

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MECANICA APLICADA



“Caracterización de fallas en un acero AISI-  
SAE 4140 templado y revenido, soldado y con  
recubrimiento de cromo utilizado en la  
fabricación de rotores de bombas de cavidades  
progresivas.”

**PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL**

**Autor: Kovich R. Adrián.**

**Director Académico: Zalazar Mónica.**

**Co-Director Académico: Codega Darío.**

**CARRERA: INGENIERIA MECANICA**

**Neuquén, Año 2018.**

## **RESUMEN.**

Los aceros son materiales universalmente utilizados para la construcción de máquinas, herramientas y estructuras. Las bombas de cavidades progresivas PCP, utilizadas en la industria del petróleo y gas, están construidas por un estator de elastómero con carcasa y rotor de acero. El acero utilizado en la fabricación de rotores es un AISI-SAE 4140 templado y revenido, soldado con aporte inoxidable AWS E 312-16 y con recubrimiento de cromo duro en toda la superficie.

Las fallas del mismo de forma prematura por fractura, desgaste y corrosión localizada, durante su operación en la extracción de petróleo y gas en la región, fueron los puntapiés para la realización de este trabajo.

La fractura del acero AISI-SAE 4140, desde el punto de vista metalúrgico, indica que el mismo no presenta uniformidad en la composición química por la presencia de zonas segregadas que generan, en el material, la presencia de diferentes microestructuras que le imparten al rotor un comportamiento mecánico fuera de especificación. Además, la unión por soldadura de este acero incrementa la posibilidad de falla por ser un material con riesgo a fisuración en frío si no se realiza un pre calentamiento y un tratamiento térmico post soldadura sumado a un aporte no compatible. El cromado debe presentar buena terminación, adherencia, espesor suficiente y ausencia de defectos para que los fluidos corrosivos no lleguen al acero y produzcan corrosión acelerada. Por último, la incorrecta selección del elastómero del estator aumenta la probabilidad de falla del rotor.

La caracterización por técnicas metalográficas, microscopía óptica, electrónica de barrido SEM con detector EDS, ensayos de microdureza y de tracción permiten dilucidar las causas que provocaron las fallas.

La metalurgia a través de los tratamientos térmicos de homogeneizado, aplicados al acero; la utilización de un procedimiento de especificación de soldadura bajo el código ASME IX y la propuesta de un recubrimiento bicapa de Cu-Cr como la correcta selección del elastómero, comercialmente disponible, disminuirán el riesgo de falla.

## **PALABRAS CLAVES**

Rotor de PCP; AISI-SAE 4140; Tratamientos Térmicos; Cromado duro; EPS.

## **ABSTRACT**

Steels materials are universally used for machines, tools and structures construction. PCP progressive cavity pumps, which are used in the oil and gas industry, are built from an elastomer stator with steel housing and rotor. The steel used in the manufacture of rotors is a hardened and tempered AISI-SAE 4140, which is welded with stainless steel AWS E 312-16 and it is also covered with hard chrome over the entire surface.

Its premature failures due to fracture, wear and localized corrosion, during its operation in the extraction of oil and gas in the region, were the kicks to the development of this investigation.

The AISI-SAE 4140 steel fracture, from the metallurgical point of view, indicates that it does not present uniformity in the chemical composition due to the presence of segregated zones that generate, in the material, the presence of different micro-structures which impart to the rotor a mechanical behavior out of specification. In addition, the welding connection of this steel increases the possibility of failure because it is a material with risk of cold cracking if a pre-heating and a post-welding thermal treatment added to a non-compatible contribution is not carried out. The chrome plating must have good finish, adhesion, sufficient thickness and absence of defects so that the corrosive fluids do not reach the steel and produce accelerated corrosion. Finally, incorrect selection of the stator elastomer increases the probability of rotor failure.

The characterization by metallographic techniques, optical microscopy, scanning electron SEM with EDS detector, microhardness and traction tests, allow us to elucidate the causes of the failures.

The metallurgy through thermal treatments of homogenized, applied to steel; the use of a welding specification procedure under the ASME IX code and the proposal of a double-layer coating of Cu-Cr as the correct selection of the elastomer, commercially available, will reduce the risk of failure.

## **KEY WORDS**

Rotor PCP; AISI-SAE 4140; Heat Treatments; Hard Chrome; EPS.

*A mis Padres Estela y Roberto.*  
*A mis Hermanos Emanuel, Eugenia y Sebastián.*

## **AGRADECIMIENTOS.**

- A mi familia; por todo el esfuerzo realizado y el apoyo que en todo momento me brindaron para poder culminar esta etapa.
- A Guillermo Martin, Darío Codega y Federico por su ayuda técnica y predisposición en la realización de las tareas de este trabajo en el laboratorio.
- A Mónica Zalazar; por su ayuda, generosidad y paciencia a lo largo de todo este trabajo.

## **INDICE**

<b>CAPITULO I</b> .....	1
<b>Introducción</b> .....	1
<b>CAPITULO II</b> .....	2
Revisión de la Literatura. ....	2
2.1    Bombas PCP.....	2
2.1.1    Descripción de las Bombas de Cavidades Progresivas PCP.....	2
2.1.2    Componentes de un sistema de bombeo PCP, para la producción de petróleo y gas.    4	
2.1.3    Geometría de una bomba PCP mono-lobular.....	4
2.1.4    Principio de funcionamiento de una bomba PCP mono-lobular.....	6
2.2    Condiciones ambientales donde trabaja la bomba PCP. ....	7
2.3    Materiales empleados en la construcción de las bombas PCP.....	8
2.3.1    Acero utilizado en la construcción de los rotores de bomba PCP.....	8
2.3.2    Acero AISI-SAE 4140. ....	11
2.3.3    Soldadura del acero AISI-SAE 4140 .....	11
2.3.4    Recubrimiento superficial: Cromado Electrolítico. ....	13
2.3.5    Elastómeros utilizados en el estator de las bombas PCP. ....	14
2.4    Tratamientos térmicos. ....	16
2.4.1    Tratamiento térmico de Homogeneizado. ....	17
2.4.2    Tratamiento térmico de Temple y Revenido.....	17
2.4.3    Tratamiento térmico de Normalizado. ....	19
2.5    Proceso de Fabricación del Rotor de una Bomba PCP. ....	19

CAPITULO III.....	21
Materiales y Técnicas Experimentales.....	21
3  Materiales analizados.....	21
3.1  Desarrollo del trabajo.....	22
3.2  Técnicas experimentales utilizadas.....	22
3.2.1  Análisis químico.....	22
3.2.2  Preparación metalográfica de las muestras.....	23
3.2.3  Microscopía óptica.....	23
3.2.4  Microscopía electrónica de barrido.....	24
3.2.5  Barridos de microdureza.....	24
3.3  Realización de tratamientos térmicos.....	25
3.3.1  Tratamiento térmico de homogeneizado.....	25
3.3.2  Tratamiento térmico de temple y revenido.....	26
3.3.3  Tratamiento Térmico de Normalizado.....	27
3.4  Realización de los ensayos de tracción.....	27
CAPÍTULO IV.....	30
4  Resultados y Análisis.....	30
ETAPA 1.....	31
4.1  Rotor R1.....	32
4.1.1  Análisis químico al MB y MS de R1.....	33
4.1.2  Microscopía óptica realizada a las muestras de R1.....	34
4.1.3  Barridos de microdureza realizados a las muestras de R1.....	37
4.2  Rotor R2.....	38
4.2.1  Análisis químico al MB de R2.....	39
4.2.2  Microscopía óptica realizada a las muestras de R2.....	39

4.2.3	Barridos de microdureza realizados a las muestras de R2. ....	42
4.3	Rotor R3. ....	43
4.3.1	Análisis químico al MB de R3. ....	45
4.3.2	Microscopía óptica realizada a las muestras de R3. ....	45
4.3.3	Barridos de microdureza realizados a las muestras de R3. ....	48
4.3.4	Microscopía electrónica de barrido con análisis EDS al MB de R3. ....	48
ETAPA 2.	.....	52
4.4	Realización de tratamientos térmicos al MB AISI-SAE 4140. ....	53
4.5	Homogeneizado H1 realizado a las tres muestras M1, M2, M3. ....	53
4.6	Resultados de la muestra M1. ....	55
4.6.1	Microscopía óptica realizada a M1. ....	55
4.6.2	Análisis EDS realizado a M1. ....	56
4.7	Resultados de la muestra M2. ....	58
4.7.1	Microscopía óptica realizada a M2. ....	59
4.7.2	Barrido de microdureza realizado a M2. ....	60
4.8	Resultados de la muestra M3. ....	60
4.8.1	Microscopía óptica realizada a M3. ....	61
4.8.2	Barrido de microdureza realizado a M3. ....	62
4.8.3	Análisis EDS realizado a M3. ....	63
ETAPA 3.	.....	65
4.9	Realización de los tratamientos térmicos al MB AISI-SAE 4140. ....	66
4.10	Homogeneizado H2 realizado a las muestras M4, M5 y M6. ....	67
4.11	Resultados de la muestra M4. ....	67
4.11.1	Microscopía óptica realizada a M4. ....	67
4.11.2	Análisis EDS realizado a M4. ....	68



4.12	Resultados de la muestra M5. ....	70
4.12.1	Microscopía óptica realizada a M5. ....	70
4.12.2	Barrido de microdureza realizado a M5. ....	71
4.13	Resultados de la muestra M6. ....	72
4.13.1	Microscopía óptica realizada a M6. ....	72
4.13.2	Barrido de microdureza realizado a M6. ....	73
4.14	Comparación entre los barridos de microdureza de las muestras M2 y M5. ....	73
4.15	Comparación entre los barridos de microdureza de las muestras M3 y M6. ....	74
4.16	Comparación de análisis EDS en muestras M1 y M4. ....	76
	ETAPA 4. ....	77
4.17	Ensayo de tracción a probeta de MB en estado original. ....	78
4.18	Ensayo de tracción a probeta de MB tratada térmicamente. ....	80
4.19	Comparación de las curvas tensión-deformación. ....	84
	ETAPA 5. ....	86
4.20	Realización de una Especificación de Procedimiento de Soldadura “EPS (WPS)”. ....	87
	ETAPA 6. ....	89
4.21	Propuesta sobre el recubrimiento superficial de los rotores. ....	90
4.22	Selección del material elastómero del estator. ....	90
5	CAPÍTULO V. ....	92
5.1	Conclusiones. ....	92
5.2	Tareas Futuras. ....	95
	<b>Referencias Bibliográficas.</b> ....	96
6	ANEXO 1: “ESTIMACION DEL TIEMPO DE HOMOGENEIZADO”. ....	98
7	ANEXO 2: “DETERMINACION DE LA TEMPLABILIDAD DEL ACERO”. ....	102
7.1	Medición del tamaño de grano. ....	103

7.2	Relación entre distintas geometrías de secciones.....	104
7.3	Calculo del diámetro crítico ideal “ $D_i$ ” y real “ $D_r$ ”.....	104
7.4	Estimación de la velocidad de enfriamiento. ....	105
8	ANEXO 3: “FORMULA PARA CALCULAR EL TIEMPO DE REVENIDO”.....	108
9	ANEXO 4: “ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA”.....	109
10	ANEXO 6: “SEGUIMIENTO DE POZO CB47”.....	111
11	ANEXO 6: “SELECCIÓN DE LOS ELASTÓMEROS”. ....	112

## **CAPITULO I**

### **Introducción**

Los aceros son los materiales, de producción en grandes escalas, más económicos que se utilizan en todas las industrias del mundo por presentar una gran versatilidad en sus propiedades mecánicas según su composición química, trabajado en frío y tratamientos térmicos que se les pueda realizar.

El acero AISI-SAE 4140 templado y revenido se utiliza en la fabricación de rotores de bombas PCP, por su alta resistencia mecánica. Las bombas PCP están compuestas, además del rotor, por un estator de material elastómero y la carcasa de acero. Son utilizadas en la industria del petróleo y gas para la extracción de la producción que se constituye como una mezcla de fluidos, gases y sólidos.

El rotor, además, presenta una unión de soldadura por arco eléctrico y recubrimiento de cromo duro en toda la superficie. Las fallas prematuras del mismo, registradas en la industria local, provocaron la necesidad de conocer las causas que las generan.

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar las fallas en tres rotores de bomba PCP e implementar bajo procedimientos normalizados las posibles soluciones.

Las tareas consistieron en la aplicación de técnicas de caracterización que involucran la metalografía, microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido con analizador EDS, ensayos de microdureza y de tracción; la realización de tratamientos térmicos al metal base, la elaboración de un procedimiento de soldadura EPS<sup>1</sup>, la propuesta de un recubrimiento duro superador al cromado y la correcta selección del material elastómero, comercialmente disponible, para el estator de la bomba.

---

<sup>1</sup> Especificación de Procedimiento de Soldadura.

## CAPITULO II.

### Revisión de la Literatura.

#### 2.1 Bombas PCP.

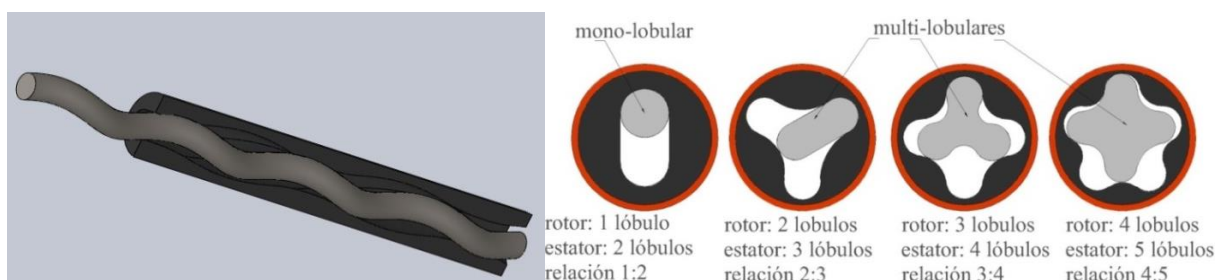
##### 2.1.1 Descripción de las Bombas de Cavidades Progresivas PCP.

Las bombas de cavidades progresivas PCP (Progressing Cavity Pumps) forman parte de un conjunto de sistemas de levantamiento artificial utilizados en la industria del petróleo y gas; también se las utiliza como bombas de superficie en industrias como la alimenticia, química y de medio ambiente dado que su demanda radica en la capacidad bombear fluidos viscosos y mezclas con sólidos y gases, con eficiencias de entre el 50 y 60 % [1].

Estas bombas fueron creadas por el ingeniero francés René Moineau en 1930 y eran ideales para bombear crudos pesados; con lo cual en la década del setenta los rusos comenzaron a probarlas en los yacimientos petrolíferos y en el año 1985 la empresa PCM (fundada por René Moineau) pudo bajar por primera vez una bomba de cavidades progresivas accionada por varillas desde la superficie, en un pozo de la empresa Total, en Francia [2].

La figura 2.1 A muestra los elementos constitutivos de estas bombas, que son dos piezas longitudinales en forma de hélice o helicoides, donde una gira dentro de la otra formando un engranaje helicoidal [1].

Figura 2.1: Elementos longitudinales y distintas secciones de una bomba PCP.

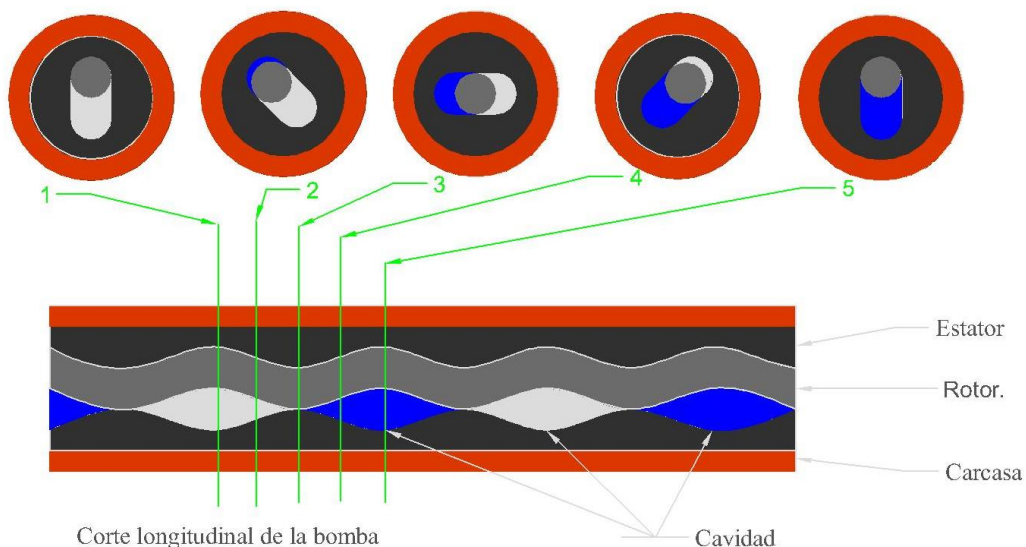


La pieza que gira se denomina rotor y puede variar en su forma al aumentar el número de lóbulos como así también la pieza fija que se denomina estator, definiéndose de esta manera las bombas mono-lobulares o de geometría simple 1:2. La sección del rotor hélice es circular (1 lóbulo) y la del estator presenta el mismo perfil circular pero al ser doble hélice estos perfiles están desplazados 180°. En las multi-lobulares o de geometría múltiple, si el rotor presenta forma de hélice doble (2 lóbulos), triple (3 lóbulos) o cuádruple (4 lóbulos), el estator presenta una sección de geometría triple, cuádruple o quíntuple lobular respectivamente. La figura 2.1 muestra las secciones de diferentes geometrías de bombas PCP, que se construyen en la actualidad.

Se clasifican como bombas volumétricas rotativas y de desplazamiento positivo porque el sistema presenta un movimiento excéntrico del rotor dentro del estator, formando cavidades separadas entre sí que se trasladan con un movimiento combinado de rotación más traslación longitudinal en la dirección del eje del rotor; desplazando el fluido desde la succión hacia la descarga y resultando como su nombre lo indica en un desplazamiento positivo. También, como la energía que el rotor le transmite al fluido es energía de presión estática, estas máquinas se denominan roto-estáticas [3]. La figura 2.2 muestra la sección transversal de una bomba en diferentes puntos donde se observan las cavidades que se forman por la posición del rotor dentro del estator.

Figura 2.2: Cavidades que se forman en una bomba PCP.

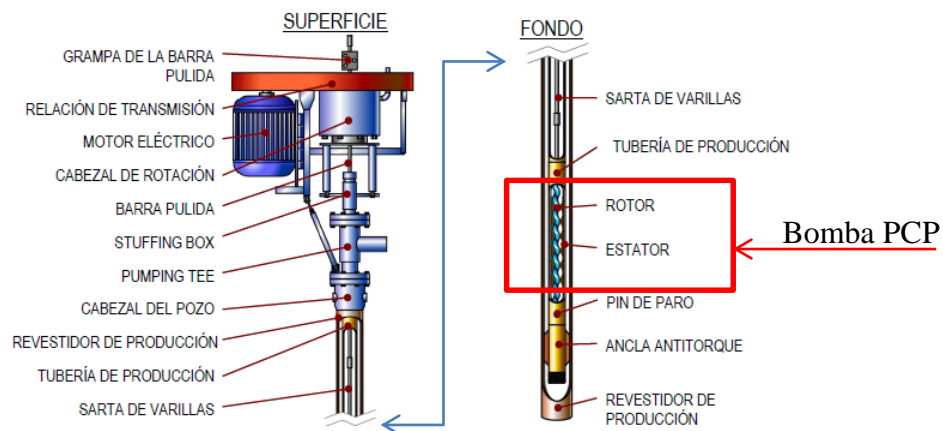
Secciones transversales en diferentes puntos de la bomba.



## 2.1.2 Componentes de un sistema de bombeo PCP, para la producción de petróleo y gas.

El sistema de bombeo PCP se compone de una serie de elementos concatenados desde la superficie hacia el fondo del pozo como se observa en la figura 2.3, necesarios para poder operar la bomba.

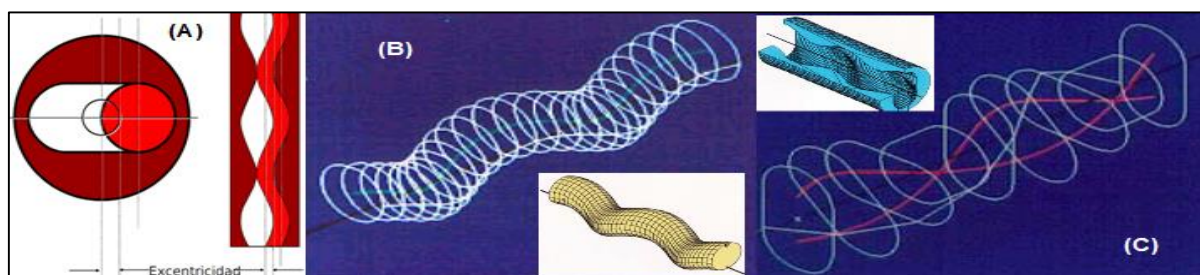
Figura 2.3 [4]: Componentes de un sistema de bombeo PCP tradicional



## 2.1.3 Geometría de una bomba PCP mono-lobular.

La geometría de la bomba PCP está definida por la forma y el ensamble del rotor dentro del estator. En las mono-lobulares o de geometría simple 1:2, el rotor presenta una sección transversal circular cuyo centro no coincide con el eje del mismo generando una excentricidad y una trayectoria helicoidal del centro de la sección a lo largo del eje del rotor. La figura 2.4 A y B muestran esta geometría.

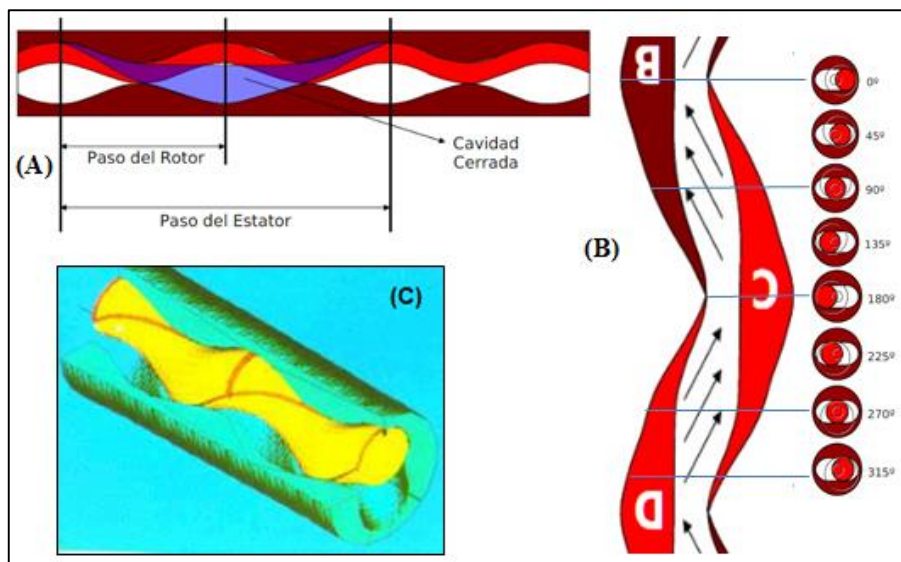
Figura 2.4. A[4], B[5]: Geometría de rotor mono-lobular; C[5]: Geometría del estator.



La figura 2.4 C muestra la geometría del estator que presenta una sección transversal formada por dos semicírculos de diámetro igual al del rotor separados por dos rectas paralelas, formando 2 lóbulos. Los centros de los semicírculos presentan una trayectoria helicoidal a lo largo del eje del estator.

Estas bombas son multi-etapas, donde una etapa se define como una distancia longitudinal igual a un paso del estator. La figura 2.5 A muestra que el paso de la hélice del estator “Ps” es el doble del paso de la hélice del rotor “Pr” y es igual a la longitud de una cavidad generada por el engrane entre ellos.

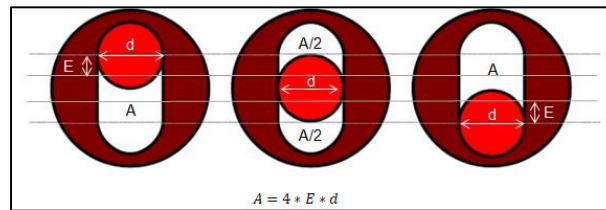
Figura 2.5. A [4]: Paso del rotor, del estator y cavidad generada en una etapa ; B [4]: Cavidades generadas en una etapa; C [5]: líneas de sellos.



Además, la figura 2.5 B muestra que en una etapa de una bomba PCP mono-lobular se generan dos cavidades separadas 180° por dos líneas de sello entre el rotor y el estator; siendo la línea de sello los sucesivos puntos de contacto entre el rotor y el estator definidos por sus formas helicoidales. La figura 2.5 C muestra las líneas de sello generadas, en color rojo, sobre el rotor.

El área transversal de pasaje de fluido “A” que se forma se mantiene constante independientemente de la posición del rotor dentro del estator, y su dimensión está dada por el producto del diámetro del rotor “d”, la excentricidad “E” y un factor 4 como se muestra en la figura 2.6.

Figura 2.6: Área transversal de una cavidad.



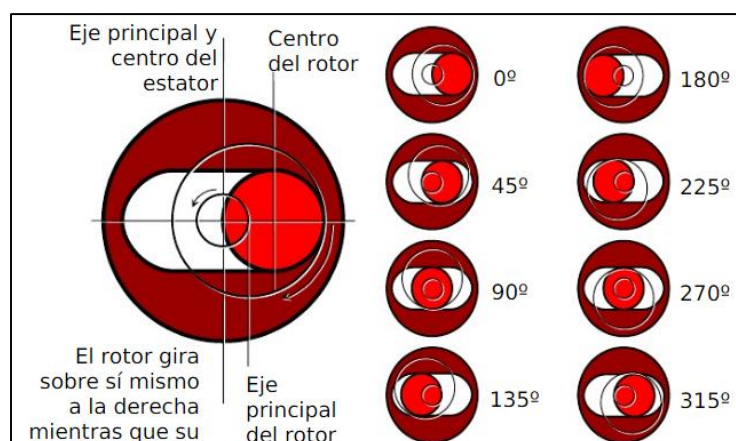
El volumen “V” de fluido desplazado por una bomba de una etapa será igual al producto entre el área transversal de pasaje de fluido “A” (calculada anteriormente, figura 2.6) y el paso del estator “Ps”.

### 2.1.4 Principio de funcionamiento de una bomba PCP mono-lobular.

Para que la bomba pueda generar un efecto de bombeo se necesita como mínimo una etapa, es decir, que la longitud mínima de la bomba sea en este caso igual al paso de la hélice del estator como se expresó en la sección 2.1.3.

El funcionamiento comienza cuando al rotor se le aplica un movimiento de rotación. Debido a su geometría y al acople con el estator, el movimiento del rotor es una combinación entre una rotación alrededor de su eje y otro en sentido contrario alrededor del eje del estator. La figura 2.7 grafica las secuencia del movimiento del rotor.

Figura 2.7 [4]: Secuencia del movimiento del rotor dentro del estator.





El caudal “Q” desplazado por la bomba dependerá del tamaño de la cavidad y de la velocidad de rotación del rotor, ya que se define como el producto entre el volumen “V” y la velocidad de rotación “n”. La siguiente expresión muestra esto.

$$Q = V * n$$

Además como el volumen generado por la bomba es constante, por ser el producto de dos constantes como el área de paso del fluido “A” y el paso del estator “Ps”, el flujo de fluido es constante sin pulsaciones si la velocidad de rotación permanece constante.

Por otro lado, la necesidad de desplazar el fluido desde el fondo del pozo hacia la superficie requiere que las cavidades que se forman entre el rotor y estator deben estar selladas correctamente para lograr que la carga fluya desde la succión hacia la descarga soportando las presiones generadas y evitando el escurrimiento del fluido entre las mismas. Para lograr esto se necesita cierta interferencia en el contacto entre el rotor y estator, o línea de sello, que dependerá del diámetro del rotor y del hinchamiento químico y térmico del elastómero [4].

## **2.2 Condiciones ambientales donde trabaja la bomba PCP.**

El ambiente en las formaciones donde se encuentra el petróleo y el gas es corrosivo debido a la presencia de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), polisulfuros, ácidos orgánicos y sulfuro elemental; Además de temperaturas y presiones extremas.

En pozos de gas con una profundidad de 6000 m, la temperatura alcanza los 230 °C y las presiones parciales de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S llegan a los 20,7 MPa y 40,8 MPa respectivamente. Estas formaciones se encuentran libres de oxígeno (O<sub>2</sub>) hasta que las mismas comienzan a ser perforadas y acondicionadas para la producción, ya que se introduce a través de los fluidos de operación (contaminados con O<sub>2</sub>) durante la perforación y el mantenimiento de los pozos. Así también, durante la recuperación secundaria se inyecta agua y CO<sub>2</sub> en conjunto con ácido clorhídrico para ayudar a permeabilizar la formación.

El oxígeno es un fuerte oxidante incluso con bajas concentraciones y su velocidad de reducción sobre un metal es alta. Esto, sumado a la baja solubilidad en agua y en salmueras, tiende a producir condiciones en las que el transporte de masa del oxígeno es lo que limita la

velocidad de corrosión en los aceros en ambientes no ácidos, teniendo en cuenta que estos últimos poseen un potencial de corrosión alto (1.3 V) [6].

El ácido sulfhídrico cuando se encuentra disuelto en agua es un ácido débil y corrosivo ya que es una fuente de iones de hidrógeno; el pH medido puede llegar a valer tres (3), soluciones muy ácidas, si la presión existente alcanza valores a los encontrados en la formación. También actúa como catalizador para que el acero absorba el hidrógeno atómico producido en la reducción de los iones de hidrógeno provocando, en los aceros de alta resistencia, riesgo a fisuración por hidrógeno.

El dióxido de carbono también es un gas débilmente ácido que si se encuentra disuelto en agua es muy corrosivo, alcanzando tasas de corrosión muy altas, de cientos de milímetros por año.

## **2.3 Materiales empleados en la construcción de las bombas PCP.**

### **2.3.1 Acero utilizado en la construcción de los rotores de bomba PCP.**

Los aceros son aleaciones de hierro (Fe) y carbono (C) o soluciones solidas de hierro y carbono. Contienen hasta un 2% en peso de carbono y si están aleados pueden contener hasta un 5 % de otros elementos de aleación en los aceros de baja aleación y más del 5 % para los aceros de alta aleación [7].

Constituyen los materiales metálicos más usados, porque fabricarlos en grandes cantidades es económico y proveen un amplio rango de propiedades mecánicas, desde moderadas tensiones de fluencia de 300 MPa, hasta tensiones de fluencia muy altas que superan los 1400 MPa [8]. Esta amplia variedad en las propiedades se logra dependiendo de la composición química y de la microestructura presente, que a su vez depende de los tratamientos térmicos que se le pueda realizar.

