# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

# SEDE QUITO

**CARRERA DE MECÁNICA**

**CARACTERIZACIÓN DE LA DUREZA DEL ACERO CHRONIT 400 SOMETIDO A FRICCIÓN ROTACIONAL A 70 RPM Y 700 RPM CON UNA CARGA APLICADA DE 5 KG EN INTERVALOS DE TIEMPOS DE 1 A 6 HORAS**

Trabajo de titulación previa a la obtención del título de**: INGENIERA MECÁNICA**

AUTORA: **MELANIE ESTEFANIA VIRACOCHA INLAGO**

TUTORA: **SONIA ELIZABETH GUAÑO ARIAS**

Quito – Ecuador

2025

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUDITORIA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Melanie Estefania Viracocha Inlago con documento de identificación N.º 1726816950; manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo: y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 6 de junio del año 2025

Atentamente,

Melanie Estefania Viracocha Inlago

1726816950

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Melanie Estefania Viracocha Inlago con documento de identificación N.- 1726816950, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy la autora de la Propuesta Tecnológica: "Caracterización de la dureza del acero Chronit 400 sometido a fricción rotacional a 70rpm y 700 rpm con una carga aplicada de 5 kg en intervalos de tiempos de 1 a 6 horas", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera mecánica, en la universidad politécnica salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la biblioteca de la universidad politécnica salesiana.

Quito, 6 de junio del año 2025

Atentamente,

Melanie Estefania Viracocha Inlago

1726816950

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Sonia Elizabeth Guaño Arias con documento de identificación N.° 1713704334, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CARACTERIZACIÓN DE LA DUREZA DEL ACERO CHRONIT 400 SOMETIDO A FRICCIÓN ROTACIONAL A 70 RPM Y 700 RPM CON UNA CARGA APLICADA DE 5 KG EN INTERVALOS DE TIEMPOS DE 1 A 6 HORAS, realizado por Melanie Estefania Viracocha Inlago con documento de identificación N.° 1726816950, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 6 de junio del año 2025

Atentamente,

Fisc. Sonia Elizabeth Guaño Arias, Msc.

1713704334

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con mucho cariño a Dios, por brindarme la paciencia, la capacidad para desarrollar este trabajo y por bendecirme en cada paso; a mi madre por su apoyo incondicional.

**Melanie Viracocha**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida por darme esta oportunidad, a mi familia, a mis padres.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana y su cuerpo de docentes por el conocimiento brindado a la largo de toda la carrera. A la Fis. Sonia Guaño por su guía para la realización de este trabajo con toda su predisposición.

**Melanie Viracocha**

# INDICE DE CONTENIDO

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUDITORIA DEL TRABAJO DE TITULACION** ..... **II**

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** ..... **III**

..... **IV**

**CERTIFICADO DE DIRECCION DEL TRABAJO DE TITULACION** ..... **IV**

**DEDICATORIA** ..... **V**

**AGRADECIMIENTO** ..... **VI**

**INDICE DE CONTENIDO** ..... **VII**

**RESUMEN** ..... **XI**

**ABSTRACT** ..... **XII**

**INTRODUCCION** ..... **1**

**ANTECEDENTES** ..... **1**

**Planteamiento del problema** ..... **1**

**Importancia y alcance** ..... **2**

**OBJETIVOS** ..... **3**

**GLOSARIO** ..... **4**

**CAPÍTULO I** ..... **5**

**FUNDAMENTOS TEÓRICOS** ..... **5**

**1.1 Aceros anti-abrasivos** ..... 5

**1.1.1 Aceros al Manganeso** ..... 5

**1.1.2 Acero con recubrimiento duro** ..... 7

**1.1.3 Acero Bonificado** ..... 8

**1.3 Principales aleantes de los aceros anti-abrasivos** ..... 11

**1.4 Acero Chronit 400** ..... 11

**1.4.1 Propiedades físicas, químicas y mecánicas del Acero Chronit 400.** ..... 12

**1.4.2 Soldabilidad y corte con oxiacetilénico del acero Chronit 400** ..... 15

**1.5 Ventajas y aplicaciones de los aceros antiabrasión de alta dureza.** ..... 16

**1.6 Dureza** ..... 19

**1.7 Fricción por rodadura** ..... 20

**1.8 Desgaste por esfuerzos de fricción.** ..... 21

**1.9 Desgaste Abrasivo** ..... 22

**CAPÍTULO II** ..... **25**
**2.1 Preparación de probetas para caracterización.** ..... 25
**2.1.1 Metodología** ..... 26
**2.1.2 Preparación del ensayo** ..... 26
**2.2 Mecanizado de probetas del acero Chronit 400** ..... 27
**2.3 Caracterización del acero Chronit 400** ..... 29
**2.4 Ensayos de dureza** ..... 31
**3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN** ..... 34
**3.1 Ensayos de Espectrometría** ..... 34
**3.2 Evolución de la dureza del material** ..... 35
**3.3 Desgaste ocurrido por la fricción** ..... 42
**CONCLUSIONES** ..... **44**
**RECOMENDACIONES** ..... 45
**REFERENCIAS** ..... **47**
**ANEXOS** ..... **50**

## ÍNDICE DE TABLAS

***Tabla 1:*** *Componentes químicos para el acero CHRONOS [3].* ..... *6*
***Tabla 2:*** *Análisis químico da las planchas bimetálicas de acero [8]* ..... *7*
***Tabla 3:*** *Principal Composición Química de los aceros bonificados [7].* ..... *8*
***Tabla 4:****Aleaciones de los aceros anti-abrasivos [7], [1].* ..... *11*
***Tabla 5.*** *Composición Química en % del Acero Chronit 400 y 500 [12].* ..... *13*
***Tabla 6****. Valores típicos de carbono para distintos espesores[13]* ..... *13*
***Tabla 7.*** *Comparación de las características mecánicas del acero Chronit 400 y Chronit 500[13]* ..... *14*
***Tabla 8.*** *Instrucciones para la mecanización, con pastillas de metal duro y ángulo de ataque positivo[4].* ..... *15*
***Tabla 9.*** *Taladrado para un ángulo de punta 115-120° [4]* ..... *15*
***Tabla 10****. Tabla de aceros comunes con su aplicación industrial [15]* ..... *17*
***Tabla 11.*** *Atributos cuando un acero está sometido a esfuerzos o cambios producidos en su estructura que dañen el material [19]* ..... *23*
***Tabla 12.*** *Mediciones correspondientes al acero Chronit 400, en comparación con el fabricante Bholer* ..... *30*
***Tabla 13.*** *Principales elementos aleantes de un acero anti-abrasivos* ..... *34*
***Tabla 14.*** *Resultados promedio de medidas de dureza en Rockwell C.* ..... *35*

# ÍNDICE DE FIGURAS

***Figura 1*** *Fases Hierro – Carbono desde austenita a martensita [5]* ..... 9
***Figura 2.*** *Endurecimiento del acero Chronit 400 anti-abrasivo* ..... 12
***Figura 3.*** *Maquinaria utilizada para trabajos pesados. a) maquinaria para remover tierra b) excavadoras de minerales c) tractor [16]* ..... 18
***Figura 4.*** *Profundidad de penetración para ensayos rockwell [17].* ..... 19
***Figura 5.*** *Remoción de material entre superficies duras que se encuentran en contacto [19]* ..... 21
***Figura 6.*** *Imagen Izquierda (a) desgaste leve en la superficie; Imagen Derecha (b) desgaste severo por partículas abrasivas [6]* ..... 23
***Figura 7.*** *Material de estudio (Acero Chronit 400)* ..... 25
***Figura 8.*** *Diagrama de proceso de ensayo para el proceso de endurecimiento controlado del material.* ..... 27
***Figura 9.*** *probetas de acero Chronit 400* ..... 28
***Figura 10****. Espectrómetro por chispa (laboratorio espectrometría)* ..... 29
***Figura 11****. Ensayo de espectrometría por chispa del material para la evaluación del compuesto químico* ..... 30
***Figura 12****. Durómetro marca Phase II de laboratorios Universidad Politécnica Salesiana* ..... 31
***Figura 13****. Lugares de valoración de dureza* ..... 32
***Figura 14.*** *Probetas acero chronit sometido a ensayo de fricción.* ..... 33
***Figura 15.*** *Aumento de dureza a 70 rpm* ..... 36
***Figura 16.*** *Grafica de aumento de dureza en 700rpm* ..... 38
***Figura 17.*** *Durezas máximas desde la primera etapa(suministro) hasta el trabajo de 700rpm* ..... 39
***Figura 18.*** *Comparación de medidas de 700 y 70rpm* ..... 41
***Figura 19.*** *Se ilustra el trabajo ejercido de las esferas en el canal de acero Chronit 400* ..... 42
***Figura 20.*** *partículas desprendidas por el efecto de fricción* ..... 42

## RESUMEN

Esta investigación se centró en la caracterización de la dureza y la resistencia a la fricción del acero Chronit 400, con el objetivo de predecir su desempeño y vida útil en condiciones de servicio prolongado, especialmente en ambientes hostiles con sustancias abrasivas que aceleran el desgaste.

La experimentación consistió en someter probetas circulares con una ranura central a pruebas de fricción contra esferas templadas. La rotación de las probetas en un torno, a velocidades de 70 y 700 rpm, generó la fricción bajo una fuerza constante de 5 kgf durante periodos consecutivos de 1 a 6 horas, midiendo posteriormente la dureza de las probetas para analizar los efectos del desgaste y caracterizar su resistencia a la deformación plástica.

Los resultados revelaron un incremento significativo en la dureza del material tras el mecanizado, la dureza aumentó de 42.9 HRC (estado de suministro) a 56.7 HRC (un incremento del 32.17%). El endurecimiento por fricción fue aún más pronunciado a 700 rpm, alcanzando una dureza máxima de 66.6 HRC, en comparación con los 59.56 HRC obtenidos a 70 rpm (una diferencia del 11.82% entre ambos estudios). Igualmente se observó que la mayor parte del endurecimiento por trabajo ocurrió en las primeras 3 horas de fricción, estabilizándose posteriormente en ambas velocidades de rotación. Sin embargo, la velocidad influyó directamente en el valor máximo de dureza alcanzado, ya que a mayor velocidad de rotación, mayor fue la tasa de deformación plástica encontrada, confirmando este como el principal mecanismo de endurecimiento.

De igual manera, las curvas de los ensayos realizados permitieron desarrollar aproximaciones numéricas mediante polinomios de grado 4, con altos coeficientes de correlación ($R^2$ de 0.99 y 0.98 para cada experimento respectivamente), lo que posibilita inferir el comportamiento a mayores velocidades y predecir la dureza durante el tiempo de uso, constatándose que el acero Chronit 400 tiende a endurecerse por deformación, especialmente en las capas superficiales (58 HRC a 66 HRC), superando la dureza de las capas internas y, por ende, aumentando su resistencia al desgaste. Cabe destacar que no se observó un desprendimiento excesivo de material durante la fricción a bajas velocidades.



***Palabras clave:*** ensayos de dureza, endurecimiento por fricción, acero Chronit 400, resistencia al desgaste, vida útil, deformación plástica, velocidad de rotación.

## ABSTRACT

This research focused on characterizing the hardness and friction resistance of Chronit 400 steel, aiming to predict its performance and service life under prolonged service conditions, especially in harsh environments with abrasive substances that accelerate wear. To this end, the friction resistance of steel specimens was evaluated by applying controlled stresses.

The experimentation consisted of subjecting circular specimens with a central groove to friction tests against hardened spheres. The rotation of the specimens in a lathe, at speeds of 70 and 700 rpm, generated friction under a constant force of 5 kgf for consecutive periods of 1 to 6 hours. Subsequently, the hardness of the specimens was measured to analyze the effects of wear and characterize their resistance to plastic deformation.

The results revealed a significant increase in material hardness after machining, with hardness increasing from 42.9 HRC (as-supplied condition) to 56.7 HRC (a 32.17% increase). Friction hardening was even more pronounced at 700 rpm, reaching a maximum hardness of 66.6 HRC, compared to 59.56 HRC obtained at 70 rpm (an 11.82% difference between the two studies). It was also observed that most of the work hardening occurred within the first 3 hours of friction, subsequently stabilizing at both rotation speeds. However, the speed directly influenced the maximum hardness value achieved, as a higher rotation speed resulted in a higher plastic deformation rate, confirming this as the main hardening mechanism.

Similarly, the test curves allowed for the development of numerical approximations using 4th-degree polynomials, with high correlation coefficients ($R^2$ of 0.99 and 0.98 for each experiment, respectively), enabling the inference of behavior at higher speeds and the prediction of hardness during service life. It was found that Chronit 400 steel tends to harden by deformation, especially in the surface layers (58 HRC to 66 HRC), exceeding the hardness of the inner layers and, therefore, increasing its wear resistance. It is worth noting that no excessive material detachment was observed during friction at low speeds.



***Keywords**:* hardness tests, friction hardening, Chronit 400 steel, wear resistance, service life, plastic deformation, rotation speed

# INTRODUCCION

El acero Chronit 400 es un material martensítico templado ampliamente empleado en sectores industriales que requieren alta dureza y resistencia mecánica, como la minería, la industria petrolera y la generación de energía. Debido a su capacidad para soportar condiciones de desgaste y carga, su estudio resulta esencial para garantizar un desempeño óptimo en aplicaciones exigentes.

En este trabajo se realiza un análisis de la dureza del Chronit 400, con el propósito de evaluar sus propiedades mecánicas y verificar su adecuación para distintos usos industriales. Para ello, se emplearon ensayos normalizados que permitieron obtener datos precisos sobre su comportamiento.

La investigación abarca la descripción de los métodos utilizados, el procedimiento de medición y la interpretación de los resultados. Los hallazgos obtenidos contribuirán al conocimiento técnico de este acero y ofrecerán información valiosa para su aplicación en diversos entornos industriales.

# ANTECEDENTES

## Planteamiento del problema

El desgaste y los defectos son problemas comunes en materiales utilizados en aplicaciones industriales exigentes, especialmente en aquellos sometidos a condiciones de trabajo severas. En el caso del acero Chronit 400, un material conocido por sus propiedades mecánicas y resistencia al desgaste se ha observado que su desempeño puede verse afectado cuando es sometido a factores como el contacto continuo y los movimientos relativos bajo fricción.

Estas condiciones, comunes en ambientes industriales, generan un deterioro progresivo debido a la interacción con sustancias abrasivas, tanto naturales como sintéticas. Este deterioro no solo compromete la integridad superficial del material, sino que también afecta su funcionalidad a largo plazo, lo que puede traducirse en fallas operativas y costos significativos de mantenimiento o reemplazo.

La problemática radica en que, a pesar de las propiedades optimizadas del acero Chronit 400, como su alta dureza y resistencia a la deformación plástica, existe una necesidad de comprender

cómo estos factores de desgaste impactan su microestructura y propiedades mecánicas. Esto es especialmente relevante en aplicaciones donde está expuesto a ambientes hostiles con sustancias abrasivas que aceleran el proceso de desgaste.

Por lo tanto, resulta fundamental realizar una caracterización detallada del desgaste que afectan al Chronit 400, así como un análisis de los defectos que pueden generarse bajo estas condiciones.

**Importancia y alcance**

Esta investigación busca resaltar la importancia de conocer el aumento de dureza en una probeta de acero Chronit 400 bajo cargas de fricción. Se aplicará una carga específica entre dos cuerpos expuestos para analizar su efecto. Los resultados permitirán evaluar y ampliar el uso de este material en la industria minera, metalúrgica y en maquinaria pesada. Por ello el estudio de este material sería de gran utilidad para evitar fenómenos como desgaste abrasivo ante la presencia de fricción que se puede presentar como un factor externo perjudicando la superficie del acero y con ello el rendimiento. Un aspecto clave en el desarrollo del estudio será el establecimiento de parámetros como la velocidad de aplicación y la carga a la que se someterán las probetas, considerando el tiempo como variable de referencia.

# OBJETIVOS

## Objetivo general

Determinar experimentalmente el incremento de dureza al someter una probeta de acero Chronit-400 a esfuerzos de fricción de 5 kilogramos fuerza empleando un tiempo de 1 a 6 horas consecutivas.

## Objetivos específicos

- Realizar un análisis físico – químico del acero Chronit 400
- Determinar la dureza del acero Chronit 400 ante esfuerzos de fricción producidas durante un trabajo continuo.
- Evaluar las condiciones de servicio con las que este acero tiene mejores resultados.
- Evaluar el material midiendo la dureza antes y después de la aplicación de cargas constantes durante tiempos ininterrumpidos.

