acero.

Primeramente, se realizó un ensayo de indentación, en el cual se determinó la dureza del material. Posteriormente realizamos un ensayo electroquímico en el cual se atacaron las muestras con una solución a base de NaCl al 3,5%, la cual deterioró en mayores proporciones la probeta con el proceso de granallado. Para terminar, realizamos el ensayo de microscopia en el cual pudimos observar los cambios que tuvieron las dos probetas, en la composición química, morfología y propiedades mecánicas.

Se pudo concluir que el proceso de granallado utilizado en el proceso de conformación de resortes de ballestas es el deseado y esperado. La probeta con granallada mejora sus propiedades mecánicas y reduce sus propiedades químicas, permitiendo resistir mayores tensiones y disminuyendo la resistencia a la corrosión y limitando la vida útil de este componente en los vehículos.

Abstract

Title: Characterization of the influence of corrosion that can affect the shot blasting process in SAE 5160 steel used for leaf springs in the automotive industry.

Author: Wilmar Ferney Barbosa Espinal and Daiver Alberto García Salinas

Keywords: Shot peening, Leaf spring, Corrosion

Descripción: In the automotive industry, one of the biggest challenges when designing a vehicle that provides comfort, safety and great economy to the end user is in the suspension system.

Suspension systems have been improving with the passing of time, although the initial designs are still used, among which we find leaf springs.

Suspension systems made up of a series of leaf springs or concave or convex leaves are responsible for counteracting the various movements caused by the irregularities and conditions of the places through which the vehicle travels.

In the production process of this type of suspensions, a series of processes are carried out, among which we find a surface treatment defined as shot blasting; shot blasting is a surface process in which, by means of a launching of very small diameter shots and launched at high speed, the material is given greater resistance. Increasing the resistance of the material to the tensions generated by the absorption of sudden movements in the vehicle.

This process not only improves the mechanical properties of the material, but also affects its chemical properties. The influence of corrosion affects the shot blasting process and therefore affects the steel of which the suspension system is composed; to analyse these changes in the properties of the steel, a series of tests were carried out to characterize the level of corrosion generated in this type of steel.

Firstly, an indentation test was performed, in which the hardness of the material was determined, then we performed an electrochemical test in which the specimens were attacked with an aqueous solution which corroded in greater proportions the specimen with the shot blasting process and finally we performed the microscopy test in which we could observe the changes that the two specimens had, both in their morphology and in their chemical composition and mechanical properties,

As conclusions we were able to determine that the shot blasting process used in the forming process of leaf springs is the desired and expected, the specimen with the shot blasting process improves its mechanical properties and reduces its chemical properties, allowing to resist greater tensions generated to its employability and decreasing the resistance to corrosion and limiting the useful life of this component in vehicles.

1. Estado del arte

La suspensión de un vehículo o motocicleta es un conjunto de elementos los cuales son los encargados de absorber los movimientos bruscos generados por las irregularidades del terreno con el fin de brindar una mejor calidad y mejor dominio del vehículo, este sistema actúa principalmente entre las ruedas y la estructura principal del vehículo, lo que se conoce como chasis. (Mantilla Nova, 2014)

Una de las funciones principales de la suspensión , es absorber los movimientos que se generan de las irregularidades del terreno, estos movimientos se transmiten a las ruedas y de las ruedas se trasmiten a los sistemas de suspensión que se encargan de minimizarlos, esto con el fin de impedir que se transmita directamente a la carrocería, brindando de esta manera, una mayor comodidad al conductor y/o pasajeros que se transportan en el vehículo, no se puede dejar de lado que se debe asegurar el contacto de las ruedas con el terreno por el cual se transita con el fin obtener buena estabilidad, para poder tener un alto grado de seguridad al momento de realizar desplazamientos en el vehículo. (Chacon, 2009).

Si las irregularidades que se presentan en los terrenos son pequeñas, serán absorbidas por las propiedades elásticas de las ruedas, de lo contrario, si las irregularidades son grandes la unión elástica del sistema de suspensión se encarga de absorber los movimientos generados por dichas irregularidades, esto con el fin de evitar que sean trasmitidas a la carrocería (Chacon, 2009).

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

Los sistemas de suspensión están compuestos por distintos elementos elásticos que se encuentran dispuesto entre la masa suspendida y la no suspendida. Sus principales diferencias son las siguientes:

Masa Suspendida: Se compone de carrocería, tren motriz, elementos auxiliares que se encuentran soportados en el chasis

Masa no suspendida: Se compone de frenos, llantas, resortes de ballestas, amortiguadores, barras de control, entre otros.

Figura 1

Suspensión de doble puente trasero.



Nota. Conformación de una *suspensión de doble puente trasero*, Pesacam, (<https://www.pesacam.com/suspension-ballesta/>).

Con el paso del tiempo estas suspensiones han evolucionado, esto con el fin de proporcionar una mayor calidad y eficiencia. Para este caso, las suspensiones de resortes de ballesta han tenido algunos cambios en su geometría y sus componentes, a pesar de estos cambios que se le han generado siguen teniendo la misma finalidad, la cual es absorber las

irregularidades presentes en los terrenos por los cuales transitan los vehículos (Mantilla Nova, 2014).

1.2. Tipos de suspensiones.

Los sistemas de suspensión se componen por elementos flexibles; estos elementos son los encargados de absorber la energía que se genera cuando se proporcionan impactos por el mal estado del terreno por los cuales se transita, también tenemos los componentes de amortiguación; los cuales tienen como función principal contrarrestar las oscilaciones de las masas suspendidas generadas por los componentes flexibles (Chacon, 2009).

1.2.1 Suspensión de eje rígido.

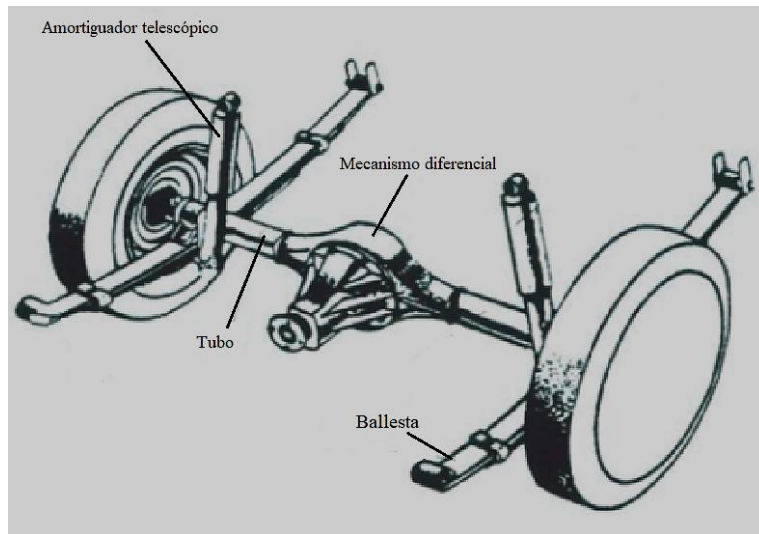
Es la suspensión más conocida y la más usada usualmente, por medio de la cual se conectan ambas ruedas al vehículo, las ruedas se encuentran instaladas en cada uno de los extremos del eje, por lo que se les conoce como suspensión de eje rígido.

En la figura 2, podemos observar la descripción gráfica de un sistema de suspensión por eje rígido. El cual está dispuesto como eje propulsor.

En el cual se observa una caja de transmisión que contiene el mecanismo diferencial y los respectivos tubos por medio de los cuales se alojan los ejes que engranan con la transmisión y transmiten el movimiento a las ruedas, El eje rígido se une al chasis mediante los resortes de ballestas.

Figura 2

Suspensión de eje rígido.



Nota. Adaptada de *Mecánica del automóvil*, (Calvo & Miravete de Marco, 1997, pág. 46), Reverté editorial.

La suspensión de eje rígido debe de ser unida al chasis de tal manera que esta oscile en dirección vertical, también se debe de tener en cuenta una rotación de balanceo generada alrededor del eje longitudinal. Se conocen varias composiciones de resortes y barras que llegan a cumplir los requerimientos dinámicos y cinemáticos (Fayyad & Suleiman, 2013). El más común es el de sujetar el eje de la mitad de los resortes de ballesta con los extremos asegurados al chasis del vehículo; Véase en la figura 2.

1.2.2 Suspensión Independiente.

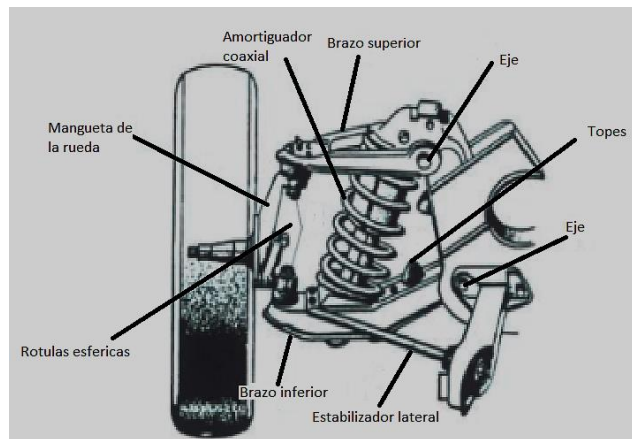
Se introduce este tipo de suspensión con el fin de permitir que las ruedas puedan moverse de arriba hacia abajo sin que dicho movimiento afecte la rueda opuesta, existen muchos diseños de suspensiones independientes, las más simples y comunes son la

suspensión de paralelogramo deformable (Véase en la figura 3) y la McPherson. (Véase en la figura 4). (Fayyad & Suleiman, 2013) (Calvo & Miravete de Marco, 1997, pág. 56).

Para los trenes delanteros y traseros de los vehículos, la suspensión más utilizada es la de paralelogramo deformable. Esta suspensión está compuesta por dos brazos uno inferior y uno superior que se encuentran unidos al chasis por medio de ejes. En este sistema también encontramos unos soportes que evitan que el brazo inferior suba demasiado y sobre pase el límite elástico de la suspensión; provocando fallas en el sistema. (Calvo & Miravete de Marco, 1997, pág. 56)

Figura 3

Suspensión de paralelogramo deformable.



Nota. Adaptada de *Mecánica del automóvil*, (Calvo & Miravete de Marco, 1997, pág. 56), Reverté editorial.

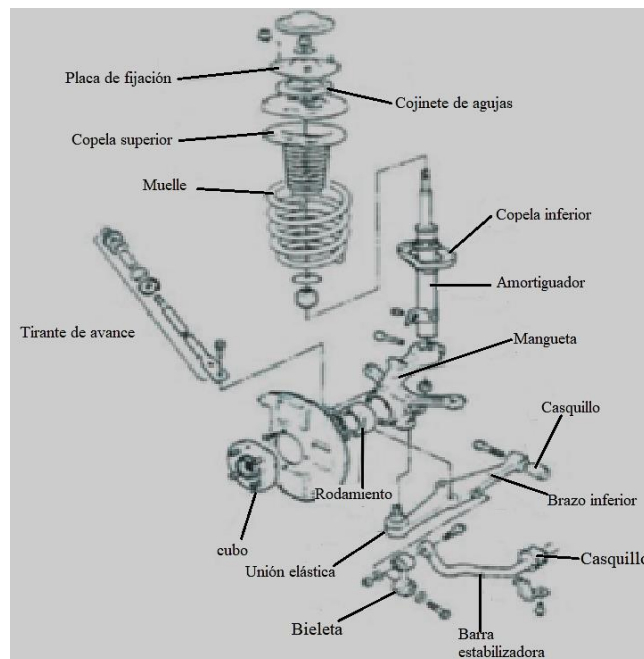
Por otra parte, la suspensión McPherson son mayormente implementados en los trenes delanteros de los vehículos, pero también puede ser implementada en los trenes traseros. Esta suspensión ha sido bastante exitosa. Su utilización se ve en vehículos modestos, por su sencillez de fabricación, fácil mantenimiento y el poco espacio que ocupa.

En la figura 4 podemos observar, un despiece de la suspensión McPherson con barra estabilizadora y brazo inferior. También se observan algunos de los componentes que conforman esta suspensión como el amortiguador, que se conecta fijamente a la parte superior de la mangueta; también se observa que el amortiguador se encuentra unido al chasis en su parte superior por medio de una placa de fijación y un cojinete de agujas.

Al igual se observan los componentes complementarios a esta suspensión, como lo es la barra estabilizadora que se encuentra unida al brazo inferior por medio de una biela, todo esto se encuentra unido al chasis mediante un casquillo. (Calvo & Miravete de Marco, 1997, págs. 53,54)

Figura 4

Suspensión McPherson.



Nota. Adaptada de *Mecánica del automóvil*, (Calvo & Miravete de Marco, 1997, pág. 54), Reverté editorial.

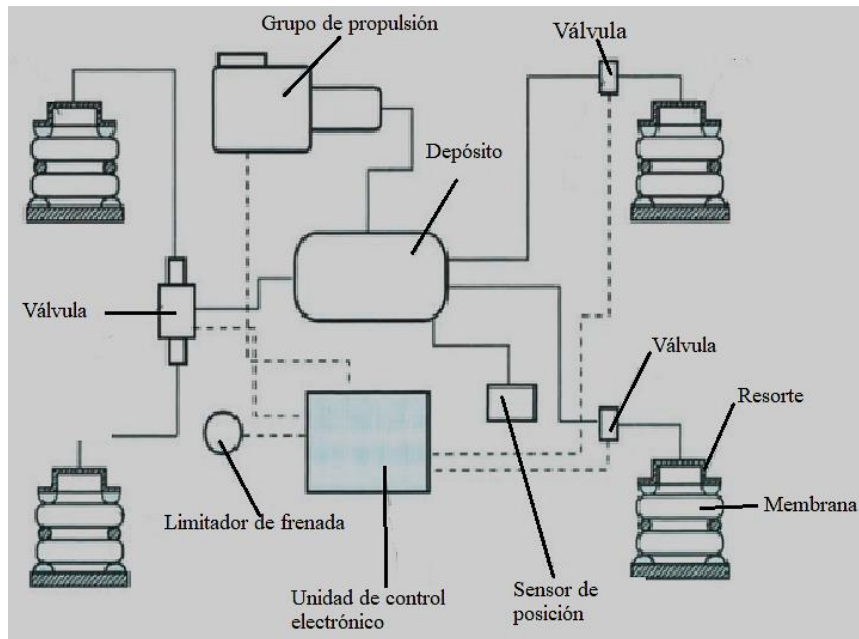
1.3. Otros componentes de suspensión.

Por otra parte, en las suspensiones mencionadas anteriormente aparecen otros componentes que brindan un mejor rendimiento al vehículo, estas suspensiones se definen como: suspensión neumática, suspensión hidroneumática y suspensión electromagnética entre otras.

- **Suspensión neumática.**

Este tipo de suspensión es regulable en los vehículos, esto quiere decir que es fácil realizar la regulación del nivel, esto con la ventaja de la integración generalizada en la composición de la estructura.

También son conocidas como suspensiones de aire y algunas de sus ventajas es que ofrecen una mejor calidad de confort al usuario, ya que esta clase de suspensión absorbe las vibraciones del mal estado de los terrenos por donde el vehículo transita, también es importante nombrar que la constante de rigidez es ajustable, al igual que su capacidad de carga y control de altura, entre otras ventajas.

Figura 5*Suspensión neumática controlada.*

Nota. Adaptada de *Mecánica del automóvil*, (Calvo & Miravete de Marco, 1997, pág. 62), Reverté editorial.

En la figura 5, podemos observar, que este tipo de suspensión entra en funcionamiento cuando una de las ruedas del vehículo pasa por un bache o deformación del terreno por el cual transita. (Calvo & Miravete de Marco, 1997, pág. 61)

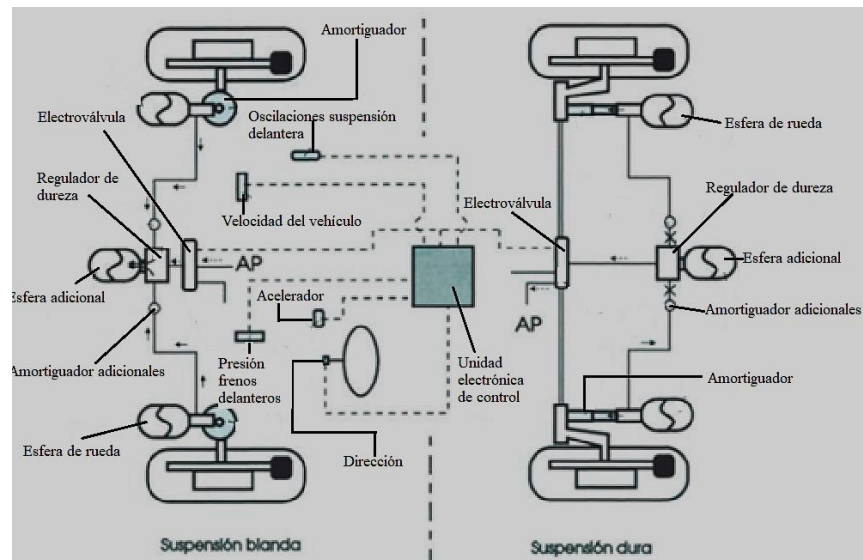
- **Suspensión Hidroneumática.**

Este tipo de suspensión contiene líquido y gas, donde el gas se comporta como el medio elástico en el sistema, para poder ofrecer una mejor amortiguación en los vehículos, estos componentes se pueden mezclar para brindar una mejor calidad en la suspensión al igual como lo hacen en las suspensiones que son utilizadas en los trenes de aterrizaje de las aeronaves. (Bauer, 2011)

Fundamentalmente esta suspensión funciona cuando el gas se encuentra almacenado en el acumulador y separado del líquido por medio de un diafragma. El líquido se encuentra en el cilindro o en las líneas de conexión, para poder equilibrar el vehículo, el líquido es impulsado por las líneas de conexión mediante una bomba de alta presión, este sistema es controlado por medio de válvulas con sensores que contribuyen al óptimo funcionamiento del sistema.