Los aceros pueden presentar distintas fases a determinadas temperaturas que están definidas por una estructura cristalina. Su arreglo dentro de los granos depende de la microestructura presente en el material que define las propiedades mecánicas y físicas. A su vez la microestructura se puede alterar por los tratamientos térmicos y mecánicos aplicados al material. La siguiente figura 2.8 muestra el diagrama de fases en equilibrio de la aleación

hierro carbono, donde se presentan las fases que pueden encontrarse en el equilibrio para varias combinaciones de porcentajes de carbono y de temperatura.

Para los aceros aleados, el diagrama de la figura 2.8 se modifica. La posición de las curvas  $A_1$ ,  $A_3$  y  $A_{cm}$  y la composición del punto eutectoide cambian. La figura 2.9 presenta un diagrama introducido por Bian [7], que muestra la variación de  $A_1$  y el porcentaje de carbono del punto eutectoide con la presencia de los elementos de aleación como molibdeno (Mo), silicio (Si), cromo (Cr) y manganeso (Mn), entre otros, a distintos porcentajes.

Figura 2.8: Diagrama de fases en equilibrio de la aleación Fe-C.

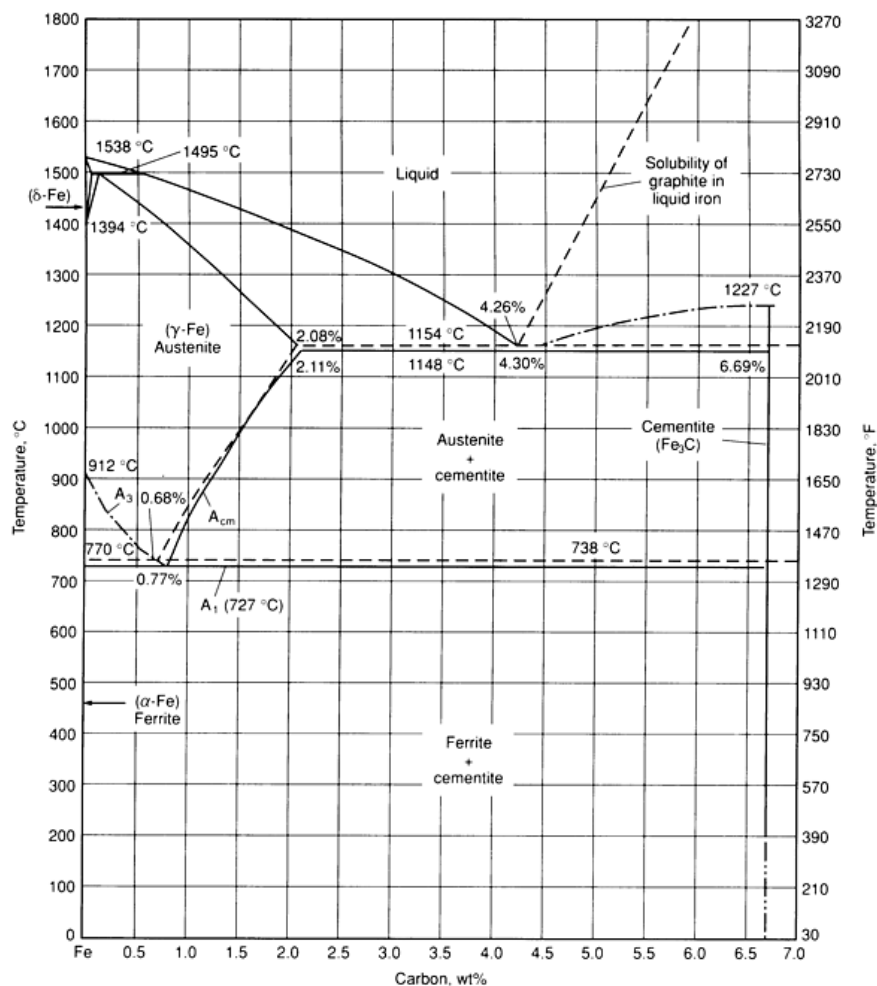
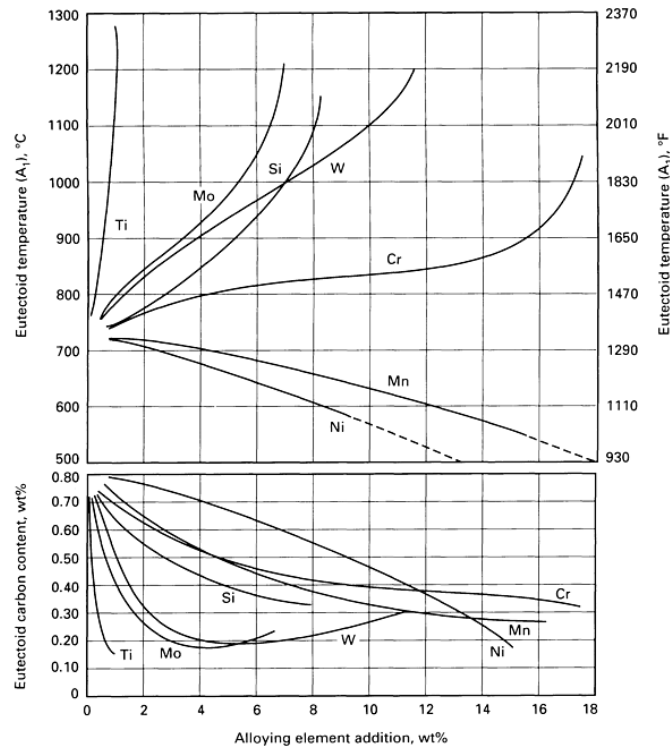


Figura 2.9: Diagrama de Bian, que muestra la variación del porcentaje del carbono y la temperatura del eutéctico en función del porcentaje de agregado de elementos de aleación a la solución Fe-C.



Se observa que al introducir a una aleación Fe-C un porcentaje determinado de Mo, Mn, Cr, Ni, Ti, W y Si, los cuales aparecen en la figura 2.9, se disminuye el porcentaje de carbono del punto eutectoide. También que los elementos estabilizadores de la austenita como el manganeso y el níquel, disminuyen la temperatura del punto eutectoide y corren la curva A<sub>1</sub> hacia abajo en el diagrama de Fe-C de la figura 2.8; por otra parte los elementos estabilizadores de la ferrita como el cromo y molibdeno aumentan la temperatura del eutectoide y el porcentaje de carbono del mismo.

Muchos de los fenómenos que modifican las propiedades mecánicas en las aleaciones se generan en los bordes de grano, donde los arreglos atómicos son irregulares debido a defectos como vacancias y dislocaciones que ayudan al movimiento de los átomos con mayor facilidad que dentro del grano. De esta manera los átomos se segregan en los bordes de grano, generando fases no deseables, afectando en detrimento las propiedades mecánicas al reducir la ductilidad y aumentar la susceptibilidad a la fisuración durante un tratamiento térmico o proceso de soldadura [8].

### 2.3.2 Acero AISI-SAE 4140.

Este acero de alta resistencia tratable térmicamente, cuya composición química se presenta en la tabla 2.1, se utiliza en aplicaciones que requieren una combinación de endurecimiento moderado, buena resistencia y buena tenacidad. Por esto se fabrican bielas, cigüeñales, trépanos de perforación y partes de bombas entre otros. Su resistencia a la tracción puede llegar hasta los 1650 MPa luego de templado y revenido; puede utilizarse a temperatura de hasta 480 °C por arriba de la cual su resistencia disminuye rápidamente con el aumento de la temperatura y es propenso a fragilización por hidrógeno que puede generarse por decapado ácido o electrodeposición de cromo [8].

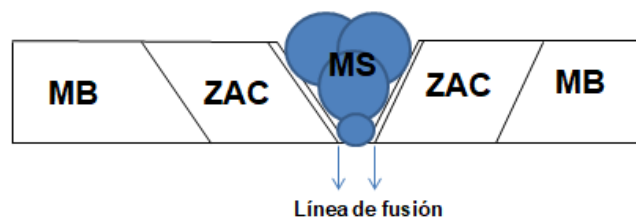
Acero	Composición Química (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Ti
AISI- SAE 4140	0.38- 0.43	0.75- 1.00	0.035	0.040	0.15- 0.35	0.80- 1.10	0.15- 0.25	.....	.....	.....	.....

Tabla 2.1 [8]: Rangos en composición química del acero AISI-SAE 4140.

### 2.3.3 Soldadura del acero AISI-SAE 4140

Al soldar un acero se definen tres zonas microestructurales que se observan en la figura 2.10: metal base (MB), metal de soldadura (MS) y zona afectada por calor (ZAC).

Figura 2.10: Zonas generadas en el metal por un proceso de soldadura.



El MB es el acero a soldar que no está afectado por el calor generado durante el proceso de soldadura y el MS es el material que resulta de la fusión entre el metal de aporte y el metal base durante el proceso. La ZAC es la zona del metal base que se afectó térmicamente durante

el proceso y la que puede presentar modificaciones microestructurales debido al aporte térmico. Se encuentra ubicada entre la línea de fusión y el MB.

Cerca de la zona de fusión se llega a temperaturas de hasta 1100 °C [9], temperatura a la cual el acero AISI-SAE 4140 se transforma en austenita con importante crecimiento de grano aumentando la templabilidad y la probabilidad de transformación a martensita.

Estos aceros tienen tendencia a la fisuración en frío en la ZAC y MS, debido a que poseen alta resistencia y templabilidad, si no se los suelda bajo procedimiento. Además los rotores de las bombas PCP, construidos con este acero, están sometidos a cargas de tracción y en contacto con hidrógeno proveniente de la electrodeposición del cromado y el medio corrosivo, con lo cual la probabilidad a fisuración en frío aumenta aún más. Por todo esto, se deben conocer las condiciones bajo las cuales se debe realizar la unión que garantice un metal de soldadura depositado libre de hidrógeno. Estas condiciones implican soldar con procesos de bajo hidrógeno, precalentar la zona a unir y mantener la temperatura de precalentamiento durante las pasadas y al finalizar la soldadura realizar un tratamiento térmico post- soldadura, para lograr un material resistente y tenaz.

Pueden soldarse con cualquiera de los procesos estándar de soldadura por arco eléctrico con precalentamiento entre los 150 y 260 °C y un tratamiento posterior de la soldadura con temperaturas entre los 600 y 675 °C [8].

El metal de aporte debe tener una composición similar al metal base para generar un depósito que responda al tratamiento térmico, y como consecuencia al desempeño mecánico, de igual manera que el metal base.

Cada proceso de soldadura tiene asignado un conjunto de consumibles asociados al tipo de material base a soldar [9].

Además, para la realización de una unión soldada se requiere del uso de una especificación de procedimiento de soldadura “EPS” o “WPS” de las iniciales de Welding Procedure Specifications. Este documento presenta información sobre que materiales, procesos y parámetros se fijaron para la realización de la soldadura, bajo instrucciones de algún código de construcción, que asegura una correcta unión mecánica respaldada por otro documento denominado registro de calificación de procedimiento de soldadura “RCP” o “PQR” de Procedure Qualifications Records.

### 2.3.4 Recubrimiento superficial: Cromado Electrolítico.

El cromado como recubrimiento duro sobre una pieza de acero tiene como función incrementar la vida útil de la misma. Presenta una capa de óxido pasivante con un coeficiente de fricción bajo generando resistencia al desgaste, a la abrasión y a la corrosión.

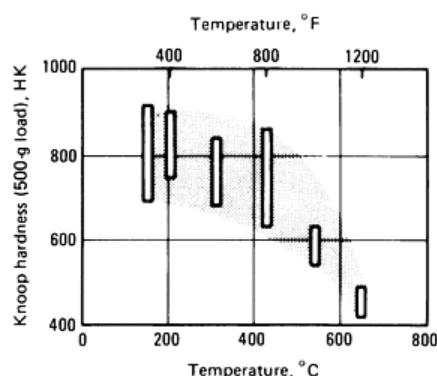
Se produce por electrodeposición de una solución que contiene ácido crómico ( $\text{CrO}_3$ ) y aniones catalíticos en proporción adecuada. El ácido crómico es la solución que aporta el cromo al recubrimiento; sin embargo el cromo no se deposita sino se encuentra una cantidad definida de aniones ácidos (catalizador).

Como catalizador se utilizan los aniones de sulfato y la composición de la solución convencional de ácido crómico catalizado por sulfato varía ampliamente.

La generación de un cromado con una red de microfisuras homogéneamente distribuidas que no superen el 10% del espesor le confieren ductilidad y dureza [10]; alcanzando valores de dureza Vickers entre los 850 HV a 950 HV.

El efecto de la temperatura sobre la dureza del recubrimiento es un factor importante que influye en la resistencia al desgaste, debido a que la dureza comienza a disminuir cuando el cromado se expone a una temperatura por encima de los 205 °C. La figura 2.11 muestra que el cromado no debe exponerse a temperaturas por encima de los 420 °C en aplicaciones que requieran buena resistencia al desgaste, ya que la caída de dureza es abrupta a valores muy bajos.

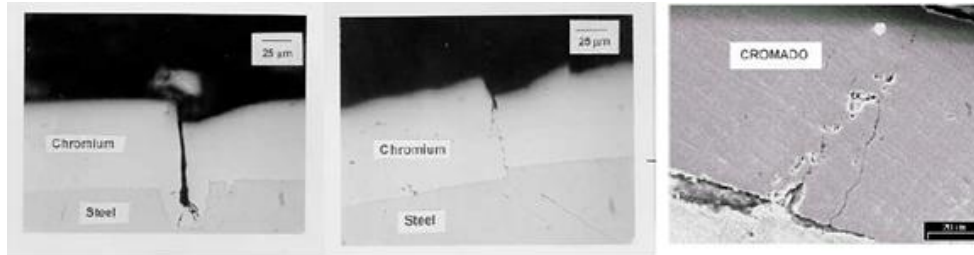
Figura 2.11 [11]: gráfica de variación de la dureza del Cromado con la temperatura.



La preparación incorrecta de la solución y la mala elección de los parámetros necesarios para realizar el cromado, generan depósitos defectuosos como recubrimientos pobres en cromo,

depósitos quemados, nodulares, picados, mala adhesión y microfisuras [11]. La figura 2.12 presenta una serie de cromados con estas características.

Figura 2.12: Cromados que presentan rugosidad, espesor variable, porosidad y fisuras.



La calidad del cromado duro se evalúa al determinar el espesor y la distribución del espesor, la apariencia, la distribución de fisuras, tamaño de fisuras, porosidad, rugosidad y adhesión al metal base.

Los depósitos libres de microfisuras tienen muy mala resistencia al desgaste y a la corrosión, porque las tensiones residuales en el depósito generan fisuras que se extienden hasta llegar al metal base produciendo corrosión acelerada.

Los depósitos porosos, si bien van en detrimento de la resistencia a la corrosión, son favorables a la resistencia al desgaste cuando se trabaja con lubricación ya que son capaces de retener lubricante y mantener las superficies lubricadas.

Para evaluar las características del cromado se utiliza la microscopía óptica que permite revelar poros, microfisuras, adherencia al sustrato y distribución del espesor a través de un ataque químico al cromado.

Para la eliminación del cromado se pueden utilizar métodos químicos o mecánicos. Cuando el sustrato es acero se puede atacar el cromado con una solución de ácido clorhídrico al 10 % [11] en volumen a temperatura ambiente; mientras que mecánicamente se lo retira del sustrato por esmerilado.

### **2.3.5 Elastómeros utilizados en el estator de las bombas PCP.**

Los polímeros son materiales que se forman por la unión de unidades de moléculas (meros) y átomos mediante enlace químico a través de un proceso de polimerización.

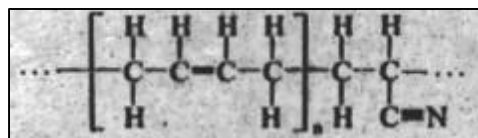


Los elastómeros son un tipo de polímero que tienen una estructura intermedia entre los termoplásticos y los termoestables, ya que presentan largas cadenas de monómeros con algunas entrecruzadas exhibiendo un material con una deformación elástica mayor al 200 % [12]. Para evitar la deformación plástica y mantener una deformación elástica alta, se necesitan enlaces cruzados entre las cadenas poliméricas que resultan de la vulcanización de las mismas con átomos de azufre (S).

Los elastómeros utilizados en las bombas PCP son los base nitrilo, los base nitrilo hidrogenados y los fluoelastómeros, siendo los primeros los más comunes en la industria petrolera [13].

El elastómero de base nitrilo (NBR) es un copolímero de butadieno acrilonitrilo y se muestra en la figura 2.15.

Figura 2.15 [12]: Copolímero de Butadieno-Acrilonitrilo.



El contenido de acrilonitrilo (ACN) está comprendido entre un 18 y 50%, generando diferentes propiedades y características en el elastómero. Para porcentajes de acrilonitrilo altos el elastómero reducirá su comportamiento elástico, adquiriendo un comportamiento mayoritariamente viscoplastico[13], pero también aumentará la resistencia a los aromáticos y al CO<sub>2</sub> presentes en el petróleo.

El butadieno acrilonitrilo con porcentaje de Acrilonitrilo medio presenta una densidad aproximada de 1.23 g/cm<sup>3</sup>, dureza de 72 Shore “A”, una temperatura máxima de funcionamiento de 120°C, excelente resistencia a la abrasión, buena resistencia a la formación de burbujas generadas por la difusión del CO<sub>2</sub> en el material y por lo tanto buena resistencia a la descompresión explosiva, baja resistencia al agua caliente y al SH<sub>2</sub> ya que el azufre de éste último ataca al triple enlace de ACN endureciendo el elastómero. Presenta un desempeño excelente en aplicaciones con crudos pesados (menor a 18°API<sup>2</sup>) y abrasivos; buen desempeño con crudos medios (18-29°API) y un pobre desempeño con crudos livianos (28-40°API) y con contenidos de aromáticos [14].

---

<sup>2</sup> °API es una unidad de la medida de la densidad del crudo respecto a la del agua.

Los butadieno acrilonitrilo hidrogenados, presentan una densidad de  $1,15 \text{ g/cm}^3$ , dureza de 76 Shore “A”, buena resistencia al  $\text{SH}_2$  debido a que el hidrógeno satura el triple enlace del acrilonitrilo (ACN); muy buena resistencia a la temperatura, con una temperatura máxima de  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ ; buena resistencia a la abrasión y baja resistencia al  $\text{CO}_2$ , a los aromáticos y al agua caliente. Tienen una excelente aptitud para aplicaciones con crudos pesados y con  $\text{SH}_2$ .

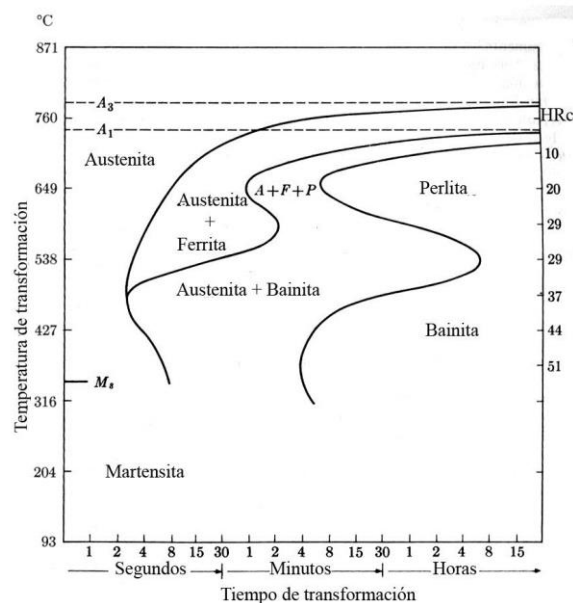
Los fluoelastómeros se utilizan en presencia de crudos livianos con altos contenidos de aromáticos. Presentan una densidad de  $1.16 \text{ g/cm}^3$ , dureza de 56 Shore “A”, excelente resistencia al  $\text{CO}_2$ , a la temperatura y al  $\text{SH}_2$ . En contrapartida presentan baja resistencia a la abrasión, a la descompresión explosiva y al agua caliente.

## 2.4 Tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos son ciclos térmicos a los que se someten los materiales, en este caso el acero ASI-SAE 4140 tratable térmicamente, sin llegar a fundirlos para generar determinadas microestructuras y así obtener una amplia variedad en sus propiedades.

La figura 2.10 muestra la curva tiempo transformación temperatura “TTT” del acero. Se observa las distintas fases microestructurales que se obtienen, luego de realizado un tratatamiento térmico, en función de la temperatura y tiempo de mantenimiento de la misma.

Figura 2.10: Curva TTT para el acero AISI-SAE 4140.



Los elementos de aleación Cr y Mo tienden a estabilizar la fase ferrita. Esto se observa en el diagrama TTT, de la figura 2.10, donde la zona austenita se reduce a una zona de ferrita más austenita.

#### 2.4.1 Tratamiento térmico de Homogeneizado.

El tratamiento térmico de homogeneizado, tiene como objetivo eliminar o disminuir la segregación química generada en el material que solidifica fuera del equilibrio. Este tratamiento se logra calentando la pieza entre los 1100 y 1300 °C [15] durante un periodo de tiempo, con un posterior enfriamiento lento. El mecanismo que disminuye la segregación química dendrítica, durante el tratamiento, es el de difusión que implica elevadas temperaturas para desplazar los átomos de los distintos elementos o solutos concentrados en las dendritas y así lograr una matriz químicamente más homogénea. Matemáticamente, la solución gaussiana de la segunda ley de Fick [16] modela la difusión de pequeñas concentraciones de soluto en una matriz por medio de la siguiente ecuación.

$$c(x, t) = \frac{M/A}{\sqrt{4 * \pi * D * t}} * e^{\left(\frac{-x^2}{4 * D * t}\right)} \quad \text{si } \begin{cases} -\infty < x < \infty \\ 0 \leq t < \infty \end{cases}$$

- $c(x, t)$ : concentración en la posición  $x$ , en tiempo  $t$ .
- $\frac{M}{A}$ : cantidad total de soluto por unidad de área.
- $D$ : coeficiente de difusión del soluto en la solución a una determinada solución.
- $t$ : tiempo de difusión del soluto en la solución.

#### 2.4.2 Tratamiento térmico de Temple y Revenido.

El tratamiento térmico de temple se realiza para lograr una microestructura de martensita en el material. La martensita “M”, es el constituyente más duro en los aceros de baja aleación y su dureza depende del contenido de carbono [7]; con lo cual este tratamiento define las propiedades mecánicas finales del material.

Para realizar el temple se debe conocer la templabilidad del material, que hace referencia a la capacidad de adquirir ciertos valores de dureza distribuidos en su sección luego de que el

material se austenice y se enfríe bruscamente [17]. Un método para determinarla es el método de Grossmann; donde se calcula el diámetro crítico ideal “ $D_I$ ”, que representa el máximo diámetro de redondo que templado en un medio de severidad infinita “ $H_\infty$ ” adquiere una microestructura de 50 % de martensita en el centro, para luego determinar el diámetro crítico real “ $D_r$ ”. Este último se define como el mayor diámetro de redondo que templado en un medio de severidad “ $H$ ” alcanza una microestructura 50 % martensítica en el centro.

Luego de conocer el “ $D_r$ ”, que es diámetro máximo que puede tener la probeta a templar, se puede determinar la dureza alcanzada en algún punto de la sección del material con la utilización de las curvas de Lamont y la curva de Jominy para el acero tratado.

La martensita presente en los aceros, luego del temple, es una microestructura muy dura y se debe a una fuerte saturación de carbono en la red atómica del hierro y a una densidad alta de dislocaciones en la estructura cristalina. Debido a esto la martensita es muy frágil para determinadas aplicaciones, con lo cual el objetivo del revenido es aumentar la tenacidad de la microestructura martensita disminuyendo parcialmente su resistencia.

El revenido se realiza a una temperatura y durante un tiempo suficiente para disminuir la resistencia y aumentar la ductilidad a través de la difusión del carbono saturado en la ferrita y así obtener una estructura más estable.

En los aceros aleados se distinguen cuatro etapas durante el inicio y fin del tratamiento térmico de revenido.

En la primera etapa, que se origina entre los 20 y los 100 °C, se presenta una difusión de los átomos de carbono hacia las dislocaciones y hacia los bordes de las placas de martensita; el resultado es la formación de grupos “clusters” de carbono. En la segunda etapa, desde los 100 a 200 °C, precipitan los carburos de transición, especialmente los carburos  $\epsilon$  ( $Fe_{2.4}C$ ). La tercer etapa, entre los 200 y los 350 °C, es una etapa de transición de la austenita retenida a ferrita y cementita. Por último, la cuarta etapa que se desarrolla entre los 250 y 700 °C, se produce la formación de ferrita y cementita. Esto es una matriz de granos de ferrita equiaxiales con carburos esferoidizados.

Para los aceros aleados con cromo y molibdeno, la formación de los carburos aleados ocurre en el rango que se extiende de los 500 a los 700 °C.

Si el material a revenir presenta impurezas de fósforo, arsénico, antimonio y estaño se genera fragilización por revenido al realizarse el tratamiento entre los 350 °C y 600 °C debido a la

segregación de éstas en el borde de grano. También puede presentarse fragilización por martensita revenida entre los 205 °C y 370 °C de temperatura durante el tratamiento, diferenciándose de la fragilización por revenido que se produce durante el enfriamiento luego de haberse realizado el revenido a temperatura elevada y durante el servicio con temperaturas en el rango de fragilización [7].

### 2.4.3 Tratamiento térmico de Normalizado.

El normalizado es un tratamiento térmico final que se le realiza a los aceros con el objetivo de mejorar la maquinabilidad y refinar el tamaño de grano de la estructura, entre otros.

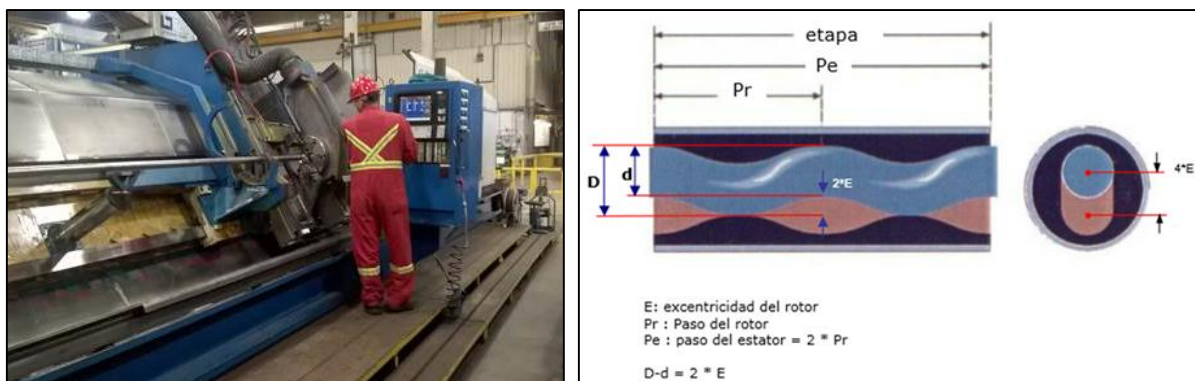
El ciclo térmico se define con una temperatura de asutenización de 55 °C por encima de la línea crítica  $Ac_3^3$ , para aceros hipoeutectoide en el diagrama hierro-carbono, seguido de un enfriamiento al aire.

La microestructura generada luego del tratamiento, para los aceros de baja aleación y medio carbono, es bainita y perlita laminar [7].

### 2.5 Proceso de Fabricación del Rotor de una Bomba PCP.

El mecanizado del rotor en forma helicoidal, se realiza en un torno CNC a partir de una sección cilíndrica de material AISI-SAE 4140. La figura 2.16 A muestra un operario trabajando en el torno CNC (imagen suministrada por la empresa Weatherford).

Figura 2.16 A [18]: Torno CNC para mecanizar los rotores. B [1]: Relación entre las dimensiones



---

<sup>3</sup>  $Ac_3$  curva que indica la transición a una fase totalmente austenítica al aumentar la temperatura.

Se parte de una sección de diámetro mayor que el diámetro final del rotor. El diámetro “D” del material original puede estimarse, siguiendo la figura 2.16 B, en función del diámetro “d” final del rotor y de la excentricidad “E” del mismo mediante la siguiente expresión:

$$D = 2 * E + d$$

Los rotores se fabrican con diferentes diámetros en función de su geometría y del caudal a suministrar.

Luego de mecanizado los rotores, se les realiza un cromado electrolítico y se procede a soldarlos para unirlos y dejarlos con su largo final; para lo cual, se los posiciona junto a un tercer rotor que presenta la misma geometría y se hacen coincidir las crestas, ya que los tres poseen el mismo paso. La figura 2.17 muestra esta disposición.

Figura 2.17: Disposición de los extremos del eje para soldar paralelo a un rotor de idéntica geometría.



## CAPITULO III.

### Materiales y Técnicas Experimentales.

#### 3 Materiales analizados.

En este trabajo se analizan tres rotores de bombas PCP que presentaron falla temprana durante su funcionamiento. Los mismos fueron suministrados al Laboratorio de Metalografía y Soldadura “LMTyS”, de la Universidad Nacional del Comahue “UNCo”, para su caracterización.

Las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 muestran los tres rotores denominados R1, R2 y R3 respectivamente.

Figura 3.1: Dos extremos del rotor R1.



Figura 3.2: Dos extremos del rotor R2.

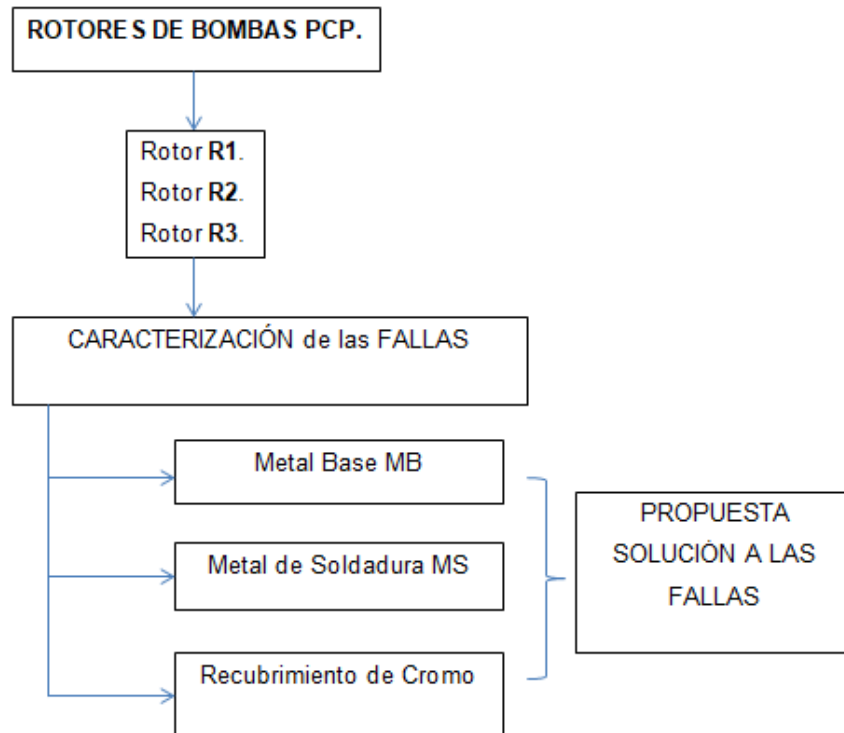


Figura 3.3: Rotor R3.