## GLOSARIO

- **Acero chronit:** acero de gran resistencia al desgaste por abrasión, impacto y deslizamiento [1].
- **Caracterización de dureza:** proceso que consiste en identificar un material a través del análisis de sus propiedades físicas, químicas y estructurales**.** [2].
- **Análisis físico** - químico: análisis para desterminar la composición del material y describir su composición química [3].
- **Espectroscopia**: técnica analítica – experimental utilizada para caracterizar un material.
- **Fuerza**: es la capacidad de generar una deformación a un cuerpo o el cambio de estado de movimiento [1]..
- **Esfuerzo**: medida física que cuantifica la fuerza aplicada sobre una superficie por unidad de área. [4].
- **Deformación plástica**: transformación permanente en la forma o tamaño de un material cuando se expone a una carga o fuerza que supera su límite elástico. Si la carga sigue incrementándose más allá de este límite, el material experimenta una deformación irreversible, debido al desplazamiento de los átomos a nuevas posiciones en su estructura cristalina. [2].
- **Fricción seca**: es un factor clave en el desgaste, la generación de calor y la deformación de los materiales, especialmente en aplicaciones donde hay movimientos repetitivos o prolongados [5].
- **Desgaste**: es el proceso de deterioro progresivo en la superficie de un material debido a la interacción mecánica con otra superficie, partículas abrasivas, o fluidos [5].
- **Movimiento relativo**: se refiere al desplazamiento de una superficie o cuerpo en relación con otra, ya sea por deslizamiento, rodadura, o una combinación de ambos [3].

# CAPÍTULO I

# FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## 1.1 Aceros anti-abrasivos

Los aceros resistentes a la abrasión han sido desarrollados con el propósito de ofrecer apoyo en el procesamiento de minerales y en el equipamiento de ingeniería, buscando extender su durabilidad en condiciones abrasivas y en situaciones con alto desgaste debido al contacto con otros metales o sustancias químicas[1].

Estos aceros anti-abrasivos cuentan con una composición química específica en la que el carbono desempeña un papel crucial. Además, la combinación de aleantes, como el cromo y el manganeso, aporta una resistencia notable al desgaste. En su formulación, estos elementos se encargan de asegurar la capacidad del acero para soportar condiciones abrasivas de manera efectiva. Por otro lado, la presencia de silicio desempeña una función clave al contrarrestar la formación de carburos [1].

Los aceros anti abrasivos se clasifican en:

- Al manganeso

- Con recubrimiento duro

- Bonificados

En este documento se estudiará estos tipos de aceros, y se abordará los aceros bonificados especialmente en el Chronit 400.

### 1.1.1 Aceros al Manganeso

Los aceros al manganeso se destacan principalmente por su microestructura austenítica, caracterizada por un alto contenido de carbono del 1,2% y un alto contenido de manganeso del 12 al 14% [1]. Estos aceros encuentran una amplia aplicación en condiciones de trabajo pesado, especialmente en situaciones que implican desgaste y deterioro de maquinaria debido a factores abrasivos.

En su estado de suministro, estos aceros presentan una dureza de 200 HB. Aunque su microestructura austenítica no experimenta un aumento significativo en dureza mediante tratamientos térmicos, estos aceros cuentan con una notable resistencia al desgaste gracias a su capacidad de autoendurecimiento por impacto, lo que incrementa su dureza superficial a más de 550 HB. Esta propiedad les permite soportar impactos intensos y aumentar la dureza superficial en aplicaciones de trabajo pesado [1].

La investigación en estos aceros anti-abrasivos ha permitido someterlos a diversos análisis de comportamiento mecánico, enfocados en mejorar características como el límite elástico, la resistencia al impacto, la fricción, la dureza y la resistencia a la corrosión. Estas investigaciones analizan cómo el acero responde ante esfuerzos mecánicos que pueden generar deformación plástica y un incremento en su dureza [1].

Entre los aceros más representativos de esta categoría se encuentra el acero CHRONOS, que contiene un alto porcentaje de manganeso (12.5%) en comparación con su contenido de carbono (1.23%), como se detalla en la Tabla 1. Este acero ha sido diseñado específicamente para soportar ambientes corrosivos y condiciones de alto impacto y desgaste[2]. Al ser sometido a trabajos pesados, como golpes y presiones específicas, el CHRONOS experimenta un endurecimiento que le proporciona una estructura más resistente, cabe destacar que esta dureza se obtiene en frío y es un factor determinante para su resistencia al desgaste[2].

**Tabla 1:** Componentes químicos para el acero CHRONOS [3].

| **Composición química del Acero CHRONOS** | | |
|---|---|---|
| **C** | **Si** | **Mn** |
| 1.23 | 0.4 | 12.5 |

### 1.1.2 Acero con recubrimiento duro

En el ámbito de la ingeniería, un objetivo primordial es aumentar la durabilidad de componentes mecánicos y herramientas sometidas al desgaste o a la fricción provocada por fuerzas externas. Para alcanzar este propósito, se utilizan recubrimientos de alta dureza que contribuyen a minimizar interrupciones imprevistas en los procesos productivos.

El proceso más utilizado para aplicar este tipo de recubrimiento es la fusión continua por soldadura sobre el material base, que emplea el uso de equipos oxiacetilénicos. En este proceso, la pieza que se va a revestir se calienta, y es crucial controlar cuidadosamente los parámetros de temperatura para evitar la pérdida de dureza en la pieza. Uno de los beneficios más destacados de este método es que logra aproximadamente un 50% más de carburos en comparación con otros procesos de soldadura[3].

Las planchas de acero antiabrasivo DURUM 100 y DURUM EXTRA presentan durezas promedio de 58 y 60 HRC, respectivamente, como se detalla en la Tabla 2. Esta variación en la dureza se atribuye principalmente al mayor contenido de titanio en el DURUM EXTRA, con un 1.5% adicional, lo que incrementa su resistencia frente a impactos.

El proceso de recubrimiento por fusión tiene como objetivo aumentar la resistencia a la abrasión en un 30% en comparación con otras planchas que cuentan con recubrimientos duros. Esto proporciona una protección efectiva para cualquier pieza sometida a procesos abrasivos severos o que puedan desgastar la superficie del material. Gracias a este método, se logra prolongar la vida útil de las piezas y herramientas, evitando interrupciones en la producción y optimizando su rendimiento en entornos de alta exigencia [4], [5].

**Tabla 2:** Análisis químico da las planchas bimetálicas de acero [8]

| **Elemento químico** | **% EN LOS ACEROS ANTIABRASIVOS DURUM 100** | **% EN LOS DURUM EXTRA** |
|---|---|---|
| Carbono (C) | 4,0 | 4,8 |
| Cromo (Cr) | 30-32 | 20-30 |
| Manganeso (Mn) | 3,3 | 3,0 |
| Boro (B) | 1,0 | 1,0 |
| Titanio (Ti) | 0,5 | 2,0 |
| Dureza Promedio | 55-60 HRC | 58-62HRC |

| | | |
|---|---|---|
| | Resistente a la abrasión moderada | Altas abrasiones e impactos |

### 1.1.3 Acero Bonificado

Los aceros bonificados son aleaciones especiales que se utilizan en diversos campos, como construcciones estructurales, minería, canteras y aplicaciones mecánicas. Se destacan por su alta resistencia a la abrasión causada por impactos y fricción, siendo hasta tres veces más tenaces y resistentes a la corrosión atmosférica que otros aceros al carbono. Estos aceros reciben un tratamiento térmico integral que afecta tanto al núcleo como a la superficie del metal para mejorar su resistencia y tenacidad [8].

La composición química de los aceros bonificados incluye principalmente un 1.80% de manganeso, 1.50% de cromo y 0.80% de níquel, lo que les otorga mejores propiedades mecánicas, traduciendo en mayor dureza, resistencia y tenacidad del material [5].

La tabla 3 muestra la composición química y los principales elementos aleantes en los aceros bonificados. Dependiendo del grado de bonificación, estos elementos pueden variar para lograr una templabilidad requerida y alcanzar la dureza deseada. Es fundamental obtener una buena resistencia al desgaste y la fatiga, así como una buena soldabilidad, ya que estos factores son fundamentales para reducir posibles fallos y fracturas en el material [7].

Entre los aceros bonificados más importantes están el CHRONIT 400 y 500. Sin embargo, en la investigación se tratará del acero Chronit 400.

**Tabla 3:** Principal Composición Química de los aceros bonificados [7].

| C | Si | Mn | Cr | Mo |
|---|---|---|---|---|
| 0.41 | 0.30 | 0.70 | 1.10 | 0.20 |

## 1.2 Microestructura de los aceros anti abrasivos

Los aceros anti-abrasivos presentan una microestructura característica antes de recibir un tratamiento térmico, donde la combinación de fases incluye ferrita, perlita y cementita. La presencia de estas fases dependerá del contenido de carbono del acero. En el caso específico del acero Chronit, que posee un bajo contenido de carbono, tiende a formar principalmente la fase ferrita, que se combina con otros aleantes que modifican su estructura.

Durante el tratamiento térmico, al elevar la temperatura de fusión, la fase ferrita y perlita se transforman en una fase conocida como austenita, que disuelve el carbono contenido en su estructura. Luego, mediante un enfriamiento rápido (en un período de 5 a 10 minutos), la austenita se convierte en martensita en solución sólida [5].

En el diagrama de la Figura 1, se observa el cambio de fase desde la austenita hasta la formación de martensita, que es la responsable de proporcionar la dureza característica de los aceros anti abrasivos después del tratamiento térmico. Sin embargo, es importante señalar que, aunque esta fase es dura, también es frágil. Por lo tanto, es necesario someterla a un proceso de revenido a temperaturas entre 200 y 650°C, durante un tiempo especificado por el fabricante, con el objetivo de aliviar tensiones internas y obtener una estructura conocida como martensita revenida[9].

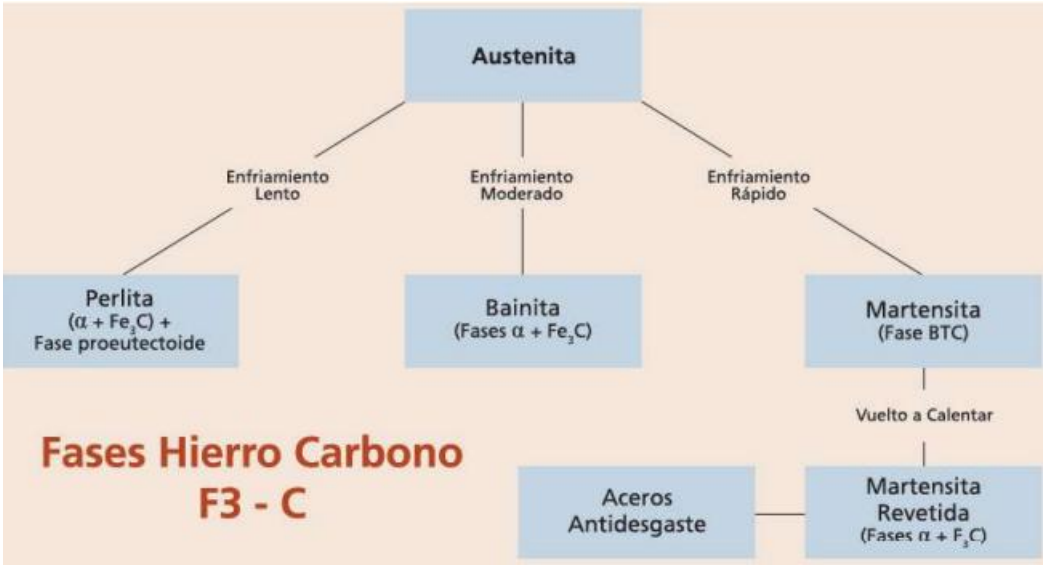



**Figura 1** Fases Hierro – Carbono desde austenita a martensita [5]

En la microestructura de la mayoría de los aceros anti-abrasivos de alta dureza, se encuentran presentes fases como la bainita, la martensita revenida y la austenita retenida. No obstante, es fundamental seguir estándares que especifiquen requisitos como la norma ASTM A 532 que especifica criterios detallados para la composición química, la microestructura y el tratamiento térmico de estos aceros, donde es preciso la adición de elementos aleantes a la estructura del acero, como cromo, manganeso, molibdeno, fósforo y níquel. En algunas ocasiones, la incorporación de un porcentaje de silicio entre 0.3% y 0.6% es suficiente para desoxidar el acero durante su fabricación y modificar su microestructura, ayudando a controlar la formación de cementita y evitar la concentración de carburos sin comprometer la resistencia al desgaste[10].

**Principales aspectos de la norma ASTM A532**

1. **Composición Química**: La norma establece los rangos específicos de elementos de aleación que deben incluirse en la composición química del acero para optimizar su resistencia al desgaste. Elementos como **cromo**, **carbono**, **manganeso**, **molibdeno**, y **níquel** son comunes, ya que estos aportan resistencia al desgaste y tenacidad. Por ejemplo, los niveles de cromo suelen ser elevados (del 12 al 30%) para formar carburos duros que mejoran la resistencia abrasiva [10].
2. **Clasificación en Grados**: ASTM A532 clasifica estos aceros en varios **grados y clases** en función de su composición y propiedades específicas. Cada grado está diseñado para resistir tipos particulares de desgaste o impacto. Por ejemplo:
    - **Clase I**: Son aceros altamente aleados y son adecuados para condiciones de abrasión severa con baja o moderada intensidad de impacto.
    - **Clase II y III**: Tienen diferente combinación de elementos, siendo más adecuados para aplicaciones con requisitos de impacto medio a alto.

3. **Tratamiento Térmico**: La norma también detalla procedimientos de tratamiento térmico, como **templado y revenido**, para optimizar la microestructura de los aceros y maximizar la formación de fases duras, como la martensita y los carburos. Estos tratamientos son esenciales para asegurar una dureza uniforme y evitar la fragilidad.

4. **Propiedades Mecánicas**: ASTM A532 especifica niveles de dureza típicos para cada grado de acero resistente a la abrasión, medidos en escalas de dureza Brinell o Rockwell. Esto permite garantizar que los aceros tratados bajo esta norma tengan la dureza y tenacidad requeridas para enfrentar condiciones de desgaste sin fallar [11].

## 1.3 Principales aleantes de los aceros anti-abrasivos

Los aceros anti-abrasivos, incluyendo el acero Chronit 400, son aleaciones de acero de bajo contenido de carbono que incorporan proporciones controladas de diversos elementos aleantes, siendo los más relevantes el Cromo (Cr), Manganeso (Mn), Níquel (Ni) y Silicio (Si), como se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4:**Aleaciones de los aceros anti-abrasivos [7], [1].

| **Elemento Aleante** | |
|---|---|
| Silicio (Si) | La adición de este elemento mejora las propiedades mecánicas y evita la formación de carburos. |
| Cromo (Cr) | El cromo hasta en un 4% aumenta la dureza, elasticidad y resistencia a la tracción de los aceros. |
| Níquel (Ni) | Proporciona mayor resistencia a la tracción y tenacidad e influye en la resistencia la corrosión. |
| Manganeso (Mn) | El manganeso en contenidos superiores al 0.8% otorga resistencia al desgaste y al impacto con lo cual resulta útil en aplicaciones de blindaje, trituradoras, entre otras aplicaciones. |

## 1.4 Acero Chronit 400

El acero Chronit 400 es una aleación diseñada para resistir el desgaste causado por la abrasión e impacto. Dado su notable desempeño mecánico, este acero se emplea en diversas aplicaciones, tales como elementos estructurales, equipos para el manejo de minerales, volquetas y molinos de piedra. Destaca especialmente en procesos que involucran altos niveles de abrasión,

provocados por la carga y el contacto constante con partículas abrasivas. Mediante un tratamiento térmico de temple y revenido, se logra obtener una estructura martensítica que presenta una dureza promedio de 400 HB (Dureza Brinell) [6].

En la figura 2 se muestra el incremento en la dureza de un acero Chronit anti-abrasivos de 360 HB, fabricado por Iván Bhoman. Bajo condiciones de trabajo, este acero experimenta un endurecimiento que eleva su dureza en 70 HB, demostrando así su capacidad de adaptación y resistencia en entornos exigentes.