Figura 6

Suspensión hidroneumática.



Nota. Adaptada de *Mecánica del automóvil*, (Calvo & Miravete de Marco, 1997, pág. 65),

Reverté editorial

En la figura 6, podemos observar un esquema que nos describe el funcionamiento de una suspensión hidroneumática.

Algunos de los parámetros que encontramos son: presión de los frenos delanteros, la posición en la cual se encuentra el pedal de acelerar, velocidad del vehículo, entre otros; estos parámetros envían datos a la unidad electrónica de control (módulo), esto con el fin de poder determinar la rigidez de la suspensión.

Por medio de la información obtenida ocasionada por altas velocidades, fuertes frenadas, aberturas de ángulos de giro, etc. La unidad de control puede determinar si se pasa por un terreno suave a un terreno más firme. (Calvo & Miravete de Marco, 1997, págs. 64,65)

1.4. Resortes de ballesta

Este componente es utilizado en vehículos cuyos ejes soportan grandes cargas. Se utilizan comúnmente en camiones, tractocamiones en el tren delantero y los trenes traseros y en algunas camionetas tipo pick up. (Sánchez, 2018)

El termino resortes de ballesta se aplica generalmente a los componentes de la suspensión compuestos de hojas escalonadas, cada una de ellas con un espesor constante, y una longitud definida según el tipo de vehículo en el cual sea implementado y la labor para la que fue diseñado el vehículo. (Mong, Sang Yong, & Oh, 2006)

1.5. Características generales de los resortes de ballesta.

La función principal de los resortes de ballesta es absorber y almacenar energía para posteriormente regresarla. Estas funciones se llevan a cabo por componentes muy distintos, uno de estos elementos son los elásticos ya que son los encargados de almacenar la energía

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

que es generada cuando el vehículo está en marcha, por otra parte, tenemos los elementos de amortiguación que son los encargados de absorber la energía.

Para producir los resortes de ballesta el primer paso y el más esencial es la selección y adquisición del material a utilizar, estos componentes se fabrican en acero SAE 5160, SAE 6150 y SAE 9254. Estos aceros se usan con el fin de evitar la fatiga u otro fenómeno ocasionado por el funcionamiento de los resortes de ballesta. (Sail, 2011)

Se emplean aleaciones de acero laminado, las cuales admiten una adecuada templabilidad para las dimensiones especificadas por el fabricante. Estos tipos de aceros cuentan con una microestructura martensítica, esto les permite soportar grandes cantidades de cargas a las cuales estarán sometidos durante grandes ciclos de uso. (SAE Spring committee, 1996)

En los procesos de fabricación existen variables asociadas que se deben tener en cuenta, las cuales son:

- El rango de temperatura.
- La resistencia a la corrosión.
- Las cargas de choque que puede soportar.

Se estima que el peso de los resortes de ballestas de un vehículo equivale a un 10% - 20% del peso total del vehículo, ya que estos componentes son fabricados en acero. (Ashok, Mallikarjun, & Mamilla, 2012)

1.6. Proceso de manufactura

Un correcto desarrollo en el proceso de manufactura, la correcta selección del material con lleva a obtener un componente de alta calidad, los cuales están asociados a los costos finales de producción. (Dighe, 2016)

1.6.1 Proceso tradicional

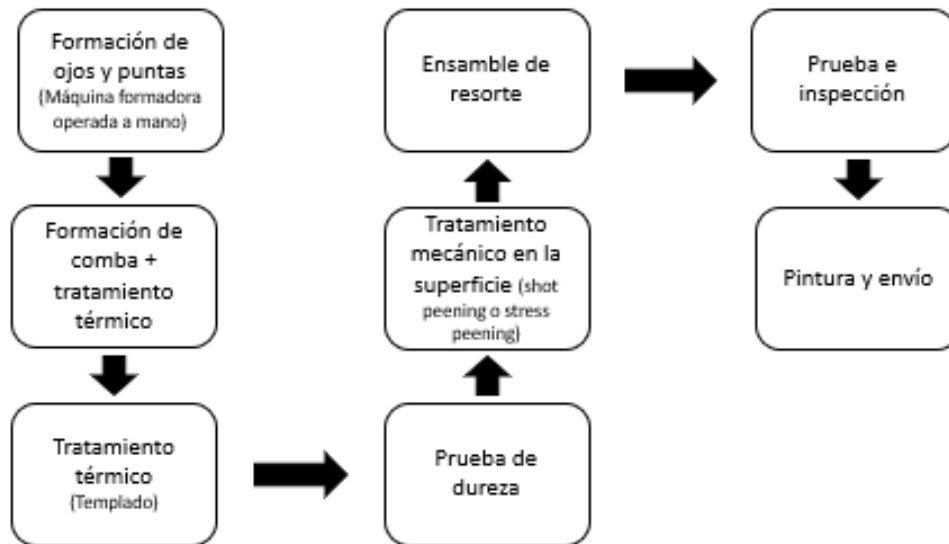
Para realizar un adecuado proceso de manufactura, primero debemos definir la geometría de dicha pieza a fabricar, esta pieza es diseñada dependiendo del tipo de trabajo al cual va a hacer sometido el vehículo en condiciones ambientales y del terreno por el cual va a transitar, siempre se debe garantizar que se cumpla con las propiedades mecánicas necesarias para su óptimo funcionamiento.

La fabricación de resortes de ballesta entre los cuales se lleva a cabo diferentes procesos de conformado de material (Véase en la figura 7) como lo es el corte o cizallado, esto con el fin de obtener la geometría inicial de dicha hoja.

Después se lleva a cabo el taladrado y punzonado, y posteriormente el calentamiento para el tratamiento térmico; a medida que avanza el proceso es necesario realizar pruebas de dureza, con el fin de verificar sus valores. (Sail, 2011)

Figura 7

Proceso de fabricación de hojas de resortes de ballesta.



Nota. Figura realizada por los autores.

Posterior a los procesos anteriormente mencionados, se realiza un tratamiento térmico de templado a cada una de las hojas que hacen parte de este componente; para finalizar se lleva el resorte a tratamiento superficial de granallado, el cual nos garantiza las propiedades mecánicas que se requieren para operar. Para finalizar se realiza el ensamble y se aplica una capa de pintura anticorrosiva. (Sail, 2011)

Finalmente, por su geometría y de la forma como están apoyados, los resortes de ballestas trabajan en flexión pura (flexión a cuatro puntos) lo que induce tensiones normales por flexión. Esto justifica en parte el tratamiento de granallado en la parte inferior, que es la zona sometida a tensiones normales positivas. De la misma forma, al estar sometidos a condiciones ambientales adversas (presencia de agua y oxígeno) se requiere conocer su respuesta electroquímica.

1.7. Justificación y/o planteamiento problema

Esta propuesta apunta a responder la siguiente pregunta, ¿Cómo se relacionan los parámetros del granallado y la resistencia a la corrosión?

Para responder esta pregunta se deben realizar ensayos de dureza, fatiga, corrosión, entre otros, con el fin de cruzar las variables para establecer una relación entre los parámetros del granallado y el resultado que agregaría en la vida a la fatiga y a la resistencia a la corrosión.

Cuando hablamos del granallado, decimos que induce tensiones compresivas en la superficie del material la cual entregan una ventaja sobre tensiones positivas. Estas tensiones residuales las podemos medir por medio de técnicas cuantitativas como la difracción de rayos x (XRD), las galgas extensiométricas o la fotoelasticidad (Romero, Pertuz, & Diaz, 2021). Debemos tener en cuenta que existen factores que modifican la resistencia a la fatiga de un componente, como lo es el proceso de granallado, proceso superficial en el cual se impacta con partículas a alta velocidad (20 a 120 m/s) una superficie para aumentar su dureza, con el fin de generar deformaciones plásticas superficiales y tensiones residuales de compresión, ambas afectando solo una capa de poco espesor (0.1 a 0.5 mm), cabe recalcar que este es un proceso realizado en frío, (Jaramillo, de Sánchez, & Avila, 2019). Para entender un poco mejor este concepto se da el ejemplo los resortes de ballesta en los automotores, los cuales están sometidos a tensiones normales por flexión, cuando están sometidos a esfuerzos fluctuantes altamente localizados. Por otro lado, cabe diferenciar que este proceso es diferente al más moderno llamado laser shot peening que produce un efecto similar, pero de una forma más rápida y controlada (Lafoy, Bergon, K., Kling, & Palin-Luc, 2020).

Por otra parte, tenemos las tensiones residuales la cual son tensiones que permanecen en un material sólido después de que se ha eliminado la causa original de las tensiones (Jaramillo, de Sánchez, & Avila, 2019). Estas pueden ocurrir debido a una variedad de mecanismos que incluyen deformaciones plásticas cíclicas, gradientes de temperatura elevados o cambios microestructurales como, por ejemplo, transformación de fase. Es una ocurrencia común pero generalmente indeseable.

El ensayo basado en el potencial electroquímico busca establecer la diferencia en la tendencia del material granallado a iniciar un proceso de corrosión en comparación con el material sin granallado (O'hara, 1990). La microscopia junto con análisis elemental por EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) puede dar idea de la creación de superficies con rugosidad mayor en donde se pueden alojar elementos altamente electronegativos como oxígeno o cloro. Esta inclinación a iniciar corrosión puede ser una causa que disminuye la vida útil de los resortes de ballesta.

Los ensayos de indentación controlada se hacen con el fin de establecer propiedades mecánicas superficiales y cuantificar el efecto del granallado en comparación con la exposición a un ambiente corrosivo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Caracterizar el nivel de corrosión generado bajo pruebas electroquímicas en muestras de acero SAE 5160 utilizado en resortes de ballesta con y sin granallado superficial.

2.2. Objetivos específicos

- Analizar los ensayos de cambio de potencial electroquímico para muestras de acero SAE 5160 con y sin granallado con el fin de determinar el efecto de los parámetros del proceso en el potencial de corrosión.
- Realizar ensayos de indentación superficial por carga y descarga en las muestras de acero SAE 5160 con y sin granallado para establecer una relación entre los parámetros del granallado, la resistencia a la corrosión y la tenacidad.
- Caracterizar microscópicamente las superficies de fractura en las muestras de acero SAE 5160 con y sin granallado con el fin de identificar y establecer la relación estructura-propiedad y los mecanismos de deterioro presentados.

3. Marco teórico

Como se mencionó anteriormente, los resortes de ballesta absorben y almacenan energía, Los ciclos presentados en los resortes no deben de exceder su punto máximo, ya que al exceder el punto máximo se pueden generar fallas prematuras que podrían alcanzar los puntos de fatiga generando ruptura de estos componentes. (SAE Spring committee, 1996).

Este tipo de componentes son los más implementados en los vehículos de carga pesada para reducir los impactos generados por las irregularidades del terreno. (SAE Spring committee, 1996).

3.1. Fatiga

La fatiga se define como las cargas y descargas generadas en ciertos ciclos, estos ciclos afectan la pieza. Al tener cargas que están siendo inducidas, se considera que se encuentran con valores por debajo de la tensión de ruptura estática.

Cuando se presentan fallas debido a cargas repetitivas; la cual da comienzo a una grieta o varias grietas. Estas grietas hacen que la pieza falle por fractura se le conoce como fatiga. Para obtener un dato que nos dé a conocer los valores de la durabilidad del material se hace un análisis de fatiga estructural, este análisis es llevado a cabo bajo condiciones de carga simples o complejas.

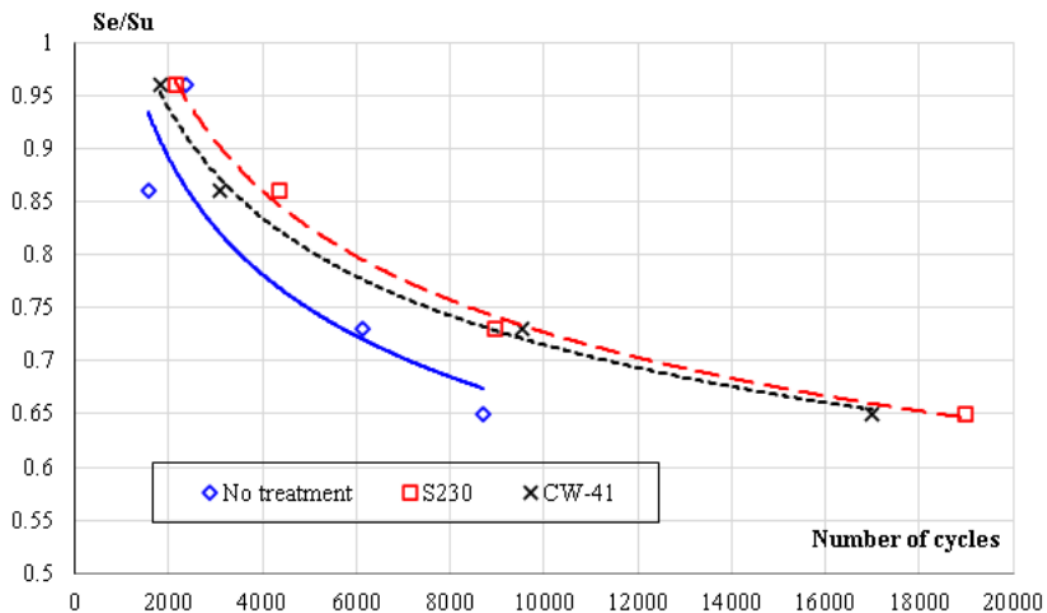
3.2. Curva s-n

En esta grafica ilustrada posteriormente en la figura 8, en su eje vertical se definen las tensiones alternas en comparación al número de ciclos requeridos que se necesita para llevar al fallo un componente que se encuentra determinado por el eje horizontal.

Dicha curva se expresas en términos de tensión media S_m . No todos los materiales manejan las mismas curvas S-N esto se debe a que se manejan diferentes valores de tensión media. Un ejemplo de esta curva se muestra en la figura 8.

Figura 8

Curva S-N



Nota. Adaptada de *fatigue study on AISI/SAE 1015 steel with shot peening under corrosive environments*, (Romero, Pertuz, & Diaz, 2021), Journal of Physics: Conference Series.

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

Esta curva expresa la resistencia a la fatiga media que tiene el material, para generar la *curva S-N* de determinado material se deben realizar múltiples ensayos bajo los cuales se varían las tensiones para poder obtener el número de ciclos para ese material.

También sabemos que las fallas de fatiga tienen tres fases, la cuales son: la nucleación, iniciación y la propagación. La nucleación es el crecimiento de grietas a nivel cristalino. La iniciación se genera cuando la o las grietas se propagan a nivel microestructural. Dichas grietas se generan en los puntos en los cuales se genera mayores esfuerzos.

La propagación de grietas crece a nivel estructural como resultado de las cargas absorbidas por los componentes. En general, las grietas son muy tenues, por lo cual es demasiado difícil visualizarlas e identificarlas; si la pieza se sigue deteriorando hasta que el material se fractura debido a las diferentes grietas presentadas, se dice que el componente fallo por fatiga.

Teniendo en cuenta que la corrosión es uno de los mecanismos que conllevan a la propagación de grietas y estas a la falla por ruptura del material. Cuando se tiene un ambiente corrosivo y el componente tiene una o varias grietas, la grieta tiende a crecer incluso bajo esfuerzos estáticos. Esta combinación hace que el material se corra con mayor rapidez, acelerando su degradación, lo que genera esta situación combinada se conoce como corrosión por esfuerzo.

3.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 5160

Cuando se habla sobre puntos críticos superiores, nos referimos a los puntos de referencia, que sobre ellos se deben calentar las piezas para realizar el tratamiento térmico de

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

Revenido y después su enfriamiento rápido para dar las propiedades de dureza al material tratado.

Punto crítico superior = 765°C

Punto crítico inferior = 708°C

Tabla 1

Tabla de composición química acero SAE 5160

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO SAE 5160.

Aceros Aleados						
Grado del acero	Composición química (%)					
SAE	Carbono	Manganeso	Fósforo	Azufre	Silicio	Cromo
	(C)	(Mn)	(P)	(S)	(Si)	(Cr)
5160	0,56/0,64	0,75/1,0	0,035	0,04	0,15/0,35	0,7/0,9

Nota. Tabla realizada por los autores.