### 3.1 Desarrollo del trabajo.

El siguiente esquema establece una relación de las actividades necesarias para la realización de este PIP.



### 3.2 Técnicas experimentales utilizadas.

#### 3.2.1 Análisis químico.

Para determinar la composición química del metal base y del metal de soldadura presentes en los rotores de bombas PCP, se los analizó por medio de la técnica de espectrometría de emisión óptica. Esta tarea se realizó en el Laboratorio de Metalurgia de la Universidad Nacional del Sur, con un espectrómetro marca SPECTRO modelo Maxx, programa Fe-30-F.



### 3.2.2 Preparación metalográfica de las muestras.

La preparación metalográfica se realizó de acuerdo a la norma ASTM E3-11 [19], para lo cual se obtuvieron las muestras por medio de un corte en frío de los rotores. Luego se incluyeron utilizando una resina acrílica y posteriormente se preparó las superficies por pulido mecánico por medio de lijas cuya granulometría fue variando desde 80 hasta 1500. Por último se realizó un pulido fino con pasta de diamante de 1µm.

Para la visualización de la microestructura del material, se atacó las muestras con diferentes reactivos. En la tabla 3.1 se muestran los reactivos empleados.

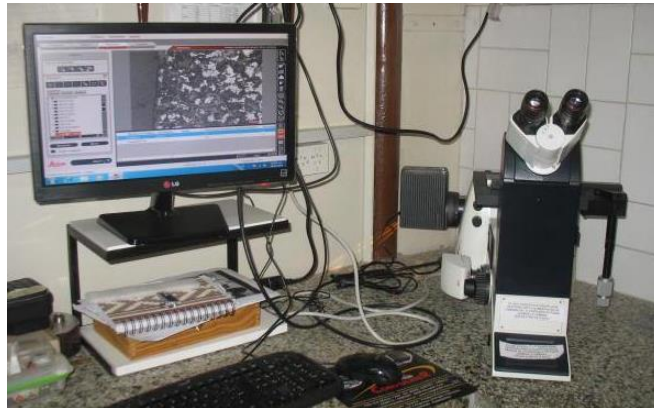
Tipo de ataque	Reactivos	Tiempo [s]	Objetivo.
Nital al 4%	4mL HNO <sub>3</sub> y 96 mL de alcohol.	5-10	Revela borde de granos ferríticos y diferencia la ferrita de la martensita.
Beraha's	20mL HCl, 100mL H <sub>2</sub> O, 0.5-1g K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	Colorea la austenita.
Segregación.	30g FeCl <sub>3</sub> , 1g CuCl <sub>2</sub> , 0.5g SnCl <sub>2</sub> , 50mL HCl, 500mL alcohol y 500mL H <sub>2</sub> O	32	Revela estructura dendrítica.

Tabla 3.1 [20]: Reactivos utilizados en los ataques químicos de las muestras.

### 3.2.3 Microscopía óptica.

La determinación de las microestructuras presentes en el metal base (MB) del rotor, zona afectadas por calor (ZAC) y metal de soldadura (MS); la medición de los espesores de recubrimiento superficial y la visualización de defectos como fisuras y óxidos, entre otros, se realizaron en el LMTyS, de la UNCo, con un microscopio óptico marca LEICA DMI 3000 con sistema incorporado de digitalización de imágenes. La figura 3.4 muestra el equipo utilizado.

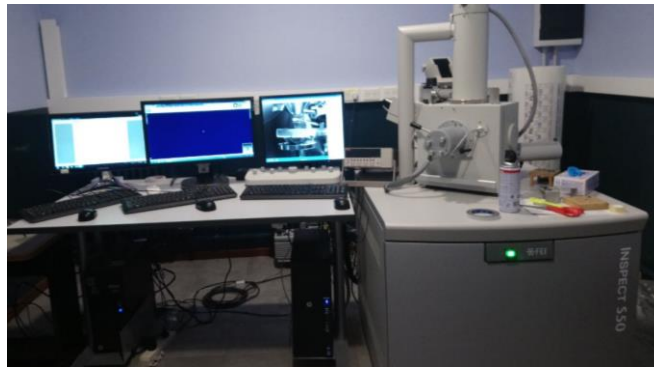
Figura 3.4: Microscopio óptico marca LEICA DMI 3000.



### **3.2.4 Microscopía electrónica de barrido.**

El análisis por microscopía electrónica de barrido, SEM<sup>4</sup>, se realizó en el Centro Atómico Bariloche que cuenta con un microscopio modelo INSPECT S50 año 2016, de la firma FEI, con analizador EDS<sup>5</sup>. La figura 3.5 muestra el equipo utilizado.

Figura 3.5: Microscópio electrónico de barrido con analizador EDS.



### **3.2.5 Barridos de microdureza.**

Los barridos de microdureza se realizaron de acuerdo a la norma ASTM E384-09 [21] utilizando un microdurómetro digital marca FUTURE-TECH modelo FM-700. La carga aplicada fue de 1000 gr durante un tiempo de 10 s en cada medición.

La figura 3.6 muestra el equipo utilizado, el cual pertenece al LMTyS de la UNCo.

---

<sup>4</sup> SEM: Scanning Electron Microscope.

<sup>5</sup> EDS: Energy Dispersive x-ray Spectroscopy.

Figura 3.6: Microdurómetro FUTURE-TECH modelo FM-700.



### **3.3 Realización de tratamientos térmicos.**

Se realizaron tratamientos térmicos al MB del rotor R3 utilizando los hornos pertenecientes al LMTyS de la UNCo. La figura 3.7 muestra los dos hornos de resistencia eléctrica utilizados.

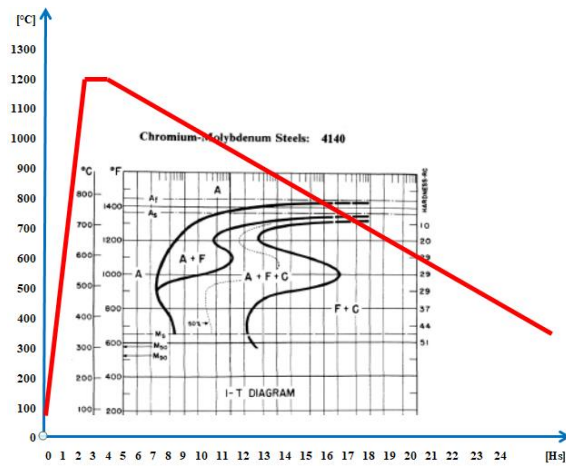
Figura 3.7: Hornos de resistencia eléctrica utilizados.



#### **3.3.1 Tratamiento térmico de homogeneizado.**

Se realizaron tratamientos térmicos de homogeneizado con el objetivo de disminuir la segregación química en el acero perteneciente a muestras extraídas del rotor R3. La figura 3.8 presenta el ciclo térmico de homogeneizado sobre el diagrama “TTT” del acero en estudio.

Figura 3.8: Ciclo térmico de H1 y H2.

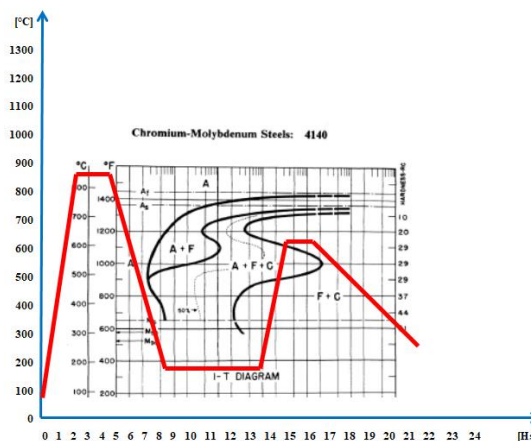


### 3.3.2 Tratamiento térmico de temple y revenido.

Se realizaron tratamientos térmicos de temple y revenido, a muestras del rotor R3 homogeneizadas, con el objetivo de proporcionarle al material las propiedades mecánicas finales.

La figura 3.9 muestra el ciclo térmico del tratamiento térmico de temple y revenido.

Figura 3.9: Ciclo térmico del tratamiento térmico de temple y revenido.

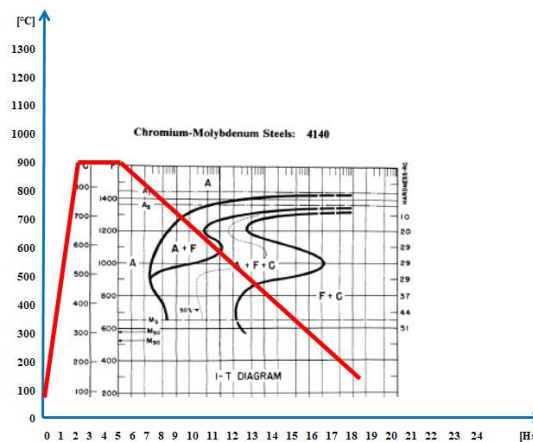


### 3.3.3 Tratamiento Térmico de Normalizado.

Se realizaron tratamientos térmicos de normalizado a las muestras del rotor R3 homogeneizadas. El objetivo es proporcionarle al material las propiedades mecánicas finales y evitar la formación de una microestructura de martensita libre.

La figura 3.10 muestra el ciclo térmico del tratamiento térmico de normalizado.

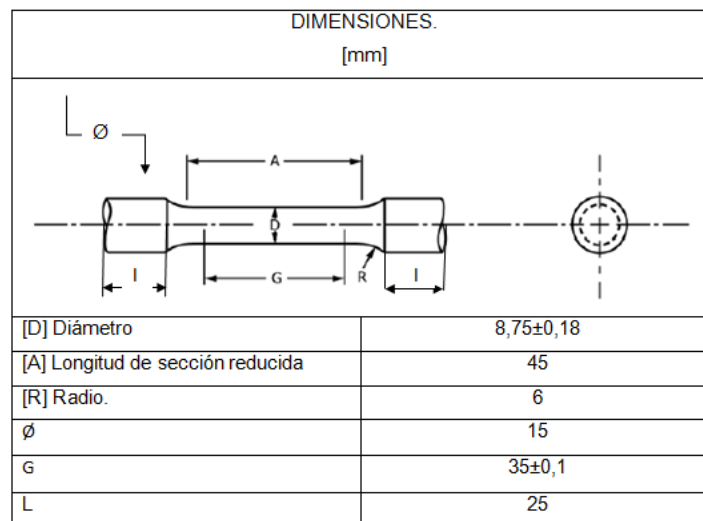
Figura 3.10: Ciclo térmico del tratamiento térmico de normalizado.



### 3.4 Realización de los ensayos de tracción.

Con el objetivo de evaluar y comparar las propiedades mecánicas del metal base del rotor R3, en estado original y tratado térmicamente, se obtienen dos probetas de acuerdo a la norma ASTM A370-14 [22] para la realización de ensayos de tracción. La figura 3.11 presenta las dimensiones de las probetas extraídas del rotor en sentido longitudinal.

Figura 3.11: Dimensiones de las probetas realizadas.



La figura 3.12 muestra las dos probetas mecanizadas. Una probeta presenta el MB en estado original y la otra se presenta con un tratamiento térmico de homogeneizado seguido de un temple y revenido.

Figura 3.12: Probetas mecanizadas para tracción.



Las probetas se ensayaron utilizando un vivróforo de alta frecuencia marca AMSLER con capacidad de 100 kN [23], adaptada como máquina de tornillo y accesorios, en el Laboratorio de Propiedades Mecánicas de la Universidad Nacional del Comahue. La figura 3.13 muestra la máquina de ensayo de tracción a la izquierda y a la derecha la probeta ubicada en la máquina.

Figura 3.13. Izquierda: Máquina de ensayo de tracción. Derecha: Probeta colocada en la máquina de tracción.



## **CAPÍTULO IV.**

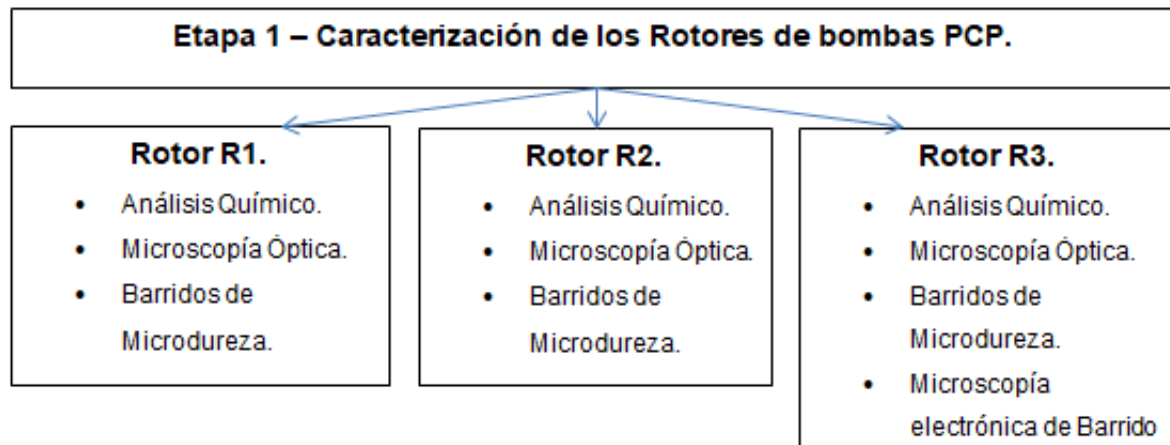
### **4 Resultados y Análisis.**

En este capítulo se presentan los resultados de las técnicas experimentales realizadas a los rotores de bombas PCP de este PIP.



## **ETAPA 1.**

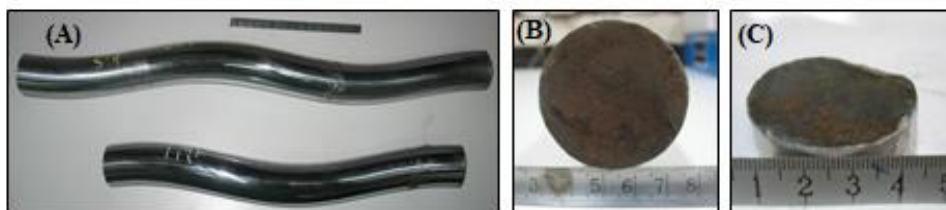
Esta etapa presenta los resultados de la caracterización de los tres rotores. El siguiente esquema muestra las actividades realizadas.



## 4.1 Rotor R1.

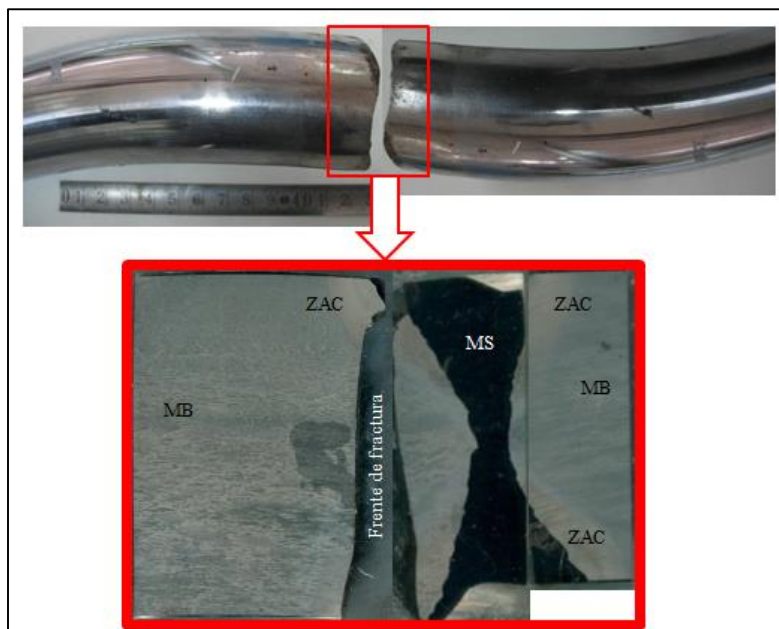
El rotor de bomba PCP denominado R1 presentó falla por fractura. El mismo es un acero con recubrimiento de cromo duro de geometría helicoidal que presenta material de soldadura en los extremos de fractura. La figura 4.1 (A) presenta los dos extremos de R1 y la (B) y (C) las superficies de fractura de los mismos.

Figura 4.1: Rotor R1 (A) y superficie de fractura (B y C).



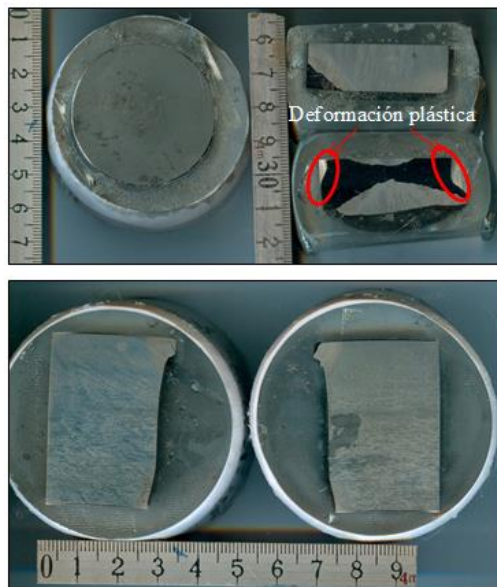
La figura 4.2 presenta la macrografía de R1 donde se indica la zona de extracción de las muestras que contienen el frente de fractura.

Figura 4.2: Zonas de extracción de las muestras del rotor R1.



Las muestras obtenidas para caracterizar el MB, el MS, la ZAC y el recubrimiento de cromo se presentan en la figura 4.3 y se indica en una de ellas la deformación plástica del MS.

Figura 4.3: Muestras extraídas del rotor R1.



#### 4.1.1 Análisis químico al MB y MS de R1.

Los resultados del análisis químico realizados al material base y metal de soldadura se muestran en la tabla 4.1.

Rotor R1	Composición Química (%)										
Metal	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	V
base.	0.416	0.790	0.005	0.009	0.272	0.950	0.139	0,083	.....	.....	.....
Metal de soldadura	0.125	0.680	<0.001	0.008	1.330	28.250	0.089	7.880			1.050

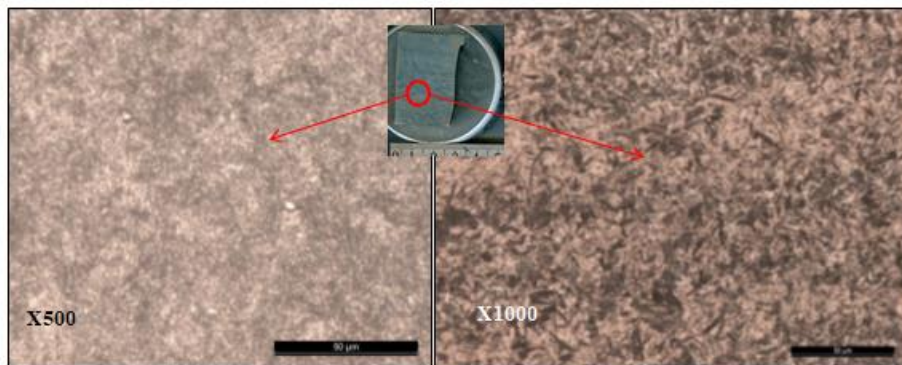
Tabla 4.1: Composición química del MB y MS de R1.

El metal base se corresponde químicamente a un acero AISI-SAE 4140 y el metal de soldadura a un acero inoxidable austenítico AWS E312-16.

### 4.1.2 Microscopía óptica realizada a las muestras de R1.

La figura 4.4 presenta dos micrografías donde se observa la microestructura del MB con aumentos X500 y X1000.

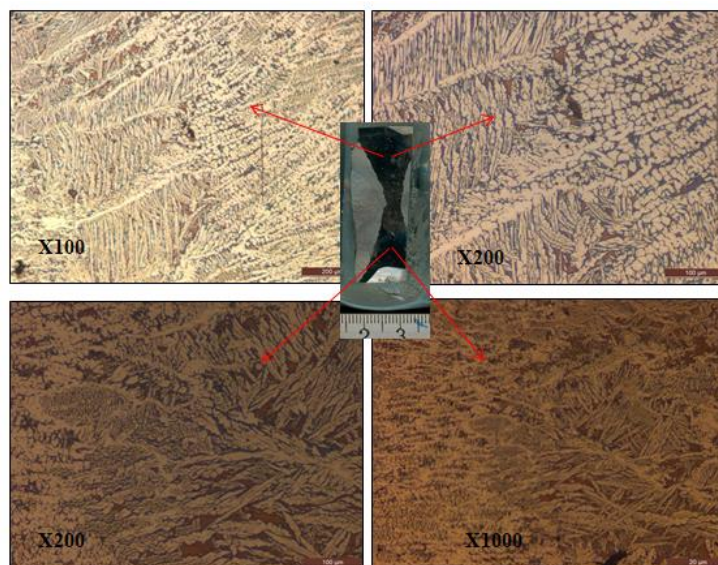
Figura 4.4: Micrografía del metal base del rotor R1.



La microestructura presente consiste de bainita (zonas oscuras), martensita revenida y martensita sin revenir (zonas claras). Esta heterogeneidad microestructural es consecuencia de una heterogeneidad química en el material que presenta algún tratamiento térmico.

La figura 4.5 presenta las micrografías correspondientes al MS con aumentos X100, X200 y X1000.

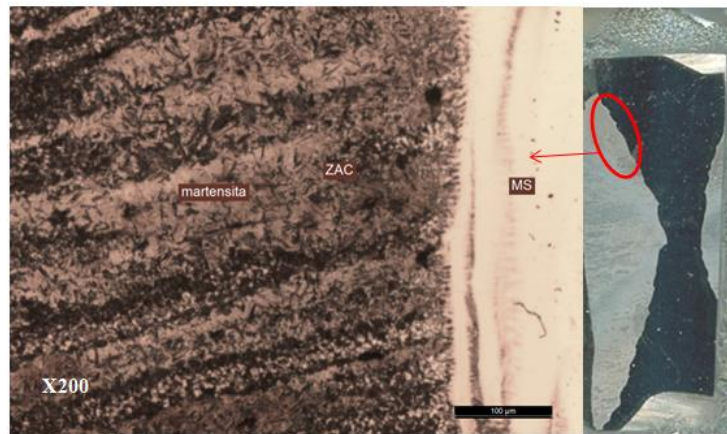
Figura 4.5: micrografías de la microestructura del MS de la muestra del rotor R1.



La microestructura del metal de soldadura se corresponde a dendritas de ferrita delta en matriz austenítica [20] característico de un metal de aporte asutenítico.

La figura 4.6 muestra la microestructura presente en la zona afectada por calor (ZAC).

Figura 4.6: Microestructura en la ZAC del rotor R1.



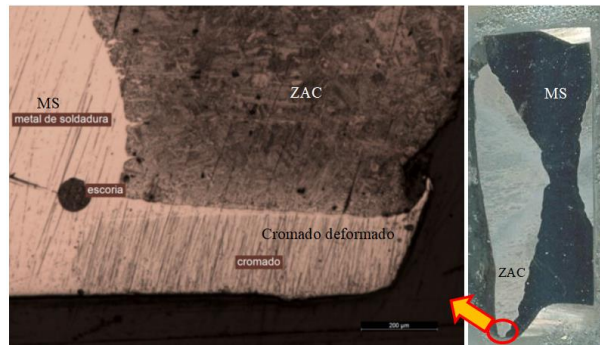
Se observa una microestructura en bandas de bainita (zonas oscuras) y martensita revenida y sin revenir (zonas claras) intercaladas entre sí. Este bandeo, es consecuencia de la segregación química dendrítica de algunos elementos de aleación presente en el material, con lo cual estas zonas segregadas favorecen la formación y retardan el proceso de revenido de la martensita cuando se someten a ciclos térmicos por soldadura.

La microestructura de martensita revenida se encuentra cerca de la zona de fusión y se debe al revenido generado durante las sucesivas pasadas de soldadura.

La martensita sin revenir se encuentra en la ZAC alejada de la zona de fusión y cerca de la superficie del rotor, en el frente de fractura. Esto se debe a la falta de un pre calentamiento y un tratamiento térmico post soldadura durante el proceso de unión, con lo cual estas zonas son alcanzadas por el calor generado durante una pasada de soldadura, que luego se enfría rápidamente sin controlar su temperatura logrando nuevamente un temple local.

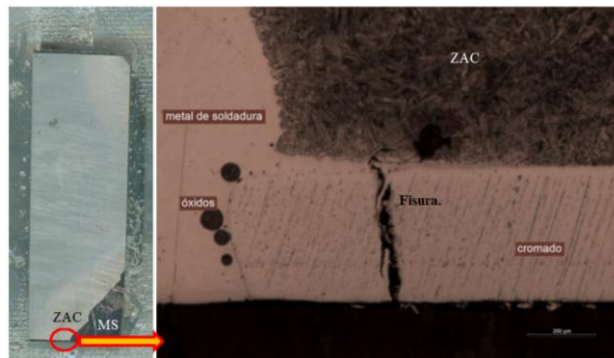
La micrografía de la figura 4.7 muestra la presencia de óxidos de geometría circular en el MS como resultado del proceso de soldadura. También un cromado deformado como resultado de la fractura del rotor.

Figura 4.7: MS, ZAC y recubrimiento de cromo en muestra del rotor R1.



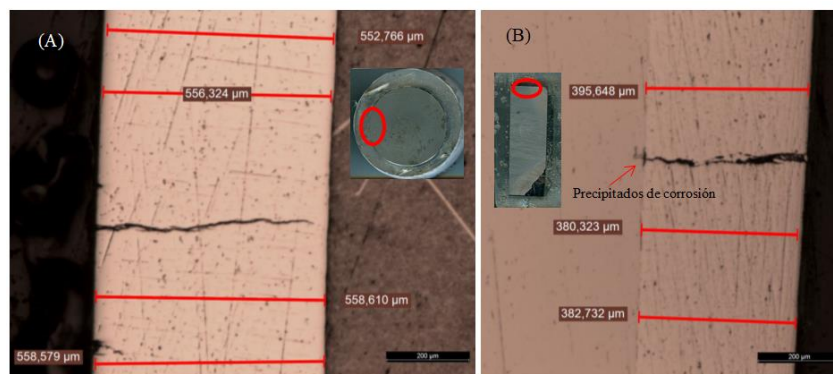
La figura 4.8 presenta una micrografía donde se observa una fisura en el cromado que alcanza al MB y la presencia de óxidos en el MS como resultado del proceso de soldadura.

Figura 4.8: Fisura en el recubrimiento de cromo del rotor R1.



La figura 4.9 presenta una micrografía (A) del recubrimiento de cromo de una muestra transversal y una (B) del recubrimiento de cromo de una muestra longitudinal.

Figura 4.9: Cromado del rotor R1: (A) muestra transversal, (B) muestra longitudinal.



En la micrografía (A) se observa un cromado poroso y la presencia de una fisura de 556  $\mu\text{m}$  de longitud que atraviesa el espesor. En la (B) se observa un cromado poroso y una fisura de 390  $\mu\text{m}$  que alcanza el MB donde se encuentran precipitados de corrosión. La diferencia en el espesor del cromado de la muestra transversal y la muestra longitudinal se debe al desgaste generado por la interferencia en las líneas de sello entre el rotor y el estator.

### **4.1.3 Barridos de microdureza realizados a las muestras de R1.**

La tabla 4.2 presenta los valores de microdureza barridos en el MB.

MB de rotor R1		
N° impronta	HV	HRC
1	265	24,8
2	257,5	23,5
3	272,7	26,1
4	267,9	25,3
5	271,3	25,8
6	265,2	24,8
7	251,9	22,6
8	282,6	27,5
9	316,8	31,8
10	288,8	28,3

Tabla 4.2: Barrido de microdureza en el metal base (MB).

Los valores se encuentran entre los 251,9 HV, característico de la bainita, y los 316,8 HV, característico de la martensita. Esto confirma la existencia de una heterogeneidad en las propiedades mecánicas producida por segregación química.

La tabla 4.3 presenta los valores de microdureza medidos en el MS y la ZAC en dos zonas de la muestra: superior e inferior.

Impronta N°	HV	Ubicación
1	411,3	ZAC
2	418,5	ZAC
3	283,0	ZAC
4	539,0	ZAC
5	325,4	ZAC
6	316,2	ZAC
7	363,5	ZAC
8	250,7	MS
9	248,9	MS
10	243,2	MS
11	248,2	MS
12	248,3	MS
13	244,8	MS
14	239,5	MS

Impronta N°	HV	Ubicación
1	330,5	ZAC
2	322,2	ZAC
3	339,0	ZAC
4	316,0	ZAC
5	300,6	ZAC
6	348,3	ZAC
7	318,7	ZAC
8	243,8	MS
9	259,0	MS
10	249,0	MS

Tabla 4.3: Barridos de microdureza.

Los medidos en la ZAC inferior indican la presencia de una microestructura de martensita sin revenir. El MS en esta zona presenta valores por debajo de los 250 HV.

Los medidos en la ZAC superior indican la presencia de microestructura martensita.

## 4.2 Rotor R2.

El rotor de bomba PCP denominado R2 presentó falla por fractura. El mismo es un acero con recubrimiento de cromo duro, de geometría helicoidal, que presenta material de soldadura en un extremo. La figura 4.10 (A) presenta los dos extremos de R2 y la (B) las superficies de fractura de los mismos donde se observa deformación plástica.

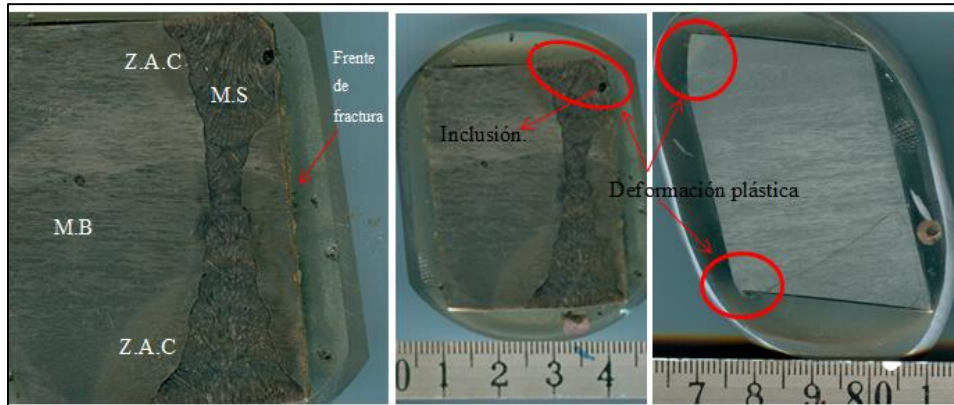
Figura 4.10: Rotor R2 fracturado.





La figura 4.11 presenta las muestras extraídas de R2 para caracterizar el MB, el MS, la ZAC y el recubrimiento de cromo.

Figura 4.11: Muestras de R2.



También se indica la deformación plástica del MS y la ZAC en el frente de fractura y una inclusión de escoria, debido al proceso de soldadura, en el MS.

#### 4.2.1 Análisis químico al MB de R2.

El resultado del análisis químico realizado al MB se muestra en la tabla 4.4.