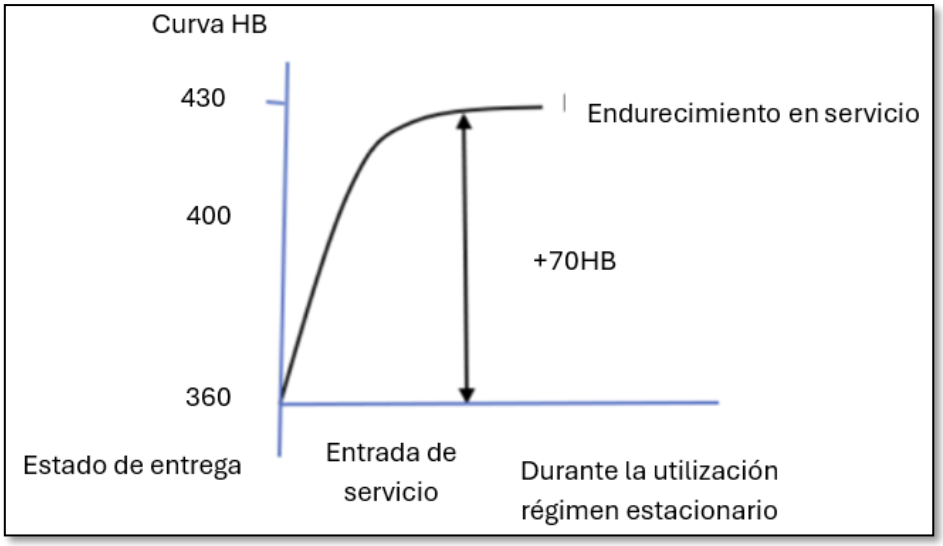



**Figura 2.** Endurecimiento del acero Chronit 400 anti-abrasivos

Debido a su alta utilidad en la industria minera este acero es utilizado en construcciones, en piezas soldadas resistentes a altas temperaturas, además este tipo de aleación que contiene níquel presenta una alta tenacidad a temperaturas de hasta -40°C, siendo muy útil en la fabricación de recipientes de presión y depósitos subterráneos entre otros [8].

### 1.4.1 Propiedades físicas, químicas y mecánicas del Acero Chronit 400.

Los aceros anti-abrasivos, como el **Chronit 400**, están diseñados con propiedades físicas, químicas y mecánicas cuidadosamente ajustadas para asegurar una alta resistencia a la abrasión y una durabilidad prolongada.

La resistencia del acero Chronit 400 a la abrasión se debe a su composición química específica, que incluye elementos de aleación como cromo, silicio, manganeso y níquel, entre otros, como se presenta en la tabla 5. Diversas combinaciones de aleantes permiten la fabricación de variantes, como el **Chronit 400** y el **Chronit 500**. La principal diferencia entre ambos es el contenido de cromo: el Chronit 400 contiene un 0.4%, mientras que el Chronit 500 alcanza un 0.8% en su estructura[8].

**Tabla 5.** Composición Química en % del Acero Chronit 400 y 500 *[12]*.

| | **Composición Química** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **dureza** | **C** | **Si** | **Mn** | **P** | **S** | **B** | **Cr** |
| **500 HB** | ≤0.30 | ≤0.50 | ≤1.60 | ≤0.025 | ≤0.010 | ≤0.004 | ≤0.8 |
| **400 HB** | ≤0.20 | ≤0.50 | ≤1.80 | ≤0.025 | ≤0.010 | ≤0.004 | ≤0.4 |

La tabla 6 se ve los valores correspondientes al CET (Carbono equivalente total) y CEV (Carbono equivalente) que contribuyen a la designación de la resistencia al agrietamiento por absorción de hidrogeno de un acero, estos valores equivalentes significan el alcance que requiere un determinado valor de carbono en aceros aleados para precalentamientos de juntas y prevenir craqueo en las piezas, con las fórmulas de carbono equivalente CET Y CEV de las ecuaciones 1 y 2 se logra calcular el valor para cada espesor [13].

**Tabla 6**. Valores típicos de carbono para distintos espesores[13]

| **Espesor mm** | **≤25** | **>25≤30** | **>30≤50** | **>50≤90** | **>90≤150** |
|---|---|---|---|---|---|
| 2)CEV | 0.37 | 0.44 | 0.54 | 0.64 | 0.72 |
| 3)CET | 0.27 | 0.3 | 0.33 | 0.36 | 0.38 |

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \qquad (1)$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \qquad (2)$$

## Propiedades Mecánicas del Acero Chronit 400

Las propiedades mecánicas del acero Chronit 400 son notables. Con un límite de fluencia promedio de 1200 N/mm2, se destaca por su alta resistencia a la deformación plástica, lo que le permite soportar fuerzas exteriores cíclicas, dinámicas o estáticas, tal como se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7.** Comparación de las características mecánicas del acero Chronit 400 y Chronit 500[13]

| Características mecánicas | Chronit 400 | Chronit 500 |
|---|---|---|
| Dureza de suministro HB | 420- 480 | 450 – 530 |
| Resistencia a la tracción N/mm2 | 1316 | 1650 |
| Límite de fluencia N/mm2 | 1163 | 1300 |
| Elongación (mínimo)% | 10 | 8 |
| Tenacidad (longitudinal) JOULES | 25(-40°C) | 25(-20°C) |

## Conformado en frio

A pesar de su alta dureza, el **acero Chronit 400** puede ser conformado en frío, lo que permite deformar el metal plásticamente sin comprometer su resistencia mecánica. No obstante, el conformado debe realizarse a bajas velocidades debido al esfuerzo significativo que este acero exige en la maquinaria de conformado[4].

## Conformado en caliente

El conformado en caliente es un proceso que se realiza en etapas a temperaturas superiores a la de recristalización del metal (400-800 °C). Este método tiene como finalidad ablandar el metal para facilitar la obtención de piezas conformadas en caliente, que luego alcanzan altas resistencias. Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de temple para lograr la dureza requerida. Cabe destacar que la dureza obtenida puede variar respecto a la condición inicial del material, según el tratamiento térmico que aplique el fabricante[14].

**Mecanizado**

El mecanizado de los aceros anti-abrasivos, incluyendo el acero Chronit 400, se realiza con herramientas de carburo de tungsteno o placas de metal duro con una elevada dureza (mínimo 500HB), como se especifica en las tablas 8 y 9. [4], Estos procesos de cepillado, fresado y taladrado deben llevarse a cabo utilizando portaherramientas con insertos intercambiables en un montaje rígido y libre de vibraciones. Para taladrar, se pueden utilizar brocas de acero rápido al cobalto o brocas con recubrimiento de nitruro de titanio A002 DORMER.

El acero Chronit 400 presenta propiedades excepcionales que lo hacen ideal para aplicaciones en la industria minera y otras áreas industriales que requieren materiales resistentes al desgaste y duraderos en condiciones extremas.

**Tabla 8.** Instrucciones para la mecanización, con pastillas de metal duro y ángulo de ataque positivo[4].

| **Mecanizado** | **Profundidad de corte en mm** | **Avance mm/r** | **Material de corte (metal duro)** | **Velocidad de corte m/min** |
|---|---|---|---|---|
| Cepillado | Hasta 3 | Hasta 1 | Boehlerit EB 30/SB40 | 35-20 |
| | | Mas de 1 | Boehlerit EB 30/SB40 | 25-10 |
| FRESADO | Hasta 2 | Hasta 0.2 | Boehlerit SBF | 120-60 |
| | | | Boehlerit SB40 | 70-45 |
| | | | Boehlerit Royal 131 | 80-60 |

En la tabla 9 se obtiene los parámetros pertinentes para realizar un taladrado adecuado para aceros duros como el acero Chronit 400.

**Tabla 9.** Taladrado para un ángulo de punta 115-120° [4]

| Mecanizado | Diámetro mm | Avance mm/r | Material de corte Metal Duro | Velocidad de corte m/min |
|---|---|---|---|---|
| Taladrar | 3-8 | 0.02-0.05 | Boehlerit HB10 | 50-35 |
| | 8-20 | 0.05-0.12 | Boehlerit HB10 | 35-50 |
| | 20-40 | 0.12-0.18 | Boehlerit HB10 | 12-35 |

### 1.4.2 Soldabilidad y corte con oxiacetilénico del acero Chronit 400

Para cortar el acero Chronit 400 mediante oxiacetileno, es necesario seguir pautas específicas para asegurar un corte efectivo y seguro. De acuerdo con el catálogo de **Aceros Böhler del Perú S.A.**, en espesores de 20 a 35 mm se recomienda un precalentamiento mínimo de 100 °C. Para espesores superiores, el precalentamiento debe ser de al menos 150 °C [15]. Este precalentamiento ayuda a evitar problemas durante el corte, garantizando una separación limpia y precisa de las piezas.

En cuanto a la soldadura manual por arco eléctrico con electrodos en el acero Chronit 400, es fundamental mantener los electrodos secos para asegurar la calidad de la soldadura. La necesidad de precalentamiento varía según el espesor de la pieza a soldar. Para espesores de hasta 20 mm, no es necesario el precalentamiento, y se puede proceder directamente con la soldadura. Sin embargo, si el espesor supera los 20 mm, es necesario precalentar la pieza entre 125 °C y 175 °C para evitar problemas como fracturas, porosidades o fragilidad, que pueden ser causadas por la introducción de hidrógeno durante el proceso de soldadura. Es importante evitar que la temperatura supere los 200 °C [13], [15], ya que esto podría disminuir la dureza del acero, como se muestra en la figura 3.

### 1.5 Ventajas y aplicaciones de los aceros antiabrasión de alta dureza.

Los aceros antiabrasivos han ganado una aceptación significativa en la industria minera debido a su excepcional resistencia y durabilidad, permitiendo extender la vida útil de los componentes hasta cinco veces en comparación con los aceros convencionales. Actualmente, se están desarrollando nuevas aplicaciones para estos aceros, como su uso en la perforación de roca sólida en entornos mineros, donde deben soportar factores ambientales adversos, condiciones de trabajo exigentes y elementos abrasivos naturales.

La elección del tipo de acero adecuado es crucial y debe basarse en sus propiedades físicas y mecánicas, teniendo en cuenta las necesidades específicas de cada aplicación y las exigencias particulares de la industria. Estos aceros son seleccionados cuidadosamente para garantizar una alta resistencia y durabilidad, mientras que también se consideran opciones de producción que minimicen los costos. La tabla 10 muestra algunos de los aceros más relevantes encontrados en la industria, junto con sus aplicaciones típicas en la industria.

**Tabla 10**. Tabla de aceros comunes con su aplicación industrial [15].

| Acero AISI Num. | Usos típicos |
|---|---|
| 1020 | Acero estructural, placas, barras |
| 1040 - 1050 | Partes de maquinarias |
| 1095 | Herramientas, resortes |
| 1137 | Partes de maquinaria para fabricar tornillos |
| 1141 | Flechas, partes de maquinas |
| 4140 - 4130 -4150 | Aceros de alta resistencia, flechas, engranes pasadores |
| 5160 | Engranes de alta resistencia, pernos |
| 8760 | Fabricación de resortes |

En específico el acero Chronit 400 se puede encontrar dentro de las siguientes áreas:

- Minería: en maquinaria como cribas, molinos, machacadoras.
- Transporte: tractores, excavadoras, maquinaria pesada.
- Piezas mecánicas sometidas tanto a esfuerzos mecánicos como térmicos, por ejemplo: piñones, flechas, bielas y engranes de varios tamaños.

Los aceros Chronit son altamente valorados por su resistencia a la corrosión ante agentes atmosféricos y factores de fricción a los que son sometidos, lo que los convierte en materiales ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales [12].

**Figura 3.** Maquinaria utilizada para trabajos pesados. a) maquinaria para remover tierra b) excavadoras de minerales c) tractor [16]

Este tipo de acero es utilizado en maquinaria para el movimiento de tierra, piedras y minerales abrasivos, así como se presenta en la figura 5.

Para seleccionar un material en aplicaciones industriales, es fundamental conocer su dureza según el área de uso. Un ingeniero mecánico podría considerar que los materiales duros son frágiles y poco adecuados para cargas de impacto, mientras que un tribólogo valoraría su alta dureza por minimizar la deformación plástica y el desgaste en piezas sometidas a deslizamiento. Por otro lado, en el campo de la metalurgia, la baja dureza puede ser clave para metales laminados en frío, y en la manufactura, se pueden preferir materiales más suaves para maquinados rápidos y una mayor producción sin sobrecargar las máquinas [17].

## 1.6 Dureza

La dureza de un material se define como su capacidad para resistir deformaciones plásticas o indentaciones bajo la aplicación de una carga, presión o desgaste mecánico. Esta propiedad puede indicar si es necesario aplicar tratamientos térmicos para reforzar el material en caso de requerir una mayor resistencia.

Existen tres escalas principales para medir la dureza de un material, cada una basada en un tipo de indentador específico. El ensayo Brinell emplea un indentador esférico, el ensayo Vickers utiliza un indentador piramidal, y el ensayo Rockwell emplea un indentador esférico con punta de diamante

[16].

Para evaluar la dureza de una superficie metálica, se preparan probetas específicas que se someten al uso de un indentador, como se muestra en la figura 4. El proceso comienza con la introducción del indentador en el área a evaluar, aplicando primero una carga preliminar menor y registrando la profundidad alcanzada. Posteriormente, se aplica una carga adicional que aumenta la penetración en el material. La diferencia en profundidad antes y después de esta carga permite calcular la dureza del material [9].

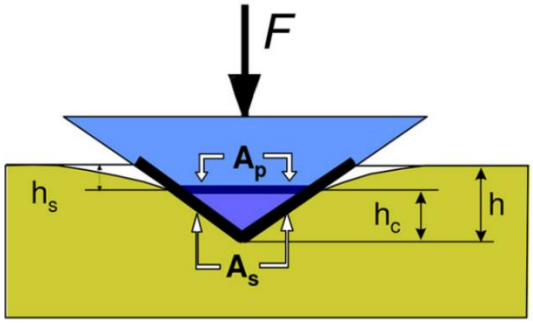



**Figura 4.** Profundidad de penetración para ensayos rockwell [17].

**Donde**

**h:** profundidad de penetración

**hc:** profundidad de contacto

**hs:** desplazamiento elástico

**As:** área elástica

**Ap:** área de penetración

**F:** Fuerza

Puntos fundamentales para desarrollar un ensayo de dureza.

- Carga a ser aplicada en el material
- Tiempo aplicado por probeta de carga explicita
- Geometría de aplicación de penetrador especifica

En muchos ensayos de dureza, especialmente si el material es muy duro o heterogéneo, se requerirá un tiempo de impresión más prolongado para poder valorar la marca dejada por el indentador [17].

Garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados. Es esencial aplicar los procedimientos adecuados para valorar la dureza del acero en función de la aplicación específica en la que será utilizado [18].

Puntos importantes para tomar en cuenta para proceder a realizar un ensayo de dureza.

- Tipo de material que se va a someter a ensayo.
- Normativa a la que se debe regir el ensayo si es el caso.
- Tamaño y grosor de la pieza
- Numero de probetas que van a ser evaluadas.

### 1.7 Fricción por rodadura

La fricción por rodadura ocurre cuando dos objetos están en movimiento continuo y uno de ellos rueda sobre la superficie del otro. Este tipo de fricción se define como la resistencia al movimiento entre los cuerpos, lo cual provoca una pérdida gradual de material debido a las fuerzas externas que generan desgaste en la superficie [19].

El roce producido por el contacto entre ambas superficies puede llevar a una pérdida permanente de material debido al desgaste. La figura 5 ilustra cómo la fricción causa desgaste entre superficies duras que se deslizan una sobre la otra, resultando en una pérdida de material en las piezas en contacto [5].

Este fenómeno de fricción y desgaste es frecuente en numerosos entornos industriales y mecánicos. Comprenderlo es esencial para diseñar componentes y maquinarias más duraderas y eficientes, reduciendo el desgaste y prolongando la vida útil de los materiales. La lubricación adecuada y el uso de materiales resistentes a la abrasión son estrategias comunes para mitigar los efectos de la fricción y el desgaste en los componentes mecánicos [19].

**Figura 5.** Remoción de material entre superficies duras que se encuentran en contacto [19]

## 1.8 Desgaste por esfuerzos de fricción.

La fricción es un tipo de desgaste que afecta directamente al material y genera daño en las piezas mecánicas, especialmente en condiciones de trabajo intenso. Este desgaste se produce debido al calor generado entre las superficies en contacto, lo que da lugar a una oxidación superficial y a la formación de microsoldaduras. Además, pueden observarse daños menores, como rayones, producidos por el desprendimiento de material en áreas con menor dureza [20].

