UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO - CHILE

ESTUDIO DE LA VIDA REMANENTE DE UNA GRÚA FAM EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO.

GONZALO RENÉ LAGOS ELGUETA

Memoria para optar al Título de
Ingeniería Civil

Profesor Guía
Maurizio Edwards Ackroyd

Profesor Co-referente
René Tobar R.

2021

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE

ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE LA GRIETA EN ACERO PARA UNA GRÚA LEVEL LUFFING FAM EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO.

Memoria de titulación presentada por
GONZALO RENÉ LAGOS ELGUETA

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniería Civil

Profesor Guía
Maurizio Edwards Ackroyd

Profesor Co-referente
René Tobar R.

2021

Agradecimientos

A mis padres, hermanos y esposa, por su cariño, apoyo y esfuerzo.

A la empresa ASMAR V. por el apoyo en los ensayos, materiales y recursos vitales para la realización de esta investigación.

Al Sr. Lautaro Ramírez por sus comentarios, tutela y el gran apoyo que recibí durante la realización de este trabajo.

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Obras Civiles
Carrera de Ingeniería Civil
Astilleros y Maestranza de la Armada ASMAR V.

ESTUDIO DE LA VIDA REMANENTE DE UNA GRUA FAM EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO

Autor: Gonzalo Lagos E.
Tutor interno: Lautaro Ramírez M.

Resumen

El siguiente trabajo de titulación consistió en determinar la vida remanente de una grúa portuaria FAM en el puerto de San Antonio, basándose en mediciones de una grieta que apareció en su base y un estudio de la teoría aplicable al asunto.

En el año 2019, durante una inspección rutinaria, se descubrió una grieta horizontal en la columna principal de dicha grúa. Se ha visto que la grieta progresa con el transcurso del tiempo. Al comenzar el presente estudio, esta tenía una longitud de 103,3 [mm] en dirección horizontal.

Para los objetivos del estudio, fue necesario determinar la velocidad de propagación de la fisura y, en consecuencia, el tiempo total antes que la grúa quede eventualmente fuera de servicio, considerando su normal funcionamiento durante los ciclos de carga y descarga de granel en el puerto de San Antonio. Para los cálculos se utilizó la ecuación de Paris, la cual, requiere conocer los esfuerzos totales de tracción en la zona cercana a la fisura, los ciclos de carga y descarga históricos de la grúa y el parámetro K_{Ic} (factor de intensidad de tensiones crítico o tenacidad a la fractura), definido por el material en el cual se desarrolló la fisura.

Los esfuerzos por peso propio de la estructura se estimaron principalmente por geometría y planos estructurales, excepto los esfuerzos debidos al peso de algunos elementos de la grúa, que se midieron directamente junto con los esfuerzos debidos a la carga de uso mediante galgas extensométricas que su instalaron para este efecto. De esta forma, se concluyó que los esfuerzos máximos medios de tracción tenían un valor de casi 100 [Mpa].

Además, se obtuvo información sobre los ciclos de carga y descarga a partir de los registros de los horómetros y el historial de trabajo de la grúa, los cuales fueron proporcionados por la empresa propietaria a través de ASMAR (V). Finalmente, se estimó la cantidad de ciclos de

cargas totales de la grúa hasta el inicio de esta investigación en $1{,}8 \times 10^6$[ciclos] a junio del 2019.

Para calcular el parámetro K_{Ic}, se correlacionaron los valores del ensayo de tenacidad de Charpy, para caracterizar el material y utilizar los resultados de la energía absorbida por el impacto del martillo (CVN) en probetas establecidas por las normas ASTM E23 y E370, según la bibliografía consultada. De esta forma, para el parámetro K_{Ic} resultó un valor alrededor de 170 [Mpa√m], considerando las condiciones y los parámetros más desfavorables para el material.

Finalmente, se obtuvo el valor de la longitud máxima de la grieta estimada en un valor de 940 [mm] con una velocidad de propagación de $3 \times 10^{-3}[\frac{mm}{ciclos}]$, la cual se alcanzaría en un tiempo de 2,7 [años]. Posteriormente se produciría un progreso instantáneo de la fisura hasta una rotura total de la pieza y eventual colapso estructural de la grúa.

Palabras Clave $K_{Ic,}$ Galgas Extensiométricas, Grieta, Ciclos de Trabajo, Ensayo de Tenacidad, Charpy.

ABSTRACT

The following graduation project consisted in determining the remaining life of a FAM port crane located in the Port of San Antonio, based upon the measures of a crack that appeared in its base and theoretical studies that apply to this matter.

In 2019, during routine inspection, a horizontal crack was found in the main column of the aforementioned crane and it has been observed that it has spread with the passing of time. At the beginning of this investigation, the crack had a length of 103.3 [mm] in horizontal direction.

For study purposes, it was necessary to determine the speed of crack growth, and hence, the amount of time for the crane to run out of service, taking into consideration the regular functioning of loading and unloading cycles of bulk in the port of San Antonio. In order to carry out calculations, Paris' law was used, which requires a prior determination of the total tensile stresses in the nearest area to the crack, the overall loading and unloading cycles of the crane and the K_{Ic} parameter (stress intensity factor) defined by the material in which the crack developed.

The self-weight stresses of the structure were estimated mainly by geometry and structural drawings, except for those applied by the weight of some crane components measured along with the stresses per load, using strain gauges installed for that purpose. Thus, it was concluded that the total tensile stresses were estimated at a value of 100 [MPa].

In addition, data about loading and unloading cycles was obtained from records of the hour meters and the working history of the crane, provided by the crane owners' company via ASMAR (V). Finally, the total number of loading cycles until the beginning of this investigation, that is June 2019, was estimated at $1{,}8 \times 10^6$ [cycles].

Moreover, to calculate the K_{Ic} parameter, Charpy impact tests were performed to characterize the material and use the results of the energy absorbed by the impact of the hammer (CVN) in specimens previously defined by ASTM E23 and E370 standards, in order to correlate the formulas proposed by various authors (consulted references). Thus, the K_{Ic} value yielded a result of 170 [MPa$\sqrt{m}$] considering the most unfavorable conditions and parameters for the material.

Finally, the maximum crack length was estimated at a value of 940 [mm] with a propagation speed of 3×10^{-3} [mm / cycles] which will occur in a time of 2.7 [years]. After that period, the crack would instantly spread and produce a subsequent structural collapse.

Keywords: K_{Ic}, Strain Gauges, Crack, Work Cycles, Tenacity Test, Charpy.

Glosario

Mecanizar: El mecanizado es un proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante la eliminación de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión.

Lote o colada: Son todos los materiales fabricados en la misma partida, vale decir materiales creados en condiciones iguales de fabricación.

Cupones de probetas: Grupo de tres probetas utilizadas para ser ensayadas en el ensayo de tenacidad, denominados así por la norma ASTM E23.

Entalle V-Notch: Tipo de abertura en la parte media de una probeta Charpy, con el fin de facilitar el inicio de la grieta en el acero, producto del impacto del péndulo Charpy. La palabra V-Notch refiere a la geometría de la abertura, la cual es en forma de V.

Rebabas: Porción de materia sobrante que sobresale en los bordes

N.R.S: Su sigla significa: Nivel de reducción de Sondas, lo que significa que es el plano al cual están referidas las profundidades de una localidad. En el caso chileno es la mayor bajamar en sicigias estando la luna en perigeo. Deberá ser un plano tan bajo que la marea rara vez descendería bajo éste.

Materiales policristalinos: Es un agregado de pequeños cristales de cualquier sustancia, a los cuales, por su forma irregular, a menudo se les denomina cristalitas o granos cristalinos.

Tensión de cizalladura: Es aquella que, fijado un plano, actúa tangencialmente a este.

Desbaste: El desbaste de metales por deslizamiento es un proceso de mecanizado superficial de piezas. Éste se basa en introducir las piezas en masa en un contenedor junto a un material abrasivo para desbaste o pulido y un aditivo generalmente en base acuosa.

Enromar: Poner roma una cosa para que carezca de punta o filo.

Índice de Contenidos

Agradecimientos ..... *V*
Resumen ..... *VI*
ABSTRACT ..... *VIII*
Glosario ..... *X*
Índice de Contenidos ..... *XI*
Índice de Figuras ..... *XIII*
Índice de Tablas ..... *XIV*
I: Introducción *1*
1.1 Prefacio **1**
1.2 Objetivo general **2**
1.3 Objetivos específicos **2**
1.4 Alcances **3**
II: Marco Teórico *6*
2.1 Descripción del Fenómeno Mecánico **6**
2.1.1 Fatiga 6
2.1.2 Iniciación y propagación de la grieta 7
2.1.3 Velocidad de propagación de la grieta 8
2.1.4 Evolución de los modelos de cálculo para determinar el crecimiento de grietas. 11
2.2 Propiedades mecánicas del material **12**
2.2.1 Ensayo de Tenacidad al impacto mediante el péndulo de Charpy 12
2.2.2 Factor de intensidad de tensiones crítica (K_{Ic}) 14
2.2.3 Acero A572 Gr 50 18
2.3 Definición y características principales de las grúas portuarias. **19**
2.3.1 Tipos de grúas 19
2.3.2 Vida útil de las grúas 21
2.3.3 Clasificación de grúas según cargas 21
2.3.4 Categorías de servicio 22
2.4 Galgas extensiométricas **23**
2.4.1 Funcionamiento de una galga extensiométrica 23
2.4.2 Composición de una galga extensiométrica 24
2.4.3 Tipos de Galgas 25
2.4.4 Criterio de selección de las galgas extensiométricas 26
2.4.5 Dispositivos de salida 27
III Descripción del caso de estudio *28*
3.1 Clasificación de la grúa "Luffing" **32**

IV Procedimiento Experimental *33*

4.1 Medición de esfuerzos por medio de galgas extensiométricas. **33**
4.1.1 Consideraciones al momento de la medición 33
4.1.2 Procedimiento de trabajo 34
4.1.3 Calibración de datos 34
4.1.4 Implementación de elementos a utilizar 36

4.2 Descripción del Laboratorio de Pruebas **42**
4.2.1 Metodología 42
4.2.2 Equipos y materiales empleados 43
4.2.3 Análisis Metalográfico 46
4.2.1 Ensayo de Tenacidad del impacto Charpy 50
4.2.2 Realización ensayo 50
4.2.3 Resultados. 51

V Análisis de Resultados *52*

5.1 Valor del esfuerzo longitudinal en la grúa **52**
5.1.1 Esfuerzo estático ($\boldsymbol{\sigma 0}$) 52
5.1.2 Esfuerzo de uso ($\boldsymbol{\sigma sg}$) 54
5.1.3 Esfuerzo total ($\boldsymbol{\sigma t}$) 55

5.2 Ciclos de carga de la grúa **55**
5.2.1 Ciclos totales de la grúa FAM 56

5.3 Estimación del Parámetro K_{Ic} **56**
5.3.1 Curva de Transición dúctil-frágil 57
5.3.2 Valores de CVN para temperatura de uso de 20 [ºC] 59
5.3.3 Valores de K_{Ic} a partir de correlaciones 60

5.4 Resultados finales **61**
5.4.1 Longitud crítica de la grieta 61
5.4.2 Velocidad de propagación de la grieta 62
5.4.3 Tiempo disponible hasta la falla 63

VI Conclusiones y recomendaciones *64*

Referencias *68*

Anexos *71*

Índice de Figuras

FIGURA 2-1 ELEMENTOS UTILIZADOS EN ENSAYO CHARPY 13
FIGURA 2-2. ESQUEMA DE UNA PROBETA CHARPY ANTES Y DESPUÉS DEL ENSAYO 13
FIGURA 2-3. INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE CARBONO DE UN ACERO SOBRE LAS CURVAS ENERGÍA ABSORBIDA EN EL IMPACTO FRENTE A TEMPERATURAS PARA PROBETAS CHARPY 14
FIGURA 2-4. ESQUEMA DE GRÁFICO OBTENIDO EN ENSAYO CHARPY DONDE SE EVIDENCIAN LOS 3 ESTADOS DE COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL A DIFERENTES TEMPERATURAS. 18
FIGURA 2-5. GRÚAS MÁS COMUNES ENCONTRADAS EN LOS PUERTOS DE CHILE 20
FIGURA 2-6. RELACIÓN ENTRE GRUPO DE LA GRÚA Y VIDA ÚTIL 22
FIGURA 3-1 GRÚA LUFFING FAM EN ESTUDIO - COMPONENTES PRINCIPALES 28
FIGURA 4-1. CONTROL DE LA TEMPERATURA MEDIANTE UN TERMÓMETRO INFRARROJO LASER 36
FIGURA 4-2. GALGA EXTENSIOMÉTRICA MODELO: PFL-20-11 37
FIGURA 4-3 A) REGISTRADOR DE DATOS "DATA LOGGER" TDS-602. 37
FIGURA 4-4. DETALLE DE UBICACIÓN DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS DENTRO DE LA COLUMNA 38
FIGURA 4-5. DETALLE DE UBICACIÓN DE LAS GALGAS, VISTA EN ELEVACIÓN. 38
FIGURA 4-6. MOVIMIENTO DEL RANGO DE LA PALA DE LA GRÚA EN SU LABOR DE CARGA Y DESCARGA GRANELERA 39
FIGURA 4-7. RESULTADOS DE LAS GALGAS EXTENSIOMETRICAS EN EL PUNTO DE MEDICIÓN Nº 3. 41
FIGURA 4-8. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE TENACIDAD. 42
FIGURA 4-9. MICROSCOPIO BINOCULAR UTILIZADO PARA EL ANÁLISIS METALOGRÁFICO. 43
FIGURA 4-10. PÉNDULO DE IMPACTO TIME, UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE TENACIDAD. 44
FIGURA 4-11. EQUIPO DE REFRIGERACIÓN UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE TENACIDAD. 44
FIGURA 4-12. PLANCHAS DE ACERO DE 1X1[M] ENTREGADOS POR KUPFER 45
FIGURA 4-13. IMAGEN CON ATAQUE A 100 AUMENTOS PARA MATERIAL A. 48
FIGURA 4-14. IMAGEN CON ATAQUE A 500 AUMENTOS PARA MATERIAL A. 48
FIGURA 4-15. IMAGEN CON ATAQUE A 100 AUMENTOS PARA EL MATERIAL B. 49
FIGURA 4-16. IMAGEN CON ATAQUE A 500 AUMENTOS PARA EL MATERIAL B. 49
FIGURA 4-17. SET DE PROBETAS PARA ENSAYO DE TENACIDAD DE IMPACTO. 50
FIGURA 4-18. PROBETAS LUEGO DE SER IMPACTADAS POR EL PÉNDULO DE IMPACTO 51
FIGURA 5-1. PRINCIPALES COMPONENTES DE LA GRÚA FAM. 53
FIGURA 5-2. GRÁFICOS COMPARATIVOS DE DIFERENTES ENSAYOS DE TENACIDAD 57
FIGURA 5-3. RESULTADOS DE LAS PROBETAS DESPUÉS DEL ENSAYO. 59

Índice de Tablas

Tabla 2-1. Principales diferencias entre CVN y K_{Ic} 16
Tabla 2-2. Composición química del acero ASTM A 572 Gr 50, valores máximos. 19
Tabla 2-3. propiedades mecánicas del acero ASTM 572 Gr. 50 19
Tabla 2-4. principales caracteristicas de grúas del puerto de Chile 20
Tabla 4-1. propiedades de la galga extensiométrica a utilizar. 36
Tabla 4-2. Resultados de mediciones galgas extensiométricas 40
Tabla 4-3. Nomenclatura de las probetas de acuerdo con el número de colada en direcciones de laminado. 46
Tabla 4-4. Composición química del acero ASTM A572 Gr. 50 según la norma ASTM y el acero suministrado por el fabricante con la misma clasificación A572 Gr.50. 46
Tabla 4-5. Resultados de ensayo de tenacidad al impacto. 51
Tabla 5-1. Momento flector en la columna debido a los pesos propios. 53
Tabla 5-2. Resumen de reacciones para diferentes condiciones del ángulo de la pluma. 54
Tabla 5-3. Resumen de los ensayos realizados 59

Capítulo I

Introducción

1.1 Prefacio

Las grúas portuarias generalmente son diseñadas y construidas en fábricas de alto nivel industrial, luego son transportadas generalmente por vía marítima en atención a su volumen, y finalmente son ensambladas en terreno. En Chile se suelen comprar principalmente a Norteamérica y Europa.

Posteriormente, cuando producto del funcionamiento y desgaste inherente, se requiere evaluar la compra o renovación, se deben tener en cuenta entre muchas otras variables, el rendimiento de la máquina y el tiempo total de funcionamiento, aparte de algún tipo de reparación importante que incida también en la vida útil. Estos aspectos están relacionados entre sí, ya que si la grúa se utilizó siempre al máximo de su capacidad (carga límite), tendrá una condición diferente a si se empleó con una tasa variable de trabajo, en donde casi nunca hubiese alcanzado un volumen y peso de carga elevada, cercanas a este límite. Adicionalmente existen diferentes factores, propios de la zona de emplazamiento de la estructura, que le dan un componente de variabilidad, con respecto a otras grúas de similares características.

Por lo tanto, a medida que la grúa se acerca al fin de su vida útil, puede presentar indicios de fallas, que a futuro signifiquen su pérdida definitiva. Sin embargo, si estas fallas se identifican a tiempo, sumado a un apropiado estudio ingenieril, generalmente es posible determinar algún tipo de reparación y el tiempo que tomará. Lo anterior se logra con una correcta planificación y estimación de costos, la cual puede determinar un plan de reparación en el

caso de que se estime factible, o de lo contrario, determinar la necesidad de adquirir una nueva grúa.

La empresa propietaria de la grúa (de la cual no es posible revelar el nombre por asuntos de confidencialidad), constituye uno de los mayores operadores de graneles limpios del puerto de San Antonio, y su principal área de negocios es de servicio de muellaje y transferencia de carga.

La grúa en cuestión, objeto de estudio del presente trabajo, presenta actualmente una grieta horizontal, presuntamente producida por fatiga, de **103,3 [mm]** de largo en el acero de la columna principal. Para la evaluación de lo anterior, la empresa propietaria ha contratado los servicios de ASMAR (Astilleros y Maestranzas de la Armada), ubicada en la V región, para identificar un criterio con base empírica que permita determinar la tolerancia en longitud y tiempo de la grieta presente en el acero, para una posterior toma de decisiones.

1.2 Objetivo general

Analizar la proyección de vida útil de la grúa tipo "luffing", actualmente en funcionamiento en el Puerto de San Antonio, considerando la existencia de una grieta que se desarrolló aparentemente por fatiga en la base de la estructura.

1.3 Objetivos específicos

1. Estimar la vida útil de la estructura utilizando como referencia la Norma FAM 1.001 y el historial de carga de la grúa.
2. Determinar la cantidad de ciclos de trabajo a los cuales ha sido sometida la grúa.
3. Determinar mediante el ensayo del péndulo de "Charpy" definido en la norma ASTM E23-02a (ASTM , 2002) la temperatura de transición dúctil-frágil y obtener la energía absorbida (CVN) para la temperatura de uso de la grúa en terreno. Se someterán a estos ensayos probetas del acero A572 Gr50, material del cual está compuesta la estructura, el material viene en formato de planchas, las cuales serán proporcionadas por un proveedor externo, considerando la inconveniencia de extraerlas de la estructura real, ya que, la grúa aún se encuentra en normal funcionamiento.