Acero	Composición Química (%)										
Metal base.	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	V
	0.379	1.090	0.006	0.003	0.345	1.050	0.165	0,051	.....	.....	.....

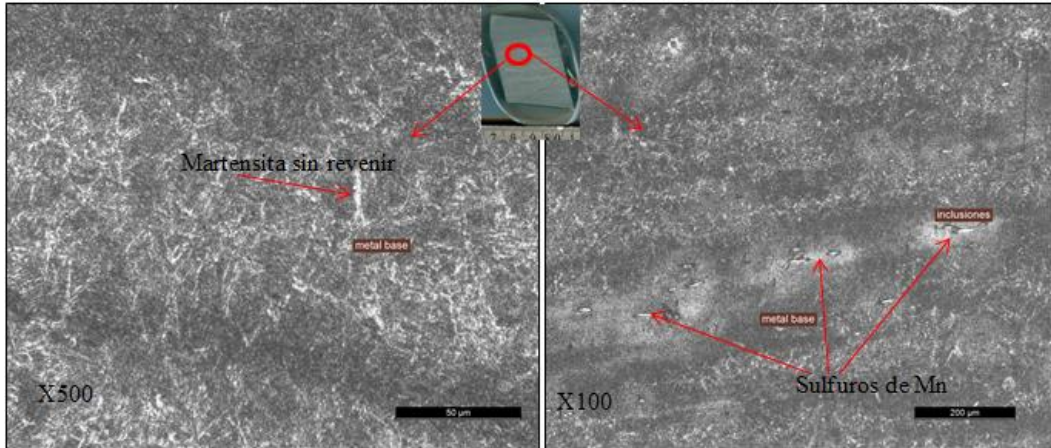
Tabla 4.4: Composición química del acero.

Los valores que figuran en la tabla indican que la composición química del MB se corresponde a un acero AISI-SAE 4140.

#### 4.2.2 Microscopía óptica realizada a las muestras de R2.

La figura 4.12 presenta dos micrografías de la microestructura del MB.

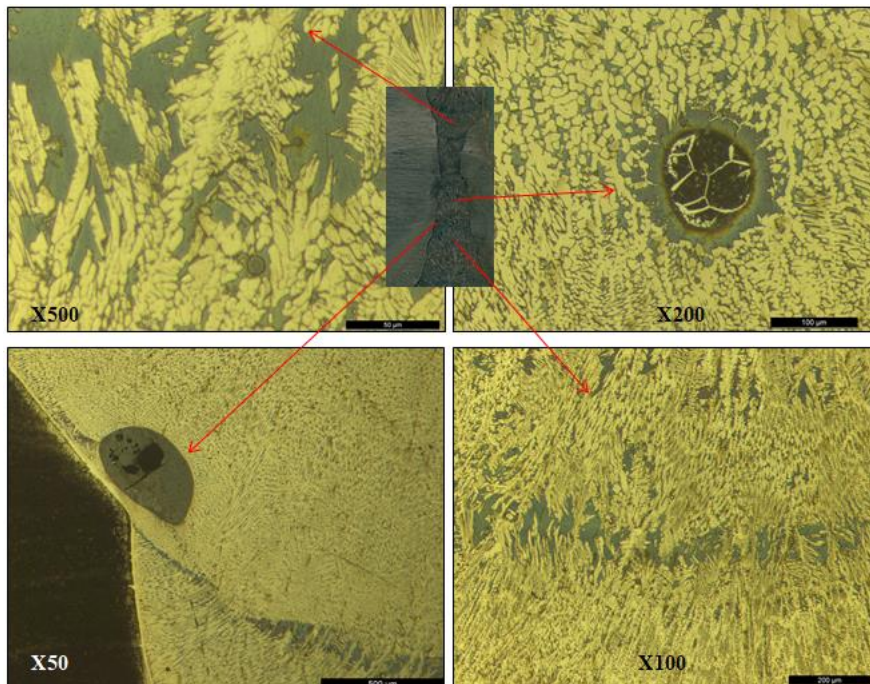
Figura 4.12: Microestructura del metal base.



Se observa una microestructura heterogénea de bainita, martensita revenida e islas de martensita sin revenir. También se indica, en la micrografía de aumento X100, la presencia de inclusiones no metálicas como el sulfuro de manganeso SMn.

La figura 4.13 presenta las micrografías del MS con aumentos X50, X100, X200 y X500.

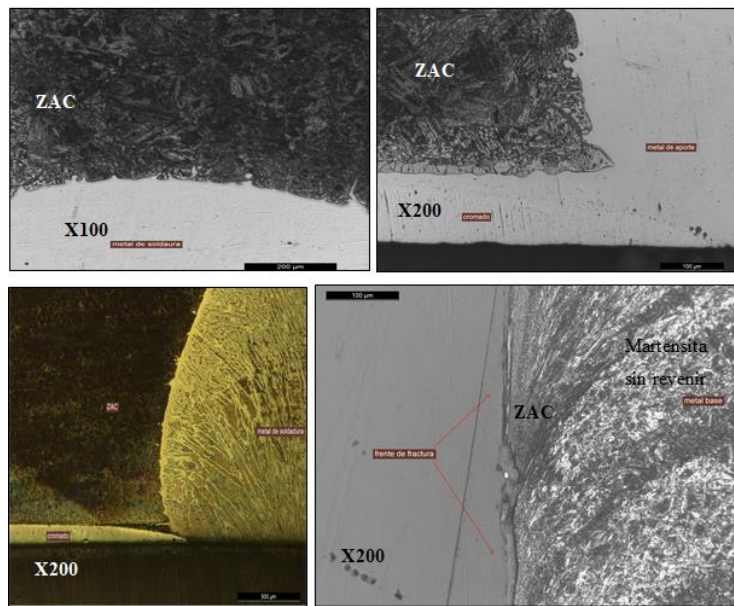
Figuras 4.13: Micrografías del MS.



La microestructura consiste en dendritas de ferrita delta (color amarillo) en matriz de austenita, característico de un aporte inoxidable austenítico. La micrografía de aumento X50 presenta inclusiones de óxido de color negro dentro de una escoria de color gris. La micrografía X200 también presenta una inclusión no metálica.

La microestructura en la ZAC se presenta en las micrografías de la figura 4.14 en tres aumentos: X100, X200 y X50.

Figura 4.14: Microestructura en la ZAC.

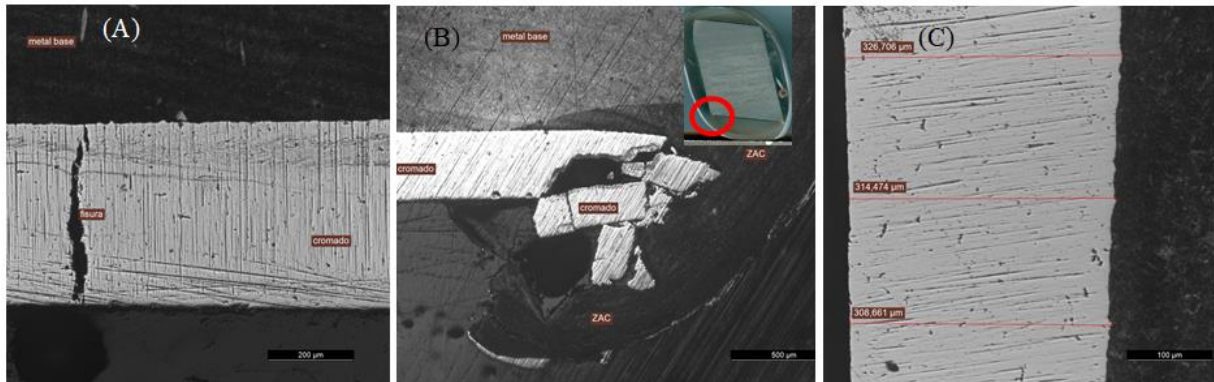


Se observa, en la ZAC, una microestructura bandeada de bainita (zonas oscuras), martensita revenida y sin reventar (zonas claras). También deformación plástica como historia del avance de la fisura que generó la falla.

La heterogeneidad en la microestructura es consecuencia de una heterogeneidad química en el material base sometido a ciclos térmicos generados durante el proceso de soldadura sin la aplicación de tratamientos térmicos de precalentamiento y post soldadura.

El recubrimiento de cromo de las muestras del rotor R2 se presenta en la figura 4.15 que contiene tres micrografías.

Figura 4.15: Micrografías del recubrimiento de cromo del rotor R2.



La micrografía (A) presenta una fisura que atraviesa el cromado. La micrografía (B) muestra un cromado fracturado y deformado plásticamente dentro de la ZAC como consecuencia de la falla por fractura. En la micrografía (C) se muestra que el espesor del cromado del rotor varía como consecuencia del desgaste mecánico producido por una interferencia excesiva con el elastómero del estator.

### 4.2.3 Barridos de microdureza realizados a las muestras de R2.

El barrido de microdureza realizado en el MB se presenta en la tabla 4.5.

MB de rotor R2.		
N° impronta	HV	HRC
1	244,3	21,2
2	289,1	28,3
3	267,6	25,2
4	261,5	24,2
5	281,6	27,3
6	286,2	28
7	281,2	27,3
8	287	28,1
9	234,6	19,1
10	256	23,3

Tabla 4.5: Barrido de microdureza en MB.

La tabla presenta valores de microdureza medidos entre los 234,6 HV y los 289,1 HV. Estos valores indican la presencia de una microestructura de martensita revenida y bainita. El barrido de microdureza realizado en la ZAC y en el MS se muestra en la tabla 4.6; esta tabla también presenta una macrografía de la muestra donde se indican las improntas generadas.



Nº	zona	HV	Nº	zona	HV
1	ZAC	404,1	16	ZAC	299,2
2	ZAC	308	17	ZAC	327,7
3	ZAC	395,1	18	ZAC	344,4
4	MS	232,8	19	ZAC	294,8
5	MS	230,3	20	ZAC	290,3
6	MS	222,7	21	ZAC	299,5
7	MS	220,6	22	ZAC	282,4
8	MS	229	23	ZAC	292,5
9	MS	216,2	24	ZAC	244,1
10	MS	217,6	25	MB	270,8
11	MS	212,8	26	MB	278
12	MS	226,1	27	MB	259,7
13	MS	221,7	28	MB	275
14	MS	220,7	29	MB	281,4
15	MS	216,7	30	MB	277,9

Tabla 4.6: barrido de microdureza en ZAC y MS.

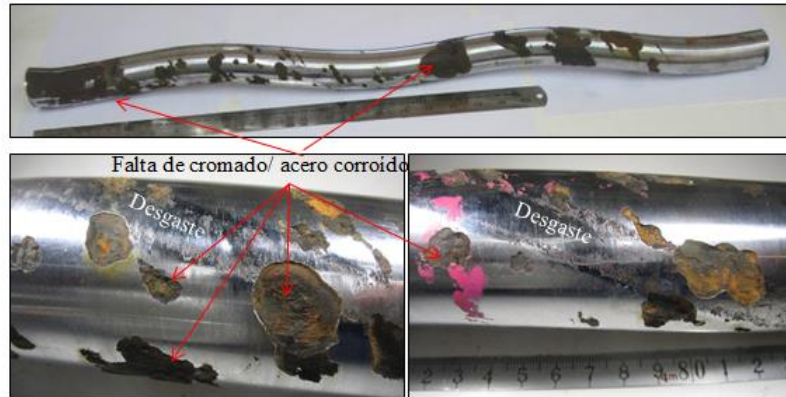
Los valores de microdureza medidos en la ZAC del lado de la superficie de fractura alcanzan los 400 HV. Esto indica la presencia de una microestructura de martensita sin revenir [7].

Los valores de microdureza medidos en el MS están por debajo de los 233 HV y representan una microestructura austenítica.

### 4.3 Rotor R3.

La figura 4.16 presenta el rotor de bomba PCP denominado R3, de geometría helicoidal, que presentó falla por corrosión en el cromado.

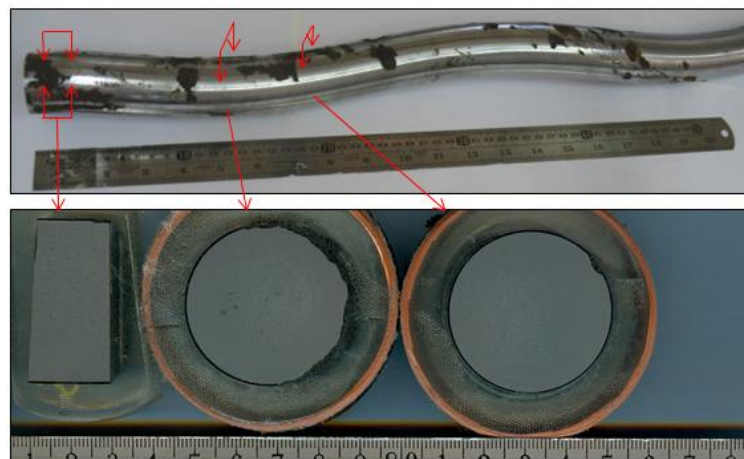
Figura 4.16: Macrografía del rotor R3.



El rotor presenta zonas sin recubrimiento como consecuencia de un proceso de corrosión por picado y marcas de desgaste localizado a lo largo de la línea de interferencia con el elastómero del estator. También, debido al desprendimiento y falta de cromado, el acero presenta corrosión.

Para caracterizar el MB y el recubrimiento de cromo se extrajeron muestras en sentido longitudinal y transversal al rotor como se indica en la figura 4.17.

Figura 4.17: Muestras de R3.



### 4.3.1 Análisis químico al MB de R3.

El resultado del análisis químico al MB se presenta en la tabla 4.7 y se corresponde químicamente a un acero AISI-SAE 4140.

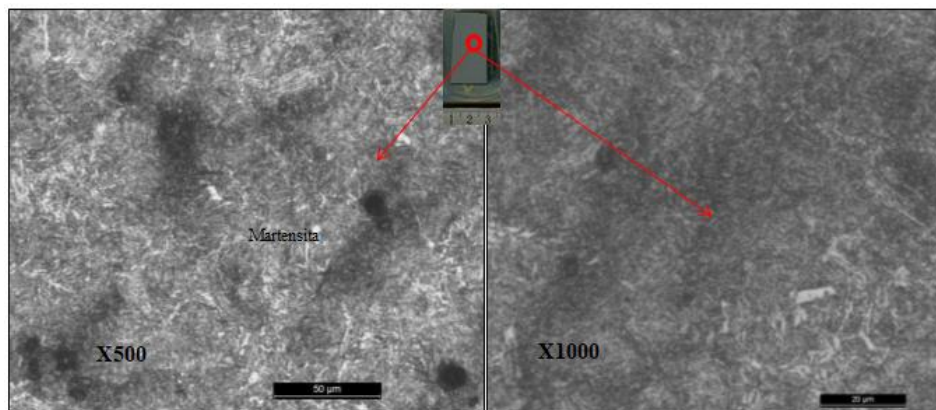
Acero	Composición Química (%)										
Metal base.	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	V
	0.411	1.220	0.008	0.008	0.310	1.330	0.201	0,085	.....	.....	.....

Tabla 4.7: Composición química del MB de R3.

### 4.3.2 Microscopía óptica realizada a las muestras de R3.

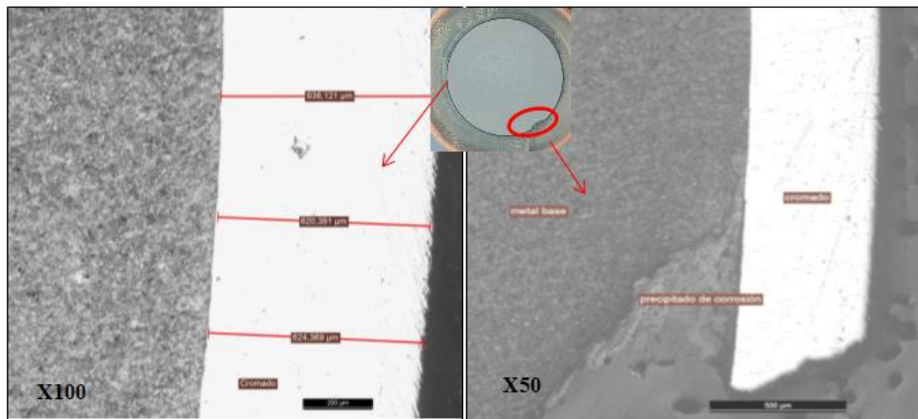
La microestructura presente en el MB se muestra en dos micrografías de aumento X500 y X1000 en la figura 4.18. La misma se compone de martensita revenida y bainita.

Figura 4.18: Microestructura del MB de R3.



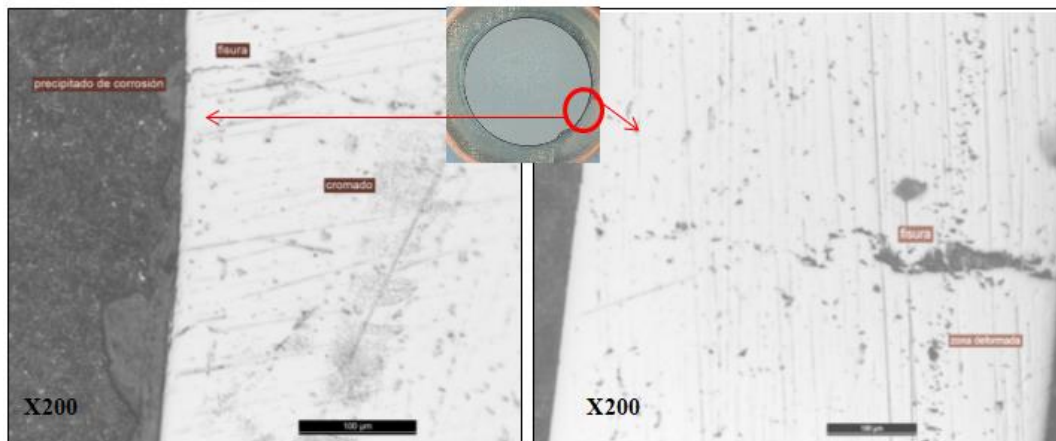
El recubrimiento de cromo se presenta en las siguientes micrografías. En la figura 4.19, la micrografía X100 muestra el espesor del cromado en tres puntos cuyo espesor promedio es de 630 µm. La micrografía X50 muestra precipitados de corrosión debajo de un cromado fracturado.

Figura 4.19: Micrografías del cromado de R3.



En la figura 4.20 se observa una fisura en el cromado contaminado que termina en el MB donde se encuentran los precipitados de corrosión.

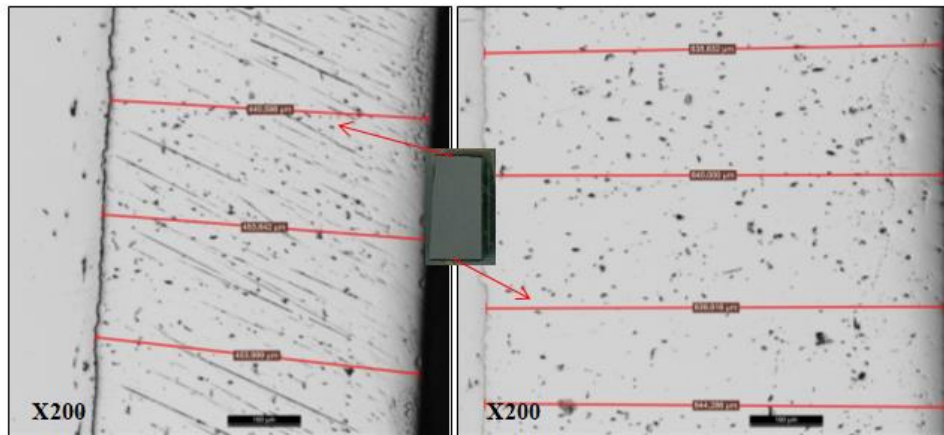
Figura 4.20: micrografías del cromado de R3.



La figura 4.21 presenta dos micrografías de aumento X200 donde se mide el espesor del cromado. El espesor medio del cromado superior de la muestra es de 450µm, mientras que el de la parte inferior es de 640µm. Esta diferencia, entre el espesor del cromado superior y el inferior, es consecuencia del desgaste localizado causado por una interferencia excesiva de contacto sobre la línea de sello con el elastómero del estator. También se observa un cromado poroso en ambas micrografías.

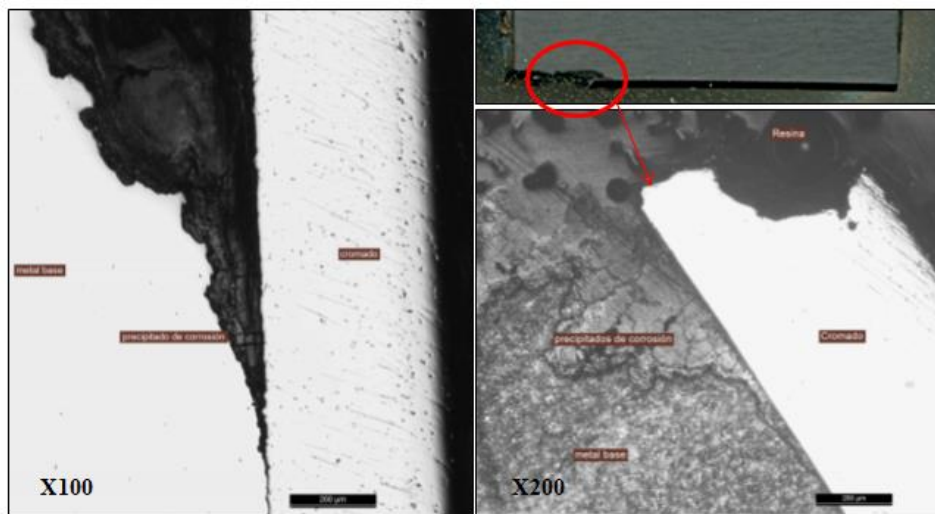
Figura 4.21: Micrografía del cromado de R3.





La figura 4.22 muestra un cromado fracturado y productos de precipitado de cromo debajo del mismo.

Figura 4.22: Micrografía del cromado de R3.



La corrosión por picado generó el desprendimiento del recubrimiento de cromo y los precipitados de cromo observados se produjeron por el acceso de los fluidos corrosivos hacia el metal base a través de las microfisuras que crecieron por estar sometidos a esfuerzos de tracción como consecuencia de una interferencia excesiva entre el rotor y estator.

Del informe químico de seguimiento de pozo en el cual estuvo funcionando este rotor, que se encuentra en el ANEXO 6: “SEGUIMIENTO DE POZO CB47”, se tiene que el lodo presenta un pH igual a 7 (neutro); una alcalinidad de 266 m/L CO<sub>3</sub>Ca (alta) y presencia de CO<sub>2</sub>.

### 4.3.3 Barridos de microdureza realizados a las muestras de R3.

El barrido de microdureza sobre el MB se presenta en la tabla 4.8 y los valores representan una microestructura de martensita revenida y bainita.

MB de rotor R3.		
N° impronta	HV	HRC
1	281,7	21,2
2	289,1	28,3
3	267,6	25,2
4	261,5	24,2
5	281,6	27,3
6	286,2	28
7	281,2	27,3
8	287	28,1
9	234,6	19,1
10	256	23,3

Figura 4.8: valores de microdureza medidos en el MB.

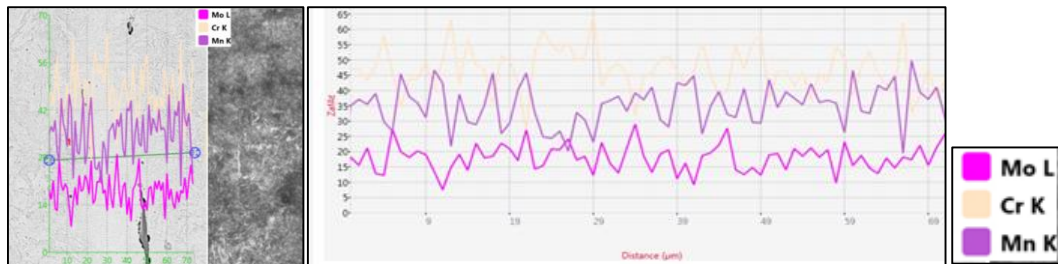
### 4.3.4 Microscopía electrónica de barrido con análisis EDS al MB de R3.

La figura 4.23 muestra como varía el porcentaje en peso de los elementos de aleación Cr, Mo y Mn en una línea sobre el MB que presenta una microestructura de martensita revenida y bainita a través de un análisis EDS.

Se observa que cuando el porcentaje en peso del manganeso (Mn) aumenta, el porcentaje en peso del cromo (Cr) y del molibdeno (Mo) disminuyen. El manganeso es un elemento gammágeno que amplía la región austenítica del acero y motiva la generación de una microestructura martensítica. El cromo y molibdeno, son elementos alfégenos que promueven la formación la ferrita evitando la transformación martensítica.

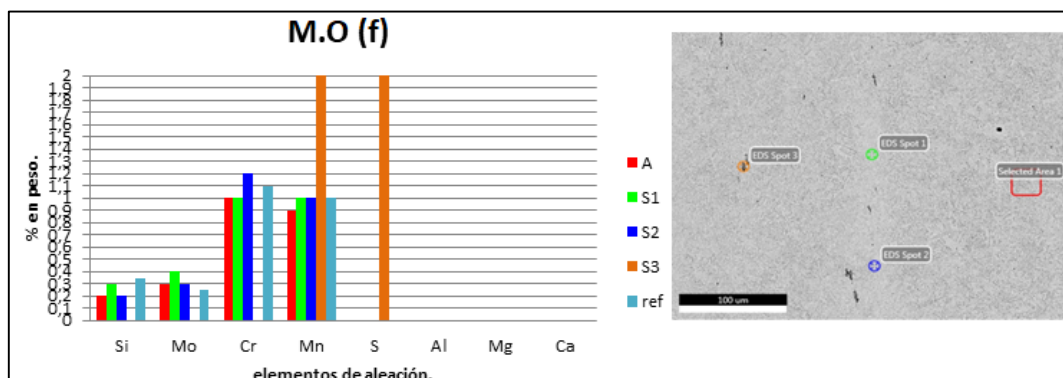
Por lo tanto, cada máximo de porcentaje en peso de manganeso indica la presencia de martensita, y cada máximo de molibdeno y cromo indica la presencia de una microestructura bainítica.

Figura 4.23: Variación del porcentaje de los elementos de aleación en el MB.



La figura 4.24 presenta un espectro de composición química en tres puntos y un área por análisis EDS en el MB. A la derecha aparece la micrografía tomada por SEM.

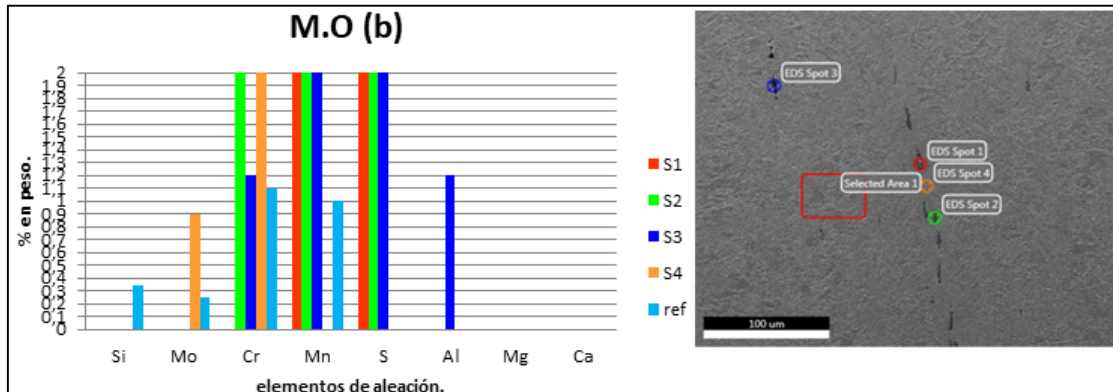
Figura 4.24. Espectro y micrografía de la M.O sobre composición química.



El área A, de color rojo, presenta una composición química promedio similar a la composición de referencia (ref.), en color celeste, del acero según bibliografía [8]. La microestructura presente en el área es de martensita revenida, ya que el material presenta un tratamiento térmico de temple y revenido. El punto 1 (S1) y el punto 2 (S2) presentan un espectro químico similar al de referencia. El punto 3 (S3), de color naranja, fue tomado sobre una inclusión de sulfuro de manganeso (SMn) representado en el espectro solo por porcentaje en peso de manganeso y azufre.

La figura 4.25, presenta un análisis EDS en cuatro puntos y un área.

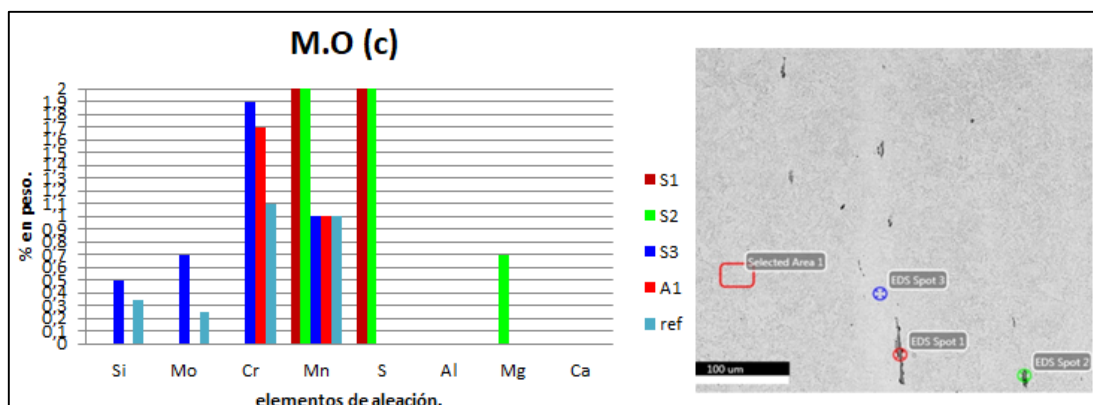
Figura 4.25: Espectro químico y micrografía en M.O.



El punto 1 (S1), indica la presencia de una inclusión de sulfuro de manganeso. El punto 2 (S2), indica una inclusión de sulfuro de manganeso y carburo de cromo (color negro). El punto 3 (S3) presenta una inclusión de sulfuro de manganeso (color gris claro) con óxido de aluminio y cromo (color negro). El punto 4 (S4), presenta un espectro de molibdeno y cromo que representa la composición de una microestructura bainítica.