Cuando la dureza del material se ve afectada por el tiempo de trabajo y por la acción repetida de cargas, pueden aparecer microgrietas en la superficie, las cuales se propagan a través del área de contacto. La fricción producida por el deslizamiento entre dos superficies es un aspecto crucial a considerar en el estudio del desgaste causado por su interacción. A mayor tiempo de deslizamiento o rodadura, mayor es la cantidad de material perdido entre las superficies en contacto [7].

En el análisis del comportamiento de elementos circulares, la fricción y el desgaste adquieren relevancia debido a los factores ambientales y externos que influyen en la naturaleza del material. Estos factores pueden incluir las velocidades de aplicación de fuerza y los esfuerzos aplicados durante determinados periodos, o incluso la erosión causada por la exposición a elementos naturales. Además, el grado de deformación del material, ya sea en frío o mediante un tratamiento térmico, también impacta en el desgaste y en su respuesta a la fricción [7].

## 1.9 Desgaste Abrasivo

### 1.9.1 Partículas Abrasivas

El desgaste entre superficies genera rebabas debido a la fricción continua entre materiales, lo que provoca la pérdida de pequeñas partículas de material en las piezas más duras. A pesar de la rugosidad de estas superficies, algunas de las partículas desprendidas pueden actuar como abrasivos, influenciadas tanto por factores ambientales como sintéticos[21].

### 1.9.2 Factores causantes del desgaste abrasivo por contacto

El desgaste abrasivo por contacto se produce cuando dos superficies metálicas están en movimiento relativo por un período de tiempo prolongado. Este tipo de desgaste es común en la industria, donde maquinarias operan a diferentes frecuencias y la interacción entre las piezas ocurre en ausencia de lubricante. Las altas velocidades de operación y las vibraciones de alta frecuencia desgastan la capa superficial del acero, incrementando el desgaste [22].

En el sector industrial, existe un interés considerable en analizar el desgaste, las fallas y la lubricación de las piezas mecánicas. Factores como la temperatura, los contaminantes y las partículas abrasivas (por ejemplo, granos, rebabas y polvos de canteras) son aspectos críticos en ambientes de trabajo secos, húmedos o salinos. Además, el movimiento de rodamiento que provoca vibraciones o deslizamientos entre superficies contribuye al desgaste y puede generar fallas en los sistemas mecánicos [21].

Los aceros anti-abrasivos de alta dureza, como los de clase 400-500 HB, son especialmente valorados por su resistencia mecánica frente a factores abrasivos. Por esta razón, es fundamental caracterizar la dureza que adquieren tras estar sometidos a esfuerzos de fricción. La tabla 11, presenta los atributos de estos aceros cuando son sometidos a esfuerzos y cambios estructurales que pueden afectar su integridad.

**Tabla 11.** Atributos cuando un acero está sometido a esfuerzos o cambios producidos en su estructura que dañen el material [19]

| Atributo | Variación |
|---|---|
| Cantidad de componentes en contacto | - Desgaste abrasivo por contacto entre un cuerpo blando y una superficie dura.<br>- Pérdida de partículas entre superficies en contacto. |
| Nivel de esfuerzo al que va a estar sometido. | - Sumamente esforzada o poco esforzada |
| Cambios que se producen en la capa superficial | - Desgarramiento por fuerzas externas o pulido debido a la fricción. |
| Si hay un fluido abrasivo | - Abrasión en seco o en húmedo, influenciada por partículas químicas o naturales |
| Dureza relativa, aparición de partículas finas producto de la fricción y perdida de material | - Superficies endurecidas o modificadas por partículas en contacto |

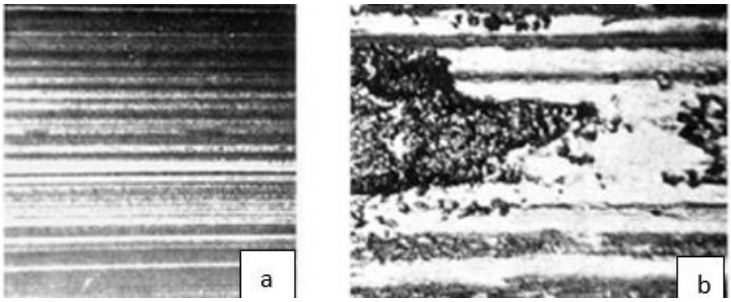



**Figura 6.** Imagen Izquierda (a) desgaste leve en la superficie; Imagen Derecha (b) desgaste severo por partículas abrasivas [6]

En la Figura 6 (a) se observa un desgaste leve en la superficie del acero, representado por líneas uniformes y con mínima profundidad. Por otro lado, la Figura 6 (b) muestra un desgaste severo con marcas profundas y zonas amorfas, lo que indica un daño considerable en la superficie.

La microscopía óptica permite examinar la estructura y los cambios en la superficie del material debido a la fricción y las partículas abrasivas. Estos factores alteran la calidad y las propiedades

mecánicas del acero. La Figura 6 (a) ilustra un desgaste leve con un patrón uniforme, mientras que la Figura 6 (b) revela un desgaste severo, lo que indica que el material ha sufrido daños significativos.

# CAPÍTULO II

## 2.1 Preparación de probetas para caracterización.

Para esta investigación, se utilizó un acero antiabrasivo Chronit de grado 400 HB (dureza Brinell), conocido por su alta resistencia al desgaste, superando en un 40-45% la durabilidad de otros aceros comerciales.

La finalidad de este estudio es caracterizar la relación entre la variación de la dureza bajo la fricción cíclica en el acero Chronit 400 mediante ensayos de dureza aplicadas en intervalos de tiempo de entre 1 y 6 horas.

Dentro del estudio es fundamental analizar la composición química del acero en estudio, por lo que se realizó un análisis químico mediante espectrofotometría de chispa, para así caracterizar la dureza de las probetas tanto en su estado de suministro como tras ser sometidas a condiciones de fuerza, velocidades controladas que genere movimiento en la superficie y con ella fricción.

En la Figura 9 se observa que las probetas de acero Chronit 400 que presentan una aleación con alto contenido de cromo y manganeso, lo que permite una buena soldabilidad y facilidad para el trabajo en frío, a pesar de su alta resistencia al desgaste. Estas propiedades convierten a este acero en una opción confiable y duradera para aplicaciones industriales de alta exigencia.

**Figura 7.** Material de estudio (Acero Chronit 400)

### 2.1.1 Metodología

### 2.1.2 Preparación del ensayo

Para evaluar el incremento en la dureza superficial del acero Chronit 400, se diseñó un ensayo de desgaste por fricción, para el que se maquinaron probetas circulares de este acero, con dimensiones específicas las cuales fueron sometidas a cargas cíclicas mediante el contacto con esferas de acero templado de 1/4 de pulgada de diámetro y una dureza de 65 HRC utilizando una carga constante de 5Kg. Al variar el tiempo de exposición al desgaste, se indujo una deformación plástica en la superficie de las probetas, lo que genera un aumento en la densidad de dislocaciones y, por consiguiente, un incremento en la dureza superficial. Para cuantificar este efecto, se midió la dureza Rockwell C en la zona de contacto después de cada intervalo de una hora, en un plazo de 6 horas.

Se espera que los resultados obtenidos permitan establecer una relación directa entre el tiempo de exposición al desgaste y el incremento en la dureza del material, proporcionando información valiosa para la selección y aplicación de este tipo de acero en componentes sometidos a condiciones de desgaste abrasivo.

En la figura 8 se presenta el diagrama de flujo que describe el proceso de evaluación utilizado para la determinación del efecto del desgaste por fricción en el endurecimiento del acero Chronit 400.

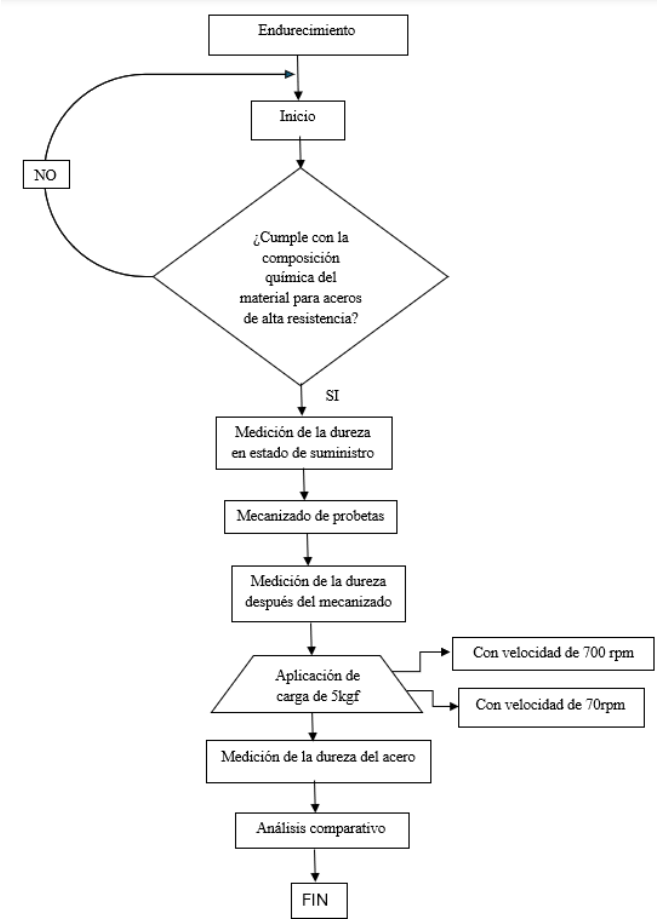



**Figura 8.** Diagrama de proceso de ensayo para el proceso de endurecimiento controlado del material.

## 2.2 Mecanizado de probetas del acero Chronit 400

Con el objetivo de evaluar el proceso progresivo de endurecimiento del acero Chronit 400 bajo condiciones de desgaste, con relación al tiempo de aplicación de la carga y la velocidad de rotación como variables, se fabricaron probetas circulares con dimensiones específicas (diámetro externo de 70 mm, diámetro interno de 40 mm y espesor de 6 mm) en las que se incluyó una ranura central, con dimensiones similares a las de un rodamiento, simulando las condiciones de contacto que se presentan en aplicaciones reales donde este tipo de acero podría ser utilizado, como se muestra en la figura 9.

Para garantizar la precisión dimensional y la calidad superficial de las probetas, se emplearon procesos de mecanizado convencionales como el fresado y el rectificado. El fresado se utilizó para dar forma a la ranura, mientras que el rectificado permitió obtener una superficie final con

una rugosidad controlada estableciendo una profundidad en la ranura de 2,5mm valor seleccionado para asegurar un contacto adecuado entre la probeta y el elemento de desgaste, tal como se detalla en el anexo II.

Las probetas circulares se mecanizaron en una fresadora universal Emcomill FB450-L/FB600-L, empleando un portaherramientas SDLCR 2020 K11 y un refrigerante a base de aceite HD32 con un 10% de diésel para optimizar la evacuación de viruta y minimizar el desgaste de la herramienta. Se estableció una velocidad de corte de 70 m/min y un avance de 0.1 mm/diente, configurando así parámetros de corte que garantizaran un mecanizado eficiente y preciso. Este acabado, caracterizado por su baja rugosidad y ausencia de defectos superficiales, fue esencial para asegurar condiciones de contacto homogéneas y reproducibles durante los ensayos de fricción, minimizando la influencia de irregularidades superficiales en los resultados.

Una vez preparadas, las probetas se sometieron a trabajo cíclico por fricción seca con el fin de analizar el endurecimiento del acero Chronit 400. Los resultados obtenidos de estos ensayos proporcionarán información valiosa sobre el comportamiento del acero frente a la fricción, su capacidad para resistir el desgaste y la variación de su dureza bajo condiciones de trabajo severas.

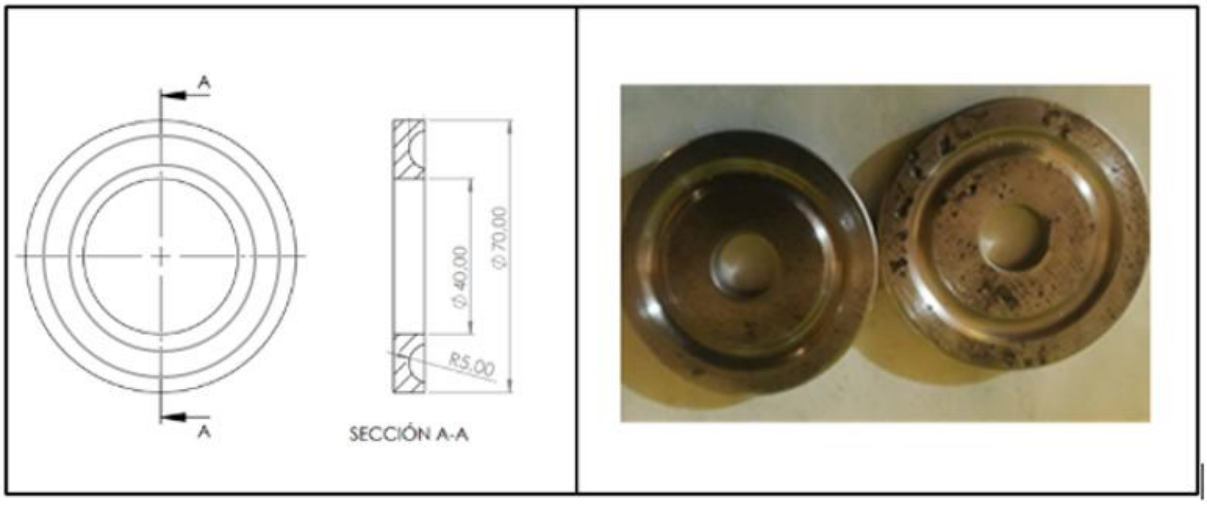



**Figura 9.** probetas de acero Chronit 400

## 2.3 Caracterización del acero Chronit 400

### 2.3.1 Ensayo de espectrometría

Para realizar el análisis químico de las probetas, se utilizó un ensayo de espectrofotometría por chispa con una muestra del acero en estudio, mediante este ensayo se constató los porcentajes químicos del acero correspondientes al acero anti-abrasivos conocido en la industria como Chronit 400. Estos ensayos fueron llevados a cabo utilizando un espectrofotómetro de marca Foundry Master Expert, tal como se muestra en la figura 10.

**Figura 10**. Espectrómetro por chispa (laboratorio espectrometría)

La técnica de espectrofotometría por chispa permitió analizar con alta precisión los compuestos químicos que conforman una muestra. Esta técnica es capaz de detectar componentes en cantidades muy pequeñas o elevadas de elementos aleantes, brindando resultados inmediatos a través de su programa integrado [21]. Por esta razón, es ampliamente utilizada en procesos de control de calidad, para obtener resultados confiables, se realizaron tres ensayos en la probeta de acero Chronit 400. Se buscó la superficie más uniforme y libre de asperezas u óxidos con el fin de obtener los mejores resultados posibles en el análisis químico.

Los resultados del análisis químico se presentan en la tabla 12. estos datos son de gran importancia, ya que proporcionan información detallada sobre la composición química del acero, lo que permite corroborar que efectivamente se trata del acero anti-abrasivos conocido como Chronit 400. Estos resultados aseguran la confiabilidad de estar trabajando con el acero

correcto, ya que, según los lineamientos del fabricante, es necesario controlar las proporciones precisas de los elementos aleantes como el cromo (Cr), manganeso (Mn), silicio (Si) y carbono (C) dentro de los rangos especificados que se describen en la Tabla 13 para lograr una composición óptima del 90% en la colada [14].

**Tabla 12.** Mediciones correspondientes al acero Chronit 400, en comparación con el fabricante Bholer

| COMPOSICIÓN QUÍMICA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Elemento químico** | | **Medición 1** | **Medición 2** | **Medición3** | **Promedio** | **Fabricante Bholer** |
| Hierro | %Fe | 96.5 | 96.6 | 96.7 | 96.6 | 96 |
| Carbono | %C | 0.168 | 0.147 | 0.133 | 0.1493 | 0.15 |
| Silicio | %Si | 0.401 | 0.358 | 0.320 | 0.359 | 0.60 |
| Manganeso | %Mn | 2.08 | 2.05 | 2.03 | 2.0533 | 2.30 |
| Cromo | %Cr | 0.590 | 0.578 | 0.574 | 0.5806 | 0.50 |
| Titanio | %Ti | 0.0314 | 0.0303 | 0.0293 | 0.0303 | 0.050 |
| Boro | %B | 0.0025 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0022 | 0.005 |
| Fosforo | %P | 0.0152 | 0.0131 | 0.0131 | 0.0138 | 0.025 |
| Azufre | %S | 0.0155 | 0.0158 | 0.0147 | 0.01533 | 0.010 |
| Aluminio | %Al | 0.0256 | 0.0243 | 0.0216 | 0.0238 | 0.020 |
| Molibdeno | %Mo | 0.0010 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0010 | 0.20 |

**Figura 11**. Ensayo de espectrometría por chispa del material para la evaluación del compuesto químico

Tabla 13: tabla de elementos aleantes controlados

| Si | Mn | Cr | C |
|---|---|---|---|
| ≤ 0.60 | ≤2.30 | ≤1.50 | ≤0.20 |

## 2.4 Ensayos de dureza

El procedimiento para la preparación del ensayo de dureza se ocupó un durómetro de marca Phase II modelo 900 como se ve en la figura 14, donde se llevará a cabo al análisis de la dureza en todas sus etapas.