4. Calcular los coeficientes de tenacidad del impacto (CVN) y de tenacidad a la fractura crítica (K_{Ic}) del material A572 Gr50, a partir de la norma ASTM E23, ASTM E399, ASTM E370, mediante ensayos y correlaciones encontradas en la literatura.
5. Obtener el esfuerzo a tracción a la cual está sometida la zona cercana a la fisura mediante análisis estructural y el uso de galgas extensiométricas.
6. Determinar el tamaño máximo crítico para la grieta existente, previo a que se produzca el colapso estructural.

1.4 Alcances

La presente memoria de título contiene una estimación de cuál sería la cantidad de ciclos de carga a la que ha sido sometida la grúa "Luffing" FAM, de propiedad del mandante que motivó esta investigación. Esta estimación, será en base a la carga total movilizada desde su instalación, la categoría de diseño original según la norma FEM 1.001 y los controles de horómetros propios de la grúa.

Por otro lado, contiene la determinación de los pesos y centros de gravedad de los elementos que componen la grúa, los que se ubican sobre la corona de giro de la columna, vale decir, pluma, plumín, tirante, contrapeso móvil, biela, husillo, plataforma de sala de máquinas, brazo cabina, caballete, winches, etc., determinando también las reacciones sobre la columna producto de las cargas de peso propio, asociadas a cada uno de los elementos antes mencionados. (Figura 1-1)

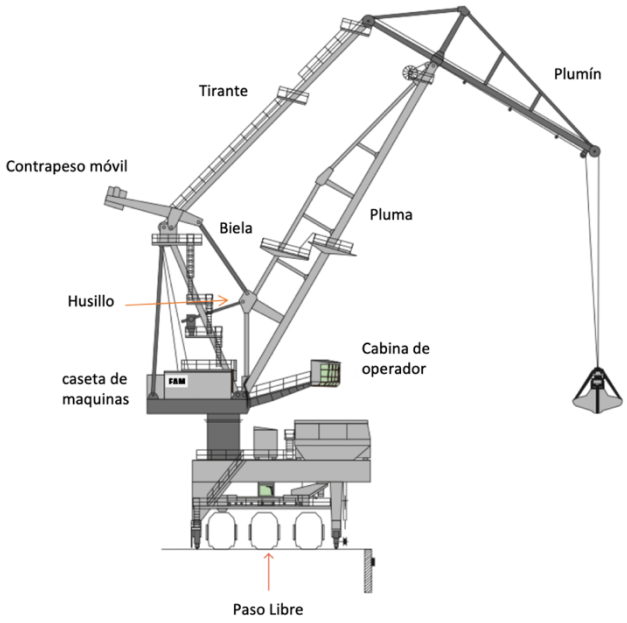


Figura 1-1. Principales componentes de la grúa FAM. Fuente: [TUKAN].

Paralelamente, por medio de mediciones de deformaciones con galgas extensiométricas, se obtuvieron los esfuerzos debidos a las cargas vivas en la zona afectada. Cabe mencionar que los esfuerzos debidos a peso propio de los componentes no pueden ser obtenidos de esta forma, y se estimaron por cubicaciones y análisis estructural.

Por otra parte, la columna base de esta grúa está compuesta del material A572 gr 50, lo que implicó analizar las propiedades mecánicas de éste, para poder caracterizar y determinar posibles variabilidades. Se consideró también las posibles variaciones en las direcciones de fabricación del material por medio de ensayos, considerando que el material a ensayar poseía las mismas especificaciones que el material original presente en la grúa. No obstante, este último ha estado expuesto a diferentes escenarios y condiciones, en comparación con el material recién salido de la fábrica.

Lamentablemente, no fue posible extraer una muestra directa, ya que, a la fecha de inicio del presente estudio, la grúa aún se encontraba operativa y por temas de seguridad e instrucciones específicas del mandante, esto fue denegado.

Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio SIMET de la Universidad de Santiago de Chile (USACH), lugar donde se determinaron los parámetros del material nuevo por medio de ensayos mecánicos, tales como el ensayo metalográfico y el ensayo de impacto. Es

evidente que los resultados obtenidos en el laboratorio por medio de ensayos no son iguales a los parámetros del material existente en la grúa, pero debido a las limitaciones de la investigación y sumado a la recomendación del jefe del laboratorio SIMET, junto a su experiencia, estas variaciones con respecto a las condiciones reales son posibles de comparar en una investigación con fines principalmente académicos y de primer acercamiento. Por ende, los resultados obtenidos no constituyen una solución exacta, pero entregan una aproximación razonable de la realidad. Un factor importante a tener en cuenta, y que es muy relevante en la vida útil de una estructura si se presenta, es la corrosión, pero según las inspecciones en terreno por profesionales del área, la grúa no presentó indicios de que este fenómeno haya sido relevante en la creación y desarrollo de la grieta. También para efectos de cálculo no se consideraron la influencia de efectos térmicos, tampoco se consideran efectos tales como tratamientos superficiales, endurecimiento superficial u otra influencia del medio.

En el caso de los efectos térmicos, se considera que el material no posee una restricción hacia posibles cambios de temperatura y deformación asociada a este fenómeno, la cual provoca esfuerzos internos. Por lo tanto, esta consecuencia para efectos de este estudio se despreciará, considerando una única temperatura de uso para el funcionamiento de la estructura, debido al clima de la zona donde ésta se encuentra emplazada.

Así también, se realizaron ensayos de tenacidad con el material A572 gr50, con el objetivo de que a través de estos resultados se pueda determinar el valor del factor de intensidad de tensiones (K_{Ic}) el que se obtiene de manera indirecta utilizando el ensayo Charpy, ya que haberlo determinado de manera directa hubiese requerido realizar el ensayo de fatiga ASTM-399, ensayo de un costo veinte veces mayor y demandante en términos de tiempo (2 a 3 semanas por probeta). Este parámetro (K_{Ic}) se determinará como valor teórico a partir de varias correlaciones encontradas en la literatura, seleccionando finalmente el valor más desfavorable para el estudio, con el fin de garantizar una zona de seguridad en los resultados obtenidos.

Capítulo **II**

Marco Teórico

En este capítulo se dan a conocer todos los contenidos teóricos que tienen relación con el presente estudio.

2.1 Descripción del Fenómeno Mecánico

En base a la recopilación de antecedentes surge la siguiente pregunta; ¿Por qué el material falló si siempre trabajó con un nivel de carga menor al límite? La respuesta académicamente correcta es que el material puede englobar varios efectos que actúan al mismo tiempo. Estos efectos participan en la degradación de la resistencia del material, los que pueden ser, efectos térmicos, de fatiga, corrosión, endurecimiento y tratamientos superficiales, entre otros. Pero lo que es claro es que no todos tiene el mismo porcentaje de participación a la hora de buscar un responsable por la falla del material.

Particularmente para esta investigación, el principal factor que suele provocar estas fallas radica en la fatiga, producto de cargas repetitivas a lo largo de su servicio. La corrosión, por otro lado, es un efecto no menos importante que suele estar presente en estructuras cercanas al mar, este efecto daña el material reduciendo la sección transversal efectiva del material, lo cual provoca una reducción de la capacidad de resistencia. Hasta el momento de esta investigación no se encontraron evidencias de corrosión en el material, por lo que, para efectos de esta investigación, esta estará orientada principalmente a entender el fenómeno de fatiga.

2.1.1 Fatiga

Según como lo define el autor (William D. Callister, 1995), la fatiga es una forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a tensiones dinámicas y variables. Ésta puede ocurrir a

un nivel de tensión menor que la resistencia a la tracción o el límite elástico correspondiente a una carga estática.

Se estima, según el mismo autor, que la fatiga es la causa de aproximadamente el 90% de las roturas metálicas. Además, es catastrófica e insidiosa y ocurre súbitamente sin ningún aviso, pudiendo alcanzar velocidades de propagación mayores a la velocidad del sonido al momento del colapso estructural.

2.1.2 Iniciación y propagación de la grieta

Se puede considerar que el desarrollo de una grieta en un material o componente tiene tres etapas:

A. Iniciación de la grieta, la cual forma una pequeña grieta en una zona de altas tensiones.
B. Propagación de la grieta, aquí la grieta avanza gradualmente en cada ciclo de carga.
C. Rotura final, esta ocurre muy rápidamente una vez que la grieta haya alcanzado cierto tamaño crítico.

La vida a fatiga se puede denominar como $\boldsymbol{n_f}$ y es el número total de ciclos a la fractura, donde $\boldsymbol{n_f}$ puede ser definida como la suma entre el número total de ciclos hasta la iniciación a la grieta ($\boldsymbol{n_i}$) y el número total de ciclos para la propagación de la grieta ($\boldsymbol{n_p}$) como se presenta en la Ecuación 2-1:

$$\boldsymbol{n_f = n_i + n_p} \qquad (2\text{-}1)$$

Si se desea mayor precisión para el cálculo, se debería incluir el número de ciclos desde la longitud crítica de la grieta hasta su rotura, pero este es insignificante comparado con los otros dos, por lo que es posible despreciarlo (Yoshida, 2015).

Por otro lado, las porciones relativas de $\boldsymbol{n_i}$ y $\boldsymbol{n_p}$ van a variar con respecto al material y las condiciones de uso.

En tensiones pequeñas, donde es necesaria una mayor cantidad de ciclos para producir el fenómeno de fatiga, una fracción grande de la vida a fatiga es utilizada en la iniciación de la grieta. Al aumentar la tensión, $\boldsymbol{n_i}$ disminuye y las grietas se forman más rápidamente.

Se debe considerar asimismo que, una vez iniciada la grieta, esta se va propagando muy lentamente, y en materiales policristalinos, como es el acero estudiado en esta memoria, progresa a lo largo de planos cristalográficos de tensión de cizalladura alta, lo que generalmente es conocido como la primera etapa de la propagación.

Durante la segunda etapa, la velocidad de extensión de la grieta aumenta drásticamente. En este punto también ocurre un cambio de dirección de propagación hasta alcanzar una dirección perpendicular a la tensión aplicada. El crecimiento de la grieta tiene lugar mediante un proceso repetitivo de enromamiento y agudizamiento de la punta de la grieta. Este proceso se repite hasta que finalmente la grieta alcanza una dimensión crítica, lo cual induce la etapa final produciéndose la rotura catastrófica.

2.1.3 Velocidad de propagación de la grieta

Durante la segunda etapa de propagación, la grieta puede crecer desde un tamaño pequeño hasta el tamaño crítico necesario para la falla catastrófica. Este es un proceso que toma tiempo y avanza en cada ciclo de trabajo, sobre todo si los elementos son utilizados en un dominio de alto número de ciclos, es decir, para vidas de fatiga mayores que 10^4-10^5 ciclos, los cuales son válidos para este estudio.

La tasa de crecimiento de una grieta de estas características está dada por la tasa de variación $\frac{da}{dN}$, donde ***da*** es el cambio de longitud de la grieta (***a*** es la longitud de la grieta), y ***dN*** es el cambio de número de ciclos (***N*** es el número de ciclos).

Existen técnicas experimentales que se emplean para medir la longitud de la grieta durante la aplicación de tensiones cíclicas, las cuales son registradas y los resultados se representan como la gráfica de la longitud de la grieta "**a**" frente al número de ciclos "**N**". A partir de los datos experimentales es importante resaltar dos resultados:

1. Inicialmente, la velocidad de crecimiento es pequeña, pero aumenta al aumentar la longitud de la grieta.
2. El crecimiento de la grieta es mayor al aumentar la tensión aplicada para una determinada longitud de la grieta.

La velocidad de propagación de la grieta es una función no solo del nivel de tensión y tamaño de la misma, sino que también de las variables del material. Matemáticamente, esta velocidad

puede expresarse en términos del factor de intensidad de tensiones (***K***) y toma la forma según la Ecuación 2-2:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = C\ (\Delta K)^m \qquad (2\text{-}2)$$

Los parámetros ***C*** y ***m*** son constantes para un determinado material que son determinadas experimentalmente, donde C es conocida como la constante de Paris y m es una constante relacionada con el parámetro K_{Ic} del elemento, y dependen también del medio, la frecuencia y el cociente de tensiones ***R*** ($R = \frac{\sigma_{mín}}{\sigma_{máx}}$). El valor de ***m*** normalmente está comprendido entre 1 y 6.

ΔK es el intervalo del factor de intensidad de tensiones de la punta de la grieta, como se indica en la Ecuación 2-3:

$$\Delta K = K_{máx} - K_{mín} \qquad (2\text{-}3)$$

Existe una forma alternativa de encontrar **ΔK** según lo indica *Paul C. Paris* (Paris & Erdogan, 1963), donde se supone que el crecimiento de la grieta es despreciable durante la fracción de compresión del ciclo de carga expresado en la Ecuación 2-4:

$$\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} = Y(\sigma_{máx} - \sigma_{mín})\sqrt{\pi a} \qquad (2\text{-}4)$$

Si $\boldsymbol{\sigma_{mín}}$ es de compresión, entonces $\boldsymbol{K_{mín}}$ y $\boldsymbol{\sigma_{mín}}$ se consideran nulos, o sea $\boldsymbol{\Delta K = K_{máx}}$ y $\boldsymbol{\Delta\sigma = \sigma_{máx}}$.

Por lo tanto, la ecuación finalmente queda expresada como se indica en la Ecuación 2-5:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \qquad (2\text{-}5)$$

Donde ***Y*** es un parámetro que depende de la geometría del material junto a la ubicación de la grieta en este, y **σ** es el esfuerzo aplicado, el cual puede tomar diferentes valores. En el Anexo G se presenta un esquema de los diferentes valores que puede tomar el factor de intensidad de esfuerzos (**Y)** con respecto a una geometría determinada.

Una de las metas de análisis de roturas es ser capaz de predecir la vida a fatiga para algunos componentes, conocidas las condiciones de servicio y resultados de ensayos de laboratorio. Es posible desarrollar una expresión analítica para N_f por integración de la Ecuación (2-2):

$$N_f = \frac{1}{C\pi^{\frac{m}{2}}(\Delta\sigma)^m}\int_a^{a_c}\frac{1}{Y^m a^{\frac{m}{2}}}da \qquad (2\text{-}6)$$

Donde:

- N_f es el número de ciclos hacia la rotura
- Y es un parámetro independiente de la longitud de la grieta
- $m\ y\ C$ son parámetros definidos por el material
- a_c es la longitud crítica de la grieta
- a_0 Es la longitud de grieta inicial

Aquí se supone que $\Delta\sigma$ (o bien $\sigma_{máx} - \sigma_{mín}$) es constante; además, en general el factor **Y** dependerá de la longitud de la grieta **a** y por tanto no puede sacarse fuera de la integral.

Por otro lado, si se despeja $\boldsymbol{a_c}$ este valor se puede calcular por medio de la Ecuación 2-7:

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma Y\sqrt{\pi}}\right)^2 \qquad (2\text{-}7)$$

Donde $\boldsymbol{K_{Ic}}$ es la tenacidad de la fractura de deformaciones planas al momento de la falla, la cual es posible obtener directamente desde un ensayo de fatiga o mediante correlaciones a partir de los ensayos de tenacidad. Se han realizado varias propuestas para correlacionar la tenacidad de fractura en deformaciones planas y las energías CVN, con éxito limitado bajo ciertas condiciones del material. Los ensayos de tenacidad de fractura en deformaciones planas no son tan simples de realizar como los ensayos de impacto; además los equipos y las probetas son mucho más caros.

La expresión (2-7) es conocida como la fórmula de Paris, llamada así por el Académico americano Paul C. Paris, quien en 1961 realizó una gráfica logarítmica (log-log) de la

velocidad de crecimiento de una grieta contra el factor de intensidad de tensiones mostrando una relación lineal en la gráfica.

2.1.4 Evolución de los modelos de cálculo para determinar el crecimiento de grietas.

La propagación de grietas en materiales sometidos a cargas oscilantes, también conocida como fatiga de materiales, ha sido un fenómeno ampliamente estudiado a lo largo del pasado siglo.

Los modelos desarrollados para determinar el crecimiento de grietas por fatiga fueron objeto de estudio en los primeros trabajos sobre cargas cíclicas en elementos mecánicos y estructurales que fueron desarrollados en el año 1829. En ese entonces, el ingeniero W. Albert sometió cadenas elevadoras de material a sucesivas cargas y descargas (Schutz, 1996).

Posteriormente, hacia mitad del siglo XIX el ingeniero August Wöhler (Wohler, 1871) estudió la fatiga y sus causas en los ejes de las ruedas de trenes, en que la idea consistió en establecer los límites de fatiga y la generación de una gráfica esfuerzo vs número de ciclos. Casi un siglo después, en el año 1940, Miner presentó una teoría para determinar la acumulación de daño por fatiga (Halford, 2006), luego, Weibull (Weibull, 1961) empezó a realizar los primeros análisis estadísticos para caracterizar la resistencia en materiales. Complementariamente, el ingeniero George Irwin (Irwin G. , 1957) presentó por primera vez el término “factor de intensidad de esfuerzos (K)” el cual cuantifica el campo de esfuerzos alrededor de una grieta, como queda expresado en la ecuación (2-5).

Una década después, los ingenieros Coffin Y Manson (Manson, 1965) estudiaron el comportamiento a la fatiga para un alto número de ciclos, generando un diagrama de amplitud de esfuerzos v/s número de ciclos.

Finalmente, en 1961 el ingeniero Paul C. Paris (Paris & Erdogan, 1963), estudió la relación entre la velocidad de crecimiento de la grieta y la variación del factor de intensidad de esfuerzos ΔK, encontrando una relación que mantiene vigencia, según los datos experimentales obtenidos. Esta ecuación da muy buenos resultados para problemas que involucran grietas mayores a un milímetro de largo (Hertzberg, 1996).

2.2 Propiedades mecánicas del material

En los aceros de alta resistencia y baja aleación, como el estudiado en la presente memoria, los cambios en las propiedades mecánicas resultan del uso del Niobio y Vanadio en su composición, junto con un proceso de laminado controlado, los cuales incrementan el límite elástico, la soldabilidad y la dureza. Sin embargo, las propiedades se mantienen constantes sólo en muestras tomadas en la dirección de laminado. En la dirección transversal la dureza se disminuye considerablemente, y el conformado es inadecuado, debido a la forma característica de las inclusiones no metálicas, las cuales, durante el proceso de laminado, se elongan en la dirección de éste (American society for metals handbook, 1990). Esto significa que el acero puede mostrar diferentes respuestas, dependiendo de la dirección de las tensiones con respecto a la dirección de laminado, por lo que, al momento de analizar es necesario considerar estas dos direcciones para un conocimiento más completo del material.