Del análisis EDS que se presenta en la figura 4.26, se observa que:

Figura 4.26: Análisis EDS en M.O

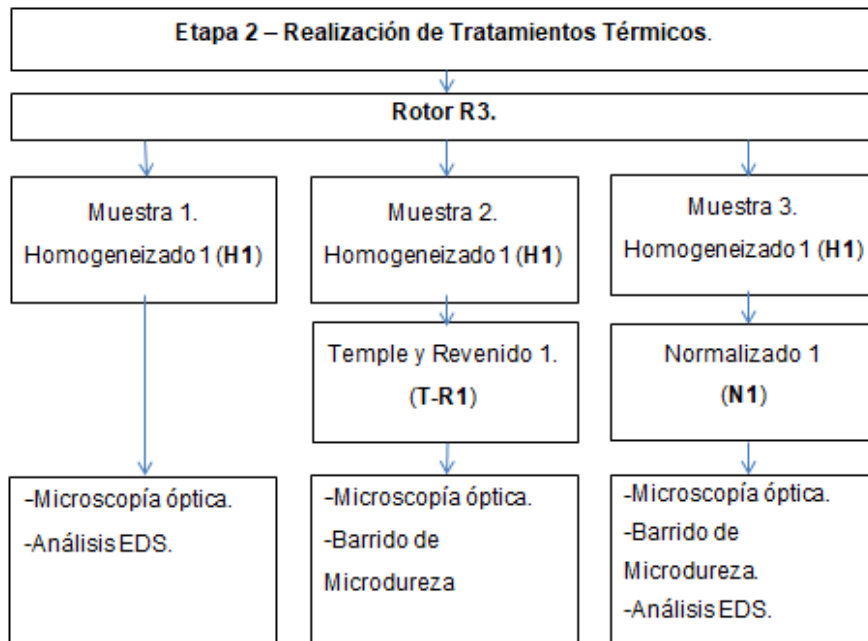


El área 1 (A1), presenta un espectro de cromo y manganeso, representando una microestructura de martensita. El punto 1 (S1), marca la presencia de una inclusión de sulfuro de manganeso. El punto 2 (S2), señala la presencia de una inclusión de sulfuro de manganeso en un óxido de magnesio (color negro). El punto 3 (S3), presenta segregación de Cr y representa una microestructura de martensita revenida.



## ETAPA 2.

Esta etapa presenta los resultados de las actividades definidas en relación a la segregación química caracterizada en el MB de los tres rotores. El siguiente esquema establece las actividades realizadas

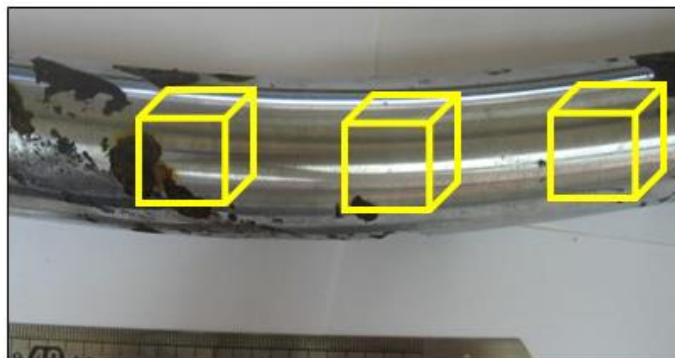


Para el desarrollo se utilizó el rotor R3, dado que el MB en los tres rotores se corresponde a un acero AISI-SAE 4140 segregado.

#### 4.4 Realización de tratamientos térmicos al MB AISI-SAE 4140.

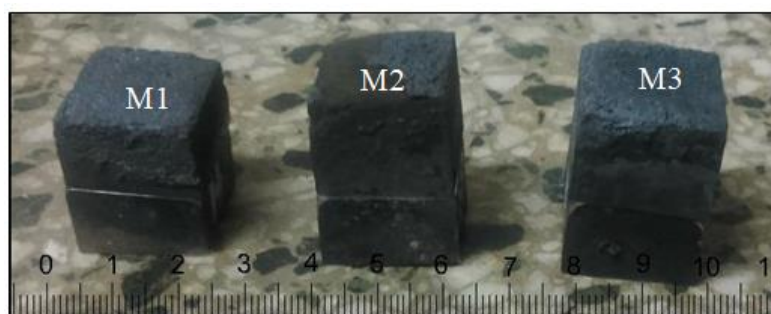
Se extrajeron del rotor R3 muestras a las que se le realizaron tratamientos térmicos de homogeneizado, normalizado y temple y revenido. En la figura 4.27 se indica sobre el rotor la geometría de las tres muestras a extraer.

Figura 4.27: Rotor R3 donde se indica la geometría de las muestras.



La figura 4.28 presenta las muestras M1, M2 y M3, con un área promedio de 400 mm<sup>2</sup> cada muestra, extraídas del rotor para la realización de los tratamientos térmicos.

Figura 4.28: Muestras extraídas para la realización de los tratamientos térmicos.



#### 4.5 Homogeneizado H1 realizado a las tres muestras M1, M2, M3.

Las muestras M1, M2 y M3 se homogeneizaron térmicamente con los parámetros que se presentan, a continuación, en la tabla 4.9.

Homogeneizado 1 (H1)	
Temperatura de Austenización [15]. [°C]	1200
Tiempo de Austenización. [s]	3600
Modo de enfriamiento.	Dentro del horno.

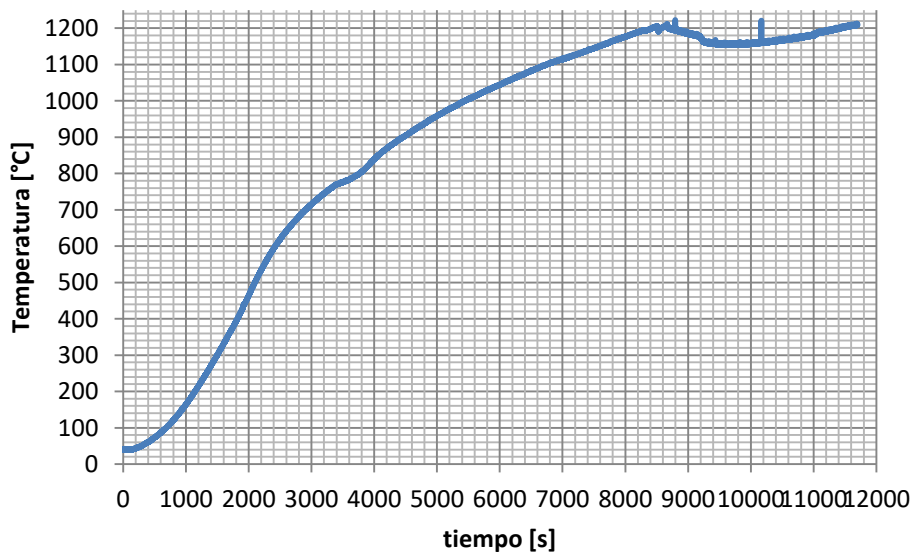
Tabla 4.9: Tratamiento térmico H1 realizado a las muestras M1, M2, M3.

El tiempo de austenización se estimó en base a la solución gaussiana de la segunda Ley de Fick, donde se tomó como referencia el tiempo de difusión de los elementos químicos Manganeso (Mn) y Cromo (Cr) en la Austenita. El cálculo de esta estimación se detalla en el ANEXO 1: “ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE HOMOGENEIZADO”.

Las probetas se colocaron dentro del horno cubiertas con viruta de fundición, para generar una atmósfera y mantener un potencial de carbono que evite la descarburización [24] de las mismas durante el tratamiento térmico.

La curva de calentamiento del horno para este tratamiento se muestra en la figura 4.21, donde se observa la pendiente de calentamiento y el tiempo de austenización. Los datos se obtuvieron a través de una termocupla tipo “K” acoplada a un sistema de adquisición de datos.

Figura 4.21: Curva de calentamiento del horno.

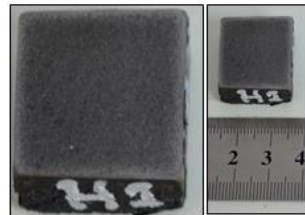




## 4.6 Resultados de la muestra M1.

La figura 4.29 presenta una macrografía de la muestra M1 luego de realizado el tratamiento térmico de homogeneizado H1 y preparada para su caracterización por M.O y SEM.

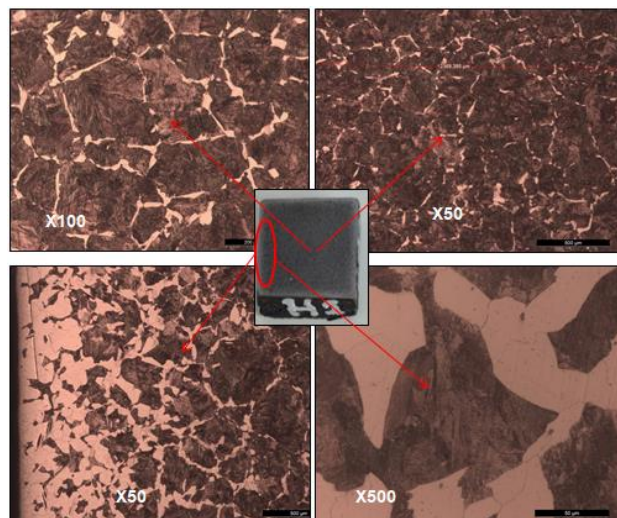
Figura 4.29: MB de la muestra M1 homogeneizada.



### 4.6.1 Microscopía óptica realizada a M1.

La figura 4.30 presenta las micrografías del MB.

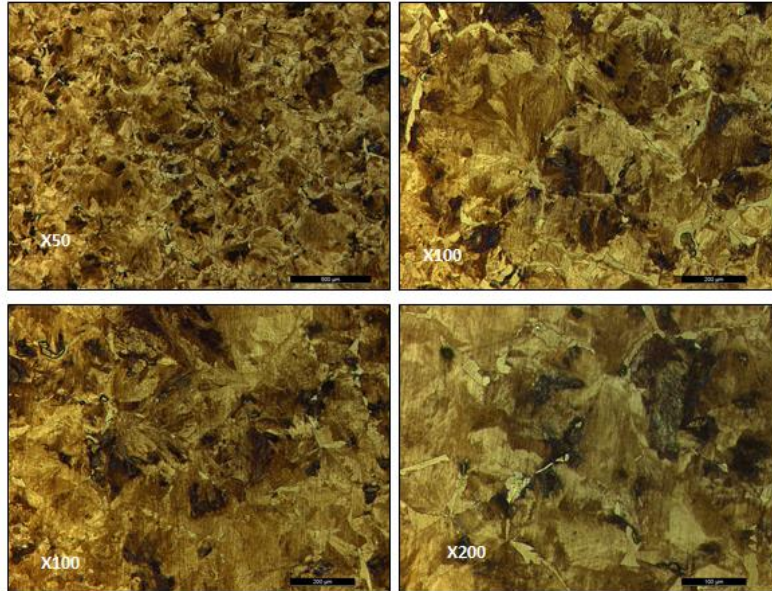
Figura 4.30: Micrografías del MB de la muestra M1.



La microestructura presente, está formada por una matriz perlítica de apariencia oscura y ferrita, en borde de grano, de apariencia brillante. La micrografía X50 presenta el descarbonizado en el borde de la muestra, generado durante el tratamiento por una atmósfera pobre en carbono. El tamaño de grano medido fue ASTM 4.

La figura 4.31 presenta las micrografías del MB que revelan segregación química.

Figura 4.31: Micrografía del MB que revela segregación.

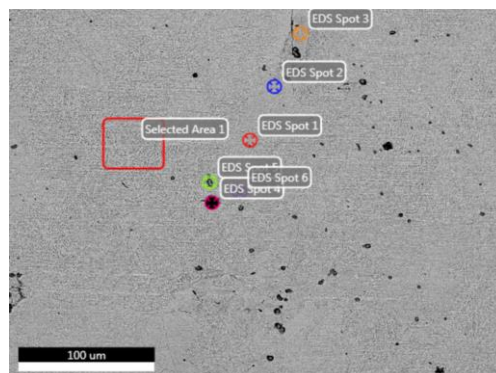


En el borde de grano se observa ferrita (color amarillo brillante) y dentro del grano zonas de color negro, marrón y amarillo que representan el crecimiento dendrítico de la perlita observando segregación dendrítica.

#### **4.6.2 Análisis EDS realizado a M1.**

La figura 4.32 presenta una micrografía obtenida con SEM del MB, indicando el área y los puntos analizados con EDS. La tabla 4.10 presenta los resultados del análisis.

Figura 4.32: Micrografía SEM del MB de la muestra M1.



	Elementos (% en peso)					
	Si	Mo	Cr	Mn	Mg	Fe
<b>bibliografía</b>	0.15-0.35	0.15-0.25	0.8-1.1	0.75-1.0		Resto.
<b>EDS Spot 1</b>	0.5	0.3	1.3	1.3		96.7
<b>EDS Spot 2</b>	0.3	0.2	1.2	0.9		97.3
<b>EDS Spot 3</b>	0.3	0.3	1.3	1.0		97.2
<b>EDS Spot 4</b>					65.5	34.5
<b>EDS Spot 5</b>	0.1	2.3	2.4	3.1		92.2
<b>EDS Spot 6</b>	0.3	0.5	1.7	1.3		96.3
<b>Área 1</b>	0.3	0.3	1.2	0.9		97.3

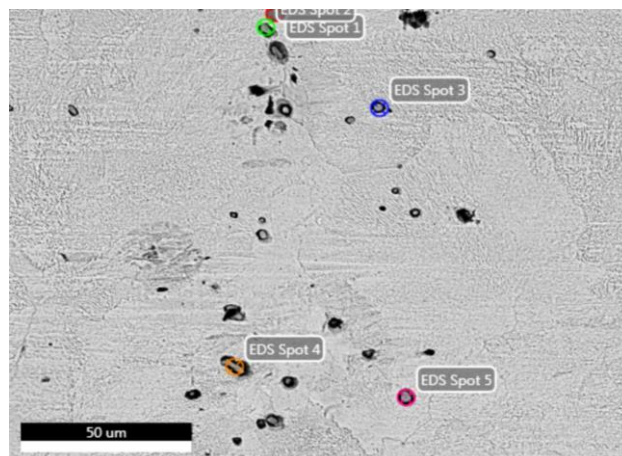
Tabla 4.10: Análisis EDS del MB de la muestra M1.

El Spot 1 presenta segregación de Si, Cr y Mn; el Spot 2 y el Spot 3 presentan segregación de Cr y se ubican, ambos puntos, sobre la microestructura ferrita. El Spot 4 indica una inclusión de óxido de magnesio.

El Spot 5 indica un carburo compuesto por Mo, Cr y Mn. El Spot 6 presenta segregación de Mo, Cr y Mn, de color negro, representando un óxido. El área 1 presenta una composición homogénea comparada con la obtenida en bibliografía.

La figura 4.33 muestra una micrografía donde se indica los puntos de análisis EDS. La tabla 4.11 presenta los resultados del análisis.

Figura 4.33: Micrografía SEM del MB de la muestra M1.



	Elementos (% en peso)						
	Si	Mo	Cr	Mn	Mg	S	Fe

<b>EDS Spot 1</b>			56.8		32.1	11.1
<b>EDS Spot 2</b>			54.0		29.8	16.2
<b>EDS Spot 3</b>		5.0	14.7		31.7	48.6
<b>EDS Spot 4</b>	5.4		57.9		31.2	5.5
<b>EDS Spot 5</b>		1.5	51.0		29.2	18.2

Tabla 4.11: Análisis EDS realizado al MB de la muestra M1.

Los puntos Spot 1 y 2 indican una inclusión de sulfuro de manganeso SMn. El Spot 3 representa una inclusión de SMn dentro de un carburo de cromo de la forma  $Cr_7C_3$ . El Spot 4 indica una inclusión de SMn dentro de un carburo de molibdeno y el Spot 5 una inclusión de SMn.

#### 4.7 Resultados de la muestra M2.

Luego de realizado el homogeneizado H1 a la muestra M2, se le realizó un tratamiento térmico de temple y revenido T-R1 cuyos parámetros se presentan en la tabla 4.12.

Para realizar este tratamiento térmico, se calculó los diámetros críticos del acero para asegurarse que luego del temple la microestructura sea 50% martensita en el centro de las muestras. En el ANEXO 2: “DETERMINACIÓN DE LA TEMPLABILIDAD DEL ACERO”, se encuentran los cálculos realizados.

Temple.	
Temperatura de Austenización. [8] [°C]	850
Tiempo de Austenización. [s]	3600
Medio de temple/enfriamiento.	H = 0.5 / aceite
Revenido.	
Temperatura de revenido, [°C]	600
Tiempo de revenido, [s]	4800
Medio de enfriamiento.	Al aire/temperatura ambiente.

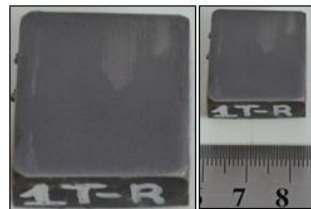
Tabla 4.12: Parámetros del tratamiento térmico TR-1 realizado al MB de la M2.

El tiempo de revenido se calculó según las expresiones dadas en el ANEXO 3: “FÓRMULA PARA CALCULAR EL TIEMPO DE REVENIDO”.

#### 4.7.1 Microscopía óptica realizada a M2.

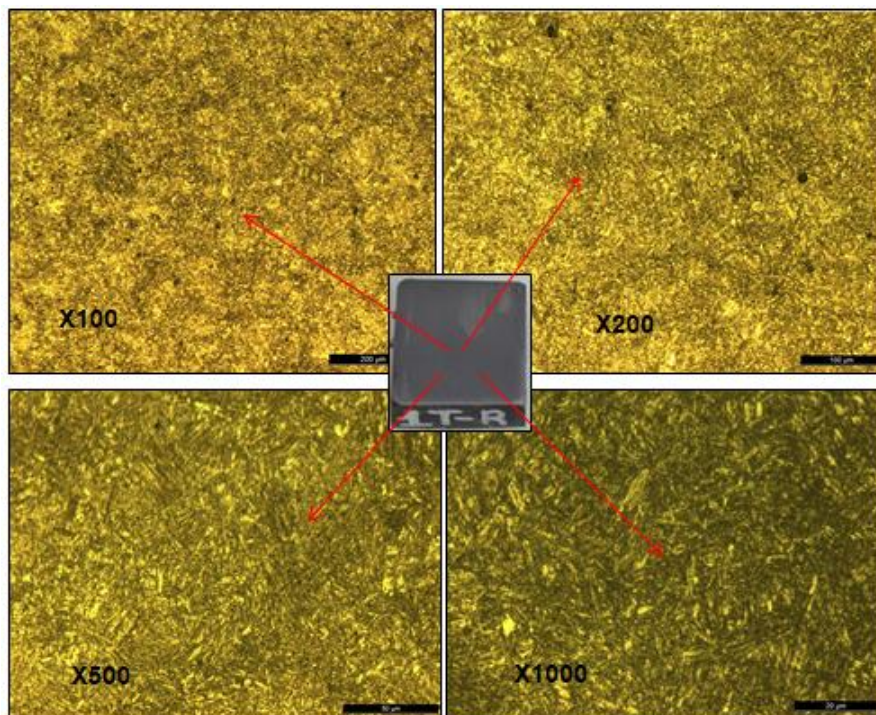
La figura 4.34 presenta la muestra M2 templada y revenida que se observó con el microscopio óptico.

Figura 4.34: Muestra M2 con tratamiento térmico TR-1.



La figura 4.35 presenta cuatro micrografías de la microestructura del MB tomadas a distintos aumentos.

Figura 4.35: Microestructuras de la muestra templada y revenida M2.



Se observa martensita revenida, bainita y en algunas zonas martensita sin revenir. Esta última se presenta con una apariencia brillante en forma de agujas.

#### **4.7.2 Barrido de microdureza realizado a M2.**

La tabla 4.13 presenta los valores de microdureza barridos sobre el MB. Las improntas se indican en una macrografía junto a la tabla.

N° de impronta	Dureza HV
1	307,6
2	323,3
3	298,9
4	312,9
5	307,3
6	311,6
7	311,3
8	313,1
9	307,7
10	317,6



Tabla 4.13: Barridos de microdureza sobre la muestra templada y revenida.

Los valores de microdureza medidos están dentro de los especificados [8] [7] para la martensita revenida y la bainita .

#### **4.8 Resultados de la muestra M3.**

Se le realizó un tratamiento térmico de normalizado N1 a la muestra M3 homogeneizada, con el objetivo de evitar la formación de una microestructura de martensita.

La tabla 4.14 presenta los parámetros del tratamiento N1.

Normalizado.	
Temperatura de Austenización. [7] [°C]	900
Tiempo de austenización, [s]	4800
Medio de enfriamiento.	Al aire/temperatura ambiente.

Tabla 4.14: Parámetros del tratamiento térmico N1 realizado a la muestra M3.

El tiempo de austenización para este tratamiento se estimó con la siguiente expresión empírica [17]:

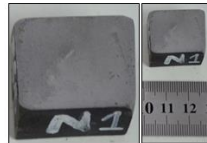
$$t = 60 + D$$

- $t$  : tiempo [min]
- $D$ : Diámetro máximo de la pieza [mm]

#### 4.8.1 Microscopía óptica realizada a M3.

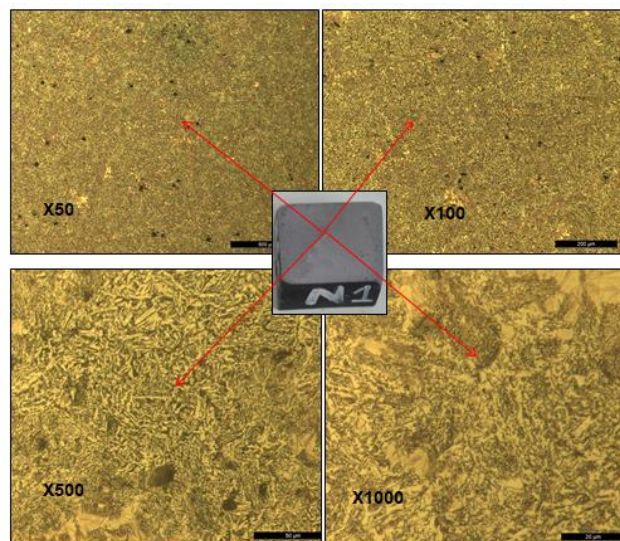
La figura 4.36 presenta la muestra M3 con tratamiento N1, que se observó en el microscopio óptico.

Figura 4.36: Macrografías de la muestra M3 con tratamiento N1 .



La figura 4.37 presenta la microestructura del MB a distintos aumentos.

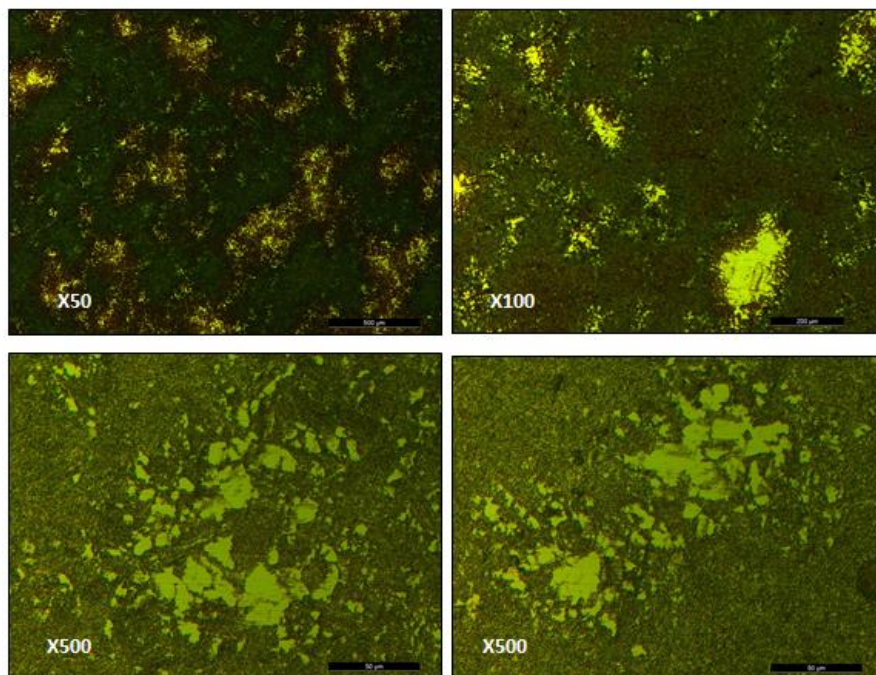
Figura 4.37: Micrografías de la muestra M3 normalizada.



Se observa bainita con martensita sin revenir. La martensita sin revenir presenta una apariencia brillante en forma de agujas y formando islas como se aprecia en la micrografía con aumentos X500 y X1000; mientras que la bainita presenta una apariencia oscura. La generación de martensita es un indicio, de que hay regiones segregadas con elementos de aleación que provocan un temple local durante el enfriamiento.

La siguiente figura 4.38 presenta las micrográficas que revelan segregación en la muestra.

Figura 4.38: Micrográficas que revelan segregación en la muestra M3.



Las micrográficas muestran zonas segregadas en forma de lagunas de color verde claro y apariencia brillante asociadas a la martensita sin revenir. La matriz presenta una microestructura de color verde oscuro asociada a bainita superior.

#### **4.8.2 Barrido de microdureza realizado a M3.**

La siguiente tabla 4.15 presenta los valores del barrido de microdureza junto a una macrografía de la muestra donde se observa la zona de medición. Los valores de microdureza superiores a 342HV indican la presencia de martensita libre.



N° de impronta	Dureza HV
1	236,1
2	304
3	300,2
4	327,7
5	367,6
6	343,5
7	344,6
8	313,9
9	286,7
10	455,3

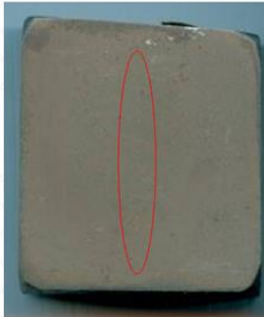
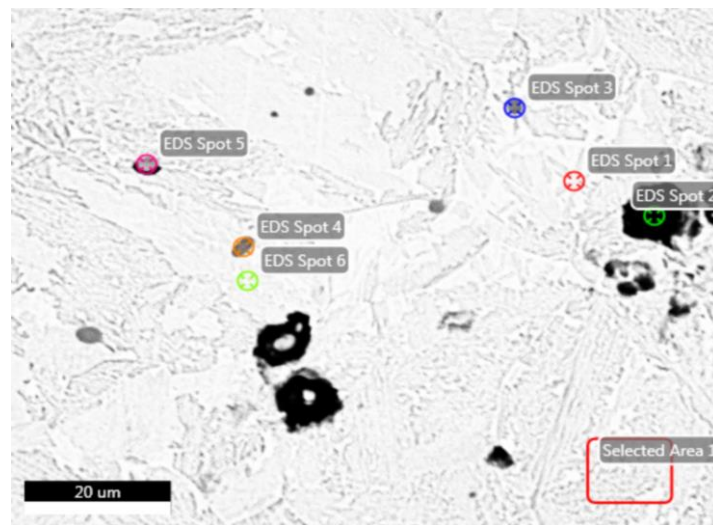


Tabla 4.15: Barridos de microdureza sobre MB de la muestra M3.

### 4.8.3 Análisis EDS realizado a M3.

La figura 4.39 presenta una micrografía del MB capturada con SEM, en la cual se indica un área y puntos de análisis EDS.

Figura 4.39: Micrografía SEM de la muestra M3.



La tabla 4.16 presenta la composición química de los puntos y el área 1 que se muestran en la figura.

	Elementos (% en peso)							
	Si	Mo	Cr	Mn	S	Al	Ca	Fe
<b>bibliografía</b>	0.15-0.35	0.15-0.25	0.8-1.1	0.75-1.0	0.04>	---	---	Resto.

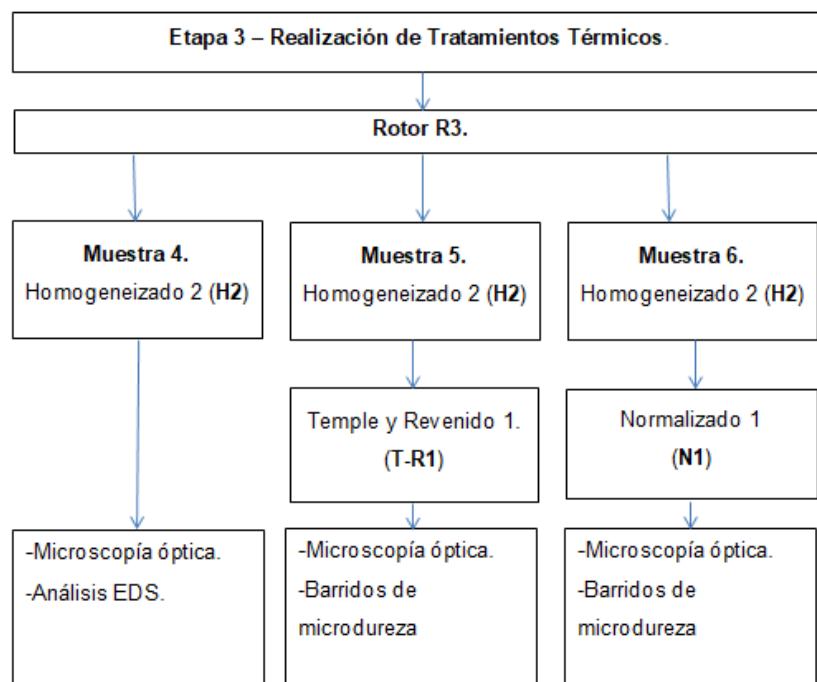
<b>Spot 1</b>	0.6	0.5	1.4	1.2				96.3
<b>Spot 2</b>	2.5		2.7	4.8	1.0	5.5	2.7	80.9
<b>Spot 3</b>				58.6	30.8			10.5
<b>Spot 4</b>				32.6	53.0			14.4
<b>Spot 5</b>				31.5	52.6			15.9
<b>Spot 6</b>	0.5	0.6	1.7	1.4				95.9
<b>Área 1</b>	0.3	0.5	1.5	1.5				96.3

Tabla 4.16: resultados del análisis EDS a la muestra M3.

El Spot 1 presenta segregación de Si, Mo, Cr y en menor proporción de Mn, y en la micrografía se encuentra en una región bainítica. El Spot 2 analiza una inclusión de color negro que presenta segregación de Si, Ca, Cr, S, Al y Mn. Los Spot 3, 4 y 5 indican segregación de Mn y S en forma de inclusión de sulfuro de manganeso SMn. El Spot 6 presenta segregación de Si, Cr, Mo; estos dos últimos elementos retardan la transformación perlítica, encontrando una microestructura de bainita. El área 1, encierra una zona con microestructura bainítica e islas de martensita libre indicando segregación en Cr, Mo y Mn.

### **ETAPA 3.**

Esta etapa presenta los resultados de un segundo tratamiento térmico de homogeneizado H2 al MB del R3, con el objetivo de lograr un material químicamente más homogéneo que el obtenido en la ETAPA 2. El siguiente esquema presenta las actividades realizadas.

