

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**ESTUDIO DE LA FRACTURA EN EL SOPORTE DEL CHASIS DEL
REMOLQUE CON TOLVA PARA CAMIONES, EN CEILANDIA
DISTRITO FEDERAL DE BRASILIA-BRASIL**

PRESENTADO POR:

Br. HIRO ALEJO ILLANES HUAMAN

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALÚRGICO**

ASESOR:

Mgt. HONORATO SÁNCHEZ QUISPE

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Mgt. HONORATO SANCHEZ QUISPE
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: ESTUDIO DE LA FRACTURA EN EL
SOPORTE DEL CHASIS DEL REMOLQUE CON TOLVA
PARA CAMIONES, EN CEILANDIA DISTRITO FEDERAL
DE BRASILIA-BRASIL

Presentado por: HIRO ALEJO ILLANES HUAMAN DNI N° 70135703;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO
METALÚRGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 02%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 20 de AGOSTO de 2026.....


.....
Firma
Post firma Honorato Sánchez Quispe
Nro. de DNI 23903892
ORCID del Asesor 0000-0002-4267-2636

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:615608646

Hiro Alejo ILLANES HUAMAN

ESTUDIO DE LA FRACTURA EN EL SOPORTE DEL CHASIS DEL REMOLQUE CON TOLVA PARA CAMIONES, EN CEILÂNDIA DI...



Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::27259:615608646

162 páginas

Fecha de entrega

19 ago 2026, 10:13 p.m. GMT-5

32.153 palabras

195.019 caracteres

Fecha de descarga

19 ago 2026, 10:51 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS de HIRO ILLANES.pdf

Tamaño del archivo

5.5 MB

2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
28 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Señor decano de la facultad de Ingeniería Geológica, Minas e Ingeniería Metalúrgica.

Señores Docentes Miembros del Jurado:

Con el propósito de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico y cumpliendo con las exigencias en el artículo 18° del reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N°. CU-324-2020-UNSAAC de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, ponemos a vuestra consideración la presente tesis, intitulado:

“ESTUDIO DE LA FRACTURA EN EL SOPORTE DEL CHASIS DEL REMOLQUE CON TOLVA PARA CAMIONES, EN CEILÂNDIA DISTRITO FEDERAL DE BRASILIA-BRASIL”.

La finalidad de este estudio es determinar las causas que originan la fractura en el soporte del chasis del remolque, evaluando las condiciones de carga y operaciones a las que está sometido, y proponer soluciones que optimicen la resistencia estructural y aumentar la vida útil del componente.

Para alcanzar este objetivo, se realizaron inspecciones visuales, análisis metalográficos, composición química, espectrometría, pruebas de dureza y análisis estructural. El enfoque metodológico combina aspectos teóricos de resistencia de materiales y de la evaluación estructural con observaciones empíricas y resultados experimentales.

Esta investigación busca conocer el motivo por el cual un soporte del chasis del remolque con tolva presenta una fractura, para ello se desea conocer los tipos de fracturas, el tipo de acero que es utilizado para la fabricación de estos soportes, el tipo de trabajo que realiza y las fuerzas que interactúan en el soporte (diagrama de fuerzas). La investigación se desarrolló en un contexto real, dentro del sector logístico y de mantenimiento de equipos metalúrgicos en Ceilândia (una de las importantes zonas industriales del Distrito Federal de Brasilia).

Br. Hiro Alejo Illanes Huaman

DEDICATORIA

En primer lugar, este trabajo va dedicado a Dios, por guiarme constantemente en mi camino y fortalecerme en cada etapa de mi vida. Doy gracias a Dios por la sabiduría, la paciencia y la perseverancia necesarias para enfrentar los desafíos evidenciadas en el transcurso de esta investigación. En los momentos de dificultad y duda, Su presencia fue un refugio y una fuente de esperanza que me permitió continuar con fe y determinación. Este logro es testimonio de su amor, su misericordia y sus bendiciones a lo largo de mi vida académica y personal.

De manera muy especial, dedico este trabajo a mi madre, Enaida Huaman Villa, quien se dedicó arduamente a mi formación personal y profesional, brindándome su amor, apoyo y confianza en cada etapa de mi vida, mayor ejemplo de esfuerzo y sacrificio. Su apoyo constante y cada palabra de aliento a no rendirse nunca, hasta en los caminos muy difíciles de la vida. Todo lo que soy y lo que he logrado hasta hoy es reflejo de su fortaleza y su entrega inagotable.

Asimismo, dedico esta tesis a mi tía, Edith Huaman Villa por su apoyo sincero, su comprensión y su acompañamiento incondicional a lo largo de este proceso. Su interés, sus consejos y su constante motivación fueron de gran importancia para mantenerme firme y enfocada en mis objetivos. Agradezco profundamente su cariño y su presencia, que me brindaron tranquilidad y ánimo en cada etapa de mi formación académica.

Br. Hiro Alejo Illanes Huaman

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a mi querida madre Enaida Huaman Villa, por sus enseñanzas, sacrificios y por haberme inculcado valores que me han permitido seguir adelante y alcanzar mis objetivos. Cada palabra de aliento y cada muestra de confianza fueron una motivación para no rendirme y continuar esforzándome. De igual manera mi agradecimiento a mi ti Edith Huaman Villa, por su cariño, apoyo y confianza durante este camino. Sus palabras de aliento, sus consejos y su preocupación constante fueron una fuente de motivación para seguir adelante y no rendirme ante las dificultades. A mi hermano y demás familiares, gracias por su apoyo, sus consejos y por estar presentes en cada etapa de este camino.

Asimismo, expreso mi más sincero agradecimiento al Mgt. Honorato Sánchez Quispe asesor de tesis, por su orientación, dedicación y valiosos aportes durante el desarrollo de la presente investigación. Sus conocimientos, recomendaciones y observaciones fueron fundamentales para fortalecer y culminar satisfactoriamente este trabajo.

De manera especial, expreso mi más sincero agradecimiento a los señores docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, quienes con dedicación, vocación y profesionalismo compartieron sus conocimientos a lo largo de mi formación académica. Gracias por su orientación constante, por su paciencia y por el acompañamiento brindado durante el desarrollo de este trabajo. Sus enseñanzas, consejos y exigencia académica fueron clave para fortalecer mis habilidades, fomentar el pensamiento crítico en cada etapa del proceso de mi tesis.

Finalmente, soy grato con todas las personas que, contribuyeron a la culminación de este trabajo. Cada apoyo recibido, cada consejo y cada experiencia vivida formaron parte esencial de este logro, el cual representa no solo el cumplimiento de una meta académica, sino también un paso importante en mi desarrollo personal y profesional

Br. Hiro Alejo Illanes Huaman

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
GLOSARIO DE TÉRMINOS	XV
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
PROBLEMA GENERAL	3
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2. FORMULACIÓN.....	4
1.2.1 Problema General	4
1.2.2 Problemas Específicos.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.3.1 Justificación Económica	5
1.3.2 Justificación tecnológica	5
1.3.3 Justificación Social.....	5
1.3.4 Justificación Ambiental.....	6
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
CAPÍTULO II.....	7

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	7
2.1. ANTECEDENTES	7
2.1.1 Internacionales	7
2.1.2 Antecedentes Nacionales	9
2.1.3 Antecedentes Locales	10
2.2. MARCO CONCEPTUAL	10
2.2.1 Remolques	10
2.2.2 Diferencia entre Remolques y Semirremolques	11
2.2.3 Características Principales del Remolque	11
2.2.4 Partes del Remolque	12
2.2.4.1. Carrocería o tolva	12
2.2.4.2. Chasis del Remolque	13
2.2.4.3. Componentes Típicos del Chasis	13
2.2.5 Camiones	14
2.2.6 Soporte del Chasis	15
2.2.6.1. Partes de un Soporte del Chasis	16
2.3. SOLDADURA EN LAS PIEZAS DEL SOPORTE	17
2.3.1 Componentes del Equipo MIG	18
2.3.2 Significado del Alambre de Soldadura MIG de Código ER70S-6	19
2.4. FRACTURA DE METALES FERROSOS (MÁS COMUNES EN LOS ACEROS)	19
2.4.1 Tipos de Fractura	19
2.4.1.1. Fractura Dúctil	19
2.4.1.2. Fractura Frágil	19
2.4.2 Modos de Fractura	20
2.4.3 Fracturas por Fatiga	20
2.4.4 Análisis de Fractografía	21
2.4.5 Límite de fatiga	22
2.4.6 Factores que Generan una Fractura en los Metales	23
2.4.7 Importancia en Estructuras Metalúrgicas	23
2.4.8 Una Fractura en estas Estructuras Metalúrgicas puede Provocar	23
2.5. DEFORMACIÓN	23

2.6.	MATERIALES DÚCTILES.....	24
2.6.1	<i>Comportamiento Elástico en Materiales Dúctiles</i>	25
2.7.	MATERIALES FRÁGILES	27
2.7.1	<i>Comportamiento Plástico de Materiales Frágiles</i>	27
2.7.2	<i>Cedencia</i>	27
2.7.3	<i>Elongación</i>	28
2.7.4	<i>Estricción</i>	28
2.8.	CAUSAS QUE PRODUCEN FALLAS.....	29
2.8.1	<i>Esfuerzo y Resistencia</i>	29
2.8.2	<i>Tipos de Cargas Aplicadas en el Chasis del Remolque</i>	29
2.8.3	<i>Ensayos de tracción</i>	29
2.8.4	<i>Tipo de esfuerzos Ejercida en el Soporte</i>	32
2.9.	CÁLCULO DE LA CARGA APLICADA EN EL SOPORTE.....	33
2.9.1	<i>Cálculo de Centro de Gravedad o Centroide de la Tolva</i>	37
2.9.1.1.	Centroide de la Área Triangular.....	37
2.9.1.2.	Centroide de la Área Rectangular	37
2.9.2	<i>Sobrecargas o Exceso de Carga</i>	40
2.10.	SUBDIVISIONES DE LA ESTRUCTURA DE MATERIALES METÁLICOS.....	43
2.11.	ARREGLOS ATÓMICOS E IÓNICOS.....	43
2.12.	IMPERFECCIONES DE LOS ARREGLOS ATÓMICOS E IONES	44
2.12.1	<i>Defectos Puntuales</i>	44
2.12.1.1.	Vacancia	44
2.12.1.2.	Intersticios.....	45
2.12.1.3.	Sitios Intersticiales para el Carbono en el Hierro	46
2.12.1.4.	Sustitucionales	47
2.12.1.5.	Otros Defectos Puntuales	47
2.13.	DIAGRAMA DE FE-C CON LOS FASES PRESENTES	47
2.13.1	<i>Estructuras Cristalinas y Fases Presentes en el Diagrama Fe-C</i>	48
2.13.1.1.	Hierro al 100%.....	48
2.13.1.2.	Fase Ferrita o Fe- α	49
2.13.1.3.	Fase Austenita o Fe- γ	49

2.13.1.4.	Carburo de Hierro (Fe_3C)	49
2.13.1.5.	Fase Perlita ($\alpha + Fe_3C$)	49
2.13.2	<i>Desarrollo y Evolución de la Microestructura, en un Enfriamiento Lento para Diferentes Aceros Hipo-Eutectoides</i>	50
2.13.3	<i>Desarrollo y Evolución de la Microestructura, en un Enfriamiento Lento para Diferentes Aceros Hiper-Eutectoides</i>	51
2.13.4	<i>Transformaciones de la Austenita</i>	52
2.13.4.1.	Perlita	53
2.13.4.2.	Bainita	54
2.13.4.3.	La Martensita	54
2.13.5	<i>Diagramas TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) para Aceros</i>	55
2.14.	ACEROS ESTRUCTURALES	57
2.14.1	<i>Composición química de los aceros</i>	58
2.15.	ANÁLISIS MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (RXF)	58
2.15.1	<i>Analizador XRF</i>	58
2.15.2	<i>Limitaciones del Analizador XRF:</i>	59
2.16.	ANÁLISIS QUÍMICO POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA POR CHISPA	60
2.16.1	<i>Propiedades mecánicas de los aceros</i>	60
2.16.2	<i>Clasificación de los Aceros Según la Norma ASTM</i>	61
2.16.3	<i>Espesores de Aceros Utilizados en los Remolques</i>	65
2.16.4	<i>Diseño del Soporte</i>	65
2.16.5	<i>Propuesta de mejora del diseño del soporte</i>	66
2.17.	MARCO CONCEPTUAL	68
CAPÍTULO III		69
HIPÓTESIS Y VARIABLES		69
3.1.	HIPÓTESIS GENERAL	69
3.2.	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	69
3.3.	VARIABLES E INDICADORES	69
3.3.1	<i>Variable Dependiente</i>	69
3.3.2	<i>Variable Independiente</i>	69

3.4.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	70
CAPÍTULO IV		71
METODOLOGIA.....		71
4.1.	ÁMBITO DE ESTUDIO	71
4.1.1	<i>Conceptos Básicos</i>	<i>71</i>
4.1.2	<i>Localización y Delimitación Espacial de la Investigación</i>	<i>71</i>
4.1.3	<i>Ubicación Geográfica.....</i>	<i>71</i>
4.2.	INVESTIGACIÓN.....	73
4.2.1	<i>Tipo de Investigación.....</i>	<i>73</i>
4.2.2	<i>Nivel de Investigación.....</i>	<i>73</i>
4.2.3	<i>Diseño de la Investigación.....</i>	<i>74</i>
4.3.	POBLACIÓN	74
4.4.	MUESTRA.....	74
4.5.	TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	75
4.5.1	<i>Observación Directa.....</i>	<i>75</i>
4.5.2	<i>Análisis Químico por Rayos XRF</i>	<i>76</i>
4.5.3	<i>Análisis Químico por Espectrometría de Emisión Óptica por Chispa</i>	<i>76</i>
4.5.4	<i>Pruebas Metalográficas.....</i>	<i>76</i>
4.5.5	<i>Pruebas de Dureza.....</i>	<i>76</i>
4.5.6	<i>Ensayos de Fractura por Tracción</i>	<i>76</i>
4.5.7	<i>Ensayo de Fractografía</i>	<i>77</i>
4.5.8	<i>Revisión Documental</i>	<i>77</i>
4.5.9	<i>Entrevistas con Personal Técnico.....</i>	<i>77</i>
4.6.	EQUIPOS E INSTRUMENTOS	77
4.6.1	<i>Equipos e instrumentos para Inspección Visual y Medición</i>	<i>77</i>
4.6.2	<i>Equipos de Análisis de Materiales.....</i>	<i>77</i>
4.6.3	<i>Equipos de Seguridad</i>	<i>77</i>
4.7.	ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICO DE LAS PROBETAS CON EL ANALIZADOR RXF.....	78
4.8.	RESULTADOS OBTENIDOS POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA POR CHISPA	83
4.9.	PRUEBAS METALGRÁFICAS	84

4.9.1	<i>Preparación de las Muestras Metalográficas.....</i>	85
4.9.2	<i>Resultados obtenidos en la Observación Microscópica de la prueba metalográfica</i>	86
4.9.3	<i>Observación de la Probeta Randon 2019</i>	92
4.10.	PRUEBAS DE DUREZA ROCKWELL, REALIZADAS EN EL LABORATORIO DE METALURGIA FÍSICA DE LA UNSAAC	92
4.10.1	<i>Tipos de Dureza Realizadas con la Dureza Rockwell</i>	93
4.11.	ANÁLISIS DE LA FRACTURA DE LAS 5 PROBETAS SOMETIDAS A ENSAYOS DE TRACCIÓN	95
4.11.1	<i>Análisis de la prueba de fractura de la muestra 1 perteneciente a la empresa Rossetti del año 2015.....</i>	95
4.11.2	<i>Análisis de la prueba de fractura de la muestra 2 perteneciente a la empresa Facchini del año 2020.....</i>	97
4.11.3	<i>Análisis de la prueba de fractura de la muestra 3 perteneciente a la chapa para mantenimiento ...</i>	99
4.11.4	<i>Análisis de la prueba de fractura de la muestra 4 perteneciente a la empresa Randon 2010</i>	101
4.11.5	<i>Análisis de la prueba de fractura de la muestra 5 perteneciente a la empresa Randon 2019</i>	103
4.11.6	<i>Cálculo de la Ductilidad de las Probetas</i>	105
4.12.	ANÁLISIS DE FRACTOGRAFIA, DE LA PROBETA RANDON 2019	107
CAPÍTULO V		109
EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		109
5.1.	EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	109
5.1.1	<i>Evaluación de resultados de las pruebas de composición química, pruebas metalográficas y pruebas de dureza realizadas</i>	110
5.1.2	<i>Evaluación general de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de tracción y la fractografía</i>	111
CAPÍTULO VI		113
DISCUSIÓN DE RESULTADOS		113
6.1.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	113
6.1.1	<i>Composición Química de las Probetas.....</i>	113
6.1.2	<i>Resultados Metalográficos (500x)</i>	114
6.1.3	<i>Resultados de Dureza (HRB).....</i>	114

6.1.4	<i>Resultados de los Ensayos de Tracción</i>	114
6.1.5	<i>Resultados de la Fractografía</i>	116
6.1.6	<i>Resultados de Evaluación Estructural del Soporte de Muelles tipo Basculante – Tándem Camión Volquete de 50 ton</i>	117
6.2.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	118
	CONCLUSIONES	120
	RECOMENDACIONES	121
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
	ANEXOS	125
	ANEXO I. MATRIZ DE CONSISTENCIA	
	ANEXO II. DIAGRAMAS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LAS 5 PROBETAS PROPORCIONADOS POR LA MAQUINA DE PRUEBAS DE FRACTURA POR TRACCIÓN	
	ANEXO III: PREPARACIÓN Y MEDICIÓN DE LAS PROBETAS	
	ANEXO IV: EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS DE FRACTURA POR TRACCION	
	ANEXO V: LECTURA DE LOS RESULTADOS OBETENIDOS EN LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN	
	ANEXO VI. “EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL SOPORTE DE MUELLES TIPO BASCULANTE – TANDEM CAMION VOLQUETE DE 50 TON”	
	ANEXO VII. INFORME DE ANÁLISIS DE FRACTOGRAFIA EN LA PROBETA FRACTURADA (RANDON 2019)	
	ANEXO VIII. ANÁLISIS QUÍMICO POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA POR CHISPA	

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 <i>Parte inclinada de la tolva</i>	35
TABLA 2 <i>Largo de la tolva</i>	35
TABLA 3 <i>Altura de la tolva</i>	36
TABLA 4 <i>Largura de la dase de la tolva</i>	36
TABLA 5 <i>Datos obtenidos por los centroides de cada grafico</i>	38
TABLA 6 <i>Algunas características de las estructuras cristalinas cúbicas</i>	44
TABLA 7 <i>Clasificación de los aceros según la norma ASTM</i>	64
TABLA 8 <i>Operacionalización de variables</i>	70
TABLA 9 <i>Coordenadas de la empresa roberto equipamentos automotivos s.a.</i>	72
TABLA 10 <i>Resultados de los elementos químicos dé % en promedio obtenidos en el anexo v</i>	84
TABLA 11 <i>Pruebas de dureza realizadas en las 5 probetas de los diferentes soportes</i>	94
TABLA 12 <i>Cálculo de la elongación</i>	106
TABLA 13 <i>Cálculo de la estricción</i>	107
TABLA 14 <i>Cuadro para la evaluación y comparación de pruebas hechas en las 5 probetas</i>	109
TABLA 15 <i>Influencia del manganeso y el titanio en la resistencia máxima a la tracción y la deformación de la fractura</i>	111
TABLA 16 <i>Resultados de la composición química por ensayo de XRF</i>	113
TABLA 17 <i>Resultados de la composición química de las probetas Obtenidas por espectrometría</i>	113
TABLA 18 <i>Resultados de la dureza rockwell en hrb de las 5 probetas</i>	114
TABLA 19 <i>Resultados obtenidos a partir de los ensayos de tracción</i>	116

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	<i>Imagen de remolque y semirremolque con tolvas</i>	12
FIGURA 2	<i>Imagen interna de una tolva de la marca randon</i>	13
FIGURA 3	<i>Imagen de un remolque con chasis</i>	14
FIGURA 4	<i>Imagen de un semirremolque con tolva enchanchado aun camión de la marca volvo</i>	15
FIGURA 5	<i>Imagen de un soporte de chasis clásico de la marca rossetti restaurado</i>	16
FIGURA 6	<i>Imagen del soporte de chasis rediseñado de la empresa randoncorp con solidworks</i>	17
FIGURA 7	<i>Maquina soldadura mig con todos sus componentes</i>	18
FIGURA 8	<i>Ejemplo de una fractura en el soporte</i>	21
FIGURA 9	<i>Probeta extraída del soporte fracturado del semirremolque con tolva</i>	24
FIGURA 10	<i>Imagen de un diagrama de esfuerzo-deformación (σ-ϵ) para materiales dúctiles</i>	26
FIGURA 11	<i>Imagen de un diagrama de σ-ϵ para el hierro gris fundido</i>	28
FIGURA 12	<i>Imagen de una tabla que muestra los tipos de cargas</i>	30
FIGURA 14	<i>Efecto de la carga en un soporte</i>	33
FIGURA 15	<i>Dimensiones reales de una remolque con tolva (corte longitudinal de todo el remolque)</i>	34
FIGURA 16	<i>Dimensiones reales de una tolva</i>	35
FIGURA 17	<i>Grafico de la tolva con los datos obtenidos realizados en excel</i>	36
FIGURA 18	<i>Diagrama de fuerzas aplicadas en la tolva</i>	39
FIGURA 19	<i>Imagen de un semirremolque que modificaron la altura colocando tablas</i>	41
FIGURA 20	<i>Sitios intersticiales de los átomos de carbono en la estructura cristalina del hierro</i>	46
FIGURA 21	<i>Imagen de diagrama de fases Fe-C</i>	48
FIGURA 22	<i>Gráfico del desarrollo y evolución de la microestructura, en un enfriamiento lento para diferentes aceros hipo-eutectoides</i>	50

FIGURA 23 <i>Gráfico del desarrollo y evolución de la microestructura, en un enfriamiento lento para diferentes aceros hiper-eutectoides.....</i>	52
FIGURA 24 <i>Una ilustración de diferentes tipos de perlita</i>	53
FIGURA 25 <i>Ilustración de la vainita</i>	54
FIGURA 26 <i>Ilustración de diferentes tipos de martensita</i>	55
FIGURA 27 <i>Diagrama ttt (tiempo temperatura y transformación) para aceros</i>	56
FIGURA 28 <i>Analizador XRF</i>	59
FIGURA 29 <i>Ejemplos de algunos diseños de soportes existentes: a) diseño de la marca rossetti, b) rediseño de la marca rossetti, c) un diseño antiguo de la marca randon</i>	65
FIGURA 30 <i>Rediseño por el programa solidworks del soporte de un chasis (perteneciente a la empresa randoncorp) de vistas diferentes: a) vista frontal, b) vista lateral y c) vista sobre cabeza</i>	67
FIGURA 31 <i>Ubicación geográfica de la empresa roberto equipamentos automotivos S.A.....</i>	72
FIGURA 32 <i>Visualización satelital de la empresa roberto equipamentos automotivos S.A.</i>	73
FIGURA 33 <i>Empresas de laboran en ceilândia, distrito federal de brasilia-brasil.....</i>	74
FIGURA 34 <i>Muestras extraídas de diferentes soportes de empresas randon y facchini</i>	75
FIGURA 35 <i>Resultados del análisis de la composición química de la probeta 1, con el “analizador XRF”... ..</i>	78
FIGURA 36 <i>Resultados del análisis de la composición química de la probeta 2, con el “analizador XRF”... ..</i>	79
FIGURA 37 <i>Resultados del análisis de la composición química de la probeta 3, con el “analizador XRF”... ..</i>	80
FIGURA 38 <i>Resultados del análisis de la composición química de la probeta 4, con el “analizador XRF”... ..</i>	81
FIGURA 39 <i>Resultados del análisis de la composición química de la probeta 5, con el “analizador XRF”... ..</i>	82
FIGURA 40 <i>Pasos realizados en el laboratorio para la preparación de las muestras metalográficas.....</i>	85
FIGURA 41 <i>Resultado de la observación en el microscopio de rossetti 2015.....</i>	87
FIGURA 42 <i>Resultado de la observación en el microscopio de facchini 2020.....</i>	88
FIGURA 43 <i>Microestructura de la chapas de acero para mantenimiento</i>	89
FIGURA 44 <i>Resultados de la de la microestructura de randon 2010.....</i>	90

FIGURA 45 <i>Resultados de la observación en el microscopio de randon 2019</i>	91
FIGURA 46 <i>Observación de una fisura en la probeta 5, perteneciente a la empresa randon 2019, es la probeta fracturada objeto de estudio.....</i>	92
FIGURA 47 <i>Preparación de la máquina de dureza rockwell, para las pruebas de dureza en las 5 probetas..</i>	93
FIGURA 48 <i>Imagen de la máquina para las pruebas de fractura en las 5 probetas</i>	95
FIGURA 49 <i>Diagrama de esfuerzo-deformación para rossetti2015.....</i>	96
FIGURA 50 <i>Diagrama esfuerzo-deformación para facchini 2020</i>	98
FIGURA 51 <i>Diagrama esfuerzo-deformación para chapa de mantenimiento</i>	100
FIGURA 52 <i>Diagrama de esfuerzo-deformación de randon 2010.....</i>	102
FIGURA 53 <i>Diagrama de esfuerzo-deformación randon 2019, probeta del soporte fracturado</i>	104
FIGURA 54 <i>Probeta fracturada de la randon 2019, preparado para la prueba de fractografía</i>	108
FIGURA 55 <i>Diagramas de esfuerzo-deformación de las 5 probetas proporcionadas por la maquina de pruebas de fractura</i>	115
FIGURA 56 <i>Imagen del ensayo de la fractografía en la probeta randon 2019</i>	117

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AC	: Corriente alterna
DC	: Corriente continua
SMAW	: Soldadura por arco y electrodo revestido (Shielded metal arc welding)
MIG	: Soldadura por arco, gas y electrodo metálico (Metal inert gas welding)
Psi	: Libras por pulgada cuadrada
σ	: Deformación
σ_{pl}	: Deformación plástica
σ_Y	: Limite elástico
ε	: Esfuerzo
$\epsilon_{m\acute{a}x}$	: Esfuerzo máximo de deformación
Ksi	: kilolibras por pulgada cuadrada (kilopound per square inch)
Mpa	: Megapascal
m	: Metro
m^2	: Metro cuadrado
m^3	: Metro cúbico
F	: Fuerza
TTT	: Tiempo, temperatura y transformación
ASTM	: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales
XRF	: Fluorescencia de rayos X (X-Ray Fluorescence)
HRC	: Dureza Rockwell C (Hardness Rockwell C)
HRB	: Dureza Rockwell B (Hardness Rockwell B)
F_c	: Fuerza de compresión
N	: Newton
m/s^2	: Metros por segundo al cuadrado
Kg	: Kilogramos
$^{\circ}C$	: Grados Celsius
A_0	: Área inicial
A_f	: Área final
L_0	: Longitud inicial
L_f	: Longitud final

RESUMEN

El propósito de este estudio es determinar las causas de la fractura ocurrida en el soporte del chasis de un remolque con tolva, de fabricación brasileña, en la localidad de Ceilândia, Distrito Federal de Brasilia-Brasil. La investigación se desarrolló a partir de la identificación de una falla por fractura recurrente en el soporte del chasis. Para el análisis respectivo, se seleccionaron cinco muestras de acero, de las cuales una corresponde al material extraído del soporte del chasis que presentó la fractura y cuatro de ellos corresponden a aceros utilizados en otras empresas fabricantes de soportes y remolques en general. Estas últimas son consideradas como muestras de referencia y se incorporan con fines comparativos, con el propósito de establecer diferencias y similitudes en sus características químicas, metalográficas, mecánicas, y determinar su posible relación con el comportamiento frente a la fractura. En total, se realizaron cinco tipos de pruebas y ensayos sobre las cinco muestras de acero. Estos comprendieron el análisis de la composición química mediante fluorescencia de rayos X (XRF), el análisis químico mediante espectrometría de emisión óptica, el ensayo de dureza, el análisis metalográfico y el ensayo de tracción. Adicionalmente, se efectuó un análisis estructural del soporte del chasis con la finalidad de determinar la distribución y magnitud de los esfuerzos a los que se encuentra sometido durante sus condiciones de trabajo. Finalmente, se realizó el análisis de fractografía de la superficie de fractura, con el propósito de identificar el mecanismo y tipo de fractura presente en el acero.

Palabras clave: Fractura, Soporte de chasis, Fallas estructurales, Espectrometría y fractografía, Cargas cíclicas.

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the causes of a fracture in the chassis bracket of a Brazilian-made hopper trailer in Ceilândia, Federal District, Brazil. The investigation was initiated following the identification of a recurring fracture failure in the chassis bracket. For the analysis, five steel samples were selected: one taken from the fractured chassis bracket and four from steels used by other manufacturers of brackets and trailers. The latter served as reference samples for comparative purposes, aiming to identify differences and similarities in chemical, metallographic, and mechanical characteristics and to determine their potential relationship to fracture behavior. A total of five types of tests and analyses were performed on the steel samples. These included chemical composition analysis via X-ray fluorescence (XRF), chemical analysis via optical emission spectrometry, hardness testing, metallographic analysis, and tensile testing. Additionally, a structural analysis of the chassis bracket was conducted to determine the distribution and magnitude of the stresses to which it is subjected during operation. Finally, fractographic analysis of the fracture surface was performed to identify the mechanism and type of fracture present in the steel.

Keywords: Fracture, Chassis support, Structural failures, Spectrometry and fractography, Cyclic loads

.

.

INTRODUCCIÓN

En los remolques con tolva que operan en la región de Ceilândia, Distrito Federal, Brasil, se ha observado la aparición recurrente de daños en determinadas zonas críticas de los soportes del chasis. Estos daños se manifiestan inicialmente mediante fisuras y grietas que, bajo la acción repetitiva de las cargas y demás solicitudes de servicio, pueden propagarse progresivamente hasta ocasionar la fractura del componente estructural metálico. Esta situación puede comprometer la integridad estructural del remolque y generar riesgos durante su operación.

Esta tesis se centra principalmente en el estudio de la fractura del soporte de un chasis en remolques con tolva, analizando primeramente el tipo de cargas que se generan en dicho soporte, evaluando las condiciones de trabajo en la operación de los remolques, después se analiza las propiedades de los aceros (mediante pruebas y ensayos realizados) para la fabricación de estos remolques en general. El conocimiento de los tipos de aceros, las composiciones químicas, propiedades mecánicas, estructura metalográfica que se utilizan en la industria metalúrgica de Brasil para la fabricación de los remolques, es un aporte científico y tecnológico en la mejoría de las empresas en el Perú fabricantes de remolques.

En las industrias brasileñas de fabricación de remolques existe una alta competitividad entre las empresas, debido a que la calidad, la resistencia y la durabilidad de sus productos representan factores determinantes para su posicionamiento en el mercado. En este contexto, la selección de los aceros, las especificaciones de los materiales, los procesos de fabricación y los controles de calidad constituyen información estratégica que proporciona ventajas competitivas a cada fabricante. La divulgación de esta información podría comprometer su posición competitiva, facilitar la replicación de sus procesos por parte de otras empresas y afectar el desarrollo de sus productos. En consecuencia, el acceso a información técnica

detallada sobre los aceros utilizados en la fabricación de remolques suele ser limitado, lo que representa una dificultad para el desarrollo de investigaciones orientadas a la caracterización y evaluación de estos aceros.

Durante el desarrollo de la investigación, se presentaron diversas limitaciones que dificultaron la ejecución del estudio. Una de las principales dificultades fue el elevado costo económico para la realización de los ensayos de laboratorio. Asimismo, se presentó una limitada disponibilidad de muestras para el estudio, extraídas de los soportes de fabricación brasileña, de empresas como Rossetti, Randon y Facchini. Debido a las restricciones para obtener estas muestras representativas, se obtuvo cantidad de probetas disponibles para el análisis experimental. Por otro lado, los tiempos requeridos para la programación, ejecución y entrega de resultados por parte de los laboratorios especializados fueron considerablemente prolongados, generando retrasos en el cronograma de la investigación. En conjunto, estas limitaciones representaron desafíos importantes para el desarrollo del estudio; sin embargo, fueron gestionadas mediante una adecuada planificación y optimización de los recursos disponibles, permitiendo cumplir con los objetivos planteados.

Esta investigación aborda seis capítulos. En el capítulo I se centra en el problema de la investigación, con sus respectivos objetivos, en el capítulo II se desarrolla el marco teórico y sus antecedentes, en el capítulo III se plantea su hipótesis y sus variables, en el capítulo IV se describe la metodología y los 7 ensayos realizados, se realiza una evaluación de resultados en el capítulo V y finalmente en el capítulo VI se realiza la discusión de resultados.

CAPÍTULO I

PROBLEMA GENERAL

1.1. Identificación del Problema

Un remolque con tolva es un equipo metalmecánico, no motorizado, enganchado a un camión, diseñado para el transporte de arenas, tierras, cascajos, etc. (granelero). En Brasil se encuentran operando muchos de estos remolques, de fabricación brasileña, de diferentes modelos y marcas como: Rossetti, Randon, Librelato, Facchini, etc. El transporte de estas cargas (arena, cascajo, residuos de construcción, tierra, entre otros) se realiza a diferentes lugares de Brasil, más específicamente todo departamento de Goiás, desde Ceilândia una de las ciudades más pobladas del distrito federal de Brasilia y lugares aledaños.

El uso de estos remolques con tolva es constante, ya que el transporte de materiales es continuo. Sin embargo, se han detectado fallas estructurales críticas en muchos de estos remolques, particularmente en el soporte del chasis, estas fallas comprometen altos costos de mantenimiento que superan a los 5 mil reales por soporte, ya que generalmente se fracturan dos o más soportes del mismo remolque.

Son innumerables la cantidad exacta de remolques con tolvas que se tiene en la ciudad de Ceilândia, ya que generalmente se tienen remolques que realizan transporte a todo Brasil; Pero la gran mayoría de estos equipos metalmecánicos realizan transporte de materiales de construcción como arena, tierra, cascajo, piedras, etc. Y se tienen otras que transportan productos de consumo, los más conocidos son la soya, el frejol, el algodón entre otros, la carga total que soportan estos equipos llega de 35 a 50 toneladas.

La pieza del remolque con tolva a estudiar es un soporte fracturado, perteneciente a la empresa Randon del año 2019, un soporte es considerado una parte importante del chasis donde se concentra gran parte de toda la carga, llamado peso bruto total de 50 ton (peso de la tolva, peso del chasis y peso de la carga que soporta), pieza clave que absorbe y distribuye las cargas

dinámicas durante el transporte. Esta fractura no solo evidencia una posible deficiencia en el diseño estructural, en los materiales utilizados o en los procesos de fabricación, sino que también refleja las duras condiciones operativas (sobrecarga, exceso de servicio, mantenimiento, etc.) a las que están expuestos estos remolques en la región. Lo cual motiva el estudio esta pieza que llegó a fracturarse.

En virtud de esta situación, se plantea la necesidad de realizar un análisis detallado que permita identificar las causas de la fractura en el soporte, evaluar el estado del soporte de chasis y proponer soluciones correctivas y preventivas. Esto permitirá mejorar la durabilidad y la seguridad de los remolques con tolva para camiones, optimizar su desempeño mecánico y reducir los riesgos asociados a este tipo de fallas.

1.2. Formulación

1.2.1 Problema General

- ¿Cuáles serán las causas de la fractura en el soporte del chasis del remolque con tolva para camiones (operando en Ceilândia, Distrito Federal de Brasilia-Brasil)?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Cuáles serán las propiedades mecánicas y la composición química del acero del soporte fracturado?
- ¿Cuál será el mecanismo de fractura presentado en el soporte del chasis de acuerdo a las evidencias metalográficas o fractográficas?
- ¿Cuáles serán los niveles de esfuerzo desarrolladas en la zona crítica del soporte bajo la condición de carga nominal y bajo sobrecarga estimada?

1.3. Justificación

Se consideran las siguientes justificaciones:

1.3.1 Justificación Económica

Las fracturas en los soportes del chasis generan pérdidas económicas considerables. Estas pérdidas incluyen altos costos de reparación y mantenimiento, tiempos de inactividad (un día de inactividad de estos remolque generan perdidas para los empresarios dedicados al transporte), interrupciones logísticas, daños a la carga transportada y costos derivados de accidentes. Mediante este estudio, se pretende reducir estos costos, con enfoques de ingeniería preventiva.

1.3.2 Justificación tecnológica

El soporte del chasis del remolque con tolva, es un componente estructural crítico que soporta cargas pesadas que llegan a 50 toneladas y transmite esfuerzos dinámicos generados durante el transporte. En los últimos meses, se han reportado fallas recurrentes en estos soportes, en remolques operando en Ceilândia, lo que evidencia posibles debilidades en el diseño, materiales, procesos de soldadura o condiciones de operación. Este estudio identifica las causas de las fracturas, analiza el comportamiento mecánico del soporte afectado y propone soluciones estructurales de diseño que permita alargar la vida útil de estos soportes.

1.3.3 Justificación Social

Ceilândia es una de las regiones más pobladas del Distrito Federal y cuenta con una actividad económica significativa basada en el transporte de mercancías y materiales de construcción, de consumo, minerales, etc. La circulación de vehículos pesados con soportes fracturados representa un peligro para la seguridad vial y para la integridad de los ciudadanos.

Realizar este estudio contribuye a prevenir accidentes relacionados con fracturas en los soportes del chasis del remolques con tolva, protegiendo no solo a los conductores, sino también a peatones.