2.2.1 Ensayo de Tenacidad al impacto mediante el péndulo de Charpy

Este ensayo se encuentra estandarizado bajo la norma ASTM E23, ASTM E370 y ASTM E399, y puede utilizarse además para determinar la transición de un comportamiento dúctil a frágil del metal en un cierto rango de temperatura. Esta temperatura de transición se define como la temperatura a la cual el acero pierde su habilidad para fluir plásticamente ante la presencia de un impacto repentino o una grieta. Para los aceros microaleados (o en inglés, High strength low-alloy (HSLA) steel), que son aceros de alta resistencia y baja aleación, las temperaturas de transición en el estado de laminado y en condiciones de normalizado son controladas principalmente por la composición química y el tamaño de grano de ferrita (ASTM , 2002).

Cada tipo de acero de alta resistencia y aleación posee unos rangos de valores de temperaturas de transición dúctil-frágil que depende de la composición química, del tamaño de grano de la ferrita y de otras variables.

El ensayo de impacto consiste en dejar caer un péndulo, el cual a su paso golpea una probeta que tiene forma de paralelepípedo (ver Figura 2-1a). Esta probeta posee un entalle estándar que recibe el nombre de V-Notch en forma de V para facilitar el inicio de la fisura (ver Figura 2-1b).

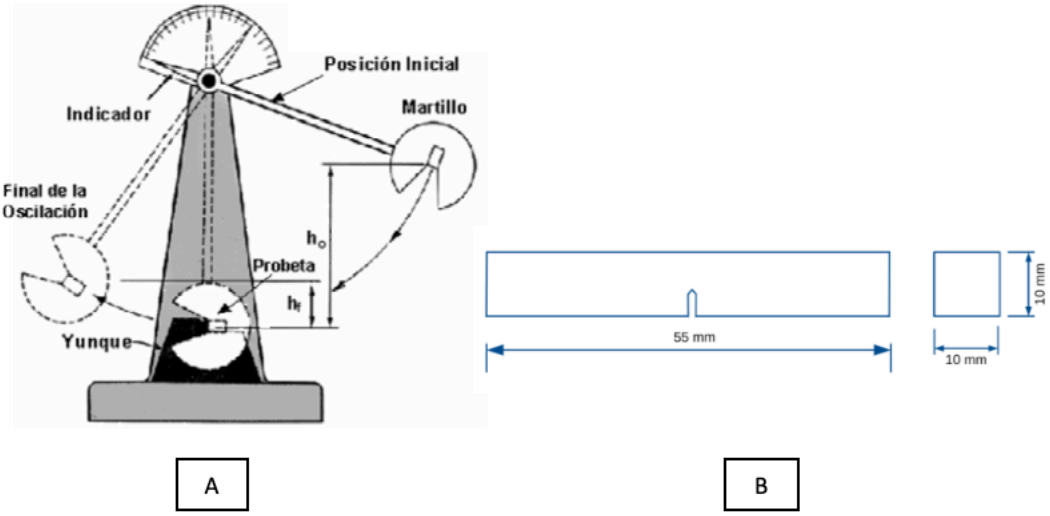


Figura 2-1 Elementos utilizados en Ensayo Charpy. A) Esquema de una máquina estándar utilizada para el ensayo de tenacidad del impacto y sus etapas de funcionamiento. B) dimensiones de una probeta estándar para el ensayo Charpy con entalle V-Notch. Fuente: a) [http://descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/sub-paginas/Materiales/ensayos.html] y b) [Autor]

Luego de golpear la probeta, el péndulo sigue su camino alcanzando una cierta altura que depende de la cantidad de energía potencial disipada al golpear. Las probetas que fallan en forma frágil se rompen en dos mitades, en cambio aquellas con mayor ductilidad se doblan sin romperse (Figura 2-2).

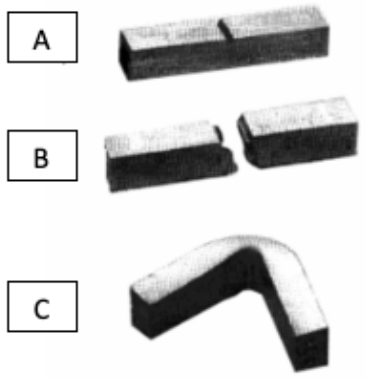


Figura 2-2. Esquema de una probeta Charpy antes y después del ensayo. a) Probeta antes del ensayo, b) Probeta después del ensayo, fractura frágil c) probeta después del ensayo, fractura dúctil.
Fuente: [http://descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/sub-paginas/Materiales/ensayos.html]

Este comportamiento mecánico de deformación depende de la temperatura y la composición química, lo cual obliga a realizar el ensayo con probetas a distinta temperatura, con la finalidad de evaluar la existencia de una "temperatura de transición dúctil-frágil". Este ensayo se lleva a un gráfico como el mostrado en la Figura 2-3, en donde se puede apreciar un fuerte cambio en la energía disipada para algunos aceros con bajos porcentajes en carbono, por lo que el contenido de carbono tiene una influencia importante sobre el comportamiento energía CVN- temperatura de un acero.

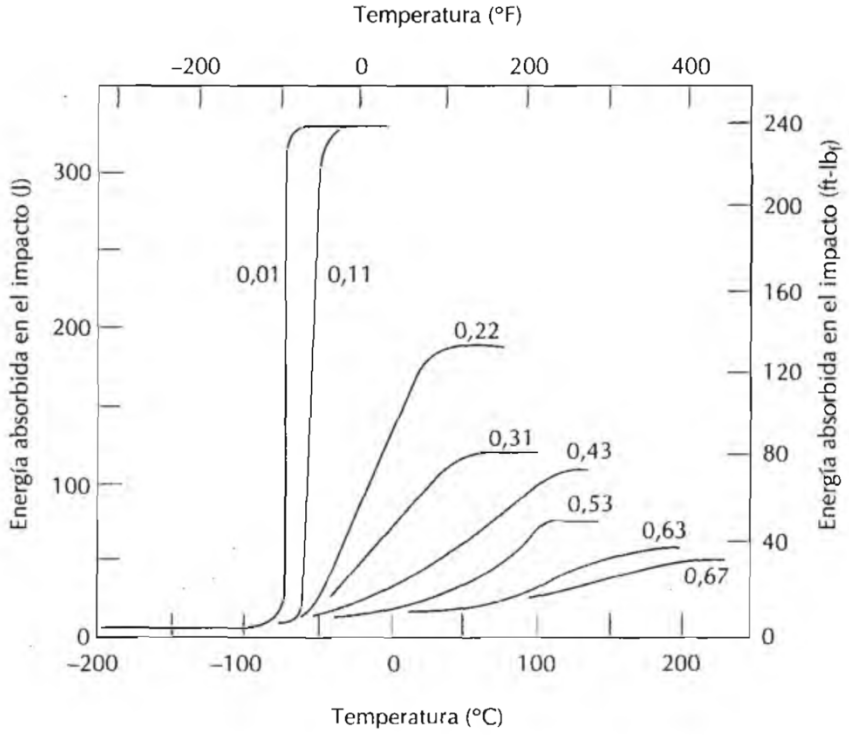


Figura 2-3. Influencia del contenido de carbono de un acero sobre las curvas energía absorbida en el impacto frente a temperaturas para probetas Charpy. (Department of materials science and engineering the university of Utah, William D. Callister, "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales", Barcelona, 1995, p. 214.)

2.2.2 Factor de intensidad de tensiones crítica (K_{Ic})

El factor de intensidad de tensiones (K_I) es un parámetro que define el campo de tensiones en las proximidades de una fisura en un material específico y es directamente proporcional a la profundidad de la grieta a y a la tensión de referencia σ , que depende de las fuerzas externas. Generalmente la magnitud de K_{Ic} queda determinada matemáticamente por la

Ecuación (2-5), que la define como un valor que varía a medida que aumenta la longitud de la grieta y tensión aplicada. El subíndice I de K_{Ic} indica que este valor crítico de K es para el modo I de desplazamiento de la grieta, la cual corresponde a una carga de abertura (o de tracción), mientras que los modos II y III son modos de deslizamiento y de desgarre respectivamente.

La propagación de la fisura tendrá lugar finalmente cuando K_I alcance un valor crítico, denominado tenacidad a la fractura y se representa como $\mathbf{K_{Ic}}$. Por lo tanto, según el criterio de fractura de la Mecánica de la fractura elástica lineal (MFEL), establecido inicialmente por Griffith (Griffith, 1920) y replanteado por Irwin (Irwin G. , 1957), la fractura se volverá catastrófica cuando el K_{Ic} alcance el valor crítico o lo sobrepase como queda definido en la relación mostrada en la Ecuación 2-8:

$$K_I \geq K_{Ic} \qquad (2\text{-}8)$$

$\mathbf{K_{Ic}}$ es una propiedad del material independiente de su geometría y diferente para cada material, por lo que su determinación experimental implica la fabricación de probetas de dimensiones tales que se garantice un estado de deformaciones planas. De esta manera se puede lograr que el K_{Ic} calculado a partir del ensayo de una probeta de laboratorio, pueda ser aplicado a una estructura o elemento construido con el mismo material.

Al trabajar con aceros, donde el comportamiento de este material en la mayoría de los casos es elastoplástico, el obtener un K_{Ic} válido a través de un ensayo implicaría la fabricación de una probeta de dimensiones extremadamente grandes con vistas a obtener el estado de deformaciones planas, lo cual implicaría también el empleo de una máquina de ensayos lo suficientemente potente para aplicar carga a esta probeta (Ramos Morales, Duffus Scott, & Palomo Napoles, 2005).

Se han empleado también otros parámetros para caracterizar la resistencia del material a la propagación de la grieta para materiales elastoplásticos. Entre estos se encuentran el CTOD y el J-integral, los cuales también buscan caracterizar la tenacidad a la fractura a partir de otras metodologías de prueba. Mencionados valores se encuentran estandarizados por las normas ASTM E1290 y ASTM E1820. Además, pueden estar directamente relacionados con la tenacidad a la fractura (K) si la grieta continua extendiéndose con respecto a su orientación original. La obtención experimental de estos parámetros implica al igual que la obtención de

K_{Ic}, un equipamiento experimental de vanguardia que pocos laboratorios poseen en el territorio chileno.

2.2.2.1 Diferencias entre CVN y K_{Ic}

Existen diferencias notables entre el ensayo de tenacidad normado por la ASTM E23 y la ASTM E370, donde el ensayo es utilizado para encontrar el valor de la energía absorbida denominada "Charpy V-Notch", en adelante CVN, y la curva de transición dúctil-frágil. Por otro lado, el ensayo de tenacidad a la fatiga está normado por la ASTM E399, este ensayo es utilizado para determinar el valor de K_{Ic}. Se presentan las diferencias más esenciales en la siguiente tabla (Tabla 2-1):

Tabla 2-1. Principales diferencias entre CVN y K_{Ic}

Diferencias	Ensayo Charpy (ASTM E23)	Ensayo K_{Ic} (ASTM E399)
Parámetro medido	Energía absorbida por la probeta: CVN	Valor crítico de la intensidad de tensiones: K_{Ic}
Punto de medición	Iniciación de la grieta y propagación	Inicio de la propagación inestable de la grieta.
Talla de la probeta	Barra rectangular de sección cuadrada	Suficiente para mantener condiciones de deformación plana.
Razón de deformación	Impacto ($10\text{-}10^2$ seg^{-1})	Cuasi estático (10^4 seg^{-1})
Concentrador de tensiones	Entalla redondeada (r=0,25mm)	Pre-grieta de fatiga (r ~ 0)

Fuente: [(Habashi & Tvrdy, 2015)]

A pesar de estas diferencias, debido a las ventajas económicas, a la mayor sencillez y el equipamiento empleado en el ensayo Charpy, muchos investigadores se han impulsado a proponer relaciones para convertir los datos obtenidos de CVN a una caracterización de mecánica de la fractura (K_{Ic}), lo cual permite una asistencia cuantitativa de la talla crítica del defecto y de los niveles aceptables de tensión aplicada.

2.2.2.2 Correlaciones entre K_{Ic} y la energía de impacto CVN

Las correlaciones son obtenidas de manera empírica y por lo tanto son válidas en rangos específicos. Algunas son encontradas en la literatura y las más utilizadas se plantean a continuación:

Correlaciones de Barson y Rolfe (Barson & Rolfe, 1999) :

- $K_{Ic}{}^2 = 5 \times \sigma_{ys} \times [CVN - \frac{\sigma_{ys}}{20}]$ *(2-9)*

Donde σ_{ys}: Límite fluencia, Esta correlación es utilizada solo en la zona alta ("upper Shelf") de la curva transición dúctil-frágil.

- $K_{Ic}{}^2 = 5 \times CVN \times E$ *(2-10)*

Donde E: Modulo de Young, esta correlación es utilizada en la zona baja de la curva de transición dúctil-frágil.

- **Correlación de Rolfe-Novak** (Rolfe & Novak, 1970) **:**

  - $K_{Ic}{}^2 = 5 \times \sigma_{ys}{}^2 \times [\frac{CVN}{\sigma_y} - 0{,}05]$ *(2-11)*

- **Correlación de Corten-Sailor** (Sailors & Corten, 1973) **:**

  - $K_{Ic}{}^2 = 8 \times E \times CVN$ *(2-12)*

- **Correlación de Marandet-Sanz** (Marandet & Sanz, 1977) **:**

  - $K_{Ic} = 19 \times [CVN]^{1/2}, (\, Mpa\, m^{\frac{1}{2}}, J^{\frac{1}{2}})$ *(2-13)*

Los valores de tenacidad determinados por estas correlaciones abarcan un amplio rango y están determinadas para regiones bien específicas como, por ejemplo, la correlación de

Rolfe-Novak, la cual aplica solo para condiciones “upper shelf”, es decir, en la zona alta de la curva de transición dúctil-frágil del material (zona dúctil).

En el rango de transición de la energía de impacto, aplican las correlaciones de Barson-Rolfe, Corten-Sailors y Marandet-Sanz. Estas zonas están esquematizadas en la Figura 2-4, donde se puede ver las tres zonas en las que puede trabajar el material dependiendo de la temperatura a la cual esta sometida.

Todo esto nos da una idea de que las correlaciones deben aplicarse en función de la región de temperaturas vs. CVN en que nos encontremos y en la dependencia del material.

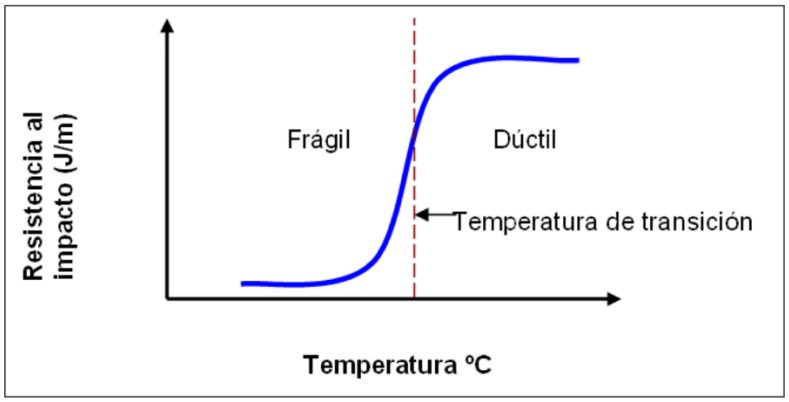


Figura 2-4. Esquema de gráfico obtenido en ensayo Charpy donde se evidencian los 3 estados de comportamiento del material a diferentes temperaturas. Fuente: https://nanopdf.com/download/protocolo-impacto-escuela-colombiana-de-ingenieria_pdf. Pag 8.

2.2.3 Acero A572 Gr 50

El acero del cual está fabricada la grúa es de calidad estructural de alta resistencia y aleación (HSLA) al Niobio- Vanadio. Este acero es más económico que aquellos que son aleados convencionales, ya que contiene cantidades menores de elementos de aleación de mayor costo. Sin embargo, éste en particular, recibe un tratamiento térmico que le da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono, el cual es más costoso (American society for metals handbook, 1990).

La composición química del acero ASTM A 572 grado 50 según la norma ASTM está dada como se muestra en la Tabla 2-2, la cual presenta las proporciones máximas de cada elemento.

Tabla 2-2. Composición química del acero ASTM A 572 Gr 50, valores máximos.

C%	Mn%	P%	S%	Si%	Nb&V%	Cu%	Ni%	Cr%	Mo%
0,23	1,35	0,04	0,05	0,40	0,15	0,60	0,45	0,35	0,15

Fuente: [American Society for metals handbook (ASTM A 572)]

Las propiedades mecánicas nominales para el acero ASTM 572 se presentan en la Tabla 2-3:

Tabla 2-3. propiedades mecánicas del acero ASTM 572 Gr. 50

Grado	Límite de fluencia		Resistencia a la tracción mínima		% de elongación mínimo (8 in)
	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	%
50	345	50	450	65	18

Fuente: [American Society for metals handbook (ASTM A 572)]

2.3 Definición y características principales de las grúas portuarias.

Las grúas portuarias son estructuras mecánicas que manipulan y almacenan contenedores y elementos a granel, los cuales se cargan y descargan de los buques en puertos comerciales.

2.3.1 Tipos de grúas

Existen varios tipos de grúas, dependiendo principalmente de los mecanismos que la componen, ya sea con poleas, contrapesos, ruedas o rieles. Algunas de estas se pueden apreciar en la Figura 2-5 junto a la Tabla 2-4, la cual muestra y describe, las grúas más comunes en funcionamiento en los puertos de Chile.



Figura 2-5. Grúas más comunes encontradas en los puertos de Chile. A) Carretilla Pórtico. B) Sidelifter. C) Grúa Pórtico. D) Grúa apiladora de alcance. E) Grúas de brazo nivelado "Luffing.
Fuente: [https://es.scribd.com/document/337710221/Tipos-de-Gruas-en-Un-Puerto]

Tabla 2-4. principales características de grúas del puerto de Chile

Tipo de grúa	Características
Carretilla Pórtico	Estructura tipo pórtico de reducidas dimensiones montada en raíles de ocho ruedas y guiada mediante una cabina montada en la parte superior.
Sidelifter	Elevador lateral para el transporte intermodal entre terminal y camiones, o terminal y ferrocarril.
Grúa Pórtico	Estructuras de gran tamaño que pueden llegar a los 140 [m] de altura y mas de 20.000 [T] de carga.
Grúa apiladora de alcance	Grúa utilizada para trabajar en espacios reducidos
Grúa de brazo nivelado "luffing"	Estructuras fijas preparadas para el entorno marino y destinadas a tareas auxiliares para la carga y descarga de todo tipo de mercancías

Fuente: [https://es.scribd.com/document/337710221/Tipos-de-Gruas-en-Un-Puerto]

2.3.2 Vida útil de las grúas

Los materiales de los cuales están confeccionadas las grúas tienen una resistencia inicial y a medida que un componente es utilizado un número suficiente de veces, incluso sin alcanzar su límite, empezará a perder su capacidad de resistencia, dando como resultado que falle en algún momento, aunque cada carga individual no haya producido daño alguno.