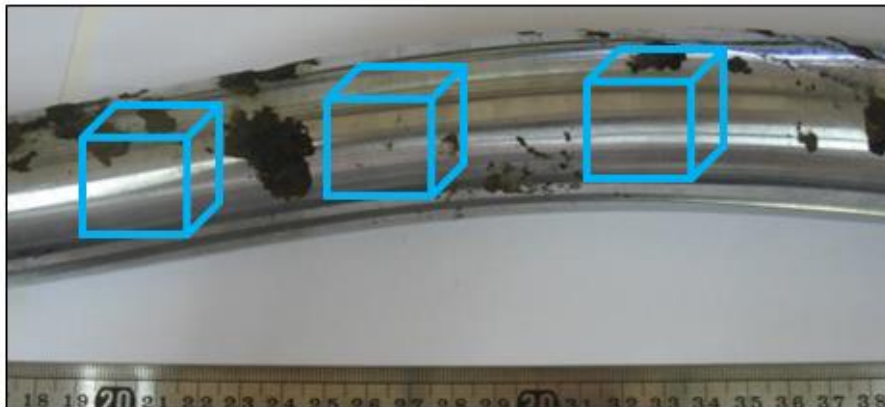


#### 4.9 Realización de los tratamientos térmicos al MB AISI-SAE 4140.

Para esta etapa, se extrajeron tres muestras denominadas M4, M5 y M6 del rotor R3 a las cuales se les realizó un tratamiento térmico de homogeneizado. A la muestra M5 luego se le realizó un temple y revenido T-R1 y a la M6 un normalizado N1.

En la figura 4.40 se observa el rotor y las zonas de extracción de las respectivas muestras.

Figura 4.40: Rotor R3.



Las muestras extraídas se presentan en la figura 4.41, donde el área de las mismas es de 400 mm<sup>2</sup> en promedio.

Figura 4.41: Muestras M4, M5 y M6 extraídas del R3.



#### 4.10 Homogeneizado H2 realizado a las muestras M4, M5 y M6.

Para la realización del tratamiento térmico de homogeneizado H2, las tres muestras denominadas M4, M5 y M6 se cubrieron con virutas de fundición, para evitar su descarburación durante el tratamiento. Los parámetros del mismo se presentan en la tabla 4.17.

Homogeneizado 2 (H2)	
Temperatura de Austenización [15]. [°C]	1200
Tiempo de Austenización. [s]	7200
Modo de enfriamiento.	Dentro del horno.

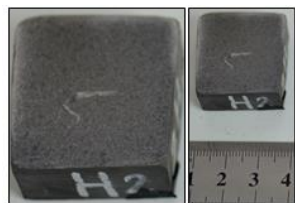
Tabla 4.17: Parámetros del tratamiento térmico de homogeneizado H2.

El tiempo de Austenización se duplicó respecto al tratamiento térmico de homogeneizado H1, para aumentar el grado de difusión de los elementos químicos segregados en el MB.

#### 4.11 Resultados de la muestra M4.

La figura 4.42 presenta la macrografía de la muestra M4 homogeneizada y preparada para su observación por M.O y SEM.

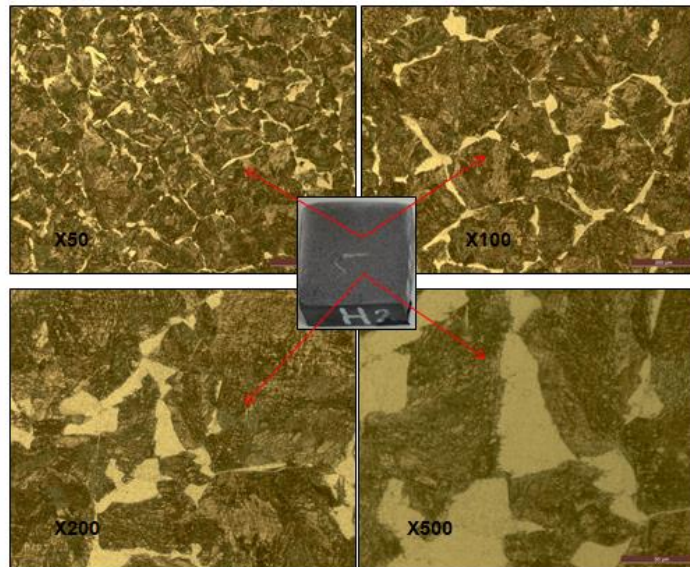
Figura 4.42: Macrografías de la muestra M4 homogeneizada H2.



##### 4.11.1 Microscopía óptica realizada a M4.

La figura 4.43 presenta las micrografías del MB a distintos aumentos.

Figura 4.43: Micrografías de M4 homogeneizada H2.

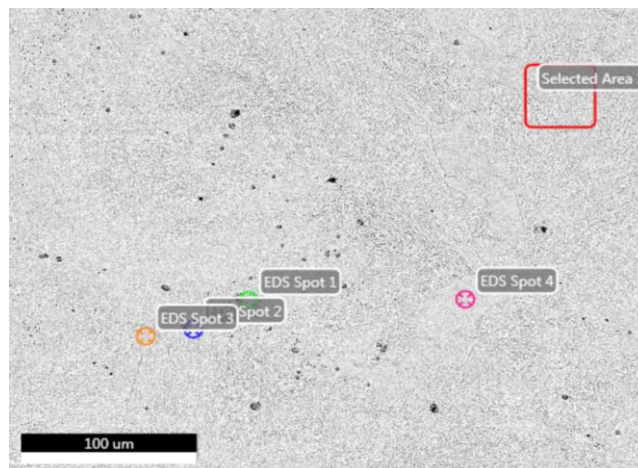


La microestructura obtenida luego del homogeneizado es una matriz de perlita con ferrita en los bordes de grano. La ferrita presenta una apariencia brillante y la perlita una apariencia oscura y opaca compuesta por ferrita y cementita.

#### 4.11.2 Análisis EDS realizado a M4.

La figura 4.44 presenta una micrografía obtenida con SEM del MB, en la cual se indica un área y puntos de análisis EDS.

Figura 4.44: Micrografía SEM de la muestra M4.



La tabla 4.18 presenta los resultados del análisis EDS indicado en la figura anterior.

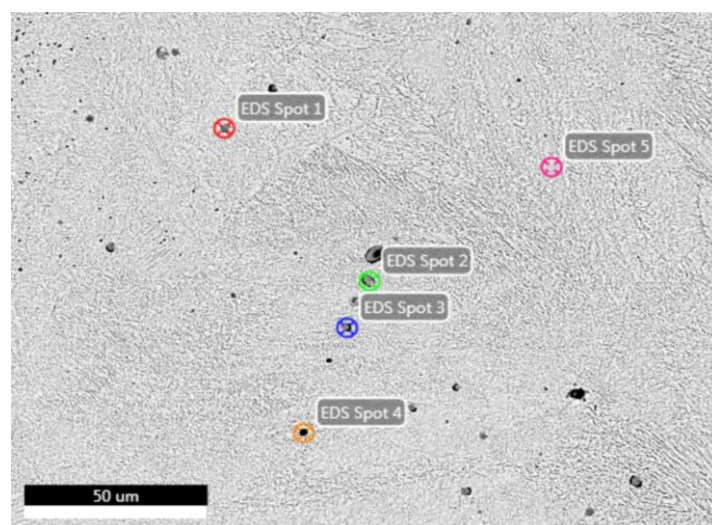
	Elementos (% en peso)					
	Si	Mo	Cr	Mn	Mg	Fe
<b>Bibliografía.</b>	0.15-0.35	0.15-0.25	0.8-1.1	0.75-1.0		Resto.
<b>EDS Spot 1</b>	0.2	0.6	1.5	1.6		96.0
<b>EDS Spot 2</b>	0.4	0.6	1.5	0.9		96.5
<b>EDS Spot 3</b>	0.2	0.4	1.4	0.9		97.1
<b>EDS Spot 4</b>	0.3	0.1	1.0	1.1		97.6
<b>Área 1</b>	0.5	0.7	1.4	1.2		96.2

Tabla 4.18: Análisis EDS de la muestra M4.

El Spot 1, situado en una microestructura perlítica, presenta segregación de Mn, Cr y Mo. El Spot 2 presenta segregación de Si, Cr y Mo, siendo los dos últimos elementos los que amplían la zona de ferrita- $\alpha$  y retardan la transformación perlítica. El Spot 3 presenta segregación de Cr y Mo. El Spot 4, situado en una región de ferrita, presenta una composición homogénea dentro de los límites establecidos en la bibliografía y el área 1 presenta segregación en Si, Mo, Cr y en menor proporción de Mn, en una región de microestructura perlítica.

La figura 4.45 presenta una micrografía capturada con SEM de la muestra, donde se analizan con EDS inclusiones.

Figura 4.45: Micrografía de M4 capturada con SEM.



La tabla 4.19 presenta los resultados del análisis EDS.

	Elementos (% en peso)						
	Si	Mo	Cr	Mn	Al	S	Fe
EDS Spot 1				31.1		50.5	18.4
EDS Spot 2			2.1	39.8		23.7	34.4
EDS Spot 3			8.0	12.9		24.4	54.7
EDS Spot 4	0.5	0.5	5.5	2.9	30.5	31.2	60.1
EDS Spot 5	0.5	0.5	1.9	1.6			95.4

Tabla 4.19: Resultados del análisis EDS.

El Spot 1 representa una inclusión de sulfuro de manganeso SMn. El Spot 2 y 3 una inclusión SMn dentro de un carburo de cromo (color negro) de la forma  $Cr_7C_3$ . El Spot 4 representa un óxido de aluminio con segregación de S, Cr y Mn. El Spot 5 indica segregación de Si, Mo, Cr y Mn.

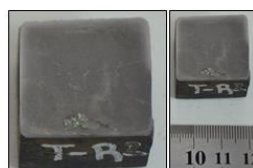
## 4.12 Resultados de la muestra M5.

A la muestra M5 homogeneizada se le realizó un tratamiento térmico de temple y revenido T-R1 para obtener las propiedades mecánicas finales del material. Los parámetros de T-R1 son los mismos que aparecen en la tabla 4.12 de la sección 4.7.

### 4.12.1 Microscopía óptica realizada a M5.

La figura 4.47 presenta la muestra M5 preparada para la observación del MB en el microscopio óptico.

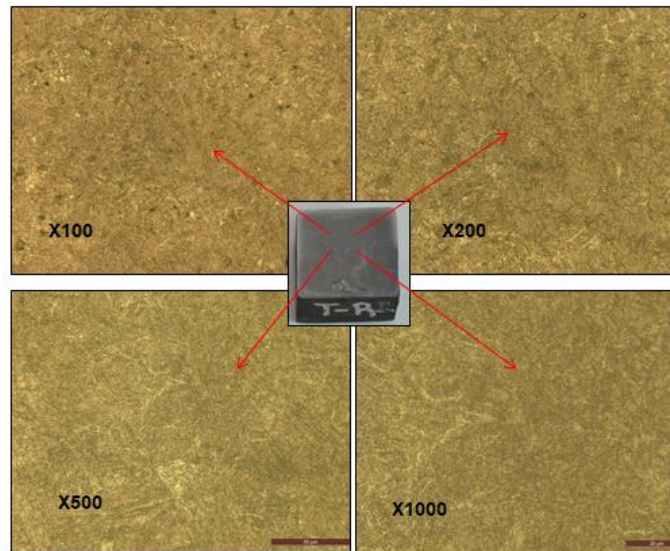
Figura 4.47: Macrografías de la muestra M5 templada y revenida.





La figura 4.48 presenta las micrografías del MB a distintos aumentos.

Figura 4.48: Micrografías de la muestra "T-R2".



La microestructura presente es martensita revenida en su totalidad.

#### 4.12.2 Barrido de microdureza realizado a M5.

La tabla 4.20 presenta los valores de microdureza medidos en la muestra y la imagen que acompaña a la tabla indica la zona donde se realizaron las improntas.

N° de impronta	Dureza HV
1	295,1
2	269,2
3	274,7
4	280,7
5	273,8
6	280,9
7	285,8
8	258,4
9	254,5
10	266,2

Tabla 4.20: Barrido de microdureza sobre M5 templada y revenida.

Los valores de microdureza representan a una microestructura de martensita revenida.

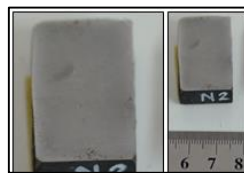
### **4.13 Resultados de la muestra M6.**

Se le realizó un tratamiento térmico de normalizado N1 a M6 para conseguir una microestructura libre de martensita. Los parámetros del tratamiento N1 son los mismos que los presentados en la tabla 4.14 de la sección 4.8.

#### **4.13.1 Microscopía óptica realizada a M6.**

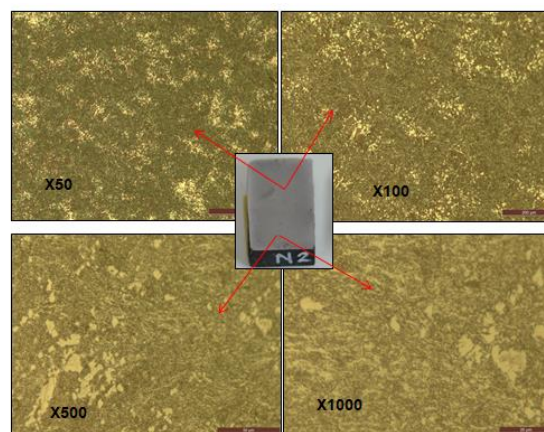
La figura 4.49 presenta la muestra M6 normalizada y preparada para su observación en el M.O.

Figura 4.49: Macrografía de la muestra M6 normalizada.



La figura 4.50 muestra las micrografías del MB a distintos aumentos.

Figura 4.50: Micrografías de la muestra M6 normalizada.



La microestructura observada consiste de bainita y martensita sin revenir. La martensita libre se presenta con una apariencia brillante, en forma de islas, en la matriz bainítica de apariencia oscura.

#### **4.13.2 Barrido de microdureza realizado a M6.**

La tabla 4.21 presenta los valores de microdureza barridos en el MB de la muestra. La figura que acompaña a la tabla muestra la zona donde se realizaron las improntas.

N° de impronta	Dureza HV
1	312,2
2	305,0
3	298,5
4	305,0
5	294,5
6	282,7
7	315,2
8	373,7
9	325,1
10	314,3

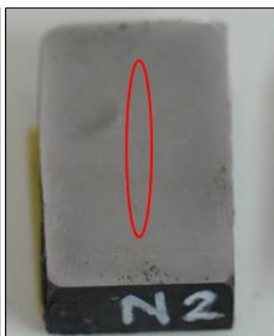


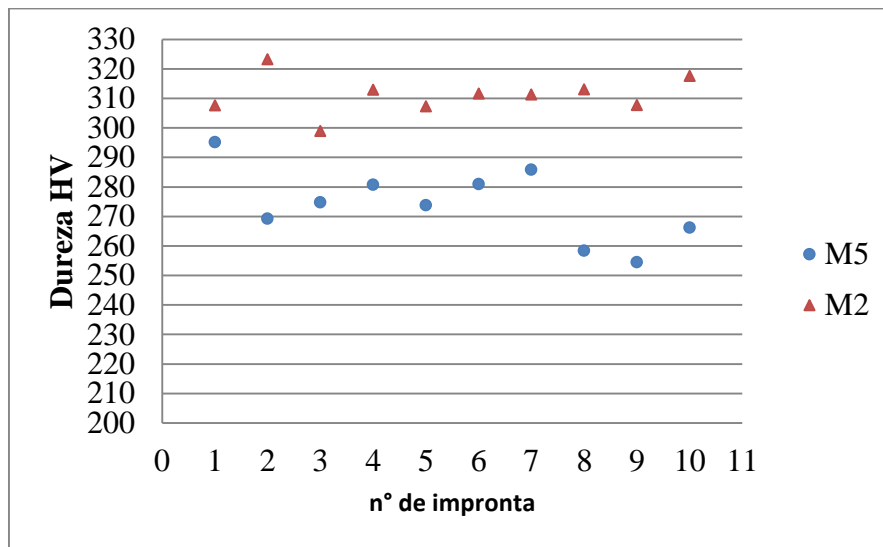
Tabla 4.21: Barridos de microdureza.

Se observa una marcada variación, en los valores de microdureza, debido a la presencia de dos microestructuras muy distintas. El valor de 373 HV, de la impronta n° 8, es característico de la martensita libre [7].

#### **4.14 Comparación entre los barridos de microdureza de las muestras M2 y M5.**

A continuación el gráfico de la figura 4.51 compara los barridos de microdureza realizados en las muestras M2 y M5.

Figura 4.51: Comparación de los barridos de microdureza de las muestras M2 y M5.

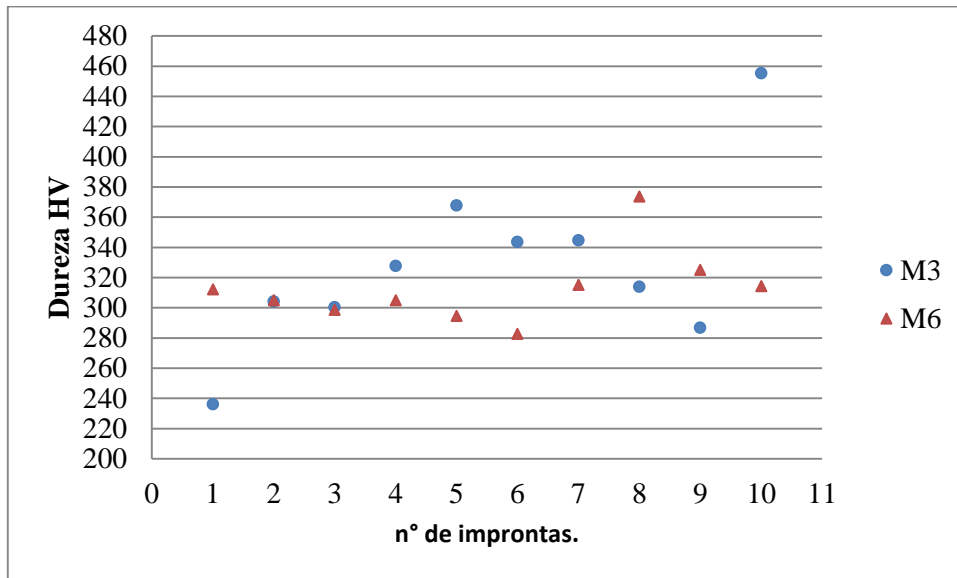


Se observa que los valores de microdureza en la muestra M5 están por debajo de los 300 HV, lo que indica la presencia de martensita revenida. La muestra M2, presenta valores de dureza mayores a 300 HV, que se corresponden a una microestructura más dura como martensita sin revenir. Esto se debe a que la muestra M5 fue homogeneizada el doble de tiempo con respecto a la muestra M2 generando una mayor disminución de los elementos químicos segregados.

#### 4.15 Comparación entre los barridos de microdureza de las muestras M3 y M6.

La figura 4.52 presenta un gráfico que compara los barridos de microdureza entre las muestras M3 y M6.

Figura 4.52: Comparación entre los barridos de microdureza de M3 y M6.

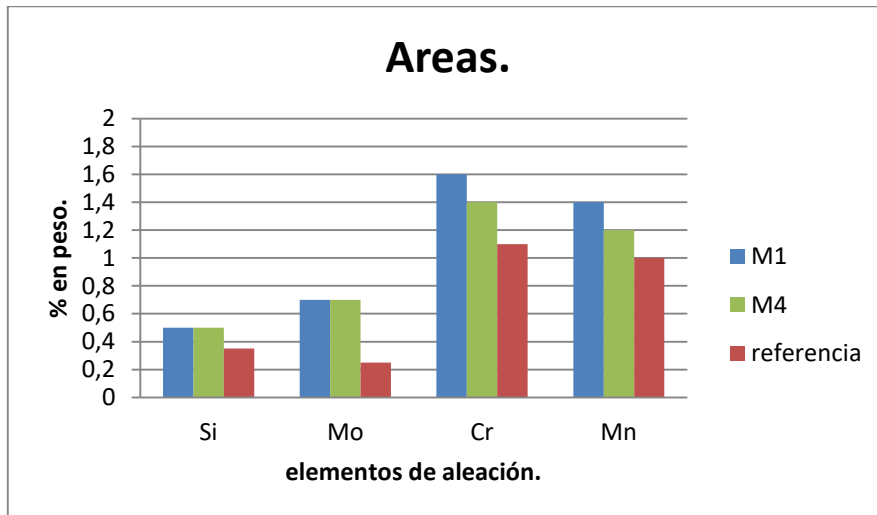


La muestra M6 presenta dos valores de microdureza que superan los 320 HV. La muestra M3 presenta cinco valores superiores a los 320 HV. Estos valores, superiores a los 320 HV, representan la dureza de una microestructura de martensita libre; con lo cual la M6 presenta menores zonas con martensita libre que la M3 como consecuencia de la disminución en la segregación química del MB.

#### 4.16 Comparación de análisis EDS en muestras M1 y M4.

La figura 4.44 compara los porcentajes en peso, obtenidos por EDS, de los elementos de aleación presentes en la muestra M1 y M4.

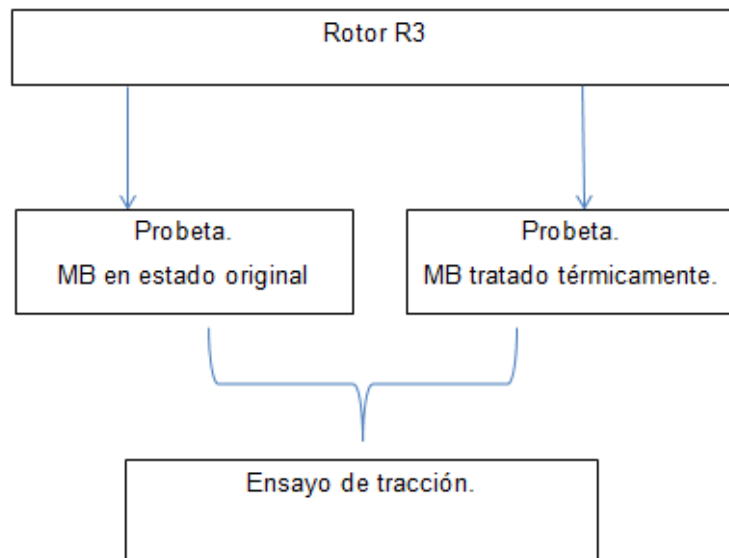
Figura 4.44: Comparación de espectros EDS de las muestras M1 y M4.



Se observa que la concentración, en porcentaje en peso, de los elementos de aleación en la M4 presentan menor desvío si lo comparamos con la muestra M1.

#### **ETAPA 4.**

En esta etapa se presentan los resultados de los ensayos de tracción realizados a dos probetas extraídas del rotor R3. El siguiente esquema representa las actividades realizadas.



#### 4.17 Ensayo de tracción a probeta de MB en estado original.

La figura 4.53 presenta la probeta mecanizada, de un extremo de rotor R3, en estado original y la figura 4.54 la probeta luego de realizado el ensayo de tracción.

Figura 4.53: Probeta de acero AISI-SAE 4140 en estado original.

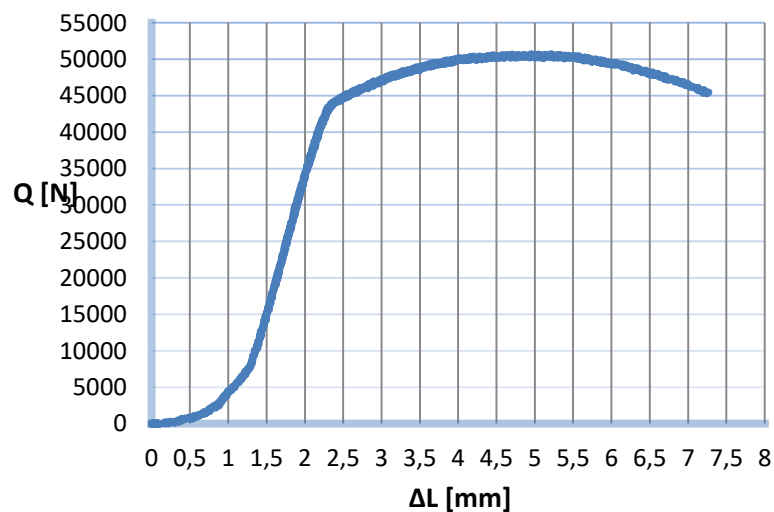


Figura 4.54: Probeta fracturada de acero AISI-SAE 4140 en estado original.



La figura 4.55 muestra la gráfica de Carga-Desplazamiento  $Q-\Delta L$  registrada durante el ensayo y la tabla 4.22 los valores correspondientes a carga de fluencia, carga máxima, carga de rotura y desplazamiento.

Figura 4.55: Curva  $Q-\Delta L$  registrado durante el ensayo de tracción.



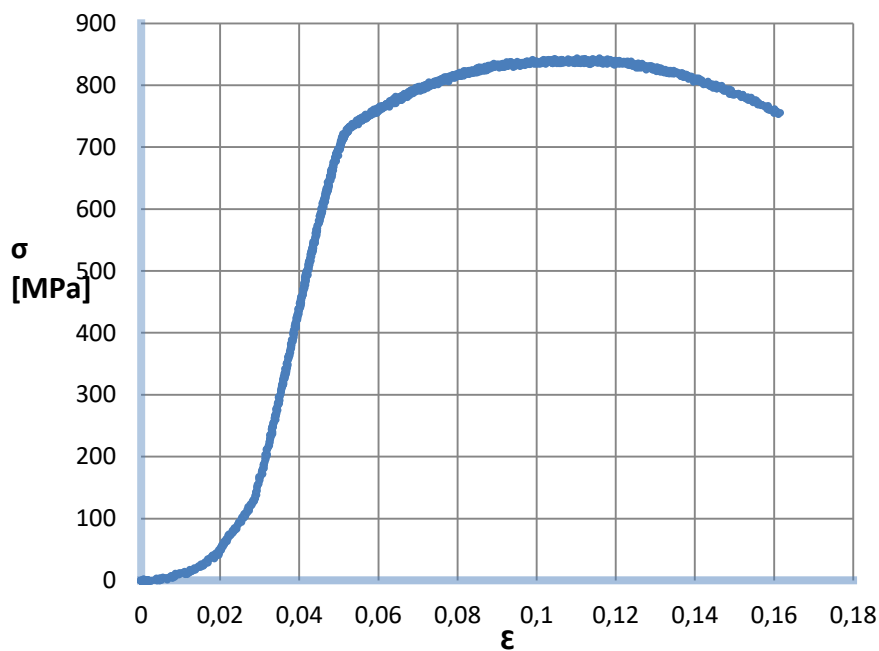


Parámetro.	Unidades.	Valor.
Carga de Fluencia. $Q_{fl}$ .	N	43000
Carga Máxima. $Q_{max}$ .	N	50773,8
Carga de Rotura. $Q_r$ .	N	4546,2
Desplazamiento. $\Delta L$	mm	7,269
Área de la probeta inicial. $A_0$	mm <sup>2</sup>	63,617

Tabla 4.22: Resultados del ensayo de tracción.

La figura 4.56 presenta la gráfica de Tensión-Deformación  $\sigma$ - $\epsilon$  correspondiente a la gráfica de  $Q$ - $\Delta L$  de la figura 4.55. La tabla 4.23 muestra los valores de tensión de fluencia, tensión máxima y tensión de rotura calculados en función de los valores registrados en la tabla 4.22.

Figura 4.56: Gráfica de  $\sigma$ - $\epsilon$ .



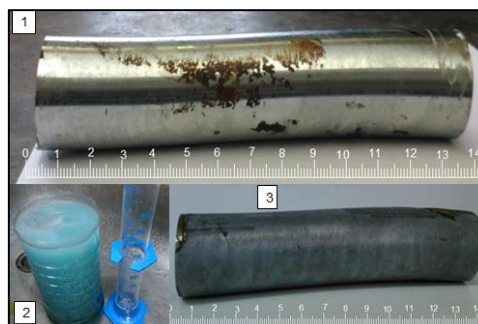
Parámetro.	Expresión	Valor [MPa].
Tensión de Fluencia. $\sigma_{fl}$ .	$= \left( \frac{Q_{fl}}{A_0} \right)$	725
Tensión Máxima. $\sigma_{max}$ .	$= \left( \frac{Q_{max}}{A_0} \right)$	844,40
Tensión de Ruptura. $\sigma_r$ .	$= \left( \frac{Q_{rot.}}{A_0} \right)$	753,62

Tabla 4.23: Parámetros del ensayo de tracción de la figura 4.4.

#### **4.18 Ensayo de tracción a probeta de MB tratada térmicamente.**

Para la realización de esta probeta, en primer lugar, se extrajo del rotor R3 el cromado duro por medio de un ataque químico, de corrosión acelerada, con un reactivo compuesto por 10% de ácido clorhídrico (HCl) [6] y 90 % de agua durante 1800 s hasta eliminar por completo el cromado. La figura 4.57 muestra el extremo de rotor R3 antes, durante y después del ataque químico.

Figura 4.57: Preparación del rotor para obtener la probeta de tracción.



Posteriormente se le realizó un tratamiento térmico de homogeneizado cubierto con virutas de fundición, para evitar la descarburación del acero, seguido de un tratamiento de temple y

revenido para obtener las propiedades mecánicas finales. Los parámetros de los tratamientos térmicos realizados se presentan en la tabla 4.24.

Homogeneizado.	
Parámetro	Valor.
Temperatura de austenización. [15]	1200 °C
Tiempo de austenización.	14400 s
Medio de enfriamiento.	Dentro del horno cerrado.
Temple y Revenido.	
Temperatura de austenización	850 °C
Tiempo de austenización	7600 s
Medio de enfriamiento	H= 0,5 / aceite con agitación.
Temperatura de revenido	600 °C
Tiempo de mantenimiento de la temperatura de revenido	7200 s
Medio de enfriamiento.	Al aire, fuera del horno.

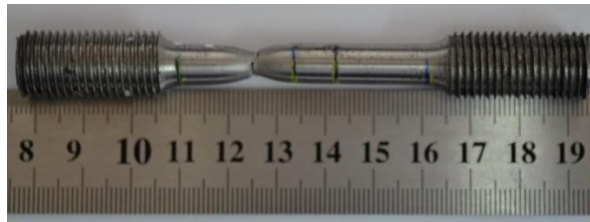
Tabla 4.24: Parámetros de los tratamientos térmicos realizados.

La figura 4.58 presenta la probeta mecanizada y la figura 4.59 la probeta fracturada luego del ensayo.

Figura 4.58: Probeta de acero AISI-SAE 4140 tratada térmicamente.

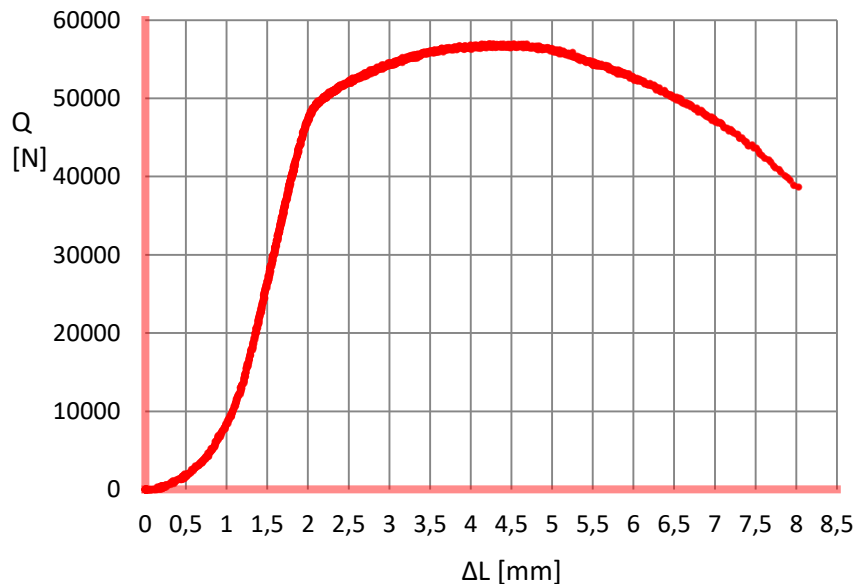


Figura 4.59: Probeta fracturada de acero AISI-SAE 4140 tratada térmicamente.