3.4. El granallado

Dentro de la gama del granallado se tiene uno de los procesos más particulares en el cual se induce tensiones de compresión en la superficie de un componente metálico. Proceso conocido como shot peening, proceso en el cual se lanza un chorro de partículas de geometría esféricas a alta velocidad contra la superficie de una la pieza metálica. Las partículas chocan con el acero generando una deformación plástica con el fin de incrementar la resistencia que tiene el material hacia la fatiga. Este proceso se realiza manteniendo controlados los parámetros de la operación los cuales son la velocidad con la que se expulsan las esferas y el flujo de esferas que es expulsado.

Figura 9

Técnica de granallado



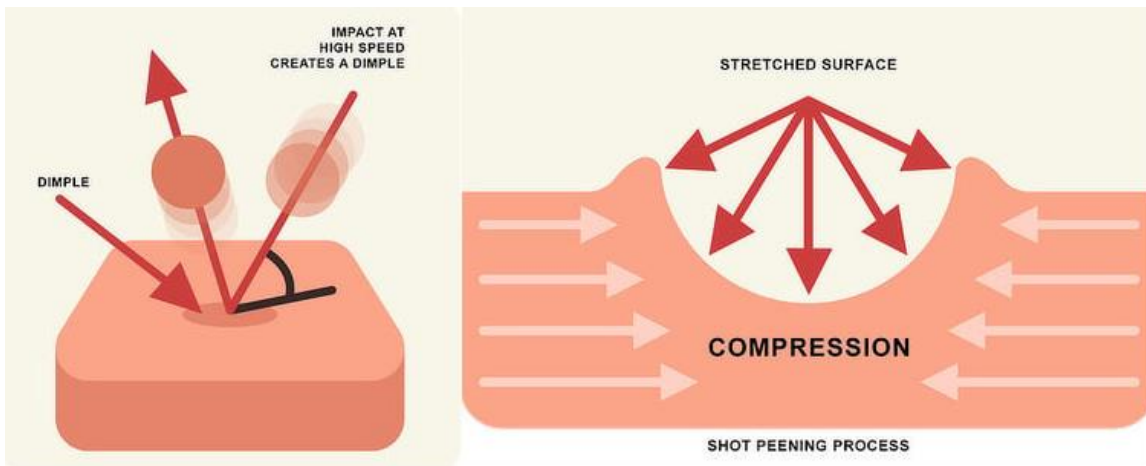
Nota. Adaptada de *las ventajas del granallado*, Weerg staff, 2020, (<https://www.weerg.com/es/es/blog/las-ventajas-del-granallado>).

Uno de los efectos obtenidos luego del proceso shot peening es el constituyente a que en la superficie del material se generasen aplastamiento de los granos metalográficos, con lo cual con lleva a la generación de dos efectos. El primero cuando los granos se extienden y se provoca una compresión entre ellos, generando nuevas de tensiones de compresión que aparecen paralelamente a la superficie. Estas tensiones de compresión eliminan las tensiones residuales generadas por procesos anteriores como tratamiento térmico, mecanizado, conformación plástica entre otros.

Para el segundo efecto, tenemos que al ser comprimidos los granos y extenderse cubren los espacios vacíos intergranulares, reduciéndolos considerablemente y con ello aumentado la velocidad con la que se genera corrosión galvánica.

Figura 10

Efecto del granallado.



Nota. Adaptada de *las ventajas del granallado*, Weerg staff, 2020, (<https://www.weerg.com/es/es/blog/las-ventajas-del-granallado>).

Alguno de los abrasivos más utilizados para el granallado es: granalla de alambre redondeado, granalla de fundición de hierro esférico y nodular, granalla fundida de geometría esférica de acero al carbono o inoxidable. (Salazar, 2015)

Uno de los abrasivos con más aceptación es la granalla de alambre redondeado esto se debe a que cuenta con un alto grado de dureza y bajo nivel a la fractura. Esto hace que sea de bajo consumo abrasivo, pero manteniendo un nivel de granulometría constante.

En la granalla nodular y fundición de hierro, comprenden granalla de fundición blanca, gris, y maleable. son implementadas en circunstancias donde se requiera cumplir con

un trabajo de granallado de bajo costo inicialmente. Cuando se trata de granalla de fundición nodular, se utiliza una escala muy mínima debido a su baja dureza. (Salazar, 2015).

Por otra parte, uno de los abrasivos más utilizados es la granalla de acero fundido o inoxidable como también es conocido, una de sus características es que, al ser sometido a un buen tratamiento térmico en su proceso de fabricación, se obtiene un valor de dureza alto con una capacidad de ruptura aceptable. Su tamaño y clasificación son según el número característico la cual están normalizados por SAE en el Standard SAE J444. (Salazar, 2015)

Para que sea de calidad y una buena efectividad el granallado (shot peening), se debe de tener en cuenta un buen control en las siguientes variables:

3.4.1 Velocidad de la granalla

Si la velocidad de la granalla aumenta, también aumenta su energía cinética esto implica que aumentará la intensidad del granallado, todo esto es dado desde el punto de vista energético. [16,23]

3.4.2 Dureza de la granalla

La dureza de la granalla debe de ser mayor a la de la superficie con la cual va a estar en contacto, con el fin de generar una deformación adecuada en la superficie, También se debe de tener en cuenta que al seleccionar un tipo de granalla de dureza muy alta puede ser extremadamente frágil y tenga un mayor porcentaje de rotura. (Salazar, 2015)

3.4.3 Tamaño de la granalla

Cuando se mantiene constante la velocidad, el tiempo de exposición, todo incremento del tamaño de la partícula incrementa la intensidad del proceso, y de una menor densidad en los impactos. Si se quiere obtener una mejor intensidad se debe de seleccionar el menor tamaño de la partícula esférica, ya que esto produce una mayor rapidez en el proceso, una mejor cobertura de impactos en la superficie tratada.

Se obtiene un factor cobertura lo cual es la medida que indica el grado donde fue impactada la superficie por las partículas. Cuando se satura la densidad de impactos es porque el valor del factor de cobertura está al 100 %.

Se la siguiente ecuación, podemos observar que se tiene una relación directamente proporcional entre el factor de cobertura y el tiempo de exposición, expresada:

$$C_n (\%) = 100 * [1 - (1 - C_1)^n]$$

En el que:

$C_1 =$ *factor de cobertura por ciclo de impactos (%)*

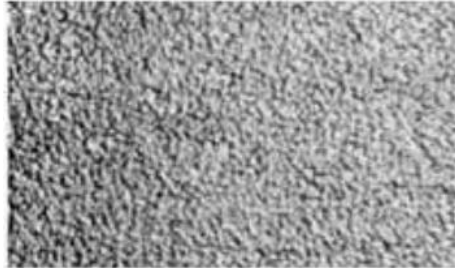
$C_n =$ *factor de cobertura despues de n ciclos de impactos (%)*

$n =$ *numero de ciclos*

La cobertura aumenta al 100% a medida que aumenta el número de ciclos. (Salazar, 2015)

Figura 11

Cobertura total granallado.



Nota. Cobertura total del tratamiento superficial de granallado, CYM materiales,

(<http://www.cym.com.ar/castellano/informes/shot-peening-introduccion.pdf>).

Figura 12

Cobertura parcial de granallado.



Nota. Cobertura parcial del tratamiento superficial de granallado, CYM materiales,

(<http://www.cym.com.ar/castellano/informes/shot-peening-introduccion.pdf>).

Porcentaje de rotura

Se tiene la necesidad que sean sólo partículas esféricas las que impacten en la superficie que se va a tratar, las partículas quebradas se deben extraer rápidamente del proceso. Un porcentaje que se puede tener como referencia de abrasivo esférico es aquel que sea inferior al 85% pero siendo este una referencia se debe tener mayores porcentajes para mantener las intensidades requeridas. (Salazar, 2015)

Distancia y ángulo de proyección

El ángulo formado entre la superficie y la dirección en la que va el flujo de partículas es de 90° en un eje vertical y disminuye en la horizontal. Cuando se tiene ángulos menores a 90° es porque se aumenta el tamaño de la granalla y la velocidad con la cual es expulsada.

3.5. EL FENÓMENO DE CORROSIÓN

El término corrosión es utilizado para definir el proceso mediante el cual se deterioran los materiales (donde se incluye metales puros y aleaciones metálicas), por medio de reacciones químicas y electroquímicas. En los materiales como los polímeros y cerámicos, es utilizado el término degradación. (Ugaz-Lock & Tang, 1988)

Los metales son obtenidos de realizar un proceso que constituye en llevar los minerales de su estado natural a un estado de mayor energía. El fenómeno de la corrosión aparece cuando dichos materiales tratan de regresar a su estado natural. (Salazar, 2015).

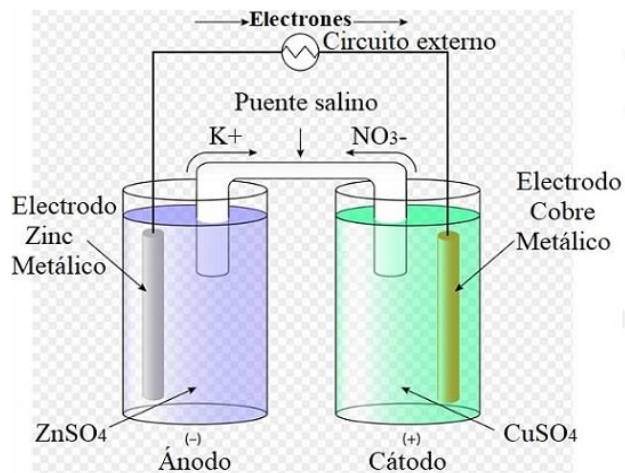
El proceso de corrosión es compuesto de las reacciones de oxidación-reducción (reacciones electroquímicas), mediante las cuales se desarrollan este tipo de procesos, para realizar un proceso de corrosión inducido es necesaria la existencia de tres componentes esenciales:

1. Uno electrodo (ánodo), un electrodo (cátodo). (Salazar, 2015)
2. Un electrolito como medio conductor, que corresponde a una solución acuosa (Salazar, 2015)

3. Un medio de conducción eléctrica que conecte los electrodos (Salazar, 2015).

Figura 13

Diagrama para una celda electroquímica



Nota. Adaptado de *celdas electroquímicas*, Bolívar Gabriel, 2020, lifeder,

(<https://www.lifeder.com/celdas-electroquimicas/>).

El potencial electroquímico es definido como la resistencia a la corrosión que tiene un material metálico a ser corroído, el grado de oxidación varía en cuanto a la composición de la solución. Entre mayor sea el valor de dicho potencial, mayor resistencia tendrá el material. En el caso contrario, cuanto más negativa sea la solución, más reactivo será el material para corroerse. La serie galvánica consiste en una tabla donde se ubican diferentes tipos de materiales respecto al potencial electroquímico de estos.

Figura 14

Serie galvánica para algunos metales y aleaciones comunes



Nota. Adaptada de *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales*, José Salazar, 2015, research gate, (https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Serie-galvanica-para-algunos-metales-y-aleacion-comunes-ECCA-2011_fig1_283699824).

3.6. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE CORROSIÓN

Hay demasiados factores que intervienen en un proceso de corrosión, el cual debe tener en cuenta las propiedades del material sobre el que se incide y el medio al cual se encuentra expuesto. A continuación, algunos factores de mayor efecto corrosivo.

3.6.1 Acidez de una solución

La acidez de una solución se mide mediante su pH, es la propiedad que define que cantidad de iones de hidrógeno se encuentran libres en la solución. Si el $\text{pH} < 7$ tendremos una solución es ácida. Lo que indica una concentración alta de iones hidrógeno libres en la

solución, los cuales reciben electrones para estabilizarse. La capacidad de recibir electrones se debe a que tan ácida sea la solución, las soluciones acidas son más corrosivas que las soluciones tanto neutrales con $\text{pH} = 7$, como las alcalinas con $\text{pH} > 7$. (Salazar, 2015) (S. Nasrazadani, 2007).

3.6.2 Sales acidas.

Al diluir este tipo de sales con la solución electrolítica se genera una disminución del pH, lo que hace que se acelere el proceso de corrosión. Se tienen algunos tipos de sales acidas como el cloruro de aluminio, el cloruro de hierro y el cloruro de amonio, por otro lado, una de las sales que incrementan el pH de una solución son las sales alcalinas, (Salazar, 2015). por lo que funcionan como inhibidores del proceso de corrosión en unos casos específicos. Este tipo de sales son el fosfato trisódico, tetraborato de sodio, silicato de sodio y el carbonato de sodio (Salazar, 2015).

3.6.3 Capas protectoras

Se puede reducir la generación de corrosión por medio de capas que protejan la superficie del material, estas capas son aplicadas artificialmente formando una película protectora, también puede generarse por medio de un fenómeno llamado pasividad el cual se encarga de generar capas de óxido metálico que impiden que el material siga en estado de corrosión. (Sail, 2011).

3.6.4 Temperatura

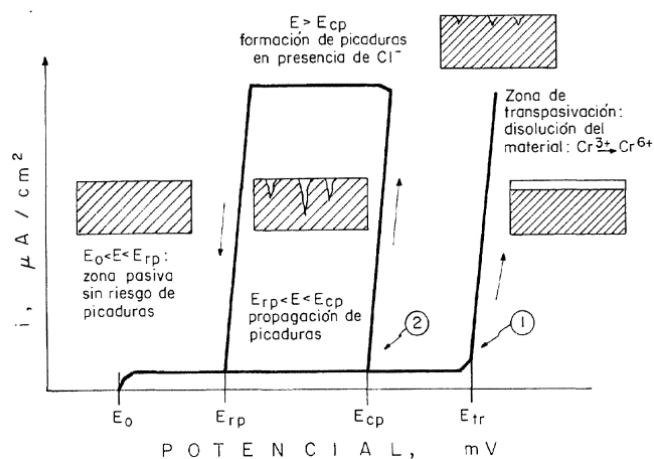
Cuando existe un aumento en la temperatura, también se aumenta la velocidad de la propaga el fenómeno de corrosión. Se ha demostrado que un aumento de 2° C duplica la tasa de corrosión. La temperatura es uno de los factores más representativos para el desarrollo del proceso de corrosión. (Fosca, Merino, & Otero, 1996)

3.6.5 Potencial electroquímico

Es de vital importancia tener claro los procesos y mecanismos por medio de los cuales se lleva a cabo el proceso de corrosión. Se ha impulsado la búsqueda de métodos con los cuales se pueda evaluar el comportamiento de los materiales metálicos frente a un medio agresivo. (Fosca, Merino, & Otero, 1996)

Figura 15

Curvas electroquímicas de aceros inoxidables en presencia o no de corrosión por picadura



Nota. Adaptada de *La celda Avesta: un método para evitar problemas de corrosión por resquicios en los ensayos electroquímicos de corrosión por picaduras*, C. Fosca, 1995,

(<https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/910/923>).

Por medio de los ensayos electroquímicos se puede evaluar rápidamente el comportamiento frente al proceso de corrosión por picadura que se genera en los aceros. La mayoría de estos ensayos contemplan la evaluación de dos parámetros, el primero es el potencial crítico de picaduras, (E_{cp}), y el segundo el potencial crítico de repasivación de picaduras o potencial de protección (E_{rp}). [35].

Como se puede observar en la Ilustración 15, vemos una representación de la curva electroquímica de aceros inoxidables. En esta ilustración se muestra en el eje vertical la corriente dada en miliampere, mientras que en el eje horizontal se presenta el potencial eléctrico dado en milivoltios. Cuando la curva se acerca al origen representa una zona pasiva. La presencia de picaduras es presentada por voltajes medios y al tener voltajes elevados se presentan altas tasas de corrosión, representados por pérdida de material.

Por otro lado, se encuentra los métodos de evaluación de los daños generados por corrosión, los cuales consisten en exponer una muestra metálica en medio en el cual será estudiado, sometido a condiciones reales.

Sin embargo, este método tiene sus limitaciones; primero, la probeta metálica no se comporta como una estructura porque no está sometida a los mismos tipos de tensiones, segundo, para poder obtener una correlación del tiempo aproximado de vida útil del material, se deben suponer tiempos de exposición prolongados, los cuales podrían ser días, meses o

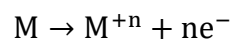
incluso años, dependiendo de la información que se quiera obtener. (Fosca, Merino, & Otero, 1996)

Se pueden emplear pruebas electroquímicas, para darles solución a los inconvenientes presentados, los cuales nos permiten determinar de velocidades instantáneas de corrosión en ensayos de corta duración (ensayos de laboratorio). (Fosca, Merino, & Otero, 1996)

3.7. Teoría del potencial mixto.

La mayoría de los procesos de corrosión son de naturaleza electroquímica, lo cual involucra la transferencia de cargas eléctricas entre zonas anódicas y catódicas (Ugaz-Lock & Tang, 1988). Esto hace que se desplieguen grandes posibilidades de estudio sobre los procesos de corrosión a través de la medición de variables eléctricas.

En la teoría de los ensayos electroquímicos de corrosión se incorpora la teoría del potencial mixto. Esta teoría postula que las reacciones de oxido-reducción generadas en la corrosión electroquímica son generadas a la misma velocidad sobre las superficies metálica. Las reacciones de oxidación pueden se representan con la siguiente ecuación:



Por medio de esta ecuación se halla el verdadero proceso de corrosión, el cual nos permite remover el átomo metálico de la superficie convirtiéndolo en un ion. Esta teoría propone que todos los electrones generados por las reacciones anódicas son consumidos por las correspondientes reacciones de reducción, o catódicas (Ugaz-Lock & Tang, 1988).