Por lo tanto, el concepto de vida útil de un componente o equipo, en este ámbito, se basa en dos factores esenciales: la carga y la resistencia a la carga. Su combinación genera la duración efectiva del material. Es necesario considerar que el grado de carga en que trabaja una grúa durante su servicio regularmente no es el mismo (contenedores vacíos, contenedores llenos, cuchara vacía, cuchara llena, etc.). En estos casos, el fabricante, emplea espectros de cargas mediante los cuales se intenta determinar una carga estándar aplicada a la grúa.

Si se desea determinar exactamente un espectro de cargas para una grúa concreta, solo será posible como lo menciona el fabricante en su manual (GOTTWALD Port Technology, 2013), mediante una prueba estadística al azar. Un ejemplo podría ser una medición de unos 1000 movimientos de elevación. El problema recae en que no se conoce de antemano la distribución exacta de las cargas, por lo que el fabricante tiene que clasificar diferentes tipos de espectros para diferentes intensidades de una grúa, con el fin de poder ajustar en la práctica el espectro de cargas. Dichos espectros abarcan desde la categoría Q1 (“La grúa levanta mayoritariamente cargas pequeñas y raramente cargas máximas admisibles”) hasta la categoría Q4 (“La grúa levanta a menudo cargas que alcanzan su máxima capacidad de carga”).

2.3.3 Clasificación de grúas según cargas

La carga designa una característica del uso que se le da a la grúa en operación, la resistencia a la carga, y, por otro lado, denota una característica de la grúa. Al momento de construir una grúa, el fabricante se enfoca en un cierto grupo de grúas y diseña la grúa en conformidad con ese grupo.

La norma FEM 1.001 (FEM, 1998), es la norma europea para el diseño de aparatos de elevación, la cual, señala que existen ocho grupos (A1 hasta A8), donde cuanto más alto sea

el número del grupo de la grúa, mayor serán los espesores de las chapas y materiales y elementos utilizados.

2.3.4 Categorías de servicio

Si es conocida la resistencia a la carga (grupo de grúas) y la carga prevista (categoría de espectro de cargas), es posible obtener la vida útil (categoría de servicio) del equipo.
Según la norma FEM (FEM, 1998) se tienen diez categorías de servicio (U0 a U9), las cuales entregan información acerca del número de ciclos de trabajo que la grúa pueda desempeñar antes de alcanzar el fin de su vida útil, y a medida que se vaya acercando dicho fin, la probabilidad de que se produzca un fallo durante su servicio irá aumentando cada vez más. En la Figura 2-6. se muestra como son relacionadas las categorías de carga y servicio con la vida útil asociada a los diferentes estados para los distintos tipos de grúa.

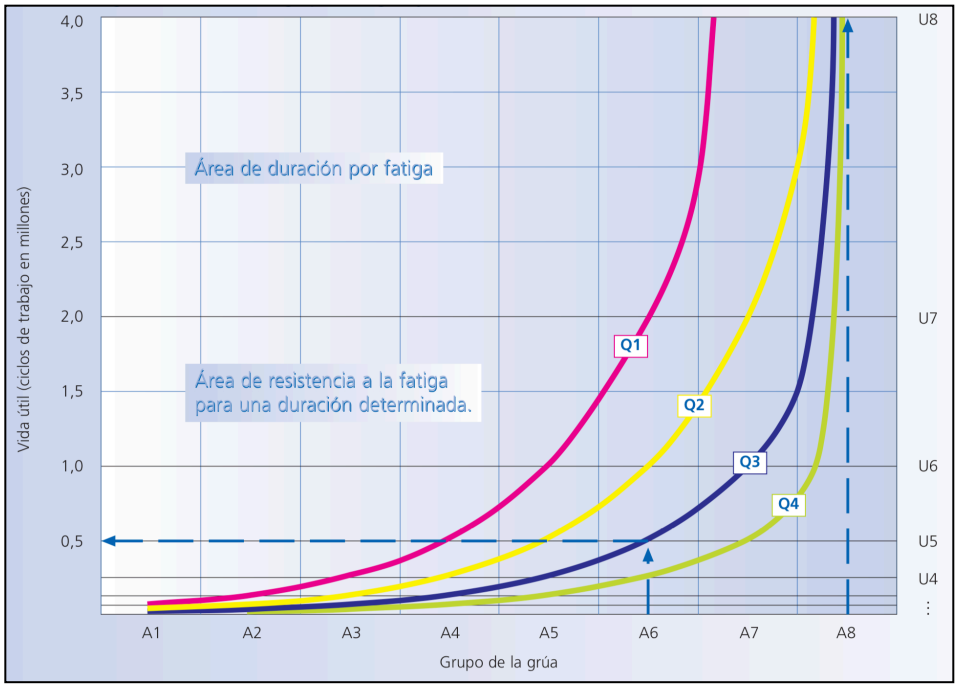


Figura 2-6. Relación entre grupo de la grúa y vida útil. fuente: [Portal Slewing Crane].

2.4 Galgas extensiométricas

Una galga extensiométrica, extensómetro o también conocido por su nombre en inglés: *"Strain Gauge"*, es un dispositivo de medida universal que se utiliza para la medición de diversas magnitudes por medio de una resistencia eléctrica, tales como la presión, la carga, torque, deformación, etc. (Rodriguez, 2013). Es uno de los sensores de deformación más usados en el mundo, especialmente, en las áreas de ingeniería civil, mecánica e industrias debido a su bajo costo y amplia disponibilidad en el mercado.

2.4.1 Funcionamiento de una galga extensiométrica

La galga trabaja relacionando la deformación del elemento que se desea analizar mediante el cambio de su resistencia eléctrica. La deformación unitaria se puede definir como la tasa de cambio de longitud de un elemento, de acuerdo a la Ecuación 2-15.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad (2\text{-}14)$$

Donde L_0 es la longitud inicial de un elemento y ΔL es la variación con respecto al estado inicial. La galga extensiométrica mide la deformación unitaria, la cual puede ser calculada según la Ecuación 2-16:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \mathrm{R}}{\mathrm{R}} \times GF \qquad (2\text{-}15)$$

Donde R es la resistencia propia de la galga extensiométrica, ΔR es la variación de resistencia y GF es un factor de ajuste.

La deformación unitaria (ε) se llama en inglés "strain", que puede ser positivo (tensión) o negativo (compresión) y es un valor adimensional. En la práctica la magnitud de la medida es tan pequeña que usualmente se expresa en microstrain (με) (millonésima parte) (Sándoval, 2013). Para conocer con exactitud cuánto varía la resistencia de la galga es necesario conectarla a una fuente de excitación externa formando un circuito eléctrico. La

configuración más utilizada corresponde a un puente de Wheatstone; el cual consta de 4 resistencias conectadas según el esquema de la Figura 2-11:

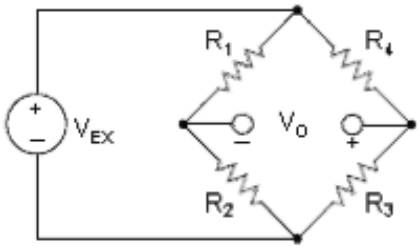


Figura 2-11. Esquema del puente de Wheatstone. Fuente: [https://josecasares.com/puente-de-wheatstone/]

Las resistencias se encuentran conectadas a una fuente de excitación que entrega un voltaje de entrada (V_{ex}).

2.4.2 Composición de una galga extensiométrica

Se trata de un cable muy fino dispuesto en forma de grilla adherido a un respaldo denominado Carrier. La galga se pega directamente al lugar del elemento del cual se desea medir la deformación (ver Figura 2-12), por lo tanto, se estira o comprime siguiendo la deformación de éste. Mediante un cable se conecta la galga a un instrumento especializado que traduce los cambios de resistencia de ésta a unidades de deformación unitaria.

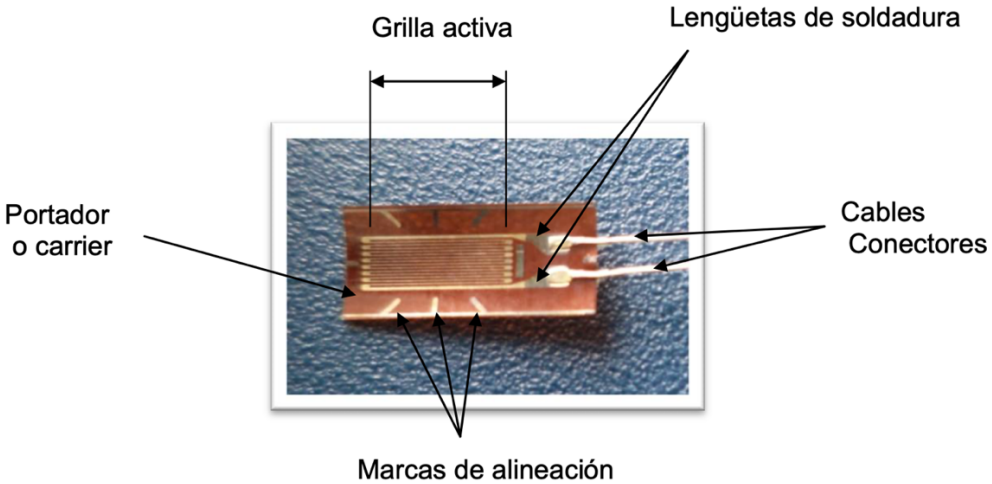


Figura 2-12. Partes de una galga extensiométrica formado por la grilla y su respaldo o carrier. Fuente: [Autor]

2.4.3 Tipos de Galgas

Existen diferentes tipos de galgas, que varían desde la cantidad de grillas que poseen y por ende las direcciones de esfuerzo que pueden detectar (direcciones x, y, z), y el rango de deformaciones a los cuales serán utilizados.

2.4.3.1 Galgas uniaxiales

Consiste en una galga de grilla simple en una sola dirección (ver Figura 2-13), la cual solo se utilizará en casos donde se desea conocer el esfuerzo en una sola dirección y esta dirección está previamente determinada.

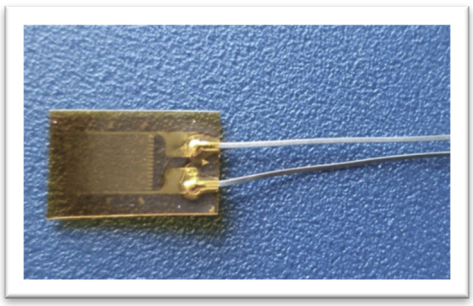


Figura 2-13. Galga extensiométrica uniaxial Fuente: [Autor]

2.4.3.2 Galgas biaxiales (Rosetas)

Para estados biaxiales de esfuerzos, una roseta de dos o tres elementos puede ser muy útil cuando es necesario determinar las direcciones principales de esfuerzos y/o deformaciones. Cuando las direcciones principales son conocidas, una roseta de dos elementos en 90º (Figura 2-14B), puede ser empleada alineando los ejes con respecto a la dirección de las grillas de las galgas. También hay galgas o rosetas de tres elementos (Figura 2-14A). Estas son utilizadas cuando no existe seguridad en las direcciones principales de los esfuerzos.

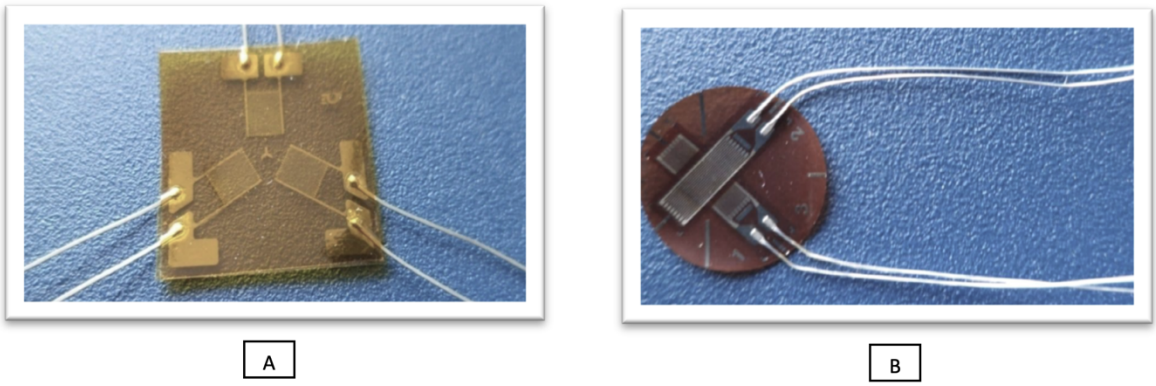


Figura 2-14. A) Roseta simple-plana con 3 elementos en 0º / 120º /240º. B) roseta apilada de dos elementos en 90º. Fuente: [Autor]

2.4.4 Criterio de selección de las galgas extensiométricas

Un método general para una primera selección previa a los criterios detallados para una galga extensiométrica en específico puede esquematizarse en los siguientes diagramas de flujos:

- <u>Número de rejillas</u>



Figura 2-15. Diagrama de selección de galga extensiométrica según la dirección de los esfuerzos. Fuente: [Laboratorio Idiem].

- Tamaño máximo de las rejillas

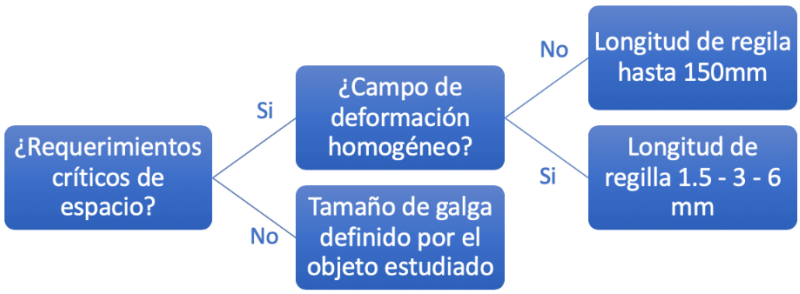


Figura 2-16. Diagrama de selección de galga extensiométrica según el tamaño de la galga. Fuente: [Laboratorio Idiem]

2.4.5 Dispositivos de salida

Los datos de deformación y esfuerzos captados por las galgas son recopilados por los componentes de salida, los cuales mediante un monitor convierten la señal de salida del amplificador a una forma observable por el usuario, en el caso de que en el monitor se muestren las variaciones de voltios o amperios y su variación en el tiempo.

Capítulo **III**

Descripción del caso de estudio

La grúa que se estudia en esta presente memoria de título es del tipo “luffing”, también llamada grúa de brazo nivelado. Ésta, utiliza una pala tipo “Clamshell” accionada por cables de acero para descarga de productos granulados desde el interior de las bodegas de los buques. Esta se puede dividir en cuatro partes principales: Cuadrilátero móvil, plataforma de sala de máquinas, columna y pórtico. (Figura 3-1).



Figura 3-1 Grúa Luffing FAM en estudio - Componentes Principales. Fuente: [Autor]

Fue adquirida por el mandante a la empresa alemana FAM en el año 2002 y puesta en servicio hacia finales del 2003, en una operación que duró alrededor de un año y medio. La grúa fue trasladada desde Alemania y fue armada en el mismo lugar de su ubicación final en San Antonio, Chile. Esta ha operado desde ese entonces hasta la fecha, presentando a lo largo de su vida útil algunos daños en su estructura en componentes mecánicos de desgaste habitual, pero ninguno similar al daño presentado en su columna principal que motiva el presente estudio. Con el tiempo, la grúa presentó una grieta que fue descubierta mientras se realizaba

un procedimiento rutinario de inspección en la estructura por medio de ensayos no destructivos (NTD). Lo anterior, ha motivado la realización del presente proyecto de análisis y propuesta de reparación.

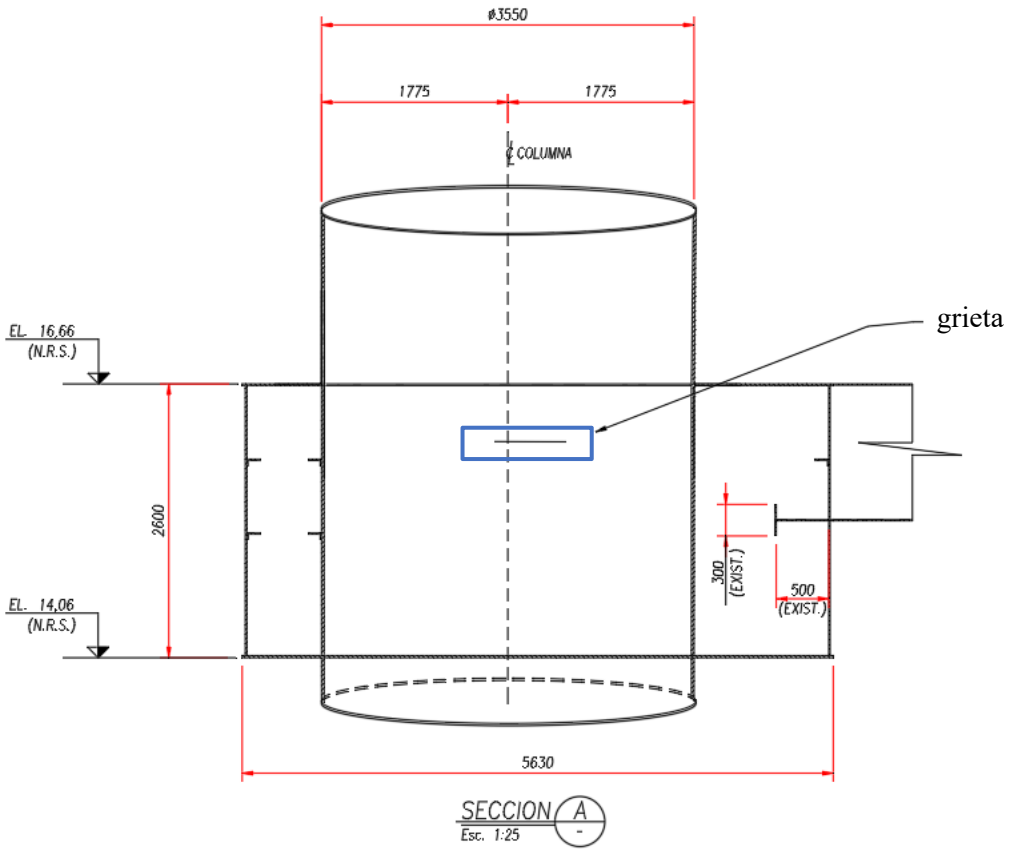


Figura 3-2. Vista sección A de columna en elevación. Fuente: [Planos grúa FAM]

El daño importante sufrido en la estructura reside en la grieta horizontal de **103,3 [mm]** de largo ubicada en la columna que tiene forma cilíndrica compuesta de un acero estructural A572gr 50, en forma de plancha de 18 [mm] de espesor los cuales están soldadas y apernada en sus uniones. En la Figura 3-3 se puede apreciar el largo de la grieta donde, al momento de la detección, se realizó de inmediato un procedimiento para frenar el avance de la grieta redondeando los extremos de forma preventiva para limitar su crecimiento.