La figura 4.60 presenta la gráfica de Carga-Desplazamiento  $Q-\Delta L$  y la tabla 4.25 los valores correspondientes a carga de fluencia, carga máxima, carga de rotura y desplazamiento registrados durante el ensayo.

Figura 4.60: Curva  $Q-\Delta L$  registrado durante el ensayo de tracción.

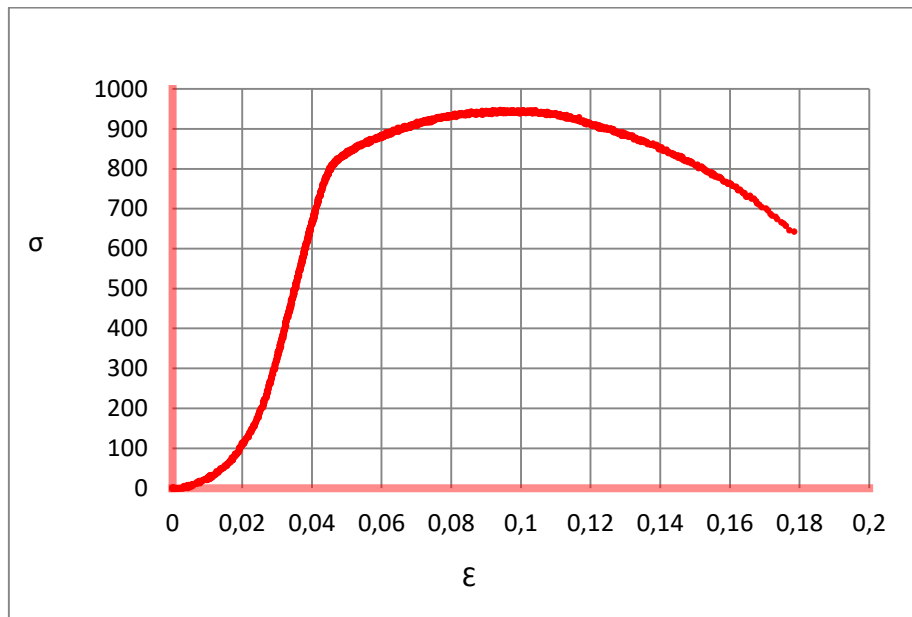


Parámetro.	Unidades.	Valor.
Carga de Fluencia. $Q_{fl}$ .	N	48000
Carga Máxima. $Q_{max}$ .	N	56996,8
Carga de Rotura. $Q_r$	N	38661
Desplazamiento. $\Delta L$	mm	8,028
Area de la probeta inicial. $A_0$	mm <sup>2</sup>	63,617

Tabla 4.25: Parámetros del ensayo de tracción.

La figura 4.61 presenta la gráfica de Tensión-Deformación  $\sigma$ - $\epsilon$  correspondiente a la gráfica de Q- $\Delta L$  del ensayo realizado y la tabla 4.26 los valores de tensión de fluencia, tensión máxima y tensión de rotura calculados en función de los valores registrados en la tabla 4.12.

Figura 4.61: Tensión " $\sigma$ " vs. Deformación " $\epsilon$ ".



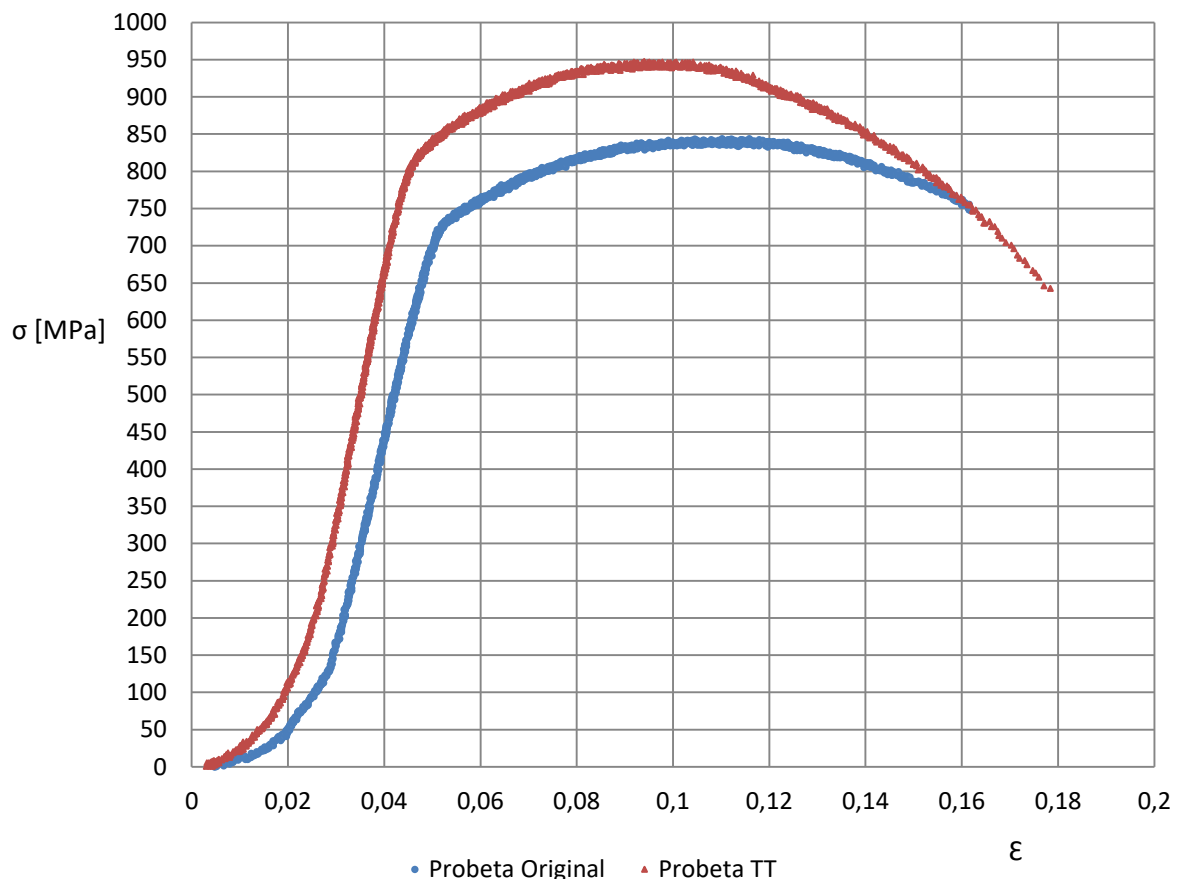
Parámetro.	Expresión.	Valor [MPa].
Tensión de Fluencia. $\sigma_{fl}$ .	$= \left( \frac{Q_{fl}}{A_0} \right)$	800
Tensión Máxima. $\sigma_{max}$ .	$= \left( \frac{Q_{max.}}{A_0} \right)$	947,89
Tensión de Rotura. $\sigma_r$ .	$= \left( \frac{Q_{rot.}}{A_0} \right)$	642,95

Tabla 4.26: Parámetros del ensayo de tracción.

#### 4.19 Comparación de las curvas tensión-deformación.

Se comparan las curvas tensión-deformación de las dos probetas ensayadas a tracción en la figura 4.62.

Figura 4.62: Comparación de curvas Tensión vs. Deformación.



Se observa que la probeta tratada térmicamente, presenta mayor módulo de elasticidad, mayor tensión de fluencia y mayor alargamiento.

Se entiende entonces que el tratamiento térmico de homogeneizado disminuyó la segregación química, en la probeta tratada térmicamente. Además; el medio de enfriamiento utilizado garantizó la formación de la microestructura martensita en toda la probeta, luego de un tiempo correcto de austenización. El tiempo y temperatura de revenido promovieron la difusión del carbono retenido en la martensita, reduciendo la resistencia y aumentando la tenacidad.

El comportamiento de la probeta en estado original fue característico de un material mecánicamente heterogéneo por presentar menor resistencia última a la tracción y menor

alargamiento, que la probeta tratada térmicamente, como consecuencia de la heterogeneidad química presente en el material.

## **ETAPA 5.**

En esta etapa se desarrolla una Especificación de Procedimiento de Soldadura, EPS, como resultado de la caracterización del MS y ZAC presente en los rotores soldados.



## **4.20 Realización de una Especificación de Procedimiento de Soldadura “EPS (WPS)”.**

Se elabora un EPS con el objetivo de reemplazar el método actual de unión, utilizando un proceso de soldadura y un metal de aporte que genere una unión sin defectos y con un comportamiento mecánico y anticorrosivo similar al acero con recubrimiento de cromo.

Se propone realizar la soldadura bajo un proceso por arco con núcleo fundente FCAW-G (Flux Metal Arc Welding- Gas). Este proceso presenta ventajas tecnológicas en comparación al proceso SMAW actualmente utilizado.

Las ventajas del proceso FCAW representan un suministro continuo de metal de aporte. El mismo es un alambre tubular que contiene elementos aleantes y fluidificantes, lo que permite producir soldaduras con adecuada velocidad de deposición tanto en posición plana como sobrecabeza; producir su propia atmósfera y gases de protección sobre la pileta líquida depositada protegiéndola del oxígeno y nitrógeno del ambiente; estabilizar el arco, proveer resistencia mecánica, metalúrgica y a la corrosión del metal de soldadura eliminando impurezas con las reacciones del flux; producir una escoria sobre el metal depositado para protegerlo de la contaminación y controlar la forma y apariencia de la pileta, con poco salpicado, en las diferentes posiciones de soldadura en las cuales el electrodo es colocado [25].

El metal de aporte AWS E312-16 utilizado presenta buena resistencia a la corrosión, por ser un consumible inoxidable austenítico, pero propiedades mecánicas inferiores al acero AISI-SAE 4140 templado y revenido. Para el correcto funcionamiento del rotor dentro del estator se necesita, además de resistencia a la corrosión y desgaste, resistencia mecánica para soportar esfuerzos combinados de tracción y torsión para evitar la deformación plástica de la unión. Conseguir esto implica evitar pérdidas de interferencia entre el rotor y el estator que causan escurrimiento de los fluidos transportados, o reducción en la eficiencia de la bomba, y la generación de fisuras que crecen por deformación bajo tensión, en cada giro del rotor, hasta llegar al metal base.

Para evitar esto, se propone soldar el rotor en dos etapas. En una primera etapa se utilizará un aporte similar en composición química al metal base, como aporte de relleno, que responda a los tratamientos térmicos de igual manera que el acero. Este aporte referido a la norma AWS A5.29, para aceros de baja aleación, es un electrodo tubular E111T5-K4M-H4 [26] de 1.6 mm

de diámetro, de bajo hidrógeno, con una resistencia a la tracción de 750 MPa y que se utiliza con una mezcla de gas de protección Ar-CO<sub>2</sub>. La temperatura del tratamiento térmico post-soldadura recomendada es de 566 °C durante 3600 s.

En una segunda etapa y para finalizar la soldadura sobre la superficie, se optará por la utilización de un aporte inoxidable martensítico referido a la norma AWS A5.22. Este aporte es un electrodo tubular E410NiMoT1-1/-4 [27] del tipo de acero inoxidable 410, de 1.2 mm de diámetro, para soldar en toda posición con una mezcla de gas Ar-CO<sub>2</sub>. Con un tratamiento térmico post-soldadura recomendado de 600 °C durante 3600s y una resistencia a la tracción de 927 MPa.

Este aporte martensítico tiene la característica de poder austenizarse y templarse al aire, presenta buena resistencia a la corrosión, desgaste y excelente resistencia mecánica luego de un tratamiento térmico post-soldadura [28]. Además presentan bajos costos con respecto a otros inoxidables [29].

La temperatura de pre-calentamiento propuesta para este acero es de 250 °C [30].

El EPS se encuentra en el ANEXO 4: “ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA - EPS”.

## **ETAPA 6.**

En esta etapa se presenta la propuesta sobre el recubrimiento superficial del rotor y la correcta selección de los elastómeros que forman el estator de la bomba PCP.

#### **4.21 Propuesta sobre el recubrimiento superficial de los rotores.**

En los rotores se observa desgaste mecánico [31] con pérdida de material a través de la disminución del espesor y el rotor R3, además, presenta corrosión por picado.

Se propone, para conseguir un recubrimiento con mayor resistencia al ambiente corrosivo de trabajo y evitar que los fluidos corrosivos ingresen a través de poros y fisuras al metal base, realizar un recubrimiento bicapa de cobre (Cu) y cromo (Cr) sobre el acero AISI-SAE 4140 del rotor. La capa de cobre, debe ser no porosa y depositada sobre la superficie del rotor correctamente preparada. Seguido, se electrodeposita el cromo. El sustrato no debe presentar inclusiones u óxidos dado que éstos son los que generan la porosidad por desprendimiento preferencial de hidrógeno [32] durante la electrodeposición del cromado y el cobre.

#### **4.22 Selección del material elastómero del estator.**

El material elastómero del estator de la bomba, con el cual el rotor debe tener un contacto permanente sobre las líneas de sello para generar el efecto de bombeo, es muchas veces el responsable de agudizar y ayudar a la generación de las fallas en el rotor.

La correcta selección en la composición química del elastómero referido a las condiciones ambientales donde trabaja, asegura el correcto funcionamiento de la bomba. En caso contrario el elastómero se endurecerá por deformación (ciclo de histéresis), se quemará y se podrá desintegrar como consecuencia de trabajar a elevadas revoluciones (> 300 r.p.m). También se podrá hinchar y desintegrar por la absorción de gases como el H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> y aromáticos presentes en el crudo [1] [13].

Las marcas generadas por desgaste en el cromado como así también la deformación en la zona soldada que derivó en el inicio y el crecimiento de fisuras, que produjeron la fractura, están asociadas a una interferencia excesiva entre el rotor y el estator debido a un hinchamiento y endurecimiento del elastómero.

Para evitar esto se debe conocer el ambiente en fondo de pozo como la temperatura, la concentración de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, aromáticos y abrasivos a los que la bomba estará sometida.

La selección de los elastómeros será entonces entre los comercialmente disponibles y resistentes a las condiciones del ambiente.

Luego de seleccionado los elastómeros más aptos, se les realiza un ensayo de compatibilidad en un autoclave con movimiento; en el cual se colocan las muestras de los elastómeros elegidos inmersos en el fluido a bombear, a la presión y temperatura del fondo del pozo, durante siete días según especialista [18] en bombas PCP. Terminado el mismo se comparan los parámetros de peso, dureza e hinchamiento antes y después del ensayo seleccionando el elastómero que presentó menor variación.

En el ANEXO 6: “SELECCIÓN DE LOS ELASTÓMEROS”, se presenta una tabla con los elastómeros fabricados por la empresa Weatherford y su aptitud para determinados parámetros como temperatura, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, aromáticos, entre otros.

## **5 CAPÍTULO V.**

### **5.1 Conclusiones.**

De las etapas realizadas se dedujeron las siguientes conclusiones.

1. La caracterización de las superficies de fractura de los rotores R1 y R2 evidencian el inicio de la fisura por deformación plástica en el MS al estar sometido a una interferencia excesiva con el elastómero del estator al ser un material inoxidable austenítico con menor dureza que el acero 4140. Las marcas de desgaste en el cromado y la variación del espesor del mismo, también evidencian la interferencia excesiva en las líneas de sello rotor-estator.
2. En los tres rotores el metal base presentó una microestructura compuesta de martensita libre, revenida y bainita. La martensita libre, sin revenir, presentó valores de microdureza por encima de los 350 HV y los análisis EDS evidenciaron la presencia de manganeso Mn segregado. Esta microestructura es resultado del tratamiento térmico presente en el MB químicamente heterogéneo.
3. La microestructura de martensita sin revenir, es frágil y peligrosa si existe la presencia de hidrógeno ( $H_2$ ) difusible. Además, los rotores por su configuración dentro del estator, generan tensiones combinadas de tracción y torsión y pueden entrar en resonancia por vibración torsional.
4. La ZAC en R1 y R2 presentó una microestructura bandeada (heterogénea) de martensita libre y martensita revenida que evidencia la falta de un proceso de soldadura con precalentamiento y tratamiento térmico post soldadura. Esto implica condiciones ideales que predisponen al material a fisuración en frío.
5. El MS presentó escoria en R1 y R2 como consecuencia del proceso de soldadura utilizado.
6. El cromado, en los rotores R1 y R2, presenta fisuras y poros que llegan al metal base y desgaste a lo largo de la línea de sello rotor-estator al variar el espesor del mismo.
7. El rotor R3 presentó corrosión por picado, debido a la falta de cromado por desprendimiento, y desgaste mecánico en la línea de sello rotor-estator. El proceso de

corrosión se desarrolló como consecuencia de un cromado poroso y con fisuras por medio de los cuales el lodo de producción alcanzó al metal base y generó corrosión acelerada picando y desprendiendo el cromado, además de formar productos de corrosión en el MB.

8. El análisis EDS realizado a las muestras M1 y M4 evidencia que el tratamiento térmico de homogeneizado H2 realizado a la muestra M4 presenta menor segregación química de los elementos Mn, Cr y Mo que el homogeneizado H1 realizado a la muestra M1. Además el barrido de microdureza sobre el MB de la muestra M5 presenta valores correspondientes a la martensita revenida y el realizado a la muestra M2, presenta valores correspondientes a la martensita libre sin revenir.
9. Las micrografías de las muestras M1 y M3 atacadas con reactivo para revelar segregación, muestran visualmente la formación de regiones bien definidas por el ataque preferencial de la solución sobre determinados elementos químicos. Así se observa en la muestra M3, la microestructura martensítica sin revenir de color verde claro; esto acompañado de valores de microdureza superiores a los 400 HV.
10. El ensayo de tracción evidenció que la probeta de MB tratada térmicamente posee una resistencia a la tracción mayor y un alargamiento total mayor que la probeta con MB en estado original; lo que se traduce en mayor tenacidad a la fractura del MB tratado térmicamente. Las causas: menor segregación química.
11. La propuesta de la especificación de procedimiento de soldadura EPS, establece bajo norma AWS la aplicación de un aporte mecánicamente compatible con los aceros de baja aleación tratables térmicamente y un aporte de terminación superficial compatible con el cromado duro.
12. La propuesta de un recubrimiento bi-capa de cromo (Cr)-cobre (Cu) tiene como función eliminar microfisuras y poros en la capa de cobre electrodepositada sobre el acero y sobre ella la electrodeposición del cromo. Esto impediría el acceso del lodo al acero ante alguna falla provocada por coalición de microfisuras, poros, desgaste y abrasión sobre el cromado.
13. La correcta selección del elastómero, en función del ambiente de producción, evitará el hinchamiento excesivo del mismo ante el contacto con CO<sub>2</sub> y aromáticos; endurecimiento por deformación (histéresis) y quemaduras del mismo.





## **5.2 Tareas Futuras.**

A partir de los resultados obtenidos se sugiere a futuro la realización de las siguientes tareas:

- 1.** Realizar la soldadura de acuerdo al EPS, con el objetivo de ensayarla según código ASME IX, para elaborar el Registro de Procedimiento de Calificación (PQR) que avale dicha unión.
- 2.** Realizar en una chapa de acero AISI-SAE 4140, el recubrimiento bi-capa de cromo (Cr)-cobre (Cu) para realizarles ensayos de corrosión y desgaste.

## Referencias Bibliográficas.

1. Hirschfeldt, M. *Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas*. 2008. **V1**, 2-3-4-5-6-7-37.
2. Cholet, H., *Las Bombas a Cavidades Progresivas*. 1998, París, Francia: Editions Technip.
3. Mataix, C., *Turbomáquinas Hidráulicas*. 1975, Madrid, España: ICAI.
4. Meza, I., *Aplicaciones y Diseño de Sistemas con Bombas de Cavidad Progresiva.*: p. 7-17-22-23-24-25-26.
5. Saveth, K. *General Guidelines for Failure Analysis Of Downhole Progressing Cavity Pumps*. 2008. 4-6.
6. International, A., *Corrosion*. 9th ed. Asm Handbook. Vol. 13. 1987, United States of America: Asm International.
7. International, A., *Heat Treating*. Vol. 4. 1991, United States of América: ASM International.
8. International, A., *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. Thenth Edition ed. Vol. 1. 1990, United States of America.: ASM international.
9. Juan, Q.H., *evaluacion de la suceptibilidad a la fisuración en frío en soldaduras de aceros de alta resistencia*, in *Facultad de Ingeniería*. 2002, Universidad Nacional del Comahue.: Neuquén. p. 167.
10. Rodriguez, E.C., *Ing. de Aplicación y Ventas.*, R.A. Kovich., Editor. 2017.
11. Zalazar, M., *Soldadura manual por arco con electrodo revestido/ Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*, in *Procesos de Soldadura por Arco Eléctrico*, U.N.d. Comahue., Editor. 2016: Laboratorio de Metalografía y Soldadura. Facultad de Ingeniería. UNCOMa. Buenos Aires 1400, Neuquén. p. 26-27-28-29-33-40-49-57.
12. Howes, G.E.T.M.A.H., *Steel Heat Treatment Handbook*. 1998: Marcel Dekker. 1192.
13. Totten, G.E., *Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies*. Second Edition. ed, ed. P.D. George E. Totten, Fasm. 2006, Portland, Oregon, U.S.A.: CRC Press. 848.
14. Burkart., A.L., *Fallas en recubrimientos de cromo duro en barriles de bombas de extracción de petróleo: características y orígenes.*, in *Congreso Conamet/Sam 2004*. 2004, Sam. p. 2-4.
15. International, A., *Surface Engineering.*, ed. M.o.t.A.H. Committee. Vol. 5. 1994, United States of America: ASM International.
16. Askeland., D.R., *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Tercera edición. ed. 1998, México.: International Thomson Editores.
17. Hirschfeldt., M., *Manifestación del fenómeno de histéresis en bombas de cavidades progresivas (PCP) en el yacimiento Diadema, Cuenca del Golfo San Jorge. Argentina*, in *II Congreso de Hidrocarburos 2003*. 2003, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas/ OilProduction.net: Buenos Aires, Argentina. p. 3-4-5-6.
18. Young., E. *Elastómeros: comportamiento con la temperatura y agentes agresivos*. 2002.
19. Astm, *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.*, in *E3-11*. 2011, Astm International.: United States.
20. International, A., *Metallography and Microstructures*. Ninth editions ed. Metal Handbook., ed. A. International. Vol. 9. 1985, United States of America.: Asm International.

21. ASM, *Control of Surface Carbon Content in Heat Treating of Steel*, in *Heat Treating*. 1991, ASM International.
22. International., A., *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. 2014: West Conshohocken, PA. p. 7.
23. Zalazar, M., *Soldadura por arco con núcleo fundente - Flux Cored Arc Welding (FCAW)*. in *Cuaderno de Facultad.*, U.N.d.C.-F.d. Ingeniería., Editor.
24. Esab, *Dual Shield T-115*, in *Gas-Shielded Flux-Cored Wires (FCAW) -Low alloy wire*. 2016, Esab.
25. Esab, *Shield-Bright 410NiMo*, in *Gas-Shielded Flux-Cored Wires (FCAW)- Stainless Steel Wires*, Esab, Editor. 2016, Esab.
26. Indura., *Manual de Aceros Inoxidables.*, Indura, Editor. 2010, Indura: Cerrillos, Chile. p. 20.
27. Maidana., N.S.Z., *Efectos de las variables de proceso sobre la microestructura, prop. mecánicas y resistencia a la corrosión de depósitos supermartensíticos obtenidos con alambres tubulares metal-cored.*, in *Grupo de Soldadura*, U.N.d.L.d.Z.-F.d. Ingeniería., Editor. 2006: Buenos Aires. p. 47-48.
28. Tuckart., W., *Escuela de Tribología 2018*, in *Mecanismos de Desgaste*. 2018: Universidad Nacional del Sur- Bahía Blanca.
29. Irigoitia, M.C., *Informe análisis de seguimiento CB47*, in *CB47- Pozo Clase C- Prod. Bruta: 110.8 m<sup>3</sup>/dia- Crudo: 2.27 m<sup>3</sup>/dia*. 2015, Oilstone. p. 4.
30. R. Suarez Baldo, M.Z., D. Salinas, J.Bessone., *Fallas de recubrimientos metálicos empleados en equipos de producción de petróleo*, in *Jornadas Sam/ Conamet*. 2003, Sam.

## 6 ANEXO 1: “ESTIMACION DEL TIEMPO DE HOMOGENEIZADO”.

Para determinar una aproximación teórica del tiempo de austenización para el tratamiento térmico de homogeneizado, con el objetivo de disminuir la segregación química, se utilizó la solución “Gaussiana” de la segunda Ley de Fick para una concentración finita, ubicada en el origen y con el coeficiente de difusión constante [1] [2].

$$c(x, t) = \frac{M/A}{\sqrt{4 * \pi * D * t}} * e^{\left(\frac{-x^2}{4 * D * t}\right)} \quad \text{si } \begin{cases} -\infty < x < \infty \\ 0 \leq t < \infty \end{cases}$$

- $c(x, t)$ : concentración en la posición  $x$ , en tiempo  $t$ .
- $\frac{M}{A}$ : cantidad total de soluto por unidad de área.
- $D$ : coeficiente de difusión del soluto en la solución a una determinada solución.
- $t$ : tiempo de difusión del soluto en la solución.

La figura 1 muestra el esquema físico de la concentración de soluto y la figura 2 los perfiles de difusión para una fuente finita ubicada en el origen.

Figura 1 [1]: Esquema físico de la concentración de soluto de una fuente finita ubicada en el origen.

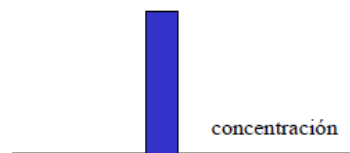
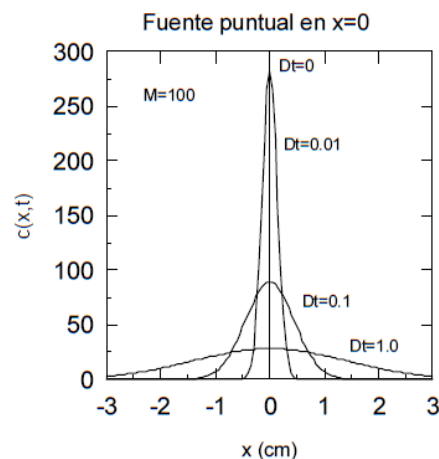


Figura 2 [2]: Perfiles de difusión para una fuente finita ubicada en el origen a distintos tiempos. “t”.



Esta solución dará una idea del tiempo requerido para que la concentración de determinado elemento químico o soluto pueda difundir en la solución a la que pertenece luego de ser tratamiento térmicamente.

La expresión matemática “Gaussiana” para  $x=0$  queda expresada de la siguiente forma:

$$c(0, t) = \frac{\frac{M}{A}}{\sqrt{4 * \pi * D * t}}$$

Despejando el tiempo  $t$  [s] se obtiene la expresión buscada:

$$t = \frac{\left(\frac{M}{A}\right)^2}{4 * \pi * D * [c(0, t)]^2}$$

El coeficiente de difusión  $D$  se calcula con la expresión de Arrhenius [3]:

$$D = D_0 * e^{\left(\frac{-Q}{R*T}\right)}$$

Dónde:

- $D_0$ , el factor de frecuencia para el soluto en una solución Fe- $\gamma$ .
- $Q$ , energía de activación del soluto para difundir en Fe- $\gamma$ .
- $R$ , la constante universal de los gases: 8,314472 J/(mol\*K).
- $T$ , la temperatura en K.

Las figuras 3 y 4 muestran el tamaño de las áreas donde se les realizó análisis EDS a la muestra del rotor R3, y donde se encontró mayor porcentaje (%) en peso de Mn y Cr en referencia al promedio establecido en la bibliografía.

La tabla 1 presenta los valores de porcentaje (%) en peso de Mn y Cr que resultaron del análisis EDS y los porcentajes que se encuentran en la bibliografía sobre un AISI-SAE 4140 químicamente homogéneo. También se encuentran los valores de  $D_0$ ,  $Q$  y  $R$ .

Figura 3: Área de análisis EDS para el % en peso del Mn.

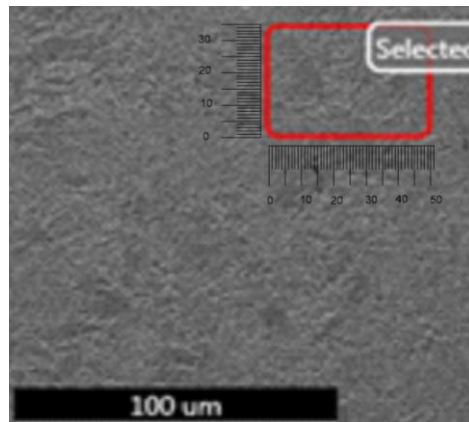
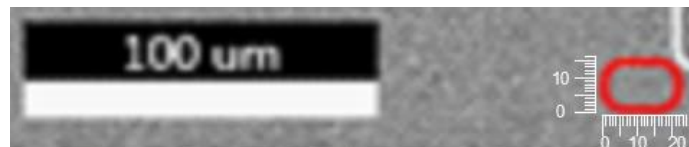


Figura 4: Área de análisis EDS para el % en peso del Cr.



AISI-SAE 4140			
EDS		Bibliografía [4]	
Mn	Cr	Mn	Cr
% en peso	% en peso	% en peso	% en peso
1.3	2	0.6-0.9	0.9-1.2
		Do [cm <sup>2</sup> /s]	Q [kJ/mol]
		0,35	282
		Do [cm <sup>2</sup> /s]	Q [kJ/mol]
		1.8x10 <sup>4</sup>	405
		R [ J/mol*K]	
		8,314472	

Tabla 1: Datos del Mn y el Cr para el cálculo del tiempo de homogeneizado teórico.

La tabla 2 presenta los resultados del cálculo del tiempo de homogeneizado, para el Mn y el Cr.

	t [s]	
	Mn	Cr
$t = \frac{\left(\frac{M}{A}\right)^2}{4 * \pi * D * [c(0, t)]^2}$	4744	2823

Tabla 2: Cálculo de los tiempos teóricos de homogeneizado para el Mn y el Cr.