**Figura 12**. Durómetro marca Phase II de laboratorios Universidad Politécnica Salesiana

En la primera etapa se realizaron mediciones de dureza en las probetas de acero Chronit 400 en estado de suministro donde no ha recibido ningún trabajo o esfuerzo que pueda alterar su estructura, como se muestra en la figura 15. Encontrando valores de dureza dentro del rango de 360 a 440 HB (38-42HRC).

**Aumento de Dureza Después del Mecanizado**

En la segunda etapa del experimento, se evaluó el aumento de dureza resultante del proceso de mecanizado. Para ello, se realizaron ocho indentaciones en cada probeta, distribuidas en cuatro puntos específicos de la circunferencia: a las 12, 3, 6 y 9 horas, repitiendo las mediciones en cada punto para obtener un promedio representativo de la dureza general. Este procedimiento se aplicó a cada probeta según su condición de ensayo (tiempo de trabajo).

Este análisis reveló un notable aumento de dureza debido al trabajo realizado durante el desbastado, lo cual confirma cómo el proceso de mecanizado puede mejorar las propiedades mecánicas del acero Chronit 400, haciéndolo más adecuado para aplicaciones que requieren alta resistencia al desgaste. Los resultados de estas mediciones, que presentan una desviación estándar generalizada de ±1.816 HRC, se detallan en el Anexo III.

**Aumento de Dureza Después del Trabajo en Fricción**

En la tercera etapa, se midió la dureza en el área de la ranura donde la esfera templada estuvo en contacto directo con el acero, permitiendo evaluar el cambio de dureza después de aplicar esfuerzos de fricción sobre el material. Estos ensayos de dureza son fundamentales para probar el incremento de la dureza del material en función del trabajo que realizo el acero Chronit 400 utilizado en este estudio, con esto se espera encontrar que cumpla con las condiciones especificadas por el fabricante para su correcto desempeño en las aplicaciones industriales.

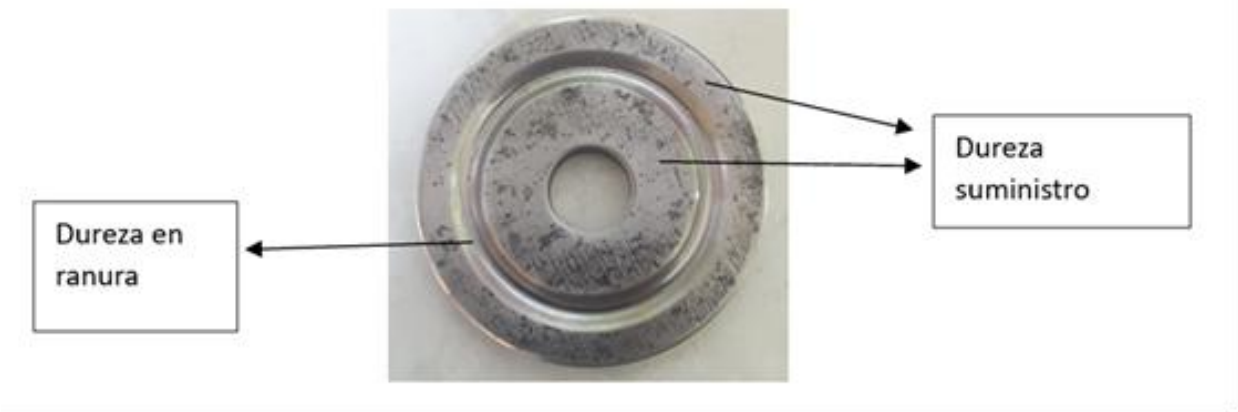



**Figura 13**. Lugares de valoración de dureza

Para la medición de la dureza, se realizaron cuatro indentaciones a lo largo de todo el canal de cada disco de acero Chronit 400, utilizando la escala Rockwell C. El ensayo se llevó a cabo sin lubricación, es decir, sin el uso de aceite ni grasa, en el equipo previamente mencionado. Se emplearon esferas templadas de ¼ de pulgada, comúnmente utilizadas en rodamientos, a las cuales se les aplicó una carga de 5 kgf contra el disco de acero Chronit 400. Durante el ensayo, representado en la figura 16, el disco giró a una velocidad constante de 70 y 700 rpm en cada probeta, afectando todo el canal de la ranura durante un tiempo de trabajo continuo de 1 a 6 horas consecutivas. Estas condiciones de ensayo permitieron evaluar la resistencia al desgaste y el endurecimiento del acero Chronit 400 en función del tiempo de exposición y las fuerzas de fricción cíclicas aplicadas.

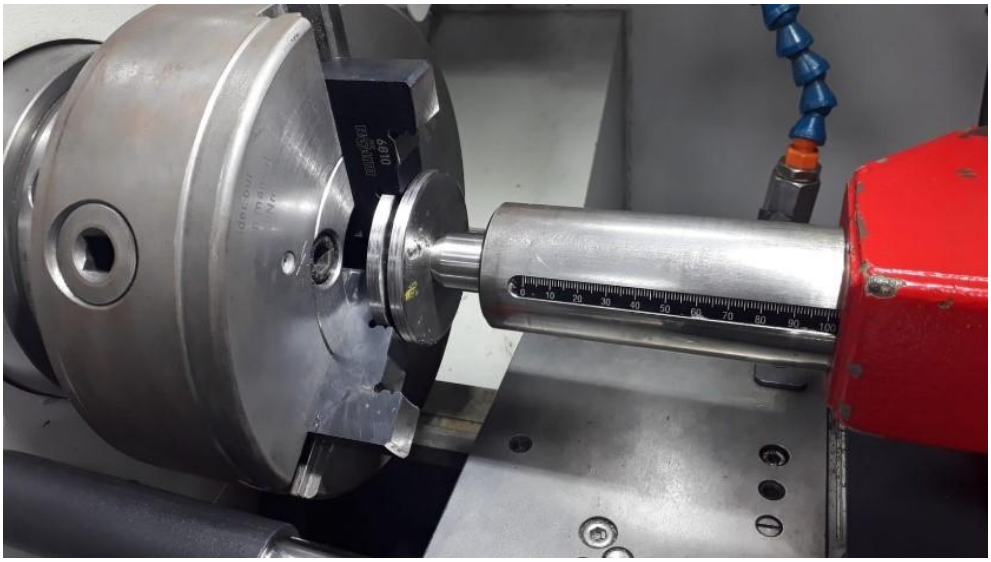


**Figura 14.** Probetas acero Chronit 400 sometido a ensayo de fricción.

# 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 3.1 Ensayos de Espectrometría

En el análisis espectrométrico realizado se identificaron los principales componentes de su composición, destacando especialmente el carbono, fósforo, aluminio y titanio, junto con tres elementos aleantes clave: silicio (Si), manganeso (Mn) y cromo (Cr). Estos elementos aleantes desempeñan un papel crucial en la estabilización de la microestructura del acero y en la mejora de sus propiedades mecánicas bajo condiciones específicas de temperatura y tratamientos térmicos, otorgándole una alta resistencia al desgaste.

El cromo, con una concentración máxima del 4%, contribuye significativamente a la elasticidad, resistencia a la tracción y resistencia al desgaste del acero. El manganeso, en concentraciones superiores al 0.8%, potencia la resistencia al impacto y la capacidad de resistir el desgaste. El silicio, presente en un 0.322%, es eficaz para prevenir la formación de carburos, mientras que el níquel, en un 0.0198%, influye positivamente en la resistencia a la corrosión. Finalmente, el vanadio, en un 0.0014%, mejora la resistencia y tenacidad del acero durante un tratamiento térmico.

En la Tabla 13 se presenta un análisis comparativo entre la composición química de los principales elementos aleantes obtenida experimentalmente y los valores proporcionados por el fabricante. Un análisis químico detallado, cuyos resultados se presentan en la Tabla 13, revela una buena concordancia entre los valores experimentales y los proporcionados por el fabricante, con un error relativo promedio del 10%. Las ligeras variaciones observadas en los contenidos de carbono, silicio, manganeso y cromo se encuentran dentro de los rangos admitidos por la norma, confirmando que las probetas analizadas cumplen con las especificaciones del acero Chronit 400 aunque se encontró un porcentaje de silicio 36.83% menor en comparación con los datos del fabricante, sin embargo, esta cantidad está dentro del rango permitido, ya que puede alcanzar valores menores a 0.50%.

**Tabla 13.** Principales elementos aleantes de un acero anti-abrasivos

| **Composición química** | **%C** | **%Si** | **%Mn** | **%Cr** |
|---|---|---|---|---|
| Valor- fabricante | 0.15 | 0.60 | 2.30 | 0.50 |
| Valor experimental | 0.157 | 0.379 | 2.07 | 0.584 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Error % | 4.67% | 36.83% | 10.00% | 16.80% |

### 3.2 Evolución de la dureza del material

Al comparar los promedios de las durezas encontradas en estado de suministro con las obtenidas después del mecanizado, se observa que la dureza del acero Chronit 400 experimenta un incremento del 13%. En estado de suministro el acero objeto de este estudio presenta una dureza promedio que se encuentra en el rango de 38.4 a 42.43 HRC, lo que equivale a valores entre 357 y 401 HB en la escala Brinell. Una vez se ha mecanizado, la dureza promedio se incrementó, alcanzando valores entre 50.76 y 58.48 HRC, correspondientes a una dureza Brinell en el rango desde 429 a 600 HB. Este incremento se puede tomar como evidencia del endurecimiento del acero debido al proceso de mecanizado.

En la tabla 14, se presentan los valores de dureza medidos tanto en estado de suministro como después del mecanizado de las probetas de acero Chronit 400. Los ensayos de dureza se llevaron a cabo siguiendo la norma ASTM E18-20, que indica la realización de mediciones en 4 puntos específicos siguiendo las posiciones de un reloj (12-3-6-9).

El incremento de la dureza alcanzado por el material debido al proceso de mecanizado es un aspecto relevante que considerar, ya que puede tener implicaciones importantes en la resistencia y durabilidad del material cuando se somete a aplicaciones que lo exponen a fricción y desgaste abrasivo.

**Tabla 14.** Resultados promedio de medidas de dureza en Rockwell C

| | Min | Max | Promedio |
|---|---|---|---|
| Suministro | 38.4 | 42.43 | 40.42 |
| Maquinado | 50.76 | 58.48 | 54.62 |
| Var % | 32% | 38% | 35% |

### 3.2.1 Ensayos de fricción con aplicación de 5kgf a 70 rpm

Para evaluar el efecto del trabajo mecánico en la dureza superficial del acero, se realizaron ensayos de fricción a una velocidad constante de 70 revoluciones por minuto (rpm) durante períodos que variaron entre 1 y 6 horas.

En estos ensayos, se sometieron las probetas de acero a un proceso de fricción controlado, simulando condiciones de desgaste o trabajo mecánico a las que al variar el tiempo de exposición a esta fricción, se buscó determinar si el aumento en el tiempo de contacto influía en el endurecimiento de la superficie del acero.

El objetivo principal de estos ensayos fue investigar si el trabajo mecánico inducido por la fricción a 70 rpm era capaz de generar deformaciones plásticas en la superficie del acero, lo que a su vez podría conducir a un aumento en la dureza.

La primera probeta de acero Chronit 400, sometida a un ciclo de trabajo de una hora a 70 rpm y 5 kg de carga, experimentó un incremento de dureza de 3.66 HRC, alcanzando un valor final de 55 HRC medido según la escala Rockwell C. Aunque este aumento es significativo, se encuentra por debajo de lo esperado para este tipo de acero bajo condiciones de trabajo más severas. Esto sugiere que el mecanismo de endurecimiento por deformación aún no se ha desarrollado plenamente en estas condiciones.

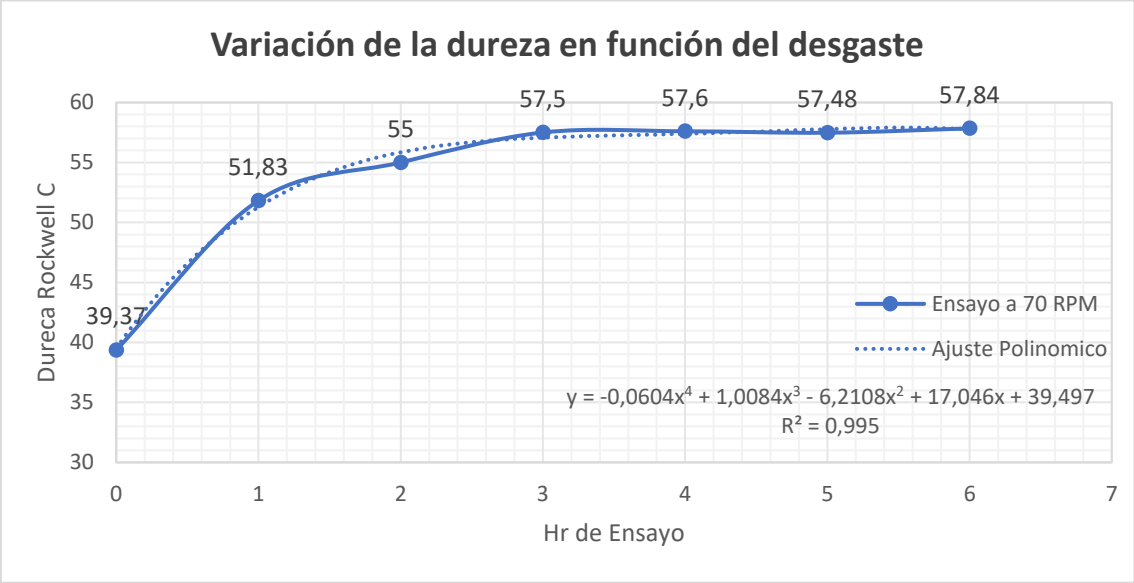



**Figura 15.** Aumento de dureza a 70 rpm

Los resultados de los ensayos de fricción a 70 rpm, reflejados en la gráfica 15, evidencian que el acero no experimentó un endurecimiento significativo bajo estas condiciones, en el que se pudo evidenciar un aumento de apenas 3.45 HRC, indicando que el material no respondió de manera notable al trabajo mecánico aplicado. Estos resultados cuantitativos sugieren que las condiciones de ensayo, caracterizadas por una baja velocidad de rotación y una carga relativamente baja, fueron insuficientes para inducir las deformaciones plásticas necesarias para activar los mecanismos de endurecimiento por deformación. Los resultados mostrados se correlacionaron mediante un ajuste polinómico de grado 4 con una correlación $R^2$ superior a 0.99 (adimensional), demostrando que es posible replicar el comportamiento del endurecimiento en función tiempo de uso.

Para lograr un endurecimiento apreciable en este tipo de acero, sería necesario someterlo a condiciones de trabajo más severas, como mayores velocidades de rotación, cargas más elevadas o tiempos de contacto prolongados. Estas condiciones más exigentes podrían generar las deformaciones plásticas necesarias para la acumulación de dislocaciones y, en consecuencia, un aumento significativo en la dureza.

### 3.3.3 Trabajo de 1 y 6 horas a 700rpm.

Los ensayos de fricción realizados a 700 rpm, en condiciones de contacto seco y a temperatura ambiente, revelaron un notable endurecimiento del acero Chronit 400. Al someter el material a un trabajo mecánico intenso y repetitivo, se observó un aumento progresivo de la dureza, pasando de 57 HRC a un valor máximo de 66.04 HRC después de 6 horas de ensayo (Figura 16). Este significativo incremento en la resistencia a la penetración se atribuye principalmente al fenómeno de endurecimiento por deformación, caracterizado por la acumulación de dislocaciones en la red cristalina del material como consecuencia de las deformaciones plásticas inducidas por la fricción. Un ajuste polinómico de grado 4 fue utilizado para correlacionar los resultados con una precisión $R^2$ superior a 0,98 (adimensional) con lo que se puede predecir el estado de avance de la dureza en función del tiempo de uso del material.