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

A continuación, se dará a conocer las reacciones catódicas más comunes en soluciones acuosas:

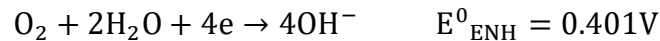
- Reducción de protones (sol. Acidas)



- Reducción de oxígeno (sol. Aci.)



- Reducción de oxígeno (sol. Neutra o básica)



- Reducción de iones metálicos



- Deposición de iones metálicos



En este proceso de corrosión pueden ocurrir simultáneamente más de una reacción catódica y anódica (Ugaz-Lock & Tang, 1988).

3.7.1 Mediciones de la velocidad de corrosión por extrapolación

Existen dos procedimientos para la medición del i_{corr} . Por medio de la extrapolación de las regiones de Tafel: el cual es conocido como el método potencioestático, este método consiste en imponer al sistema un potencial determinado y poder registrar la lectura de corriente respectiva, por otro parte, también se cuenta con el método galvanostático, este método aplica una determinada intensidad de corriente y registrar el potencial respectivo (Ugaz-Lock & Tang, 1988). Sin embargo, la equivalencia de corriente entre las semirreacciones de reducción y oxidación en el potencial mixto, E_{corr} , impide la medida directa del i_{corr} , esto se debe a que por medio de instrumentos de laboratorio no se mide corriente alguna al compensarse externamente las intensidades de signos diferentes.

si se desea obtener información la cual permita estimar la i_{corr} . se debe alterar el sistema para que dicha alteración pueda romper la equivalencia antes mencionada. Mediante un ensayo de polarización podemos medir instrumentalmente una corriente total, esto es posible ya que el desplazamiento del punto de equivalencia es forzado. [34,36]. Para los resultados nos arroja las curvas de polarización, la cual nos muestra la relación entre la densidad de corriente y el potencial aplicado.

La ilustración 16 nos muestra una porción de las curvas obtenidas al aplicar un potencial diferente al E_{corr} . Se puede observar que mientras más nos aproximemos a el valor de E a el de E_{corr} , el valor de la i tiende a cero.

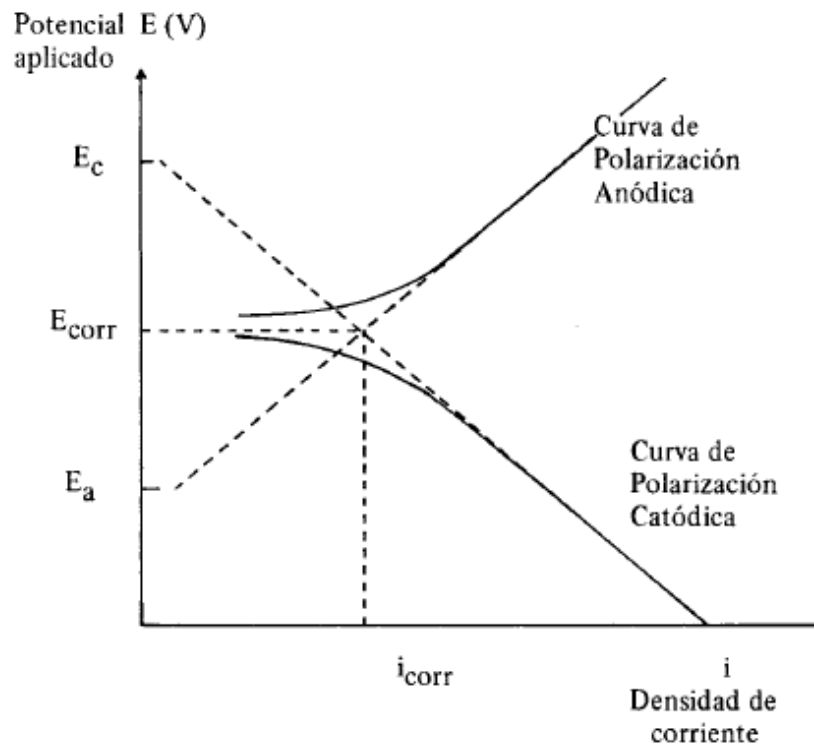
La variación del potencial, densidad de corriente de las curvas anódicas y catódicas deberían ser lineales, interceptándose en el punto $E_{\text{corr}}/i_{\text{corr}}$, sin embargo, existen desviaciones lineales en las proximidades de E_{corr} . Dichas curvas poseen regiones en las que

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

se cumple una proporción lineal entre el potencial y el logaritmo de la densidad de corriente, zona denominada región de Tafel. (Ugaz-Lock & Tang, 1988)

Figura 16

Curvas de polarización



Nota. Adaptada de *principios de las técnicas electroquímicas en estudios de procesos de corrosión*, Alberto Ugaz e Isabel Díaz, 1988,

(<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/4855/4855>).

Dicha zona se ajusta a la siguiente expresión.

$$\eta = a + b \log i$$

Donde;

a y b son constantes.

i densidad de corriente.

η polarización (diferencia entre potencial aplicado y el E_{corr}).

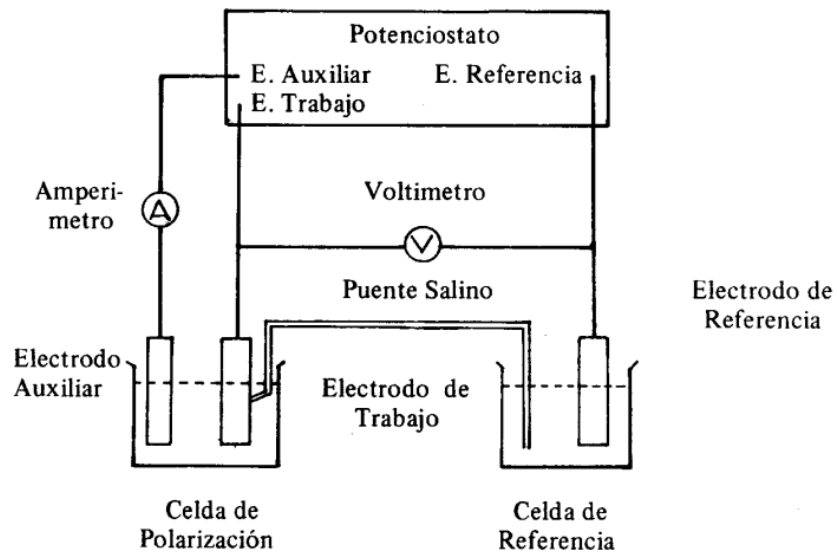
Extrapolando los segmentos de las curvas anódica y catódicas e interceptándolas al E_{corr} , se puede determinar el valor de i_{corr} para un metal en un medio agresivo.

3.8. Método potencioestático.

Para llevar a cabo la realización de los experimentos de polarización es necesario tener una celda electroquímica, ya que nos permite poner en contacto la sustancia electrolítica y el material metálico que se va a estudiar. Cuando se hace referencia al electrodo de trabajo, cuyo potencial es medido en cada instante con respecto a un electrodo de potencial constante, en cuanto al electrodo de referencia, este cierra el circuito con el contra electrodo o el electrodo auxiliar.

Figura 17

Instalación de potenciostato (celda electroquímica)



Nota. Adaptada de *principios de las técnicas electroquímicas en estudios de procesos de corrosión*, Alberto Ugaz e Isabel Díaz, 1988,

(<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/4855/4855>).

Hoy en día se encuentra gran cantidad de potenciostatos con registros gráficos incorporados, esto hace que se tenga una gama amplia de posibles trazos respecto a las curvas de polarización. Se puede determinar la eficiencia de alguna variedad de inhibidores para una serie de medios agresivos en diferentes metales. Por lo general son por medio de ensayos potenciostáticos, dichos resultados proporcionan más o menos una idea del comportamiento que muestran las probetas frente a un medio agresivo, por lo tanto, no arrojan un valor absoluto de la velocidad de corrosión. (Ugaz-Lock & Tang, 1988), (Salazar, 2015).

A pesar de ciertas dificultades por medio de los ensayos electroquímicos podemos obtener información sobre la velocidad de corrosión, mediante estos ensayos se obtiene de manera rápida datos que nos permite evaluar y seleccionar materiales, los materiales deben de ser sometidos a determinadas condiciones para la obtención de dichos resultados. (Ugaz-Lock & Tang, 1988)

4. Metodología.

El siguiente cuadro muestra las actividades desarrolladas en el desarrollo del proyecto, así como la descripción de cada una.

Tabla 2

Gestión de trabajo de grado.

#	Actividad	Descripción
1	Revisión bibliográfica	Recopilación de bibliografía y conceptualización. Análisis de la literatura recopilada.
2	Planeación del experimento	Se estudiaron los requerimientos de los cupones de prueba a ensayar en concordancia con las pruebas a realizar.

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

3	Fabricación de muestras	Esta etapa incluye el estudio de normas para cada ensayo, corte de material, y granallado de acuerdo con lo definido en la actividad 2.
4	Ensayo de indentación.	Se realizaron ensayos de indentación con el fin de determinar la dureza en la capa superficial del material para diferentes niveles de granallado y sin granallado
5	Ensayos de potencial electroquímico	Se llevaron a cabo los ensayos para muestras con diferentes niveles de granallado y sin granallado con el fin de establecer su efecto en el potencial de corrosión. Estos ensayos se tienen planeado realizarlos en la escuela de ciencia de materiales de la Universidad Industrial de Santander.
6	Análisis morfológico	Se llevaron a cabo los ensayos de microscopía óptica en la escuela de ingeniería mecánica UIS y de SEM en el Centro de microscopía UIS.
7	Análisis de resultados.	Tabulación de datos obtenidos en los ensayos 4, 5 y su cruce con el análisis morfológico de la actividad 6.

8	Reporte final	Redacción de informe final con recomendaciones de parámetros de proceso
---	---------------	---

Nota. Tabla realizada por los autores.

Preparación de las muestras

Se sometieron las muestras de acero SAE 5160 con y sin granalla a corte perpendicular en una sierra metalográfica de precisión (Buehler IsoMet 1000) en el laboratorio de corrosión de Guatiguará, esto con el fin de obtener las muestras con un corte limpio y con la menor modificación posible del estado de esfuerzos residuales, ver *ilustración 24*, y poder llevar después al proceso de pulido.

Figura 18

Muestras Acero SAE 5160



Nota. Fotografía tomada por los autores.

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

El proceso para el pulido se llevó a cabo en las piezas de acero SAE 5160 con lijas granos de 120, 320, 400 y 600 esto con el fin de eliminar las líneas más gruesas que se observaban en las piezas, para las líneas poco profundas se utilizaron lijas de granos 1200 y 1500. Dicho proceso se llevó a cabo en la máquina de pulir (Buehler), véase en la ilustración 19, que se encuentra en el laboratorio de metalografía, proceso en el cual se lleva a cabo con mucho cuidado aplicando una fuerza constante y rotando las piezas 90 grados, posteriormente al proceso de pulido se pasan las muestras por un paño suave con alúmina de $0,3 \mu\text{m}$ para finalizar el proceso de pulido y que las piezas queden con el acabado tipo espejo.

Figura 19

Máquina para pulir Buehler.

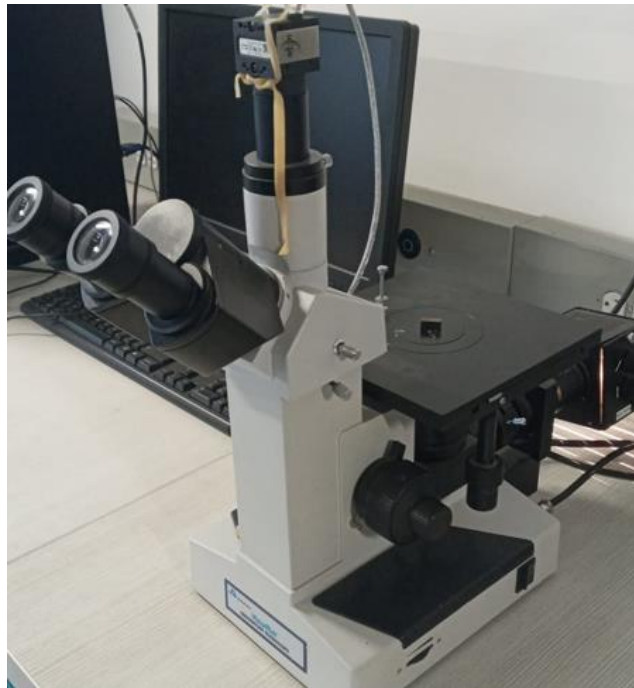


Nota. Fotografía tomada por los autores.

Después de terminar el proceso de pulido las muestras se llevan al microscopio óptico como se muestra en la ilustración 20, para descartar cualquier rayadura pronunciada que hubiese quedado después del proceso de lijado y pulido.

Figura 20

Muestras pulidas y montadas en el Microscopio óptico



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Montaje de las muestras en el durómetro bruket umt

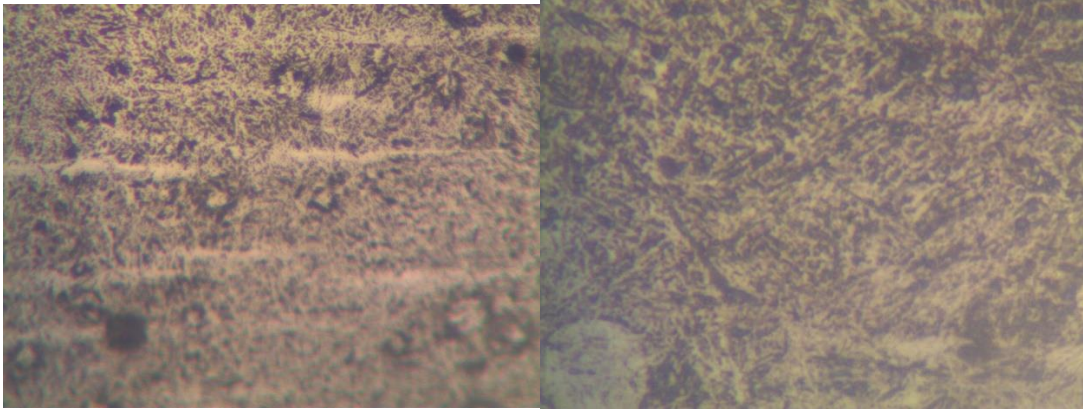
Después de la preparación de las piezas se procede a atacar las piezas con Nital al 5%, esto con el fin de poder apreciar su microestructura (en la ilustración 21 donde se observa la microestructura del acero SAE 5160 con granalla y en la ilustración 22 obtenemos la microestructura del acero SAE 5160 sin granalla), por un tiempo aproximado de 8 a 10 segundos. Este Nital fue preparado en el laboratorio con los siguientes volúmenes:

12 ml de alcohol 70%

0.5ml de ácido nítrico 50%.

Figura 21

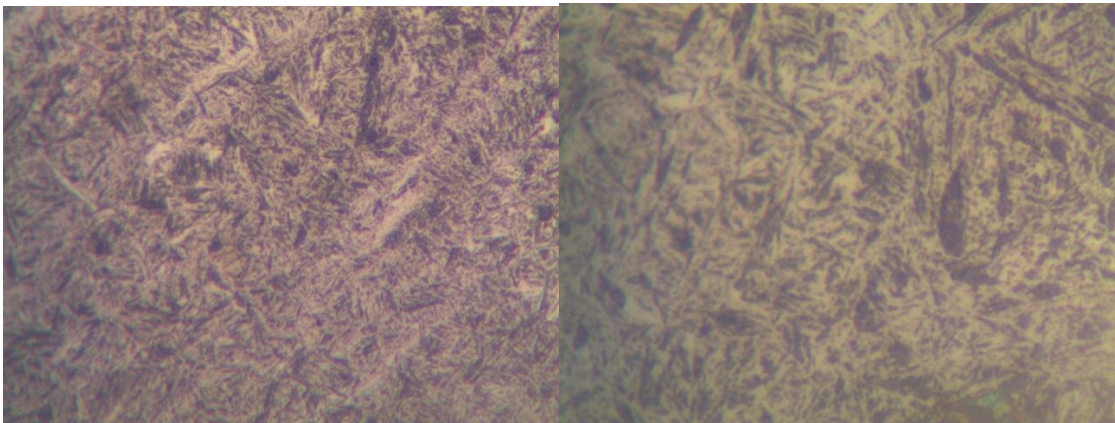
Microestructura del acero SAE 5160 con granalla (magnificación 100X).