1.3.4 Justificación Ambiental

Una falla en el soporte del chasis puede provocar derrames repentinos de las cargas que transporta el remolque mediante accidentes de tránsito, comprometiendo la integridad de las vías y el deterioro ambiental local, afectando el ordenamiento territorial en zonas industriales y residenciales de Ceilândia y lugares aledaños. Asimismo, la necesidad de reparación constante o el retiro prematuro del soporte dará lugar a mayor acumulación de residuos metálicos y consumo adicional de recursos para fabricar piezas de reemplazo. El estudio de la fractura en el soporte del chasis de un remolque con tolva, busca identificar las causas de la fractura y proponer soluciones que aumenten la vida útil del soporte, minimizar riesgos de derrames y la generación de residuos, contribuyendo a la sostenibilidad de las operaciones de transporte, al cumplimiento de buenas prácticas ambientales y promover un desarrollo industrial más responsable.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Determinar las causas de la fractura en el soporte del chasis del remolque con tolva, para camiones (operando en Ceilândia, Distrito Federal de Brasilia-Brasil)

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el acero del soporte fracturado evaluando su composición química, dureza microestructura, y otras propiedades.
- Identificar el mecanismo de fractura que se presenta en el soporte del chasis.
- Determinar los niveles de esfuerzos desarrollados en el soporte bajo carga nominal y bajo sobrecarga estimada.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. Antecedentes

2.1.1 Internacionales

- Baadkar (2010), en la University of Canterbury, Nueva Zelanda, desarrolló la investigación “*Semi-Trailer Structural Failure Analysis Using Finite Element Method*”. El estudio estuvo orientado al análisis de fallas estructurales ocurridas en componentes de un semirremolque. Para determinar las causas de la falla, se empleó el método de elementos finitos, considerando diferentes condiciones de carga y comportamiento estructural. La investigación también contempló la validación experimental mediante mediciones de deformación, permitiendo identificar regiones críticas en las cuales podían producirse grietas y fallas. Posteriormente, se realizó un análisis de fatiga para evaluar la vida de los componentes y determinar modificaciones que permitieran mejorar su comportamiento estructural. Esta investigación constituye uno de los antecedentes internacionales más importantes para mi tesis porque analiza directamente la falla estructural de un semirremolque. Su metodología demuestra la utilidad de combinar inspección de la falla, análisis estructural y evaluación de fatiga para establecer la causa de una fractura.
- Guadalupe Vadillo (2007), de la Universidad Carlos III De Madrid en su Investigación titulada: “*Modelos de Fractura Dúctil en Condiciones Estáticas y Dinámicas*”. El objetivo de esta tesis fue estudiar y modelar el comportamiento de los materiales metálicos dúctiles frente a procesos de fractura bajo condiciones de carga estática y dinámica. La investigación se fundamentó en el análisis de los mecanismos microscópicos asociados con la fractura dúctil, particularmente en los procesos de nucleación, crecimiento y coalescencia de microvacíos que se desarrollan en el material

como consecuencia de la deformación plástica. Para ello, se emplearon modelos constitutivos basados principalmente en el modelo de Gurson, incorporando variables relacionadas con la porosidad, la triaxialidad de tensiones, la velocidad de deformación y la temperatura. Asimismo, los modelos fueron implementados mediante herramientas de simulación numérica y contrastados con resultados experimentales, con la finalidad de evaluar su capacidad para representar el comportamiento de materiales metálicos sometidos a diferentes condiciones de carga. Los resultados permitieron establecer que la evolución de los microvacíos constituye un mecanismo fundamental en el desarrollo de la fractura dúctil, y que factores como la triaxialidad de tensiones y las condiciones de carga influyen significativamente en la evolución del daño y en la capacidad resistente del material. El aporte de esta investigación al presente estudio radica en proporcionar fundamentos teóricos para interpretar el mecanismo de fractura dúctil en componentes estructurales de acero. En particular, permite relacionar la presencia de deformación plástica y la formación, crecimiento y coalescencia de microvacíos con las características observables en la superficie de fractura, como los dimples u hoyuelos, aspectos relevantes para determinar el mecanismo de falla del soporte del chasis del remolque con tolva objeto de la presente investigación.

- Teixeira (2004) desarrolló en la Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, la investigación titulada: “*Metodologia de análise de fadiga em componentes estruturais de aço baseada na mecânica da fratura*”. El objetivo de la investigación fue desarrollar y validar una metodología para el análisis de fatiga de componentes estructurales de acero sometidos a cargas cíclicas y que presentan defectos o discontinuidades. La investigación consideró defectos tales como porosidades, vacíos internos y partículas no metálicas, identificándose que las discontinuidades similares a grietas son frecuentes en uniones soldadas. Para el análisis se emplearon los fundamentos de la Mecánica de

la Fractura y métodos numéricos, utilizando el programa FRANC3D para determinar el factor de intensidad de tensiones K_I y evaluar la propagación de grietas y la vida a fatiga. La metodología fue aplicada a una viga de acero sometida a cargas cíclicas con defectos localizados en una unión soldada, obteniéndose resultados de vida a fatiga del mismo orden de magnitud que los calculados mediante los procedimientos simplificados de la NBR 8800. El trabajo estudia cómo se comportan a la fatiga los componentes estructurales de acero que contienen defectos o discontinuidades cuando están sometidos a cargas cíclicas. Entre los defectos considerados se encuentran porosidades, vacíos internos, partículas no metálicas y discontinuidades semejantes a grietas, especialmente aquellas presentes en uniones soldadas. Teixeira desarrolló y validó una metodología para analizar la propagación de grietas y la vida a fatiga utilizando los fundamentos de la Mecánica de la Fractura y métodos numéricos.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

- Berrios, Barcena (2021), de la Pontificia Universidad Católica Del Perú en su Tesis para Optar el Grado de Doctor en Ingeniería, titulado: *“Procedimiento para el Análisis del Crecimiento de Fisuras por Fatiga en Componentes de Aceros Bidimensionales Utilizando Simulación Numérica”*. Esta investigación relaciona directamente fisuras por fatiga, componentes de acero, simulación numérica y mecánica de fractura. El planteamiento central parte de que una fisura existente en un componente estructural puede crecer progresivamente cuando el material está sometido a cargas repetitivas o cíclicas. Por ello, la investigación busca establecer un procedimiento que permita predecir numéricamente la evolución de la fisura y estimar el comportamiento del componente frente a la fatiga. La investigación se fundamenta en conceptos de mecánica de fractura y fatiga, utilizando simulación numérica para estudiar el crecimiento de las fisuras.

- Yépez y Castillo (2007), de la Pontificia Universidad Católica del Perú, desarrollaron la tesis titulada: “*Estudio del comportamiento de fisuras en uniones soldadas mediante la modelación por elementos finitos*”. Cuyo objetivo estuvo orientado a analizar el comportamiento de fisuras presentes en uniones soldadas mediante la aplicación del método de elementos finitos. La investigación permitió evaluar la influencia de la presencia y geometría de las fisuras sobre la distribución de esfuerzos en la unión, considerando las zonas próximas a la discontinuidad como regiones susceptibles a presentar concentraciones de esfuerzos. La modelación numérica permitió analizar el comportamiento de la estructura ante la presencia de fisuras y establecer la importancia de considerar la geometría de la discontinuidad en la evaluación de la integridad estructural. El aporte de esta investigación al presente estudio consiste en proporcionar fundamentos para analizar el comportamiento de fisuras localizadas en uniones soldadas mediante herramientas de simulación numérica. Este antecedente resulta relevante para el estudio de la fractura del soporte del chasis del remolque con tolva, debido a que las uniones soldadas pueden constituir zonas de concentración de esfuerzos y posibles sitios de iniciación de grietas cuando el componente se encuentra sometido a cargas estáticas y cíclicas durante su funcionamiento.

2.1.3 Antecedentes Locales

No existe trabajos locales

2.2. Marco Conceptual

2.2.1 Remolques

Los remolques con tolvas (remolques basculantes) son equipamientos destinados a trabajos de transporte pesado, que ayudan en el transporte de muchos materiales, los más comunes son el transporte de materiales de construcción como arena, piedras, cascajo, tierra,

etc. Y algunos productos de consumo, los más comunes son la soya, maíz, variedades de frejoles, etc.

En Brasil estas tolvas son llamados de carretas, cazambas o carrocerías basculantes, se tienen una infinidad de marcas y modelos, de las marcas los más conocidos son: Rossetti, Librelato, Facchini, Randon.

La mayoría de los remolques están hechos de aceros estructurales, la evolución en la mejoría de estos aceros es un logro en el avance tecnológico de la metalurgia, muchos ingenieros estudian el uso de estos aceros, ya que cada parte de la tolva ofrecen diferentes tipos de funcionalidades, en conclusión, existen diferentes tipos de aceros en diferentes piezas o lugares del remolque.

2.2.2 Diferencia entre Remolques y Semirremolques

Se denomina semirremolque al vehículo de transporte de carga pesada que carece de un sistema completo de ejes y suspensión en su parte delantera, por lo que una fracción de su peso propio y de la carga transportada es transmitida al camión (tractor motora) mediante el dispositivo de acoplamiento, generalmente una quinta rueda. Por otro lado, el remolque dispone de un sistema de rodadura independiente, constituido por ejes y elementos de suspensión propios, de manera que la totalidad de su peso y de la carga transportada es transmitida al suelo a través de dichos ejes. En la figura 1, se puede observar un semirremolque enganchado al camión, y detrás del semirremolque se encuentra un claro ejemplo de remolque.

2.2.3 Características Principales del Remolque

- Estructura: Tiene paredes metálicas y una salida inferior o trasera que facilita la descarga del material por gravedad.
- Material: Suele ser de acero reforzado para resistir el peso y la abrasión del material transportado.

- Mecanismo de descarga: Puede ser basculante (se levanta la caja para vaciar el contenido) o de compuerta inferior (el material cae por una abertura controlada).
- Capacidad: Varía según el tipo de camión y el uso (en el caso de un remolque con tolva varía de 35 a 50 toneladas).

Figura 1

Imagen de remolque y semirremolque con tolvas



Nota. Imagen tomada frente a la empresa Roberto Equipamentos

2.2.4 Partes del Remolque

2.2.4.1. Carrocería o tolva

La carrocería o tolva es el conjunto estructural destinado a contener, transportar y descargar la carga. En los remolques y semirremolques para el transporte de materiales, la tolva constituye el elemento principal de almacenamiento de la carga y está diseñada para soportar las solicitaciones generadas por el peso del material, las operaciones de carga y descarga, las vibraciones y las cargas dinámicas durante el desplazamiento.

Estructuralmente, la tolva está conformada por elementos como planchas o chapas de acero, largueros, travesaños, refuerzos longitudinales y transversales, cuya función es proporcionar rigidez y resistencia al conjunto. Su geometría depende del tipo de material

transportado y del sistema de descarga empleado. La figura 2 se observa el interior de una tolva.

Figura 2

Imagen interna de una tolva de la marca Randon



Nota. Imagen tomada en la empresa Roberto Equipamentos

2.2.4.2. Chasis del Remolque

El chasis del remolque (especialmente para camiones de carga pesada) es la estructura metálica principal que soporta todo el peso de la tolva, la carga transportada y los esfuerzos generados durante la operación, frenado y movimiento del vehículo.

El chasis (Figura 3) es el bastidor estructural que actúa como la columna vertebral del remolque y semirremolque. Está compuesto por perfiles longitudinales (largueros) y transversales (travesaños), sobre los cuales se monta la tolva o cazamba.

2.2.4.3. Componentes Típicos del Chasis

- Largueros longitudinales: Vigas principales que recorren toda la longitud del chasis.
- Travesaños o refuerzos transversales: Conectan los largueros y refuerzan la estructura.
- Soportes de elevación: Elementos donde se monta el cilindro hidráulico que levanta la tolva.

- Ejes y suspensión: Van atornillados o soldados al chasis.
- Placa de acoplamiento (lugar donde se ubica el pino rey): Punto de unión con el camión tractor.
- Parachoques, guardabarros y luces: También están fijados al chasis.

Figura 3

Imagen de un remolque con chasis



Nota. La imagen fue tomada en la empresa Roberto Equipamentos, la imagen muestra la tolva parte superior del semirremolque, y el chasis parte inferior del mismo.

2.2.5 Camiones

Los camiones son los vehículos que realizan el transporte de estos remolques y la mayoría son de la marca volvo, existen un sin fin de modelos y marcas de estos camiones, todo depende del año en la que fueron fabricados. Estos vehículos de transporte están compuestos por una cabeza tractora (camión) y un remolque o semirremolque.

Los camiones son usados para el transporte de carga pesada y de gran volumen. La capacidad de estos vehículos oscila entre 35 a 50 toneladas (peso bruto), esto depende del año,

diseño, potencia del motor, etc. El camión que se observa en la Figura 4 tiene los siguientes componentes:

- Cabeza tractora (camión). Es el que lleva el motor y que arrastra la carga, puede separarse del semirremolque, tiene una quinta rueda para enganchar el semirremolque.
- Semirremolque. Es la parte trasera donde se carga la mercancía, no tiene eje delantero, por lo que se apoya sobre el camión. El semirremolque, que es objeto de estudio, se llama semirremolque con tolva.

Figura 4

Imagen de un semirremolque con tolva enchanchado aun camión de la marca Volvo



Nota. imagen tomada en Ceilândia después de realizar el mantenimiento

2.2.6 Soporte del Chasis

Es un componente estructural metálico, objeto de estudio donde se presenta la mayoría de fallas. Esta pieza es el que soporta la mayoría del peso del material cargado, el peso de la

tolva o cazamba, el peso del chasis y el semirremolque en general. Este componente va soldado en la parte inferior del chasis.

Los soportes son los componentes metálicos, que facilitan la funcionalidad de la suspensión de los muelles, mediante la conexión en el balancín. En la Figura 5 se puede apreciar como los muelles son introducidos en balancín de los soportes, y se puede observar también cual es la función principal de estos soportes.

Figura 5

Imagen de un soporte de chasis clásico de la marca Rossetti fabricado



Nota. Tomada en la empresa Roberto Equipamentos, se fabrica el soporte y se suelda

2.2.6.1. Partes de un Soporte del Chasis

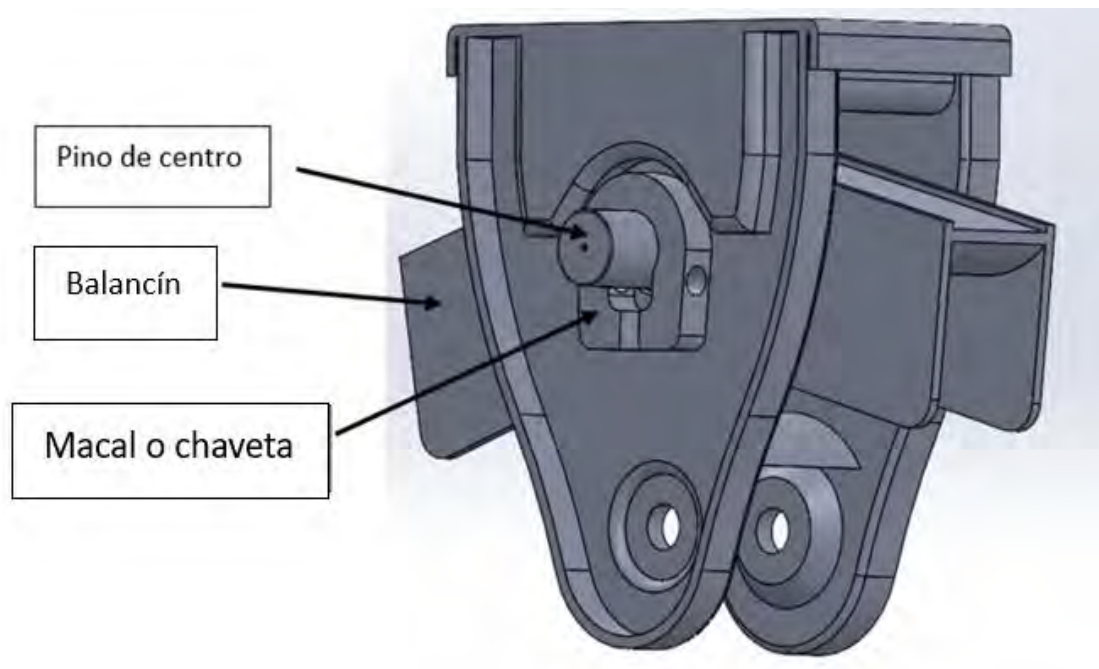
En la Figura 6 se puede observar un diseño de un soporte, este componente presenta varios elementos o piezas, tales como: el pino de centro, macal o chaveta y el balancín.

- Pino de centro: Es la pieza que facilita el movimiento bascular de la balanza. El pino de centro debe tener mayor dureza, porque esta pieza ofrece mayor resistencia a la fricción.

- Macal o chaveta: Es la pieza soldada al soporte, esta pieza evita la rotación del pino de centro.
- Balancín: Es la pieza basculante del soporte que facilita el movimiento del sistema de suspensión mecánica del chasis mediante la operación de los muelles o ballestas (piezas de aceros de alta dureza apiladas una encima de otras, que van dentro del balancín del soporte).

Figura 6

Imagen del Soporte de Chasis Rediseñado de la Empresa Randoncorp con SolidWorks



Nota. Elaboración propia con programa SolidWorks

2.3. Soldadura en las Piezas del Soporte

El tipo de soldadura que se realiza en la restauración de los soportes, la soldadura de las piezas en general destinado a la producción de los soportes, es llamado como soldadura MIG. La soldadura MIG, pertenece al proceso GMAW, este proceso de soldadura por arco eléctrico utiliza un electrodo consumible en forma de alambre, el cual es alimentado de manera continua y automática desde una bobina. La Figura 7 muestra una foto de una máquina de soldadura MIG.

2.3.1 Componentes del Equipo MIG

- Fuente de poder (corriente continua DC, polaridad positiva)
- Alimentador de alambre
- Pistola de soldadura
- Gas protector (mezcla de Ar y CO₂)
- Alambre de soldadura (electrodo consumible)

Figura 7

Maquina soldadura MIG con todos sus componentes



Nota. Imagen de la máquina de soldadura que se utiliza en la empresa Roberto Equipamentos

Según una encuesta a los dueños de las empresas metalúrgicas, que realizan renovación de remolques con tolvas en diferentes lugares de Ceilândia-DF, el alambre que más es utilizado en soldadura MIG es el alambre ER70S-6 (esto se puede observar en la etiqueta de la bobina), estos alambres son especialmente para acero al carbono.

2.3.2 Significado del Alambre de Soldadura MIG de Código ER70S-6

- ER: Electrodo / Relleno
- 70: Resistencia mínima a la tracción (70,000 psi)
- S: Sólido (no tubular)
- 6: Contenido de desoxidantes (mejor limpieza en superficies oxidadas).

2.4. Fractura de Metales Ferrosos (más Comunes en los Aceros)

La fractura es una falla irreversible que ocurre cuando un material metálico pierde su integridad estructural y se rompe parcial o totalmente (en una o varias partes) debido a la acción de esfuerzos o tensiones que exceden su resistencia elástica. Esta ruptura puede manifestarse de manera súbita o progresiva, dependiendo del esfuerzo y de las características del material.

2.4.1 Tipos de Fractura

Existen principalmente dos tipos de fractura en metales:

2.4.1.1. Fractura Dúctil

Una de las principales características de la fractura dúctil es la presencia de una deformación plástica significativa antes de la separación definitiva del material, con superficies de fractura rugosas e irregulares. Es común que los materiales metálicos absorban energía antes de romperse. Respecto a la fractura dúctil, Askeland (2013) menciona lo siguiente:

La fractura dúctil por lo general ocurre de una forma transgranular (a través de los granos) en los metales que tienen buena ductilidad y tenacidad. Con frecuencia se observa una cantidad considerable de deformación-incluyendo rebajo (restricción)-en el componente fallido. La deformación ocurre antes de la fractura final.(pág. 254)

2.4.1.2. Fractura Frágil

Una fractura frágil ocurre sin una previa deformación elástica, con superficies lisas o planas. Suele presentarse en condiciones de baja temperatura o temperatura ambiente, a alta velocidad de carga o en presencia de defectos internos. Askeland (2013) menciona que: “Las

fracturas dúctiles por lo regular son ocasionadas por sobrecargas sencillas, o por la aplicación de un esfuerzo muy alto al material”(págs. 254-255).

2.4.2 Modos de Fractura

Considerando los conceptos de fractura dúctil y frágil, los modos de fractura en los aceros se clasifican principalmente en función del grado de deformación plástica que experimenta el material antes de la falla, así como del mecanismo mediante el cual se inicia y propaga la grieta hasta producir la ruptura. Entonces, Avner (1988) sobre modos de fractura, en su libro menciona lo siguiente:

Las fracturas dúctiles son el resultado de fuerzas cortantes que producen deformación plástica (por deslizamiento o macla) a lo largo de ciertos planos cristalográficos, en tanto que las fracturas frágiles se deben a fuerzas tensiles que producen clivaje. En la mayoría de las fracturas, ambos tipos están presentes en diversos grados. La identificación del mecanismo básico suele determinar el tipo de carga que inició la fractura. De la misma manera, el conocimiento de la aplicación de la carga ayuda a determinar si una falla particular fue de naturaleza dúctil (corte) o frágil (clivaje).(pág. 628)

2.4.3 Fracturas por Fatiga

La fractura por fatiga se origina por cargas repetitivas o cíclicas a lo largo del tiempo. Inicia con una microgrieta que crece lentamente hasta provocar la rotura completa del componente. Representa uno de los tipos de falla más habituales en estructuras metálicas sometidas a esfuerzos variables. Con respecto a fractura por fatiga Avner (1988), dice:

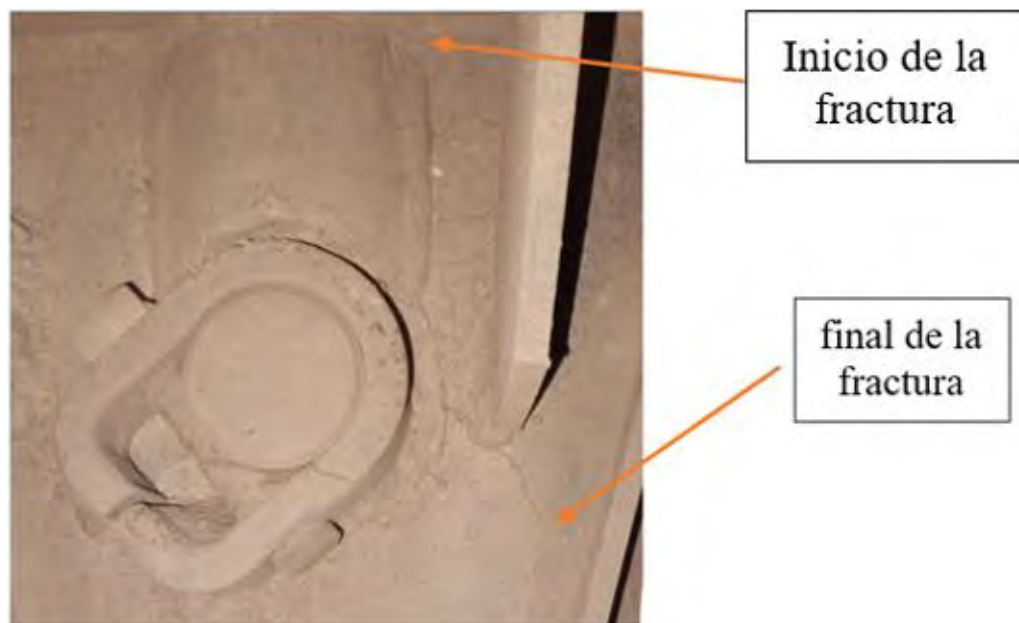
Las fallas por fatiga, son los tipos más comunes de fractura en máquinas y probablemente constituyen el 90% de todas las fracturas. Tales fracturas se desarrollan después de un gran número de aplicaciones de carga, generalmente a un nivel de esfuerzos, inferior a la resistencia de cedencia del material.(pág. 633)

2.4.4 Análisis de Fractografía

El análisis de fractografía es una técnica de investigación utilizada en la ingeniería para estudiar las características de la superficie de fractura de un componente, con el propósito de identificar el mecanismo de falla y determinar las causas que originaron la rotura. Este análisis se basa en el principio de que cada tipo de fractura deja características superficiales específicas que permiten reconstruir la secuencia de propagación de la grieta y establecer las condiciones bajo las cuales ocurrió la falla. En la Figura 8 se puede distinguir el inicio y el final de la fractura.

Figura 8

Ejemplo de una fractura en el soporte



Nota. Imagen tomada de un soporte de la empresa Rossetti

La fractografía constituye una de las herramientas más importantes en el análisis de fallas, ya que permite diferenciar entre mecanismos de fractura como la fractura dúctil, la fractura frágil, la fractura por fatiga, la corrosión bajo tensión, el desgaste y otros procesos que afectan la integridad estructural de los materiales metálicos. Asimismo, posibilita localizar el

punto de inicio de la grieta, determinar la dirección de propagación de la fractura e identificar la zona donde se produjo la rotura final del componente.

En los aceros al carbono, la fractografía permite identificar con precisión el tipo de fractura ocurrido. Una fractura dúctil se caracteriza por la presencia de una superficie rugosa y fibrosa con abundantes hoyuelos originados por la coalescencia de microvacíos, evidenciando una importante deformación plástica antes de la rotura. Por el contrario, una fractura frágil presenta superficies relativamente planas, facetas de clivaje y escasa deformación plástica, indicando una propagación rápida de la grieta. En los casos de fractura por fatiga, es posible observar el origen de la grieta.

2.4.5 Límite de fatiga

El límite de fatiga es el valor máximo del esfuerzo cíclico o alternante que un material puede soportar durante un número muy elevado de ciclos de carga, sin que se produzca la iniciación y propagación de grietas que conduzcan a la fractura por fatiga. En los aceros al carbono y de baja aleación, este parámetro representa un umbral por debajo del cual el material puede resistir un número prácticamente infinito de ciclos de carga sin experimentar falla por fatiga.

Con el fin de especificar una resistencia segura para un material metálico sometidos a cargas repetitivas, es necesario determinar un límite debajo del cual no pueda detectarse evidencia de falla después de aplicar una carga durante un determinado número de ciclos. Este esfuerzo se llama límite de resistencia o de fatiga.

Si se utiliza una máquina de pruebas para este propósito, es posible someter cada una de varias probetas a un esfuerzo determinado, de manera cíclica y hasta la falla. Los resultados se muestran como una gráfica que representa el esfuerzo S (o σ) sobre el eje vertical y el número de ciclos hasta la falla N en el eje horizontal. Esta grafica se llama diagrama S-N o diagrama del ciclo de esfuerzo, y casi siempre los valores de N se

representan en una escala logarítmica porque suelen ser bastante grandes. (HIBBELER, 2017, pág. 112)

2.4.6 Factores que Generan una Fractura en los Metales

La fractura de metales puede estar relacionada con diversos factores, entre ellos:

- Sobrecarga o sobreesfuerzo puntual.
- Diseño estructural inadecuado.
- Defectos de fabricación o soldadura.
- Presencia de concentradores de tensión.
- Corrosión o degradación del material.
- Falta de mantenimiento preventivo.

2.4.7 Importancia en Estructuras Metalúrgicas

En sistemas estructurales como el chasis de un camión o los soportes del chasis del semirremolque con tolva, una fractura representa un riesgo crítico. Estos componentes están sometidos constantemente a cargas variables, impactos, vibraciones y esfuerzos dinámicos, lo que los hace susceptibles a fallas por fatiga, por sobrecarga, etc.

2.4.8 Una Fractura en estas Estructuras Metalúrgicas puede Provocar

- Pérdida de estabilidad estructural.
- Volcaduras o accidentes graves.
- Daños colaterales en otras partes del vehículo.
- Costos elevados de reparación y paro operativo.

Por ello, la identificación de grietas o deformaciones, así como el análisis estructural adecuado, son esenciales para prevenir fallas catastróficas.

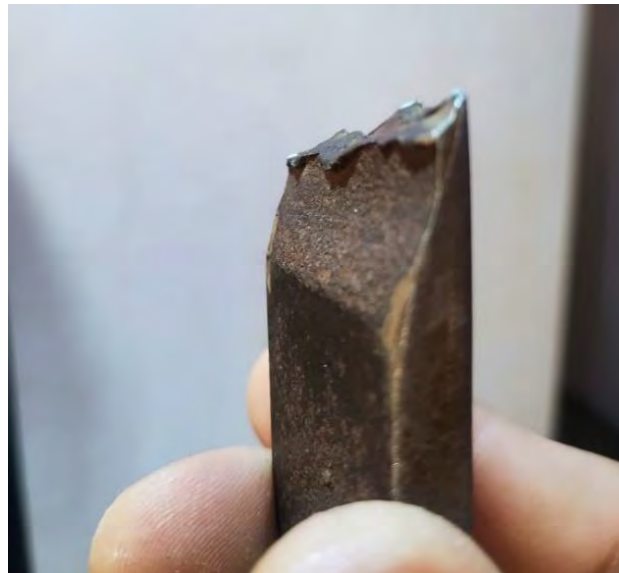
2.5. Deformación

Una deformación es considerada como un cambio de forma, tamaño de un cuerpo, después de retirar las cargas que fueron sometidas al mismo.

Según la imagen (Figura 9) aparentemente se observa un ejemplo de una deformación en la probeta antes de la fractura, lo que indica que a consecuencia de fuerzas externas ejercidas (cargas externas) en el soporte, el metal llegó al punto máximo de esfuerzo elástico antes de llegar a la fractura, en ese caso se podría decir que el metal sufrió una fractura dúctil. Otra teoría es que la probeta sufrió primero una fractura frágil, y por causa de las fuerzas externas, en esta probeta se generan fuerzas de “fricción” en la parte fracturada (el remolque podría haber operado aun después de presentar una fractura en el soporte).

Figura 9

Probeta extraída del soporte fracturado del semirremolque con tolva



Nota. Acero extraído de la empresa Randon 2019

2.6. Materiales Dúctiles

Los materiales dúctiles, en la mayoría de los casos son llamados de materiales flexibles, por consiguientes estos materiales presentan poca dureza, probablemente presentan menor porcentaje de carbono o elementos aleantes. Hibbeler (2017), habla sobre materiales dúctiles lo siguiente:

Cualquier material que pueda someterse a grandes deformaciones antes de fracturarse se denomina material dúctil. El acero dulce, es un ejemplo típico. Los ingenieros suelen

elegir materiales dúctiles para el diseño porque son capaces de absorber los impactos o la energía, y si estos se sobrecargan, por lo general presentan grandes deformaciones antes de fallar.(pág. 91)

2.6.1 Comportamiento Elástico en Materiales Dúctiles

Los aceros de bajo porcentaje de carbono son considerados materiales dúctiles, porque presentan un comportamiento elástico inicial, al momento de ejercer esfuerzos en estos materiales, en su libro Mecánica de Materiales, Hibbeler (2017), describe el diagrama de la Figura 10:

La región inicial de la curva, indicada en gris claro, se refiere a la región elástica. Aquí la curva es una línea recta hasta el punto donde el esfuerzo alcanza el límite proporcional (σ_{pl}). Si el esfuerzo excede ligeramente este valor, la curva se dobla hasta que el esfuerzo alcanza el límite elástico. Para la mayoría de los materiales, estos puntos están muy cercanos y por lo tanto es muy difícil distinguir sus valores exactos. Sin embargo, la razón por la que la región elástica es única, es que después de alcanzar σ_Y , si la carga se retira, la probeta recobrará su forma original, en otras palabras, no ocurrirá ningún daño al material.(pág. 87)

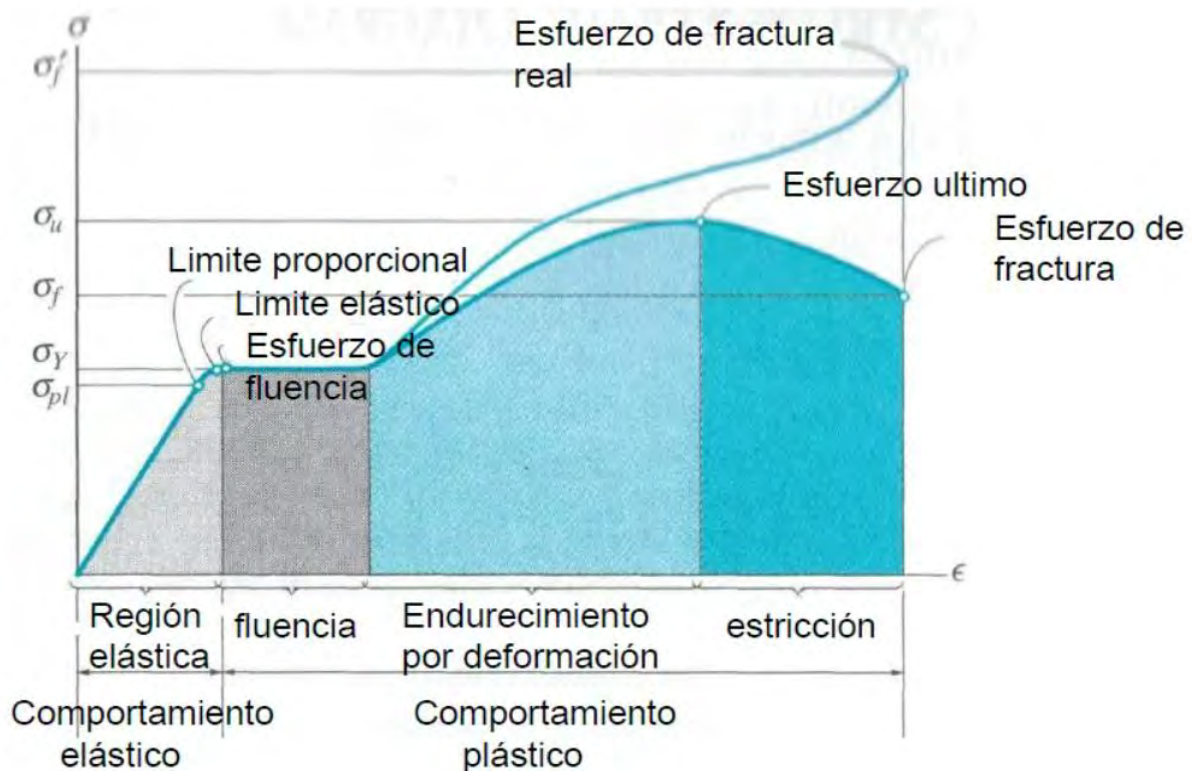
Según este diagrama, los materiales dúctiles presentan dos comportamientos importantes:

- Comportamiento elástico: Quiera decir que las fuerzas o cargas externas, ejercidas en un material, no llegan a generar una deformación en el material, entonces hablamos de una zona elástica, esto indica que después de retirar las cargas externas, el material recupera su forma inicial, sin presentar ningún cambio en su estructura original.
- Comportamiento plástico: Quiere decir que las cargas externas ejercidas en el material, es mayor al esfuerzo ejercido por el metal, pero para que el material llegue

a fracturarse tiene que pasar por las regiones de cedencia que en la figura es llamado de fluencia e incremento de la resistencia por deformación (endurecimiento por deformación). Fluencia quiere decir que el material paso del límite elástico, ya no vuelve a su estado original, pasado el tiempo, el material pasa por un proceso de endurecimiento por deformación, llegando así al esfuerzo máximo de deformación ($\epsilon_{máx}$) que conlleva a la presencia de grietas, aumento de las grietas y una posible fractura.

Figura 10

Imagen de un diagrama de esfuerzo-deformación (σ - ϵ) para materiales dúctiles



Nota. adaptación de “Mecánica de Materiales” de (HIBBELER, 2017, pág. 87), Ed. Pearson.

Para que el material llegue a fracturarse como el claro ejemplo de nuestra probeta, quiere decir que primero la probeta ejerció un comportamiento elástico, después un

comportamiento plástico lo que indica que tal material llegó a sobrepasar al límite elástico (σ_Y), llegando así al esfuerzo máximo de deformación ($\epsilon_{m\acute{a}x}$), llamada el último esfuerzo ejercida por el material que nos lleva a la fractura.

2.7. Materiales Frágiles

Por lo general se les llama como materiales rígidos, en caso de los aceros estos, se presentan con un porcentaje de carbono mayor al 0.5%, y en el caso de las fundiciones con un mayor grado de rigidez, con un porcentaje mayor de 2.11% de carbono. “Los materiales que no presentan cedencia o que exhiben una cedencia muy pequeña antes de la falla se conocen como materiales frágiles. El hierro gris fundido es un ejemplo”(HIBBELER, 2017, pág. 93).

2.7.1 Comportamiento Plástico de Materiales Frágiles

En el libro de Hibbeler (2017), se explica de una forma clara y concisa el comportamiento de los materiales frágiles:

El hierro gris fundido tiene un diagrama de esfuerzo-deformación en tensión como el mostrado en la porción AB de la curva de la Figura 11. Aquí la fractura en $\sigma_f=22$ ksi (152MPa) tuvo lugar debido a una grieta microscópica que luego se propagó rápidamente a través de la probeta, lo que causó una fractura completa. Como la aparición de grietas iniciales en una probeta es más bien aleatoria, los materiales frágiles no tienen un esfuerzo de fractura a la tensión bien definido en cambio, por lo general se reporta el esfuerzo de fractura promedio en un conjunto de ensayos observados. (pág. 93)

2.7.2 Cedencia

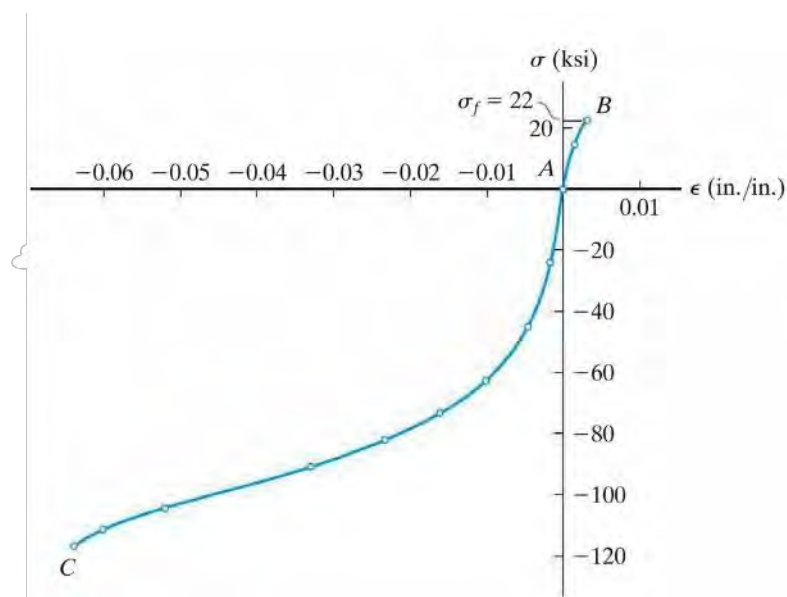
La cedencia corresponde al inicio de la deformación plástica permanente en un material sometido a carga. Al alcanzar el límite de cedencia, pequeñas variaciones en el esfuerzo producen incrementos significativos en la deformación, de modo que el material no recupera totalmente sus dimensiones originales al eliminar la carga.

2.7.3 Elongación

La elongación es el porcentaje del aumento de la longitud antes de llegar a la fractura, es un indicador de los aceros para halla la ductilidad. Para valores menores al 10%, la ductilidad es baja, para valores mayores al 20%, la ductilidad es alta. Valores entre el 10% al 20% se considera una mediana ductilidad.

Figura 11

Imagen de un diagrama de σ - ϵ para el hierro gris fundido



Nota. Adaptado de “*Mecánica de Materiales*” (pag.92), por R.C Hibbeler, 2017, Editorial. Pearson.

A consecuencia del trabajo cíclico que realizan los remolques (carga y descarga del material, en los remolques) se genera endurecimiento en el material metálico del soporte del chasis, lo que explicaría un comportamiento plástico del material.

2.7.4 Estricción

La estricción es una deformación localizada caracterizada por la disminución porcentual progresiva del área transversal de la probeta, conocida como formación de cuello. Este fenómeno se presenta después de alcanzar la resistencia máxima a la tracción. Para valores

mayores del 40%, la ductilidad es mayor, y para valores menores del 20%, la ductilidad es menor, la ductilidad es mediana para valores que oscilan entre el 20% y 40%.