Adicionalmente, las altas presiones y temperaturas locales generadas en la zona de contacto durante el ensayo podrían haber favorecido transformaciones microestructurales, como el

refinamiento de la martensita, contribuyendo así al aumento de la dureza. Este fenómeno, conocido como endurecimiento por transformación, se suma al efecto del endurecimiento por deformación, resultando en una mejora global de las propiedades mecánicas del material.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la capacidad del acero Chronit 400 de adaptarse a condiciones de trabajo exigentes, caracterizadas por altas cargas y rozamientos severos. El significativo incremento en la dureza observado sugiere que este material es un candidato prometedor para aplicaciones en componentes mecánicos sometidos a desgaste, como engranajes, ejes y levas, donde se requiere una alta resistencia al desgaste y a la fatiga.

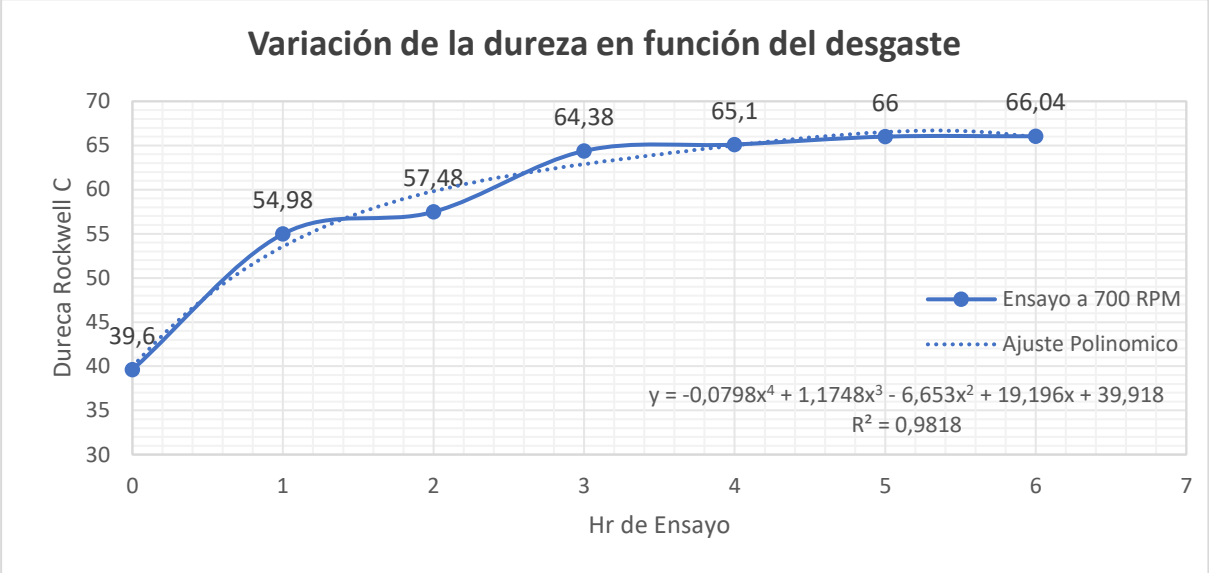



**Figura 16.** Grafica de aumento de dureza en 700rpm

## ANALISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA DUREZA

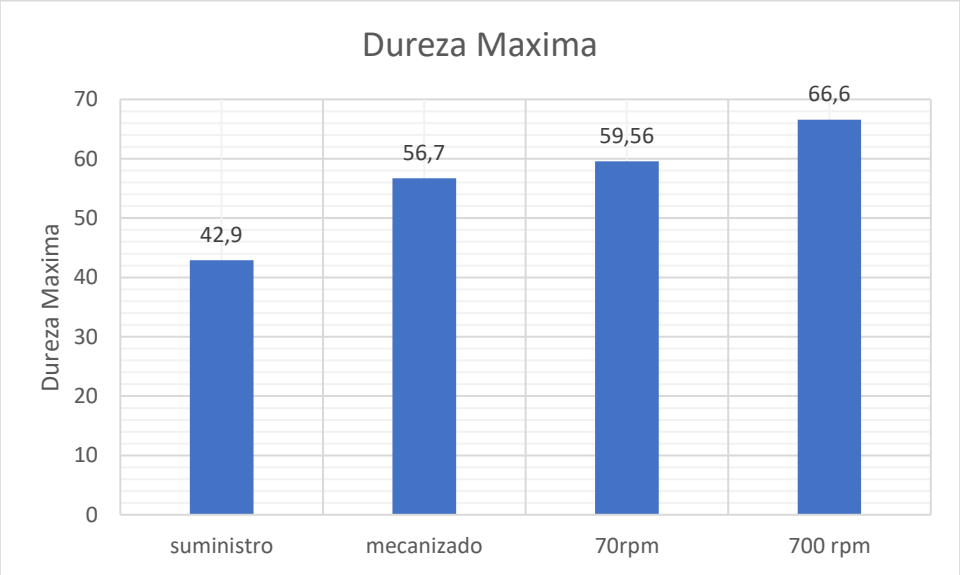



**Figura 17.** Durezas máximas desde la primera etapa(suministro) hasta el trabajo de 700rpm

La figura 17. muestra el comportamiento de la evolución de la dureza del acero Chronit 400 bajo diferentes condiciones de trabajo, desde su estado de suministro hasta un ensayo de fricción a velocidades de 70 y 700 rpm. En esta imagen, se puede apreciar cómo la dureza aumenta en el mecanizado, en bajas y altas velocidades, lo que confirma su alta calidad y resistencia.

Se observa un aumento de dureza de 13 HRC en el mecanizado con respecto al estado de suministro, este incremento se debe a factores de procesos de manufactura y a las propiedades del refrigerante, que evita que la pieza se recaliente y pierda sus propiedades mecánicas. A pesar de trabajar en seco y en condiciones abrasivas, se evidenció un aumento de dureza del 57% sin que la pieza presentara fallas o recalentamientos significativos.

Al trabajar en 70 y 700 rpm, la dureza máxima alcanzada es de 59.56 y 66 HRC, respectivamente, durante tiempos de 1 a 6 horas consecutivas. A pesar del aumento de revoluciones en el ensayo, la pérdida de material generada fue mínima y no afectó considerablemente las propiedades mecánicas ni la estructura superficial del acero Chronit 400. Esto demuestra que el acero mantiene su resistencia y calidad bajo condiciones de trabajo exigentes y abrasivas.

En la figura 18 se muestra la evolución de la dureza Rockwell C del acero Chronit 400 en función del tiempo de exposición al ensayo de desgaste. En esta se muestran dos series de datos, correspondientes a ensayos realizados a dos velocidades de rotación diferentes: 70 rpm y 700 rpm donde se observa el comportamiento del endurecimiento en servicio.

En ambas series de datos se observa un aumento significativo de la dureza durante las primeras horas de ensayo, el cual es común en procesos de endurecimiento por trabajo en frío, donde la deformación plástica inducida por la fricción genera defectos cristalinos que dificultan el movimiento de las dislocaciones, aumentando así la resistencia del material a la deformación. A partir de tres horas, la curva de dureza se estabiliza, indicando que se ha alcanzado un estado de equilibrio entre el endurecimiento por trabajo y otros mecanismos como la recuperación y recristalización.

La velocidad, por otro lado, influye en la magnitud y la rapidez con la que se alcanza el endurecimiento máximo. A 700 rpm, tanto el aumento inicial como la dureza final son mayores que a 70 rpm lo que sugiere que a mayor velocidad de rotación, mayor es la tasa de deformación plástica y, por lo tanto, mayor el endurecimiento mostrado por el material.

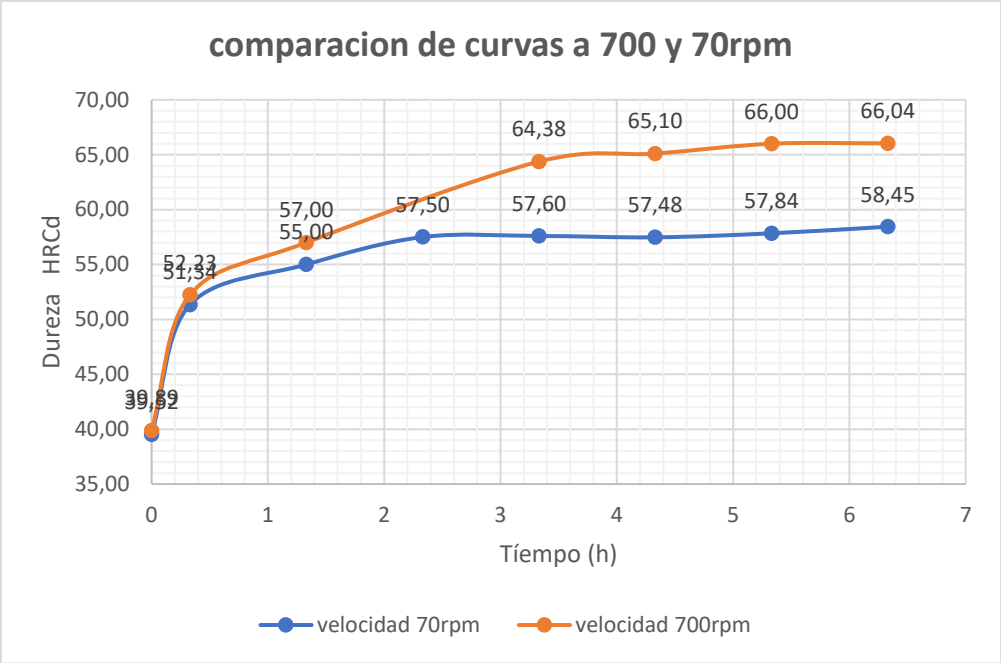



**Figura 18.** Comparación de medidas de 700 y 70rpm

Los resultados indican que el mecanismo principal de endurecimiento en este caso es el trabajo en frío ya que la fricción entre la muestra y la superficie de desgaste induce deformaciones plásticas en las capas superficiales del material, lo que a su vez genera defectos cristalinos que dificultan el movimiento de las dislocaciones y aumentan la resistencia a la deformación donde la estabilización de la dureza a largo plazo sugiere que los procesos de recuperación y recristalización comienzan a contrarrestar el endurecimiento por trabajo.

El equipo utilizado para el ensayo ofrece un buen montaje en periodos cortos de 2 horas y a bajas revoluciones de 70 rpm, sin embargo, al aumentar la velocidad a 700 rpm, se observa un periodo de aumento de dureza a partir de la 3ra hora de trabajo, alcanzando un incremento de aproximadamente 9% esto es debido a las condiciones a las que se expuso el acero ya que a altas velocidades esta expuesto a vibraciones.

Los ensayos de fricción son cruciales para evaluar el rendimiento de los aceros bajo condiciones de desgaste. A continuación, se describe los resultados obtenidos.

### 3.3 Desgaste ocurrido por la fricción

El trabajo cíclico realizado durante el ensayo de fricción reveló el desprendimiento de partículas duras en altas velocidades, tal como se aprecia en la figura 19. Estos desprendimientos que se ven en la figura 20 son resultado de irregularidades y rugosidades presentes en la sección de la ranura de las probetas de acero Chronit 400. La interacción prolongada entre las esferas y la superficie del acero generó rayaduras y desgaste del material, como se muestra en la figura 21.

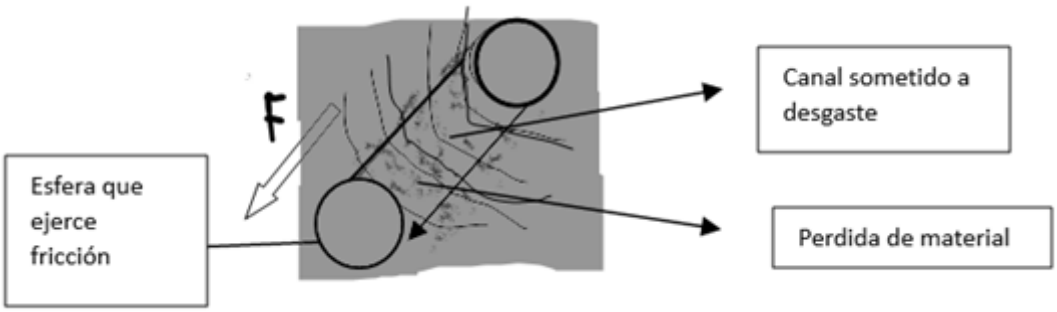



**Figura 19.** Se ilustra el trabajo ejercido de las esferas en el canal de acero Chronit 400

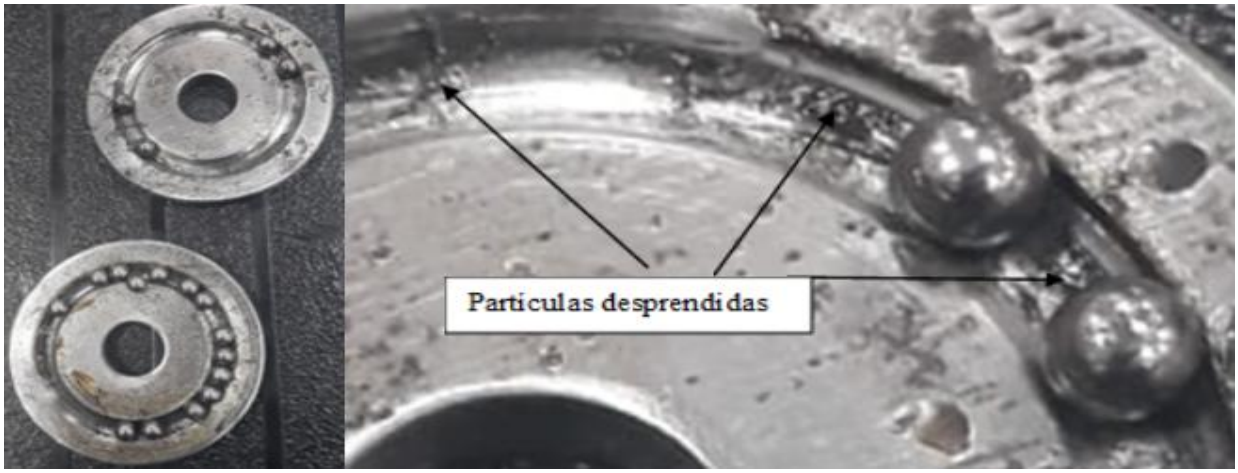



**Figura 20.** Partículas desprendidas por el efecto de fricción

**Figura 21.** Rayaduras en el acero producidas por la fricción

## CONCLUSIONES

Se ha observado un incremento significativo en la dureza del material en estudio de 42.9 HRC a 56.7 HRC, lo que representa un incremento del 32.17%, comparando los valores alcanzados en estado de suministro y posterior al mecanizado, confirmando que el proceso de mecanizado influye en las propiedades mecánicas del material que sufre endurecimiento por deformación.

El efecto del endurecimiento por fricción es más pronunciado a 700 rpm que a 70 rpm. La dureza alcanza su valor máximo (66.6 HRC) a 700 rpm, lo que indica que, a mayor velocidad de fricción, mayor es el endurecimiento del material. El aumento de dureza entre 70 rpm (59.56 HRC) y 700 rpm (66.6 HRC) correspondiendo a una diferencia de 11.82%, demostrando la fuerte correlación entre la velocidad y el endurecimiento debido al fenómeno de endurecimiento por trabajo o endurecimiento por deformación plástica.

Se pudo identificar que después del proceso de endurecimiento paulatino, caracterizado por el movimiento de las dislocaciones durante la deformación plástica en las primeras horas de su uso, se estabilizo en una dureza distintiva después de las 3 horas de uso, viéndose que la mayor parte del endurecimiento por trabajo ocurrió en las etapas iniciales de la fricción. Este comportamiento es similar tanto a baja como a alta velocidad siendo el factor diferenciador el valor de la dureza alcanzada en cada condición de trabajo dado que, a mayor velocidad de rotación, mayor es la tasa de deformación plástica lo que indica que este es el mecanismo principal que endurece el material así como se ve en las curvas desarrolladas durante los ensayos que permitieron definir el comportamiento y realizar una aproximación numérica basados en un polinomio de grado 4 con niveles de correlación ($R^2$) de 0.99 y 0,98 (adimensional) respectivamente, con lo que es posible inferir el comportamiento mayores velocidades o conocer el estado de la dureza durante el tiempo de uso del material.