Figura 3-3. grieta presente en la grúa, ubicada en el interior de la columna principal de ésta. Posee un largo de 103,3 [mm], Se redondearon los extremos de la grieta para controlar su propagación. Fuente: [Autor]

La grúa FAM en cuestión, se ubica sobre un tablero de hormigón apoyado en pilotes hincados en el fondo marino. El tope superior del pórtico, de donde nace la columna principal, se ubica en la cota 16.660 NRS, mientras que la sala de máquinas se ubica en el nivel 23.890 NRS. El peso de todo el conjunto ubicado sobre la columna es de aproximadamente 370 [ton]. La altura de la columna cilíndrica, según el manual de fábrica, es de 4676 [mm], sin considerar la corona rotatoria ubicada entre el cilindro y la sala de máquinas. La fisura presente en la columna se registra a 2580 [mm] desde la parte más baja del cilindro. Las Figuras 3-2, 3-4, 3-5 muestran la ubicación de la fisura anteriormente mencionada desde diferentes vistas.

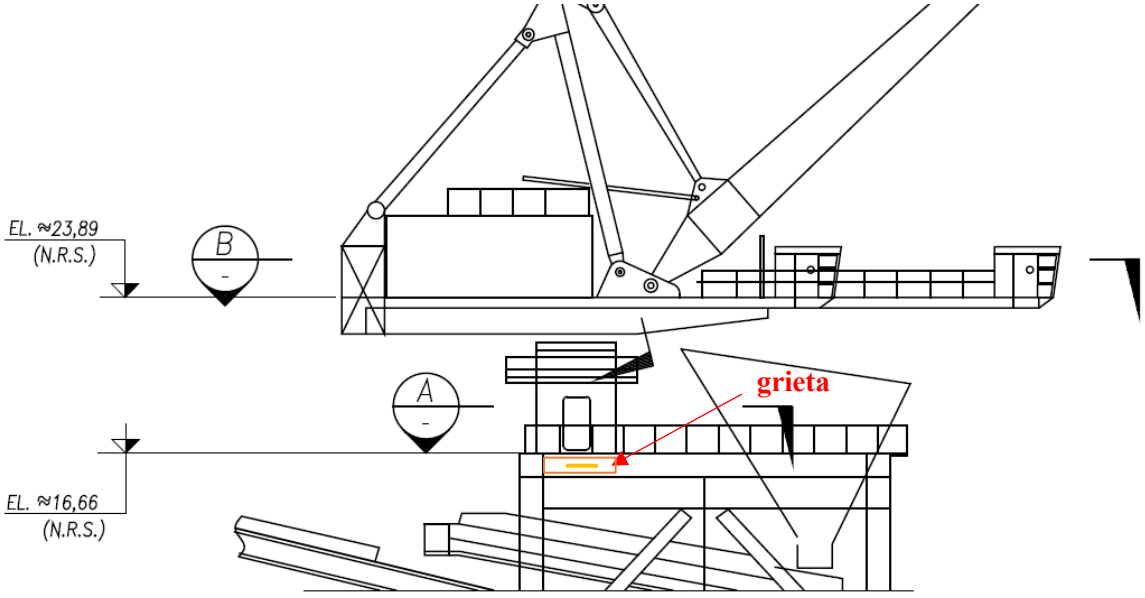


Figura 3-4. Vista en elevación de la grúa FAM. Fuente: [Planos grúa FAM]

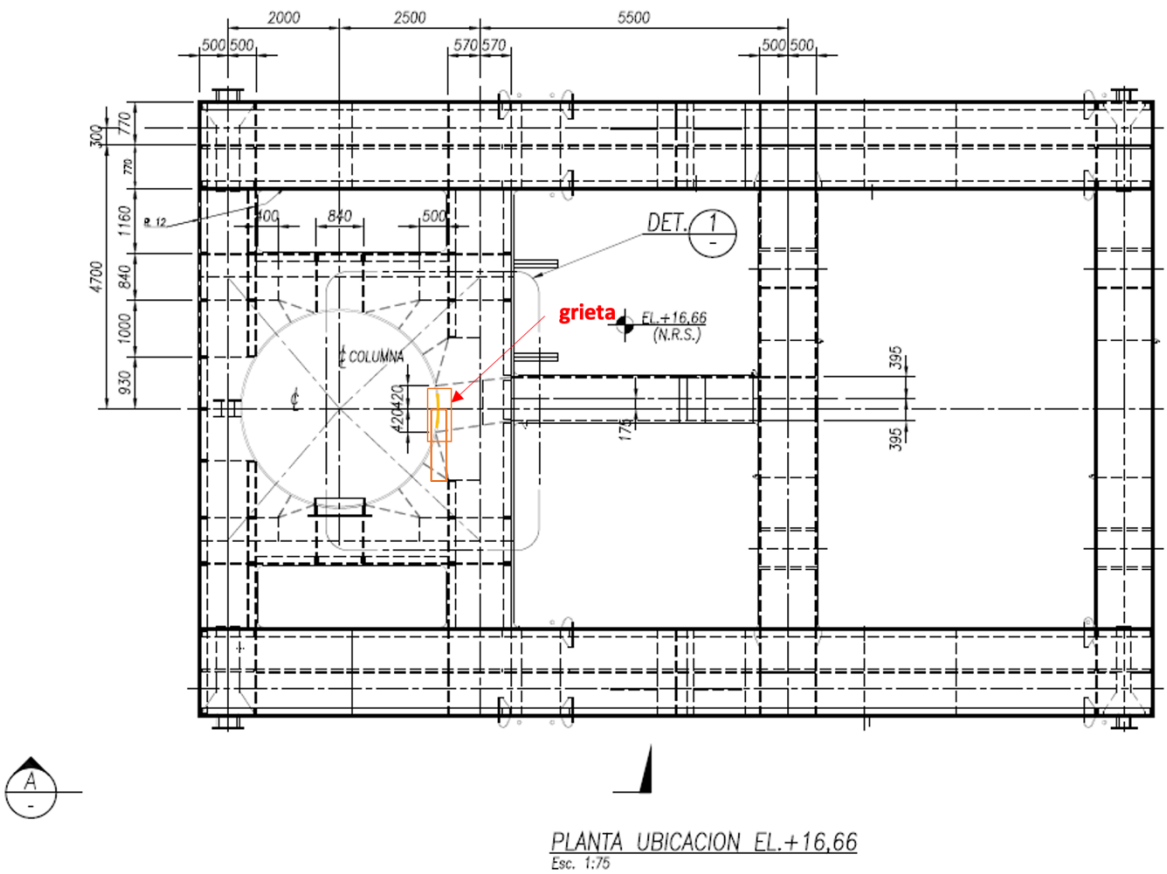


Figura 3-5 vista en planta de la grúa. Fuente: [Planos grúa FAM].

3.1 Clasificación de la grúa “Luffing”

De acuerdo con la información proporcionada por el mandante, pese a que se negó por términos de privacidad la totalidad del archivo de la clasificación de la grúa dada por el fabricante, se pudo obtener un extracto, donde entrega datos importantes para este estudio (archivo adjuntado en el Anexo A).

Esta grúa fue diseñada de acuerdo con la norma FEM 1.001, que presenta las siguientes clasificaciones del equipo como un todo:

- Clasificación global de la grúa: **Clase A8**

- Clasificación espectro de carga normalizado: **Q4**
  Significa un factor de espectro entre 0.50 y 1.0. El factor de espectro refleja cuánto se acercan en promedio las cargas levantadas a la carga máxima admisible.

- Categoría de servicio del equipo: **U7**
  Esta clase tiene relación con un número máximo de ciclos de carga entre $1 \cdot 10^6$ y $2 \cdot 10^6$

En resumen, la clasificación A8 resulta de considerar para el diseño un total entre 1,000,000 y 2,000,000 de ciclos de carga de la grúa como máximo durante su vida útil (clase U7), además un factor de espectro de carga entre 0.5 y 1.0 (clase Q4). Este factor refleja cuan cerca de la carga máxima se considera que va a ser la utilización promedio de la grúa.

Capítulo **IV**

Procedimiento Experimental

En este capítulo, se presentará el procedimiento utilizado para las pruebas experimentales, además de presentar una breve descripción sobre el equipamiento necesario para llevar a cabo las pruebas. Por otro lado, se presentan las mediciones de esfuerzos, deformaciones en la zona estudiada mediante galgas extensiométricas, el ensayo de Tenacidad y de metalografía asociada al material A572 Gr.50.

4.1 Medición de esfuerzos por medio de galgas extensiométricas.

Se realizó el monitoreo instrumental local cuasi estático de las deformaciones axiales en el manto de la columna en la zona donde está presente la fisura. El objetivo del monitoreo fue medir los cambios de tensiones axiales y posibles concentraciones de tensiones, a consecuencia de las actividades habituales de funcionamiento de la grúa.

4.1.1 Consideraciones al momento de la medición

Las deformaciones unitarias (ε_{sg}) se midieron a partir del estado tensional de la grúa en su posición de reposo adoptada cada vez que termina un ciclo de trabajo, la cual consiste en su labor de carga y descarga de gráneles. Cabe resaltar que los sensores (galgas extensiométricas) no miden el estado tensional producto del peso propio de la estructura (σ_0), por lo que la tensión total (σ_t) está definida en la Ecuación 4-1:

$$\sigma_t = \sigma_0 + \sigma_{sg} \qquad (4\text{-}1)$$

Donde σ_0 se estimará a partir de un análisis teórico estático del peso de los elementos de la grúa que actúan en la columna de la estructura.

Las tensiones locales (σ_{sg}) se estimarán por medio de las deformaciones unitarias (ε_{sg}), usando el valor del módulo de elasticidad del acero (E) de 205 [Gpa] como referencia de la cláusula 6.6 de la norma inglesa BS 5400-3 para este tipo de aceros, la tensión local queda definida por medio de la Ecuación 4-2:

$$\sigma_{sg} = E \times \varepsilon_{sg} \qquad (4\text{-}2)$$

4.1.2 Procedimiento de trabajo

1. Definición de los puntos a instrumentar en la zona de reparación.
2. Definición de los criterios de control para el monitoreo de las tensiones durante los ciclos habituales de trabajo, en función de la tensión de fluencia del acero de la columna de la grúa.
3. Instalación de las galgas extensiométricas, las que se orientaron en la dirección longitudinal de la columna de la grúa.
4. Registro y monitoreo de deformaciones unitarias, cálculo de tensiones y comparación con los valores límites preestablecidos teóricos (resistencia del acero).
5. Finalmente, se establecen las deformaciones residuales (diferencia de tensiones) respecto a la condición inicial del monitoreo.

4.1.3 Calibración de datos

Las condiciones de instalación de los sensores difieren a las condiciones ideales de laboratorio. Existen factores externos que pueden alterar los resultados obtenidos, por lo tanto, es necesario realizar una serie de pruebas para descartar fuentes de error, validar los registros obtenidos y la metodología empleada para la determinación de las deformaciones. Con el fin de optimizar el tiempo de instalación y disminuir los posibles errores en la medición, se adaptó la metodología propuesta por el fabricante y por el laboratorio IDIEM (Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales) de la Universidad de Chile, con los que se trabajó en conjunto para la implementación y toma de datos. El detalle de la metodología de preparación de las galgas queda adjunto en el Anexo I.

4.1.3.1 Calibración de los sensores

El sistema de adquisición de datos utilizado permitía conectar las galgas bajo una configuración de cuarto de puente. Una vez que el puente se encuentra balanceado, sólo es posible conocer las variaciones en la deformación de las galgas desde ese momento en adelante. Al desconectar el equipo, la referencia se pierde.

4.1.3.2 Efecto del ruido eléctrico sobre la señal

El ruido eléctrico corresponde a una mezcla de señales aleatorias de diferente frecuencia que se sobreponen a la señal de interés. Para disminuir el efecto del ruido sobre la señal, la configuración empleada en la conexión de los sensores incluyó por medio de una malla una conexión a tierra la cual generalmente no es necesario, sin embargo, se agregó de forma preventiva.

4.1.3.3 Efecto de la humedad y corrección por longitud de cable adicional

Las mediciones, instalación de las galgas y los elementos a monitorear, se realizaron en los meses de verano, por lo que, aunque se dejaron un poco menos de una hora registrando lecturas, estas se realizaron al interior de la columna, lo que significa que las galgas no estuvieron a la intemperie, la temperatura y humedad fueron las óptimas para el ensayo, por lo que se despreciaron los efectos de humedad sobre el registro y la corrección de la longitud del cable.

4.1.3.4 Efecto de la temperatura sobre las deformaciones

Se realizaron controles de temperatura en las galgas extensiométricas y la superficie a la cual está adherida mediante un termómetro infrarrojo digital laser en el lugar, como se puede ver en la Figura 4-1, esto se debe a la variación de temperatura que puede repercutir en una deformación térmica, que provocaría lecturas diferentes a solo por el efecto de las cargas, lo cual es una característica negativa del circuito de cuarto de puente.



Figura 4-1. Control de la temperatura mediante un termómetro infrarrojo laser al interior de la estructura.

4.1.4 Implementación de elementos a utilizar

4.1.4.1 Instrumentos de medición

Se utilizaron galgas extensiométricas marca Tokyo Sokki Kenkyujo, modelo PFL-20-11. Un esquema de éstas se muestra en la Figura 4-2 mientras que en la Tabla 4-1 se muestran las principales características de estas galgas:

Tabla 4-1. propiedades de la galga extensiométrica a utilizar.

Material aplicable		**Metal, Mortero**
Temperatura operativa (ºC)		-20 ºC a +80 ºC
Material de la lámina		Poliéster
Material filamento		Aleación Cu-Ni
Límite de deformación a Tº ambiente		2% (20000 x 10^{-6} strain “ε”)
Dimensiones del filamento:	Largo [mm]	20
	Ancho [mm]	1,2
Dimensiones de la lámina:	Largo [mm]	28
	Ancho [mm]	6,6
Resistencia [Ω]		120

Recuperado de: [https://tml.jp/e/product/strain_gauge/concrete.html#pf_list.html]

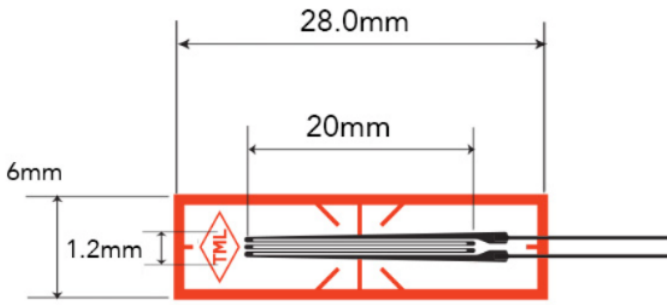


Figura 4-2. Galga extensiométrica modelo: PFL-20-11, con una resistencia de 120Ω.
Fuente: [https://store.technimeasure.co.uk/product/pfl-20-11/]

4.1.4.2 Registrador de datos

En la estación base, donde se recopilaron todas las mediciones de las galgas, se utilizó un registrador de datos también conocido como "Data Logger" modelo TDS-602 de la marca Tokyo Sokki Kenkyujo, el cual tiene una operación muy simplificada, que ofrece una medición estable a una velocidad de 0,04 segundos por canal y tiene una resolución de 0,1 microstrain, dispositivo que se puede ver en la Figura 4-3A. El equipo en funcionamiento con las galgas ya instaladas se puede apreciar en la Figura 4-3B.

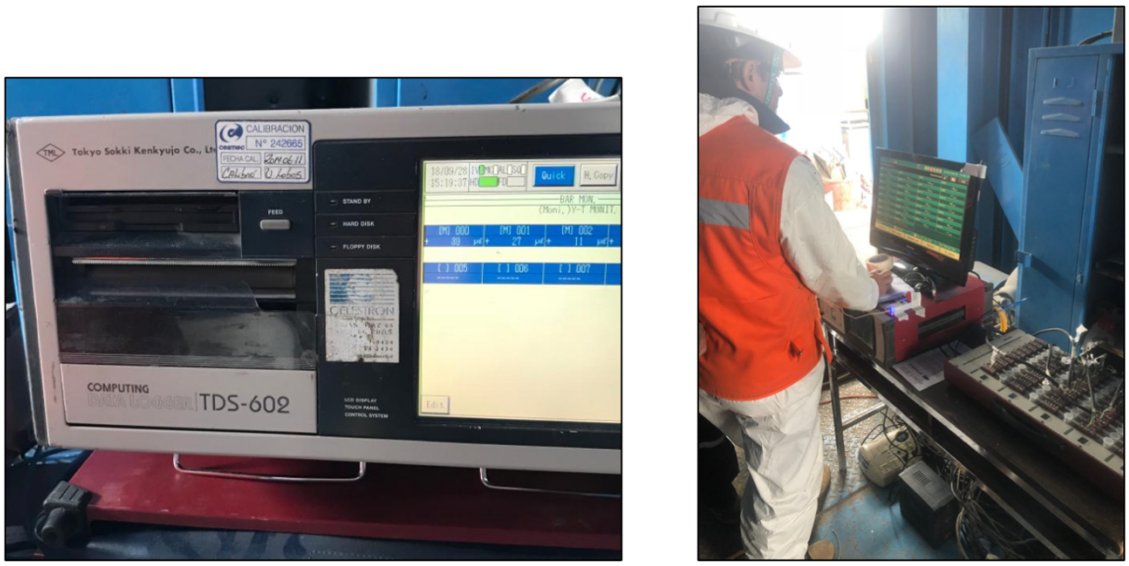


Figura 4-3 A) Registrador de datos "Data Logger" TDS-602. B) Estación base al interior de la columna.

4.1.4.3 Esquema de conexiones

La instalación de las galgas se efectuó en el interior de la columna base de la estructura, con un total de 4 galgas ubicadas a la altura de la grieta en diferentes posiciones.

La posición de los puntos instrumentados corresponde a los números 1, 2, 3 y 4 según la Figura 4-4 para la vista en planta y la Figura 4-5 para la vista en elevación:

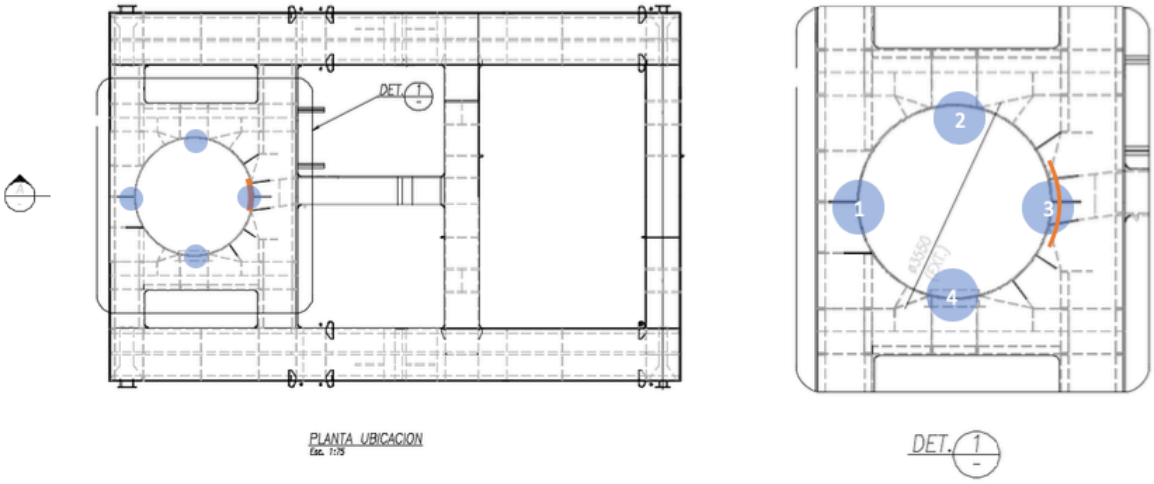


Figura 4-4. Detalle de ubicación de las galgas extensiométricas dentro de la columna, vista en planta a la altura de la fisura. Círculos de color azul son la ubicación de las galgas y líneas de color naranja es la ubicación de la fisura.