2.8. Causas que Producen Fallas

Cuando se observa una fractura en una pieza metálica, surge la necesidad de averiguar, cuales podrían ser las posibles causas que originaron esa fractura. Hasta este capítulo se estudiaron, los tipos de fracturas. En capítulos siguientes estudiaremos como influencia la estructura atómica en la fractura. El propósito de esta tesis, no es prevenir la fractura, sino más por lo contrario, es aumentar la vida útil de los soportes.

2.8.1 Esfuerzo y Resistencia

Para tener claro el comportamiento de los cuerpos frente a cargas externas se debe tomar en consideración dos conceptos importantes como el esfuerzo y la resistencia. El esfuerzo representa la magnitud de las fuerzas internas desarrolladas en un material cuando este es sometido a una carga externa. Matemáticamente, se define como el cociente entre la fuerza aplicada y el área sobre la que dicha fuerza actúa. Mientras que la resistencia es la propiedad mecánica que posee un material para oponerse a la deformación o a la fractura cuando se encuentra sometido a cargas externas. Esta propiedad se evalúa mediante parámetros como el límite de fluencia, la resistencia máxima a la tracción y la resistencia a la fractura.

2.8.2 Tipos de Cargas Aplicadas en el Chasis del Remolque

El tipo de carga que se ejerce en el chasis del remolque, es la aplicación de la carga por flexión o combado simple, que se demuestra en la Figura 12. Porque la carga intenta flexionar el chasis.

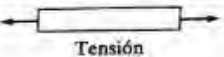
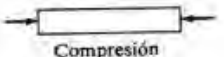
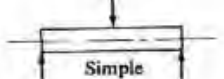
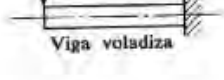
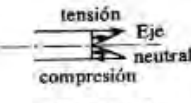
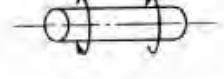
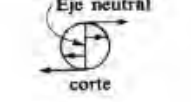
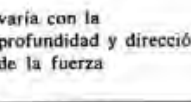
2.8.3 Ensayos de tracción

El ensayo de tracción consiste en aplicar una fuerza de tracción uniaxial sobre una probeta normalizada mediante una máquina universal de ensayos. La carga se incrementa de manera gradual y controlada mientras se registra la deformación experimentada por el material.

Las pruebas de tracción y los ensayos de flexión están estrechamente relacionados porque ambos evalúan la respuesta mecánica de un material frente a esfuerzos, aunque bajo condiciones de carga diferentes. La relación principal radica en que, durante la flexión, una parte del material trabaja a tracción y otra a compresión simultáneamente.

Figura 12

Imagen de una tabla que muestra los tipos de cargas

CARGA	DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS		EJEMPLOS
Axial	 Tensión		barras de ensayos tensiles cables
	 Compresión		Columnas cortas
Combado	 Simple		Vigas
	 Viga voladiza		Raíz de dientes de engrane
Torsional			ejes (flechas) resortes espirales
Corte directo			remaches tornillos
Contacto			cojinetes de rodillos dientes de engrane

Nota. Adaptado de “introducción a la metalurgia física” de (Avner, 1988, pág. 631),

Editorial. McGRAW-HILL

Las pruebas de tracción y los ensayos de flexión están directamente relacionados debido a que la flexión genera simultáneamente esfuerzos de tracción y compresión dentro del material. Las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tracción, como resistencia, ductilidad y módulo de elasticidad, permiten predecir el comportamiento del material frente a cargas de flexión y comprender los mecanismos de deformación y fractura. Esta relación es

fundamental para el diseño estructural y la evaluación de la seguridad mecánica de materiales y componentes industriales.

El esfuerzo normal aplicado se determina mediante:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Ec.1})$$

donde:

- σ = esfuerzo normal o tensión (MPa),
- F = fuerza aplicada (N),
- A_0 = área inicial (mm²).

La elongación o deformación unitaria longitudinal se calcula como:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (\text{Ec.2})$$

donde:

- ε = elongación
- L_0 = longitud inicial,
- L_f = longitud final instantánea.

La estricción se determina mediante el porcentaje de reducción de área:

$$Z = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \quad (\text{Ec.3})$$

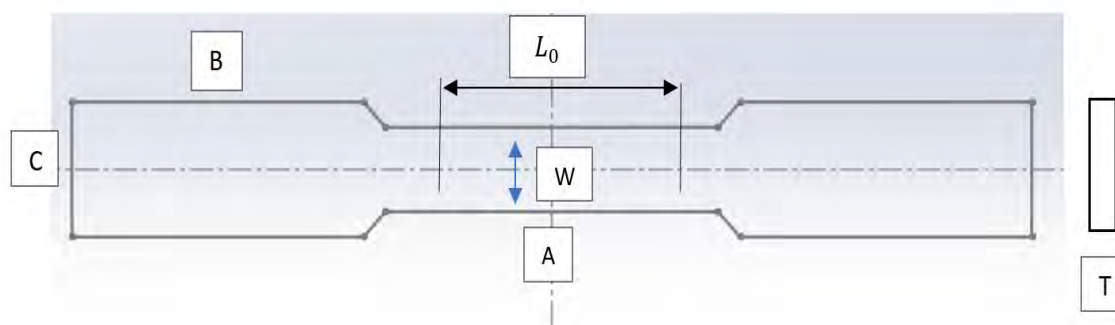
donde:

- Z = Porcentaje de estricción (%),
- A_0 = Área inicial.
- A_f = Área final mínima en la zona fracturada.

Se realizaron pruebas de ensayos de fractura por tracción en las 5 probetas de estudio, según la norma ASTM E8, observado en la Figura 13 (esta norma establece los procedimientos estandarizados para la realización de ensayos de tracción en aceros), para saber el comportamiento de la curva esfuerzo–deformación de cada una de las probetas, con el fin de identificar el comportamiento mecánico del material durante las diferentes etapas del ensayo.

Figura 13

Ensayo de Fractura Según la Norma ASTM E8



Nota. Elaboración Propia

Donde:

- W = Es el largo de la zona de fractura de 6mm
- T = El ancho de zona de fractura varia con respecto a la probeta
- A = Zona de reducción de largura total de 64mm
- B = Zona de trabajo de las morsas o pinzas que sujetan la probeta, medida de 30mm
- C = Ancho de la probeta de 10mm
- L_0 =longitud inicial, dato importante para hallar la deformación, el valor de ese dato es de 50mm, en el caso de las pruebas para las 5 probetas

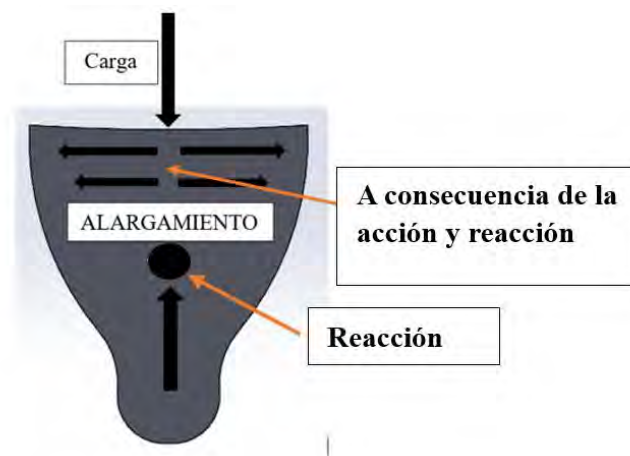
2.8.4 Tipo de esfuerzos Ejercida en el Soporte

Haciendo un esquema de fuerzas, se puede predecir el tipo de fuerza que se ejerce en el soporte. Por efecto de la carga por flexión o combado simple ejercida en el chasis del

semirremolque, existe una ligera deformación en la zona superior del soporte, tal como se aprecia en la Figura 14, por consiguiente, se puede observar un ligero alargamiento en los laterales del soporte, lo que indicaría que el tipo de fuerza ejercida en el soporte es la “fuerza de tracción”.

Figura 14

Efecto de la carga en un soporte



Nota. Elaboración propia

Las “fuerzas de tracción” en el soporte tienden a estirar o alargar el soporte (a consecuencia de la compresión de la carga, ocasionando que el soporte se pandee), en todo el largo de su eje transversal. En términos simples, una fuerza de tracción jala un objeto en direcciones opuestas, provocando que se alargue.

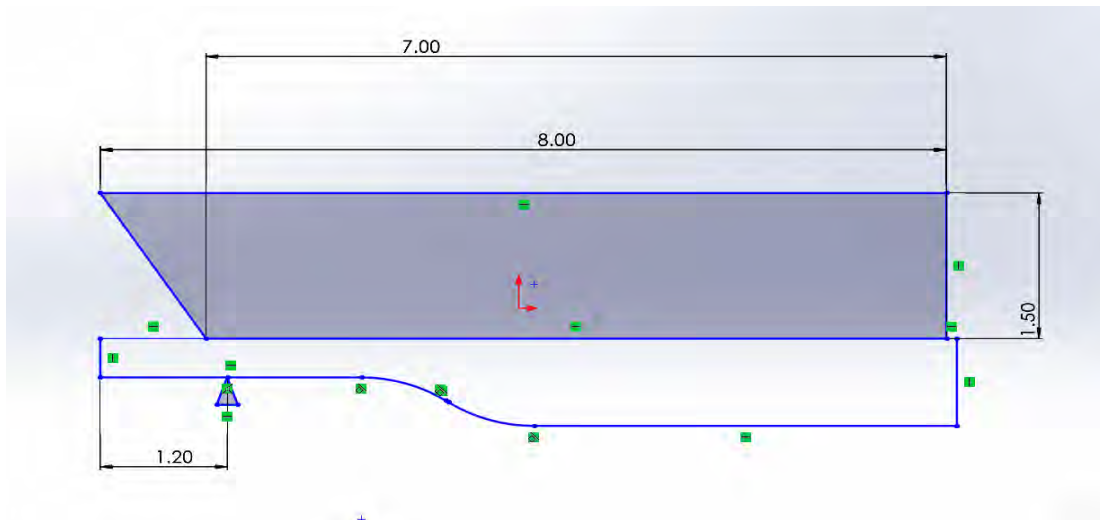
Esta teoría surge a consecuencia del patrón de fractura, del tipo vertical, mediante la observación de las fracturas de los soportes de chasis durante 5 años.

2.9. Cálculo de la Carga Aplicada en el Soporte

Para comprender mejor las fuerzas que interactúan en el soporte fracturado, es necesario elaborar un diagrama de cuerpo libre, para ello se tiene un diseño que ayuda a comprender las fuerzas de deformación. Por consiguiente, se realiza un corte longitudinal de todo el semirremolque mostrado en la Figura 15.

Figura 15

Dimensiones reales de una remolque con tolva (corte longitudinal de todo el remolque)

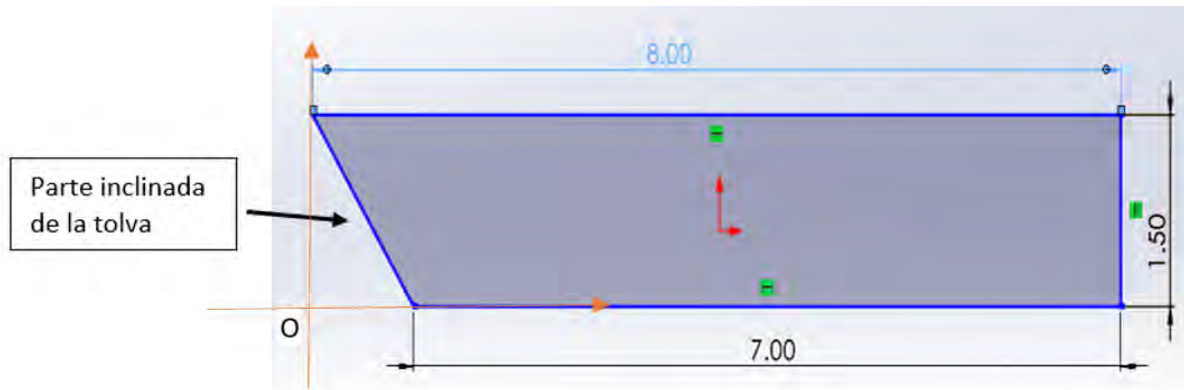


Nota. Elaboración propia

Se tiene como referencia, la carga que soporta estos remolques oscila de entre 35 a 50 toneladas, para realizar los cálculos se toma como dato principal 50 toneladas, que es la máxima capacidad de estos remolques con tolvas.

Un cuerpo puede estar sometido a fuerzas de superficie por cargas o fuerzas de cuerpo. Las fuerzas de superficie que actúan sobre un área pequeña de contacto se reportan como fuerzas concentradas, mientras que las cargas distribuidas actúan sobre un área mayor de la superficie de cuerpo. Cuando la carga es coplanar, entonces la fuerza resultante de una carga distribuida es igual al área bajo la curva de la carga distribuida, y dicha resultante actúa a través del centro geométrico o centroide de esta área. (HIBBELER, 2017, pág. 4)

Con esta teoría, para hallar la fuerza total ejercida por los 50 toneladas de carga, se tiene que hallar centroide de la tolva, el centroide es la distancia exacta donde va la fuerza resultante y esta a su vez está relacionado con el área de toda la tolva. Para ello nos basamos de la siguiente gráfica.

Figura 16*Dimensiones reales de una tolva**Nota.* Elaboración propia

Con los datos de la Figura 16, se obtienen las siguientes tablas, el propósito de estas tablas es obtener el grafico que muestra en la Figura 17

Tabla 1*Parte Inclinada de la Tolva*

valores en	valores en
x	y
(m)	(m)
0	1.5
1	0

Nota. Elaboración propia**Tabla 2***Largo de la Tolva*

valores en	valores en
x	y
(m)	(m)
0	1.5
8	1.5

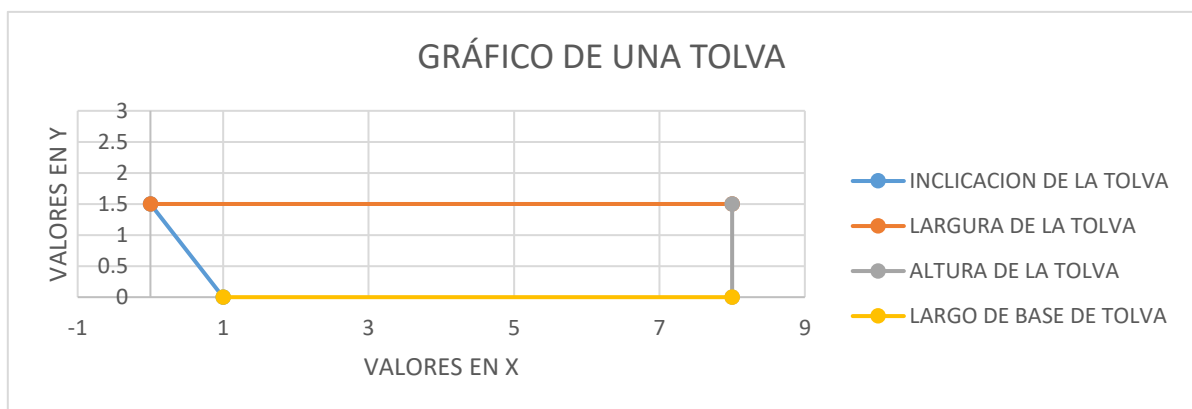
Nota. Elaboración propia

Tabla 3*Altura de la Tolva*

valores en x (m)	valores en y (m)
8	0
8	1.5

Nota. Elaboración propia**Tabla 4***Largura de la Dase de la Tolva*

valores en x (m)	valores en y (m)
1	0
8	0

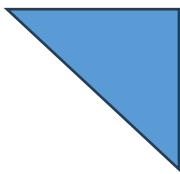
Nota. Elaboración propia**Figura 17***Grafico de la Tolva con los datos Obtenidos Realizados en Excel**Nota.* Elaboración propia con programa excel

En el grafico de la tolva (figura 17) se observa el área de la tolva, pero para hallar el centroide de esa forma es casi imposible, ya que es un trapecio invertido, por otra parte, se podría decir que dicha área se puede dividir en dos áreas, estas áreas serían un área rectangular y otro triangular invertido. Para ello se realizan los siguientes cálculos:

2.9.1 Cálculo de Centro de Gravedad o Centroide de la Tolva

En tema de centroides de áreas rectangulares, el centroide está ubicado en la mitad de su altura y la mitad de su largo, ya en el caso de los triángulos es a $1/3$ de la altura y $1/3$ de su base, esto según en la teoría de la estática. Pero como el triángulo en este caso está invertida, el centroide en “x” será a $2/3$ de “x”, mientras que el centroide en “y” será a $2/3$ de “y”. Entonces con los datos en el grafico de la tolva, se podrá hallar el centroide de la siguiente manera:

2.9.1.1. Centroide de la Área Triangular



Del grafico se observa que la base es 1m y la altura es 1.5m, pero como el triángulo es echado e invertida, el centroide será:

- Centroide en x

$$\frac{2}{3} \text{base} = \frac{2}{3} 1 = 0.667$$

- Centroide en y

$$\frac{2}{3} \text{altura} = \frac{2}{3} 1.5 = 1$$

- Área del triangulo

$$\frac{b \times h}{2} = \frac{1 \times 1.5}{2} = 0.75$$

2.9.1.2. Centroide de la Área Rectangular



Del grafico se observa que el largo del triángulo es 7m y la altura es de 1.5m, pero la gráfica de este rectángulo comienza en 1, entonces:

- Centroide en x

$$1 + \frac{\text{base}}{2} = 1 + \frac{7}{2} = 4.5$$

- Centroide en y

$$\frac{\text{altura}}{2} = \frac{1.5}{2} = 0.75$$

- Área del Rectángulo

$$\text{Base x altura} = 7 \times 1.5 = 10.5$$

Con los datos obtenidos realizamos la siguiente tabla:

Tabla 5

Datos Obtenidos por los Centroides de Cada Grafico

figura	Área (m^2)	Centroide en X (m)	Centroide en Y (m)	Producto del centroide en X, por el área ($m \times m^2$)	Producto del centroide en Y, por el área ($m \times m^2$)
	0.75	0.667	1	0.5	0.75
	10.5	4.5	0.75	47.45	7.875
TOTAL	11.25			47.95	8.625

Nota. Elaboración propia

De la tabla anterior (tabla 5), se podrá calcular el centroide de toda la tolva, basándose de la siguiente formula:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \quad (\text{Ec.4})$$

$$\frac{0.5 + 47.45}{0.75 + 10.5} = \frac{47.95}{11.25} = 4.26 \text{ m}$$

$$X = 4.26 \text{ m}$$

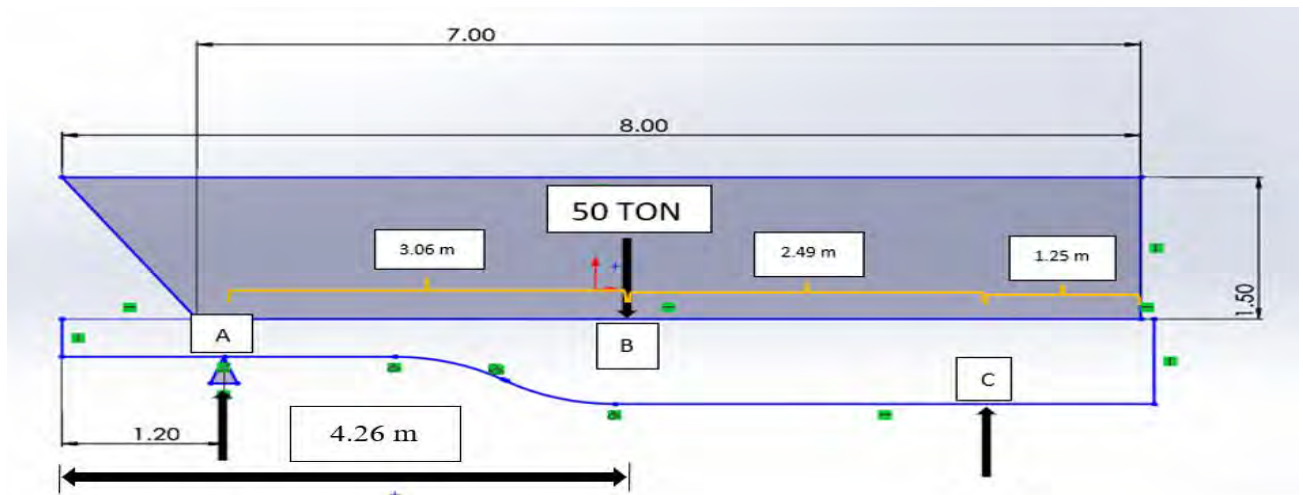
$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \quad (\text{Ec.5})$$

$$\frac{0.75 + 7.865}{0.75 + 10.5} = \frac{8.625}{11.25} = 0.77 \text{ m}$$

El motivo de hallar el centroide, es calcular la fuerza externa total a la que fue sometida este soporte, teniendo como base de una carga de 50 toneladas (capacidad máxima de carga del remolque con tolva).

Figura 18

Diagrama de Fuerzas Aplicadas en la Tolva



Nota. Elaboración propia

Del grafico la Figura 18 muestra el diagrama de cuerpo libre, con este diagrama se realizan las siguientes operaciones:

- Convertimos la masa 50 toneladas en newton:

$$N = m \times g \quad (\text{Ec.6})$$

$$N = 50000 \text{ kg} \times (9.807 \text{ m/s}^2)$$

$$N = 490350 \text{ N}$$

- Se requiere calcular la carga en el punto c, ya que es el lugar donde se encuentran estos soportes: Para ello se realiza una suma de momentos tomando como referencia el punto A.
- Se realiza las ecuaciones de equilibrio, para un balance de momentos:

$$\sum M_A = 0 \quad (\text{Ec.7})$$

$$F_A \times 0 - F_B \times 3.06 \text{ m} + F_C \times (3.06 \text{ m} + 2.49 \text{ m}) = 0$$

$$0 \times 0 - 490350 \text{ N} \times 3.06 \text{ m} + F_C \times 5.55 \text{ m} = 0$$

$$F_C = \frac{490350 \text{ N} \times 3.06 \text{ m}}{5.55 \text{ m}}$$

$$F_C = 270355 \text{ N}$$

- Para hallar la fuerza en el punto A:

$$\sum F_0 = 0 \quad (\text{Ec.8})$$

$$F_A - F_B + F_C = 0$$

$$F_A - 490350 \text{ N} + 270355 \text{ N} = 0$$

$$F_A = 490350 - 270355 \text{ N}$$

$$F_A = 219995 \text{ N}$$

Con estos datos se puede decir que la mayor carga ejercida por la fuerza de 50 toneladas en toda la tolva, se concentra en el punto C, con 270355 Newton. Y el punto C a su vez es el lugar donde van soldadas los soportes. En el punto c con respecto a la empresa Randon se tendrán 6 apoyos para las cargas (2 ejes), contabilizando exactamente 6 soportes. Entonces para hallar la carga ejercida en el soporte se divide:

$$\text{Carga aplicada en el soporte} = \frac{F_C}{6} \quad (\text{Ec.9})$$

$$\text{Carga aplicada en el soporte} = \frac{270355 \text{ N}}{6}$$

$$\text{Carga aplicada en el soporte} = 45059.2 \text{ N} = 4.59 \text{ Tn}$$

2.9.2 Sobrecargas o Exceso de Carga

El gran problemas de los conductores es aumentar las dimensiones de las tolvas (mostrado en la Figura 19), colocando maderas encima de las tolvas, esto con el propósito de transportar más cargas, las dimensiones especificadas por los fabricantes indica la carga máxima que soportan estas tolvas, aumentar las dimensiones nos lleva al exceso de carga que

soportan los remolques, esto conlleva a tener fallas frecuentes en un remolque y las fallas más frecuentes que se observan en los soportes de estos remolque.

Figura 19

Imagen de un Semirremolque que Modificaron la Altura Colocando Tablas



Nota. Esta imagen fue sacada en la empresa Roberto Equipamentos

Aumentar las dimensiones de las tolvas en un remolque que transporta materiales de construcción puede parecer una forma directa de llevar más carga, pero trae varias consecuencias importantes que conviene evaluar con cuidado:

- podrías transportar más material por viaje. Sin embargo, eso implica más peso total, lo que puede exceder los límites de transportes legales o la capacidad estructural del remolque y del camión.
- Tolvas más grandes (sobre todo si crecen en altura) elevan el centro de gravedad. Esto aumenta el riesgo de vuelcos, especialmente en curvas, pendientes o frenadas bruscas.

- El chasis, los ejes, la suspensión y los soportes recibirán más carga. Estos pueden aparecer deformaciones, fatiga del material o fallas mecánicas.
- Existen límites legales de peso, dimensiones y distribución de carga. Superarlos puede generar multas, inmovilización del vehículo o problemas de seguridad.

En la figura 16 se observa un diseño representativo de una tolva con dimensiones de:

- Largo mayor= 8m
- Largo menor= 7m
- Ancho=2.2m
- Altura= 1.5 m

El peso bruto que soporta este tipo de tolvas es de 50 toneladas aproximadamente; pero no todas las tolvas tienen las mismas dimensiones, pueden variar dependiendo al año, modelo y marca de los fabricantes, pero las diferencias son pocas. Si se aumentara 20 cm la altura de esa tolva, hallaremos el exceso de carga que podría soportar estas tolvas.

Volumen del exceso de carga= aumento x largo mayor de la tolva x ancho

Volumen del exceso de carga= 0.2m x 8m x 2.2m

Volumen del exceso de carga= $3.52m^3$

- Exceso de carga en la tolva cuando transporta tierra. Densidad de la tierra es de $\approx 1.8 T/m^3$, todo depende del estado de la tierra en que se encuentra.

$Exceso\ de\ carga_{tierra} = volumen\ del\ exceso\ de\ carga \times densidad\ de\ la\ tierra$ (Ec.10)

$Exceso\ de\ carga_{tierra} = 3.52m^3 \times 1.8 T/m^3$

$Exceso\ de\ carga_{tierra} = 6.336 T$

- Exceso de carga en la tolva cuando transporta arena. Densidad de la arena para cálculos rápidos, suele tomarse un valor promedio de $\approx 1.6 T/m^3$

$Exceso\ de\ carga_{arena} = volumen\ del\ exceso\ de\ carga \times densidad\ de\ la\ arena$ (Ec.11)

$Exceso\ de\ carga_{arena} = 3.52m^3 \times 1.6 T/m^3$

*Exceso de carga*_{arena} = 5.632 T

El exceso de carga no solo afecta la funcionalidad, sino que acorta drásticamente la vida útil de los soportes y pone en riesgo la seguridad. Por eso es clave respetar la capacidad del diseño.

2.10. Subdivisiones de la Estructura de Materiales Metálicos

Una probeta obtenida del soporte fracturado, se subdivide en:

- Estructura microscópica: Esta microestructura está compuesta por un conjunto de redes o granos.
- Granos: Esta subdivida a su vez por un conjunto de redes cristalinas, estas estas redes cristalinas mantienen las mismas características de todo el grano.
- Red cristalina: Es el conjunto completo de puntos que representan la repetición infinita de una celda unitaria en toda la red.
- Celda unitaria: Es la unidad que contiene los átomos a su disposición, llamada también estructura cristalina.
- Átomo: Corresponde a la mínima porción de materia capaz de conservar la identidad química de un elemento.

2.11. Arreglos Atómicos e Iónicos

Los arreglos atómicos indica las organizaciones o posicionamiento de átomos en la celda unitaria. Las celdas unitarias son llamadas también estructuras cristalinas y son las siguientes:

- CS. Los átomos forman un cubo
- CCC. Los átomos forman un cubo, y se ubican en las esquinas y en el centro del cubo
- FCC. Los átomos forman un cubo, y se encuentran en las esquinas y en el centro de las caras
- Tetragonal, etc.

Aquellos elementos, que tienen la capacidad de formar diversas estructuras cristalinas son llamados de “alótropos”. Tal es el caso del hierro, a temperatura ambiente el Fe presenta una estructura cristalina de CCC (Fe- α), pero si el hierro es calentado (aumento de temperatura), este sufre un cambio en su estructura cristalina a FCC (Fe- γ). En la Tabla 6 se muestran algunas características de las estructuras cristalinas cúbicas.

Tabla 6

Algunas Características de las Estructuras Cristalinas Cúbicas

Tipo de estructura	Posiciones atómicas	Nº de átomos por celda unitaria	Ejemplo
CS	Esquinas	1	Polonio
CCC	Esquinas + 1 en el centro	2	Hierro (Fe- α)
FCC	Esquinas + 1 en cada cara	4	Cobre, Fe- γ aluminio

Nota. Elaboración propia

2.12. Imperfecciones de los Arreglos Atómicos e Iones

Se llama arreglo atómico a la formación de átomos dentro de una red cristalina. Pero el ordenamiento de estos átomos en la red cristalina no siempre es perfecto o exacto, ya que existieran uno o más átomos que obstaculizan dicho ordenamiento, formándose diferentes defectos en una red cristalina. Tal efecto es llamado como imperfecciones o defectos puntuales.

2.12.1 Defectos Puntuales

2.12.1.1. Vacancia

Una vacancia es un defecto puntual de la estructura cristalina que se produce cuando un átomo está ausente de una posición que normalmente debería ocupar dentro de la red cristalina. Este tipo de imperfección altera el ordenamiento regular de los átomos y puede

influir en propiedades como la difusión, la conductividad y el comportamiento mecánico del material.

Se produce una vacancia cuando un átomo o un ion está ausente de su sitio normal en la estructura cristalina. Cuando los átomos o iones están ausentes, aumenta la aleatoriedad o entropía general del material, lo cual incrementa la estabilidad termodinámica de un material cristalino. Todos los materiales cristalinos tienen defectos de vacancia. Estas se introducen en los metales y aleaciones durante la solidificación, a altas temperaturas o como consecuencia del daño de la radiación. Las vacancias desempeñan una función importante en la determinación de la velocidad a la cual los átomos o iones se mueven alrededor de o se difunden en un material sólido, especialmente en los metales puros. (Donald R. Askeland, 2013, pág. 115)

2.12.1.2. Intersticios

Se les llama átomos intersticios a aquellos que ocasionan imperfecciones en la red cristalina y esto se producen cuando un átomo ocupa un espacio intersticial, es decir, una posición situada entre los sitios normales de la red cristalina. La presencia de estos átomos genera distorsiones locales en la estructura y modifica las propiedades del material. Por lo general los átomos intersticios son más pequeños que los átomos originales de la red cristalina.

Los átomos de carbono se adicionan de manera intencional al hierro con el fin de producir acero. Para concentraciones pequeñas, los átomos de carbono ocupan sitios intersticiales en la estructura cristalina del hierro, introduciendo un esfuerzo en la región localizada del cristal en su alrededor. Como se puede observar, la introducción de átomos intersticiales es una manera importante de incrementar la resistencia de materiales metálicos. (Donald R. Askeland, 2013, pág. 117)

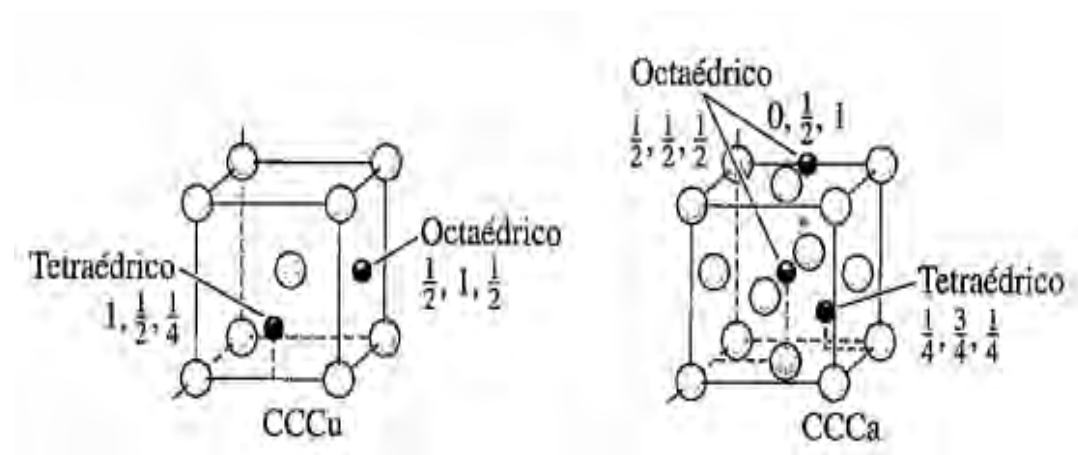
2.12.1.3. Sitios Intersticiales para el Carbono en el Hierro

Se sabe que el hierro a diferentes temperaturas presenta dos tipos estructuras cristalinas, a temperatura baja es de CCC (Fe- α), a temperaturas mayores de 727°C, la red cristalina es de FCC (Fe- γ), los sitios intersticiales para el carbono y el hierro son:

- Sitios octaédricos: Se dice que un sitio intersticial es octaédrico, porque alrededor de 1 átomo de carbono se encuentran 6 átomos de hierro, estos átomos de hierro se encuentran formando entre ellos un octaedro. Por lo tanto, los átomos de carbono y hierro presentan un número de coordinación de 6. En la Figura 20 se puede observar que un átomo intersticial octaédrico de carbono se encuentra en el centro de las caras de una estructura cristalina FCC, y en el caso de una CCC, el átomo intersticial octaédrico de carbono se encuentra en las aristas y en el centro de dicha estructura cristalina.

Figura 20

Sitios Intersticiales de los Átomos de Carbono en la Estructura Cristalina del Hierro



Nota. (Donald R. Askeland, Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2013, pág. 84), sexta edición Editorial. CENGAGE Learning

- Sitios tetraédricos: Se dice que un sitio intersticial es tetraédrico, porque alrededor de 1 átomo de carbono se encuentran 4 átomos de hierro, estos átomos de hierro se

encuentran formando un tetraedro, Por lo tanto, los átomos de carbono y hierro presentan un número de coordinación de 4. En la Figura 20 se muestra algunos lugares donde se podría encontrar un átomo de carbono intersticial con sus respectivas direcciones.

2.12.1.4. Sustitucionales

Los defectos sustitucionales constituyen alteraciones puntuales de la red cristalina que se producen cuando un átomo propio del material es reemplazado por un átomo diferente. Esta sustitución genera cambios locales en el arreglo atómico, los cuales pueden afectar diversas propiedades del material, tales como su resistencia mecánica, dureza y comportamiento físico.

Los defectos sustitucionales se presentan comúnmente en aleaciones metálicas, donde los átomos del elemento aleante ocupan las posiciones normalmente correspondientes a los átomos del metal base. Para que esto ocurra, los átomos sustituyentes deben poseer tamaños atómicos y características químicas relativamente compatibles con los del material anfitrión.

2.12.1.5. Otros Defectos Puntuales

Otros defectos que se presentan en los arreglo atómicos son:

- Defectos de Frenkel
- Defecto de Schottky

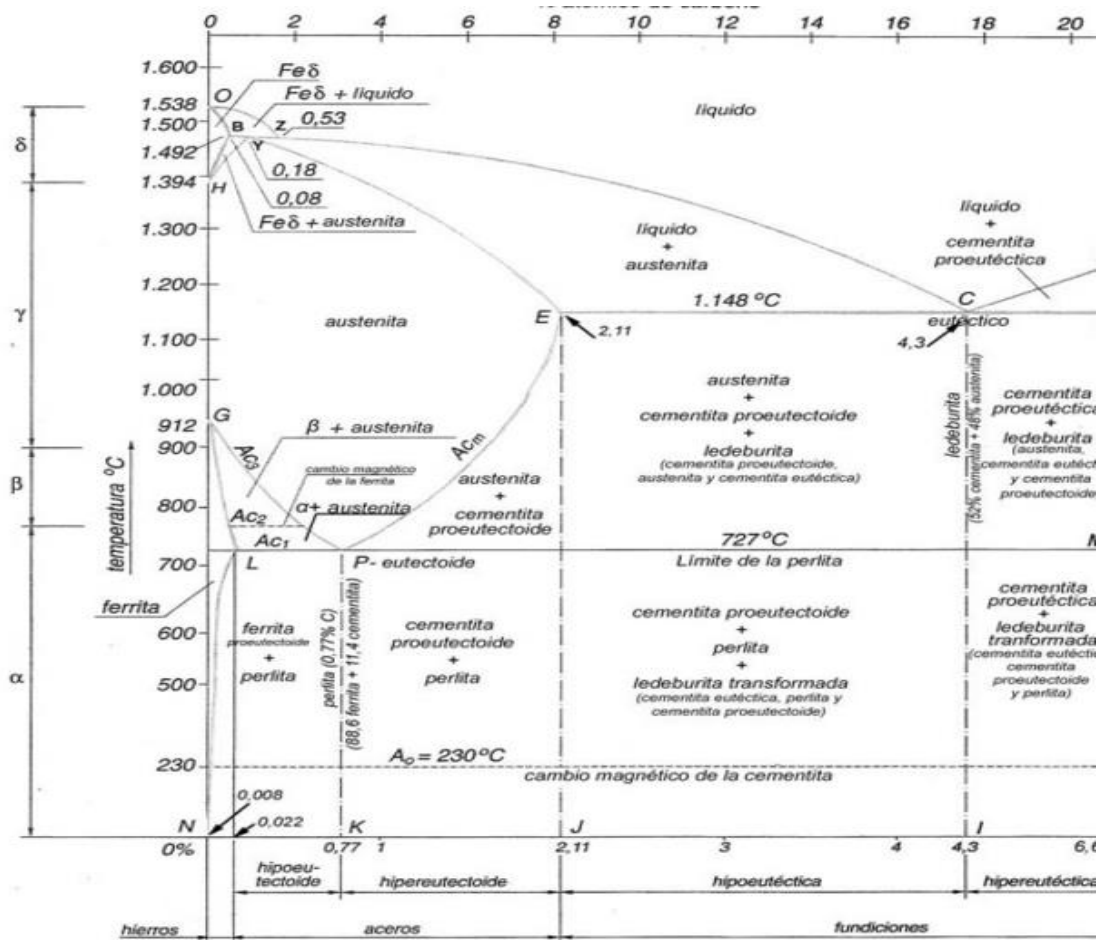
2.13. Diagrama de Fe-c con los Fases Presentes

Para entender mejor el comportamiento de los aceros y fundiciones, con respecto a dureza, resistencia de materiales, maleabilidad, etc. Se analiza mejor las estructuras cristalinas y las fases presentes en el diagrama (los materiales ferrosos son los más usados en la industrias metalúrgicas y siderúrgicas), descrita e realizada por el metalúrgico alemán Adolf Ledebur.

Para entender mejor comportamiento de los materiales ferrosos (aceros), a diferentes composiciones y temperaturas, se estudia el diagrama mostrado en la Figura 21 (diagrama de fases Fe-c), para ello se menciona las fases y las reacciones presentes en dicho diagrama.

Figura 21

Imagen de Diagrama de Fases Fe-C



Nota. Adaptado del Sitio Oficial de UD Trucks (fotografía),2025,

(<https://diagramaweb.com/fe-c/>)

Este diagrama (Fe-c), se analiza con el fin de comprender la relación entre la composición química, la temperatura y la estructura interna (microestructura) de las aleaciones, que son la base de la mayoría de los aceros utilizados en la industrias metalúrgicas.