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Figura 22

Microestructura del acero SAE 5160 sin granalla (magnificación 100X)

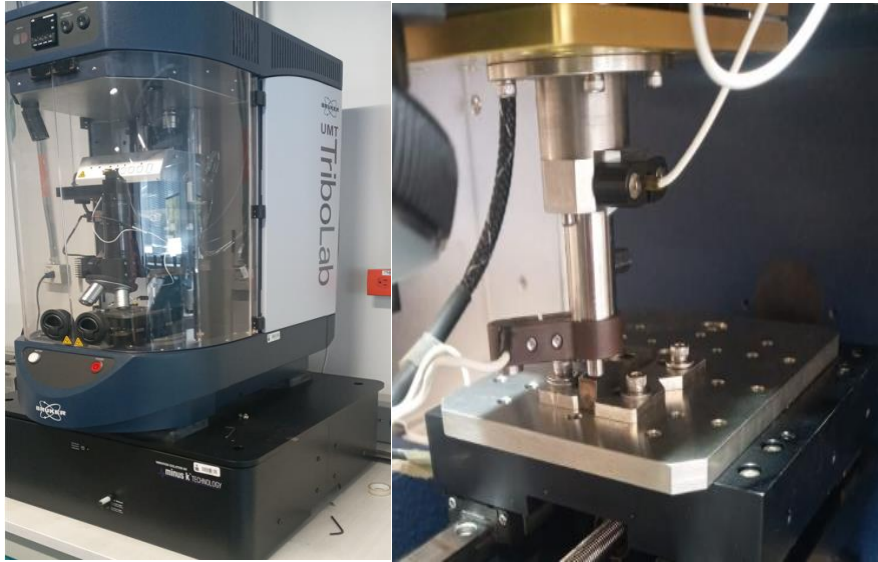


Nota. Fotografía tomada por los autores.

Después de haber sometido las muestras al ataque, se procede a el montaje en el durómetro. Para estas pruebas la maquina aplica una fuerza de 5 N por 15 segundos en cada punto que se hace en la muestra, por cada muestra se tomaron datos de 21 puntos por pieza. Un ejemplo de la muestra montada en el durómetro se aprecia en la ilustración 23.

Figura 23

Maquina UMT (Izquierda), Maquina aplicando la fuerza en la muestra (Derecha)



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Por último, la maquina empieza a trabajar sobre la muestra y al finalizar el proceso obtienen las longitudes de las diagonales, como se esquematiza en la ilustración 24, Las huellas dejadas por el indentador tal y como se muestra en la ilustración 24. Una vez obtenidas las diagonales, la dureza Vickers se calcula con la ecuación (1).

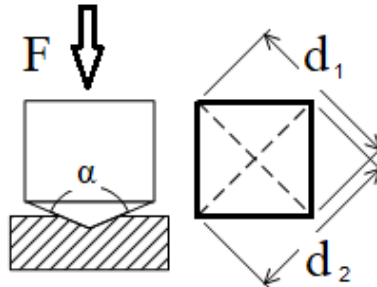
$$HV=0.102 (2F \sin \alpha) / d^2 \quad (1)$$

En la cual:

F es la fuerza aplicada en Newton, d la longitud de las diagonales en mm y α el ángulo de la punta del indentador. 136° en este caso.

Figura 24

Esquemático de una indentación Vickers y nomenclatura usada



Nota. Realizada por los autores.

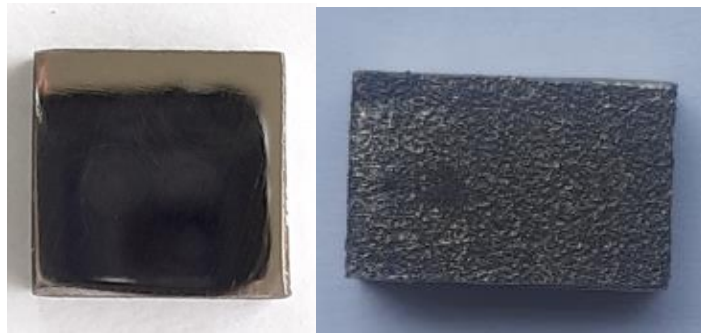
Corrosión.**Ensayo electroquímico.**

Probeta.

Se utilizaron dos probetas de acero SAE 5160, una de ellas con un proceso superficial de granallado (la imagen de la derecha) y la otra en su estado de producción (la imagen de la izquierda), como se muestra en la ilustración 25. Las dimensiones de las probetas se dieron especificadas por el tamaño del orificio de la celda electroquímica.

Figura 25

Detalle de las probetas sin y con granalla.



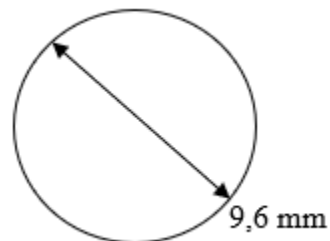
Nota. Fotografía tomada por los autores.

Celda electroquímica.

El área de contacto entre la solución preparada y el electrodo de trabajo es de $9,6 \text{ [mm]}^2$, esta área corresponde al espacio hueco que tiene la celda electroquímica, como se muestra es la ilustración 26.

Figura 26

Geometría del área de contacto entre la probeta y la solución

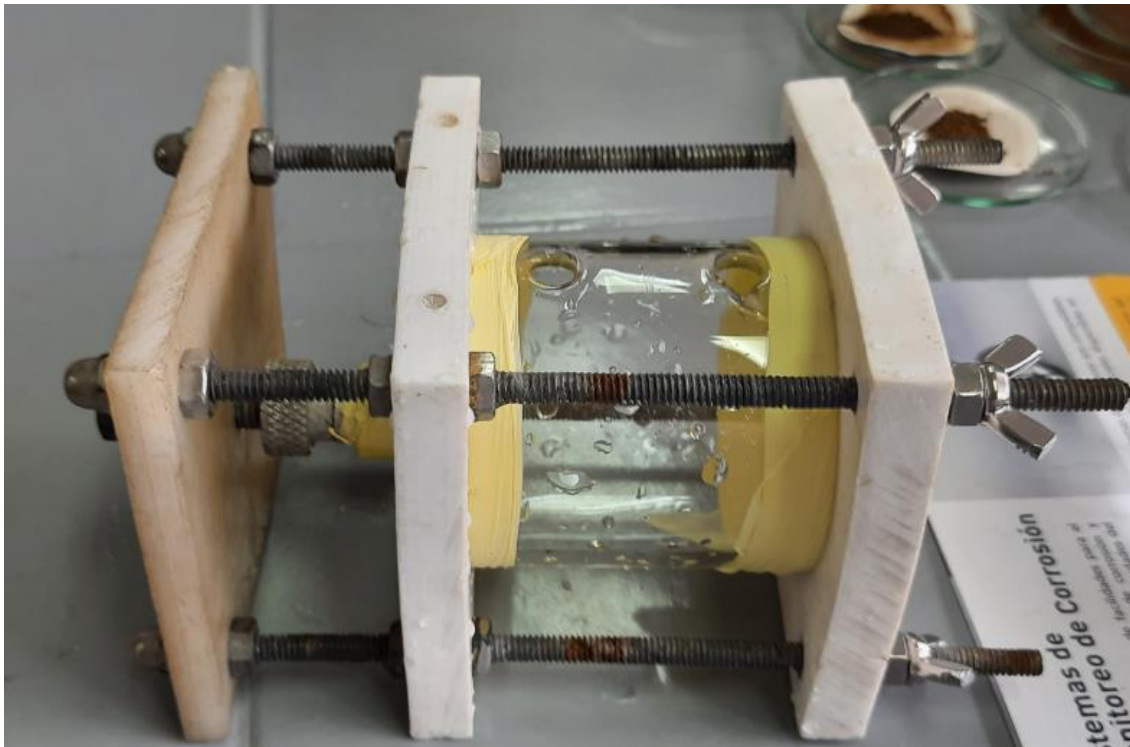


Nota. Fotografía tomada por los autores.

Un detalle de la celda electroquímica usada que se muestra en la *ilustración 27*, esta celda pertenece al grupo de investigación en corrosión, GIC.

Figura 27

Celda electroquímica usada.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

La celda está compuesta por tres placas de Teflón, cuatro barrillas roscadas con sus respectivas tuercas y arandelas, un tornillo de ajuste para el electrodo de trabajo y la probeta.

Para llevar a cabo el ensayo se prepararon 500 ml de solución entre los cuales su composición es de 17,5 mg de cloruro de sodio, y 500 ml de agua desionizada. La concentración de la solución es 3,5% Peso/Vol.

En la celda de trabajo se utilizaron tres electrodos. Electrodo de trabajo, electrodo de referencia, contraelectrodo.

- Electrodo de trabajo es un alambre de cobre de 0.2 mm de diámetro y 10 cm de longitud.
- Electrodo de referencia – Cloruro de plata, GAMRY 930-00015 mostrado en la ilustración 28.
- Contraelectrodo de grafito 00015 mostrado en la ilustración 29.

Figura 28

Electrodo plata - cloruro de plata.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Figura 29

Contraelectrodo de grafito.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

La solución utilizada para este ensayo se compuso de 3,5 gramos de Cloruro de sodio por 100 ml de agua desionizada, la solución utilizada fue preparada por agitación en un balón aforado, se mezcló hasta que el cloruro de sodio fue disuelto por completo.

Se procede a colocar la probeta de acero SAE 5160 en el orificio del área de contacto de la celda electroquímica, para posteriormente depositar la solución, se verifica que no presente fugas, con el fin de evitar resultados erróneos.

Figura 30

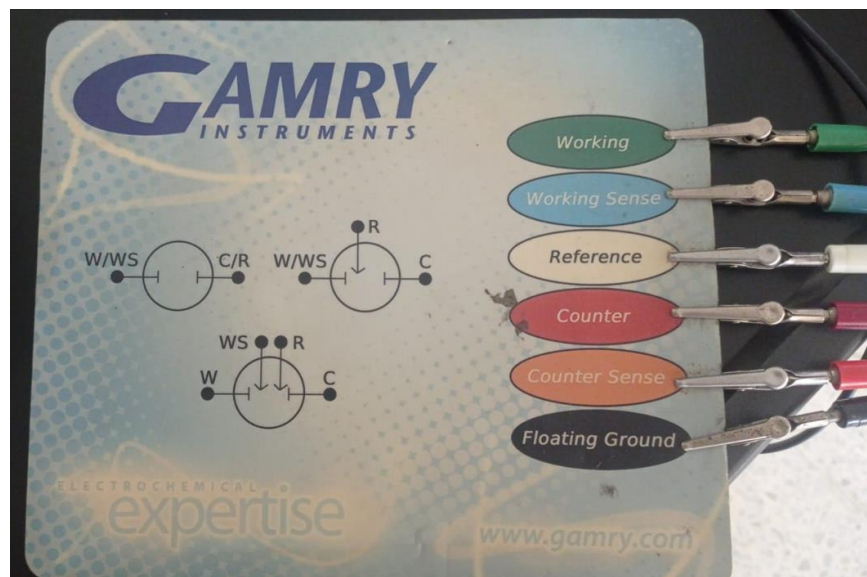
Llenado de la celda electroquímica para ensayo



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Figura 31

Paleta de conexiones



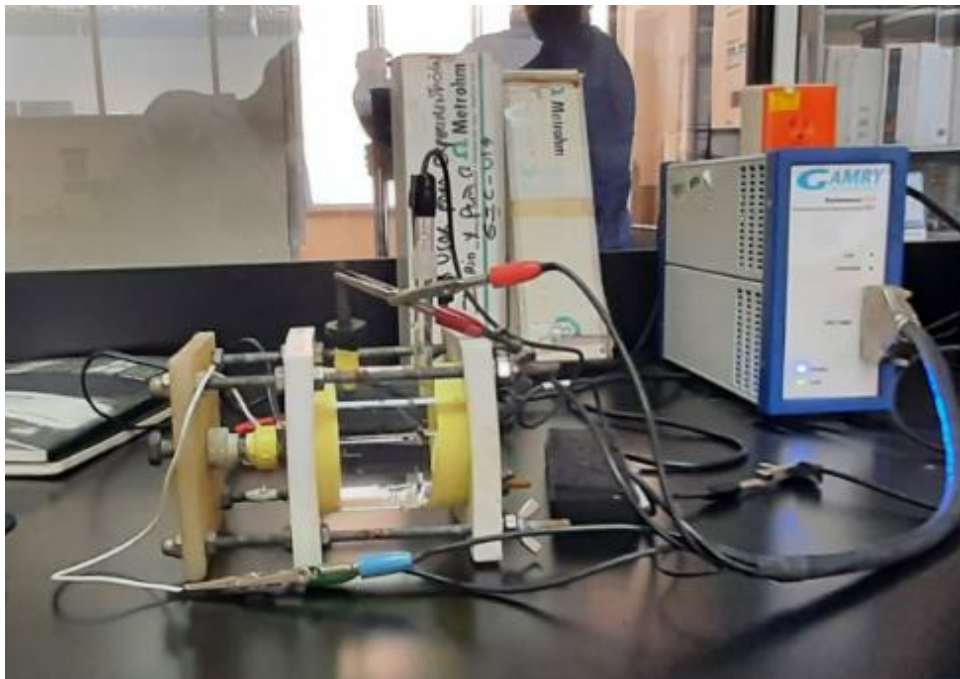
Nota. Fotografía tomada por los autores.

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

Se procede a realizar la adecuación del equipo Gamry 600, para posteriormente realizar las debidas conexiones entre la celda electroquímica y el equipo.

Figura 32

Montaje y conexión del potenciostato/galvanostato Gamry 600 con celda electroquímica.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Se implementó el método potencioestático que consiste en medir la velocidad de corrosión por extrapolación, lo que nos lleva a analizar las curvas de Tafel. también nos permite medir potencial de corrosión (OCP). Estas pruebas se llevaron a cabo en un lapso de 90 minutos por cada ensayo.

Estos ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio GIC (grupo de investigación en corrosión) en el parque tecnológico Guatiguará, UIS.

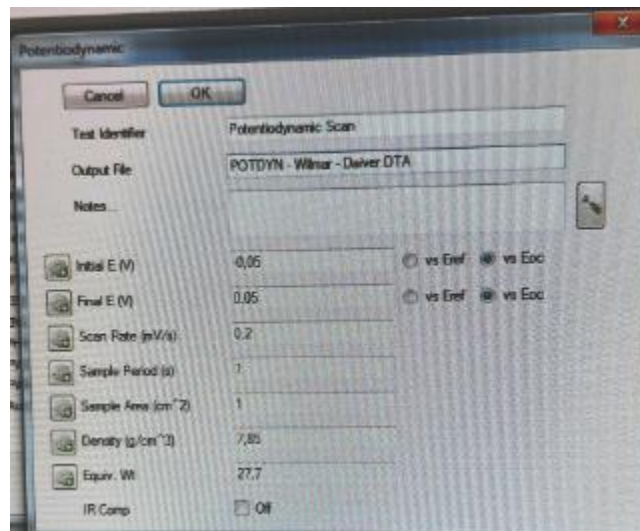
INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

El software utilizado en el análisis de los datos generados es el Gamry 600, Este software sirve para ejecutar una gran cantidad de experimentos electroquímicos, para realizar los ensayos de potencial de corrosión se deben hallar los siguientes datos:

Densidad del material, peso equivalente.

Figura 33

Datos ingresados en el programa para la realización de los ensayos.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

El peso equivalente se halló mediante las siguientes ecuaciones:

$$P.E = \frac{1}{N_{EQ}} \quad (2)$$

$$N_{EQ} = \sum \left(\frac{f_i \cdot n_i}{a_i} \right) \quad (3)$$

Donde:

f_i = *Fracción masa.*

$n_i =$ *Intercambio de electrones (valencia).*

$a_i =$ *Peso atómico*

Para la realización del ensayo electroquímico y analizar las curvas de extrapolación de Tafel.

Microscopia.

Para esta prueba se utilizó un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo Quanta FEG 650, el cual dispone de un detector STEM. Que lleva acoplado un analizador de energía dispersiva de Rayos X, este microscopio cuenta con tres modos de trabajo: alto vacío, bajo vacío y ESEM. Véase en la ilustración 34.

Figura 34

Microscopio QUANTA FEG 650



Nota. Fotografía tomada por los autores.

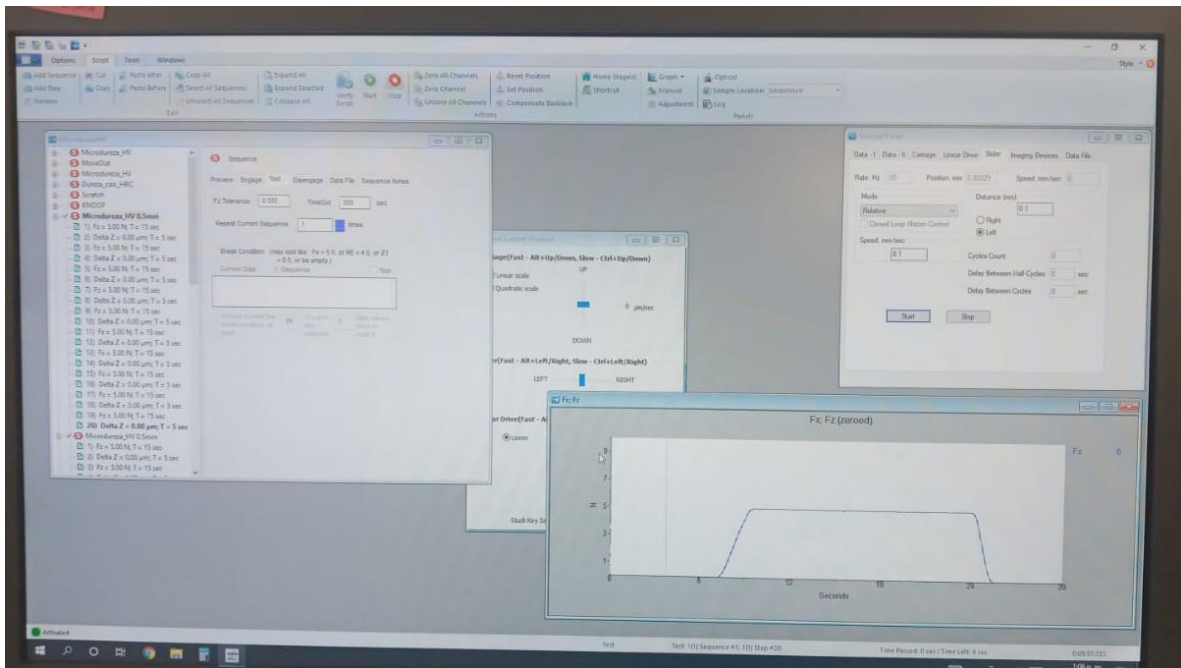
5. Resultados y análisis

5.1. Microdureza

Para el estudio de indentación superficial en metales es necesario tener la superficie con un acabado espejo, para que de esta manera se pueda diferenciar los estados de la superficie antes y después de haber realizado el proceso, con el fin de medir el tamaño de la huella marcada por el indentador. Adicionalmente, se debe verificar que la huella no se haya realizado en una zona con presencia marcada de algún constituyente de lo que entregaría mediciones de dureza localizada.