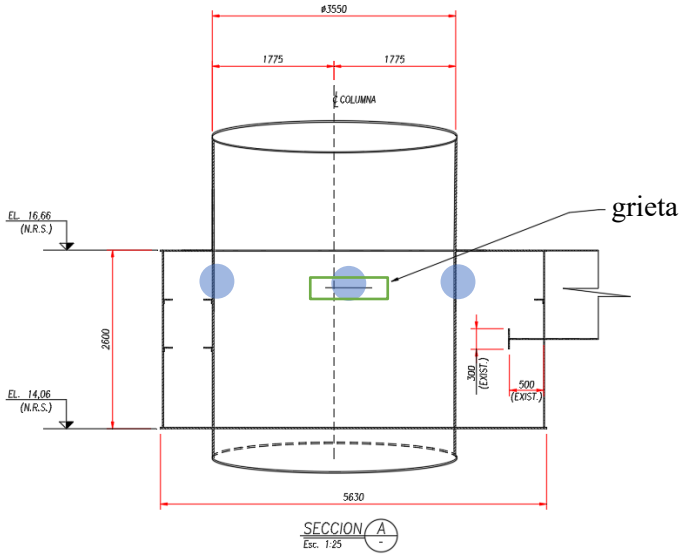


Figura 4-5. Detalle de ubicación de las galgas, vista en elevación. Círculos de color azul son la ubicación de las galgas y líneas de color naranja es la ubicación de la fisura.

4.1.4.4 Movimiento a medir

Los movimientos que usualmente realiza la grúa en sus labores son de carga y descarga de granel desde el puerto a los buques de almacenamiento, son de extensión y contracción del brazo de la grúa y una rotación de la corona en el eje horizontal. Para la medición de los esfuerzos en la zona de interés se utilizaron las dos posiciones claves que se presentan en el esquema a continuación (Figura 4-6), donde se muestra el rango de alcance máximo y el mínimo estimado del brazo de la grúa. Además, se consideró una rotación usual de la corona rotatoria.

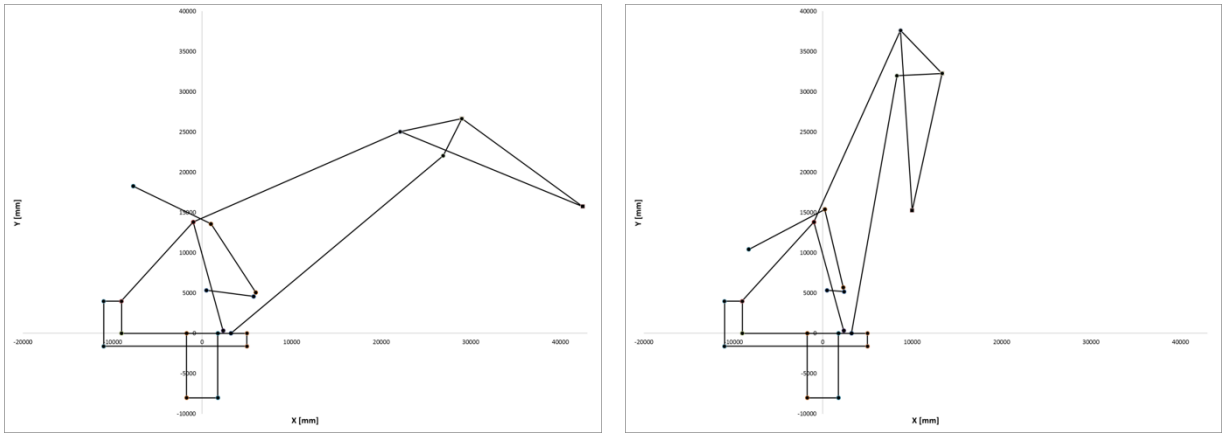


Figura 4-6. movimiento del rango de la pala de la grúa en su labor de carga y descarga granelera, dispuesta para la medición del esfuerzo con galgas extensiométricas. Fuente: [Autor]

4.1.4.5 Resultados

En el ensayo, se realizó un total de 30 ciclos de trabajo de la grúa (un ciclo de trabajo equivale a la toma y descarga del material transportado por la grúa) para un mejor muestreo de datos, de los cuales se obtuvo una media aritmética a partir de los máximos valores a tracción y compresión por ciclo, además de obtener los valores de la desviación estándar y la deformación en microstrain (με) en la siguiente tabla resumen (Tabla 4-2). Resultados completos de las mediciones están detalladas en el Anexo H.

Tabla 4-2. Resultados de mediciones galgas extensiométricas

Galga Extensiométrica	Media tracción máx. [Mpa]	Media compresión máx. [Mpa]	Desviación estándar tracción [Mpa]	Desviación estándar compresión [Mpa]	Deformación media máx. tracción [με]	Deformación media máx. compresión [με]
1	81,83	66,50	1,68	3,86	395,3	321,2
2	66,5	81,96	1,57	4,33	321,3	395,9
3	**67,91**	**83,64**	**1,65**	**3,42**	**328,1**	**404,1**
4	83,47	67,83	1,63	4,45	403,2	327,7

Cabe destacar que a partir de los resultados obtenidos en la Tabla 4-2, se utilizaron los valores de tracción de la galga extensiométrica número 3 para el análisis de la longitud de la grieta, ya que, es la que está ubicada más cerca al lugar de esta, y por ende, es la que tiene una mejor representatividad, la medición de los otros puntos adicionales se utilizaron para la comprobación de los resultados obtenidos y posibles errores en el desarrollo. En la Figura 4-7 se presenta el gráfico de variación del esfuerzo en un período de alrededor de 30 ciclos de carga y descarga.

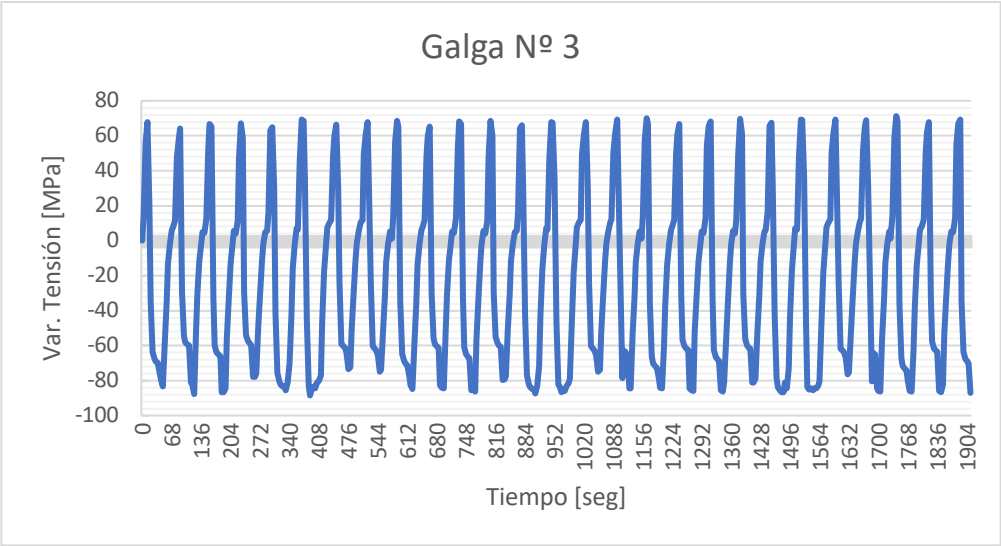


Figura 4-7. resultados de las galgas extensiométricas en el punto de medición nº 3.

Los valores obtenidos por medio del previo análisis estadístico permiten validar la repetitividad de los valores medidos y determinar que las variaciones, no generan un error considerable para este estudio a partir de la observación de la variación estándar del parámetro del esfuerzo de tracción medido. Pero, es necesario recordar que estas tensiones se mueven dentro de un rango, lo que puede generar una posible variación en la precisión del resultado final. Es por este motivo que actualmente se usan metodologías probabilísticas a partir de una serie de curvas de probabilidad constante (William D. Callister, 1995), en vez de un valor único para un estado de tensión determinado.

4.2 Descripción del Laboratorio de Pruebas

Como se dijo, se realizó el ensayo de Charpy en el laboratorio SIMET, con el objetivo de poder caracterizar el material presente en la estructura y su comportamiento. De esta forma, se pudo saber en qué parte de la curva transición de comportamiento dúctil-frágil está situado el material y el valor de la energía absorbida (CVN), la cual, mediante correlaciones encontradas en la literatura, es posible estimar el valor de K_{Ic}, necesario para la estimación de la longitud máxima de grieta. La prueba se ejecutó para diferentes temperaturas, sin embargo, cabe destacar que la grúa está expuesta a temperaturas medias de 20 [ºC] para la zona central de Chile (San Antonio).

4.2.1 Metodología

La metodología para llevar a cabo estos ensayos queda ilustrada en la Figura 4-8. Previo al ensayo de tenacidad, se realiza un ensayo metalográfico, con el fin de determinar la dirección más débil que, para este tipo de materiales, es la dirección transversal a la línea de fabricación, esto con el fin de reducir a la mitad la cantidad de probetas a ensayar y con ello optimizar recursos.

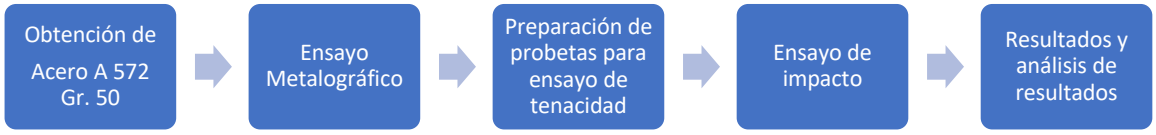


Figura 4-8. Metodología para la realización del ensayo de tenacidad. Fuente: [Laboratorio de pruebas: SIMET].

4.2.2 Equipos y materiales empleados

4.2.2.1 Equipos.

Para la realización de la determinación de la dirección de laminado del material mediante el ensayo de metalografía, se utilizó el microscopio marca Olympus modelo BX51, capaz de resoluciones superiores a 1100 µm.

- **Microscopio Binocular,** Marca: Olympus, Modelo: BX51



Figura 4-9. Microscopio Binocular utilizado para el análisis metalográfico..

Para la realización de las pruebas de tenacidad se emplearon los siguientes equipos:

- **Péndulo de impacto**, Marca: TIME Group Inc. Modelo: JB-S300



Figura 4-10. Péndulo de impacto TIME, utilizado para el ensayo de tenacidad.

- **Equipo de Refrigeración / Horno**, Marca PTE, Modelo: WDC-60



Figura 4-11. Equipo de refrigeración utilizado para el ensayo de tenacidad.

4.2.2.2 Material

Para la realización de estos ensayos se utilizaron dos planchas de acero A570 G50, ambas con dimensiones de 1[m] x1[m], cada plancha con espesores de 10 [mm] y 12 [mm], números de lote de las planchas: 201804290981 y 180145 para los materiales de 10 [mm] y 12 [mm] de espesor respectivamente (ver Figura 4-12), distribuido en Chile por la compañía **Kupfer Hermanos S.A.** y fabricado en China. Estas planchas fueron fabricadas mediante un proceso de laminado en caliente seguido de un tratamiento térmico de normalizado. La variación del espesor en las planchas de muestra radica en evitar que el distribuidor y/o fabricante entreguen dos planchas del mismo lote, la cual según el distribuidor y el laboratorio SIMET, identifican diferencias entre diferentes lotes para un mismo material atribuible a los porcentajes de composición química de este. Cabe destacar que los espesores no afectan al mecanizado de las probetas, ya que estas se desgastarán hasta obtener el espesor exigido por la norma ASTM E23. Las dos planchas se identificaron por la nomenclatura mostrada en la Tabla 4-3:



Figura 4-12. Planchas de Acero de 1x1[m] entregados por Kupfer, A) lote n.º: 201804290981, B) n.º lote: 180145.

Tabla 4-3. Nomenclatura de las probetas de acuerdo con el número de colada en direcciones de laminado.

Número de colada	Nomenclatura	Dirección longitudinal	Dirección transversal
201804290981	A	Al	At
1801450	B	Bl	Bt

Fuente: [Autor].

La Tabla 4-4 ilustra la composición química del acero según norma ASTM y el de las dos muestras de acero que se ensayaron obtenidas en el certificado de calidad del fabricante.

Tabla 4-4. Composición química del acero ASTM A572 Gr. 50 según la norma ASTM y el acero suministrado por el fabricante con la misma clasificación A572 Gr.50.

Elemento / Probeta	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Nb	% V	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo
ASTM	0,23	1,35	0,04	0,05	0,40	0,15	0,15	0,60	0,45	0,35	0,15
A	0,19	1,04	0,017	0,004	0,28	0,012	0,004	0,009	0,011	0,304	0,005
B	0,18	1,02	0,014	0,003	0,26	0,016	0,004	0,017	0,009	0,30	0,002

Fuente: [ASTM y Fabricante Chino].

4.2.3 Análisis Metalográfico

4.2.3.1 Preparación metalográfica

La finalidad de la preparación de las muestras para análisis metalográfico no es otra que obtener una superficie plana y especular, que se logra gracias a la remoción de material por medio de lijas, paños y material abrasivo. El material fue preparado siguiendo el proceso que se indica a continuación:

- Corte longitudinal y transversal realizado por medio de la máquina cortadora Buehler.
- Montaje en baquelita realizado por medio de la máquina montadora de muestras Buehler.
- Desbaste (papel esmeril No. 80) realizado con el fin de eliminar las irregularidades en las superficies tales como rebabas producto del corte.

- Pulido (papel esmeril No. 400 y 600, 1200) realizado con el fin de eliminar las rayas ocasionadas por el desbaste.
- Pulido Fino se realiza con el fin de eliminar las rayas ocasionadas por el pulido, utilizando la mesa de pulido Buehler provista de paños sobre los cuales se depositaron abrasivos, con el propósito de obtener una superficie pulida gracias a la remoción del material superficial, sin producir deformación o flujo de este. Se realiza mediante tres ciclos alternativos de pulido y ataque utilizando como abrasivos: Alúmina al 5µ y al 0,05µ, y como reactivo de ataque: Nital al 3%.
- Ataque: fue utilizado como reactivo de ataque Nital al 3% y el tiempo de ataque fue de 4 segundos.

4.2.3.2 Resultados

Se tomaron las muestras obtenidas de la preparación metalográfica para la determinación de fases, tamaño de grano e impurezas con la ayuda del sistema de análisis de imagen y del microscopio Binocular Olympus. donde fue posible apreciar claramente la dirección del laminado que, para efectos de la fotografía, la dirección transversal del laminado está de forma horizontal.

Plancha A, con espesor de 12mm



Figura 4-13. Imagen con ataque a 100 aumentos para material A. Fuente: [Laboratorio de pruebas: SIMET]

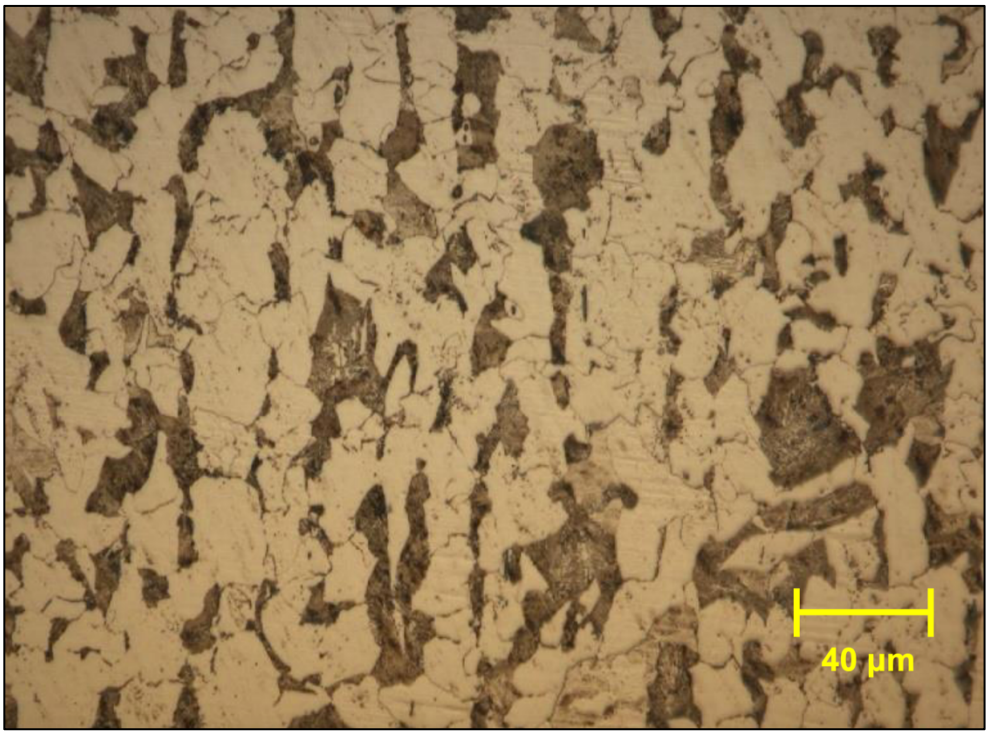


Figura 4-14. Imagen con ataque a 500 aumentos para material A. Fuente: [Laboratorio de pruebas: SIMET]