2.13.1 Estructuras Cristalinas y Fases Presentes en el Diagrama Fe-C

2.13.1.1. Hierro al 100%

El hierro al 100% en composición según el diagrama mostrado anteriormente tiene un comportamiento alótropo, eso quiere decir que a medida que el hierro sufre variación de temperatura, el hierro forma diferentes fases que presentan diferentes estructuras cristalinas.

- El hierro hasta 912 °C la fase presente en el hierro puro es la ferrita
- El hierro desde 912°C hasta 1394°C la fase presente en el hierro puro es la austenita.
- Y de 1394 °C hasta 1538°C la fase presente en el hierro puro es el hierro delta ($\text{Fe } \delta$).

2.13.1.2. Fase Ferrita o $\text{Fe-}\alpha$

Hasta 912 °C de temperatura al 100 % de hierro se forma la ferrita, esta ferrita se puede hallar de hasta el 0,022% en porcentaje en peso de carbono, la ferrita es de las fases más blandas a temperatura ambiente, pero tiene mayor dureza en comparación a la austenita.

La estructura cristalina del $\text{Fe } (\alpha)$ es de CCC y el factor de empaquetamiento es de 68% (por eso es que se tiene una solubilidad muy baja de carbono), y contiene 2 átomos por celda unitaria de $\text{Fe } (\alpha)$.

2.13.1.3. Fase Austenita o $\text{Fe-}\gamma$

La austenita se encuentre en un rango de porcentaje en peso de carbono del 0% hasta el 2.11 %, y un rango de temperatura de oscila de entre 727 °C hasta 1492°C, La austenita es favorable para procesos de conformado debido a su comportamiento blando y que es altamente deformable.

La estructura cristalina de la austenita es de FCC, y el factor de empaquetamiento es del 74% con capacidad de disolución de carbono que puede llegar hasta el 2.11% de carbono, debido a que los sitios intersticiales son un poco más grandes y contiene 4 átomos por celda unitaria de $\text{Fe}(\gamma)$.

2.13.1.4. Carburo de Hierro (Fe_3C)

Llamado también como cementita, está presente en un porcentaje en peso de composición en carbono de 6.67%, esta fase es la más dura de todas las fases.

2.13.1.5. Fase Perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)

Está constituida por la fase ferrita más el carburo de hierro.

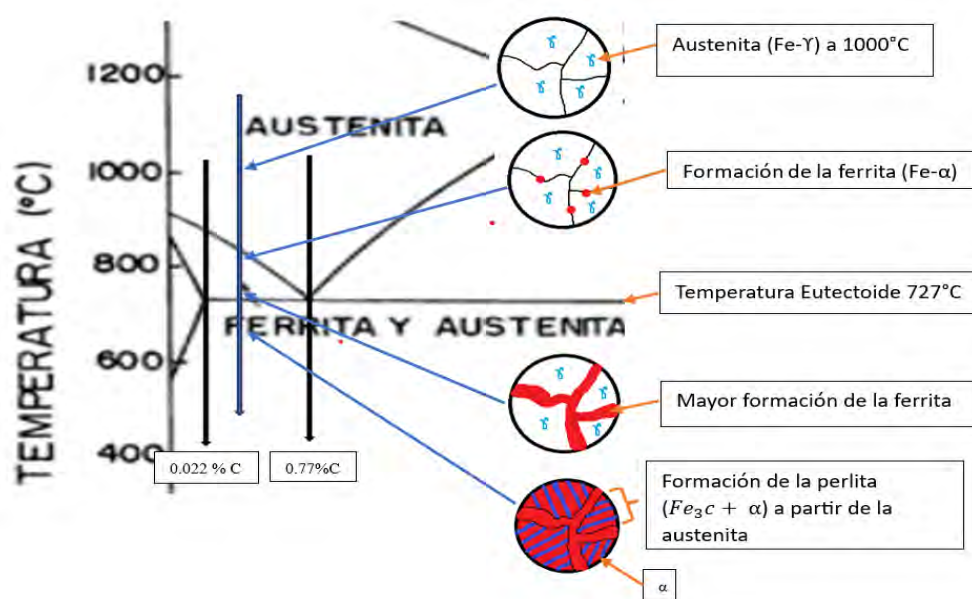
2.13.2 Desarrollo y Evolución de la Microestructura, en un Enfriamiento Lento para Diferentes Aceros Hipo-Eutectoides

Para el análisis correspondiente de un enfriamiento muy lento de lo acero hipo-eutectoides (a condiciones de equilibrio). Se realiza las siguientes descripciones:

Los aceros hipo-eutectoides se encuentran en la región que va de 0.022% hasta 0.77% de carbono (porcentaje en peso de carbono). A diferentes temperaturas, la microestructura del acero hipo-eutectoide muda, tal como se aprecia en la Figura 22.

Figura 22

Gráfico del Desarrollo y Evolución de la Microestructura, en un Enfriamiento Lento para Diferentes Aceros Hipo-Eutectoides



Nota. Elaboración propia

A una temperatura de 1000°C, en los aceros hipo-eutectoides se observa una microestructura llamada Austenita (Fe-γ). Conforme disminuye la temperatura se entra a la región de la formación ferrítica (denominada ferrita Pro-eutectoide, porque este fue formado antes de la temperatura eutectoide), estas ferritas se forman en los límites de grano. A medida que se genera un enfriamiento lento, llegamos a la temperatura Ligeramente por encima de la

temperatura eutectoide (727°C), en esa región se tendrá mayores formaciones de la ferrita. Ya por debajo de la temperatura eutectoide, se obtendrá una microestructura ya establecida denominada perlita ($\text{Fe}_3\text{C} + \alpha$), esta perlita fue formada a partir de la austenita. A consecuencia de la ferrita que se formó antes de la temperatura eutectoide ($T > 727^{\circ}\text{C}$), para un acero hipo-eutectoide se tendrá dos microconstituyentes a condiciones normales:

- Ferrita Pro-eutectoide: esta ferrita fue formada antes de llegar a la temperatura eutectoide.
- Perlita ($\text{Fe}_3\text{C} + \alpha$): La perlita está formada por láminas de cementita y ferrita; pero esta ferrita es muy diferente a la ferrita Pro-eutectoide, porque se formó después (por debajo de la temperatura eutectoide).

2.13.3 Desarrollo y Evolución de la Microestructura, en un Enfriamiento Lento para Diferentes Aceros Hiper-Eutectoides

Para el análisis correspondiente de un enfriamiento lento de los aceros hiper-eutectoides (a condiciones de equilibrio). Se realizan las siguientes descripciones:

Los aceros hiper-eutectoide es la región que se encuentra con un contenido porcentual en peso de carbono que va de 0.77% hasta 2.11%. A diferentes temperaturas, la microestructura del acero muda como se puede observar en la Figura 23.

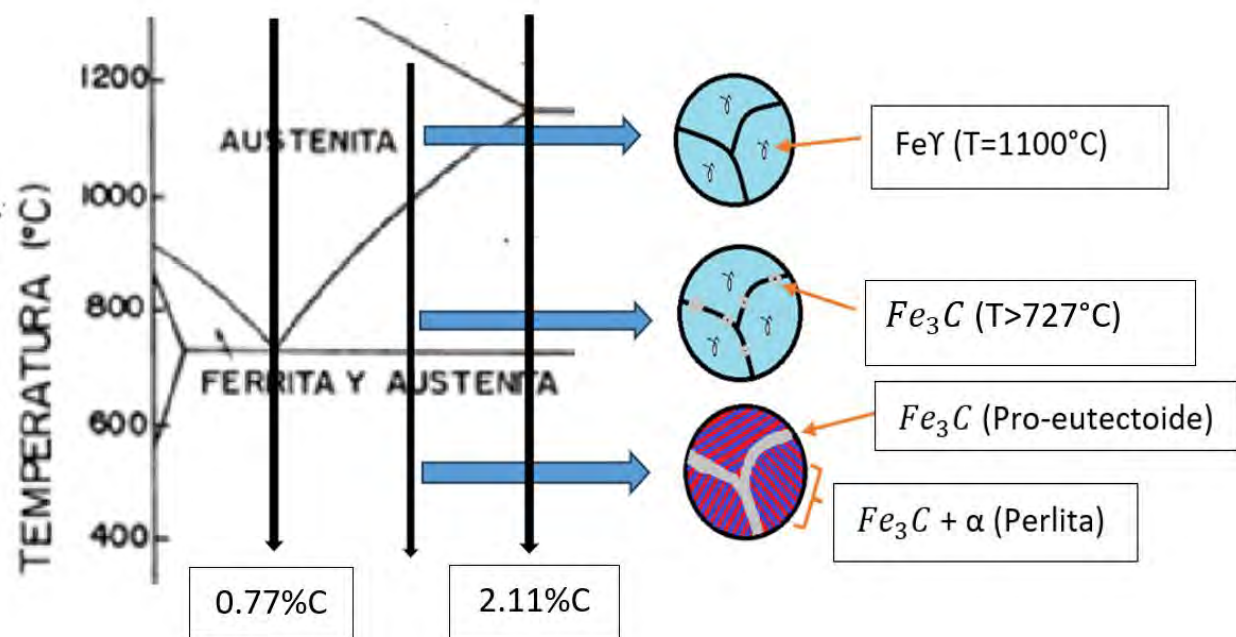
A 1100°C en la probeta se obtiene la fase llamada austenita; Pero conforme se reduce la temperatura, antes de llegar a la temperatura eutectoide (727°C), se forman pequeñas partículas de cementita, a lo largo de los límites intergranulares de la austenita, denominada cementita Pro-eutectoide. A consecuencia de la cementita que se formó antes de la temperatura eutectoide ($T > 727^{\circ}\text{C}$), para un acero hiper-eutectoide se tendrá dos microconstituyentes a condiciones normales:

- Fe_3C (Cementita Pro-eutectoide): Porque este cementita fue formado antes de la temperatura eutectoide.

- Perlita ($Fe_3C + \alpha$): la cementita contenido en esta perlita es diferente a la cementita Pro-eutectoide porque fue formada después a muy bajas temperaturas.

Figura 23

Gráfico del Desarrollo y Evolución de la Microestructura, en un Enfriamiento Lento para Diferentes Aceros Hiper-Eutectoides



Nota. Elaboración propia

2.13.4 Transformaciones de la Austenita

Cuando se le calienta a los aceros y se realiza diferentes tratamientos térmicos, aparecen diferentes microestructuras, a parte de los ya mencionados en el diagrama Fe-C, lo que varía algunas de sus propiedades mecánicas de estas nuevas microestructuras, estos son; La perlita, la bainita y la martensita. La fase austenítica del acero es la única microestructura que se transforma en las fases mencionadas, esta fase no existe a temperatura ambiente, ya que solo es estable a una temperatura por encima de $727^{\circ}C$.

2.13.4.1. *Perlita*

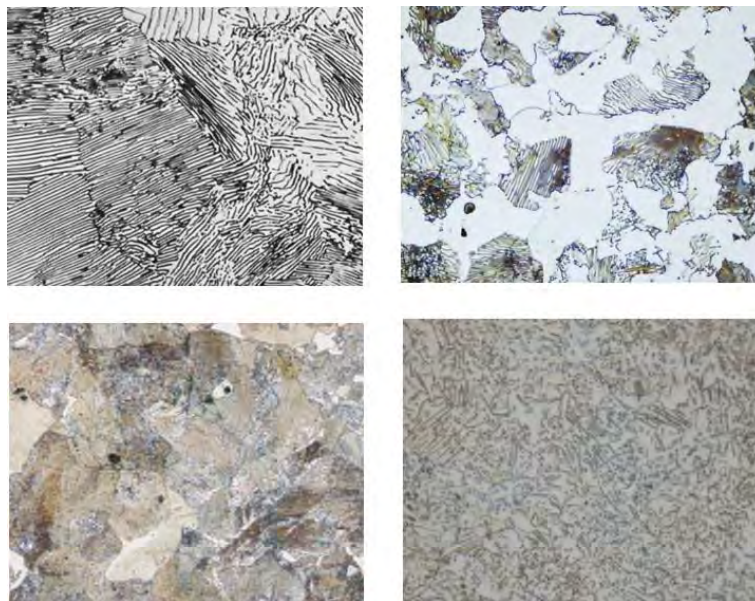
Para que la austenita se transforme en perlita, el enfriamiento se realiza lentamente, en otras palabras, la perlita aparece si la velocidad de enfriamiento de la austenita se lleva a cabo en condiciones de equilibrio, es decir en un enfriamiento lento.

La perlita (que se observa en la Figura 24) es reconocible por presentar una estructura en forma de láminas alternas de ferrita (blancas o claras) y cementita (negras u oscuras). El espaciado entre las láminas depende de la velocidad de enfriamiento:

- Con un enfriamiento lento se obtiene una perlita más gruesa (láminas más separadas).
- Pero con un enfriamiento un poco más rápido la perlita se afina (láminas muy juntas → más dura y resistente).

Figura 24

Una Ilustración de Diferentes Tipos de Perlita



Nota. Adaptado de Copyright (fotografía), 2025, Ciencia e Ingeniería de Materiales
(<https://tecnologiamaateriales.com/microestructura-con-perlita-y-ferrita/>)

La perlita tiene una buena resistencia mecánica, ya que tiene las propiedades intermedias de la ferrita y la cementita, no es tan blanda ni muy dura.

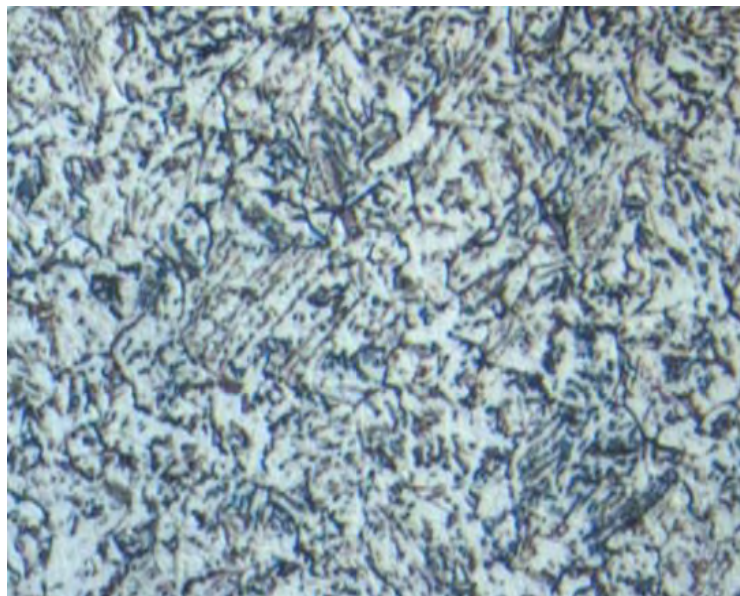
2.13.4.2. Bainita

Si la austenita se enfría moderadamente, ya sea si fuese sometido a una baja corriente de aire, de velocidad de enfriamiento intermedio y manteniendo la temperatura en un valor inferior a la temperatura eutectoide ($T < 727^{\circ}\text{C}$). Es entonces que aparece la bainita.

En el microscopio la bainita mostrado en la Figura 25 se puede distinguir como una combinación de ferrita con la cementita que no presenta una microestructura laminar, sino que muestra una forma de plumas o placas finas.

Figura 25

Ilustración de la Vainita



Nota. Adaptado de Copyright (fotografía), 2025, Ciencia e Ingeniería de Materiales
(<https://tecnologiademateriales.com/microestructura-con-perlita-y-ferrita/>)

2.13.4.3. La Martensita

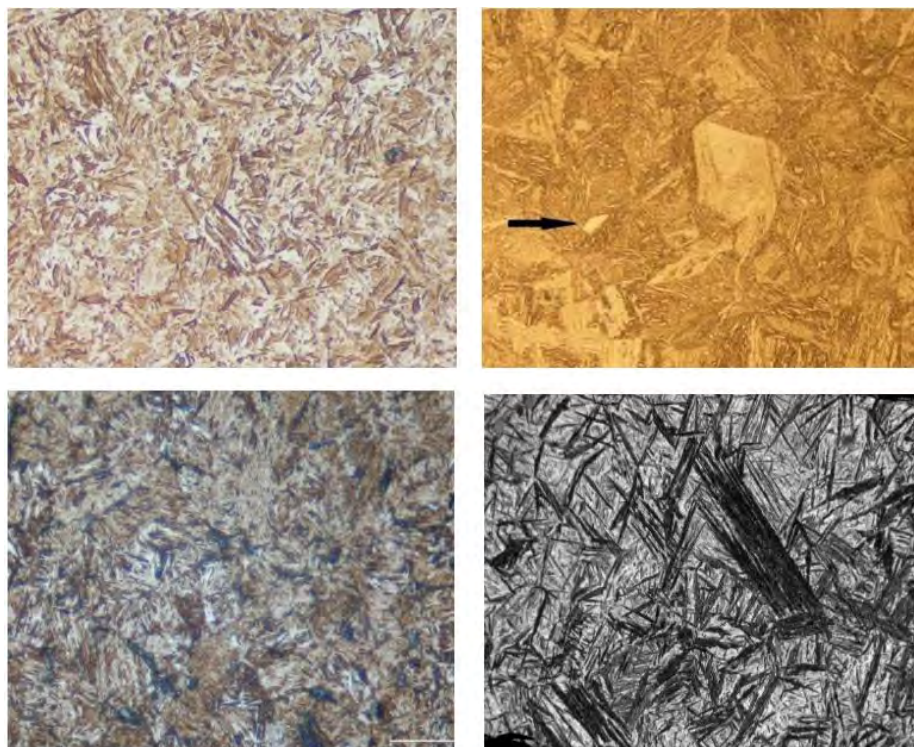
La martensita aparece como resultado de un enfriamiento muy rápido de la austenita, la difusión de los átomos de carbono que contiene la fase austenítica, que intenta transformarse en ferrita y cementita, no pueden completar esta transformación a esa velocidad de enfriamiento, quedando el carbono retenido. Como resultado se produce una estructura

deformada que se caracteriza por presentar formas de agujas puntiagudas tal com se muestra en la Figura 26.

La martensita corresponde a una solución sólida sobresaturada en carbono, caracterizada por su alta dureza y resistencia al desgaste, pero con baja tenacidad, es la más frágil de todas las transformaciones austeníticas.

Figura 26

Ilustración de diferentes tipos de martensita



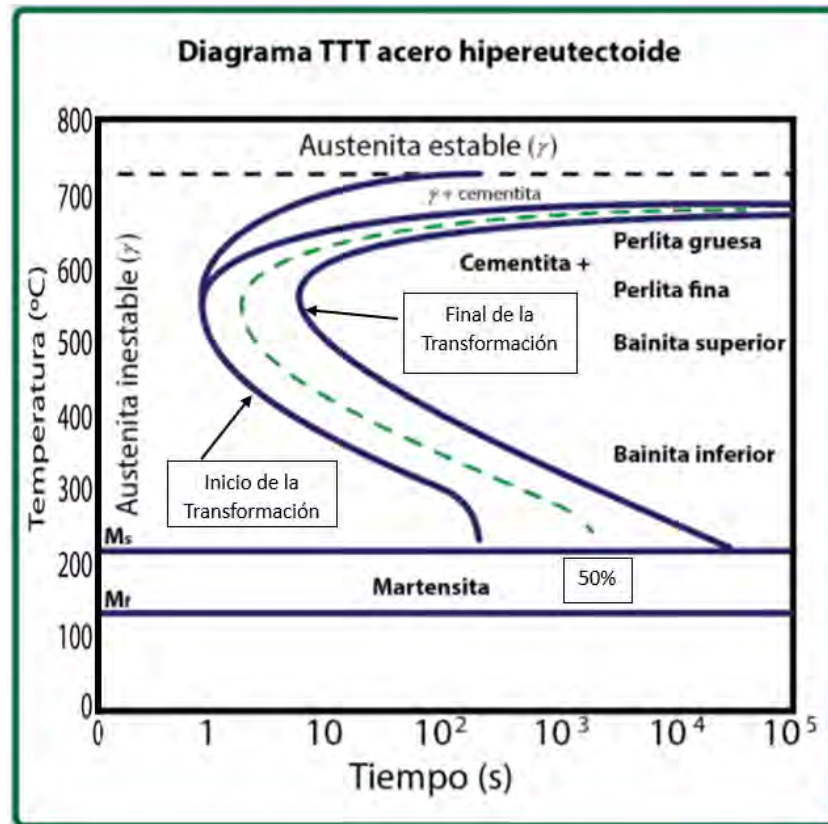
Nota. Adaptado de Copyright (fotografía), 2025, Ciencia e Ingeniería de Materiales
(<https://tecnologiademateriales.com/microestructura-con-perlita-y-ferrita/>)

2.13.5 Diagramas TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) para Aceros

Los diagramas TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) son herramientas fundamentales para entender cómo ocurren las transformaciones de fases en estos aceros, durante enfriamientos isotérmicos. A continuación, se muestra cómo interpretar estos diagramas.

Figura 27

Diagrama TTT (Tiempo Temperatura y Transformación) para Aceros



Nota. Adaptado de copyright (fotografía), 2025. Ingeniosos

(<https://lawebdeingeniosos.com/diagramas-ttt-perlita-bainita-y-martensita/>)

Según el diagrama TTT (Figura 27), a una temperatura de 727°C a más se tiene la austenita estable, se observa la curva de inicio de transformación de perlita y bainita, a diferentes temperaturas y tiempos. Por ejemplo; si deseo obtener perlita gruesa tendría que bajar la temperatura de la probeta a 650°C aproximadamente, y mantener esa temperatura a más de 100 segundos, la austenita se transformará en perlita de grano grueso, después se realiza un enfriamiento rápido, para mantener dicha fase. Observando la imagen del diagrama TTT para los aceros hiper-eutectoides, existen la presencia de partículas de cementita, esta cementita es la que formó antes de llegar a la temperatura eutectoide ($T > 727^\circ\text{C}$), la que es denominada como cementita Pro-eutectoide.

Para obtener la martensita, según el diagrama la probeta tiene que estar a una temperatura mayor a 727°C , y el enfriamiento tiene que ser lo más rápido posible, para así no se pasa por las curvas de transformación, tal proceso se denomina “el temple”.

2.14. Aceros estructurales

Aunque parecen simples, su comportamiento es bastante rico y está influenciado por diversos factores, entre ellos el contenido de carbono, la microestructura y los tratamientos térmicos. En esencia un acero contiene: Hierro (Fe) como base y carbono (C) que varía entre un aproximado de 0.02% y 2.1%. y pequeñas cantidades de microaleantes (Mn, CR, Si, Ti, P, S,). Según el cantidad de carbono se clasifican en:

- **ACEROS CON BAJO CARBONO** (% de C < 0.25%). Estos aceros ofrecen alta ductilidad (se deforman fácilmente sin romperse), baja resistencia mecánica y excelente soldabilidad. En su microestructura predomina la ferrita con algo de perlita.
- **ACEROS CON MEDIO CARBONO** (% de C de 0.25%-0.6%). Las características principales es que ofrecen buen equilibrio entre resistencia y ductilidad. mayor dureza que los de bajo carbono, presentan una buena respuesta a tratamientos térmicos como el temple y el revenido. En su microestructura existe una mezcla de ferrita y perlita con proporciones más equilibradas.
- **ACEROS CON ALTO CARBONO** (% de C de 0.6%-2.11%). Los aceros mayores L 0.6% tienen alta dureza, mayor resistencia al desgaste, baja ductilidad (más frágiles) y difícil soldabilidad. Estos son muy sensibles al tratamiento térmico.

Después de haber estudiado, los diagramas FE-C, se concluye que existe una amplia variedad de aceros, más específicamente el uso de los aceros hipo-eutectoides en la metalurgia industrial, especialmente en la metalurgia del acero y sus aplicaciones donde se requiere aceros con resistencias mecánicas y al desgaste. Tal es el caso de nuestras probeta de un soporte

fracturado. Para ello, la mejor forma de conocer estos aceros es la clasificación según la norma ASTM.

2.14.1 Composición química de los aceros

La composición química de los aceros corresponde a la identificación y cuantificación de los elementos químicos presentes en la aleación, expresados generalmente como porcentaje en masa. El acero está constituido principalmente por hierro (Fe) y carbono (C), además de elementos de aleación y elementos residuales o acompañantes, como manganeso (Mn), silicio (Si), cromo (Cr), níquel (Ni), molibdeno (Mo), titanio (Ti), aluminio (Al), fósforo (P) y azufre (S), entre otros.

La composición química constituye un factor fundamental en el comportamiento metalúrgico y en las propiedades mecánicas del acero, debido a que cada elemento puede modificar su microestructura y, en consecuencia, características como la resistencia mecánica, límite de fluencia, dureza, ductilidad, tenacidad, soldabilidad y resistencia al desgaste. En el análisis de los aceros seleccionados para el presente estudio, se realizaron dos técnicas de caracterización química con la finalidad de determinar y comparar la composición elemental de las cinco muestras de acero. Estas técnicas permitieron identificar los principales elementos constituyentes de cada material y establecer posibles diferencias en su composición química. Los métodos empleados fueron los siguientes:

- análisis mediante fluorescencia de rayos X (XRF)
- análisis mediante espectrometría de emisión óptica.

2.15. Análisis mediante fluorescencia de rayos X (RFX)

2.15.1 Analizador XRF

Para realizar un análisis de la composición química de las probetas mostradas en la Figura 36, se utiliza un equipo eléctrico llamado “analizador XRF” (fluorescencia de rayos x), conocida también como “pistola de rayos x”. Este aparato funciona aprovechando un principio

físico llamado fluorescencia de rayos x. su objetivo es identificar que elementos químicos están presentes en las probetas de acero y en qué proporción. En la Figura 28 se muestra el analizador XRF.

Figura 28

Analizador XRF



Nota. Imagen tomada en un laboratorio de Cusco

Este aparato se utilizó en las probetas porque:

- Permite identificar rápidamente tipos de acero (por ejemplo, si es inoxidable por su contenido de cromo y níquel).
- No destruye la muestra (ensayo no destructivo).
- Es rápido: resultados en segundos.
- Se puede usar directamente en campo o en planta.

2.15.2 Limitaciones del Analizador XRF:

- No mide bien elementos muy ligeros (como carbono), que son clave en el acero.

- La precisión depende de la calibración y del estado de la superficie.
- Solo analiza la capa superficial (no el interior profundo).

2.16. Análisis Químico por Espectrometría de Emisión Óptica por Chispa

Mediante el análisis de espectrometría de emisión óptica por chispa (OES) fue posible determinar con mayor precisión la composición química de las muestras, incluyendo elementos de particular interés para la caracterización del acero. Entre estos destaca el carbono (C), cuyo contenido constituye un parámetro fundamental para evaluar y diferenciar la composición de los aceros. Asimismo, la concentración de carbono permite establecer su posible influencia sobre determinadas propiedades mecánicas y metalúrgicas, como la resistencia a la tracción, el límite de fluencia, la dureza, la ductilidad y la microestructura. Por consiguiente, los resultados obtenidos mediante espectrometría de emisión óptica complementaron la caracterización realizada por XRF y permitieron efectuar una evaluación más precisa de la composición química y del comportamiento esperado del acero estudiado.

2.16.1 Propiedades mecánicas de los aceros

Los aceros poseen las siguientes propiedades:

- Alta resistencia a la tracción
- Límite de fluencia
- Ductilidad
- Tenacidad
- Elasticidad
- Plasticidad
- Resistencia a la fatiga
- Resistencia al impacto
- Módulo de elasticidad

- Resiliencia

2.16.2 Clasificación de los Aceros Según la Norma ASTM

Para la fabricación de los soportes de un remolque no conviene elegir “cualquier acero”: ahí se concentran esfuerzos críticos (compresión, flexión, impacto). La elección correcta suele estar entre aceros estructurales ASTM bien conocidos, estos aceros que se van a mencionar a continuación pertenecen a los aceros que ofrecen alta resistencia con menor aleación (HSLA, se describen los siguientes aceros:

- ASTM A36. Es un acero al carbono estructural especificado por la norma A36/A36M de ASTM International. Se utiliza principalmente en construcción metálica por su equilibrio entre resistencia mecánica, soldabilidad, este acero es de bajo carbono aleado en pocos porcentajes, lo que significa que su comportamiento depende principalmente del hierro y el carbono, con pequeñas cantidades de otros elementos. Su composición química en porcentajes es:
 - o Carbono (C): con un porcentaje de $\leq 0.26\%$
 - o Manganeso (Mn): varia de 0.60% a 1.20%
 - o Hierro (Fe): varia en un aproximado de 97–99%

El A36 con bajo porcentaje de carbono significa que posee alta ductilidad y facilidad de soldadura, el Mn mejora la resistencia y dureza del material.

- ASTM A1011/1018. Son materiales laminadas en caliente utilizados principalmente en aplicaciones estructurales livianas y fabricación industrial. Mientras que el A1011 se caracteriza por su bajo costo y alta formabilidad, el A1018 ofrece un mejor control de propiedades mecánicas y dimensionales, lo que lo convierte en una alternativa idónea para aplicaciones que demandan alta precisión y uniformidad. Su composición química varia de:

- o Carbono (C): $\leq 0.15 - 0.25\%$
 - o Manganeso (Mn): $0.30 - 1.20\%$
 - o Fósforo (P): $\leq 0.03 - 0.04\%$
 - o Azufre (S): $\leq 0.03 - 0.04\%$
 - o Hierro (Fe): balance
- ASTM A656. Estos aceros son diseñados para lograr máxima resistencia con menor peso estructural. Es especialmente relevante en remolques, maquinaria pesada y estructuras donde el peso es crítico. Presentan la siguiente composición:
 - o Carbono (C): $\leq 0.26\%$ (varía por grado)
 - o Manganeso (Mn): $0.50 - 1.60\%$
 - o Silicio (Si): $\leq 0.50\%$
 - o Titanio (Ti): trazas
 - o Hierro (Fe): balance

Los microaleantes (Si, Ti) refinan el grano, y ofrecen mayor resistencia, el bajo porcentaje de carbono mantiene la soldabilidad. En su estructura se observa ferrita-perlita controlada.

- ASTM A588. Estos aceros tienen una especificación estructurales con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica. Presentan la siguiente composición química:
 - o Carbono (C): $\leq 0.19\%$
 - o Manganeso (Mn): $0.80 - 1.25\%$
 - o Silicio (Si): $0.15 - 0.40\%$
 - o Cromo (Cr): $0.40 - 0.65\%$
 - o Hierro (Fe): balance

Su característica principal es que en su superficie se forma una capa protectora de óxidos adherentes, que reduce la velocidad de corrosión. Estos aceros se usan en

puentes, torres eléctricas, estructuras expuestas, vagones ferroviarios, tolvas y remolques industriales, fachadas arquitectónicas.

- ASTM A572. Estos aceros tienen alta resistencia y son diseñados mediante microaleación para mejorar significativamente la relación resistencia–peso respecto a aceros al carbono tradicionales. Su principal ventaja es la capacidad de reducir el peso estructural sin comprometer la resistencia, lo que lo hace ideal para aplicaciones como puentes, maquinaria pesada y remolques de alta carga. Sin embargo, su mayor costo y menor tolerancia a errores de fabricación requieren un diseño y control más riguroso.

Su composición química es:

- o Carbono (C): $\leq 0.23\%$
 - o Manganeso (Mn): hasta 1.35%
 - o Silicio (Si): 0.15 – 0.40%
 - o Hierro (Fe): balance
- ASTM A242. Es un acero estructural con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica gracias a su aleación con cobre, níquel y cromo. Su principal característica es la formación de una pátina protectora que reduce significativamente la corrosión, lo que lo hace ideal para estructuras expuestas al ambiente como puentes, torres y equipos industriales. Sin embargo, su uso no es adecuado en ambientes marinos severos y su costo es superior al de aceros estructurales convencionales.

Este tipo de clasificación identifica el tipo de acero y su aplicación principal. Su composición química es:

- o Carbono (C): $\leq 0.15 - 0.22\%$
 - o Manganeso (Mn): 0.80 – 1.25%
 - o Cobre (Cu): 0.20 – 0.40%
 - o Níquel (Ni): 0.20 – 0.50%

- o Cromo (Cr): 0.40 – 0.70%

En la siguiente tabla se aprecia los aceros, al tipo de aceros que pertenecen, y sus respectivas propiedades:

Tabla 7

Clasificación de los Aceros Según la Norma ASTM

Norma ASTM	Tipo de Acero	propiedades				
		Tracción (MPa)	Limite Elástico (MPa)	Elongación (%)	Dureza (HRB)	Modulo De Elasticidad (GPa)
A36	Acero al carbono estructural	400-550	250	20-23	67-83	200
A1011/A1018	Acero laminados	365-520	220-350	20-30	55-75	200
A656	Aceros HSLA	550-750	349-690	14-20	70-95	200
A588	Aceros HSLA	485-630	345-485	18-21	75-90	200
A572	Acero de alta resistencia Aceros HSLA	450-620	290-450	18-21	70-85	200
A242	Aceros HSLA, con resistencia a corrosión.	480-630	345	18-20	70-80	200

Nota. Elaboración propia

La selección del acero adecuado para la fabricación de diferentes soportes es lo más básico, y fundamental. Se tiene que prever las aplicaciones, algunas propiedades mecánicas, químicas etc. Según la Tabla 7 de clasificación de los aceros, el acero más apropiado para la fabricación de estos soportes sería: El acero A1011 o A1018, con el tipo de acero al carbono laminado, y con aplicaciones principales que son: laminas para automotriz, estructuras y soldaduras Diseño de soporte, etc.

Después de la elección del tipo de acero, entramos a la etapa del diseño de soporte, la solución a las fracturas del soporte podría ser una mejoría en los diseños, tales mejorías podrían ser aumentando espesura o formas más adecuadas para su fabricación (diseño).

2.16.3 Espesores de Aceros Utilizados en los Remolques

Las chapas para la fabricación de estos soportes tienen diferentes espesores, los más usados son:

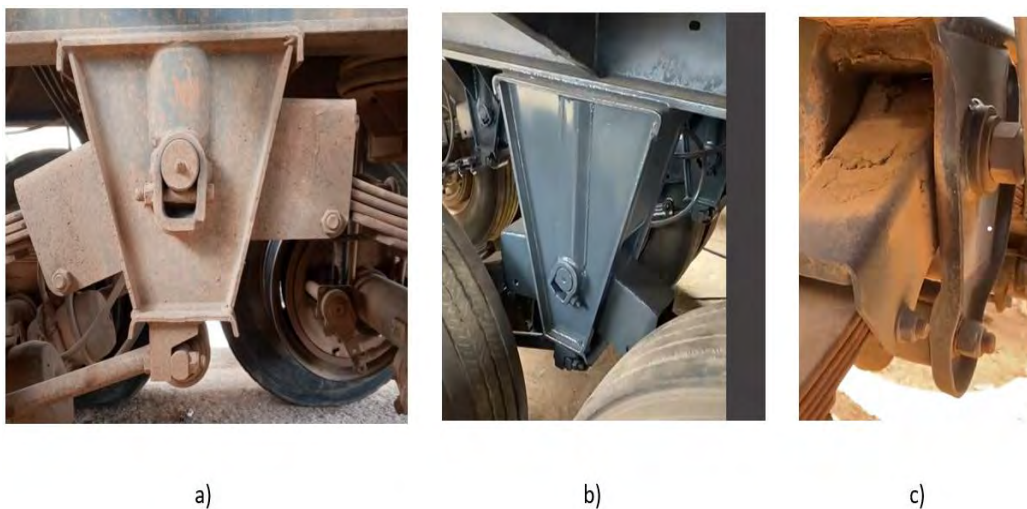
- ¼ de pulgada
- 5/16 de pulgadas

2.16.4 Diseño del Soporte

El diseño más adecuadas para la fabricación de los soportes es la forma realizada por la empresa “RANDONCORP”, hoy en día una de las grandes empresas metalúrgicas brasileros, en la producción de remolques, semirremolques, tolvas, carrocerías y vagones ferroviarios. Se realizo un rediseño para mostrar algunas mejorías. En la siguiente imagen (Figura 29) se muestran ejemplos de algunos diseños de soportes existentes en Brasil.

Figura 29

Ejemplos de Algunos Diseños de Soportes Existentes: a) Diseño de la Marca Rossetti, b) Rediseño de la Marca Rossetti, c) Un Diseño Antiguo de la Marca Randon



Nota. Foto tomada en la empresa Roberto Equipamentos

2.16.5 Propuesta de mejora del diseño del soporte

El análisis de los soportes de suspensión mostrados en la Figura 29 permitió identificar diferencias importantes en cuanto al método de fabricación y su posible influencia sobre el comportamiento estructural del componente. El soporte mostrado en la Figura 29.a) fue fabricado mediante el ensamblaje de placas de acero, la mayoría de la piezas unidas por soldadura, mientras que el soporte de la Figura 29.c) presenta una geometría continua, sin uniones soldadas visibles en la zona principal de transmisión de esfuerzos. La figura 29.b) se diferencia solo en las dimensiones con la primera imagen.

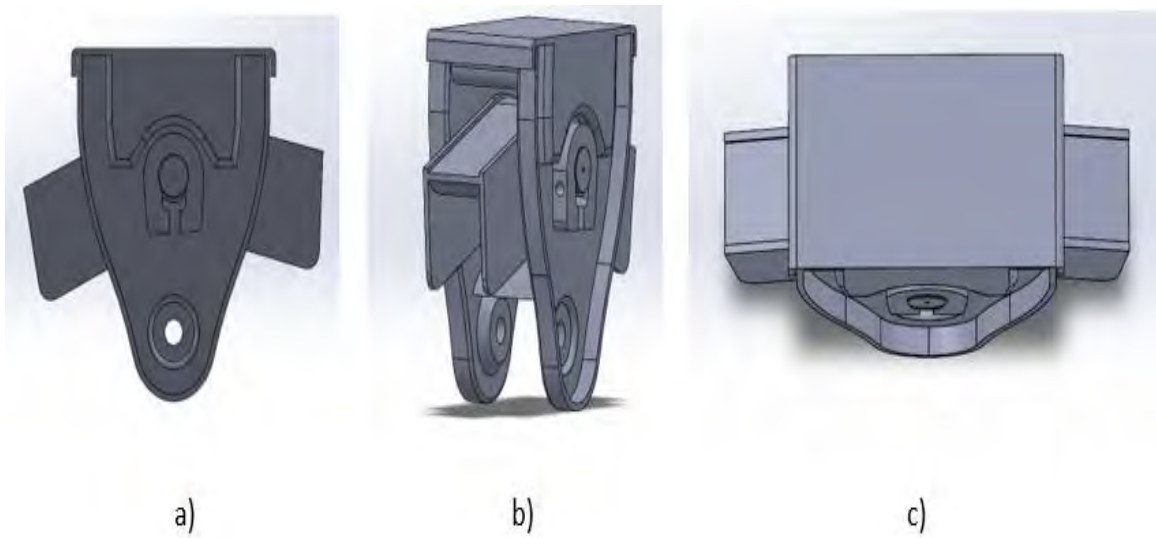
Las uniones soldadas constituyen regiones potencialmente críticas cuando el componente está sometido a cargas dinámicas y cíclicas. Durante el proceso de soldadura se genera una Zona Afectada por el Calor (ZAC), donde el material experimenta transformaciones microestructurales que pueden modificar sus propiedades mecánicas. Además, el cordón de soldadura, los cambios bruscos de sección y los posibles defectos de fabricación actúan como concentradores de esfuerzos, favoreciendo la iniciación y propagación de grietas por fatiga. (Olson, Siewert, Liu, & Edwards, 1993, págs. 408-415)

En contraste, el soporte mostrado en la Figura 39.c) presenta una geometría más uniforme y continua, lo que sugiere que pudo haber sido fabricado mediante un proceso de conformado, como el forjado o la fundición. La ausencia de soldaduras en la región crítica representa una ventaja desde el punto de vista estructural, debido a que disminuye la presencia de discontinuidades y favorece una distribución más homogénea de los esfuerzos. Asimismo, se observa estos diseños tienen diferentes espesores. El diseño facilita la producción del soporte al tener un espesor más fino, sin embargo, esta reducción de espesor no implica necesariamente una disminución de la resistencia mecánica.