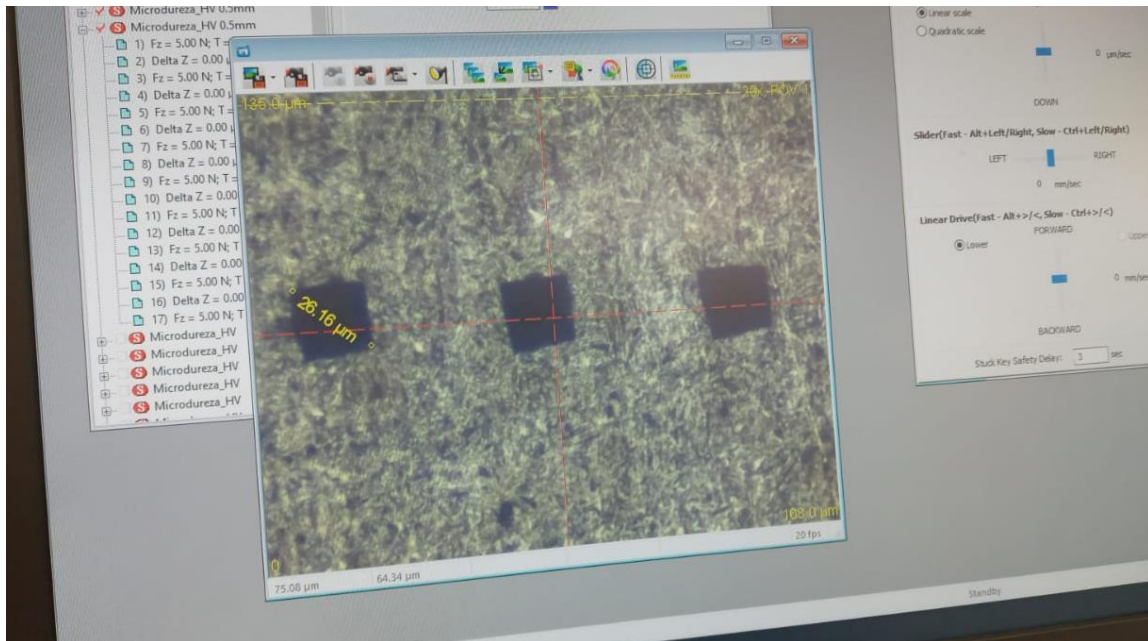
Figura 35

Programación de la maquina UMT.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

Figura 36*Datos tomados de las diagonales*

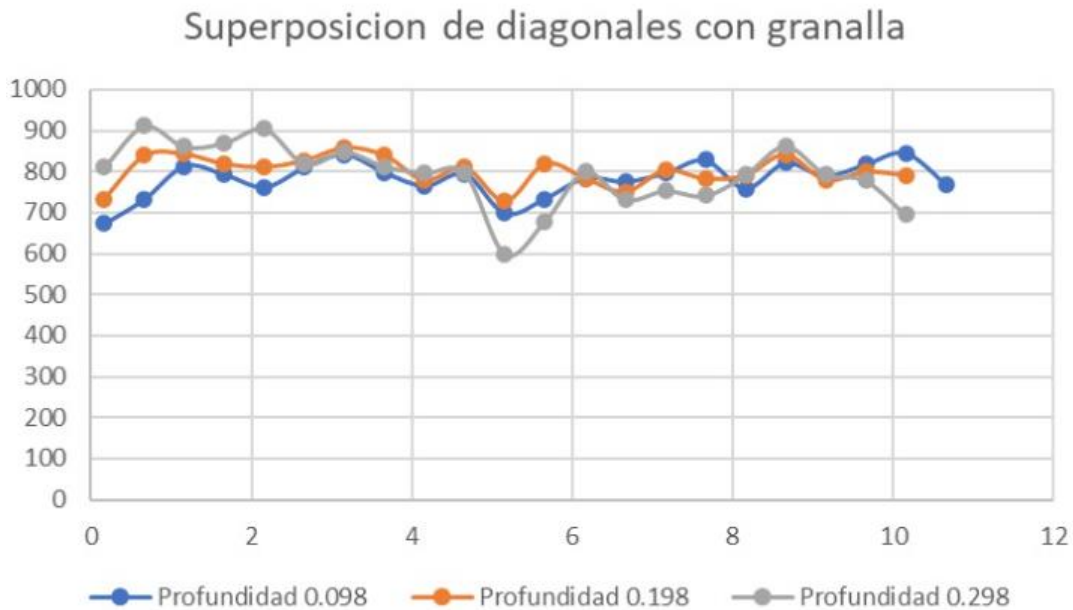
Nota. Fotografía tomada por los autores.

Muestra con granalla

La ilustración 37, muestra los resultados de dureza Vickers para una muestra con granalla tomada a tres profundidades medidas desde la superficie procesada. Los valores de HV se estimaron según la ecuación (1) y se encuentran en el **Apéndice A**.

Figura 37

Dureza Vickers a diferentes profundidades del borde para una muestra con granalla



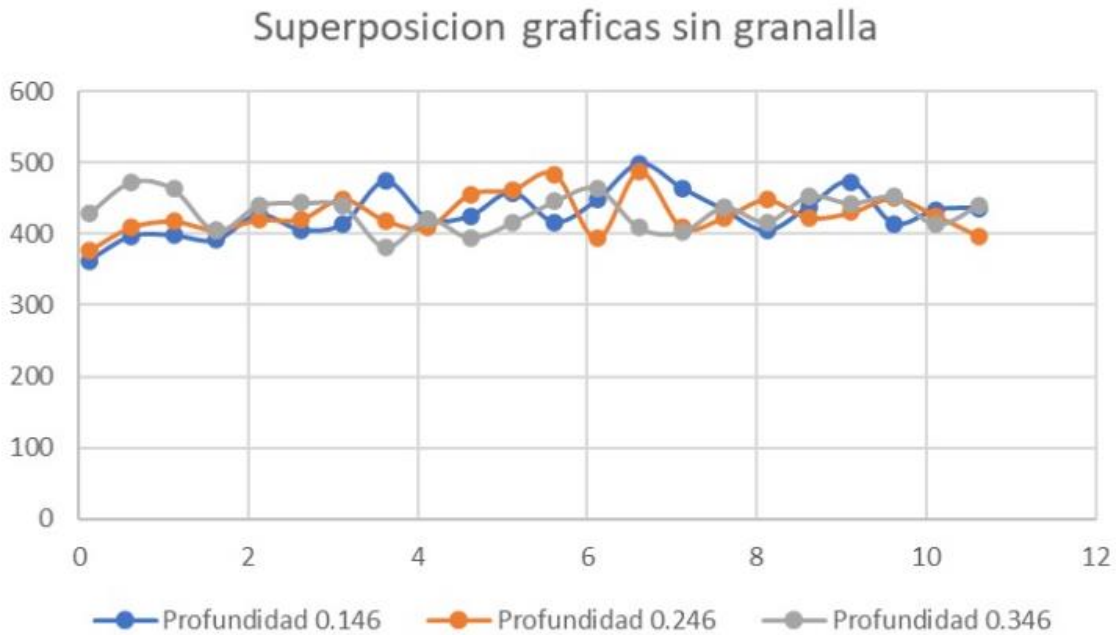
Nota. Datos obtenidos por los autores.

Muestra sin granalla

La ilustración 38, muestra los resultados de dureza Vickers para una muestra sin granalla tomada a tres profundidades medidas desde la superficie procesada. Los valores de HV se estimaron según la ecuación (1). y se encuentran en el **Apéndice A**.

Figura 38

Dureza Vickers a diferentes profundidades del borde para una muestra sin granalla



Nota. Datos obtenidos por los autores.

Para este ensayo se toma en cuenta los valores de micro dureza promedio de las probetas con el fin de obtener el valor más alto de dureza entre las muestras (con o sin granalla); por lo antes mencionado, decimos que la probeta que presento mayor nivel de dureza fue la muestra con el tratamiento superficial de granallado ya que presenta un pico de más o menos 600 μm .

El porcentaje de variación entre los valores promedio de las diagonales en la probeta sin granalla es de 2%, en cuanto a la variación de los valores promedios de las diagonales en la probeta con granalla es de un 4% ya que al final de estos promedios tiende a aumentar respecto a los primeros datos obtenidos. Para estos datos debemos tener en cuenta factores

que influyen en el resultado como: posibles errores de máquina como calibración, a pesar de que las muestras fueron pulidas tipo espejo se puede obtener alguna suciedad del ambiente a la hora del montaje en la máquina.

5.2. Corrosión

5.2.1 ensayo electroquímico.

Los ensayos electroquímicos permiten la evaluación rápida del comportamiento frente a la corrosión por picadura de los aceros.

Se llevó a cabo la realización de dos ensayos electroquímicos en los cuales se atacaron dos probetas de acero SAE 5160, con una solución compuesta por agua desionizada y NaCl al 3,5 %; una de las probetas tiene un tratamiento superficial de granallado el cual le brinda mejores propiedades mecánicas. Debido a la modificación superficial, se evalúa su comportamiento ante ataques químicos.

En este experimento se evaluaron tres parámetros importantes que son: corriente de corrosión, resistencia a la polarización y resistencia a la corrosión. Basado en estos parámetros y en la gráfica de Tafel se procede a realización del ensayo para posteriormente analizar los resultados obtenidos.

En esta sección presentaremos los resultados obtenidos en el desarrollo del ensayo realizado a las probetas (con granallado y sin granallado). Estos ensayos se realizaron con el fin de determinar la velocidad con la que se corroe las probetas, teniendo en cuenta sus respectivos tratamientos superficial y la solución utilizada.

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

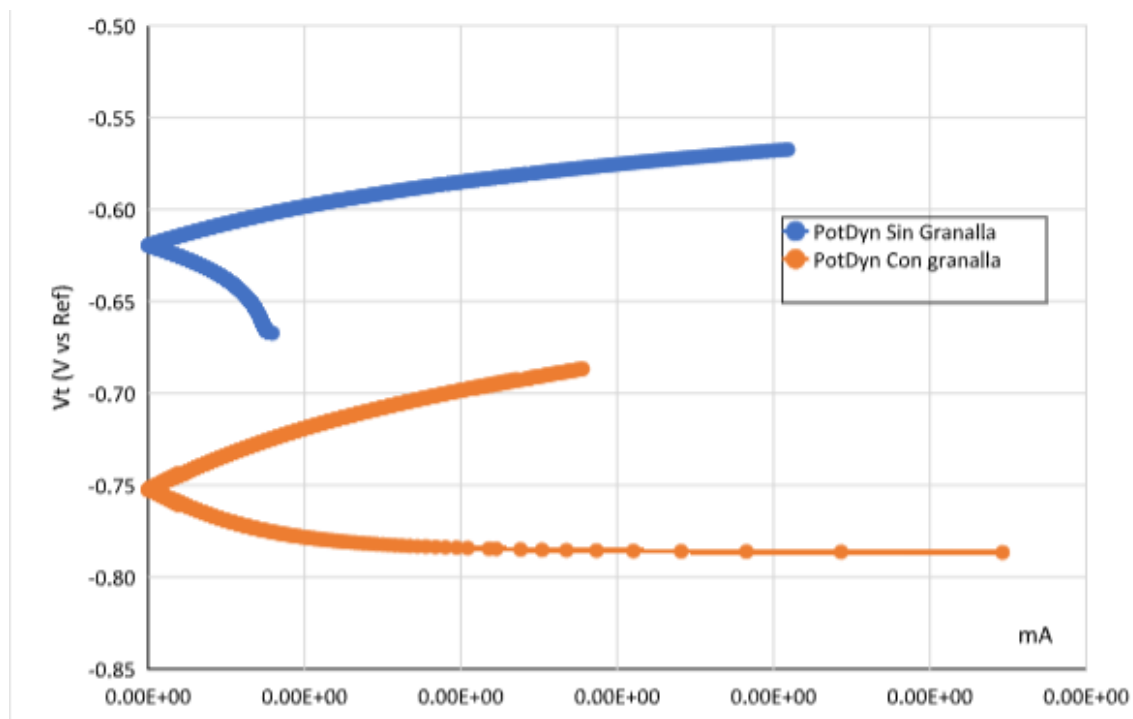
Al realizar la prueba en el Gamry 600 la gráfica de polarización o extrapolación de Tafel fue realizada con 503 datos y respectivamente obtenida para el acero SAE 5160 (SIN GRANALLA).

La gráfica de polarización o extrapolación de Tafel fue realizada con 503 datos y respectivamente obtenida para el acero SAE 5160 (CON GRANALLA).

Para poder evidenciar mejor este resultado se procede a superponer ambas graficas.

Figura 39

Potencial de corrosión para el acero 5160 con y sin granalla



Nota. Datos obtenidos por los autores.

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

La gráfica de color azul es la generada con los datos del acero SAE 5160 sin granalla, mientras que la gráfica de color naranja es generada con los datos del acero SAE 5160 con granalla.

Teniendo en cuenta que la gráfica generada por el acero SAE 5160 sin granalla inicia su medición en -620 mV, mientras que la gráfica generada para el acero SAE 5160 con granalla inicia su medición en -750 mV.

Teniendo en cuenta que las probetas son del mismo material, realizando la salvedad de que una de ellas tiene tratamiento superficial y la otra no; se puede evidenciar lo siguiente:

La probeta que se corroe más rápido es la de acero SAE 5160 con granallado, esto se debe a que el tratamiento superficial realiza una deformación plástica en la superficie del material, generando espacios vacíos los cuales no son impactados con granalla. Estos espacios vacíos se determinan como intersticios, en los cuales se alojan con mayor facilidad agentes generadores de óxidos. Aumentando de esta manera la degradación progresiva del acero por factores corrosivos.

5.3. Microscopia.

En este estudio microscópico se puede determinar la microestructura del material en relación con sus propiedades físicas, mecánicas, químicas y la composición de fabricación de una aleación o material en particular.

Se procedió a poner las probetas en el plato de análisis del microscopio y se comienza con el procedimiento de vacío para poder llevar a cabo la prueba.

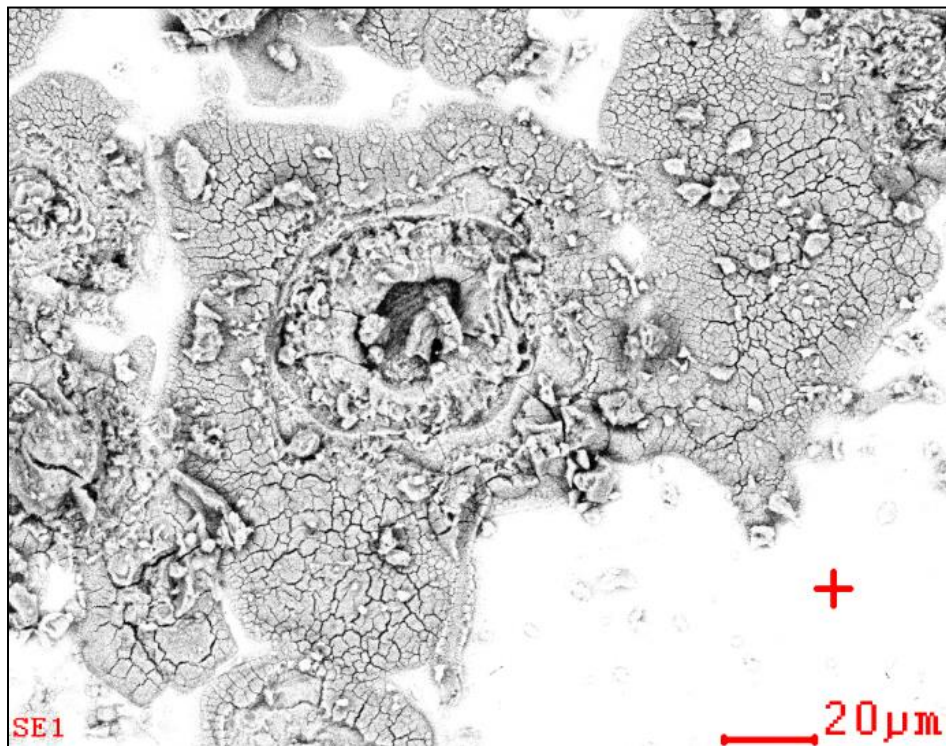
INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

En esta sección presentaremos los resultados obtenidos en el desarrollo de la prueba, realizado a las probetas (con y sin granalla), esta prueba se realizó con el fin de observar los cambios en las probetas después de realizar el ataque electroquímico con el fin de determinar los cambios en su composición química y su cambio morfológico después del ataque electroquímico.