Se constato que este acero tiende a endurecerse por deformación, especialmente en las capas superficiales, alcanzando una dureza de 58 HRC a 66 HRC, superando la dureza de las capas internas. Esta formación de una capa dura aumenta considerablemente su resistencia al desgaste, logrando resultados mejorados en comparación con la estructura original, sin embargo, no se observó un desprendimiento excesivo de material durante el proceso de fricción en bajas velocidades.

## RECOMENDACIONES

Dado que la dureza del material aumenta significativamente con la fricción, se recomienda considerar este fenómeno como una ventaja en aplicaciones donde el desgaste sea un factor crítico. De esta manera, el diseño de componentes podría optimizarse para permitir un cierto período de "rodaje" inicial que induzca el endurecimiento superficial y mejore la resistencia al desgaste a largo plazo.

Si bien en este estudio no se menciona explícitamente, el acabado superficial inicial del material podría influir en el proceso de endurecimiento por trabajo y en la resistencia al desgaste, de modo que se recomienda investigar el efecto de diferentes acabados superficiales (rugosidad, pulido, etc.) en el comportamiento del Chronit 400 bajo fricción.

Igualmente, se recomienda realizar estudios de lubricación que consideren las condiciones de operación específicas (velocidad, carga, temperatura) para minimizar el desgaste abrasivo y optimizar el proceso de endurecimiento por trabajo, de modo que la lubricación podría incluso diseñarse para controlar la tasa de endurecimiento del material.

Por otro lado, dado el impacto significativo de la velocidad en el endurecimiento, se enfatiza la necesidad de un control preciso de la velocidad de rotación durante los ensayos, incorporando equipos de ensayo con control de velocidad preciso y calibrado, recomendando realizar mediciones de dureza a intervalos de tiempo más frecuentes durante las primeras horas del ensayo, lo que permitirá obtener una curva de endurecimiento más detallada y determinar con mayor precisión el tiempo de estabilización. Al mismo tiempo, la temperatura generada durante la fricción puede influir en el proceso de endurecimiento por lo que se recomienda monitorear y controlar la temperatura de las probetas durante los ensayos.

Al mismo tiempo, para complementar los datos de dureza, se recomienda realizar análisis microestructurales (microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido) de las superficies de las probetas antes y después de los ensayos, lo que permitirá observar los cambios microestructurales inducidos por la fricción y correlacionarlos con los cambios en la dureza.

Aunque no fue significativo en este estudio a bajas velocidades, se recomienda realizar un análisis del desprendimiento de partículas (tamaño, forma, composición) en ensayos a velocidades más altas o bajo otras condiciones de operación, con la finalidad de comprender mejor los mecanismos de desgaste y prevenir fallos catastróficos.

# REFERENCIAS


[1] L. Córdova Morales and J. Villavicencio Cevallos, “Incremento de dureza y resistencia al desgaste de un acero al manganeso para la industria minera,” *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, vol. 13, no. 1, Jun. 2018, doi: 10.24133/cctespe.v13i1.720.

[2] Torres Krivic and Emilio, “Aplicacion de recubrimiento protectores para el desgaste,” Monterrey. Accessed: May 14, 2023. [Online]. Available: https://es.scribd.com/document/238478306/RECUBRIMIENTOS-DUROS-pdf

[3] Fernandez Columbie Tomas Heraldo, “Mecanismos de endurecimiento del acero AISI 1045 deformado por rodadura,” Instituto superior minero metalurgico “Dr. Antonio Nuñez Jimenez,” Moa, 2011. Accessed: Apr. 11, 2023. [Online]. Available: http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1527/fernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[4] DEPARTAMENTO TECNICO DE BOHLER, “CHRONIT-T1-450,” *CHRONIT T1 450- CHRONIT T1 500*.

[5] C. Marín Villar, “WWW.METALACTUAL.COM Una Batalla contra el Desgaste.”

[6] I. Velasteguí Balda, G. Edmundo, Hernandez Alvarez, and Valeria Stephania, “ANÁLISIS DE LA SOLDABILIDAD Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA PLANCHA DE ACERO ANTI ABRASIVO GRADO 450 MEDIANTE EL PROCESO GMAW,” Escuela Politecnica Nacional, Quito, 2019. Accessed: May 14, 2023. [Online]. Available: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20376/1/CD%209623.pdf

[7] Alcántara Borges D., Fernández Columbié T., and Rodríguez González I., “Fricción y desgaste en elementos circulares empleados en pasadores,” *Revista de ingenieria Mecanica*, vol. 12, no. 2, pp. 49–58, Jul. 2009, Accessed: Apr. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/pdf/2251/225117947006.pdf

[8] “hoja de datos para ceros chronit bohler”.

[9] " Procedimiento, Y. Caracterización, and D. E. Soldadura En, “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.”

[10] “Standard Specification for Abrasion- Resistant Cast Irons”.

[11] “FUNDICIONES BLANCAS RESISTENTES AL DESGASTE.”

[12] Gomez Hurtado Wilson and Bello Salirrosas Carlos, “Procedimiento de soldadura en la union del acero CHRONIT T1-500 y el acero ASTM A36 bajo la norma AWS D1.1/D1.1:2015 para la reaparacion de arados de maquinaria agricola,” Trujillo, 2020. Accessed: Apr. 10, 2023. [Online]. Available: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/48372/G%c3%b3mez_HWC-Bello_SCA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[13] BHOLER COMPANIE, “ACERO ANTIDESGASTE,” *CARACTERISTICAS DE LOS ACERO ANTIDESGASTE-CHRONIT 400 Y CHRONIT 500*.

[14] “UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO FACULTAD DE INGENIERIA.”

[15] C. Marín Villar, “Una Batalla contra el Desgaste,” 2020. Accessed: Apr. 10, 2023. [Online]. Available: www.METALACTUAL.COM

[16] “Aceros Antidesgaste | MultiAceros Chile.” Accessed: Apr. 10, 2023. [Online]. Available: https://www.multiaceros.cl/aceros-antidesgaste/

[17] Heeger Alan J., “INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES,” *CARACTERIZACION DE MATERIALES*, Feb. 2020.

[18] Caipe Cisneros Jose Hugo, “ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO DE LATA ALEACION MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA SMAW CON DIFERENTE MATERIAL DE APORTE,” *facultad de ingenieria mecanica*, pp. 5–7, Feb. 2020.

[19] Perez Oviedo P. and Torre Nieto J., “Guia de diseño para calcular el desgaste,” *Ciencia, Ingenieria y Desarrollo Tec* , 2020, Accessed: Apr. 13, 2023. [Online]. Available: https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/128/1/Guia%20de%20dise%C3%B1o%20para%20calcular%20el%20desgaste.pdf

[20] F. Alexander, S. Bustamante, J. Manuel, and V. Restrepo, “ESTUDIO DEL MODELO DE DESGASTE PROPUESTO POR ARCHARD STUDY OF THE MODEL OF WEARING PROPOSED BY ARCHARD,” *Año*, vol. 72, pp. 27–43, 2005.

[21] D. Guzmán, A. Guzmán, D. González, and R. Sepúlveda, “Análisis del desgaste de dos aceros comerciales de la serie 400HB sometidos a un régimen impacto-abrasivo Wear analysis of two 400HB grade commercial steels exposed to impact-abrasion,” *Revista chilena de ingeniería*, vol. 30, no. 3, pp. 528–537, 2022.

[22] F. Paz-Triviño, R. Buitrago-Sierra, and J. F. Santa-Marín, “Wear resistance and hardness of nanostructured hardfacing coatings,” *DYNA (Colombia)*, vol. 87, no. 214, pp. 146–154, 2020, doi: 10.15446/DYNA.V87N214.85683.

# ANEXOS

## ANEXO I. DATOS TÉCNICOS DEL ACERO CHRONIT 400.

Hot-rolled cut sheets

CUT SHEETS

# durostat 400/450/500

Data sheet • May 2017

**Wear-resistant sheets made from hot-rolled steel strip**

durostat 400, durostat 450 and durostat 500 typically achieve surface hardness values of roughly 400, 450 and 500 HB. The steel is optimally suited to applications with high mechanical stress and high levels of abrasion, such as those in loading and conveying machinery, dredgers, crushing plants, screening equipment, chutes and truck cab structures. Their high level of hardness is adjusted by means of direct quenching after hot rolling. State-of-the-art alloying technology with low carbon content guarantees excellent welding properties. Sheets made of durostat 400, durostat 450 and durostat 500 are well suited to cold forming in spite of their high strength. In order to maintain their hardness, durostat 400, durostat 450 and durostat 500 may not be heated to more than 200 °C.

**Convincing advantages:**

- High wear resistance, low abrasion
- Longer service life and maintenance intervals
- Light-weight applications resulting from higher strength

**voestalpine Steel Division**
www.voestalpine.com/steel

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

# durostat®

## Chemical composition

Ladle analysis in weight percent and carbon equivalent

| durostat® | C max. | Si max. | Mn max. | P max. | S max. | Al min. | Cr max. | Mo max. | Ti max. | B max. | CEV max. | CET max. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 400 | 0.15 | 0.60 | 2.30 | 0.025 | 0.010 | 0.020 | 0.50 | 0.20 | 0.050 | 0.005 | 0.59 | 0.38 |
| 450 | 0.20 | 0.60 | 2.30 | 0.025 | 0.010 | 0.020 | 0.50 | 0.20 | 0.050 | 0.005 | 0.62 | 0.42 |
| 500 | 0.24 | 0.60 | 2.30 | 0.025 | 0.010 | 0.020 | 0.50 | 0.20 | 0.050 | 0.005 | 0.66 | 0.46 |

CEV = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15

CET = C + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 +Ni/40

## Mechanical properties: Surface hardness/tensile strength

| durostat® | Hardness [HB] | Typical values | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Hardness [HB] | Yield strength $R_{p0.2}$ [MPa] | Tensile strength $R_m$ [MPa] | Total elongation $A_5$ [%] |
| 400 | 360 - 440 | 400 | 1150 | 1350 | 10 |
| 450 | 410 - 490 | 450 | 1250 | 1450 | 9 |
| 500 | 460 - 540 | 500 | upon request | upon request | upon request |

## Mechanical properties: Notch impact energy/bending radii

| durostat® | Typical values: Notch impact energy [1] Av [Joule] | | Bending radius Ri min. [2] [3] | |
|---|---|---|---|---|
| | Test temperature -20 °C | Test temperature -40 °C | Location of bending edge in direction of rolling: Transverse | Longitudinal |
| 400 | 60 | 40 | 3 x sheet thickness | 4 x sheet thickness |
| 450 | 50 | 30 | 4 x sheet thickness | 5 x sheet thickness |
| 500 | upon request | upon request | 4 x sheet thickness | 5 x sheet thickness |

[1] Typical values (ISO-V, longitudinal), full samples (10 x 10 mm)

[2] Smallest permissible inside radius at 90° edging, Ri min.

[3] It must be taken into consideration that the quality of the cut edge has a strong influence on the achievable bending radii.

## Example dimensions

Maximum width per thickness

| durostat® | Thickness [mm] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 5.0 | 6.0 |
| 400 | 1250 | 1520 | 1570 | 1620 | 1620 | 1620 |
| 450 | 1250 | 1520 | 1570 | 1620 | 1620 | 1620 |
| 500 | - | upon request | upon request | 1500 | 1500 | 1500 |

Thickness < 4 mm: Supplied as cut sheet with cut edge

Thickness ≥ 4 mm: Supplied as cut sheet with mill edge

Maximum sheet length: 12 m (18 m at extra charge)

Further dimensions upon request

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

durostat®

## TECHNICAL RECOMMENDATIONS FOR WELDING



As a result of their chemical composition, sheets made of durostat 400, durostat 450 and durostat 500 exhibit good welding characteristics in all commonly used fusion welding techniques. The heat-affected zone of the welded joints is characterized by both the occurrence of temper softening and a lack of hardness increase as compared to the direct quenched base material.

### Temper softening

The extent of temper softening is directly dependent on the cooling time ($t_{8/5}$). The effects of temper softening on the strength properties across the weld are dependent on the relative width of the soft zone (ratio of soft zone width to sheet thickness) and the strength properties of the weld metal.

### No hardness increase

Maximum hardness in the heat-affected zone (HAZ) does not exceed the hardness of the base material because of the purely martensitic microstructure. The hardness depends exclusively on carbon content. The carbon equivalent therefore only has an effect on transformation behavior and a decrease in maximum hardness as the $t_{8/5}$ time increases.

### Preheating not necessary

Preheating is generally not required up to a sheet thickness of 6 mm.

This applies under the following conditions:

- Use of welding consumables that lead to a very low hydrogen content in the weld metal (HD < 5 ml/100 g weld metal). Compliance with the manufacturer's instructions on storage and re-drying is mandatory.
- Sheets must be kept clean, dry and free from coatings, rust and scale in the area of the joint.

In cases of deviation, an estimation of the preheating temperature is recommended based on EN 1011-2, C.3, Method B, or SEW 088. Depending on atmospheric conditions (temperature below dew point, condensation of humidity), edge drying is recommended immediately before welding at a temperature of at least 80 °C.

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

durostat®

### Manual metal arc welding (111) and gas-shielded metal arc welding (MAG, 135)

The strength properties across the weld are influenced among other factors by the strength characteristics of the selected welding consumable.

#### Welding consumables

| Strength value of the welding consumable or pure weld metal [1] | Manual metal arc welding (111) | Gas-shielded metal arc welding (MAG, 135) |
|---|---|---|
| Rm ≥ 500 MPa | AWS A5.1: E7018-1H4R<br>EN ISO 2560-A: E 42 5 B 4 2 H5<br>(e.g. BÖHLER FOX EV 50) | AWS A5.18: ER70S-6<br>EN ISO 14341-A: G 42 4 M21 3Si1<br>(e.g. BÖHLER EMK 6) |
| Rm ≥ 530 MPa | AWS A5.5: E8018-C3H4R<br>EN ISO 2560-A: E 46 6 1Ni B 4 2 H5<br>(e.g. BÖHLER FOX EV 60) | AWS A5.18: ER70S-6<br>EN ISO 14341-A: G 46 4 M21 4Si1<br>(e.g. BÖHLER EMK 6) |
| Rm ≥ 690 MPa | AWS A5.5: E10018-GH4R<br>EN ISO 18275-A: E 62 6 Mn2NiCrMo B 4 2 H5<br>(e.g. BÖHLER FOX EV 75) | WS A5.28: ER100S-G<br>EN ISO 16834-A: G 69 6 M21 Mn4Ni1,5CrMo<br>(e.g. UNION NiMoCr) |
| Rm ≥ 760 MPa | AWS A5.5: E11018-GH4R<br>EN ISO 18275-A: E 69 6 Mn2NiCrMo B 4 2 H5<br>(e.g. BÖHLER FOX EV 85) | AWS A5.28: ER110S-G<br>EN ISO 16834-A: G 79 5 M21 Mn4Ni1,5CrMo<br>(e.g. UNION X 85) |
| Rm ≥ 830 MPa | - | AWS A5.28: ER120S-G<br>EN ISO 16834-A: G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo<br>(e.g. UNION X 90)<br><br>AWS A5.28: ER120S-G<br>EN ISO 16834-A: G 89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo<br>(e.g. UNION X 96) |

[1] Minimum tensile strength Rm in untreated, as-welded condition

Should the respective structure require that welding seams feature the same level of wear resistance as the base material, the cover pass can be carried out using wear-resistant welding consumables.

#### Wear-resistant welding consumables

| Hardness value of the welding consumable or pure weld metal [1] | Manual metal arc welding (111) | Gas-shielded metal arc welding (MAG, 135) |
|---|---|---|
| Hardness 370 HB | EN 14700: E Fe 1<br>(e.g. UTP DUR 350) | - |
| Hardness 450 HB | - | EN 14700: SZ Fe 2<br>(e.g. UTP A DUR 350) |
| Hardness 56–58 HRC | EN 14700: E Fe 8<br>(e.g. UTP DUR 600) | EN 14700: S Fe 8<br>(e.g. UTP A DUR 600) |

[1] Typical hardness in HB or HRC in untreated, as-welded condition



voestalpine
ONE STEP AHEAD.

## ANEXO II. REFRIGERANTE UTILIZADO EN EL MECANIZADO

# RANDO HD

## 32, 37, 46, 68, 100, 150, 220

Rando HD es una serie de aceites lubricantes formulados con bases grupo II altamente refinadas y aditivos antidesgaste para lubricación de sistemas hidráulicos. Está aprobado por diversos fabricantes de bombas hidráulicas.

### APLICACIONES

La serie Rando HD está recomendada para la lubricación de bombas de sistemas hidráulicos equipados con bombas de paleta o de engranajes, en presiones hasta 5000 psi y/o rotaciones arriba de 1200 rpm. También está recomendada para sistemas hidráulicos equipados con bombas de pistón operando a cualquier presión.