En conclusión, se combina las dos formas de pensar de los fabricantes, para realizar una propuesta en la mejora del diseño del soporte, teniendo como resultados la Figura 30 que se muestra a continuación:

Figura 30

Rediseño por el programa SolidWorks del Soporte de un Chasis (Pertenece a la Empresa RANDONCORP) de Vistas Diferentes: a) Vista Frontal, b) Vista Lateral y c) Vista Sobre Cabeza



Nota. Una propuesta de mejora en el rediseño del soporte, realizado con programa SolidWorks

2.17. Marco conceptual

- a) **Fuerzas mecánicas:** Las fuerzas mecánicas son aquellas fuerzas que se ejercen sobre un cuerpo y que pueden modificar su estado de movimiento o su forma. Estas fuerzas son responsables de la mayoría de las interacciones físicas que observamos en la vida cotidiana y forma parte del estudio de la mecánica en la física.
- b) **Fractura en los metales:** La fractura en los metales es el proceso mediante el cual un metal se rompe o se separa en partes debido a la aplicación de una carga o esfuerzo. Este fenómeno es crítico en ingeniería y ciencia de los materiales, ya que puede llevar a fallos estructurales si no se controla adecuadamente.
- c) **Soporte de chasis:** El soporte de chasis es la pieza de estudio en esta tesis, que sufrió la fractura, esta pieza se encuentra soldada al chasis del remolque, en ella está concentrada la mayoría de las cargas externas aplicadas al remolque.
- d) **Tolvas para camiones:** Una tolva es un contenedor o recipiente en forma de embudo diseñado para almacenar, transportar y descargar materiales a granel (arena, grava, minerales, granos, etc.). Están ampliamente utilizadas en la minería, construcción, agrícola y logística.
- e) **Aceros:** El acero es una aleación de hierro (Fe) con una pequeña cantidad de carbono (generalmente entre 0.02% y 2.11% en peso), y a veces esta aleado con otros elementos. Esta combinación mejora significativamente la resistencia, dureza y otras propiedades del hierro puro.
- f) **Camiones:** Un camión es un vehículo de carga pesada, encargada de realizar el transporte de los remolques.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis General

Por efecto de la sobrecarga y el trabajo cíclico de carga y descarga que realiza el remolque, se genera una fatiga anticipada en el soporte, que se manifiesta como la fractura observada.

3.2. Hipótesis Específicos

- La composición química y las propiedades mecánicas del acero del soporte presentan características de un acero estructural de bajo contenido de carbono, cuyos contenidos de C, Mn y otros elementos de aleación influyen en su resistencia, dureza y ductilidad.
- El mecanismo de fractura predominante está asociado con un proceso de fatiga generado por la aplicación repetitiva de cargas, favorecido por concentraciones de esfuerzos en la zona crítica del soporte.
- Los niveles de esfuerzo en la zona crítica aumentan bajo condiciones de sobrecarga respecto de la carga nominal, pudiendo alcanzar o superar localmente el límite de fluencia y favorecer la iniciación de fisuras y el posterior desarrollo de falla por fatiga.

3.3. Variables e Indicadores

3.3.1 Variable Dependiente

Durabilidad del soporte de chasis

3.3.2 Variable Independiente

- Tipos de cargas aplicadas en los soportes
- Condiciones operativas del remolque
- Tipos de materiales utilizados en la fabricación de los soportes

3.4. Operacionalización de las variables

Tabla 8

Operacionalización de Variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Niveles	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Independiente					
• Tipos de cargas aplicadas en los soportes. • Condiciones operativas del remolque. • Tipos de materiales utilizados en la fabricación de soportes.	• Fuerzas que actúan sobre los soportes del chasis del remolque, se tienen: axial, flexión o combado, corte directo y contacto. • Parámetros y situaciones reales de funcionamiento del remolque que influyen en la respuesta mecánica de los soportes. • Materiales metálicos como los aceros o compuestos como las aleaciones usados en los soportes estructurales del chasis del remolque.	• Se medirán mediante análisis estructural, simulaciones o mediciones directas. Se registrará tipo de carga, magnitud y comportamiento. • Se registrarán condiciones de sobrecarga, tipos de servicios, mantenimiento, etc. • Se clasificarán según su composición, propiedades mecánicas y comportamiento ante cargas.	• Flexión o combado, compresión • Velocidad de operación, frecuencia de uso y capacidad de carga • Tipos de aceros	• N/m, lb. • (km/h), (horas/día) y Ton. • Hipo-Eutectoides	• Programas de software. • Velocímetros, programas estadísticos. • Metalografía.
Dependientes	Definición conceptual	Definición operacional	niveles	Indicadores	Técnicas e Instrumentos
Durabilidad del soporte de chasis	Capacidad del soporte para conservar sus propiedades y funcionamiento frente a cargas y condiciones operativas durante un periodo prolongado.	Medición mediante pruebas mecánicas, inspecciones periódicas aplicadas en el soporte.	Tiempo de uso, tiempo de vida útil	Años	Programas estadísticos para realizar los registros, y realizar comparaciones.

Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA

4.1. Ámbito de Estudio

4.1.1 Conceptos Básicos

La primera etapa para comenzar con la investigación fue la observación, con el pasar del tiempo de aproximadamente 5 años, encontré diferentes tipos de soportes, con respecto a diseño, marcas, de diferentes empresas metalúrgicas (como RANDONCORP, ROSSETTI, LIBRELATO, IDEROL, etc.). El problema existente en la mayoría de estos soportes, es la ocurrencia de la fractura de las mismas. En ese sentido el diseño que ofrece mayor confianza es la de RANDONCORP. Ya que presentan un mejor diseño, calidad y duración en su fabricación.

4.1.2 Localización y Delimitación Espacial de la Investigación

Un remolque con tolva para camiones, perteneciente a la empresa RANDONCORP (fabricante de remolques con tolvas), llegó con los soportes fracturados a las instalaciones de la empresa ROBERTO EQUIPAMENTOS AUTOMOTIVOS S.A. (Empresa encargado del mantenimiento de remolques en general, Con el registro nacional de persona jurídica N° 30.253.247/0001-80). Estos remolques operan en el sector de Ceilândia, distrito federal de Brasilia- Brasil.

4.1.3 Ubicación Geográfica

La empresa metalúrgica ROBERTO EQUIPAMENTOS AUTOMOTIVOS S.A, está ubicada en el poblado de Ceilândia, y tiene por dirección: SMC (sector de materiales de construcción) Cuadra 6 lotes del 15 hasta el 17 en el distrito federal e Brasilia (DF), está a 60 min en auto desde el aeropuerto de Brasilia. La Tabla 9 muestra las coordenadas geográficas exactas donde se encuentra ubicada la empresa mencionada, con unidades de medida en centesimales y sexagesimales.

Tabla 9

Coordenadas de la Empresa Roberto Equipamentos Automotivos S.A.

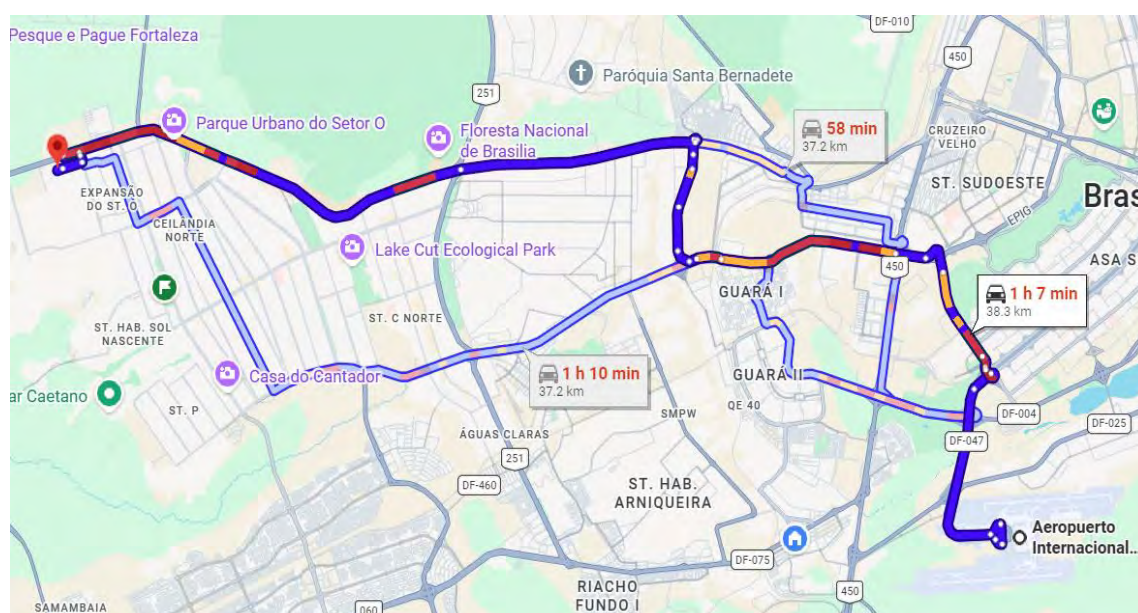
AREA DE RENOVACION DE TOLVAS PARA CAMIONES			
ROBERTO EQUIPAMENTOS AUTOMOTIVOS S.A.	Unidad de medica	Coordenadas geográficas	
		Latitud	Longitud
	Decimal	-15.791917	-48.148694
	Sexagesimal	15°47'30.9"S	48°08'55.3"W

Nota. Elaboración propia.

Teniendo como referencia principal el aeropuerto internacional de Brasilia, que lleva el nombre completo de Aeropuerto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, la empresa se encuentra ubicado al noroeste del aeropuerto internacional de Brasilia a 60 min, en la ciudad que tiene de nombre Ceilândia. La Figura 31 muestra la ubicación geográfica de la empresa, y la Figura 33 una visualización satelital.

Figura 31

Ubicación Geográfica de la Empresa Roberto Equipamentos Automotivos S.A.



Nota. Google Maps (2025)

Figura 32

Visualización Satelital de la Empresa Roberto Equipamentos Automotivos S.A.



Nota. Google Maps (2025)

4.2. Investigación

4.2.1 Tipo de Investigación

La investigación más adecuado para el estudio sobre la fractura del soporte del chasis del remolque con tolva en Ceilândia, Distrito Federal de Brasília-Brasil, se enfoca a tipo de investigación aplicada. Porque el estudio se orienta a resolver un problema técnico concreto en la fractura del soporte de chasis de un remolque con tolva, mediante el análisis experimental del material, la identificación del mecanismo de falla y la propuesta de recomendaciones de diseño y mantenimiento, con impacto directo en la práctica industrial

4.2.2 Nivel de Investigación

El presente estudio es de nivel explicativo, porque más allá de describir la presencia de una fractura, la investigación busca explicar las causas que la originan, integrando resultados de análisis químico, metalográfico, mecánico, fractografía y de dureza para establecer relaciones causales entre la microestructura del acero, las condiciones de carga cíclica, los concentradores de esfuerzos y el mecanismo de fatiga observado; por ello, su propósito central es comprender “por qué” y “cómo” se produjo la falla del soporte

4.2.3 Diseño de la Investigación

Asimismo, el diseño es experimental, pues se manipularán determinadas variables del diseño (como materiales, dimensiones, espesores, formas, etc.) para conocer su efecto sobre el rendimiento del soporte, permitiendo establecer relaciones de causa y efecto entre las modificaciones. Se construyeron prototipos de un rediseño del soporte que ayudan a mejorar la vida útil del componente mediante un programa de diseño SolidWorks.

4.3. Población

La población objeto de estudio, son todos los soportes del chasis de remolques mostrados en la Figura 33, que laboran en la ciudad de Ceilândia, perteneciente al distrito federal de Brasilia-Brasil. Estos soportes tienen diferentes diseños, depende de cada empresa fabricante de estos remolques, tales como; RANDONCORP, ROSSETTI, LIBRELATO, FACCINI, etc.

Figura 33

empresas de laboran en Ceilândia, distrito federal de Brasilia-Brasil



Nota. La imagen fue tomada en la empresa Roberto Equipamentos

4.4. Muestra

Se extrajo 5 muestras pertenecientes a las empresas brasileñas Rossetti, Facchini y Randon. La muestra de la pieza fracturada pertenece a la empresa Randon del año 2019.

El propósito de extraer diferentes muestras de probetas es realizar una breve comparación, estas probetas se describen en la Figura 34.

Figura 34

Muestras Extraídas de Diferentes Soportes de empresas Randon y Facchini



Nota. Muestras enumeradas de las 5 probetas: 1) Rossetti 2015, 2) Facchini 2020, 3) chapas para mantenimiento de los remolques en general, 4) Randon 2010 y 5) Randon 2019 (pieza fracturada en estudio).

4.5. Técnica de Recolección de Datos

Para el estudio del soporte fracturado, se hicieron uso de varias estrategias de recolección de datos que posibilitaron la obtención de información precisa y confiable sobre la condición de los elementos estructurales, su ubicación, tipo de fractura y posibles causas. Las técnicas empleadas fueron las siguientes:

4.5.1 Observación Directa

Se realizó una inspección visual de los soportes, registrando grietas, deformaciones, fracturas, etc. Para sistematizar los hallazgos se emplearon listas de chequeo y fichas de registro, complementadas con fotografías que documentan la condición actual de cada soporte.

4.5.2 *Análisis Químico por Rayos XRF*

Se llevaron a cabo mediciones de composición metálica, mediante el uso de pistolas a rayos X, también llamadas analizadores XRF (fluorescencia de rayos X), para medir la composición en porcentajes de los materiales metálicos de forma rápida y no destructiva. Funcionan disparando rayos X sobre una muestra, los cuales se analizan para identificar los elementos y sus concentraciones presentes en los aceros.

4.5.3 *Análisis Químico por Espectrometría de Emisión Óptica por Chispa*

El análisis químico de las probetas de acero se realizó mediante la técnica de Espectrometría de Emisión Óptica por Chispa, la cual permite determinar de manera rápida y precisa la composición química del acero que el analizador XRF no pueda.

4.5.4 *Pruebas Metalográficas*

Se llevaron a cabo análisis de estudios metalográficos que permiten examinar la estructura interna de los metales mediante técnicas de observación microscópica. Con el objetivo de identificar los granos para determinar sus propiedades mecánicas de resistencia y maleabilidad.

4.5.5 *Pruebas de Dureza*

Se llevaron a cabo pruebas de dureza Rockwell B de las probetas en estudio, para verificar la calidad del acero, conocer el tratamiento térmico que poseen, estimar las propiedades mecánicas y evaluar su desempeño de la pieza durante su servicio.

4.5.6 *Ensayos de Fractura por Tracción*

El ensayo de fractura por tracción realizadas en las 5 probetas, funcionan aplicando una carga controlada sobre una probeta de acero hasta que aparece o se propaga una grieta. Durante el ensayo se mide cómo responde el material: cuánto se deforma, cuánta energía absorbe y en qué momento se fractura.

4.5.7 Ensayo de Fractografía

Este ensayo realizado en Arequipa, muestra la causa por la que el acero del soporte Randon 2019 sufrió la fractura

4.5.8 Revisión Documental

Se analizaron planos, especificaciones técnicas, reportes de mantenimiento previos e informes de inspección. Esto permitió identificar la historia de los soportes y posibles factores que contribuyeron a las fracturas.

4.5.9 Entrevistas con Personal Técnico

Se realizaron entrevistas estructuradas con ingenieros, técnicos y operarios, con el objetivo de conocer la frecuencia de cargas aplicadas, procedimientos de mantenimiento y eventos que pudieran haber afectado la integridad de los soportes.

4.6. Equipos e Instrumentos

Se tiene una lista completa y adecuada de equipos e instrumentos que se requieren para un estudio del acero del soporte del chasis de un remolque con tolva:

4.6.1 Equipos e instrumentos para Inspección Visual y Medición

- Cámara fotográfica profesional
- Lupa
- Calibrador Vernier (pie de rey)

4.6.2 Equipos de Análisis de Materiales

- Microscopio metalográfico
- Espectrómetro de medición óptica o XRF
- Durómetro Rockwell
- Máquina universal de tracción

4.6.3 Equipos de Seguridad

- Gafas de protección

- Guantes quirúrgicos
- Botas de seguridad
- Mandil de laboratorio

4.7. Análisis de la Composición Química de las Probetas con el Analizador RXF

Los resultados realizados con el “analizador XRF” fueron los siguientes:

PROBETA 1: Es una probeta extraída del soporte de un remolque perteneciente a la empresa Rossetti del año 2015.

Figura 35

Resultados del Análisis de la Composición Química de la Probeta 1, con el “Analizador XRF”



Nota. Probeta del soporte de la Empresa Rossetti año 2015

En la probeta 1 (Figura 35) se muestra un resultado de composición química de los siguientes porcentajes:

Fe = 99.600%

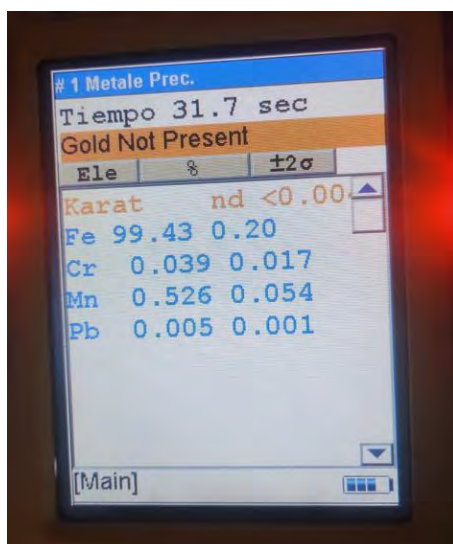
Mn = 0.362%

En conclusión, se puede afirmar que: “la probeta 1, es un acero con microaleantes, este caso sería el manganeso (con un porcentaje de 0.362%), esta probeta es un acero perteneciente a los aceros con bajo porcentaje de carbono.

PROBETA 2: Es una probeta extraída del soporte de un remolque perteneciente a la empresa Facchini del año 2020.

Figura 36

Resultados del Análisis de la Composición Química de la Probeta 2, con el “Analizador XRF”



Nota. Probeta del soporte de la empresa Facchini año 2020

En la probeta 2 (Figura 36) se muestra un resultado de composición química de los siguientes porcentajes:

Fe = 99.430%

Cr = 0.039%

Mn = 0.526%

Pb = 0.005%

En conclusión, se puede afirmar que: “la probeta 2, es un acero con microaleantes, este caso sería el manganeso (con un porcentaje de 0.526%), Cr (0.039%) y Pb (0.005%), perteneciente a los aceros con aleación al manganeso.

PROBETA 3: Es una probeta extraída de las chapas o planchas metálicas que se utilizan en la actualidad para la renovación y fabricación de los soportes y remolques en general, se tienen chapas de diferentes espesuras como 1/8”, 3/16”, 1/4”, 5/16”. La probeta que se extrae para la prueba de composición química tiene una espesura de 1/4”.

Figura 37

Resultados del Análisis de la Composición Química de la Probeta 3, con el “Analizador XRF”



Nota. Probeta de las Chapas usada en la actualidad para el mantenimiento en general

En la probeta 3 (Figura 37) se muestra un resultado de composición química de los siguientes porcentajes:

Fe = 99.230%

Cr = 0.039%

Mn = 0.724%

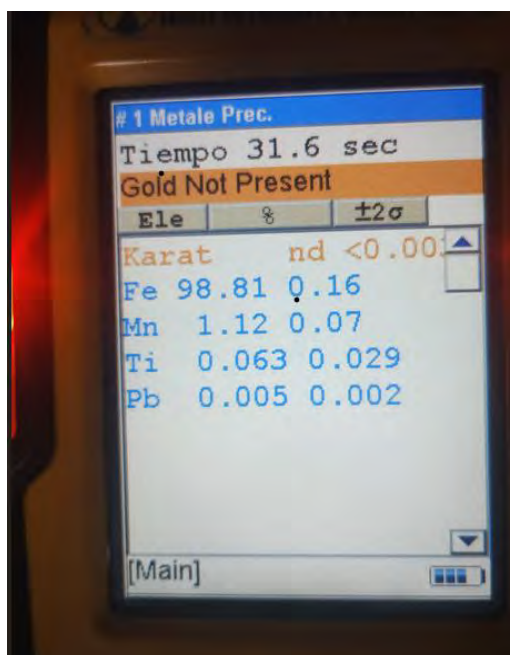
Pb = 0.005%

En conclusión, se puede afirmar que: “la probeta 3, con microaleantes, este caso sería el manganeso (con un porcentaje de 0.724%), Cr (0.039%) y Pb (0.005%), perteneciente a los aceros al manganeso.

PROBETA 4: Es una probeta extraída del soporte de un remolque perteneciente a la empresa Randon del año 2010, se obtienen los siguientes resultados:

Figura 38

Resultados del Análisis de la Composición Química de la Probeta 4, con el “Analizador XRF”



Nota. Probeta del soporte de la empresa Randon año 2010

En la probeta 4 (Figura 38) se muestra un resultado de composición química de los siguientes porcentajes:

Fe = 98.810%

Mn =1.120%

Ti =0.063%

Pb = 0.005%

En conclusión, se puede afirmar que: “la probeta 4, es un acero con microaleantes, este caso sería el manganeso (con un porcentaje de 1.120%), Ti (0.063%) y Pb (0,005%).

PROBETA 5: Es una probeta extraída del soporte fracturado (objeto de estudio), de un remolque perteneciente a la empresa Randon del año 2019, se obtienen los siguientes resultados:

Figura 39

resultados del Análisis de la Composición Química de la Probeta 5, con el “Analizador XRF”



Nota. Probeta del soporte fracturado de la empresa Randon año 2019

En la probeta 5 (Figura 39) se muestra un resultado de composición química de los siguientes porcentajes:

Fe = 99.370%

Mn = 0.620%

Pb = 0.005%

En conclusión, se puede afirmar que: “la probeta 5, es un acero con microaleantes, en este caso el elemento microaleante sería el manganeso (con un porcentaje de 0.620%) y Pb (0,005.

Los resultados obtenidos mediante el análisis por fluorescencia de rayos X (XRF) no permitieron establecer de manera concluyente la composición química completa de las

muestras analizadas. Esta limitación se debe principalmente a que la técnica XRF presenta restricciones para la determinación precisa de elementos ligeros, particularmente el carbono (C). Debido a que el contenido de carbono constituye uno de los principales criterios para la clasificación y diferenciación de los aceros, la ausencia de este elemento en el análisis impidió realizar una identificación inequívoca del grado o tipo de acero correspondiente a cada muestra.

Por consiguiente, los resultados obtenidos mediante XRF deben considerarse como una caracterización química parcial, siendo necesario complementar el análisis químico por espectrometría de emisión óptica por chispa, que permitirá determinar con mayor precisión el contenido de carbono y otros elementos de aleación, para establecer de manera confiable la composición y posible clasificación de los aceros estudiados.

4.8. Resultados obtenidos por Espectrometría de Emisión Óptica por Chispa

En la Tabla 10 se presenta los resultados obtenidos mediante el análisis de composición química por espectrometría de emisión óptica por chispa, correspondiente a las cinco muestras de acero evaluadas. Para cada muestra de acero se realizaron tres mediciones mediante el ensayo correspondiente, con la finalidad de obtener resultados acertadas. A partir de los valores obtenidos se calculó el promedio de cada elemento químico analizado, reduciendo la influencia de posibles variaciones durante la medición y proporcionando mayor confiabilidad a los resultados obtenidos. En el anexo VIII de esta tesis se muestran todos los elementos encontrados en los aceros realizados por el análisis de espectrometría, en la siguiente tabla, solo se muestran algunos elementos más representativos, y de más interés para su estudio de estos aceros.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante espectrometría de emisión óptica por chispa, en las cinco muestras analizadas, se determinó que el contenido de carbono varía entre 0,1108 % y 0,1725 %. Estos valores se encuentran por debajo de la composición eutécticoide del diagrama de fases Fe–C, por lo que, desde el punto de vista metalúrgico, las muestras pueden ser clasificadas como aceros hipo-eutéctoides, cuya microestructura de equilibrio está

constituida principalmente por ferrita Pro-eutectoide y perlita. Asimismo, se identificó la presencia de manganeso (Mn) en todas las muestras, con concentraciones variables, lo que evidencia su participación como elemento aleante.

Tabla 10

Resultados de los Elementos Químicos de % en Promedio Obtenidos en el Anexo V

PROBETA	% EN PROMEDIO DE LOS SIGUIENTES ELEMENTOS										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Ti	Fe
Rossetti 2015	0.1332	0.0789	0.3849	0.0155	0.0149	0.0287	0.0120	0.0065	0.0391	0.0006	99.21
Facchini 2020	0.1626	0.0184	0.5256	0.0102	0.0023	0.0260	0.0115	0.0096	0.0318	0.0009	99.10
Chapa para Mantenimiento	0.1643	0.0350	0.6810	0.0192	0.0174	0.0296	0.0091	0.0063	0.0526	0.0015	98.91
Randon 2010	0.1108	0.0233	1.083	0.0154	0.0052	0.0179	0.0137	0.0151	0.0648	0.0348	98.50
Randon 2019	0.1725	0.0400	0.5840	0.0142	0.0121	0.0158	0.0095	0.0054	0.0412	0.0006	99.03

Nota. Esta Tabla Muestra los Porcentajes en Promedio de Algunos Elementos Químicos de Mayor Interés para el Estudio, Obtenidos por la Espectrometría.

El manganeso puede contribuir al incremento de la resistencia y dureza del acero mediante endurecimiento por solución sólida, además de influir en la transformación microestructural y en la templabilidad del material. Particularmente, la probeta Randon 2010 presentó un contenido de titanio (Ti) de 0,0348 %, considerablemente superior al registrado en las demás muestras. Esta concentración resulta relevante a la composición química y de las condiciones de procesamiento. Este elemento contribuye al refinamiento del tamaño de grano y al endurecimiento del acero.

4.9. Pruebas Metalográficas

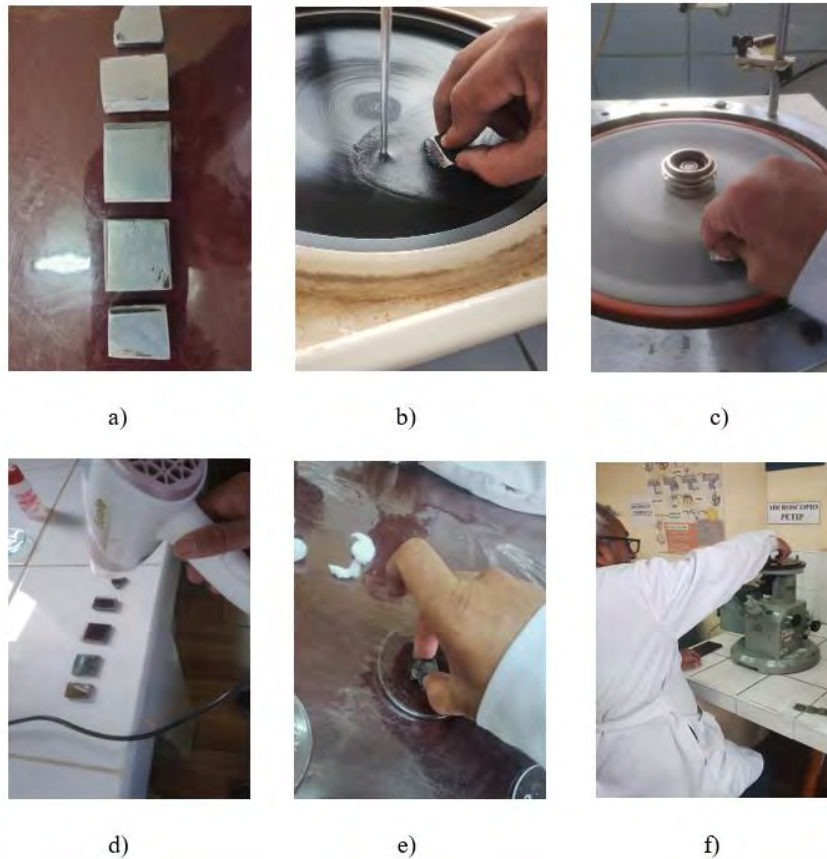
Las pruebas metalográficas en los aceros se realizaron para observar y analizar su microestructura y determinar su efecto en las propiedades y comportamiento en servicio.

4.9.1 Preparación de las Muestras Metalográficas

Seguidamente, en la Figura 40 se detallan los procedimientos que se realizaron para las pruebas metalográficas en el laboratorio.

Figura 40

Pasos realizados en el laboratorio para la preparación de las muestras metalográficas



Nota. a) corte y extracción de una porción de la muestra representativa, b) desbaste de las muestras, c) pulido de las muestras, d) lavado y secado, e) ataque químico, f) observación microscópica a un tamaño de 200x.

- PASO 1 (Figura 40.a). Se cortaron las muestras para extraer una porción representativa del material, se usó una cortadora con disco abrasivo (evitar sobrecalentamiento, porque puede alterar la microestructura).

- PASO2 (Figura 40.b). Se realizó el desbaste de las muestras obtenidas en el paso 1 (lijado), con la intención de eliminar las irregularidades del corte. Se usan lijas abrasivas de grano grueso a fino (220 → 320 → 400 → 600). El lijado se realizó en una sola dirección, seguidamente se debe cambiar la dirección del lijado para eliminar rayas anteriores, usar agua para evitar calentamiento.
- PASO 3 (Figura 40.c). Se realizó el pulido fino para obtener una superficie tipo espejo. Para ello se usan paños con abrasivos finos, el objetivo es eliminar rayas microscópicas y lograr una superficie completamente lisa.
- PASO 4 (Figura 40.d). Se realizó la limpieza de las probetas después del pulido, para ello se lava con agua y alcohol, se secó con aire y paño limpio para evita contaminación o manchas.
- PASO 5 (Figura 40.e). Se realizó el ataque químico con Nital al 5% para revelar la microestructura. Este reactivo Ataca selectivamente las fases (ferrita, perlita, etc.) y hace visibles los límites de grano.
- PASO 6 (Figura 40.f). Realizamos la observación microscópica, se utilizan los microscopios del laboratorio de metalurgia física de E.P. ingeniería metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

4.9.2 Resultados obtenidos en la Observación Microscópica de la prueba

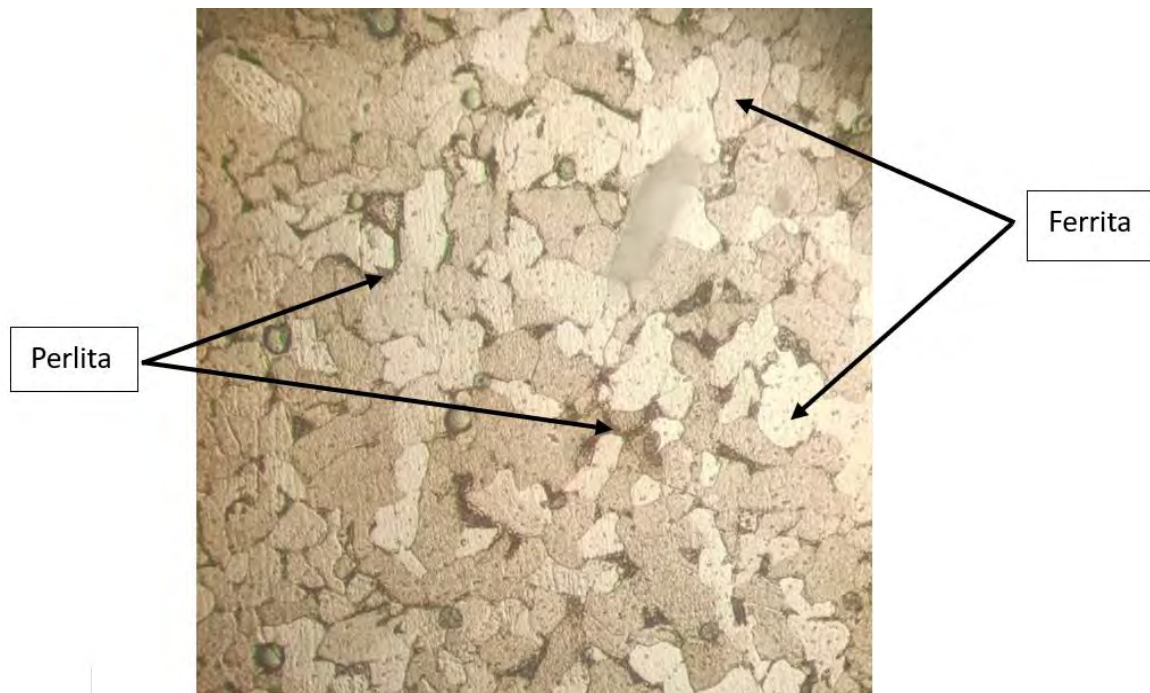
metalográfica

Luego de realizar la preparación metalográfica de las muestras y aplicar el ataque químico correspondiente, se efectuó la observación de las superficies en el microscopio óptico.

Como los resultados, se identificaron las diferentes microestructuras presentes en las cinco muestras de acero analizadas, permitiendo evaluar las características de los granos, las fases constituyentes y su distribución en la matriz metálica. Las microestructuras observadas se presentan a continuación.

Figura 41

Resultado de la Observación en el Microscopio de Rossetti 2015



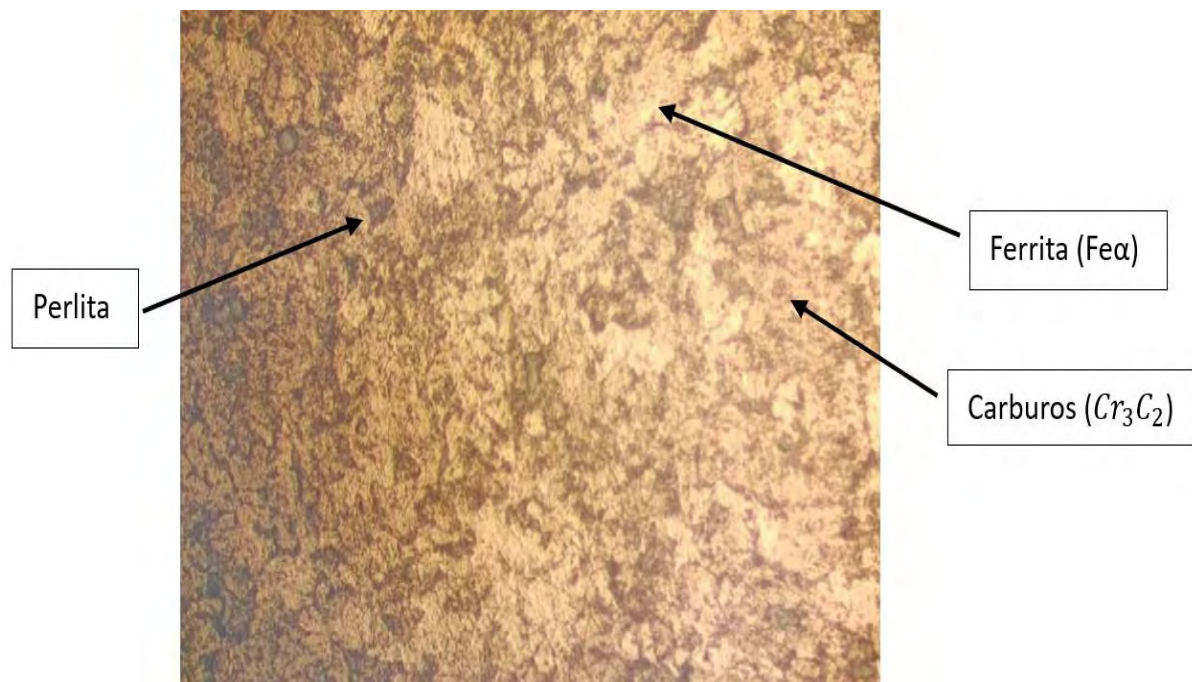
Nota. Elaboración Propia

PROBETA 1. (La muestra pertenece al soporte de fabricante Rossetti año 2015). En la figura 41, se observa mayor formación de ferrita en granos bien definidos (aumento de 200x), se observó también la presencia de perlita en los límites de grano de ferrita en pequeñas proporciones. Con una observación meticulosa, se puede distinguir pequeños puntos atrapados en los granos de ferrita, tales puntos son llamados carburos de metales aleantes, en este caso se trata de carburos de manganeso (Mn_3C), ya que en los resultados de la composición química de la probeta 1 se obtuvieron un porcentaje de microaleantes de manganeso del 0.362% (observar figura 35).

PROBETA 2. (La muestra pertenece al soporte de fabricante Facchini año 2020). El resultado obtenido se muestra en la figura 42, se pueden observar mayor formación de ferrita en forma de granos no definidos (aumento de 200x), se puede observar también la formación de perlita ($\alpha + Fe_3C$) en pequeñas proporciones (oscuro)

Figura 42

Resultado de la Observación en el Microscopio de Facchini 2020



Nota. Elaboración Propia

Según los resultados en la composición química de la probeta 2 (tal como se muestra en la figura 36), se tienen microaleantes compuesto de cromo, manganeso y plomo en porcentajes de 0.039%, 0.526% y 0.005% respectivamente. Lo que indica la formación de carburos tales como el carburo de manganeso (Mn_3C), carburo de cromo (Cr_3C_2) y la perlita ($\alpha + Fe_3C$).