Plancha B, con espesor de 10mm

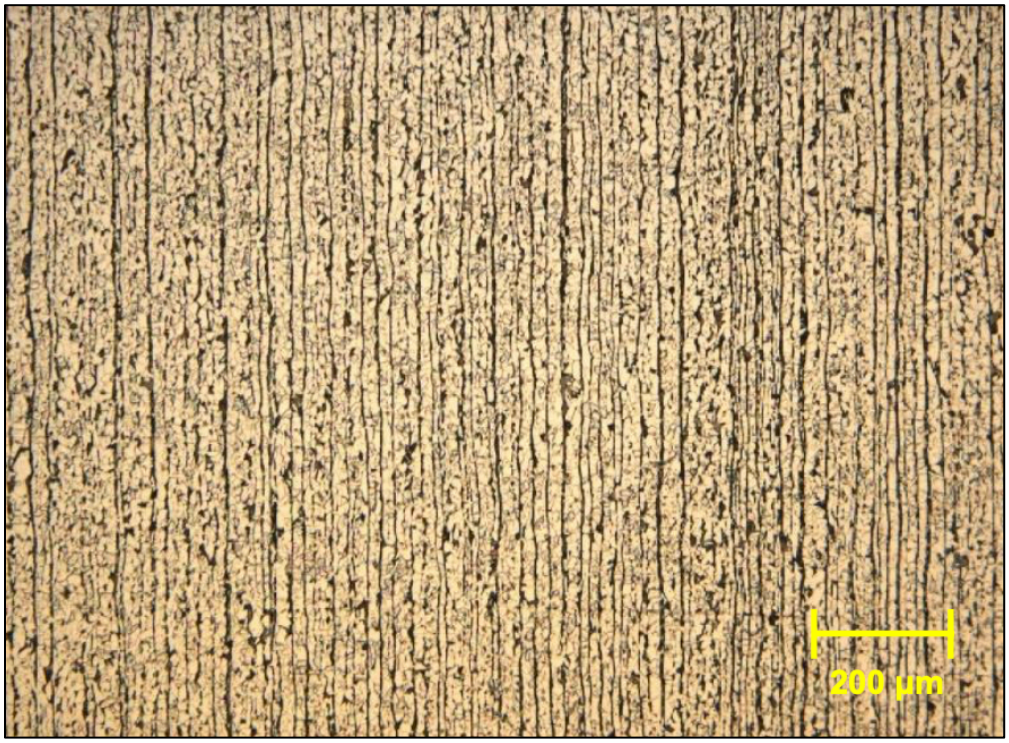


Figura 4-15. Imagen con ataque a 100 aumentos para el material B. Fuente: [Laboratorio de pruebas: SIMET]

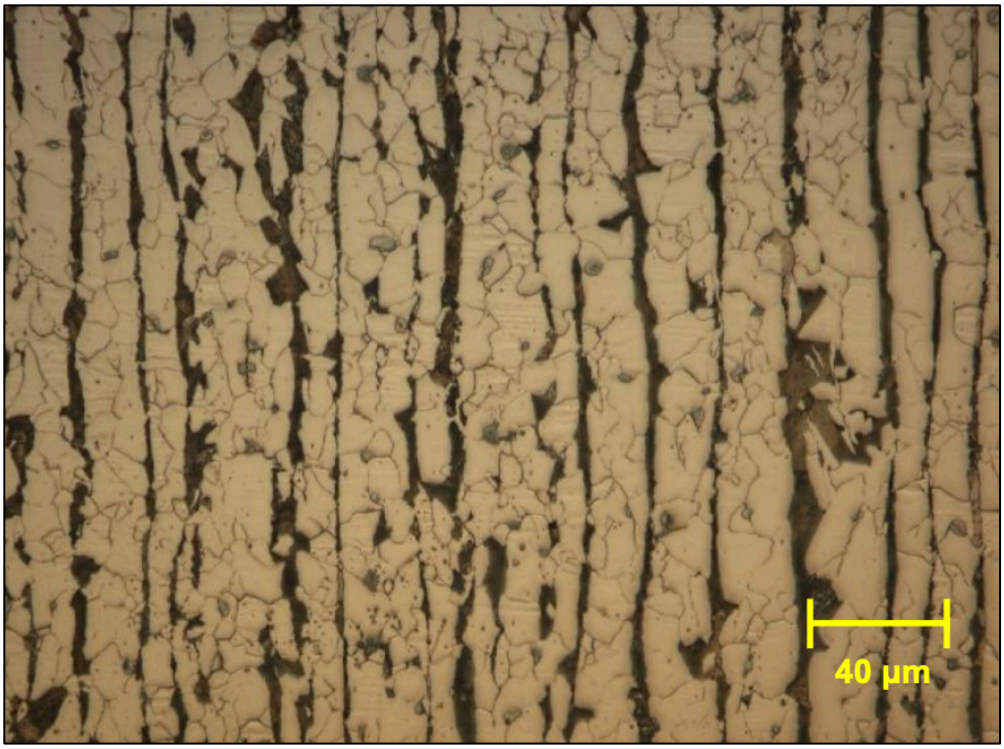


Figura 4-16. Imagen con ataque a 500 aumentos para el material B. Fuente: [Laboratorio de pruebas: SIMET].

4.2.1 Ensayo de Tenacidad del impacto Charpy

4.2.1.1 Número de probetas a utilizar

Una vez realizado el análisis metalográfico y determinado la dirección de laminación, se mecanizaron 3 cupones de probetas por cada plancha de acero (3 probetas por cupón), lo cual se resumen en 18 probetas a ensayar en total (9 probetas por plancha). Se ensayaron dos cupones por temperatura, una por cada plancha, con el fin de estimar en que parte de la curva de transición dúctil-frágil está el material.

4.2.1.2 Preparación de muestras

Se recibieron probetas en el laboratorio SIMET de la Universidad de Santiago (USACH) para realizar el ensayo de impacto según la norma ASTM E 23 y ASTM 370. En la Figura 4-17 se presentan todas las probetas antes de ser ensayadas:

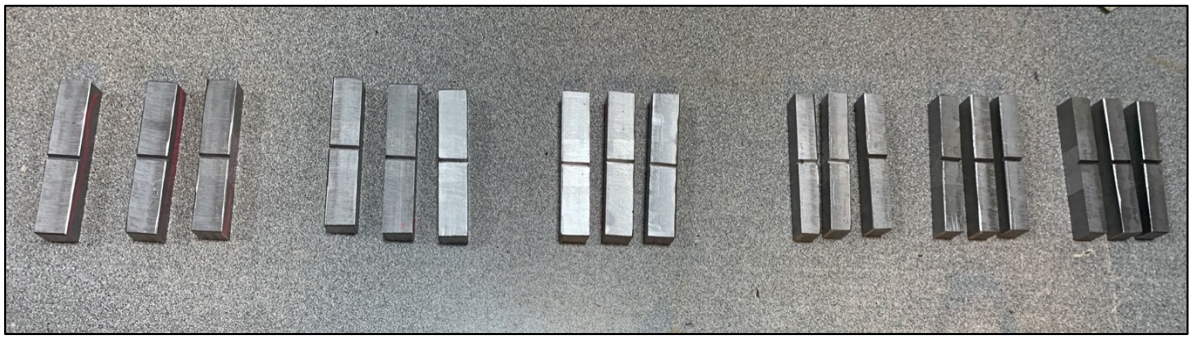


Figura 4-17. Set de probetas para ensayo de tenacidad de Impacto, a la izquierda están los 3 cupones de 3 probetas cada una de la plancha de 12 mm y a la derecha están los 3 cupones de 3 probetas cada una para la plancha de 10mm del acero A572 gr 50. Fuente: [Autor].

4.2.2 Realización ensayo

Se realizó el ensayo de cada una de las probetas mencionadas con anterioridad a diferentes temperaturas: temperatura ambiente (20ºC) y dos temperaturas adicionales (-10ºC y 5ºC). Para las probetas ensayadas a temperatura inferior a la temperatura ambiente se utilizó un equipo de refrigeración para llegar a las temperaturas escogidas.

4.2.3 Resultados.

Según los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 4-5, la probeta At_05 posee, a temperatura ambiente, la más baja energía absorbida debido, principalmente, a cantidades altas de carbono y azufre en el acero.

Tabla 4-5. Resultados de ensayo de tenacidad al impacto.

Temperatura (ºC)	Probeta	Energía promedio (J)
-10	At_01	15,8
	Bt_02	138,3
5	At_03	27,5
	Bt_04	144,7
20	At_05	79,1
	Bt_06	156,6

Cabe destacar que la capacidad de absorción de energía en las probetas At es más baja que las probetas compuestas por el material Bt, la cual presenta una cantidad de energía absorbida en concordancia con respecto al certificado de calidad entregada por el fabricante, el que está adjuntado en el Anexo D de este estudio. Caso contrario a lo ocurrido con la probeta At, la cual, presenta una diferencia del 40% menos de tenacidad al impacto, en comparación con el certificado de calidad del fabricante.

Por otro lado, se observó que las probetas Bt luego de ser ensayadas (ver Figura 4-18) a temperatura ambiente, resultaron con una fractura dúctil, lo que indica en primera instancia que el material está en la zona dúctil de la curva de transición. Por otro lado, también se observa que las probetas At poseen una tendencia a una fractura frágil, la cual es posible asociar a la zona de transición para este rango de temperaturas.

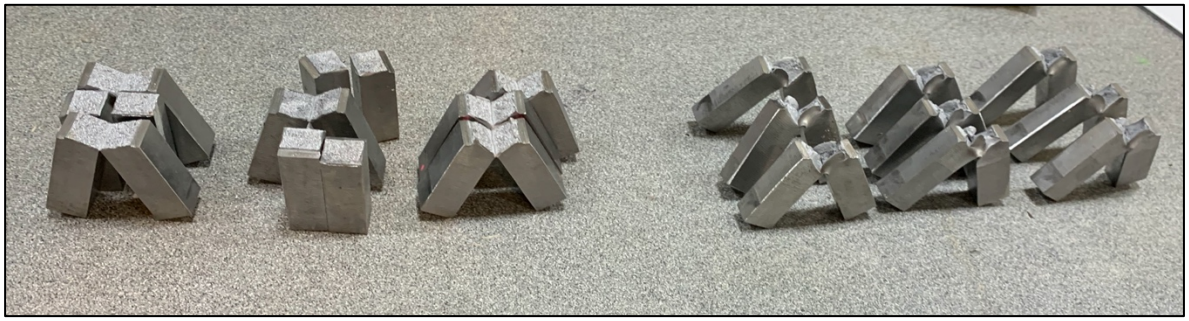


Figura 4-18. Probetas luego de ser impactadas por el péndulo de impacto. a la izquierda las 3 probetas At con fracturas frágiles y a la derecha las 3 probetas Bt con fracturas dúctiles.

Capítulo V

Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de ensayos experimentales, mediciones y cálculos realizados en el capítulo anterior, con el fin de relacionarlos entre si y presentar la solución encontrada en esta investigación.

5.1 Valor del esfuerzo longitudinal en la grúa

Para determinar el valor del esfuerzo longitudinal total (σ_t) al cual está sometida la columna de la grúa, es necesario conocer los dos efectos que están superpuestos en la acción, por un lado tenemos el esfuerzo estático (σ_0), producto del propio peso de la estructura y sus componentes, y por otro lado tenemos el esfuerzo de uso (σ_{sg}), propio de la utilización y movimiento de la grúa en su normal funcionamiento debido a las cargas de uso, fenómeno que quedó expresado en la Ecuación (4-1) presentado en el capítulo anterior.

5.1.1 Esfuerzo estático ($\boldsymbol{\sigma_0}$)

Para la determinación del esfuerzo, en el caso estático por el peso propio de la estructura, se utilizó el cálculo del peso de sus componentes a partir de las medidas geométricas, las cuales fueron tomadas desde los planos de la grúa proporcionados por el mandante y el fabricante, las medidas no indicadas en estos planos fueron tomadas a escala de otros planos y por inspección en terreno.

A continuación, se presenta una tabla resumen (Tabla 5-1) la cual separa la grúa en tres partes; Partes fijas, Partes móviles y Cabina de control.

En el grupo de partes fijas de la grúa están considerados principalmente la plataforma, contrapeso, caballete, tirantes, husillo, caseta de máquinas, escaleras, viga apoyo cabina, sala

eléctrica y contrapeso hormigón. Por otro lado, las partes móviles están compuestas por la pluma, plumín, tirante, contrapeso móvil, biela, husillo (parte móvil). Y finalmente la cabina de control, compuesta principalmente por el brazo de la cabina del operador.

La ubicación de los componentes de la grúa se presenta en la Figura 5-1 la cual muestra las principales partes que componen la grúa.

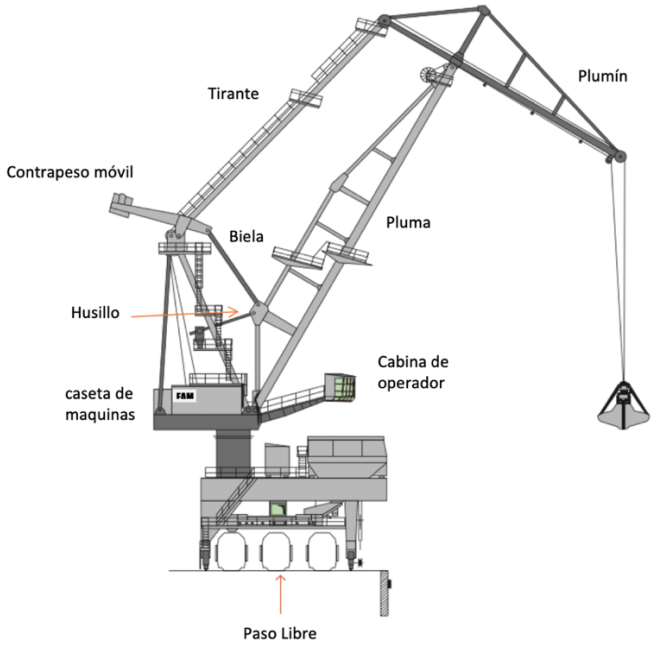


Figura 5-1. Principales componentes de la grúa FAM. Fuente: TUKAN.

Se ubican los pesos y los valores de los momentos resultantes aplicados para cada centro de gravedad o posiciones del plumín. Los cálculos se presentan en más detalle en el Anexo F de este documento.

Tabla 5-1. Momento flector en la columna debido a los pesos propios.

		α = 42.95°		**α = 62°**		**α = 80.95°**	
	Peso [tonf]	**X [m]**	**M [t-m]**	**X [m]**	**M [t-m]**	**X [m]**	**M [t-m]**
Partes fijas	236,99	-4,10	-972,66	-4,10	-972,66	-4,10	-972,66
Partes móviles	123,33	7,00	863,00	3,91	482,72	0,80	98,47
Cabina	9,5	12,40	117,80	2,40	22,80	12,40	117,8
Total	**369,82**		**8,13**		**-467,14**		**-756,40**

Se realizaron tres posibles casos para analizar así el caso más desfavorable: con alcance mínimo de la pala (81º), alcance máximo (43º) y un valor intermedio (62º). Estas fuerzas se pueden juntar en una sola carga resultante y un momento asociado que de manera conveniente pase por el eje vertical central de la columna, este resultado también se realiza considerando los tres casos de análisis previamente definidos, los cuales quedan expresados en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Resumen de reacciones para diferentes condiciones del ángulo de la pluma.

Ángulo de la pluma	Carga vertical [tonf]	Momento [tonf m]
42,95°	369,82	8,13
62,00°	369,82	-467,14
80,95°	369,82	-756,40

Se puede apreciar que el caso más desfavorable es cuando la grúa tiene un alcance mínimo (81º), esto se puede asociar principalmente a que el contrapeso de la grúa está pensado para anular el momento que genera la pluma en su mayor extensión con carga, pero cuando tiene su mínima extensión este contrapeso genera momento adicional en vez de anularlo.
Finalmente, se tiene la tensión (tracción), a partir de la carga vertical y el momento asociado, en las cercanías de la zona de fisura por acción de los pesos propios de la estructura en reposo para el caso más desfavorable, el cual fue el Alcance mínimo (81º):

$$\sigma_0 = 30{,}4\ [MPa]$$

5.1.2 Esfuerzo de uso ($\boldsymbol{\sigma_{sg}}$)

Para el análisis de este fenómeno se utilizó, como se mencionó en el capítulo anterior, el uso de las galgas extensiométricas para la determinación de estos esfuerzos, donde, además, se pudo verificar que un ciclo de trabajo dura aproximadamente 69 segundos, estimado a partir de observaciones en terreno (anexo E). Lo que significa que la grúa toma el granel, lo descarga en el contenedor y vuelve a su posición inicial en este tiempo.

A continuación, se presenta el valor del esfuerzo de tracción medido por la galga extensiométrica denominada como N.º 3, presentada en la Tabla 4-2 del capítulo anterior, la cual es la galga más cercana a la zona de fisura.

$$\sigma_{sg} = 67{,}91\ [MPa]$$

Cabe destacar que la columna está sometida constantemente a esfuerzos de tracción y compresión producto de la toma y descarga de elementos a granel, reflejado en los resultados de las mediciones de las galgas extensiométricas, pero solo el esfuerzo de tracción es la causal de la propagación de la grieta y de la degradación de la resistencia del material producto de la fatiga, por lo que es ese el valor de interés y que se utilizará para el análisis.
También cabe destacar que este valor no es el mayor valor de esfuerzo a tracción, de hecho, la galga número 4, presenta el valor mayor de esfuerzos, pero como la galga número 3 es la más cercana a la zona de la grieta, se considerará esta galga para el análisis. De estas mediciones se puede desprender que la grieta no se produjo por un valor máximo de esfuerzos, sino que quizás haya alguna zona con concentraciones de tensiones en este sector que haya influido en la aparición y desarrollo de esta.

5.1.3 Esfuerzo total ($\boldsymbol{\sigma_t}$)

Finalmente, se estima el valor del esfuerzo total de tracción en la zona de análisis a partir de la suma de los dos efectos identificados previamente, caso estático y caso por carga de uso:

$$\sigma_{sg} = 98{,}31\ [MPa]$$

5.2 Ciclos de carga de la grúa

La grúa en su carácter de transportador granelero, posee un trabajo determinado el cual es ir a buscar el material al contendor ubicado al interior de un buque granelero. En base a lo observado en terreno y a las mediciones realizadas, se estima que el ciclo completo de trabajo dura aproximadamente 69 segundos, lo cual finalmente en cantidad de ciclos por hora es de:

Ciclos por hora: 3600 / 69 = **52.2 [ciclos/h]**.

Adicionalmente en base a la información proporcionada por los operadores y al espectro de cargas asociado a la grúa, la carga promedio por cada ciclo se estima en 14.4 [ton] (80% de la capacidad máxima de la pala).

5.2.1 Ciclos totales de la grúa FAM

Se estimó el número de ciclos de carga de dos maneras distintas, la primera a partir de la carga total de la grúa movilizada hasta la fecha y la siguiente a partir de los horómetros registrados en la grúa (Cálculos en el Anexo E), se pudo estimar de forma general la cantidad de ciclos totales efectuados por la grúa mediante un promedio de los dos datos obtenidos:

Ciclos de la grúa FAM = **1.780.077** [**ciclos]**, a mayo de 2019.

Cabe resaltar que según la clasificación de la grúa determinada en el capítulo 3.1. la cual se refiere a la clase de utilización (U7), indica que el número máximo de ciclos que puede efectuar la grúa está dentro del orden de $1 \cdot 10^6$ a $2 \cdot 10^6$ [ciclos], y considerando que los ciclos actuales de la grúa están en el orden de $1{,}8 \cdot 10^6$ [ciclos], se verifica que una de las causas de la iniciación y propagación de la grieta fue producto del efecto de la degradación de resistencia por fatiga asociado a la cantidad de ciclos de trabajo realizado por la estructura a lo largo de su vida útil.

5.3 Estimación del Parámetro K_{Ic}

Para la estimación del parámetro K_{Ic} se determina correlacionar los datos encontrados a partir de los ensayos de tenacidad del impacto con las correlaciones encontradas en la literatura y expuestas en el Capítulo 2 de esta investigación, estas correlaciones tienen ciertas limitaciones y dependen principalmente de la zona en la cual el material está en operación según la temperatura ambiente en la que está trabajando la estructura.