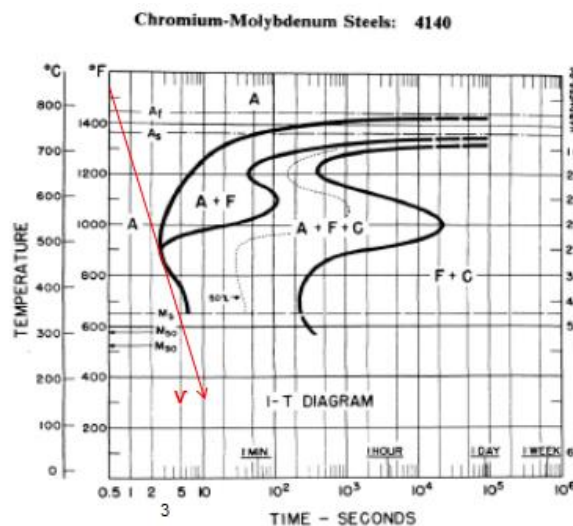
### **Referencias Bibliográficas.**

1. Zalazar, M., *Catedra de Materiales II*, in *Difusión*. 2014: Universidad Nacional del Comahue.
2. Timmermann, E.O. *Difusión: leyes de balance, continuidad e integración de la 2da. ley de Fick*. 2004.
3. H.K.D.H. Bhadeshia, R.W.K.H., *Steel microstructure and properties*. Third edition ed. 2006, UK: Elsevier.

## 7 ANEXO 2: “DETERMINACION DE LA TEMPLABILIDAD DEL ACERO”.

La microestructura que se busca generar en este acero luego del tratamiento térmico de temple es la martensita “M”. La velocidad mínima de enfriamiento “v” necesaria para lograr una microestructura completamente martensítica se estima a partir del gráfico de la figura 1, denominada curva Transformación-Tiempo-Temperatura (TTT), específico para el material.

Figura 1: Diagrama TTT, acero AISI-SAE 4140.



Los dos factores más importantes que influyen en la templabilidad del material son la composición química y el tamaño de grano en fase austenita o Fe- $\gamma$  [1]. Esta característica aumenta al aumentar el tamaño de grano de la austenita debido a que la superficie de borde de grano por unidad de volumen disminuye, reduciéndose los sitios de nucleación para la microestructura de ferrita y perlita gobernados por el mecanismo de difusión.

La templabilidad se determina con un parámetro  $D_I$ , propuesto por Grossmann [2] denominado Diámetro Crítico Ideal. Este parámetro indica el diámetro máximo de un redondo que templado en un medio de severidad infinita “ $H_\infty$ ” logra obtener en el centro del mismo una microestructura 50% martensítica.

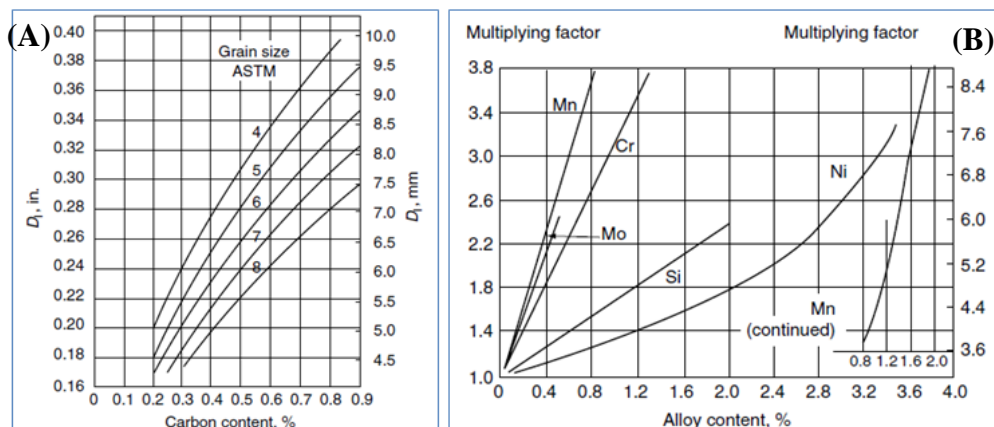
Para aceros de baja aleación, como el 4140, el diámetro crítico ideal  $D_I$  se determina con la siguiente expresión:



$$D_I = D_{ic} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times \dots \times f_n \quad (1)$$

Donde  $D_{ic}$  es el Diámetro base de templabilidad que se determina con el porcentaje de carbono (%C) y el tamaño de grano de la microestructura austenítica a partir del gráfico de la figura 2A. Los factores  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$  dependen del porcentaje de cada elemento de aleación presente en el material y se determina de forma experimental. La Figura 2B muestra esta curva.

Figura 2. A: Efecto del tamaño de grano y el %C en el Diámetro base de templabilidad  $D_{ic}$ ; B: Curvas que determinan el valor de los factores “f” para los distintos elementos de aleación.



Una vez determinado el Diámetro Crítico Ideal  $D_I$ , se debe estimar el Diámetro Crítico Real que brinda información del mayor diámetro de redondo que puede ser templado en un medio de severidad H para conseguir una microestructura 50% martensítica en el centro del mismo.

## 7.1 Medición del tamaño de grano.

El tamaño de grano se midió según norma ASTM E112 – 13 [3], por el método de los interceptos.

El diámetro promedio de grano estimado en una micrografía de una muestra homogeneizada H1 con aumento 100X, fue de 0.13 mm que indica un tamaño ASTM 4.

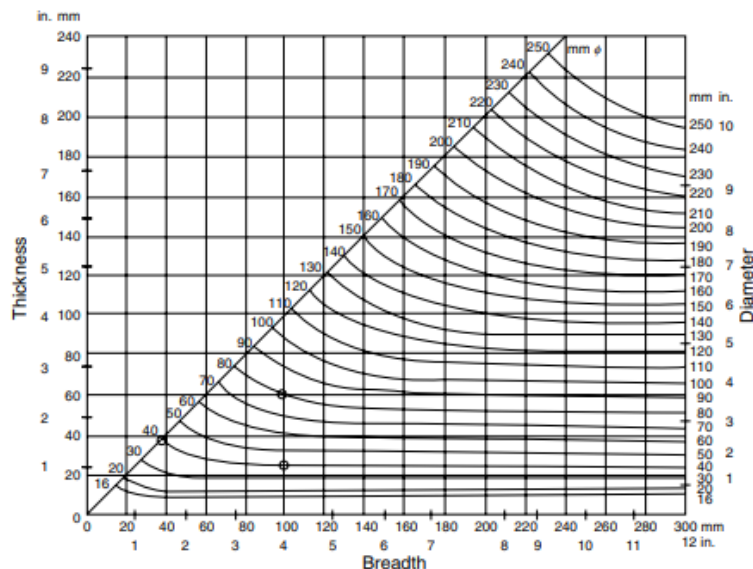
El diámetro promedio de grano estimado en una micrografía de una muestra homogeneizada H2 con aumento 100X, fue de 0.15 mm que indica un tamaño ASTM 3.

## 7.2 Relación entre distintas geometrías de secciones.

Las diferentes geometrías de las secciones que puede tener una pieza tienen una fuerte influencia en la transferencia de calor durante la extracción del mismo en un tratamiento térmico de temple y consecuentemente en la profundidad de endurecimiento alcanzada. Como las muestras extraídas del rotor tienen forma rectangular, esta geometría genera menos profundidad de endurecimiento que las barras de sección circular, a igual tamaño de sección y condiciones de temple.

La figura 3 muestra la gráfica que relaciona las secciones rectangulares o cuadradas a su equivalente circular. Como las muestras tienen una geometría aproximadamente cuadrada de 20x20 mm se determina su sección equivalente circular.

Figura 3 [2]: Determinación de la sección circular equivalente de las muestras de sección cuadrada.



Por lo tanto, su equivalente a sección circular es una muestra de diámetro igual a 20 mm.

## 7.3 Cálculo del diámetro crítico ideal “D<sub>I</sub>” y real “D<sub>r</sub>”.

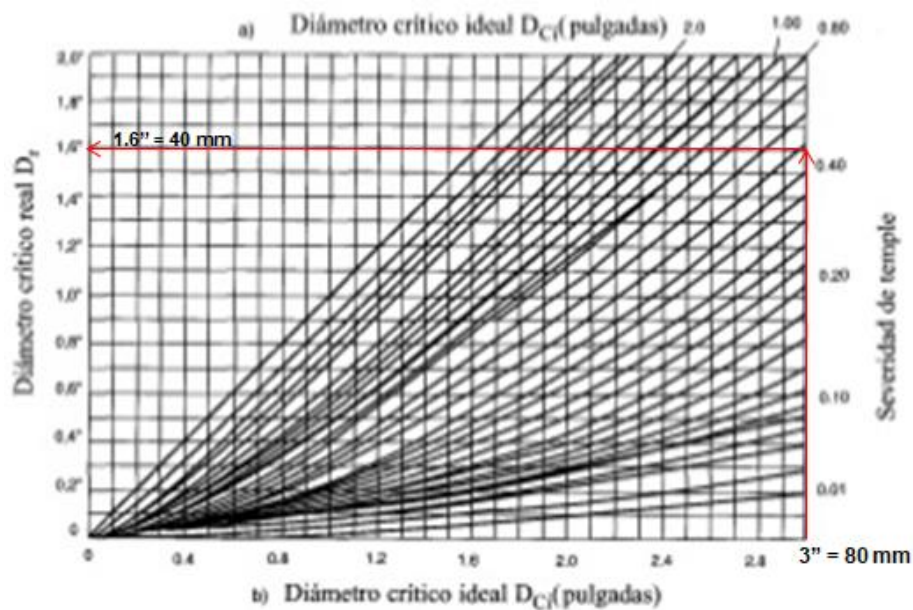
A partir de la expresión (1) se determina el diámetro crítico ideal D<sub>I</sub>. El D<sub>ic</sub> se obtiene de la figura 2 A, y los factores f<sub>i</sub> para cada elemento de aleación de la figura 2 B.

Para la muestra M2:  $D_I[mm] = 80.9$

Para la muestra M5:  $D_I[mm] > 80.9$

Para determinar el Diámetro Crítico Real  $D_r$ , se hace uso del gráfico de Grossmann de la figura 4 que relaciona el Diámetro Crítico Real con el Diámetro Crítico Ideal en función del coeficiente de severidad  $H$  (para el caso en estudio el  $H$  es de 0.5).

Figura 4: Grafico de Grossmann que relaciona  $D_r$  y  $D_i$  en función de  $H$ .



De la figura se tiene para la muestra M2 el  $D_r [mm] = 40$ ; para la muestra M5 el  $D_r [mm] > 40$  mm.

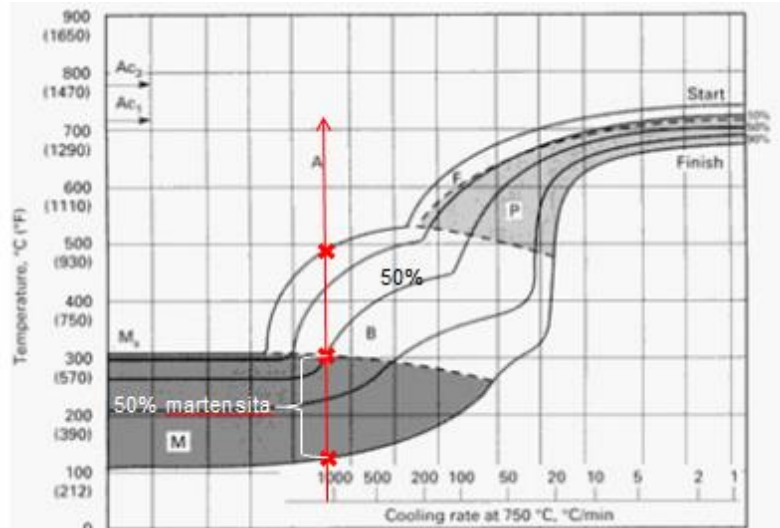
Esto indica que se obtendrá una microestructura de 50% martensita en el centro de la muestra M2 y M5 si las mismas tienen un diámetro de 40 mm. Por lo dicho se podrá temprar de forma exitosa cualquier pieza que se encuentre homogeneizada con el tratamiento H1 ó H2 y que tenga un diámetro menor o igual a 40 mm.

#### 7.4 Estimación de la velocidad de enfriamiento.

Para lograr una microestructura 50% martensítica en el centro de la muestra, se debe conocer la velocidad mínima de enfriamiento requerida desde la temperatura de austenizado. La figura 5, muestra un gráfico donde se correlacionan las distintas microestructuras que se pueden

generar con las diferentes velocidades de enfriamiento para el acero AISI-SAE 4140, marcada con una línea roja la velocidad mínima de enfriamiento buscada.

Figura 5 [4]: Gráfica de velocidad de enfriamiento y microestructuras generadas en un AISI-SAE 4140.



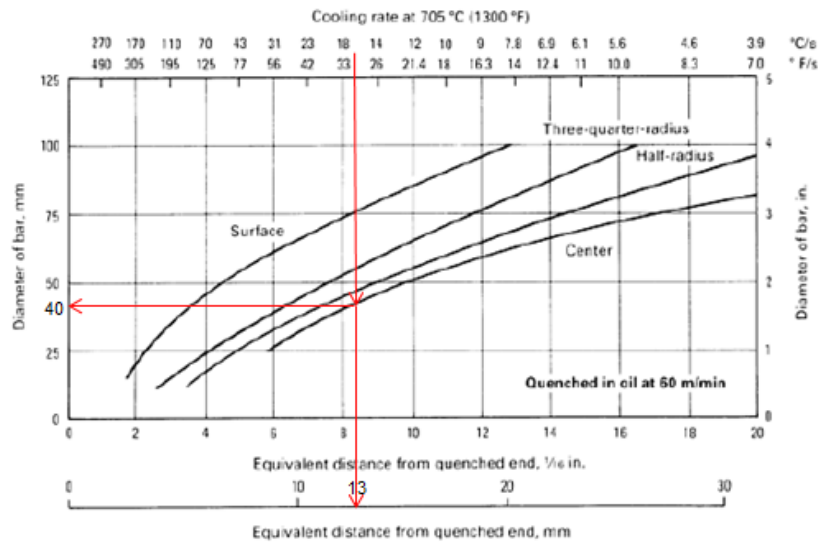
Esta velocidad está en función del medio de temple y tipo de agitación. Para la realización de este trabajo el medio de temple utilizado fue aceite y en la tabla 1 se encuentran tabulados la severidad de temple H y velocidad de flujo correspondiente a un aceite con un nivel de agitación bueno.

Agitación	Velocidad de flujo	Severidad H	
	m/min	Aceite	
bueno	61	0.4 - 0.6	0.5

Tabla 1 [5]: Severidad de temple y condición alcanzados.

Para verificar si las muestras tratadas térmicamente alcanzarán la velocidad mínima de enfriamiento  $V=1000 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min} = 17 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ . en el centro; en una primera instancia se determinó a través de la figura 6 el diámetro máximo de la barra que enfría en el centro a esa velocidad y la distancia Jominy equivalente, dado que la gráfica está realizada para una velocidad de flujo de 61 m/min, que es la misma velocidad generada durante el temple realizado.

Figura 6 [5]: Velocidades de enfriamiento en función de la posición y diámetro de la barra para un medio de enfriamiento con velocidad de flujo de 60 m/min.



El diámetro máximo de material que enfría a 17  $^{\circ}\text{C/s}$ . en el centro es de 40 mm; por lo tanto un diámetro menor, como el equivalente a 20 mm de las muestras, tendrá una velocidad de enfriamiento mayor lo que asegura la presencia de un porcentaje de martensita mayor al 50 % en el centro.

## Referencias Bibliográficas.

1. H.K.D.H. Bhadeshia, R.W.K.H., *Stell microestructure and properties*. Third edition ed. 2006, UK: Elsevier.
2. Totten., G.E., *Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies*. Second Edition. ed, ed. P.D. George E. Totten, FASM. 2006, Portland, Oregon, U.S.A.: CRC Press. 848.
3. INternational, A., *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, in *E112-13*. 2013: United States. p. 9.
4. International, A., *Heat Treating*. Vol. 4. 1991, United States of América: ASM International.
5. International., A., *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. Thenth edition ed. Vol. 1. 1990, United States of America.: ASM international.

## 8 ANEXO 3: “FORMULA PARA CALCULAR EL TIEMPO DE REVENIDO”.

El tratamiento térmico de revenido, disminuye y atenúa los valores de dureza entre la superficie y el núcleo; esto implica que la dureza luego del revenido sea una función lineal de su temperatura y una función logarítmica del tiempo empleado. La expresión matemática para el cálculo de la dureza es:

$$H_t = 102 - 5.7 \times 10^{-3} [T_t(12 + \log t)]$$

- $H_t$ : Dureza obtenida del Tratamiento temple y revenido [HRC]
- $T_t$ : Temperatura de Revenido [K].
- $t$ : Tiempo de Revenido [s].

Despejando la variable “ $t$ ” (tiempo) y definiendo el valor de dureza deseado luego del revenido “ $H_t$ ”, de la ecuación anterior, se obtiene el tiempo:

$$t = 10^{\frac{102-H_t}{5 \times 10^{-3} * T_t} - 12}$$


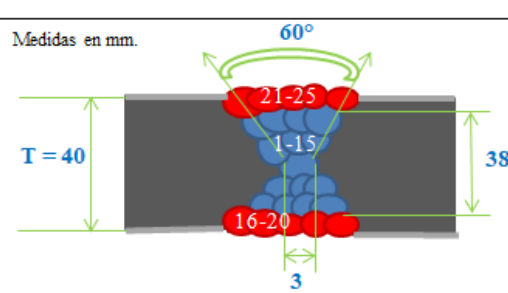
Esta expresión es válida para microestructuras 100 % martensíticas.

De acuerdo al análisis realizado en el ANEXO 2, sección 7.4: “Estimación de la velocidad de enfriamiento”, se determinó que el porcentaje de martensita en el centro de las muestras templadas supera el 50 %.

### Referencias Bibliográficas.


1. Totten., G.E., *Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies*. Second Edition. ed, ed. P.D. George E. Totten, FASM. 2006, Portland, Oregon, U.S.A.: CRC Press. 848.

## 9 ANEXO 4: “ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA”

	Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Metalografía y Soldadura.		
<b>ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (EPS).</b> ASME IX – QW 482 – WPS.			
ESPECIFICACIÓN (EPS) N°: <b>001</b> Revisión N°: Soportados por Registros (PQR) N° (s):		Fecha de Emisión: Fecha de Revisión:	
PROCESO (S): <b>FCAW-G</b>		TIPO (S):	
Empresa: Domicilio:			
<b>JUSTAS (QW-402)</b>			
Tipo de Junta: <b>A tope.</b> Simple o Doble Junta: <b>Doble en V.</b> Respaldo: Si ___ No <input checked="" type="checkbox"/> Material de Respaldo (tipo): ___ Metálico ___ Metálico No Fusible ___ No Metálico ___ Otro. Repelado: <input checked="" type="checkbox"/> Sí. ___ No Método:	Medidas en mm. 		
<b>METAL BASE (QW-403)</b>	<b>METALES DE APORTE (QW-404)</b>		
P-N°: <b>N/A</b> Gr-N°: <b>N/A</b> A P-N°: <b>N/A</b> Gr-N°: <b>N/A</b> . ó Especificación (Tipo y Grado): <b>AISI 4140.</b> Especificación (Tipo y Grado): <b>AISI 4140.</b> ó Composición Química y Propiedades Mecánicas: Composición Química y Propiedades Mecánicas: RANGO DE ESPESORES (mm): Tope: <b>40</b> Filete: ----- RANGO DE DIÁMETROS (mm): <b>40</b> Otro:	PROCESO:	Proceso 1	Proceso 2
	Especificación (SFA) N°: Clasificación (AWS) N°: F-N°: A-N°: Dimensión Cons. -θ(mm): Metal Aportado (mm): Rango de espesores (mm): Tope: Filete: Electrodo-Fundente (clasific.): Fundente (marca comercial): Inserto Consumible: Forma de producto (alambre):	<b>A5.29</b> <b>E111T5-K4 M-H4</b> <b>6</b> <b>12</b> <b>1.6</b> --- --- --- --- --- <b>Tubular.</b>	<b>A5.22</b> <b>E410NiMo</b> <b>T1-1/4</b> <b>6</b> <b>6</b> <b>1.2</b> --- --- --- --- --- <b>Tubular.</b>
Fecha:	Hoja 1 de 2.		

**PIP- Caracterización de fallas en un acero AISI-SAE 4140 templado y revenido, soldado y con recubrimiento de cromo utilizado en la fabricación de rotores de bombas de cavidades progresivas.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE**

		Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Metalografía y Soldadura.					
<b>POSICIONES (QW-405)</b>			<b>GAS (QW-408)</b>				
Posición(es) de la Junta:				GAS(ES)	MEZCLA (%)	CAUDAL (l/min)	
Progresión de Soldadura:			Protección:	Ar - CO <sub>2</sub>	75 - 25		
Posición(es) de Filete:			Respaldo:				
Arrastre:							
<b>PRECALENTAMIENTO (QW-406)</b>			Purgado previo:				
Temp. de precalentamiento (mín.): 250 °C			Otro:				
Temp. entre pasadas (máx.): 250 °C			<b>CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (QW-409)</b>				
Mantenimiento:			Tipo de corriente:		Polaridad:		
			Amperaje (rango):		voltaje (rango):		
<b>TRAT. TÉRMICO POST SOLDADURA (QW-407)</b>			Electrodo de Tungsteno (tipo y diám.):				
Rango de temperatura: 566 °C – 600°C (E110T5)			Modo de transferencia del metal (p/GMAW):				
Rango de tiempo de alivio: 1hs (E110T5).			Velocidad de alimentación del alambre:				
Otro: E410 PWHT: 600°C -1hs			Otro:				
<b>TÉCNICA (QW-410)</b>							
Cordón Recto u Oscilante:			AMBOS.				
Dimensión de la <u>busa</u> (para GMAW y GTAW):			N/A.				
Método de limpieza inicial:			CEPILLO.				
Método de limpieza entre pasadas:			AMOLADO Y CEPILLO				
Método de repelado de la raíz:			N/A				
Oscilación del arco (máxima):			2φ ELECTRODO.				
Distancia boquilla de contacto- pieza (para GMAW y SAW):			N/A				
Pasadas múltiples o simples (por lado):			MÚLTIPLES.				
Electrodo único o múltiple:			UNICO.				
Velocidad de la soldadura (rango):			VER CUADRO.				
Martillado (Peening):			SI ___ NO ___				
Espesor máximo por pasada (Solo para requerimientos de impacto):							
Otro:							
<b>CUADRO DE VARIABLES OPERATIVAS (QW-404/ QW-409/ QW-410).</b>							
PASADA	PROCESO	METAL APORTE Clasificación/Diámetro	CORRIENTE Tipo y Polaridad	AMPERAJE [A]	VOLTAJE [V]	VEL. AVANCE [mm/min]	PROGRESIÓN
1-15	FCAW	E111T5-K4 //1.6mm	DCEP	220-280	29-30		
16-25	FCAW	E410NiMo // 1.2mm	DCEP	150-220	24-26		
ELABORADO POR: <b>Kovich, Adrián</b>							
Fecha:						Hoja 2 de 2.	



## 10 ANEXO 6: "SEGUIMIENTO DE POZO CB47".

Ing. de Aplic. Tratamientos Químicos

Informe análisis de seguimiento CB47



➤ Parámetros físico-químicos:

Análisis de gases disueltos en fluido 15/06: CO<sub>2</sub>: 36.2 ppm; O<sub>2</sub>: 0.03 ppm.

Baja presión de gas de entre-columna para realizar medición de gases.

BRS: 1

Tendencia incrustante baja.

Tbdp: 35°C; Pbdp: 2 kg/cm<sup>2</sup> (directa).



### FORMULARIO DE REPORTE DE LABORATORIO

API RP 45

FISICO QUIMICO

Empresa	Yacimiento	Fecha	Hora	Muestreado por
Oil Stone	Cerro Bandera	15/06/2015	no reportada	Petrolab SRL
Nb. Informe	Punto Muestreo	Pozo	PDT	Fecha Informe
50703	CB 47	—	26841	30/06/2015

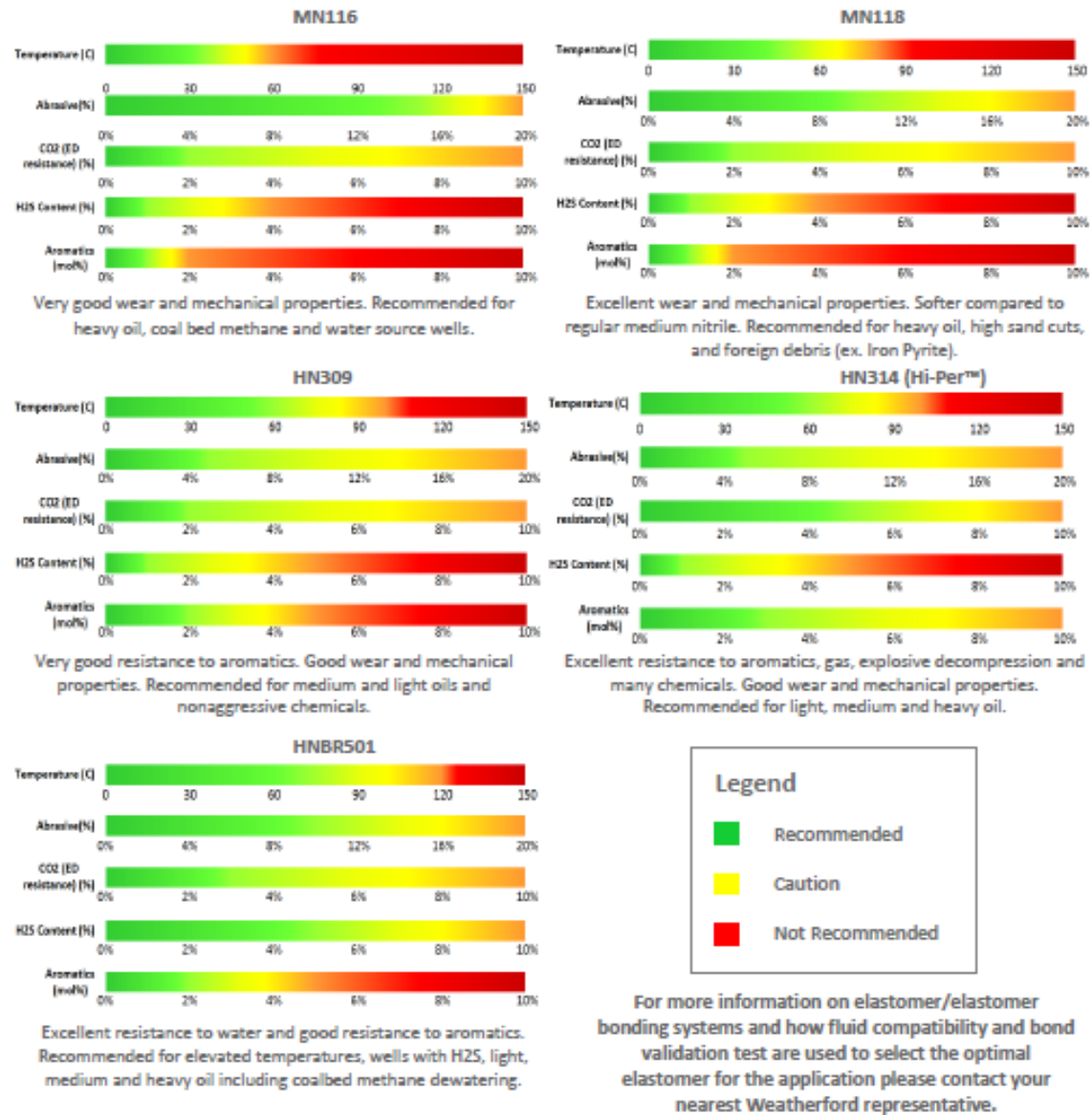
CY 802 : 5,47 mg/lit ICS 400 : .... c/fosfatos  
 IC 5400 : ..... mg/lit ICS 400 : .... c/aminas  
 Hierro Ferrico: 6,88 mg/lit IC 890 : .... c/fosfatos  
 Hierro Ferroso: 3,72 mg/lit Sup y Fdo : P: 8-50 Kg/cm<sup>2</sup> - T°:34,1-40 °C  
 Tende a pptar.CO3Ca Sup y Fdo Sulfuros : 0,0 mg/lit

Cationes	mg/L	meq/L	ppm	Metodo *	Propiedades	Valor	Unidades	Metodo *
Sodio Na <sup>+</sup>	16.535,71	718,95	15.823,70	5.3.28.4	pH	7,09		5.3.24.1
Caldo Ca <sup>++</sup>	1.357,00	67,85	1.298,99	5.3.8.3	Densidad (20°)	1,045	g/mL	5.3.8.3
Magnesio Mg <sup>++</sup>	255,21	20,99	244,22	5.3.18.4	Conductividad	.....	µmS/cm	5.3.13.1
Bario Ba <sup>++</sup>	228,00	3,32	218,18	5.3.4.3	Resistividad	.....	ohm/cm	5.3.13.1
Hierro FeT	10,60	0,38	10,14	5.3.16.1	TDS	48.264,62	mg/L	5.3.33.1
Potasio K <sup>+</sup>	508,30	13,00	486,41	5.3.26.3	Sr	0,0	mg/L	
<b>Total Cationes</b>	<b>18.894,91</b>	<b>824,49</b>	<b>18.081,25</b>		<b>Otros Test</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Metodo *</b>
					CO <sub>2</sub>	36,2	mg/L	5.3.9.1
<b>Aniones</b>	<b>mg/L</b>	<b>meq/L</b>	<b>ppm</b>	<b>Metodo *</b>	SH <sub>2</sub>	0,0	mg/L	5.3.32.4
Cloruros Cl <sup>-</sup>	29.045,15	819,17	27.794,44	5.3.10.1	O <sub>2</sub>	0,030	mg/L	5.3.23.1
Sulfatos SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,00	0,00	0,00	5.3.31.2	Dureza Total	4.435,20	mg/L CO <sub>2</sub> Ca	ASTM D-1126
<b>Alcalinidad</b>					Dureza Calica	3.385,80	mg/L CO <sub>2</sub> Ca	ASTM D-1126
Bicarbonatos CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	324,50	5,32	310,55	5.3.1.2	Alcalinidad pH 8.3	0,00	mg/L CO <sub>2</sub> Ca	5.3.1.2
Carbonatos CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,00	0,00	0,00	5.3.1.2	Alcalinidad pH 4.5	266,00	mg/L CO <sub>2</sub> Ca	5.3.1.2
Hidroxilos OH <sup>-</sup>	0,00	0,00	0,00	5.3.1.2	Hidrocarburos	NS	mg/L	EPA 418.1
<b>Total Aniones</b>	<b>29.369,71</b>	<b>824,49</b>	<b>28.104,98</b>		TSS	132,0	mg/L	NACE TM 173

## 11 ANEXO 6: “SELECCIÓN DE LOS ELASTÓMEROS”.

### Elastomers

The elastomer/bond matrix table is provided as an initial guide to aid in the selection of the best elastomer/elastomer bond system for your specific application. Matching the elastomer/elastomer bond system to the well conditions is essential to achieving the maximum run life and performance from your PC pump. Subsequently the final selection should be based on a combination of elastomer and bond validation tests conducted with the reservoir fluid.



### Referencia Bibliográfica.

- Rodriguez, E.C., *Ing. de Aplicación y Ventas.*, R.A. Kovich., Editor. 2017