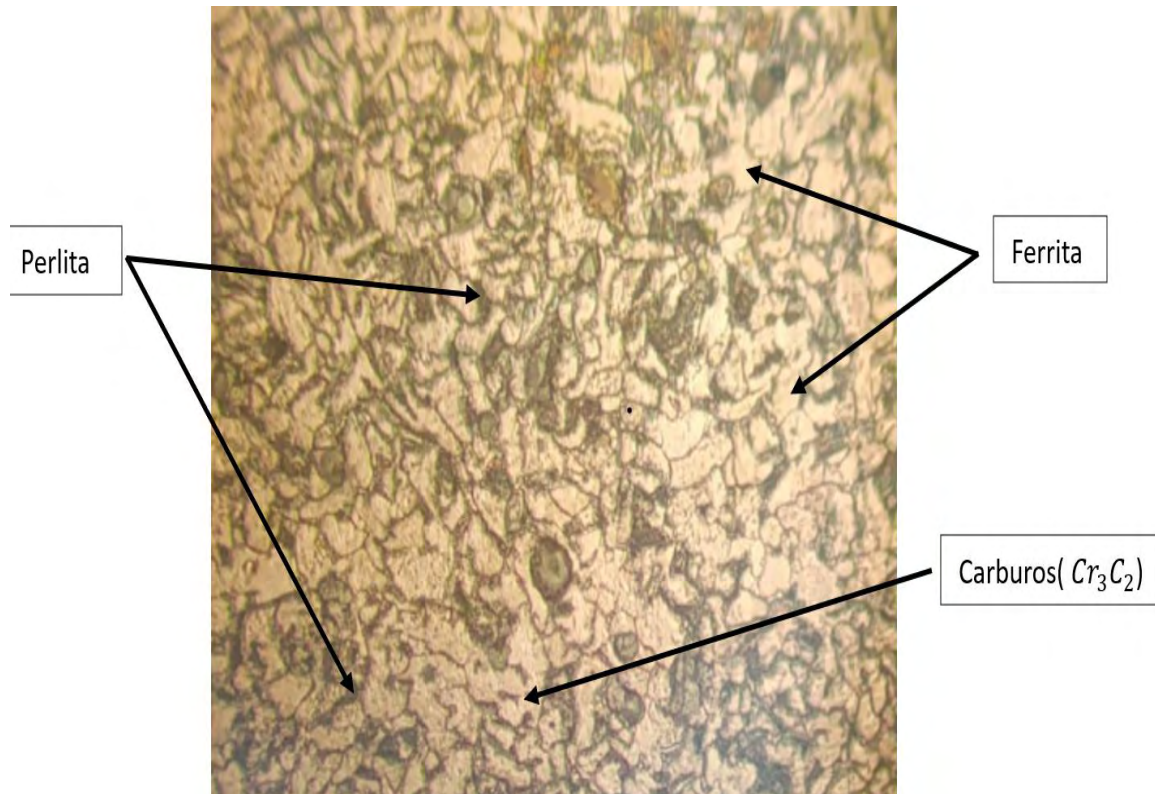
Los soportes del remolque de la empresa Facchini se observa que tienen: Buena resistencia mecánica y buena soldabilidad. La presencia de Mn y Cr significaría:

- Manganeso (Mn). Este elemento mejora la resistencia del acero, aumenta la tenacidad y ayuda en la soldabilidad
- Cromo (Cr). Este elemento se encuentra en muy baja cantidad (menor al 0.1% llamado traza o microaleación). El cromo mejora la resistencia al desgaste, aumentar durabilidad y contribuye (ligemente) a la resistencia a la corrosión.

En la figura 45 no se pudo distinguir el carburo de cromo, porque el cromo tiene bajo porcentaje (0.039%) en su composición química de la probeta 2.

Figura 43

Microestructura de la chapas de acero para mantenimiento



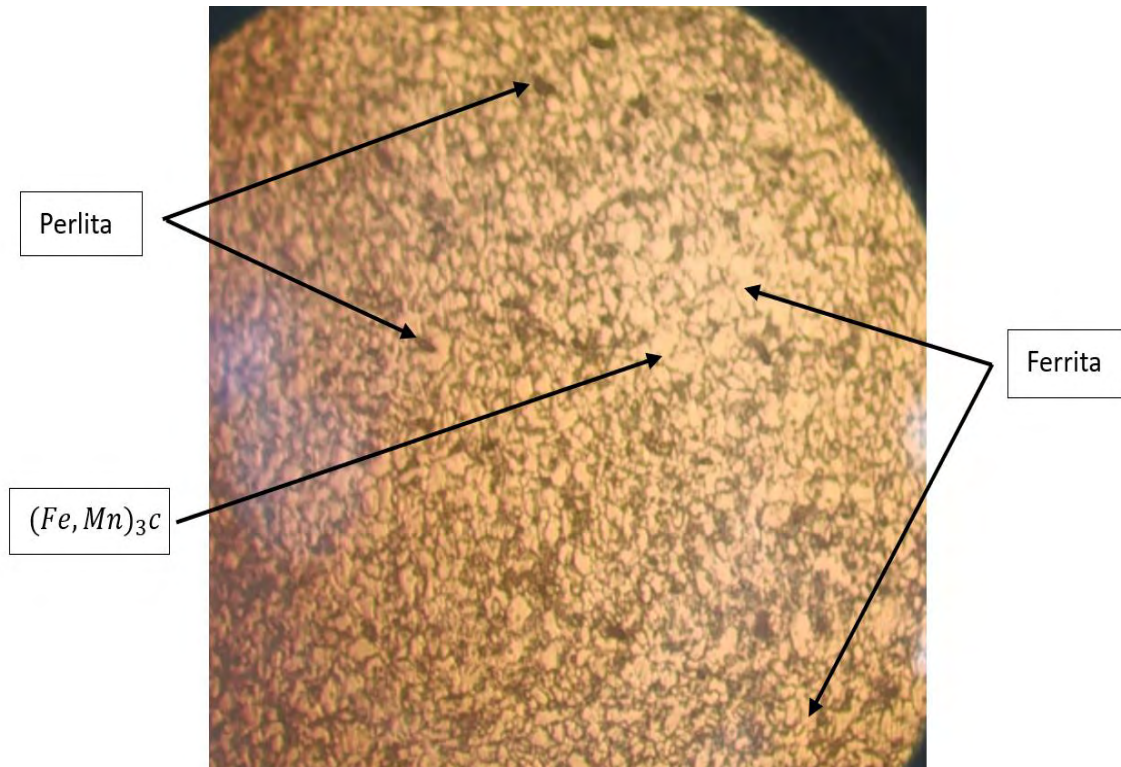
Nota. Elaboración Propia

PROBETA 3. (La muestra pertenece planchas de acero para mantenimiento de los soportes y los remolques en general). El resultado obtenido se muestra en la figura 43, se pueden observar mayor formación de ferrita (aumento de 500x), se distingue en los límites de grano la formación de perlita ($\alpha + Fe_3C$) en muy pequeñas proporciones. Según los resultados en la composición química de la probeta 3 (tal como se muestra en la figura 37), se tienen microaleantes compuestos de cromo, manganeso y plomo en porcentajes de 0.039%, 0.724% y 0.005% respectivamente. Lo que indica la formación de carburos tales como el carburo de manganeso (Mn_3C), carburo de cromo (Cr_3C_2) y el carburo de hierro formando la perlita (α

+ Fe_3C). Se puede percibir que se obtuvo la misma composición química que la probeta 2, solo se diferencian en sus porcentajes de hierro y manganeso.

Figura 44

Resultados de la de la microestructura de Randon 2010

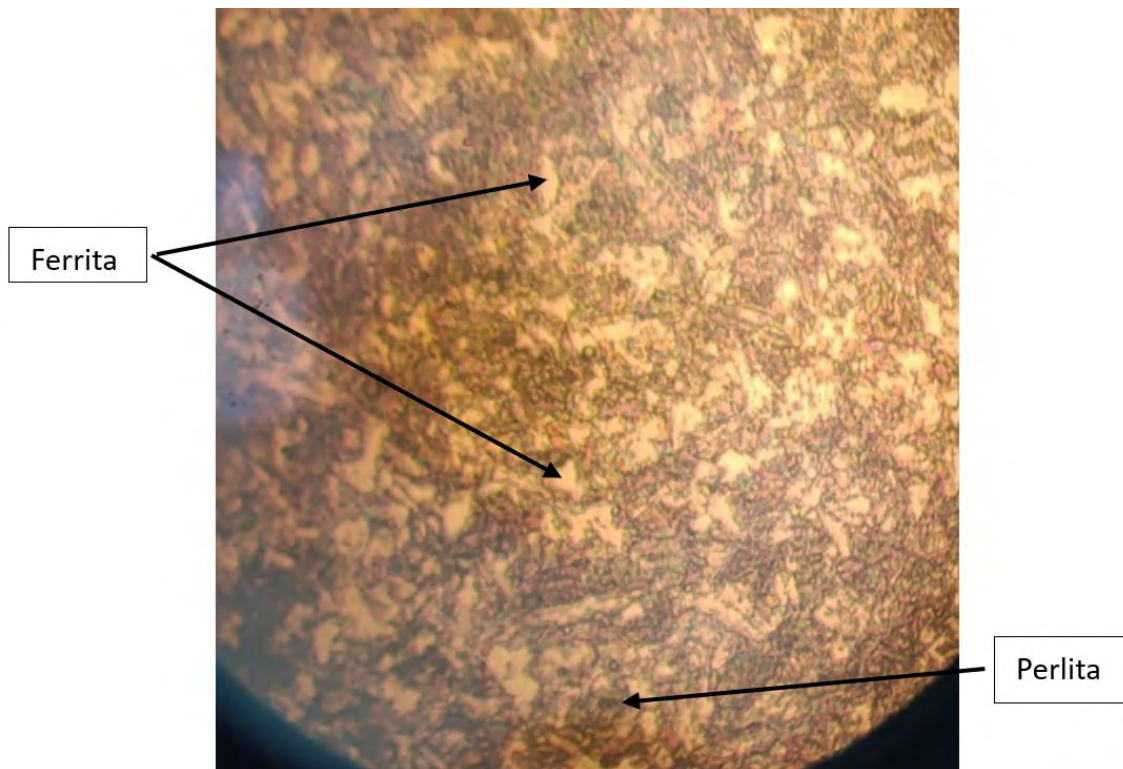


Nota. Elaboración Propia

PROBETA 4. (La muestra pertenece al soporte de fabricante Randon año 2010). El resultado obtenido se muestra en la figura 44, se pueden observar mayor formación de ferrita en forma de granos finos (aumento de 200x) y la formación de perlita ($\alpha + Fe_3C$) en muy pequeñas proporciones. Los carburos están contenidos en la ferrita, según los resultados en la composición química de la probeta 4 (tal como se muestra en la figura 38), se tienen microaleantes de mayor porcentaje de manganeso en un 1.12% (es la probeta con mayor porcentaje de manganeso), el titanio en un 0.063% y el plomo de 0.005%, esto indica la formación de carburos en proporciones muy pequeñas. Por la presencia de titanio en su composición química, afina el grano y contribuye a incrementar una mayor dureza de 68 HRB.

Figura 45

Resultados de la observación en el microscopio de Randon 2019



Nota. Elaboración Propia

PROBETA 5. (La muestra pertenece al soporte fracturado de fabricante Randon año 2019). El resultado obtenido se muestra en la figura 45, se pueden observar la formación de ferrita en forma de granos finos (aumento de 500x), con mayor formación de carburos, se puede observar también la formación de perlita ($\alpha + Fe_3C$) en muy pequeñas proporciones.

La formación de carburos, no dejan la formación de la ferrita en forma formal. La ferrita en tamaño de granos finos y la presencia de mayor cantidad de carburos hacen que la pieza tiende a fracturarse. Según los resultados en la composición química de la probeta 4 (tal como se muestra en la figura 39), se tienen microaleantes de manganeso en un 0.620% y el plomo de 0.005%. en comparación con la probeta 1 (probeta de la Rossetti que tiene manganeso en un 0.362%), que tienen casi los mismos elementos en su composición química, la diferencia es que la probeta 5 tiene mayor formación de carburos.

4.9.3 Observación de la Probeta Randon 2019

Al observar la probeta 5, en una zona que está cerca a la parte fracturada se puede distinguir el crecimiento de una fisura que no llega a la zona de fractura, tal como se muestra en la Figura 46. Esto indica que antes que una pieza llegue a fracturarse, se tuvo múltiples fisuras, y el crecimiento y la unión de estas múltiples fisuras hizo que la pieza llegue a fracturarse.

Figura 46

Observación de una Fisura en la Probeta 5, perteneciente a la empresa Randon 2019, es la probeta fracturada objeto de estudio



Nota. Elaboración Propia

4.10. Pruebas de Dureza Rockwell, realizadas en el laboratorio de metalurgia física de la UNSAAC

En la prueba dureza Rockwell se utilizó una punta de carbono (indentador piramidal) bajo carga. Para medir la profundidad de una huella producida por el penetrador cuando se aplica una carga específica. A diferencia de otros métodos, no se mide el tamaño de la marca, sino que mide que tan profundo entra el penetrador.

En el laboratorio de metalurgia física de la UNSAAC de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica se puede observar una máquina de dureza Rockwell (Figura 47), que se conecta al computador o laptop, porque tiene un software que registra las pruebas realizadas.

Figura 47

Preparación de la Máquina de dureza Rockwell, para las pruebas de dureza en las 5 probetas



Nota. Elaboración Propia

4.10.1 Tipos de Dureza Realizadas con la Dureza Rockwell

Las pruebas de dureza Rockwell realizados en el laboratorio fueron HRC y HRB:

- Prueba HRC (Rockwell C). Usamos un penetrador de diamante (de alta dureza) y se aplicó una carga de 150kgf, pero los resultados salieron datos numéricos negativos. Fue entonces que cambiamos otro penetrador.

Tabla 11*Pruebas de Dureza Realizadas en las 5 Probetas de los Diferentes Soportes*

TIPO DE PRUEBAS	HRB	HRB PROMEDIO
PROBETA 1. Rossetti 2015	41.2	43.0
	44.9	
	43.4	
PROBETA 2. Facchini 2020	51.8	51.0
	50.2	
	51.7	
PROBETA 3. Chapa para mantenimiento en General	56.2	56.5
	56.9	
	56.2	
PROBETA 4. Randon 2010	68.6	68.3
	68.0	
	68.1	
PROBETA 5. Randon 2019	49.8	48.2
	46.6	
	49.3	

Nota. Elaboración Propia

- Prueba HRB (Rockwell B). Usamos un penetrador de carburo (menor dureza) y aplicamos una carga de 100kgf, obteniendo así datos numéricos positivos. Se realizaron 3 pruebas de dureza por probeta, para asegurar que el resultado sea confiable y representativo del material, estas pruebas se muestran en la Tabla 11.

4.11. Análisis de la Fractura de las 5 Probetas Sometidas a Ensayos de Tracción

Los datos obtenidos en el anexo II de esta tesis, de esfuerzo y deformación de las 5 probetas fueron proporcionados por la máquina de ensayo por tracción. En la figura 48 se observa una ilustración de las pruebas de fractura realizadas en las 5 probetas.

Figura 48

Imagen de la Máquina para las Pruebas de Fractura en las 5 Probetas



Nota. Imagen tomada en los laboratorios de la UNSA

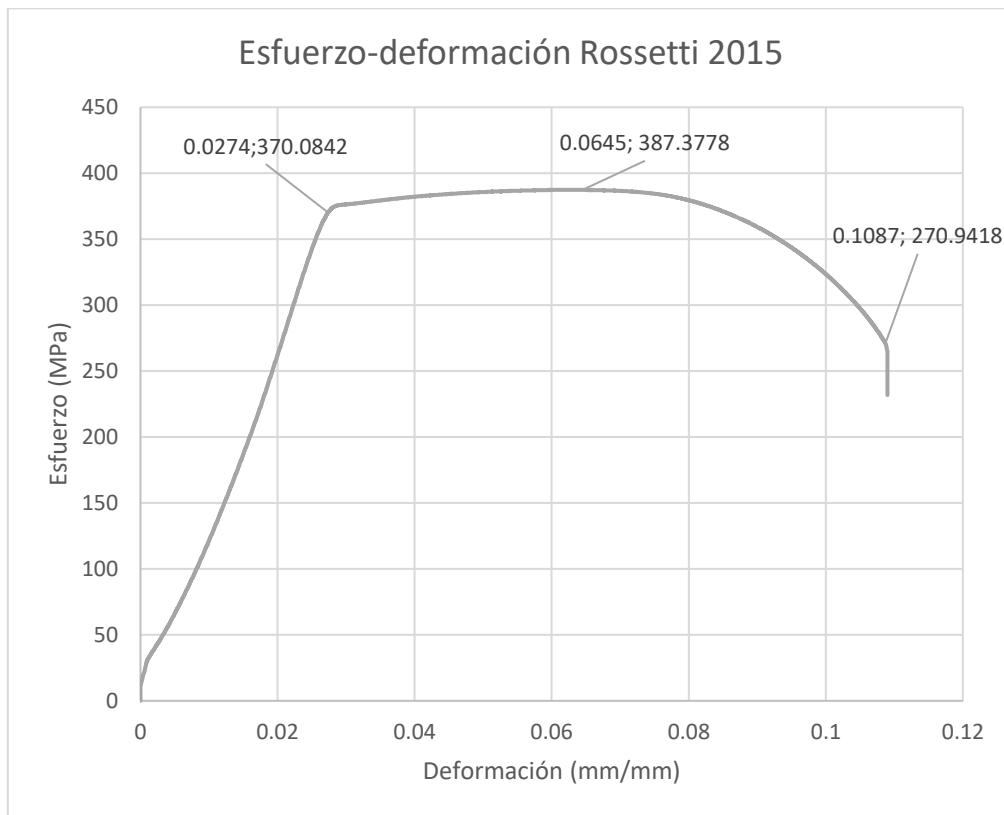
4.11.1 Análisis de la prueba de fractura de la muestra 1 perteneciente a la empresa

Rossetti del año 2015

Se realizó la prueba de fractura para la primera probeta, perteneciente a la empresa Rossetti 2015. La máquina para los ensayos de fractura proporcionó más de 3 mil datos, de esfuerzo y deformación, con esos datos se realizó el siguiente diagrama.

Figura 49

Diagrama de Esfuerzo-Deformación para rossetti2015



Nota. Imagen generada por la máquina para pruebas de tracción de la UNAS de Arequipa

El diagrama σ - ϵ presentado para Rossetti 2015 de la Figura 49, muestra el comportamiento típico de un acero estructural dúctil sometido a un ensayo de tracción. A partir de la curva se pueden identificar claramente las diferentes etapas mecánicas del material y deducir sus propiedades principales.

Al inicio de la curva se distingue una zona aproximadamente lineal, donde el esfuerzo aumenta proporcionalmente con la deformación. Esta región corresponde al comportamiento elástico del material, en el cual las deformaciones son reversibles y el material recupera su forma original al retirar la carga. La pendiente de esta parte representa el módulo de elasticidad.

Posteriormente, alrededor de una deformación de 0.0274 mm/mm y un esfuerzo cercano a 370 MPa, el material alcanza el límite de fluencia o cedencia. En esta etapa el acero

comienza a deformarse plásticamente. Esto indica una buena capacidad de deformación antes de la falla, característica propia de materiales dúctiles.

Después de la fluencia, la curva continúa aumentando lentamente hasta alcanzar el esfuerzo máximo o resistencia última, aproximadamente de 387 MPa a una deformación de 0.0645 mm/mm. En esta zona ocurre el endurecimiento por deformación, fenómeno mediante el cual el material incrementa temporalmente su resistencia debido a cambios internos en su estructura cristalina.

Una vez alcanzada la resistencia máxima, el esfuerzo comienza a disminuir progresivamente mientras la deformación continúa aumentando. Esta reducción indica el inicio de la estricción, donde la deformación se concentra en una región específica de la probeta disminuyendo el área transversal efectiva. Finalmente, la fractura ocurre aproximadamente en una deformación de 0.1087 mm/mm y un esfuerzo cercano a 271 MPa.

El comportamiento observado permite concluir que el material posee una elevada ductilidad, ya que soporta deformaciones relativamente grandes antes de fracturarse. Además, la diferencia entre el esfuerzo de fluencia y la resistencia máxima evidencia una capacidad moderada de endurecimiento por deformación.

4.11.2 Análisis de la prueba de fractura de la muestra 2 perteneciente a la empresa

Facchini del año 2020

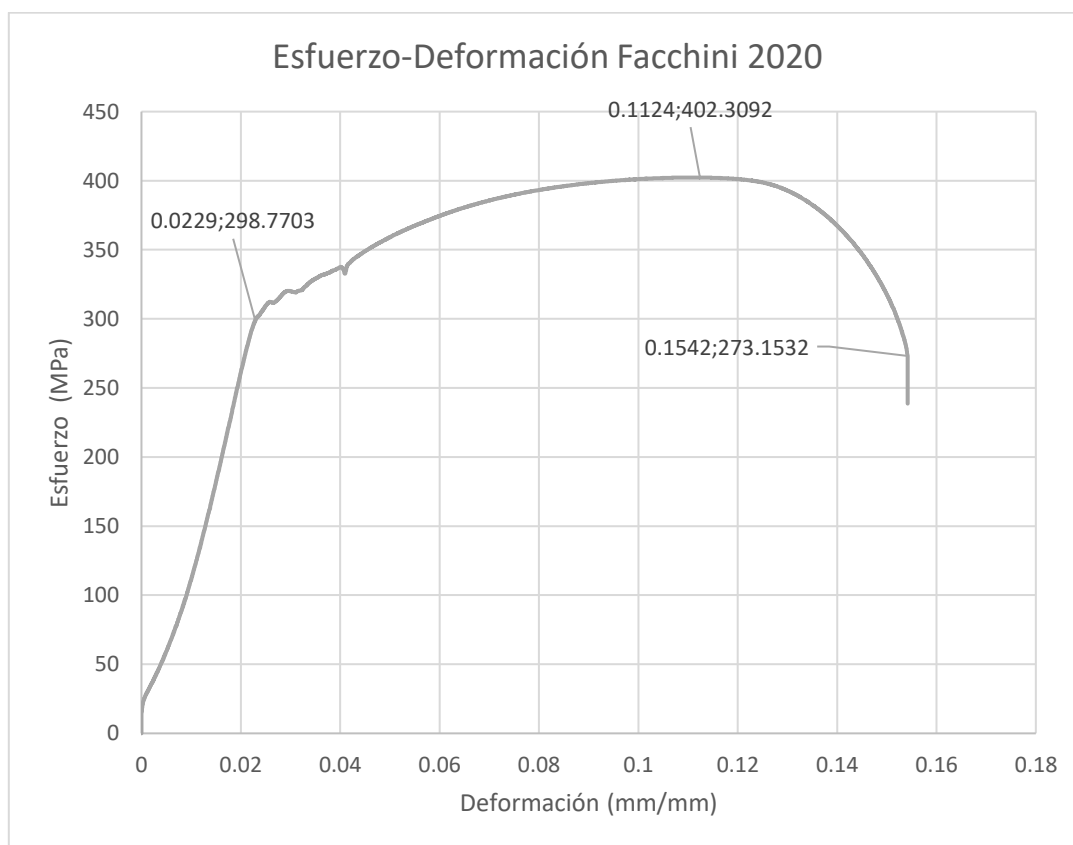
La prueba de fractura de la segunda probeta, perteneciente a la empresa Facchini 2020, se proporcionan más de 4 mil datos, con esos datos se realizó el diagrama esfuerzo-deformación que se muestra en la figura 50.

El diagrama σ - ϵ correspondiente al material Facchini 2020 evidencia un comportamiento mecánico claramente dúctil durante el ensayo de tracción. La curva muestra las diferentes etapas características de deformación y resistencia del material, permitiendo evaluar su capacidad de soportar cargas y deformaciones antes de la fractura.

En la primera parte del diagrama se aprecia una región lineal donde el esfuerzo aumenta proporcionalmente con la deformación. El límite de fluencia se presenta aproximadamente en una deformación de 0.0229 mm/mm con un esfuerzo cercano a 299 MPa. A partir de este punto el material entra en la región plástica, donde comienza a experimentar deformaciones permanentes. Se observa una ligera inestabilidad después de la fluencia, característica típica de algunos aceros durante la transición entre deformación elástica y plástica.

Figura 50

Diagrama Esfuerzo-Deformación para Facchini 2020



Nota. Imagen generada por la máquina para pruebas de tracción de la UNSA

Posteriormente, el material continúa incrementando su resistencia debido al fenómeno de endurecimiento por deformación. La curva alcanza un esfuerzo máximo o resistencia última de aproximadamente 402 MPa a una deformación de 0.1124 mm/mm. Este incremento

progresivo del esfuerzo indica que el material posee una buena capacidad para absorber energía antes de la falla.

Después de alcanzar la resistencia máxima, el esfuerzo disminuye gradualmente mientras la deformación continúa aumentando. Esta etapa corresponde al inicio de la estricción, donde la deformación se concentra localmente reduciendo el área transversal efectiva de la probeta. Finalmente, la fractura ocurre aproximadamente en una deformación de 0.1542 mm/mm y un esfuerzo cercano a 273 MPa.

El análisis general de la curva permite concluir que el material presenta una ductilidad considerablemente alta, ya que soporta grandes deformaciones antes de fracturarse.

4.11.3 Análisis de la prueba de fractura de la muestra 3 perteneciente a la chapa para mantenimiento

La prueba de fractura de la tercera probeta, perteneciente a las chapas que se usan para el mantenimientos de los soportes, se proporciona más de 4 mil datos, con esos datos se realizó el diagrama que se muestra en la figura 51.

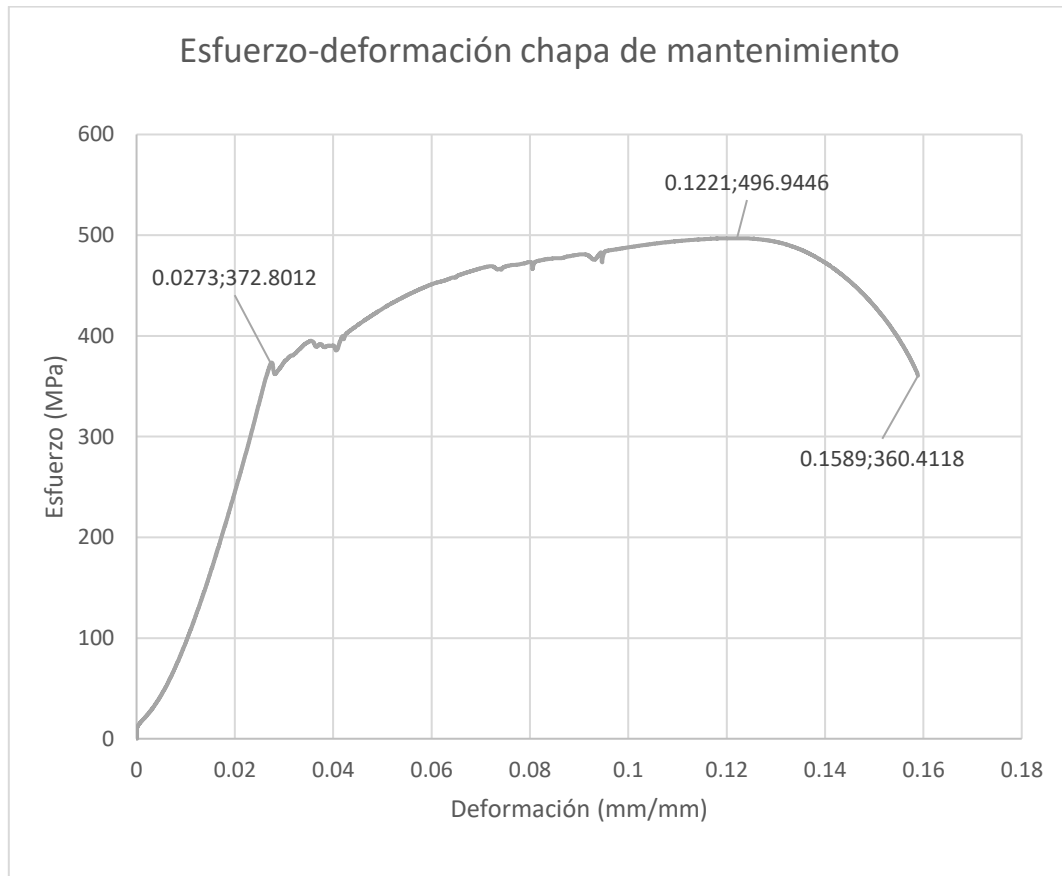
El diagrama esfuerzo–deformación correspondiente a la chapa de mantenimiento presenta un comportamiento típico de un material metálico dúctil con alta resistencia mecánica y considerable capacidad de deformación antes de la fractura. El límite de fluencia se alcanza aproximadamente en una deformación de 0.0273 mm/mm y un esfuerzo cercano a 373 MPa. A partir de este punto el material comienza a experimentar deformaciones plásticas permanentes. Se aprecia una ligera caída e irregularidad en la curva inmediatamente después de la fluencia, fenómeno asociado al inicio de la deformación plástica y al reacomodo interno de la estructura del material

Posteriormente, el material continúa aumentando su resistencia debido al endurecimiento por deformación. La curva asciende progresivamente hasta alcanzar el esfuerzo máximo o resistencia última de aproximadamente 497 MPa a una deformación de 0.1221

mm/mm. Este valor representa la máxima capacidad del material para soportar carga antes del inicio de la estricción.

Figura 51

Diagrama Esfuerzo-deformación para Chapa de Mantenimiento



Nota. Imagen generada por la máquina para pruebas de tracción de la UNSA

Después del esfuerzo máximo se evidencia una disminución gradual del esfuerzo mientras la deformación continúa aumentando. Esta etapa corresponde a la estricción, donde la deformación se localiza en una sección reducida de la probeta provocando la disminución efectiva del área transversal. Finalmente, la fractura ocurre aproximadamente en una deformación de 0.1589 mm/mm y un esfuerzo cercano a 360 MPa.

El comportamiento observado permite concluir que la chapa de mantenimiento posee una elevada resistencia mecánica y una ductilidad significativa.

Comparando esta curva con las anteriores, se puede observar que la chapa de mantenimiento presenta la mayor resistencia última, alcanzando aproximadamente 497 MPa, superior a los materiales Rossetti 2015 y Facchini 2020. Asimismo, mantiene una deformación considerable antes de fracturarse, lo cual sugiere una combinación favorable de resistencia y ductilidad.

Desde el punto de vista estructural, este comportamiento es ventajoso porque el material puede soportar altos niveles de esfuerzo sin fracturarse de manera súbita. La presencia de deformaciones visibles antes de la falla proporciona un margen de seguridad importante en aplicaciones sometidas a cargas elevadas o condiciones de servicio severas.

4.11.4 Análisis de la prueba de fractura de la muestra 4 perteneciente a la empresa

Randon 2010

La prueba de fractura de la cuarta probeta, perteneciente al soporte de la empresa Randon año 2010, se proporciona más de 3 mil datos, con esos datos se realizó el diagrama que se muestra en la figura 52

. La curva obtenida durante el ensayo de tracción permite identificar claramente las etapas de deformación elástica, fluencia, endurecimiento por deformación, estricción y fractura.

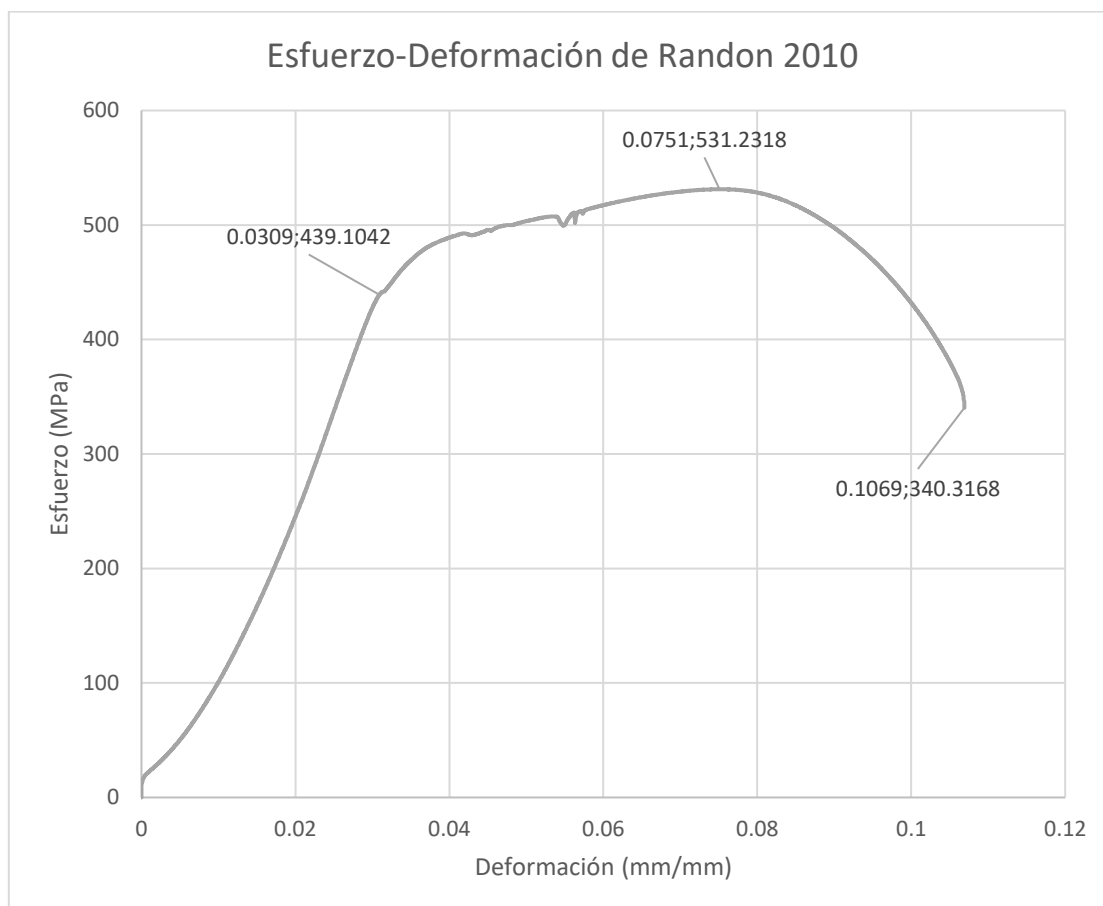
En la primera parte de la gráfica se observa una región lineal donde el esfuerzo aumenta proporcionalmente con la deformación. Esta zona corresponde al comportamiento elástico del material, en el cual las deformaciones son temporales y desaparecen al retirar la carga aplicada.

La pendiente de esta región representa el módulo de elasticidad, indicador de la rigidez del acero. El límite de fluencia se presenta aproximadamente en una deformación de 0.0309 mm/mm y un esfuerzo cercano a 439 MPa. Este valor evidencia que el material posee una resistencia al inicio de la deformación plástica considerablemente alta en comparación con

otros materiales estructurales convencionales. A partir de este punto comienzan las deformaciones permanentes del material.

Figura 52

Diagrama de Esfuerzo-Deformación de Randon 2010



Nota. Imagen generada por la máquina para pruebas de tracción de la UNSA

Posteriormente, la curva continúa aumentando debido al fenómeno de endurecimiento por deformación. El material alcanza una resistencia máxima o esfuerzo último de aproximadamente 531 MPa a una deformación de 0.0751 mm/mm, valor que representa la máxima capacidad resistente de la probeta durante el ensayo. Este comportamiento demuestra una elevada capacidad de soportar cargas antes del inicio de la falla localizada.

Luego del esfuerzo máximo, la curva muestra una disminución gradual del esfuerzo mientras la deformación sigue aumentando. Esta etapa corresponde a la estricción, fenómeno

en el cual la deformación se concentra en una zona específica reduciendo progresivamente el área transversal efectiva de la probeta. Finalmente, la fractura ocurre aproximadamente en una deformación de 0.1069 mm/mm y un esfuerzo cercano a 340 MPa.

El análisis general del diagrama permite concluir que el material Randon 2010 posee una combinación favorable de alta resistencia mecánica y ductilidad moderada. El elevado límite de fluencia y la alta resistencia última indican que el material puede soportar grandes esfuerzos antes de deformarse permanentemente o fracturarse.

Comparando esta curva con las obtenidas para Rossetti 2015, Facchini 2020 y la chapa de mantenimiento, el material Randon 2010 presenta la mayor resistencia última, alcanzando aproximadamente 531 MPa, lo que evidencia un comportamiento mecánico superior en términos de capacidad resistente. Sin embargo, su deformación a la fractura es menor que la observada en Facchini 2020 y en la chapa de mantenimiento, indicando una ductilidad relativamente más limitada. Desde el punto de vista estructural, este comportamiento resulta adecuado para aplicaciones donde se requiere alta capacidad resistente y buena absorción de energía, manteniendo un comportamiento dúctil que evita fallas frágiles repentinas.

4.11.5 Análisis de la prueba de fractura de la muestra 5 perteneciente a la empresa

Randon 2019

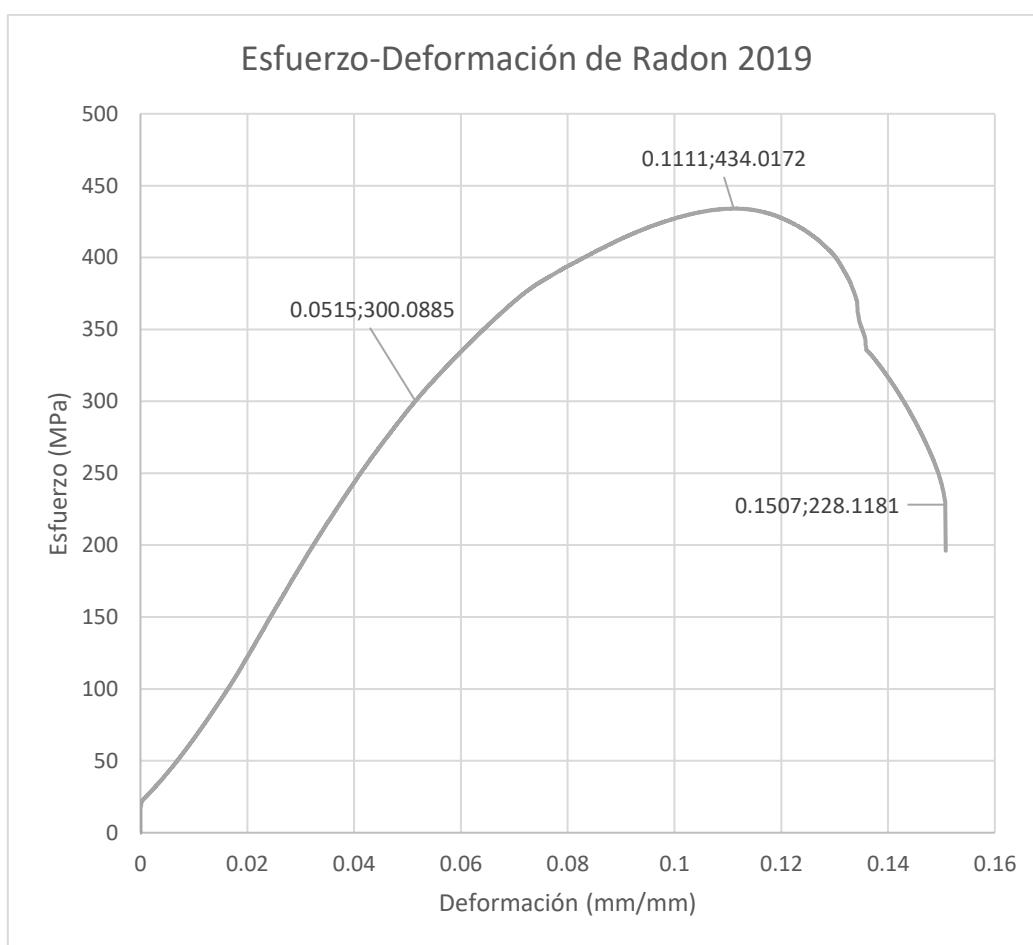
La prueba de fractura de la quinta probeta, perteneciente al soporte de la empresa Randon 2019, es el soporte fracturado objeto de estudio, se proporciona más de 4 mil datos, con esos datos se realizó el diagrama que se muestra en la figura 53.