Al realizar la prueba de microscopia en el Quanta FEG 650 se obtuvieron diferentes imágenes de la morfología del acero SAE 5160 (SIN GRANALLA) es mostrada en la ilustración 40.

Figura 40

Probeta sin granalla vista desde el microscopio (en el área no corroída).



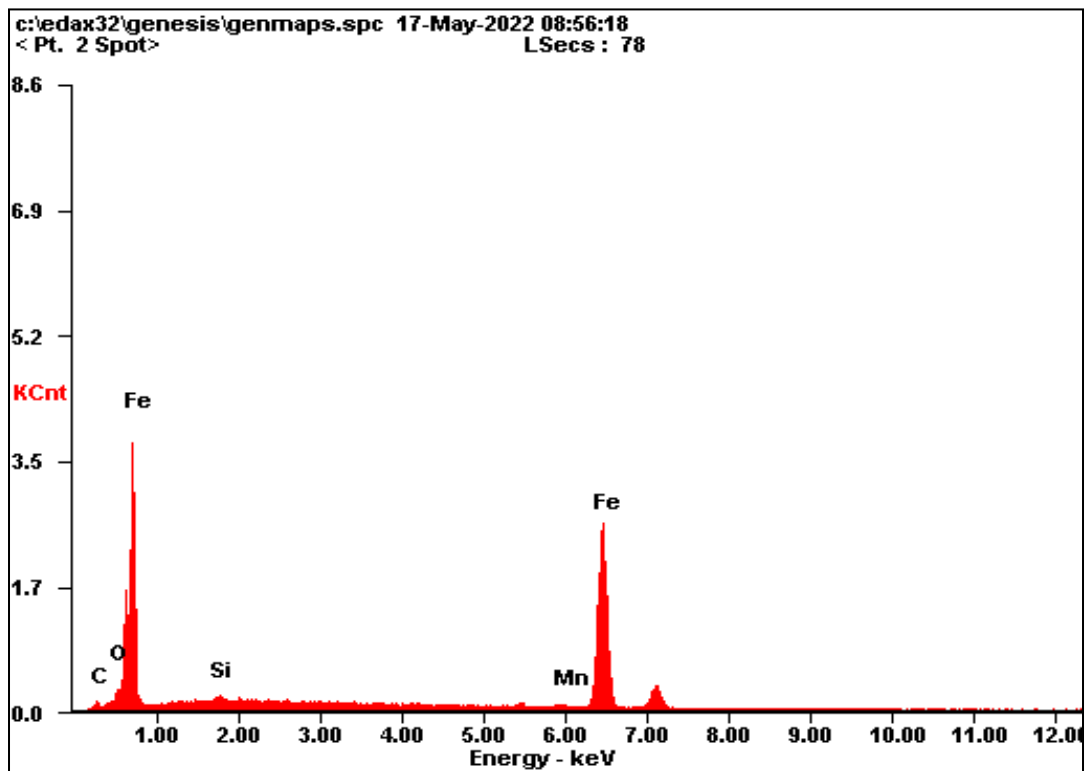
Nota. Foto suministrada por el equipo Quanta FEG 650.

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

El área analizada en la ilustración 40, es la marcada por la cruz roja, en esta área se identificó que la probeta se vio atacada electroquímicamente más en algunas áreas que en las otras, se encontró que la composición química en esta área es similar a la composición química original del acero, se puede ver en la ilustración 41 y la tabla 3.

Figura 41

Grafica de composición química del acero SAE 5160 después del ataque electroquímico sin granalla (No corroída).



Nota. Foto suministrada por el equipo Quanta FEG 650.

Tabla 3

Composición química después del ataque electroquímico sin granalla (No corroída).

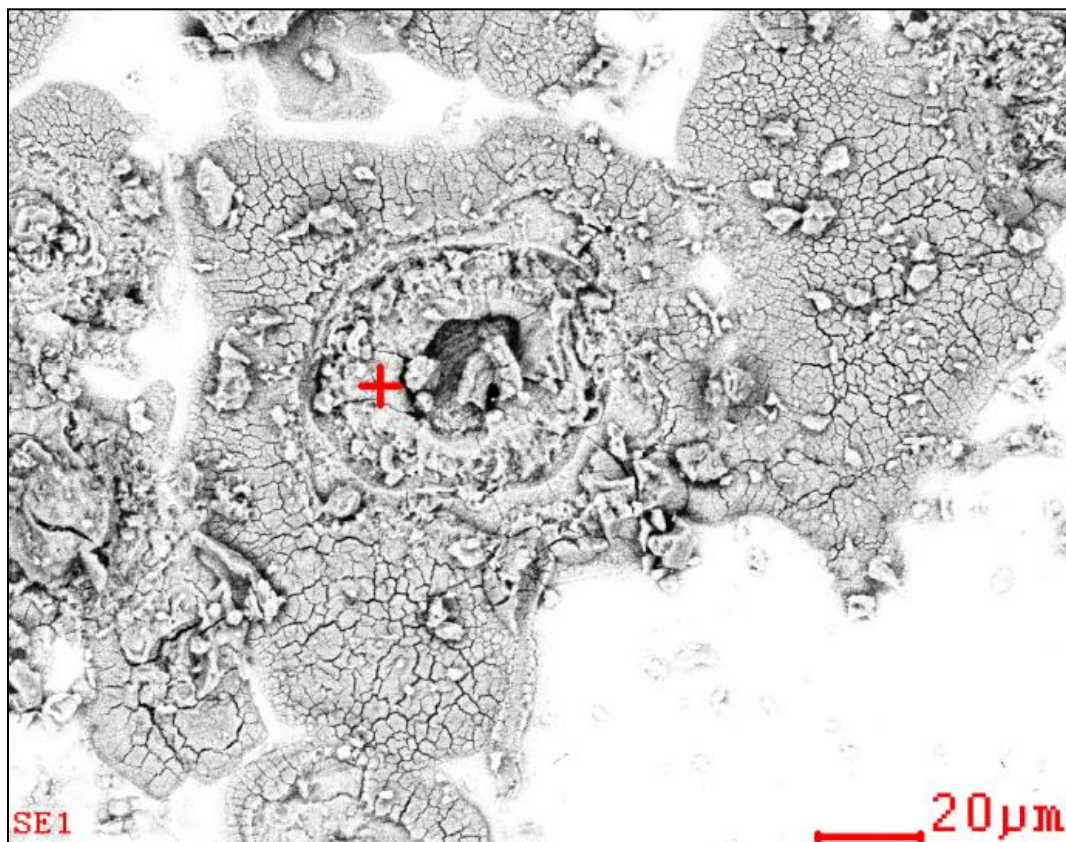
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	01.43	06.10
<i>O</i>	01.38	04.42
<i>Si</i>	00.32	00.58
<i>Mn</i>	01.44	01.34
<i>Fe</i>	95.43	87.56
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. Foto suministrada por el equipo Quanta FEG 650.

Como se puede observar en las ilustraciones 41 y Tabla 3, la composición del acero SAE 5160 en esta área de la probeta no tuvo un gran cambio a su composición original, debido a que la composición inicial del acero SAE 5160 la hace resistente en gran medida a la corrosión generada por los agentes ambientales a los que están expuestos este tipo de componentes en los vehículos.

Figura 42

Probeta sin granalla vista desde el microscopio. (en el área corroída).

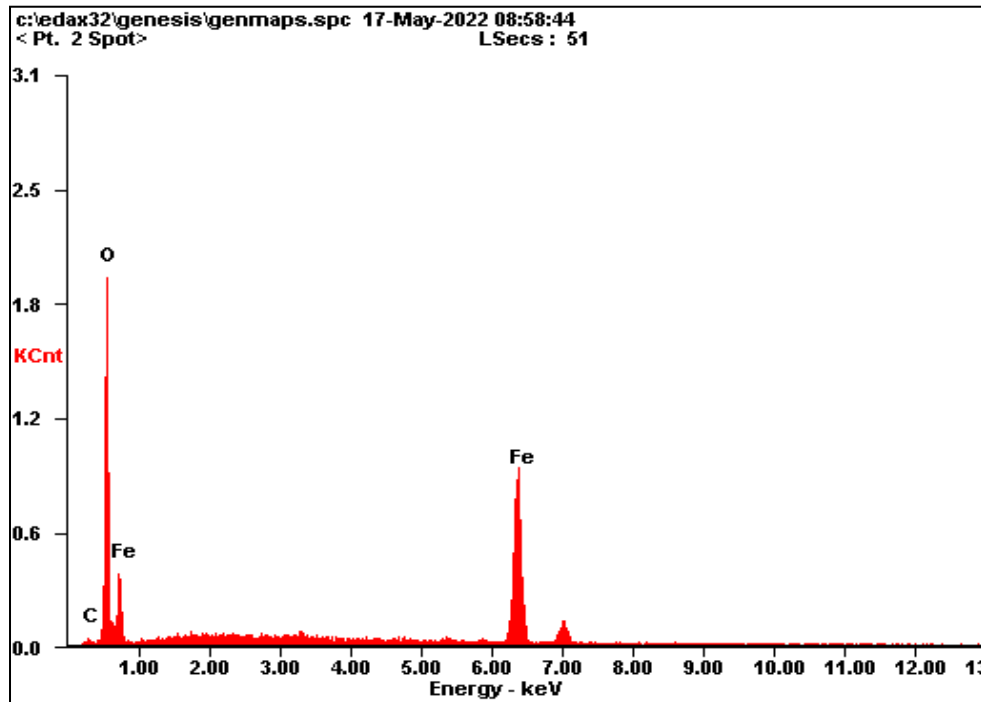


Nota. Foto suministrada por el equipo Quanta FEG 650.

El área analizada en la Ilustración 42 es la indicada por la cruz roja, en esta área se identificó que la probeta se vio atacada electroquímicamente más que la Ilustración 41, se encontró que la composición química en esta área cambio significativamente a la composición química original del acero, este cambio es mostrado en las Ilustraciones 43 y Tabla 4.

Figura 43

Grafica de composición química del acero SAE 5160 después del ataque electroquímico (Corroída).



Nota. Foto suministrada por el equipo Quanta FEG 650.

Tabla 4

Composición química después del ataque electroquímico (Corroída).

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	00.92	02.86
<i>O</i>	18.76	43.63
<i>Fe</i>	80.32	53.51
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. Foto suministrada por el equipo Quanta FEG 650.

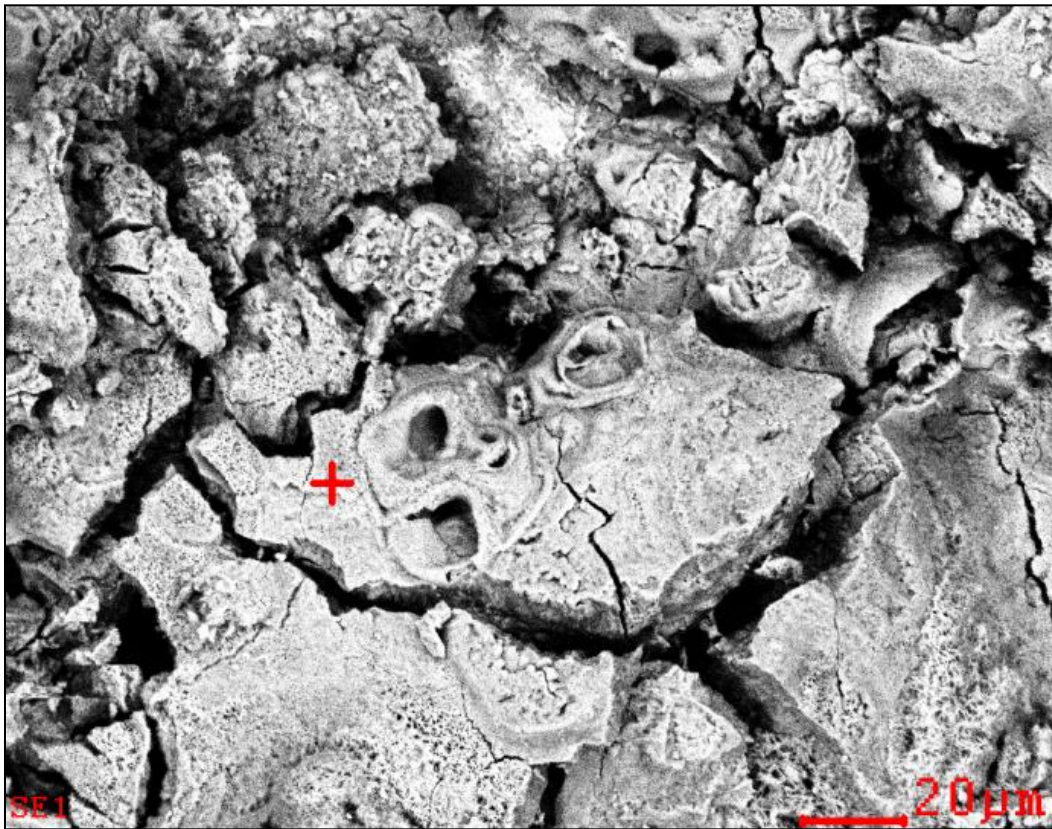
INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

El cambio observado en la composición química del acero SAE 5160 en esta área estudiada, se evidencia que la afectación que tiene el proceso de corrosión en el acero sin granalla no afecta de manera uniforme. El oxígeno se ve en mayores proporciones porcentual en esta área de estudio que en la Ilustración 41, generando mayores óxidos de hierro y un cambio significativo en la morfología del material.

A continuación, vamos a observar la probeta con granallado.

Figura 44

Probeta con granalla vista desde el microscopio.



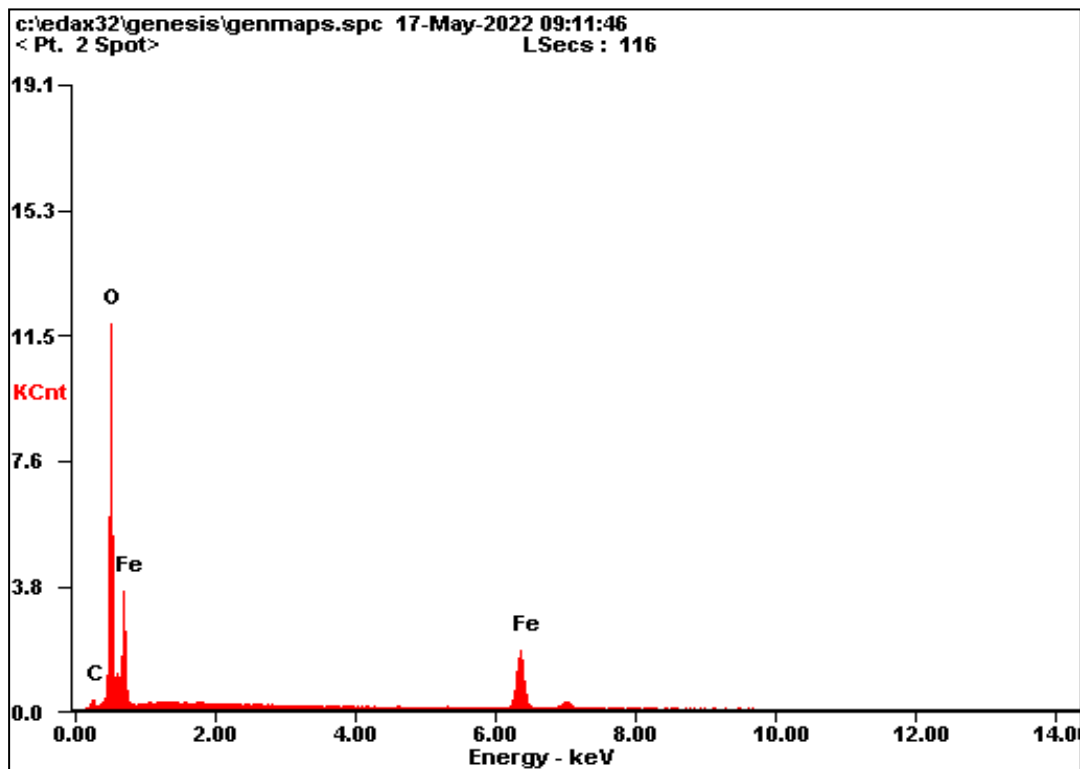
Nota. Foto suministrada por el equipo Quanta FEG 650.

En la Ilustración 44, se puede observar el alto grado de corrosión generado por el ataque electroquímico. La composición química del material tubo grandes cambios con respecto a la composición química original del material y a los cambios observados en la probeta sin granalla Ilustración 42.

Figura 45

Grafica de composición química del acero SAE 5160 después del ataque electroquímico

(Con granalla).