La serie Rando HD puede ser utilizada en diversas otras aplicaciones industriales, como compresores, motores hidráulicos y sistemas circulatorios en general , cuando es requerido un producto de estos grados de viscosidad y con características de protección antidesgaste.

Esta serie no debe ser utilizada, cuando las especificaciones del fabricante requieran productos libres de zinc.

Los aceites Rando[1] HD cumplen:

- **Requerimientos de los principales fabricantes**
  - — **Bosch Rexroth** (ISO 32, 46 y 68)
  - — **Cincinnati Machine** P-68 (ISO 32), P-70 (ISO 46), P-69 (ISO 68).
  - — **Parker Hannifin** (anteriormente conocido como Denison) HF-0, HF-1, HF-2 y T6H2OC (ISO 32, 46 y 68))
  - — **Eaton-Vickers** 35VQ25A pump, I-286-S (ISO 32, 46 y 68), M2950-S (ISO 32, 46 y 68)
- **Requerimientos de aceites para sistemas circulatorios**
  - — **AFNOR** NF E 48-603 HM (ISO 32, 46, 68, 100 y 150)
  - — **ANSI/AGMA** 9005-EO2, Lubricación de Engranajes Industriales, para lubricación de engranajes como aceites para engranajes con herrumbre y oxidación inhibidos (ISO 46, 68, 100, 150 y 220).
  - — **ASTM** D-6158 Class HM (ISO 32, 46, 68, 100 y 150)
  - — **DIN** 51524 parte 2 HLP - Aceite para sistemas hidráulicos con aditivación antidesgaste y también R&O. (ISO 22, 32, 46, 68 y 100)
  - — **ISO** 11158 HM (ISO 22, 32, 46, 68, 100 y 150)

### BENEFICIOS

La serie Rando HD proporciona:

- **Intervalos de cambios más largos** - por su formulación con bases grupo II que le proporciona una alta estabilidad a la oxidación.
- **Mayor vida útil a los equipos** — un paquete aditivo antidesgaste minimiza el desgaste protegiendo las superficies cuando la carga causa una falla en la película lubricante.
- **Tiempo de inactividad minimizado** — su efectivo sistema inhibidor de herrumbre, corrosión y oxidación ayuda a evitar la producción de partículas abrasivas derivadas de la formación de herrumbre y depósitos, barnices y lodos debidos a la falla del aceite, los cuales pueden dañar las superficies y sellos del equipo y bloquear los filtros de forma prematura.
- **Operación suave** — sus buenas características de estabilidad hidrolítica y de separación de agua promueven una excelente filtrabilidad en la presencia de contaminación por agua. Sus propiedades anti espuma y de liberación de aire aseguran una operación suave y eficiencia del sistema.

### MANEJO:

Para información sobre seguridad en el manejo de este producto, referirse a la hoja de seguridad o contacte a su representante de ventas.

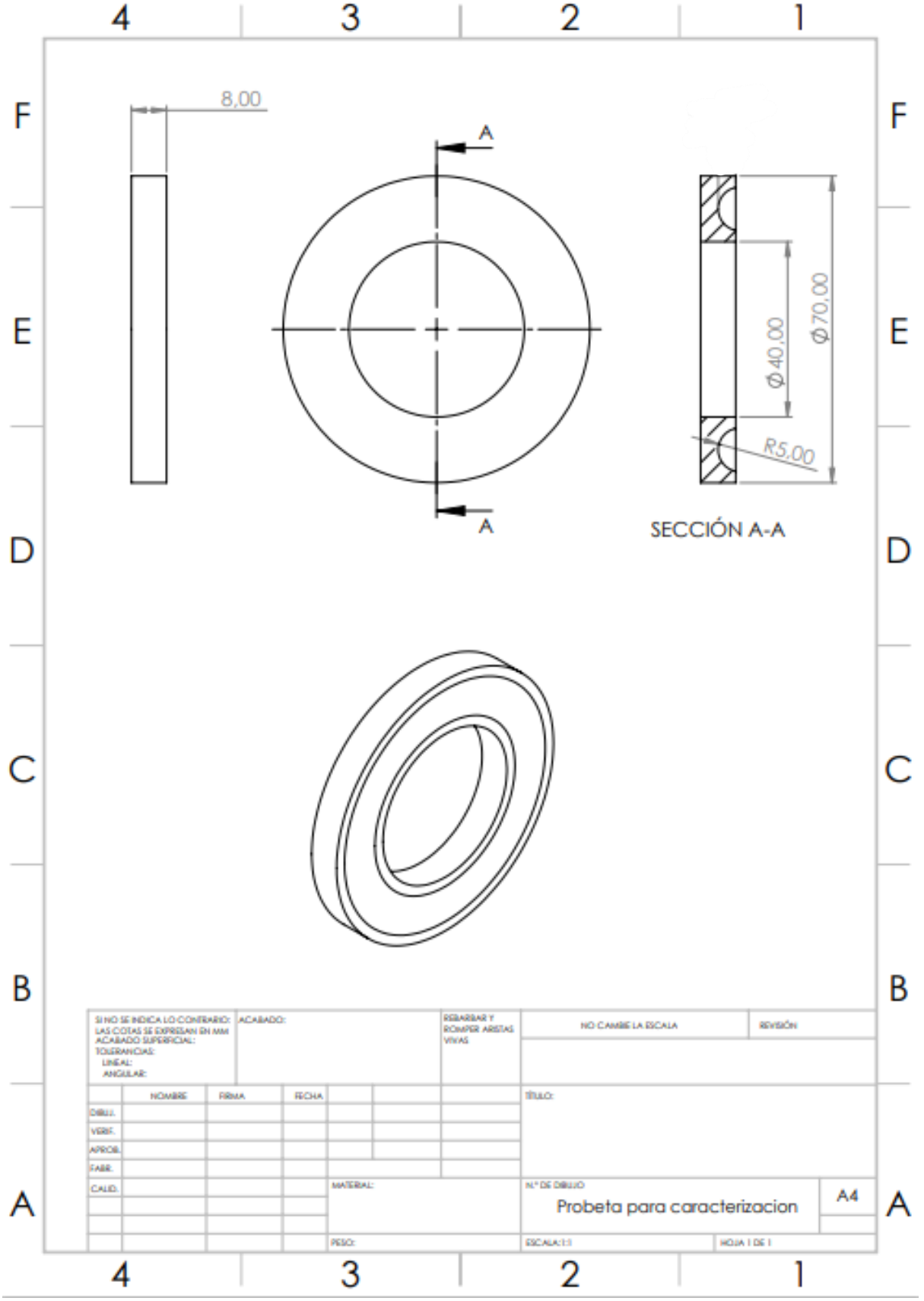
15 Marzo 2011

1. productos manufacturados en:
Argentina (ISO 32, 37,46, 68, 100, 150, 220)
Chile (ISO 32, 46, 68)
Colombia (ISO 32, 46, 68, 100, 150)
Ecuador (ISO 32, 46, 68)
El Salvador (ISO 32, 46, 68, 100, 150)

## CARACTERISTICAS TIPICAS:

| Grado ISO | Método ASTM | 32 | 37 | 46 | 68 |
|---|---|---|---|---|---|
| *Código de producto* | - | *1657* | *21481* | *1658* | *1659* |
| *Código de hoja de seguridad MSDS*<br>*Argentina*<br>*Chile*<br>*Colombia*<br>*Ecuador*<br>*El Salvador* | | <br>*ARGL007D*<br>*CHL01657*<br>*COL01657*<br>*27068*<br>*26352* | <br>*ARGL007D*<br>-<br>-<br>-<br>- | <br>*ARGL007D*<br>*CHL01657*<br>*COL01657*<br>*27068*<br>*26352* | <br>*ARGL007D*<br>*CHL01657*<br>*COL01657*<br>*27068*<br>*26352* |
| Color ASTM | D-1500 | <0,5 | <0,5 | <0,5 | <0,5 |
| Densidad @ 15ºC | D-4052 | 0,861 | 0,863 | 0,866 | 0,869 |
| Viscosidad cinemática<br>cSt @ 40 ·C<br>cSt @ 100 ·C | <br>D-445<br>D-445 | <br>32,2<br>5,53 | <br>37,1<br>6,01 | <br>46,4<br>6,89 | <br>68,76<br>8,98 |
| Índice de viscosidad | D-2270 | 108 | 106 | 103 | 104 |
| Punto de inflamación, ·C | D-92 | 226 | 232 | 242 | 246 |
| Punto de fluidez, ·C | D-97 | -30 | -27 | -30 | -27 |
| Espuma, Tend./Estab., ml<br>Seq I<br>Seq II | <br>D-892<br>D-892 | <br>0/0<br>0/0 | <br>0/0<br>0/0 | <br>0/0<br>0/0 | <br>0/0<br>0/0 |
| Neutralización, mg KOH/g | D-974 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Corrosión lámina de cobre | D-130 | 1A | 1A | 1A | 1A |
| Emulsión @ 54,4ºC, tiempo de separación, minutos | D-1401 | 5 | 10 | 10 | 10 |

## ANEXO II. DISEÑO DE PROBETA



## ANEXO III. RESULTADOS DEL ENSAYO DE ESPECTROMETRÍA

Start | New

ample: prob1 chroni 400

| Average | Element | Burn 1 | Burn 2 | Burn 3 |
|---|---|---|---|---|
| 96.6 | Fe % | 96.5 | 96.6 | |
| 0.157 | C % | 0.168 | 0.147 | |
| 0.379 | Si % | 0.401 | 0.358 | |
| 2.07 | Mn % | 2.08 | 2.05 | |
| 0.0142 | P % | 0.0152 | 0.0131 | |
| 0.0156 | S % | 0.0155 | 0.0158 | |
| 0.0359 | Pb % | 0.0350 | 0.0368 | |
| 0.584 | Cr % | 0.590 | 0.578 | |
| < 0.0010 | Mo % | < 0.0010 | < 0.0010 | |
| 0.0258 | Ni % | 0.0247 | 0.0269 | |
| 0.0250 | Al % | 0.0256 | 0.0243 | |
| < 0.0010 | Co % | < 0.0010 | < 0.0010 | |
| 0.0167 | Cu % | 0.0180 | 0.0154 | |
| 0.0326 | Nb % | 0.0335 | 0.0316 | |
| 0.0308 | Ti % | 0.0314 | 0.0303 | |
| 0.0012 | V % | 0.0013 | 0.0012 | |
| < 0.0100 | W % | < 0.0100 | < 0.0100 | |
| 0.0043 | Sn % | 0.0041 | 0.0045 | |
| 0.0023 | B % | 0.0025 | 0.0021 | |
| 0.0016 | Ca % | 0.0022 | 0.0009 | |
| 0.0094 | Zr % | 0.0092 | 0.0096 | |
| 0.0034 | Zn % | 0.0037 | 0.0030 | |
| 0.0093 | Bi % | 0.0086 | 0.0100 | |
| 0.0050 | As % | 0.0053 | 0.0048 | |
| 0.0082 | Se % | 0.0077 | 0.0087 | |
| 0.0069 | Sb % | 0.0061 | 0.0077 | |

## ANEXO III. MEDIDAS DE DUREZA DEL ACERO CHRONIT 400

### Datos para 70 rpm

| | suministro | mecanizado | dureza en el trabajo |
|---|---|---|---|
| probeta 1 | 39,2 | 50,1 | 55,9 |
| 1 h | 41,4 | 53,6 | 50,8 |
| 70rpm | 41,3 | 52,9 | 53,2 |
| | 39,9 | 51,1 | 56,6 |
| | 39,1 | 52,6 | 57,2 |
| | 38 | 53,6 | 56,7 |
| | 35,8 | 53 | 54,6 |
| | 38,6 | 54,9 | 55 |
| probeta 1 | 41,1 | 54,7 | 57,9 |
| 2h | 40,4 | 52,5 | 57,6 |
| 70rpm | 44,8 | 51,8 | 57,2 |
| | 39,2 | 53,6 | 57,7 |
| | 38,6 | 54,7 | 58 |
| | 39,4 | 55,2 | 57 |
| | 38,9 | 51,5 | 57,7 |
| | 38,4 | 53,2 | 56,9 |
| probeta 2 | 38,7 | 51 | 58 |
| 3h | 40,3 | 49,5 | 58,5 |
| 70rpm | 40,6 | 51,6 | 57,6 |
| | 38 | 52,4 | 57,9 |
| | 38 | 53,2 | 57,5 |
| | 39,1 | 52,5 | 57,9 |
| | 38 | 53 | 57,9 |
| | 39,9 | 53,7 | 55,5 |
| probeta 2 | 38,4 | 50,7 | 55 |
| 4h | 41,1 | 49,5 | 56,3 |
| | 39 | 48,7 | 57 |
| 70rpm | 39,6 | 50 | 58 |
| | 38,9 | 52,7 | 58,2 |
| | 39,8 | 50,6 | 59,3 |
| | 40 | 52,6 | 58 |
| | 39,3 | 51,3 | 58 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| probeta 3 | 38,7 | 50,7 | 58 |
| 5h | 40,3 | 49,5 | 58,5 |
| 70rpm | 40,6 | 51,5 | 57 |
| | 41,8 | 49,9 | 57,7 |
| | 38,6 | 49 | 57,5 |
| | 39,1 | 46,2 | 57,9 |
| | 38 | 47,3 | 58,12 |
| | 39,9 | 47,1 | 58 |
| probeta 3 | 38,4 | 50,5 | 58 |
| | 40 | 52,3 | 57,9 |
| 6h | 41,1 | 51 | 59 |
| 70rpm | 39,6 | 50,6 | 59,8 |
| | 38,9 | 46 | 59,56 |
| | 40,1 | 50,2 | 57,2 |
| | 39,8 | 49,6 | 58,5 |
| | 39,3 | 51,1 | 57,6 |

**DATOS**
**700 RPM**

| | | | |
|---|---|---|---|
| probeta 4 | 38,7 | 49,8 | 58 |
| 1h | 40,3 | 50,3 | 58,5 |
| 700rpm | 40,6 | 51 | 57,7 |
| | 40,2 | 50,4 | 57,9 |
| | 39,1 | 52,5 | 53,9 |
| | 38,2 | 54 | 57,5 |
| | 38 | 53 | 57 |
| | 39,9 | 53,7 | 55,5 |
| probeta 4 | 38,4 | 50,7 | 59,1 |
| | 38,2 | 48,6 | 57,7 |
| 2h | 41,1 | 51,6 | 58,9 |
| 700rpm | 39,6 | 50,6 | 57,6 |
| | 38,9 | 52,7 | 58,2 |
| | 38,5 | 50,1 | 60,6 |
| | 39,8 | 50,7 | 57,6 |
| | 39,3 | 51,1 | 58,96 |
| probeta 5 | 41,8 | 52,6 | 65,3 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 3h | 40,7 | 53,6 | 66,3 |
| 700rpm | 41,1 | 53,3 | 63,5 |
| | 40 | 54,1 | 62,5 |
| | 41 | 51,6 | 62 |
| | 41,2 | 51,4 | 63,8 |
| | 41,7 | 53,6 | 65,3 |
| | 39,6 | 51,2 | 66,3 |
| | | | |
| probeta 5 | 38 | 49,8 | 66 |
| 4h | 39,9 | 50,2 | 65,85 |
| 700rpm | 39,3 | 53,6 | 65 |
| | 38 | 54 | 64,9 |
| | 38,1 | 52 | 64,85 |
| | 39,3 | 51 | 65,3 |
| | 41,4 | 51,1 | 65,6 |
| | 40,9 | 52,7 | 63,3 |
| | | | |
| probeta 6 | 40,2 | 55,5 | 65,3 |
| 5h | 41,7 | 56,1 | 66,3 |
| 700rpm | 41,1 | 54,2 | 66,7 |
| | 40,1 | 52 | 65,6 |
| | 38,1 | 53,1 | 66,4 |
| | 41,7 | 53,2 | 65,6 |
| | 41,7 | 52,1 | 66,3 |
| | 39,6 | 51,2 | 65,8 |
| | | | |
| probeta 6 | 38 | 56,7 | 66,3 |
| 6h | 39,9 | 55,2 | 66 |
| 700rpm | 39,3 | 51,2 | 66,8 |
| | 40,2 | 52 | 66,3 |
| | 40,2 | 50,4 | 65,6 |
| | 37,6 | 51,1 | 66,8 |
| | 41,4 | 53,6 | 66,7 |
| | 42,9 | 52,7 | 63,8 |