El diagrama esfuerzo–deformación correspondiente al material Randon 2019 presenta un comportamiento típicamente dúctil, caracterizado por una amplia capacidad de deformación antes de la fractura y una evolución progresiva de la resistencia durante el ensayo de tracción. La curva permite identificar las principales etapas mecánicas del material y evaluar su desempeño estructural.

En la región inicial del diagrama se observa una etapa aproximadamente lineal donde el esfuerzo aumenta proporcionalmente con la deformación. Esta zona corresponde al comportamiento elástico del material, en el cual las deformaciones son recuperables una vez retirada la carga. La pendiente inicial representa la rigidez o módulo de elasticidad del material.

Figura 53

Diagrama de Esfuerzo-Deformación Radon 2019, probeta del soporte fracturado



Nota. Imagen generada por la máquina para pruebas de tracción de la UNSA

El límite de fluencia se identifica aproximadamente en una deformación de 0.0515 mm/mm y un esfuerzo cercano a 300 MPa. A partir de este punto el material entra en la región plástica, iniciándose deformaciones permanentes. Comparado con otros materiales analizados, el inicio de la fluencia ocurre a una deformación relativamente mayor, lo que indica una transición más gradual entre el comportamiento elástico y plástico.

Después de la fluencia, la curva continúa aumentando de manera sostenida debido al fenómeno de endurecimiento por deformación. El material alcanza un esfuerzo máximo o resistencia última de aproximadamente 434 MPa a una deformación de 0.1111 mm/mm. Este comportamiento evidencia una buena capacidad de absorción de energía y resistencia mecánica antes de la aparición de la falla localizada.

Posteriormente, la curva presenta una disminución progresiva del esfuerzo mientras la deformación continúa aumentando. Esta etapa corresponde a la estricción, fenómeno asociado a la reducción localizada del área transversal de la probeta. Finalmente, la fractura ocurre aproximadamente en una deformación de 0.1507 mm/mm y un esfuerzo cercano a 228 MPa.

El análisis general permite concluir que el material Randon 2019 posee una ductilidad elevada, ya que alcanza deformaciones relativamente grandes antes de fracturarse. La amplia región plástica observada en la curva indica una importante capacidad de deformación permanente y absorción de energía antes de la falla.

En comparación con los demás materiales analizados, Randon 2019 presenta una resistencia última intermedia, inferior a la observada en Randon 2010 y en la chapa de mantenimiento, pero superior a Rossetti 2015. Sin embargo, destaca por su elevada deformación antes de la fractura, característica favorable en aplicaciones donde se requiere capacidad de deformación y comportamiento seguro ante cargas variables o impactos.

4.11.6 Cálculo de la Ductilidad de las Probetas

La ductilidad se interpreta a partir de dos parámetros obtenidos en el ensayo de tracción: el porcentaje de elongación y el porcentaje de reducción de área (estricción). Ambos indican la capacidad del material para deformarse plásticamente antes de fracturarse.

- **PORCENTAJE DE ELONGACIÓN.** La elongación representa el aumento porcentual de la longitud de la probeta después de la fractura respecto a su longitud inicial. La interpretación para la elongación es la siguiente.

Baja elongación posee baja ductilidad <10%

Elongación moderada posee una moderada ductilidad 10%-20%

Alta elongación posee alta ductilidad > 20%

Teniendo como referencia que todas las probetas poseían una longitud inicial de 50mm, después del ensayo de tracción se obtuvieron las siguientes longitudes finales que se muestran en la Tabla 12. Para calcular la elongación se usa la fórmula de la ecuación 2.

Hallamos la elongación para Rossetti 2015:

$$\varepsilon_{Rossetti} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\varepsilon_{Rossetti} = \frac{58 - 50}{50} \times 100\%$$

$$\varepsilon_{Rossetti} = 16\%$$

Tabla 12

Cálculo de la elongación

Probetas	L_0 (mm)	L_f (mm)	Aplicando Fórmula de la elongación
Rossetti 2015	50	58	16%
Facchini 2020	50	64	28%
Chapa para mantenimiento	50	62	24%
Randon 2010	50	53	6%
Randon 2019	50	59	18%

Nota. Elaboración propia

- **PORCENTAJE DE ESTRICCIÓN.** La reducción de área mide la disminución del área transversal en la zona de estricción antes de la fractura. Y se Interpreta de la siguiente forma:

A menor reducción de área posee menor ductilidad, < 20% (acero frágil)

Una reducción de área que va de 20%- 40% posee una ductilidad moderada

Mayor reducción de área posee mayor ductilidad, >40% (acero dúctil)

Teniendo como referencia que todas las probetas poseían un largo inicial (W_0) y ancho inicial (T_0)), después del ensayo de tracción se obtuvieron los largos y anchos finales, que se muestran en la Tabla 13: para calcular la estricción se usa la fórmula de la ecuación 3.

Hallamos la estricción para Rossetti 2015:

$$Z_{Rossetti} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\%$$

$$Z_{Rossetti} = \frac{61 - 16.5}{61} \times 100\%$$

$$Z_{Rossetti} = 72.95\%$$

Tabla 13

Cálculo de la estricción

PROBETAS	W_0 (mm)	T_0 (mm)	A_0 (mm²)	W_f (mm)	T_f (mm)	A_f (mm²)	Aplicando Formula de Estricción
Rossetti 2015	10	6.1	61	5.5	3	16.5	72.95%
Facchini 2020	9	5	45	4.6	2.9	13.34	70.36%
Chapa para mantenimiento	9.6	6.3	60.48	5,1	3.3	16.83	72.17%
Randon 2010	9.1	6	54.6	5.5	3	16.5	69.78%
Randon 2019	10.2	8.5	86.7	4.3	3.9	16.77	80.66%

Nota. Elaboración propia

4.12. Análisis de fractografía, de la probeta Randon 2019

Esta prueba se realizó en la UNSA de Arequipa y los resultados obtenidos se describen en el anexo 4 de esta tesis. para la prueba de fractografía de la probeta 5 se realizó

con anterioridad una limpieza con acetona (C_3H_6O), resultando una estructura tal como se muestra en la Figura 54. El ensayo se realiza por el método de SEM (Microscopia Electrónica de Barrido), este ensayo se basa en la fundamentación teoría de fallas, Líneas de Chebrón, leyes de fluides de materiales, fractografía entre otros, basadas en normas como ASTM E3 / ASTM E3-11, ASTM E1181, ASTM E2331, ASTM E647, ASTM E399, entre otros.

Figura 54

Probeta Fracturada de la Randon 2019, Preparado para la prueba de Fractografía



Nota. Foto tomada en el Laboratorio de Metalografía y Microscopia Ingenierías-CIALE de la UNSA de Arequipa.

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1.Evaluación de resultados

Tabla 14

Cuadro para la Evaluación y Comparación de Pruebas Hechas en las 5 Probetas

PROBETA	Pruebas realizadas			
	Composición Química XRF	C. Q. por Espectrometría	Pruebas Metalográficas (aumento de 500x)	Dureza (HRB) Promedio
Probeta 1 Rossetti 2015	Fe=99.600% Mn=0.362%	C=0.1332% Mn=0.3849% P=0.0155% S=0.0149% Cr=0.0287% Fe=99.21%	Formación de ferrita en granos bien definidos, se distingue formación de perlita en los límites de grano de la ferrita.	43.0
Probeta 2 Facchini 2020	Fe=99.430% Cr=0.039% Mn=0.526% Pb=0.005%	C=0.1626% Mn=0.5226% P=0.0102% S=0.0023% Cr=0.0260% Ti=0.0009% Fe=99.10%	Presencia de perlita oscuro, pero en muy poca cantidad. También se distingue carburos (Cr_3C_2). La ferrita no bien definida.	51.0
Probeta 3 Chapa Para Mantenimiento en General	Fe=99.230% Cr=0.039% Mn=0.724% Pb=0.005%	C=0.1642% Mn=0.6810% P=0.0192% S=0.0174% Cr=0.0296% Ti=0.0015% Fe=98.91%	Se observa la ferrita en granos bien definido, en los límites de grano se ve la perlita, los carburos (Cr_3C_2) están contenidos en los granos de ferrita en muy pequeñas cantidades.	56.5
Probeta 4 Randon 2010	Fe=98.810% Mn=1.120% Ti=0.063% Pb=0.005%	C=0.1108% Mn=1.083% P=0.0154% S=0.0052% Cr=0.0179% Ti=0.0348% Fe=98.50%	Se observa granos finos de ferrita, perlita en pequeñas proporciones y se observa también la presencia de carburos ($(Fe, Mn)_3C$) contenidos en la ferrita.	68.3
Probeta 5 Randon 2019 Pieza fracturada	Fe=99.370% Mn=0.620% Pb=0.005%	C=0.1725 Mn=0.5840% P=0.0142% S=0.0121% Cr=0.0158% Ti=0.0006% Fe=99.03%	Se observa la presencia de granos finos de ferrita y la perlita en la fase oscura. Se aprecia mayor formación de carburos.	48.2

Nota. Elaboración Propia

5.1.1 Evaluación de resultados de las pruebas de composición química, pruebas metalográficas y pruebas de dureza realizadas

De los resultados mostrados en la Tabla 14. Se puede analizar los siguientes puntos:

- La evaluación integral de los resultados obtenidos mediante fluorescencia de rayos X, espectrometría de emisión óptica por chispa, análisis metalográfico y ensayo de dureza evidencia diferencias significativas entre los materiales estudiados. Todas las muestras presentan una matriz predominantemente ferrítica, con presencia variable de perlita y carburos, siendo compatibles con aceros hipo-eutectoides debido a sus contenidos de carbono comprendidos entre 0,1108 % y 0,1725 %.
- Por otro lado, Randon 2019 presentó un mayor contenido de carbono respecto a Randon 2010; sin embargo, registró una menor dureza. Este comportamiento demuestra que la dureza de estos tipos de acero no depende exclusivamente del contenido de carbono, sino también de la concentración de elementos aleantes y microaleantes, del tamaño de grano y de la distribución de fases. La diferencia de propiedades entre ambos materiales evidencia, además, una posible modificación de la condición metalúrgica del acero empleado en la fabricación del componente en diferentes periodos.
- En relación con la fractura observada en el soporte de Randon 2019, la menor dureza no puede considerarse por sí sola como la causa de la falla. No obstante, constituye una característica relevante del material que debe ser correlacionada con su composición química, microestructura, propiedades mecánicas y condiciones de servicio. En particular, la acción combinada de las cargas cíclicas y las posibles condiciones de sobrecarga puede generar concentraciones de esfuerzos y acumulación progresiva de daño, favoreciendo la iniciación y propagación de fisuras por fatiga hasta alcanzar una condición crítica de fractura.

5.1.2 Evaluación general de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de tracción y la fractografía

Tabla 15

Influencia del manganeso y el titanio en la resistencia máxima a la tracción y la deformación de la fractura

PROBETAS	% Mn y Ti por XRF	%Mn y Ti por Espectrometría	Fluencia (Mpa)	Resistencia Máxima (Mpa)	Deformación de la Fractura (mm/mm)
Rossetti 2015	Mn=0.362	Mn=0.3849 Ti=0.0009	370	387.40	0.1087
Facchini 2020	Mn=0.526	Mn=0.5256 Ti=0.0009	298	402.31	0.1542
chapa para mantenimiento	Mn=0.724	Mn=0.6810 Ti=0.0015	372	496.97	0.1589
Randon 2010	Mn=1.120 Ti=0.063	Mn=1.083 Ti=0.0348	439	531.24	0.1069
Randon 2019	Mn=0.620	Mn=0.5840 Ti=0.0006	300	434.05	0.1507

Nota. Elaboración Propia

En la tabla 15, se analiza la influencia del titanio y el manganeso contenidos en los aceros extraídos como muestras:

- El contenido de manganeso determinado mediante espectrometría de emisión óptica por chispa, varió entre 0,3849 % y 1,083 %, mientras que el titanio presentó concentraciones entre 0,0006 % y 0,0348 %. La probeta Randon 2010 presentó los mayores contenidos de Mn y Ti, alcanzando 1,083 % y 0,0348 %, respectivamente, y

simultáneamente registró el mayor límite de fluencia (439 MPa) y la mayor resistencia máxima a la tracción (531,24 MPa). Este comportamiento puede estar relacionado con la contribución del manganeso al endurecimiento por solución sólida y con la posible acción microaleante del titanio, cuyos precipitados pueden contribuir al refinamiento de grano y al incremento de la resistencia mecánica.

- En contraste, la probeta Randon 2019, correspondiente al material fracturado, presentó menores contenidos de Mn (0,584 %) y Ti (0,0006 %), así como un límite de fluencia de 300 MPa y una resistencia máxima de 434,05 MPa. Estos valores representan reducciones de aproximadamente 31,7 % y 18,3 %, respectivamente, en comparación con Randon 2010. Sin embargo, Randon 2019 presentó una deformación a la fractura de 0,1507 mm/mm, superior a la registrada por Randon 2010 (0,1069 mm/mm), evidenciando una mayor capacidad de deformación plástica antes de la fractura.
- La comparación entre ambos materiales permite establecer que Randon 2010 presenta un comportamiento caracterizado por mayor resistencia mecánica y menor deformabilidad, mientras que Randon 2019 presenta menor resistencia y mayor capacidad de deformación. Esta diferencia puede estar relacionada con las variaciones en la composición química, microestructura y condiciones de procesamiento de los materiales. En el caso del soporte fracturado, el menor límite de fluencia implica que, ante una determinada condición de sobrecarga, el material podría alcanzar la región plástica con menores niveles de esfuerzo. Si estas condiciones se combinan con sollicitaciones cíclicas durante el servicio, podrían favorecer la acumulación progresiva de daño, la iniciación y propagación de fisuras por fatiga y, finalmente, la fractura del componente.

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Presentación de Resultados

6.1.1 Composición Química de las Probetas

Se analizó la composición química de cinco probetas de acero, mediante dos pruebas la XRF y la espectrometría de emisión óptica por chispa, cuyos resultados se muestran en la Tabla 16 y Tabla 17 simultáneamente:

Tabla 16

Resultados de la composición química por ensayo de XRF

PROBETA	Fe (%)	Mn (%)	OTROS
Rossetti 2015	99.60	0.362	-----
Facchini 2020	99.43	0.526	Cr=0.039 Pb=0.005
chapa para mantenimiento	99.23	0.724	Cr=0.039 Pb=0.005
Randon 2010	98.81	1.12	Ti=0.063 Pb=0.005
Randon 2019	99.37	0.62	Pb=0.005

Nota. Elaboración propia

Tabla 17

Resultados de la Composición Química de las Probetas Obtenidas por Espectrometría

Probeta	Fe (%)	Mn (%)	C (%)	Otros elementos
1	99.21	0.3849	0.1332	Ti, Si, Cr, Mo, P, S, Al Pb, otros.
2	99.10	0.5256	0.1626	Ti, Si, Cr, Mo, P, S, Al Pb, otros.
3	98.91	0.6810	0.1643	Ti, Si, Cr, Mo, P, S, Al Pb, otros.
4	98.50	1.083	0.1108	Ti, Si, Cr, Mo, P, S, Al Pb, otros.
5	99.03	0.5840	0.1725	Ti, Si, Cr, Mo, P, S, Al Pb, otros.

Nota. Elaboración Propia

6.1.2 Resultados Metalográficos (500x)

- Probeta 1: Predominio de ferrita en granos bien definidos, acompañado con perlita en los límites de grano.
- Probeta 2: Presencia de perlita oscuro, pero en muy poca cantidad. También se distingue carburos (Cr_3C_2). La ferrita no bien definida.
- Probeta 3: Se observa la ferrita en granos bien definido, en los límites de grano se ve la perlita, los carburos (Cr_3C_2) están contenidos en los granos de ferrita en muy pequeñas cantidades.
- Probeta 4: Se observa granos finos de ferrita, perlita en pequeñas proporciones y se observa también la presencia de carburos ($Fe, Mn)_3C$ contenidos en la ferrita.
- Probeta 5: Se observa la presencia de granos finos de ferrita y la perlita en la fase oscura.

6.1.3 Resultados de Dureza (HRB)

Tabla 18

Resultados de la dureza Rockwell en HRB de las 5 probetas

Probeta	Dureza mínima (HRB)	Dureza máxima (HRB)	Promedio
1	41.2	44.9	43.0
2	50.2	51.8	51.0
3	56.2	56.9	56.5
4	68.0	68.6	68.3
5	46.6	49.8	48.2

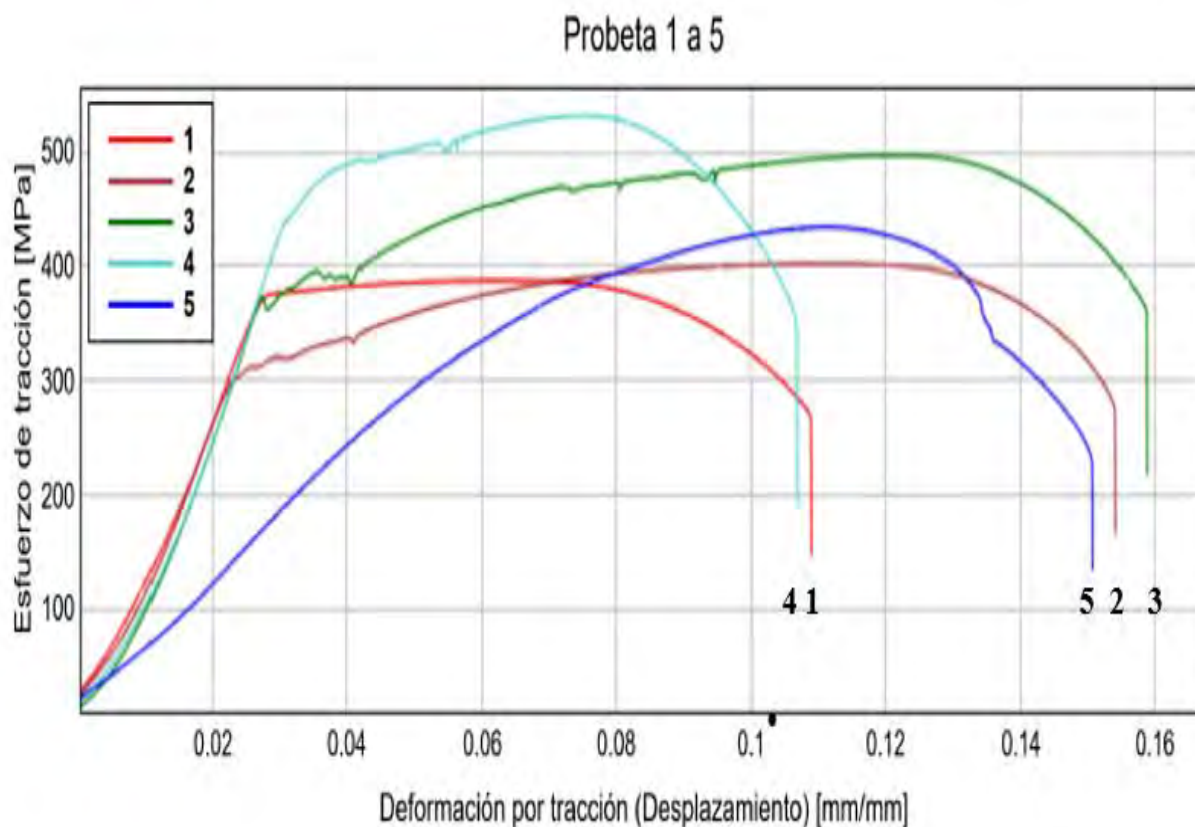
Nota. Elaboración propia

6.1.4 Resultados de los Ensayos de Tracción

Para realizar un análisis de comparación de los resultados de las pruebas de fractura por tracción de las 5 probetas, se unen los 5 diagramas en un solo diagrama. Los datos obtenidos nos proporciona la máquina de ensayo para la fractura.

Figura 55

Diagramas de Esfuerzo-Deformación de las 5 probetas Proporcionadas por la Maquina de Pruebas de Fractura



Nota. Diagrama proporcionadas en los laboratorios de la UNSA, este diagrama esta en el anexo II.

Según lo observado en el diagrama presentado en la Figura 55, se puede inferir que los fabricantes de soportes en Brasil, tienden actualmente a emplear aceros con mayor capacidad de deformación plástica y ductilidad. Esta selección responde a las condiciones de servicio a las que se encuentran sometidos estos componentes, debido a la acción de las cargas y esfuerzos cíclicos. El empleo de aceros con mayor capacidad de deformación permite que el material absorba y redistribuya toda la carga antes de alcanzar la fractura. Asimismo, las condiciones de servicio pueden generar endurecimiento localizado del material, particularmente en zonas

sometidas a deformación plástica, soldadura o concentraciones de esfuerzos. Este fenómeno puede modificar las propiedades mecánicas del acero y, dependiendo de su magnitud, influir en la iniciación y propagación de grietas por fatiga.

Por lo tanto, la tendencia hacia el empleo de aceros con mayor ductilidad puede interpretarse como una estrategia de diseño orientada a mejorar la capacidad de deformación, absorción de energía y resistencia al daño de los soportes, contribuyendo a incrementar su desempeño y vida útil bajo condiciones de carga cíclica.

Teniendo como referencia los diagramas de σ - ε anteriores y los resultados obtenidos en el anexo I, los calculos de elongación y estricción hallados, se presentan en la Tabla 19:

Tabla 19

Resultados obtenidos a partir de los ensayos de tracción

PROBETA	Fluencia (Mpa)	Resistencia Máxima (Mpa)	Deformación de la Fractura (mm/mm)	Elongación (%)	Estricción (%)
Rossetti 2015	370	387.40	0.1087	16%	72.95%
Facchini 2020	298	402.31	0.1542	28%	70.36%
Chapa para mantenimiento	372	496.97	0.1589	24%	72.17%
Randon 2010	439	531.24	0.1069	6%	69.78%
Randon 2019	300	434.05	0.1507	18%	80.66%

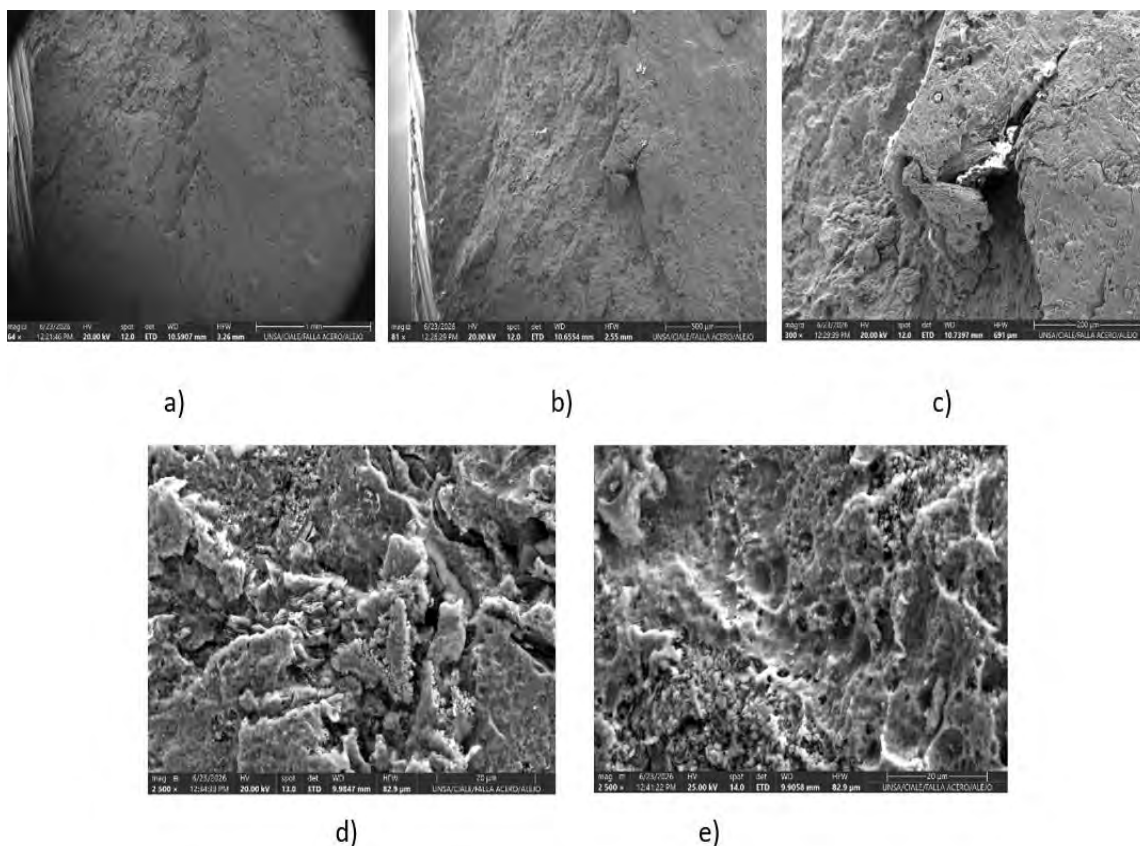
Nota. Elaboración Propia

6.1.5 Resultados de la Fractografía

Se realizó la fractografía en la probeta Randon 2019, cuyos resultados se aprecian en la Figura 56, y la interpretación se tiene en el anexo IV.

Figura 56

Imagen del ensayo de la fractografía en la probeta Randon 2019



Nota. estudio realizado en la UNSA de Arequipa: a) imagen a 64x, b) imagen a 81x, c) imagen a 300x, d) imagen a 2500x, e) imagen a 2500x. estas imágenes se encuentran en el anexo VII

6.1.6 Resultados de Evaluación Estructural del Soporte de Muelles tipo

Basculante – Tándem Camión Volquete de 50 ton

Según los resultados de ingeniero mecánico Hendrick Delgado, en el estudio de la evaluación estructural del soporte (anexo III), llega a las siguientes conclusiones:

- El análisis estructural del soporte de muelles tipo basculante mostró un esfuerzo equivalente de Von Mises aproximado de 175 MPa, valor inferior al límite de fluencia del acero ASTM A572 Gr 50 de 345 MPa, obteniéndose un factor de seguridad estático aproximado de 1.97, por lo que el componente no presenta falla

por fluencia estática.

- La simulación identificó concentraciones de tensiones principalmente alrededor del alojamiento del pasador como la parte superior (ver nodo 42744), donde predominan esfuerzos de compresión y corte asociados a una carga crítica vertical de aproximadamente 156 kN y una carga adicional inclinada proveniente del brazo del sistema tándem.
- Considerando un límite de fatiga aproximado equivalente al 50% del límite de fluencia del material (172.5 MPa), se verifica que el esfuerzo equivalente obtenido es cercano y ligeramente inferior a dicho valor, indicando muy alto riesgo de falla por fatiga durante operación prolongada bajo cargas cíclicas severas.
- Se concluye que la falla más probable del soporte de muelles, no ocurre por carga estática instantánea, sino por fatiga estructural acumulada causada por vibraciones, impactos y esfuerzos repetitivos durante la operación del vehículo.

6.2. Discusión de resultados

- En términos generales, los resultados muestran una clara relación entre la composición química, la microestructura y la dureza de los materiales analizados. El incremento del contenido de manganeso, la presencia de titanio y el refinamiento del tamaño de grano producen un aumento progresivo de la dureza y de la resistencia mecánica, mientras que las variaciones en el contenido de carbono modifican la proporción de perlita y la formación de carburos. No obstante, la ocurrencia de la fractura observada en la pieza de servicio demuestra que las propiedades mecánicas del material, por sí solas, no garantizan un comportamiento adecuado frente a la fatiga, siendo necesario considerar también el diseño estructural, la calidad de las uniones soldadas, las concentraciones de esfuerzo y las condiciones reales de operación del remolque.

- En la selección de los aceros para la fabricación de los soportes, los fabricantes (Randon, Facchini, Librelato, Rossetti, etc.), escogen aceros que tengan un patrón de comportamiento, según las gráficas de comportamiento de estos aceros aplicados a una fuerza de tracción, estos aceros ofrecen mayor deformación. Los fabricantes de soportes utilizan aceros que ofrezcan mayor deformación y menor dureza (según datos de la prueba de dureza Rockwell). Un acero con mayor deformación, indica que la probeta tiende a sufrir una deformación plásticas, antes de generar grietas en el acero y conllevar a la fractura (fractura dúctil), por otro lado un acero con mayor deformación, presenta también mayor resistencia a la fatiga, porque una fractura inicia cuando existen altos esfuerzos de tensión en la zona, que disminuye la resistencia del material, para generar estos esfuerzos de tensión, se necesita muchos trabajos cíclicos del soporte en un tiempo indeterminado.
- En conjunto, los ensayos de tracción demuestran que existe una relación directa entre la composición química, la microestructura, la dureza y el comportamiento mecánico de los aceros analizados. La probeta Randon 2010 presentó el mejor desempeño estructural por su mayor contenido de manganeso y titanio, su microestructura refinada y la mayor dureza. En contraste, la pieza fracturada Randon 2019 conservó un comportamiento dúctil durante el ensayo de tracción, lo que confirma que la fractura en servicio estuvo gobernada por un mecanismo de fatiga y no por una insuficiente resistencia estática del material. Estos resultados apoyan la hipótesis de que la vida útil del soporte del chasis depende no solo de las propiedades del acero, sino también de las condiciones de carga, el diseño geométrico y la presencia de concentradores de esfuerzos.

CONCLUSIONES

- Se determinó que la fractura observada en el soporte del chasis del remolque con tolva está relacionada con la acción combinada de las solicitaciones cíclicas de carga y descarga y las condiciones de sobrecarga durante el servicio. La repetición de estas solicitaciones genera una acumulación progresiva de daño en las zonas críticas del soporte, donde las concentraciones de esfuerzos favorecen la iniciación y propagación de fisuras. En consecuencia, los resultados obtenidos son compatibles con la hipótesis general, según la cual la sobrecarga y el trabajo cíclico del remolque contribuyen al desarrollo de una falla por fatiga que finalmente se manifiesta mediante la fractura del soporte.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en el cálculo de la estricción presentados en la Tabla 19, se observa que las probetas analizadas alcanzaron valores de reducción de área superiores al 40 %. Este resultado evidencia una elevada capacidad del material para experimentar deformación plástica antes de alcanzar la fractura. En términos generales, una mayor reducción porcentual del área transversal está asociada con una mayor ductilidad del acero, por lo que los resultados obtenidos permiten establecer que los materiales evaluados presentan un comportamiento predominantemente dúctil. Esta característica indica que, antes de producirse la fractura, el acero fue capaz de absorber una cantidad considerable de deformación plástica, lo cual es consistente con el comportamiento esperado de aceros estructurales de bajo contenido de carbono.
- El elemento que más influencia tiene en estos tipos de aceros, es el manganeso ya que se obtuvo resultados, con diferencias considerables, según la prueba de espectrometría. Con estos resultados se puede decir que, no solo el carbono actúa en el comportamiento mecánico de los aceros, también existen elementos aleantes como el manganeso y el titanio en el caso de las probetas de la empresa Randon.

RECOMENDACIONES

- En primer lugar, se recomienda seleccionar un material que presente un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica y tenacidad. Aunque la probeta 4 mostró los mayores valores de dureza, su microestructura con presencia significativa de carburos y grano fino puede incrementar la fragilidad del material, lo cual no es deseable en elementos estructurales sometidos a cargas variables o impactos. Por otro lado, la probeta 3 presenta una combinación más favorable, con una dureza intermedia y una microestructura compuesta por ferrita bien definida y perlita distribuida en los límites de grano, lo que le confiere mejores propiedades mecánicas globales.
- Asimismo, se recomienda controlar la microestructura del material durante el proceso de fabricación, buscando una distribución homogénea de ferrita y perlita. Se debe evitar la formación excesiva de carburos, ya que estos incrementan la dureza, pero disminuyen la ductilidad, aumentando el riesgo de falla frágil. Un tamaño de grano fino pero controlado es deseable, ya que mejora la resistencia sin comprometer significativamente la tenacidad.
- En cuanto a la composición química, es importante mantener bajos contenidos de carbono, lo cual favorece la ductilidad del material. El manganeso puede emplearse para mejorar la resistencia mecánica, pero su contenido debe ser controlado para evitar un endurecimiento excesivo. De igual manera, se debe limitar la presencia de elementos que favorezcan la formación de carburos en exceso.
- Desde el punto de vista del procesamiento, se recomienda aplicar tratamientos térmicos como el normalizado, con el fin de obtener una microestructura homogénea y refinar el tamaño de grano. Asimismo, se debe controlar la velocidad de enfriamiento para evitar la formación de fases frágiles que puedan comprometer el desempeño del soporte en servicio.

- Finalmente, en el diseño del soporte se deben considerar aspectos como la adecuada distribución de esfuerzos y la reducción de concentraciones de carga, con el fin de prevenir fallas prematuras. También se recomienda realizar inspecciones de control de calidad, tales como análisis metalográficos o ensayos no destructivos, especialmente en componentes críticos.
- En conclusión, el material más adecuado para la fabricación del soporte no es aquel que presenta la mayor dureza, sino el que ofrece la mejor combinación entre resistencia y tenacidad, siendo la condición representada por la probeta 3 la más recomendable dentro de las analizadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315370293>
- Arana Bilbao, J. L., & González Martínez, J. J. (2002). *Mecánica de fractura*. Universidad del País Vasco. <https://addi.ehu.es/handle/10810/9356>
- Avner, S. H. (1988). *Introducción a la Metalurgia física*. McGRAW-HILL.
- Baadkar, C. (2010). Semi-trailer structural failure analysis using finite element method [Tesis de maestría, University of Canterbury]
- Berrios Barcena, D. R. (2021). Procedimiento para el analisis del Crecimiento de fisuras por fatiga en componentes de acero bidimensionales utilizando simulacion numerica. *Tesis de doctorado*. Pontificia universidad Catolica del Peru, Lima , Peru.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (11th ed.). McGraw-Hill.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- Dieter, G. E. (1986). *Mechanical Metallurgy* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Donald R. Askeland, P. P. (2013). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Cengage Learning.
- Dowling, N. E. (2013). *Mechanical Behavior of Materials* (4th ed.). Pearson
- González-Velázquez, J. L. (2018). *Fractography and Failure Analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96969-5>
- Guadalupe Vadillo, M. (2007). Modelos de fracturas Ductil en Condiones Estaticas y Dinamicas. *Tesis doctoral*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- HIBBELER, R. (2017). *Mecánica de Materiales*. Pearson.

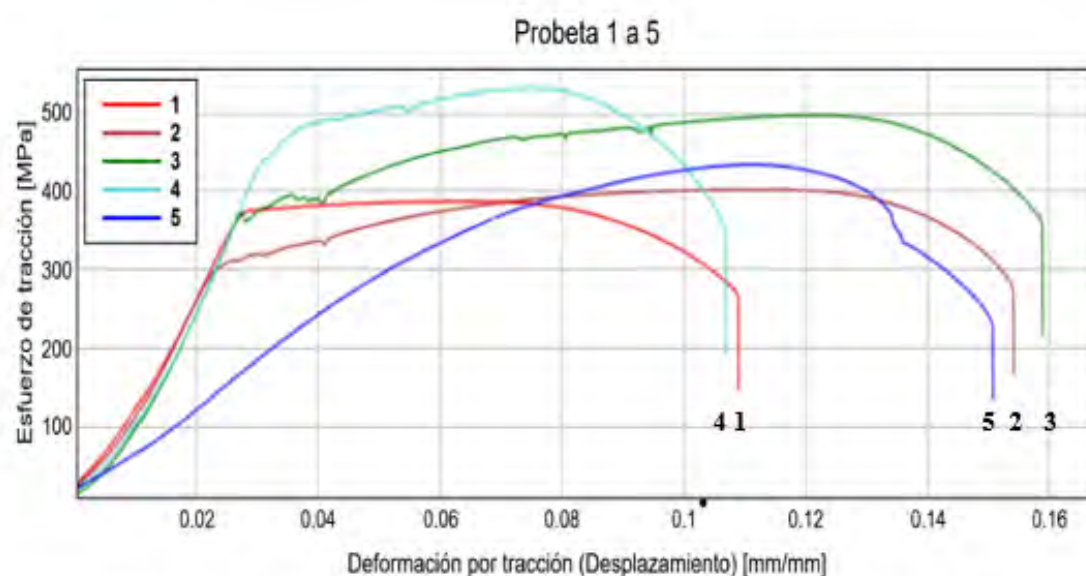
- Jaramillo, H., & Alba de Sánchez, N. C. (2018). *Mecánica de la fractura y análisis de falla en metales*. Universidad Autónoma de Occidente.
<https://red.uao.edu.co/entities/publication/f5f092ec-178b-4516-a48b-3b678d147fcc>
- Komori, K. (2019). *Ductile Fracture in Metal Forming: Modeling and Simulation*. Elsevier.
- Olson, D. L., Siewert, T. A., Liu, S., & Edwards, G. R. (Eds.). (1993). ASM Handbook, Volume 6: Welding, Brazing and Soldering. ASM International.
- Sánchez Mora, J. J. (2003). Comportamiento Térmico y Mecánico del Poli (etilén tereftalato)(PET) Modificado con Resinas Poliméricas Basadas en Bisfenol-A. *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Santos Teixeira, R. (2004). Metodologia de Analise de Fadiga em Componentes Estruturais de Aço Baseada na Mecânica da Fratura. *Tesis de Maestria*. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.

ANEXOS

ANEXO I. MATRIZ DE CONSISTENCIA

“ESTUDIO DE LA FRACTURA EN EL SOPORTE DEL CHASIS DEL REMOLQUE CON TOLVA PARA CAMIONES, EN CEILANDIA-DISTRITO FEDERAL DE BRASILIA- BRASIL”				
Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<i>Problema general:</i> ¿Cuáles serán las causas de la fractura en el soporte del chasis del remolque con tolva para camiones?	<i>Objetivo General:</i> Determinar las causas de la fractura en el soporte del chasis del remolque con tolva, para camiones	Hipótesis General: Por efecto de la sobrecarga y el trabajo cíclico de carga y descarga que realiza el remolque, se genera una fatiga anticipada en el soporte.	Dependiente Durabilidad del soporte de chasis	• Tipo de investigación Aplicada • Nivel de investigación Explicativo • Diseño de Investigación Experimental
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicos	Independiente	
PE1: ¿Cuáles serán las propiedades mecánicas y la composición química del acero del soporte fracturado? PE2: ¿Cuál será el mecanismo de fractura presentado en el soporte del chasis de acuerdo a las evidencias metalográficas o fractográficas? PE3: ¿Cuáles serán los niveles de esfuerzo desarrollados en la zona crítica del soporte bajo la condición de carga nominal y bajo sobrecarga estimada?	OE1: Caracterizar el acero del soporte fracturado evaluando su composición química, dureza microestructura, y otras propiedades. OE2: Identificar el mecanismo de fractura que se presenta en el soporte del chasis. OE3: Determinar los niveles de esfuerzos desarrollados en el soporte bajo carga nominal y bajo sobrecarga estimada.	HE1: La composición química y las propiedades mecánicas del acero del soporte presentan características de un acero estructural. HE2: El mecanismo de fractura predominante está asociado con un proceso de fatiga generado por la aplicación repetitiva de cargas, favorecido por concentraciones de esfuerzos en la zona crítica del soporte. HE3: Los niveles de esfuerzo en la zona crítica aumentan bajo condiciones de sobrecarga respecto de la carga nominal, pudiendo alcanzar o superar localmente el límite de fluencia y favorecer la iniciación de fisuras y el posterior desarrollo de falla por fatiga.	• Tipos de cargas aplicadas en los soportes. • Condiciones operativas del remolque. • Tipos de materiales utilizados en la fabricación de soportes.	