Nota. Foto suministrada por el equipo Quanta FEG 650.

Tabla 5

Composición química después del ataque electroquímico (Con granalla).

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	02.95	06.62
<i>O</i>	38.73	65.24
<i>Fe</i>	58.31	28.14
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. Foto suministrada por el equipo Quanta FEG 650.

Como se puede observar en las Ilustraciones 45 y Tabla 5, el aumento de óxidos ferrosos presentes en la probeta es bastante grande, esto se debe al tratamiento superficial que se le realizó (granallado), el cual hace que una de sus propiedades mecánicas se aumente, generando un cambio que hace que el acero se corroa con mucha más facilidad.

6. Conclusiones

- Mediante la realización de las pruebas de indentación, realizadas con el equipo UMT BRUKER en las probetas de acero SAE 5160, aplicando en ellas una fuerza de 5 Newton con un tiempo de indentación de 15 segundos. Se pudo concluir que la probeta con mayor resistencia a ser deformada por el indentador fue la probeta con proceso de granallado.
- Mediante la realización de la prueba electroquímica se expusieron las dos probetas a la misma sustancia acuosa, se llevó a cabo mediante los parámetros y gráficas de Tafel, y se concluye que la probeta que se vió mayormente afectada por este ensayo fue la probeta de acero SAE 5160 bajo el proceso de granallado. Esto debido a rugosidad de la superficie después del tratamiento superficial, permitiendo que se alojen en los intersticios mayor agentes corrosivos, acelerando una mayor propagación de los óxidos de hierro.
- Los resultados obtenidos de esta prueba de laboratorio se evidenciaron mayores afectaciones por corrosión en la probeta de acero SAE 5160 con granalla, esto se evidencia en los grandes cráteres generados después del ensayo electroquímico y los cambios drásticos en la morfología del material, el granallado aumenta la tenacidad del acero, pero lo hace más frágil a procesos químicos como lo es el proceso de corrosión, generado por diferentes factores.

- Se logró caracterizar el nivel de corrosión, mediante gráficas y tablas de composición química determinadas en las pruebas de microscopia. En estas tablas se pueden evidenciar los porcentajes de los componentes químicos que se encontraron después del proceso electroquímico al cual fueron expuestas las dos probetas, para realizar esta caracterización escogimos la probeta que se vio mayormente afectada por el proceso electroquímico (probeta de acero SAE 5160 con granallado).

En esta probeta se encontraron mayores porcentajes de oxígeno, esto generado gracias a las deformaciones superficiales del proceso de granallado, ya que al realizar dicho proceso se genera una deformación plástica en la superficie del material ocasionando intersticios en los cuales se alojan los agentes corrosivos de la solución acuosa a la que fue expuesta esta probeta.

7. Recomendaciones.

Con el objetivo de mejorar los resultados de la caracterización se propone realizar las siguientes pruebas de laboratorio.

XPS, SEM TRASNVERSAL, esto con el fin de determinar la altura de la capa de corrosión y otros factores que nos aproximarían a una mejor caracterización del proceso de corrosión en este tipo de acero.

Referencias Bibliográficas.

- Ashok, D., Mallikarjun, M., & Mamilla, V. (2012). Design and structural analysis of composite multi leaf spring. *International Journal of Emerging trends in Engineering and Development*, 5(2), 30-37.
- Bauer, W. (2011). *Hydropneumatic suspension systems*. Alemania: Springer.
- Calvo, J., & Miravete de Marco, A. (1997). *Mecánica del automovil*. Barcelona, España: Editorial Reverte.
- Chacon, H. V. (2009). *Diseño de una suspension para un vehiculo automovil basada en amortiguadores magneticos*. Madrid: Universidad Carlos III .
- Dighe, A. D. (2016). A review on testing of steel leaf spring. *International research journal of engineering and technology*, 3, 492-496.
- Fayyad, A., & Suleiman, E. (2013). Electromagnetic Suspension System: Circuit and simulation. *International Journal of Modelling and Optimization*, 3, 440-444.
- Fosca, C., Merino, C., & Otero, E. (1996). La celda Avesta: un método para evitar problemas de corrosión por resquicios en los ensayos electroquímicos de corrosión por picaduras. *Revista de metalurgia*, 32(3), 151–159.
- García, J., López, A., & Galeano, J. P. (2017). *Caracterización y análisis fractográfico mediante las técnicas SEM y DRX en acero SAE 5160, tratado térmicamente mediante temple y revenidos a diferentes temperaturas*. Bogotá: UNIVERSIDAD LIBRE.
- Iberisa SA. (2001). *Introduccion al analisis de fatiga o durabilidad*. Recuperado el 27 de Dic de 2021, de <http://www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm>

- Jaramillo, H., de Sánchez, N., & Avila, J. (2019). Effect Of The Shot Peening Process On The Fatigue Strength Of Sae 5160 Steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(12), 4328-4335.
- Lafoy, G., Bergon, J., K., A., Kling, R., & Palin-Luc, T. (2020). Scaling Laser Shock Peening Process Towards High Repetition Rates: A Demonstration On Industrial Grade Al2024-T351. *Proceedings Volume 11273, High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems IX*; San Francisco, CA: High-Power Laser Mater.
- Mantilla Nova, D. (2014). *Diseño óptimo de resortes tipo ballesta para la suspension de un vehiculo comercial considerando las condiciones dinamicas*. Bogota: UNAL.
- Mong, D., Sang Yong, H., & Oh, C.-Y. (2006). A flexible multi-body dynamic model for analyzing the hysteretic characteristics and the dynamic stress of a taper leaf spring. *Journal Of Mechanical Science and Technology*, 20, 1638–1645.
- O'hara, P. (1990). Controlled Shot Peening To Prevent Fatigue And Stress Corrosion Cracking. *The International Journal of Surface Engineering and Coatings*, 68(3), 87-91.
- Ortiz, F. F. (2010). *Estudio de la resistencia de fatiga del acero sae 5160 antes y después de proceso shot peening*. Cali: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE.
- Romero, F., Pertuz, A., & Diaz, J. (2021). Fatigue Study on AISI/SAE 1015 Steel with Shot Peening Under Corrosive Environments. *Journal of Physics CS*, 1938, 12005.
- S. Nasrazadani, J. D. (2007). Effects of DBU, morpholine, and DMA on corrosion of low carbon steel exposed to steam. *Corrosion Science*, 3024-3039. Recuperado el 07 de 09 de 2022, de <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.01.012>

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

SAE Spring committee. (1996). *Spring Design manual*. Detroit: Society of automotive engineers.

Sail, T. (2011). *Project profile on auto leaf springs*. New Delhi.

Salazar, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Tecnología en marcha*, 28(3), 127-137.

Sánchez, C. (2018). Partes automotrices y sus procesos de fabricación: resortes de ballesta. *Desarrollo tecnologico e innovacion empresarial*, 7(1), 3-8.

Ugaz-Lock, A., & Tang, I. D. (1988). Principios de las técnicas electroquímicas en estudios de procesos de corrosión. *Revista de química PUCP*, 2(1), 23-31.

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

Apéndices.

Apéndice A. Datos de profundidad de muestra con granallado.

Las siguientes tablas están relacionadas con el ensayo de indentación realizados a la probeta con granallado, en estas tablas se observan los datos hallados durante la realización del ensayo, con estos datos se realizaron las curvas que se puede observar en la Ilustración 44.

- Datos línea 1, a 0,098 mm de profundidad del borde CON GRANALLA.

									F kgf	
									0,509858	
N° Identacion	Desplazamiento en Y	Desplazamiento en X	Diagonal 1	Diagonal 2	Promedio	Ajuste de valor μm	D	Vickers		
1	0,162	0,098	20,39	20,46	20,425	37,479875	1404,74103	673,0640417		
2	0,662	0,098	20,48	18,67	19,575	35,920125	1290,25538	732,7856871		
3	1,162	0,098	18,84	18,32	18,58	34,0943	1162,421292	813,3717795		
4	1,662	0,098	18,54	19,1	18,82	34,5347	1192,645504	792,7591828		
5	2,162	0,098	19,32	19,06	19,19	35,21365	1240,001146	762,4837106		
6	2,662	0,098	18,91	18,32	18,615	34,158525	1166,80483	810,3160449		
7	3,162	0,098	18,17	18,36	18,265	33,516275	1123,34069	841,6686796		
8	3,662	0,098	18,01	19,51	18,76	34,4246	1185,053085	797,8382463		
9	4,162	0,098	19,21	19,1	19,155	35,149425	1235,482078	765,2726755		
10	4,662	0,098	18,5	19,1	18,8	34,498	1190,112004	794,4468017		
11	5,162	0,098	20,06	20,04	20,05	36,79175	1353,632868	698,4764462		
12	5,662	0,098	18,87	20,25	19,56	35,8926	1288,278735	733,9100225		
13	6,162	0,098	18,54	19,3	18,92	34,7182	1205,353411	784,4012108		
14	6,662	0,098	19,16	18,89	19,025	34,910875	1218,769193	775,7667985		
15	7,162	0,098	18,3	19,26	18,78	34,4613	1187,581198	796,1398151		
16	7,662	0,098	18,47	18,36	18,415	33,791525	1141,867162	828,0128432		
17	8,162	0,098	18,7	19,77	19,235	35,296225	1245,823499	758,9202449		
18	8,662	0,098	18,06	18,93	18,495	33,938325	1151,809904	820,8652071		
19	9,162	0,098	18,62	19,1	18,86	34,6081	1197,720586	789,4000375		
20	9,662	0,098	18,67	18,4	18,535	34,011725	1156,797437	817,3260457		
21	10,162	0,098	17,96	18,49	18,225	33,442875	1118,425888	845,3673016		
22	10,662	0,098	18,8	19,43	19,115	35,076025	1230,32753	768,4788419		

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

Las siguientes tablas están relacionadas con el ensayo de indentación realizados a la probeta sin granalla, en estas tablas se observan los datos hallados durante la realización del ensayo, con estos datos se realizaron las curvas que se puede observar en la Ilustración 45.

- Datos línea 1, a 0,146 mm de profundidad del borde SIN GRANALLA.

F kgf									
0,509858									
N° Identacion	Desplazamiento en Y	Desplazamiento en X	Diagonal 1	Diagonal 2	Promedio	Ajuste de valor μm	D	Vickers	
1	0,118	0,146	26,54	29,1	27,82	51,0497	2606,07187	362,7991561	
2	0,618	0,146	25,7	27,51	26,605	48,820175	2383,409487	396,692503	
3	1,118	0,146	25,57	27,56	26,565	48,746775	2376,248073	397,8880345	
4	1,618	0,146	26,54	27,03	26,785	49,150475	2415,769193	391,3787286	
5	2,118	0,146	26,15	25,16	25,655	47,076925	2216,236867	426,6153537	
6	2,618	0,146	26,19	26,4	26,295	48,251325	2328,190364	406,1011031	
7	3,118	0,146	26,77	25,33	26,05	47,80175	2285,007303	413,7757783	
8	3,618	0,146	25,5	23,2	24,35	44,68225	1996,503465	473,5682616	
9	4,118	0,146	25,35	26,29	25,82	47,3797	2244,835972	421,1802942	
10	4,618	0,146	25,86	25,56	25,71	47,17785	2225,749531	424,7920362	
11	5,118	0,146	24,84	24,68	24,76	45,4346	2064,302877	458,0145121	
12	5,618	0,146	26,85	25,08	25,965	47,645775	2270,119875	416,4893165	
13	6,118	0,146	25,46	24,64	25,05	45,96675	2112,942106	447,4711696	
14	6,618	0,146	23,56	23,93	23,745	43,572075	1898,52572	498,0078307	
15	7,118	0,146	24,26	24,94	24,6	45,141	2037,709881	463,9917998	
16	7,618	0,146	24,82	26,08	25,45	46,70075	2180,960051	433,5158156	
17	8,118	0,146	26	26,69	26,345	48,343075	2337,0529	404,5610927	
18	8,618	0,146	25,43	25,19	25,31	46,44385	2157,031203	438,3249876	
19	9,118	0,146	23,37	25,35	24,36	44,7006	1998,14364	473,1795333	
20	9,618	0,146	27,61	24,43	26,02	47,7467	2279,747361	414,7304616	
21	10,118	0,146	24,22	26,66	25,44	46,6824	2179,24647	433,8566969	
22	10,618	0,146	25,67	25,07	25,37	46,55395	2167,270261	436,2541638	

INFLUENCIA DE LA CORROSION EN EL ACERO SAE 5160

- Datos línea 2, a 0.246 mm de profundidad del borde SIN GRANALLA.

				F kgf					
				0,509858					
N° Identacion	Desplazamiento en Y	Desplazamiento en X	Diagonal 1	Diagonal 2	Promedio	Ajuste de valor μm	D	Vickers	
1	0,118	0,246	29,19	25,45	27,32	50,1322	2513,237477	376,200293	
2	0,618	0,246	25,17	27,22	26,195	48,067825	2310,5158	409,207622	
3	1,118	0,246	24,98	26,87	25,925	47,572375	2263,130863	417,775521	
4	1,618	0,246	25,8	26,82	26,31	48,27885	2330,847357	405,638178	
5	2,118	0,246	25,49	26,25	25,87	47,47145	2253,538565	419,553803	
6	2,618	0,246	24,9	26,78	25,84	47,4164	2248,314989	420,528565	
7	3,118	0,246	23,9	26,13	25,015	45,902525	2107,041801	448,724214	
8	3,618	0,246	26,01	25,77	25,89	47,50815	2257,024316	418,905844	
9	4,118	0,246	26,1	26,3	26,2	48,077	2311,397929	409,05145	
10	4,618	0,246	24,45	25,2	24,825	45,553875	2075,155528	455,619187	
11	5,118	0,246	24,82	24,48	24,65	45,23275	2046,001673	462,111389	
12	5,618	0,246	24,56	23,6	24,08	44,1868	1952,473294	484,247686	
13	6,118	0,246	26,33	27,08	26,705	49,003675	2401,360164	393,727142	
14	6,618	0,246	23,84	24,17	24,005	44,049175	1940,329818	487,278331	
15	7,118	0,246	26,04	26,33	26,185	48,049475	2308,752048	409,520232	
16	7,618	0,246	24,98	26,56	25,77	47,28795	2236,150215	422,816262	
17	8,118	0,246	24,86	25,21	25,035	45,939225	2110,412394	448,007545	
18	8,618	0,246	25,89	25,65	25,77	47,28795	2236,150215	422,816262	
19	9,118	0,246	25,01	26,08	25,545	46,875075	2197,272656	430,297384	
20	9,618	0,246	24,61	25,35	24,98	45,8383	2101,149747	449,982528	
21	10,118	0,246	26,24	25,13	25,685	47,131975	2221,423067	425,619365	
22	10,618	0,246	25,82	27,35	26,585	48,783475	2379,827433	397,289594	

- Datos línea 3, a 0,346 mm de profundidad del borde SIN GRANALLA.

				F kgf					
				0,509858					
N° Identacion	Desplazamiento en Y	Desplazamiento en X	Diagonal 1	Diagonal 2	Promedio	Ajuste de valor μm	D	Vickers	
1	0,118	0,346	26,17	25,05	25,61	46,99435	2208,468932	428,1159049	
2	0,618	0,346	25,26	23,5	24,38	44,7373	2001,426011	472,4035112	
3	1,118	0,346	24,84	24,42	24,63	45,19605	2042,682936	462,8621793	
4	1,618	0,346	27,5	25,2	26,35	48,35225	2337,94008	404,4075737	
5	2,118	0,346	23,81	26,74	25,275	46,379625	2151,069615	439,5397846	
6	2,618	0,346	24,05	26,29	25,17	46,18695	2133,23435	443,2146309	
7	3,118	0,346	23,81	26,77	25,29	46,40715	2153,623571	439,0185397	
8	3,618	0,346	25,87	28,38	27,125	49,774375	2477,488407	381,6286981	
9	4,118	0,346	25,34	26,32	25,83	47,39805	2246,575144	420,8542402	
10	4,618	0,346	25,82	27,49	26,655	48,911925	2392,376407	395,2056509	
11	5,118	0,346	25,88	26,08	25,98	47,6733	2272,743533	416,0085208	
12	5,618	0,346	25,67	24,54	25,105	46,067675	2122,23068	445,5126788	
13	6,118	0,346	25,67	23,53	24,6	45,141	2037,709881	463,9917998	
14	6,618	0,346	25,77	26,66	26,215	48,104525	2314,045325	408,5834728	
15	7,118	0,346	27,61	25,2	26,405	48,453175	2347,710168	402,7246158	
16	7,618	0,346	25,24	25,43	25,335	46,489725	2161,294531	437,4603562	
17	8,118	0,346	25,13	26,77	25,95	47,61825	2267,497733	416,9709462	
18	8,618	0,346	25,24	24,55	24,895	45,682325	2086,874817	453,0605609	
19	9,118	0,346	25,67	24,68	25,175	46,196125	2134,081965	443,0385949	
20	9,618	0,346	25,52	24,34	24,93	45,74655	2092,746837	451,7893223	
21	10,118	0,346	26,54	25,59	26,065	47,829275	2287,639547	413,2996723	
22	10,618	0,346	25,87	24,61	25,24	46,3154	2145,116277	440,7596387	