ANEXO II. DIAGRAMAS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LAS 5 PROBETAS PROPORCIONADOS POR LA MAQUINA DE PRUEBAS DE FRACTURA POR TRACCIÓN



	Etiqueta de la probeta	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Geometría	Velocidad 1 [mm/min]
1	p1	19/05/2026	19/05/2026	Rectangular	10.00
2	p1	19/05/2026	19/05/2026	Rectangular	10.00
3	p1	19/05/2026	19/05/2026	Rectangular	10.00
4	p1	19/05/2026	19/05/2026	Rectangular	10.00
5	p1	19/05/2026	19/05/2026	Rectangular	10.00

	Espesor [mm]	Anchura [mm]	Área calculada [mm ²]	Máximo Esfuerzo de tracción [MPa]	Fuerza en Máximo Esfuerzo de tracción [kN]
1	6.10	10.00	61.00	387.40	23.63
2	5.00	9.00	45.00	402.31	18.10
3	6.30	9.60	60.48	496.97	30.06
4	6.00	9.10	54.60	531.24	29.01
5	8.50	10.20	86.70	434.05	37.63

Nota. El ensayo de tracción fue realizado en la UNSA de Arequipa, y los resultados obtenidos se muestran en las gráficas de esfuerzo y deformación, de la imagen del anexo II, de las numeraciones en la gráfica: 1 representa a las muestra de Rossetti 2015, 2 Facchini 2020, 3 chapa para mantenimiento, 4 Randon 2010 y 5 es la probeta de la pieza fracturada de Randon 2019.

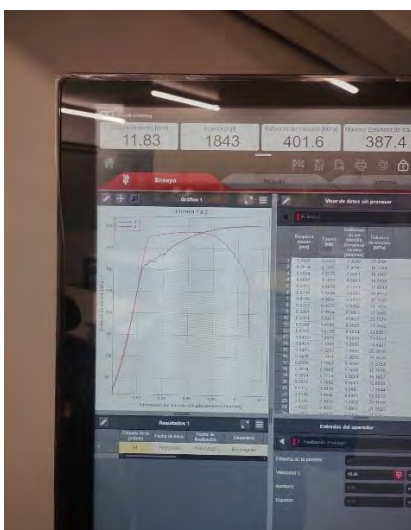
ANEXO III: Preparación y medición de las probetas



ANEXO IV: Ejecución de las pruebas de fractura por tracción



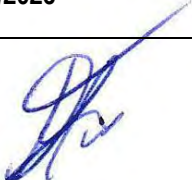
ANEXO V: Lectura de los resultados obtenidos en las pruebas de tracción





**ANEXO VI. “EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL
SOPORTE DE MUELLES TIPO BASCULANTE –
TANDEM CAMION VOLQUETE DE 50 TON”**

REV. A

	Elaborado Por:	Revisado Por:	Aprobado Por:
Cargo:	P. Mecánico	S. Mecánico	S. Mecánico
Nombre:	Hendrick Delgado	Diego Olarte	Diego Olarte
Fecha:	26/05/2026	26/05/2026	26/05/2026
Firma:			

CUSCO - 2026

	INFORME TÉCNICO	DN-26052026-IT-001
	"EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL SOPORTE DE MUELLES TIPO BASCULANTE – TANDEM CAMIÓN VOLQUETE DE 50 TON"	REV.A FECHA: 26-MAY - 2026

1. INTRODUCCION

El sistema de suspensión trasera en camiones volquete de gran capacidad cumple una función fundamental en la transmisión y distribución de cargas entre el chasis y los ejes posteriores. Dentro de este sistema, el soporte de muelles tipo basculante constituye un componente crítico, debido a que soporta esfuerzos combinados producidos por el peso bruto vehicular, las cargas dinámicas del terreno y las sollicitaciones derivadas de la operación del vehículo.

El presente informe desarrolla la evaluación estructural del soporte de muelles tipo basculante perteneciente al sistema tándem de un camión volquete de 50 toneladas de capacidad. Para ello, se realizó un análisis mediante el método de elementos finitos utilizando el software ANSYS Mechanical – Static Structural, considerando condiciones de carga representativas de operación.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento estructural del soporte de muelles tipo basculante del sistema tándem de un camión volquete de 50 toneladas mediante simulación por elementos finitos.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Determinar la distribución de esfuerzos.
2. Identificar zonas críticas de concentración de tensiones.
3. Evaluar esfuerzos principales.
4. Analizar el estado tensional mediante tensor de tensiones.
5. Verificar el comportamiento estructural bajo carga estática.

3. ALCANCE

El presente estudio comprende el análisis estructural estático del soporte de muelles tipo basculante perteneciente al sistema de suspensión tándem posterior de un camión volquete de 50 toneladas.

El análisis incluye modelado geométrico, propiedades del material, generación de malla, aplicación de restricciones y cargas equivalentes, evaluación de tensiones equivalentes de Von Mises, deformaciones y esfuerzos principales.

4. PROPIEDADES DEL MATERIAL

El material del elemento a analizar es: ASTM A572 Gr 50

- Módulo de elasticidad: 200 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0.30
- Densidad: 7850 kg/m³
- Límite de fluencia: 345 MPa
- Resistencia última: 450 MPa


Diego Marcelo Olarte Montes
 GERENTE GENERAL

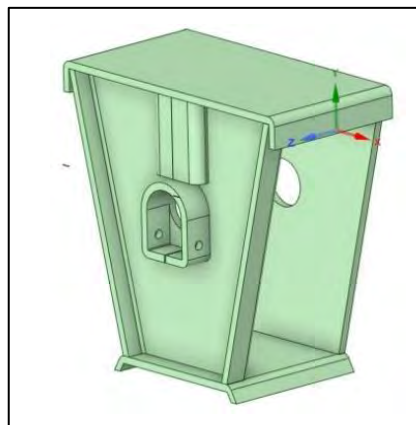
	INFORME TÉCNICO	DN-26052026-IT-001
	"EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL SOPORTE DE MUELLES TIPO BASCULANTE – TANDEM CAMION VOLQUETE DE 50 TON"	REV.A FECHA: 26-MAY - 2026

6. MODELADO DEL ELEMENTO

La geometría del soporte fue desarrollada en entorno CAD e importada al módulo ANSYS Mechanical para su análisis estructural. Durante el modelado se consideraron agujeros de conexión, radios de curvatura y superficies de aplicación de carga.

Figura 1

Soporte de Muelles Real - Modelo CAD 3D



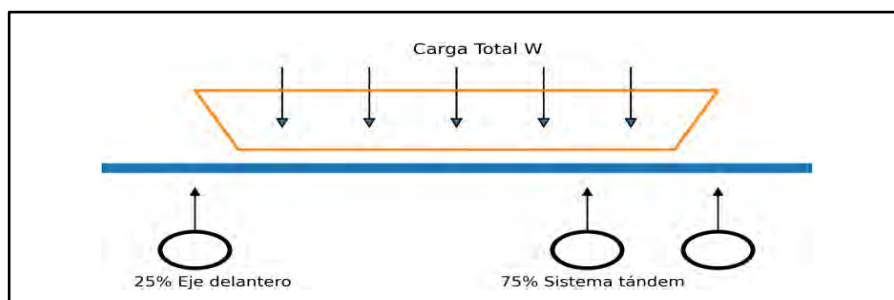
Nota: Elaboración propia.

7. APLICACIÓN DE CARGAS

La carga bruta total es: $m = 50925 \text{ Kg}$.

Figura 2

Distribución de carga 50-ton en puntos de apoyo.



Nota: Elaboración propia.

Carga equivalente:

$$W = m * g = 50925 \text{ Kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$W = 499574.25 \text{ N}$$

- 25% sobre eje delantero.
- 75% sobre sistema tándem posterior.


D&N
 INGENIERIA SERVICIOS Y PROYECTOS SAC

 Diego Marcelo Olarte Montes
 GERENTE GENERAL

Carga eje delantero:

$$W_f = 124893.56 \text{ N}$$

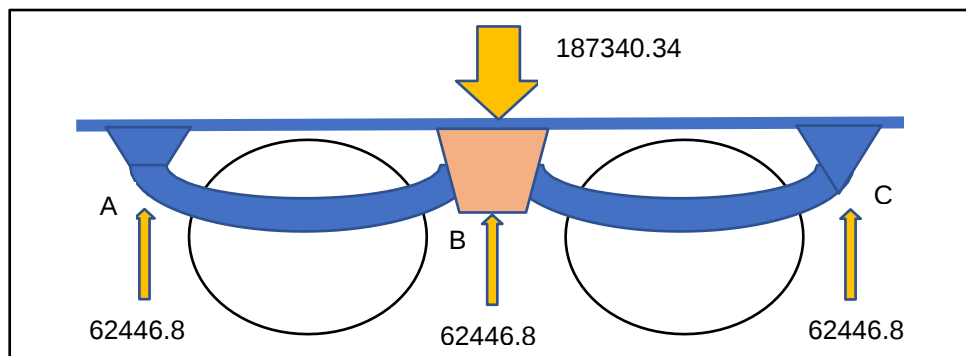
Carga sistema tándem o posterior:

$$W_p = 374680.69 \text{ N}$$

$$W_p \text{ lado derecho} = 187340.34 \text{ N}$$

Figura 3

Distribución de cargas verticales en puntos de apoyo sistema tandem.



Nota: Elaboración propia.

El análisis se ejecutará en el punto "B" por lo tanto.

 Por otro lado, además de la carga estática el análisis se efectúa aplicando un factor de mayoración dinámica de 2.5 teniendo así la W_c (W critico):

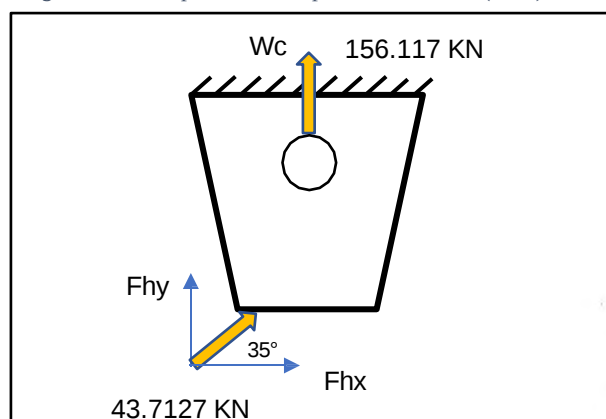
$$W_c = 2.5 * W_p = 156116.9 \text{ N}$$

 y la carga aplicada horizontalmente F_h respecto al brazo rigidizador del eje delantero será de 0.7:

$$F_h = 0.7 * W_p = 43127 \text{ N}$$

Figura 4

Diagrama de cuerpo libre de soporte de muelles. (DCL).



Nota: Elaboración propia.


D&N
 INGENIERÍA SERVICIOS Y PROYECTOS S.A.C.
 Diego Marcelo Olarte Montes
 GERENTE GENERAL

	INFORME TÉCNICO	DN-26052026-IT-001
	"EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL SOPORTE DE MUELLES TIPO BASCULANTE – TANDEM CAMION VOLQUETE DE 50 TON"	REV.A FECHA: 26-MAY - 2026

$$F_{hy} = F_h * \sin 35^\circ = 25.073 \text{ KN}$$

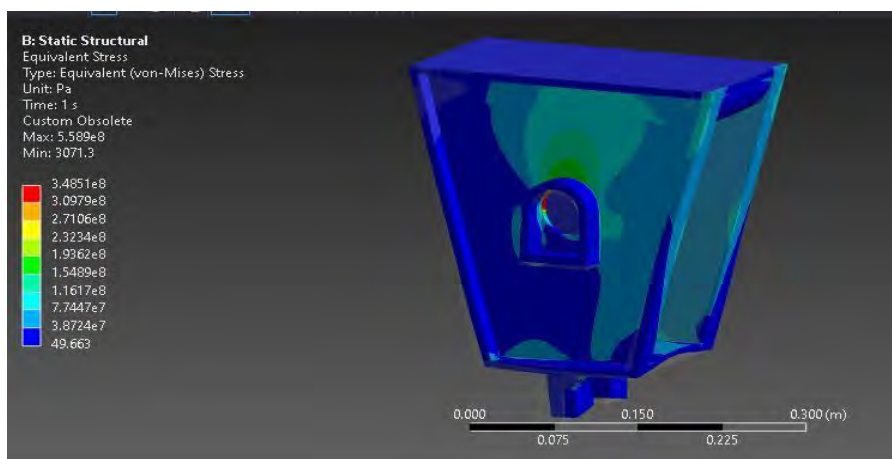
$$F_{hx} = F_h * \cos 35^\circ = 35.807 \text{ KN}$$

8. ANALISIS FEM

El análisis estructural del soporte de muelles tipo basculante fue desarrollado mediante el Método de Elementos Finitos (FEM) utilizando el software ANSYS Mechanical – Static Structural. El objetivo de la simulación fue evaluar el comportamiento mecánico del componente frente a las condiciones de carga representativas de operación del sistema tandem posterior del camión volquete de 50 toneladas.

Para el desarrollo del modelo numérico se consideró la geometría tridimensional del soporte, propiedades mecánicas del acero ASTM A572 Gr 50, condiciones de restricción equivalentes al montaje real y la aplicación de cargas verticales e inclinadas obtenidas del análisis de distribución de cargas del vehículo.

Figura 5
Simulación software ANSYS - Esfuerzos equivalentes.



Nota: Obtenido de ANSYS MECHANICAL.

Se verifican los esfuerzos normales y cortantes en el nodo 42474 obteniendo:

Figura 6
Esfuerzos normales y cortantes en el nodo 42474.

Graphics Annotations							
Type	Value	Note	Unit	Location X	Location Y	Location Z	Node ID
Result	8.0541e+005	Normal stress X	Pa	0.002720	-0.004495	0.201640	42474
Result	-1.7295e+008	Normal stress Y	Pa	0.002720	-0.004495	0.201640	42474
Result	64436	Normal stress Z	Pa	0.002720	-0.004495	0.201640	42474
Result	-1.5791e+007	Shear stress XY	Pa	0.002720	-0.004495	0.201640	42474
Result	-1.817e+005	Shear stress YZ	Pa	0.002720	-0.004495	0.201640	42474
Result	-25983	Shear stress XZ	Pa	0.002720	-0.004495	0.201640	42474

Nota: Obtenido ANSYS


D&N
 INGENIERIA SERVICIOS Y PROYECTOS S.A.C.
 Diego Marcelo Olarte Montes
 GERENTE GENERAL

	INFORME TÉCNICO	DN-26052026-IT-001
	"EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL SOPORTE DE MUELLES TIPO BASCULANTE – TANDEM CAMION VOLQUETE DE 50 TON"	REV.A FECHA: 26-MAY - 2026

Tabla 1

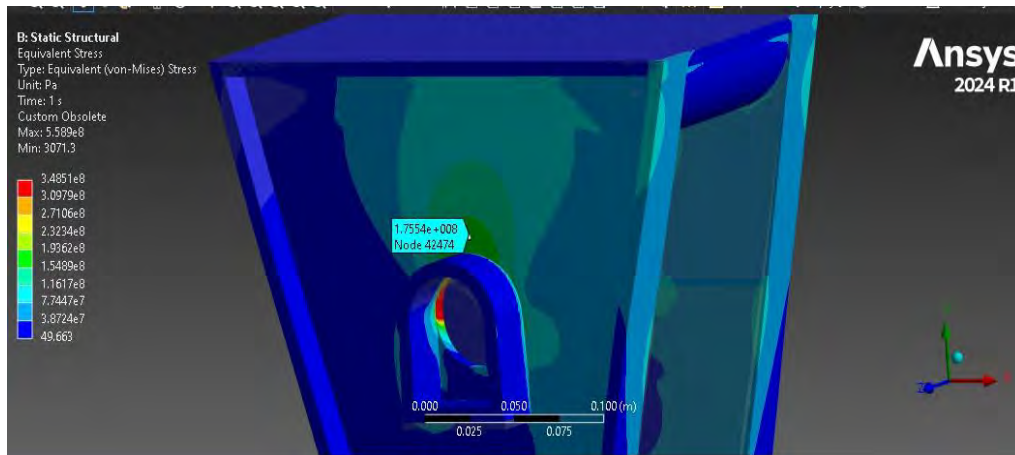
Resumen de esfuerzos normales y cortantes en el nodo 42474.

Componente	Valor [Pa]	Valor [MPa]
σ_x	8.0541×10^5	0.805
σ_y	-1.7295×10^8	-172.95
σ_z	6.4×10^4	0.064
τ_{xy}	-1.5791×10^7	-15.791
τ_{yz}	-1.817×10^5	-0.1817
τ_{xz}	-2.5983×10^4	-0.0258

Nota: Elaboración propia.

Figura 7

Esfuerzo equivalente nodo 42474.



Nota: Obtenido ANSYS MECHANICAL.

Así también se puede observar el esfuerzo equivalente en el punto de análisis que será el nodo (42474).

Obteniendo un aproximado de:

$$\sigma_{eq} = 175.54 \text{ MPa}$$

9. EVALUACION TENSIONAL EN EL PUNTO DE ANALISIS

Con los valores obtenidos de esfuerzos en el nodo 42474, obtenemos del estado tensional general:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}$$


D&N
 INGENIERIA SERVICIOS Y PROYECTOS SAC

 Diego Marcelo Olarte Montes
 GERENTE GENERAL

	INFORME TÉCNICO	DN-26052026-IT-001
	"EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL SOPORTE DE MUELLES TIPO BASCULANTE – TANDEM CAMION VOLQUETE DE 50 TON"	REV.A FECHA: 26-MAY - 2026

$$\sigma = \begin{bmatrix} 0.805 & -15.791 & -0.0258 \\ -15.791 & -172.95 & -0.1817 \\ -0.0258 & -0.1817 & 0.064 \end{bmatrix} MPa$$

Del tensor verificamos que el esfuerzo dominante está en la dirección Y en contra de la aplicación de la fuerza, ósea en compresión, así también existe un esfuerzo cortante moderado en XY. Y las demás componentes son pequeñas, casi no influyentes en el análisis.

En vista que los esfuerzos en la componente Z, son muy pequeños o casi despreciables, analizaremos un caso de Tensión Plana.

El problema puede tratarse de la siguiente manera:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Donde:

$\sigma_x = 0.805 \text{ MPa}$

$\sigma_y = -172.95 \text{ MPa}$

$\tau_{xy} = -15.791 \text{ MPa}$

Resultando:

$$\sigma_1 = 2.23 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = -174.37 \text{ MPa}$$

ahora comprobaremos el esfuerzo equivalente de Von-mises, que para un estado plano de esfuerzos estaría dado por la ecuación:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{vm} = \sigma_{eq} = 175 \text{ Mpa}$$

Lo cual concuerda de manera óptima con el resultado del análisis FEM con valores muy aproximados.


 DIEGO MARCELO OLARTE MONTES
 GERENTE GENERAL

	INFORME TÉCNICO	DN-26052026-IT-001
	"EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL SOPORTE DE MUELLES TIPO BASCULANTE – TANDEM CAMION VOLQUETE DE 50 TON"	REV.A FECHA: 26-MAY - 2026

10. COMPARACION CON ACERO ASTM A572 GR50

FLUENCIA

En vista que el esfuerzo equivalente de Von mises es de 175 MPa en promedio, y el acero ASTM A572 GR 50 posee un límite a la Fluencia de 345 MPa procedemos al cálculo del factor de seguridad.

$$FS_{FLUENCIA} = \frac{\sigma_f}{\sigma_{eq}}$$

$$FS_{FLUENCIA} = \frac{345 \text{ MPa}}{175 \text{ MPa}}$$

$$FS_{FLUENCIA} = 1.97$$

Verificando que el elemento, no falla por fluencia, pero que si presenta una carga concentrada considerable de esfuerzos en la zona analizada.

FATIGA

Se realiza el cálculo de factor de seguridad con valores aproximados al límite de fatiga, el cual podría llegar a fallar, por cargas dinámicas cíclicas.

$$FS_{FATIGA} = \frac{\sigma_f * 0.5}{\sigma_{eq}}$$

$$FS_{FATIGA} = \frac{345 \text{ MPa} * 0.5}{175 \text{ MPa}}$$

$$FS_{FATIGA} = 0.98$$

Verificando que el elemento, falla de manera muy justa al límite de fatiga, lo cual conlleva a la aparición lenta y progresiva de discontinuidades en el elemento y más en la zona analizada.


 INGENIERIA SERVICIOS Y PROYECTOS SAC
 Diego Marcelino Olarte Montes
 GERENTE GENERAL

	INFORME TÉCNICO	DN-26052026-IT-001
	"EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL SOPORTE DE MUELLES TIPO BASCULANTE – TANDEM CAMION VOLQUETE DE 50 TON"	REV.A FECHA: 26-MAY - 2026

7 CONCLUSIONES

Del análisis se puede concluir:

- El análisis estructural del soporte de muelles tipo basculante mostró un esfuerzo equivalente de Von Mises aproximado de 175 MPa, valor inferior al límite de fluencia del acero ASTM A572 Gr 50 de 345 MPa, obteniéndose un factor de seguridad estático aproximado de 1.97, por lo que el componente no presenta falla por fluencia estática.
- La simulación identificó concentraciones de tensiones principalmente alrededor del alojamiento del pasador como la parte superior (ver nodo 42744), donde predominan esfuerzos de compresión y corte asociados a una carga crítica vertical de aproximadamente 156 kN y una carga adicional inclinada proveniente del brazo del sistema tándem.
- Considerando un límite de fatiga aproximado equivalente al 50% del límite de fluencia del material (172.5 MPa), se verifica que el esfuerzo equivalente obtenido es cercano y ligeramente inferior a dicho valor, indicando muy alto riesgo de falla por fatiga durante operación prolongada bajo cargas cíclicas severas.
- Se concluye que la falla más probable del soporte de muelles, no ocurre por carga estática instantánea, sino por fatiga estructural acumulada causada por vibraciones, impactos y esfuerzos repetitivos durante la operación del vehículo.


 INGENIERIA SERVICIOS Y PROYECTOS SAC
 Diego M. Ojeda Montes
 GERENTE GENERAL

ANEXO VII. INFORME DE ANÁLISIS DE FRACTOGRAFIA EN LA PROBETA

FRACTURADA (RANDON 2019)

INFORME 0137-JUN-LMM/CIALE-2026

Referencia: “Ensayo de tipología a de falla de acero al carbono”

Del: Ing. Juan Manuel Jara Gonzales

Coordinador del laboratorio de Metalografía y Microscopia-CIALE

Para: Sr. Hiro Alejo Illanes Huamán

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Con referencia a la muestra de acero al carbono recibida para el análisis de la tipología de fractura; esta se ha procedido a preparar de acuerdo a los protocolos establecidos, para poder ser analizadas en Microscopia Electrónica de Barrido, y determinar el tipo de fractura que ha generado la falla del acero.

La imagen de la morfología del acero en microscopía electrónica de barrido (SEM) representa preferentemente una fractura frágil por **sobrecarga o clivaje**, de acuerdo a la dirección del desplazamiento de falla presenta características típicas de fractura de **cuasi-clivaje**.

Se concluye que la falla del acero al carbono ensayados en nuestros laboratorios, por la lectura de las líneas de fractura es del tipo **falla por sobrecarga y fatiga**.

Es todo en cuanto tengo que informarle.

Atte.

Arequipa, 25 de junio del 2026



Ing. Jara Gonzales Juan Manuel
Coordinador del laboratorio de
Metalografía y Microscopia-CIALE

Muestras N°1 (Acero al carbono)



Imagen SEM N°1 La imagen de la fractografía con morfología rugosa es característica de una superficie fracturada con presencia de falla frágil-Dúctil, combinación que está ligada a la falla final por endurecimiento por la deformación sufrida.



Imagen SEM N°2 En esta imagen, se observa una morfología irregular con presencia de escamas y zonas de desgarro, lo cual es típico de una falla por Sobrecarga y fatiga

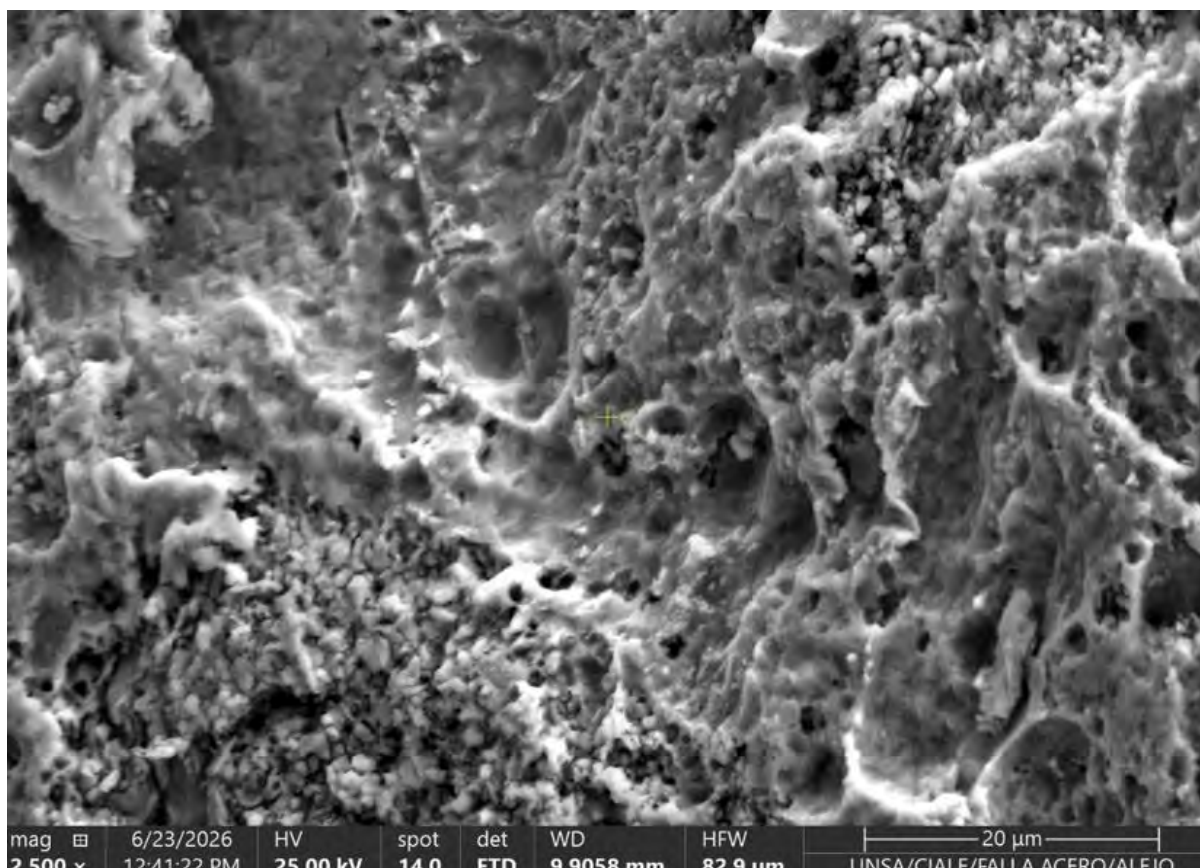


Imagen SEM N°3 La imagen (SEM) a grandes aumentos evidencia la presencia de **fractura dúctil** en el acero, probablemente al inicio de la fractura por que se presenta deformación e incluso presencia de Dimples.

ANEXO VIII. ANÁLISIS QUÍMICO POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA POR CHISPA

Foto 1. Resultados de la Probeta Rossetti 2015

Resultados de Medida

Instrumento: 78A1041
Muestra: SUS1.0737 HCCB
Asociación: FE_100 Modo: Concentración de Elemento 06.07.2026 16:31:41



	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
1	0,1325	0,0974	0,3827	0,0148	0,0141	0,0344	0,0161
2	0,1544	0,0998	0,3836	0,0164	0,0164	0,0289	0,0120
3	0,1127	0,0394	0,3885	0,0154	0,0142	0,0228	0,0079
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,02086	0,03422	0,00309	0,00079	0,00128	0,00579	0,00410
RSD	15,86	43,38	0,80	5,06	8,61	20,17	34,12
	Ni [%]	Al [%]	Co [%]	Cu [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]
1	0,0072	0,0459	0,0110	0,0080	0,0008	0,0007	0,0062
2	0,0070	0,0426	0,0060	0,0080	0,0009	0,0007	0,0041
3	0,0054	0,0289	0,0022	0,0080	0,0007	0,0003	0,0026
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00097	0,00901	0,00446	0,00001	0,00013	0,00024	0,00183
RSD	14,82	23,02	69,57	0,14	15,96	38,84	42,74
	W [%]	Pb [%]	Sn [%]	Zr [%]	Zn [%]	N [%]	Se [%]
1	0,0099	0,0009	0,0008	<0,0005	0,0023	0,0033	<0,0010
2	0,0053	0,0008	<0,0005	<0,0005	0,0024	0,0072	<0,0010
3	<0,0020	0,0010	<0,0005	<0,0005	0,0021	0,0050	<0,0010
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00399	0,00008	0,00016	0,00000	0,00013	0,00194	0,00000
RSD	69,28	8,73	27,31	0,00	5,75	37,52	0,00
	B [%]	Ca [%]	Bi [%]	As [%]	Ta [%]	Sb [%]	Fe [%]
1	0,0002	0,0001	<0,0005	0,0018	0,0371	0,0032	99,17
2	0,0003	<0,0001	<0,0005	0,0018	0,0376	0,0029	99,16
3	0,0002	<0,0001	<0,0005	0,0019	0,0403	0,0019	99,29

Los resultados muestran la composición química de Rossetti 2015

Foto 2. Resultados de la Probeta Facchini 2020

Resultados de Medida

Instrumento: 78A1041
Muestra: SUS1.0737 HCCB
Aleación: FE_100
Modo: Concentración de Elemento
06.07.2026 16:41:43

SpArcfire

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
1	0,1630	0,0189	0,5197	0,0098	0,0029	0,0312	0,0151
2	0,1635	0,0185	0,5259	0,0102	0,0022	0,0243	0,0106
3	0,1614	0,0177	0,5313	0,0107	0,0017	0,0225	0,0089
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00112	0,00058	0,00581	0,00045	0,00058	0,00459	0,00319
RSD	0,69	3,18	1,10	4,41	25,11	17,65	27,64
	Ni [%]	Al [%]	Co [%]	Cu [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]
1	0,0098	0,0310	0,0078	0,0102	0,0012	0,0008	0,0069
2	0,0095	0,0325	0,0030	0,0101	0,0012	0,0010	0,0049
3	0,0096	0,0319	0,0019	0,0101	0,0014	0,0010	0,0046
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00015	0,00074	0,00311	0,00004	0,00012	0,00009	0,00125
RSD	1,60	2,34	73,59	0,38	9,17	9,66	22,84
	W [%]	Pb [%]	Sn [%]	Zr [%]	Zn [%]	N [%]	Se [%]
1	0,0150	0,0006	0,0014	<0,0005	0,0025	0,0065	0,0021
2	0,0127	0,0013	0,0018	<0,0005	0,0025	0,0045	0,0030
3	0,0128	0,0015	0,0017	<0,0005	0,0025	0,0049	0,0030
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00128	0,00047	0,00021	0,00000	0,00005	0,00103	0,00051
RSD	9,47	41,19	12,78	0,00	1,95	19,36	18,76
	B [%]	Ca [%]	Bi [%]	As [%]	Ta [%]	Sb [%]	Fe [%]
1	0,0004	<0,0001	<0,0005	0,0031	0,0388	0,0055	99,09
2	0,0005	0,0001	<0,0005	0,0036	0,0363	0,0077	99,11
3	0,0004	0,0002	<0,0005	0,0036	0,0345	0,0073	99,11

Los resultados muestran la composición química de Facchini 2020

Foto 3. Resultados de la Probeta perteneciente a la chapa para mantenimiento en general

Resultados de Medida

Instrumento: 78A1041
Muestra: SUS1.0737 HCCB
Alaación: FE_100 Modo: Concentración de Elemento 06.07.2026 16:46:46



	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
1	0,1710	0,0270	0,6691	0,0184	0,0172	0,0304	0,0101
2	0,1602	0,0423	0,6932	0,0208	0,0186	0,0302	0,0088
3	0,1618	0,0358	0,6779	0,0185	0,0163	0,0283	0,0085
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00583	0,00772	0,01222	0,00133	0,00116	0,00113	0,00088
RSD	3,55	22,04	1,80	6,90	6,66	3,80	9,59
	Ni [%]	Al [%]	Co [%]	Cu [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]
1	0,0059	0,0464	0,0024	0,0074	0,0010	0,0013	0,0036
2	0,0071	0,0537	0,0014	0,0078	0,0011	0,0016	0,0035
3	0,0060	0,0578	0,0010	0,0073	0,0010	0,0016	0,0032
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00065	0,00581	0,00069	0,00030	0,00008	0,00018	0,00022
RSD	10,28	11,03	43,16	3,98	7,99	12,00	6,44
	W [%]	Pb [%]	Sn [%]	Zr [%]	Zn [%]	N [%]	Se [%]
1	<0,0020	0,0015	0,0008	<0,0005	0,0031	0,0052	<0,0010
2	<0,0020	0,0012	0,0008	<0,0005	0,0031	0,0052	0,0013
3	<0,0020	0,0015	0,0005	<0,0005	0,0029	0,0046	0,0013
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00000	0,00018	0,00017	0,00000	0,00008	0,00038	0,00017
RSD	0,00	13,24	23,45	0,00	2,50	7,53	14,59
	B [%]	Ca [%]	Bi [%]	As [%]	Ta [%]	Sb [%]	Fe [%]
1	0,0003	0,0017	<0,0005	0,0024	0,0355	0,0034	98,93
2	0,0004	0,0019	<0,0005	0,0029	0,0317	0,0032	98,89
3	0,0003	0,0019	<0,0005	0,0026	0,0317	0,0031	98,92

Los resultados muestran la composición química de la chapa para mantenimiento de los soportes

Foto 4. Resultados de la Probeta Randon 2010

Fv

Resultados de Medida

Instrumento: 78A1041
Muestra: SUS1.0737 HCCB
Aleación: FE_100 Modo: Concentración de Elemento 06.07.2026 16:51:35



	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
1	0,1257	0,0281	1,056	0,0153	0,0081	0,0239	0,0154
2	0,0922	0,0201	1,087	0,0142	0,0038	0,0147	0,0129
3	0,1145	0,0216	1,106	0,0168	0,0036	0,0152	0,0129
↑							
↓							
SD	0,01704	0,00423	0,0251	0,00135	0,00254	0,00513	0,00145
RSD	15,38	18,19	2,32	8,73	49,16	28,62	10,60
	Ni [%]	Al [%]	Co [%]	Cu [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]
1	0,0163	0,0685	0,0056	0,0084	0,0265	0,0352	0,0061
2	0,0139	0,0627	0,0027	0,0080	0,0260	0,0338	0,0052
3	0,0150	0,0658	0,0029	0,0078	0,0271	0,0355	0,0060
↑							
↓							
SD	0,00122	0,00292	0,00161	0,00029	0,00056	0,00088	0,00050
RSD	8,07	4,44	43,40	3,55	2,13	2,54	8,62
	W [%]	Pb [%]	Sn [%]	Zr [%]	Zn [%]	N [%]	Se [%]
1	<0,0020	0,0019	0,0008	<0,0005	0,0025	0,0069	<0,0010
2	<0,0020	0,0021	0,0008	<0,0005	0,0020	0,0057	0,0018
3	0,0035	0,0020	0,0012	<0,0005	0,0022	0,0429	0,0024
↑							
↓							
SD	0,00086	0,00009	0,00024	0,00000	0,00028	0,02115	0,00072
RSD	34,50	4,73	26,92	0,00	12,35	114,35	41,54
	B [%]	Ca [%]	Bi [%]	As [%]	Ta [%]	Sb [%]	Fe [%]
1	0,0003	0,0007	<0,0005	0,0024	0,0379	0,0027	98,50
2	0,0003	<0,0001	<0,0005	0,0030	0,0336	0,0035	98,55
3	0,0004	0,0004	<0,0005	0,0027	0,0354	0,0037	98,45

Los resultados muestran la composición química de Randon 2010

Foto 5. Resultados de la Probeta Randon 2019

Resultados de Medida

Instrumento: 78A1041
Muestra: SUS1.0737 HCCB
Almación: FE_100 **Medida** Concentración de Elemento 06.07.2026 16:58:12



	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
1	0,1760	0,0483	0,5772	0,0141	0,0140	0,0164	0,0100
2	0,1652	0,0329	0,5855	0,0140	0,0114	0,0150	0,0090
3	0,1762	0,0388	0,5904	0,0144	0,0109	0,0161	0,0094
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00628	0,00777	0,00666	0,00022	0,00167	0,00071	0,00052
RSD	3,64	19,42	1,14	1,58	13,84	4,51	5,44
	Ni [%]	Al [%]	Co [%]	Cu [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]
1	0,0056	0,0393	0,0042	0,0088	0,0008	0,0006	0,0034
2	0,0051	0,0389	0,0034	0,0088	0,0008	0,0005	0,0030
3	0,0056	0,0454	0,0038	0,0094	0,0007	0,0007	0,0034
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00032	0,00366	0,00043	0,00036	0,00010	0,00008	0,00025
RSD	5,89	8,88	11,27	4,06	12,51	11,97	7,52
	W [%]	Pb [%]	Sn [%]	Zr [%]	Zn [%]	N [%]	Se [%]
1	<0,0020	0,0011	0,0007	<0,0005	0,0028	0,0042	<0,0010
2	<0,0020	0,0014	0,0008	<0,0005	0,0026	0,0030	<0,0010
3	<0,0020	0,0012	0,0009	<0,0005	0,0028	0,0036	0,0012
↑							
↑							
↓							
↓							
SD	0,00000	0,00012	0,00008	0,00000	0,00014	0,00060	0,00010
RSD	0,00	10,01	10,09	0,00	5,25	16,69	9,29
	B [%]	Ca [%]	Bi [%]	As [%]	Ta [%]	Sb [%]	Fe [%]
1	0,0002	0,0003	<0,0005	0,0018	0,0340	0,0024	99,03
2	0,0002	<0,0001	<0,0005	0,0018	0,0354	0,0029	99,05
3	0,0002	0,0001	<0,0005	0,0021	0,0328	0,0025	99,02

Los resultados muestran la composición química de Randon 2019