5.3.1 Curva de Transición dúctil-frágil

Para apreciar en qué zona de la curva de transición se ubica la temperatura de uso de la estructura (20ºC), las cuales pueden ser: zona dúctil, zona frágil o zona de transición, se grafican los resultados del ensayo de tenacidad. Sin embargo, existen estudios previos sobre este mismo tema como es el caso que se llevó a cabo en la Escuela de Ingeniería de Bucaramanga (Carreño Herrera & Villarreal Mejia, 2006) donde los resultados se presentan de forma esquemática para evidenciar la absorción de energía del acero a diferentes temperaturas. Cabe agregar además que los resultados del estudio de la Escuela de Bucaramanga muestran una menor absorción de energía que los ensayos realizados en esta investigación, aunque, cabe destacar que el contenido de carbono del material utilizado en la investigación colombiana es superior y cercanos al límite permitido por la ASTM (cercanas al 0,23%) a diferencia de las analizadas (0,18% y 0,19%). Además, se desconoce las condiciones reales de los ensayos y la procedencia del material, por lo que NO son numéricamente comparables.

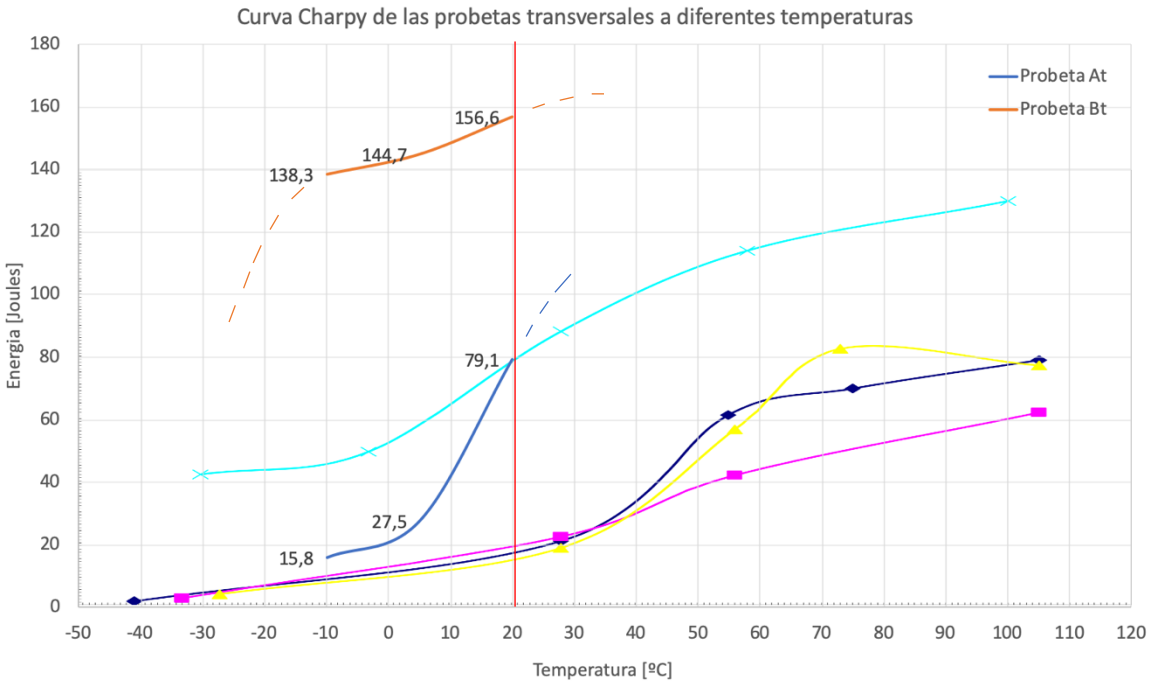


Figura 5-2. Gráficos comparativos de diferentes ensayos de Tenacidad. Líneas de color café e índigo son los ensayos realizados en esta investigación y líneas de color azul, celeste, amarillo y lila son ensayos realizados por los autores Carreño Herrera & Villarreal Mejía.

A partir de la Figura 5-2 es posible observar que los dos materiales ensayados están en diferentes zona de la curva dúctil-frágil. El material *At* representado por la curva de color indigo está en la zona de transición similar al material representado por el color celeste. Esto se puede apreciar por el aumento radical de la absorción de energía al aumentar un poco la temperatura; tambien se puede observar al material *Bt* representado por la curva de color cafe, que tiene una mayor capacidad de absorción de energía y es posible ubicarla en la zona dúctil. Esta apreciación se puede fundamentar también, ya que el valor de la energía absorbida al variar la temperatura aumenta de manera más moderada en comparación con otras probetas y también porque los resultados de las probetas después del ensayo visualmente mostraron planos de falla frágiles para el material *At* (curva indiga). Por otra parte, el material *Bt* (curva cafe) se observa que su plano de falla se produjo a partir de una fractura dúctil, los planos de falla de estas dos muestras después del ensayo se pueden observar en la Figura 5-3.

Llama la atención la diferencia que existe entre los resultados obtenidos para planchas del mismo tipo de acero y del mismo fabricante. Esto puede deberse principalmente a la diferencia de contenido de carbono en las muestras, donde el material Bt tiene menos proporcion de carbono que el material At como se presenta en el certificado de calidad del fabricante presentado en la Tabla 4-4.

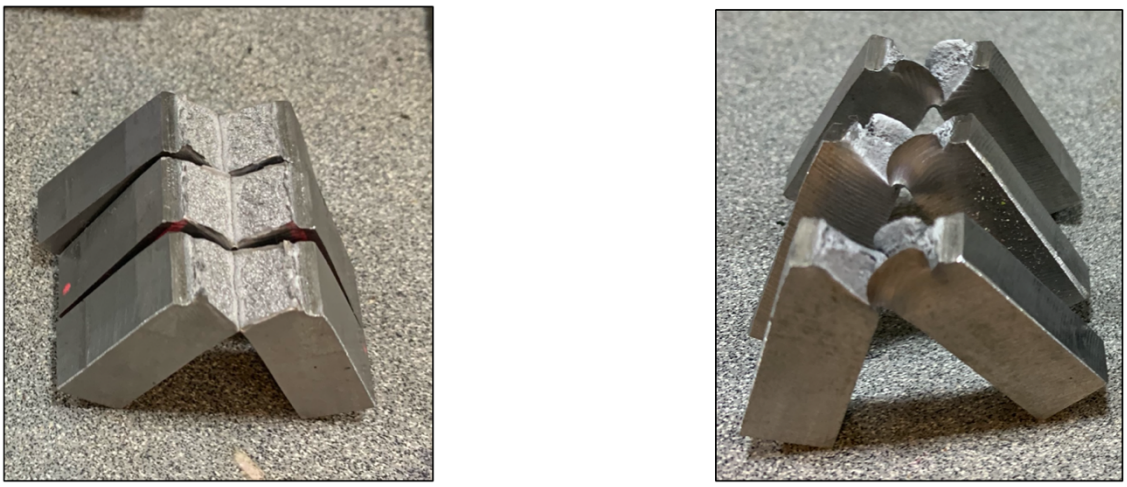


Figura 5-3. Resultados de las probetas después del ensayo. A) plano de falla frágil de la probeta At. B) plano de falla dúctil para probeta Bt.

5.3.2 Valores de CVN para temperatura de uso de 20 [ºC]

Se presentan en la siguiente tabla los valores de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de tenacidad para los materiales ensayados, identificados como At y Bt, los que son las probetas generadas a partir de las planchas A y B respectivamente, en su dirección transversal a la línea de fabricación, ver Tabla 5-3:

Tabla 5-3. Resumen de los ensayos realizados, en la tabla superior los resultados del material identificado como At y para la tabla inferior los resultados sobre el material Bt, con sus respectivas medidas de dispersión, las tres mediciones y sus promedios por temperatura.

Temperatura [ºC]	**Muestra: At**				**Desviación estándar** [J]	**Varianza** $[J^2]$
	Nº1 [J]	Nº2 [J]	Nº3 [J]	$\bar{X}$ [J]		
-10	12,6	21,1	13,6	**15,8**	4,6	14,4
5	23,2	31,8	27,5	**27,5**	4,3	12,3
20	81,4	63,7	92,3	**79,1**	14,4	138,9

Temperatura [ºC]	**Muestra: Bt**				**Desviación estándar** [J]	**Varianza** $[J^2]$
	Nº1 [J]	Nº2 [J]	Nº3 [J]	$\bar{X}$ [J]		
-10	136,8	143,3	134,7	**138,3**	4,5	13,4
5	140,1	146,5	147,61	**144,7**	4,1	11,0
20	147,6	157,3	164,9	**156,6**	8,7	50,1

Cabe destacar que la cantidad de ensayos está previamente definida por la norma ASTM E23 y ASTM 370, la cual exige tres mediciones por temperatura.

Finalmente, las dos muestras de material que se utilizaron para la realización de este ensayo, a una temperatura de uso de ~20ºC, obtuvieron valores de medición promedio de 79,1 [J] y 156,6 [J] para las muestras identificadas como *At* y *Bt,* respectivamente.

Cabe destacar que existe una gran diferencia entre las dos muestras en la cantidad de energía absorbida en las diferentes temperaturas. La probeta *Bt* obtuvo un resultado esperado, ya que, tiene concordancia con respecto al certificado de calidad emitido por el fabricante (certificado adjuntado en el Anexo D), pero no así para el caso de la muestra *At*, ya que, el certificado de calidad para este acero dista mucho de los resultados obtenidos en el ensayo de tenacidad realizados en esta investigación. Esta incertidumbre por medio de los resultados de la muestra *At*, radica en que se esperaba que *At* tuviera una mayor capacidad de absorción de energía, tal como lo dice su certificado de calidad, además, en el certificado de calidad son bastante similares los valores de medición para ambos materiales. Pero ventajosamente se correlacionarán los dos valores y se utilizará el valor más desfavorable para el estudio como criterio de esta investigación, con la finalidad de establecer un criterio de seguridad para los resultados.

5.3.3 Valores de K_{Ic} a partir de correlaciones

Para la obtención del parámetro K_{Ic} se utilizaron dos correlaciones diferentes, ya que, los valores de la energía absorbida CVN en los ensayos realizados para los dos tipos de muestras están en diferentes zonas de la curva dúctil-frágil.

5.3.3.1 Probetas At

Para el caso del material *At* que posee un valor de energía absorbida a 20ºC de 79,1 [J], que se ubica en la zona de transición para la temperatura antes mencionada, se utilizará la correlación propuesta por Marandet-Sanz (Marandet & Sanz, 1977)**,** representada en la Ecuación (2-13) mencionada anteriormente**.**

Se tiene entonces que el valor de K_{Ic} para este acero a una temperatura de 20ºC es de:

$$K_{Ic} = 168{,}98\ [MPa\sqrt{m}]$$

5.3.3.2 Probetas Bt

El material *Bt* que posee un valor de energía absorbida a 20ºC de 156,6 [J], se ubica en la parte alta de la zona de la curva dúctil-frágil ("Upper Shelf"), donde se utilizará la correlación propuesta por Barson y Rolfe (Barson & Rolfe, 1999) representada en la Ecuación (2-9) mencionada en el capítulo 2.

Finalmente, se obtiene el K_{Ic} asociado al material B para una temperatura de uso de 20ºC:

$$K_{Ic} = 144{,}7\ [MPa\sqrt{m}]$$

5.3.3.3 Valor de K_{Ic}

Para la determinación final del parámetro K_{Ic}, se utilizará un criterio orientado a la seguridad para el caso del resultado más desfavorable, ya que para este caso, la estructura tiene una menor cantidad de ciclos a la fatiga (menor vida útil) y el valor de K_{Ic} es inversamente proporcional a estos parámetros, para el cual se utilizará el valor más alto de K_{Ic} de 168,98 [J] el que entregará una menor vida útil restante, lo que genera un resultado más conservador e inclinado hacia la seguridad operativa. Es importante destacar que se consideraron solo los resultados obtenidos mediante los ensayos de esta investigación, ya que, se busca entender el fenómeno de forma experimental, tratando de reproducir las condiciones reales del problema.

5.4 Resultados finales

Se presentan los resultados finales de esta investigación a partir de los ensayos y mediciones realizadas.

5.4.1 Longitud crítica de la grieta

Para la estimación del valor crítico de la grieta se utiliza la Ecuación (2-7), mencionada previamente en el capítulo 2.

El valor del esfuerzo total ($\boldsymbol{\sigma_t}$) en la zona de la fisura fue estimado previamente a partir de la suma de los efectos de peso propio y carga de uso de la estructura en la zona de la fisura en

estudio, el valor del factor geométrico Y es igual a 1, ya que se supone que la grieta está lo suficientemente alejada de los bordes.

Se obtiene finalmente la longitud crítica total de la grieta:

$$a_c = 940{,}4 \text{ [mm]}$$

Cabe considerar que el valor inicial de la grieta, la cual motivó esta memoria de título está dentro de este valor (103,3[mm]), por lo que es necesario restar el valor de a_c para determinar la longitud de la grieta que necesita propagarse desde el inicio de esta investigación hasta el colapso catastrófico, lo que da un valor de longitud de grieta que falta por propagarse de 837 [mm].

5.4.2 Velocidad de propagación de la grieta

Para la determinación de la velocidad de propagación de la grieta, se utilizó la Ecuación 2-2 mencionada previamente:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = C\ (\Delta K)^m \qquad (5\text{-}1)$$

Los parámetros *C* y *m* son constantes que para este material según el autor estadounidense Wolé Soboyejo (Soboyejo, 2003) para el acero A570 gr50, tienen un valor de C = $2{,}9 \times 10^{-12}$ y $m = 2{,}7$. El valor de la constante de Paris (C) es un valor de ajuste que depende del tipo de régimen (A, B o C) en el cual está la propagación de la grieta. Para esta investigación se considera solo el régimen C, ya que los primeros regímenes ocurren en la etapa inicial de la formación de la grieta los cuales son despreciables con respecto al régimen C. El valor de *m* está tabulado con respecto al valor de K_{Ic} del material.

El valor de ΔK ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$), mencionado en la Ecuación 2-3 queda determinado por los esfuerzos máximos y mínimos ($\sigma_{máx}\ y\ \sigma_{mín}$) definido por los ciclos de carga de la grúa. El valor de K_{min} está relacionado con el esfuerzo mínimo al que está sometida la grúa. Este valor es posible considerarlo como nulo ya que se considera que el esfuerzo es de compresión y no aporta a la propagación de la grieta, por lo que finalmente se utilizará el valor de K_{max}

= $K_{Ic,}$ ya que, K_{Ic} es el mayor valor del factor de intensidad de tensiones que puede tener el acero.

Finalmente, se obtiene el valor de la velocidad de propagación de la grieta:

$$3{,}0 \times 10^{-6}\ [mm/ciclos]$$

5.4.3 Tiempo disponible hasta la falla

Según la estimación de los ciclos de carga por año de la grúa, los cuales están determinado por los ciclos totales de la grúa dividido por la cantidad de años en utilización de esta, es posible estimar el tiempo disponible que tiene la grúa para su normal operación de la misma forma en que se ha estado haciendo hasta este momento, relacionando los valores de la velocidad de propagación y los ciclos de carga por año:

Ciclo/año:	$1{,}05\times 10^{5}$	[ciclos/año]
Avance por año:	314,6	[mm/año]
Años a la falla:	2,7	[años].

Capítulo **VI**

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Este apartado se orienta a establecer las principales observaciones del trabajo, así como las recomendaciones que derivan del mismo, procurando aportar en la definición de un criterio de acción a partir del largo máximo que puede alcanzar la grieta, sin que se produzca un colapso catastrófico, así como definir una estimación del tiempo disponible para la toma de decisiones en la materia, aun cuando la grúa continúe funcionando.

1. La estimación de la vida útil de una grúa o en general para cualquier estructura, constituye un tema relevante para la organización de recursos y presupuestos al interior de una empresa, ya que permite dimensionar el tiempo y los costos, que debe considerar una adecuada planificación y ejecución de las medidas de contingencia que se estimen necesarias de implementar.
2. Esta investigación, si bien es de carácter formativo, entrega a la empresa propietaria de la grúa por medio de ASMAR V. una estimación acerca de la vida restante de funcionamiento que puede tener la grúa, la que se calculó en dos coma siete (2,7) años.
3. Para efecto del presente estudio, se estimó que posterior al plazo de 2,7 años, el comportamiento mecánico de la grieta, ingresaría en un terreno incierto aumentando cada vez más las probabilidades de que la grieta se vuelva inestable y se propague súbitamente (William D. Callister, 1995).
4. El estudio permitió determinar asimismo, la importancia que posee el control de la longitud de la grieta en todo este proceso, ya que el valor máximo de longitud que se puede alcanzar es de 940 [mm] , por lo que se requiere mantener un control

permanente en terreno frente a situaciones tales como deficiencias operativas de la grúa y/o situaciones colaterales a su funcionamiento tales como, movimientos sísmicos relevantes, intensidad en la velocidades de viento fuera de lo usual y marejadas, entre otras.

A modo de comentarios finales, se pueden hacer las siguientes observaciones:

1. Con respecto al desarrollo de los ensayos mecánicos que implicó el estudio, se determinó utilizar el ensayo de tenacidad al impacto Charpy, en atención a que, mediante correlaciones de otras investigaciones, permitía obtener el valor del factor de intensidad de tensiones crítico (K_{Ic}), aun cuando cabe mencionar que existe un tipo de ensayo que entrega este valor de manera más directa, precisa y empírica, como lo es el ensayo de fatiga. Sin embargo, por un tema de costos y factibilidad de tiempo que este tipo de ensayo implica, éste no se pudo aplicar.
2. Otro aspecto de interés derivado de la condición experimental que implicó el presente estudio lo constituye la variable temperatura, ya que las correlaciones utilizadas son válidas en un rango de temperaturas previamente determinado y que se asume constante durante todo el año, lo que fue posible en atención a la zona geográfica en la cual está emplazada la grúa (ciudad de San Antonio en la región de Valparaíso, Chile), ya que cualquier interpolación de resultados para grúas de características similares implicaría desarrollar un análisis respecto de la temperatura de uso y los efectos externos, para con ello establecer la zona de ubicación del material en la curva dúctil-frágil y con ello utilizar las correlaciones precisas para cada caso.
3. En materia de los esfuerzos estimados a los que está sometida la columna de la grúa, se determinaron los valores del peso propio de la estructura mediante un análisis de cuerpo libre, para lo que se consideró como supuesto, el cumplimiento del principio de Saint-Venant , aun cuando técnicamente esta decisión no es del todo correcta, ya que, la aplicación de las fuerzas no está lo suficientemente alejada de la zona en que están aplicadas las cargas, afectando la precisión del resultado, pero que en la práctica proporciona una buena aproximación.

Como recomendaciones derivadas del presente estudio, se pueden formular las siguientes:

1. Para obtener una estimación de los esfuerzos a los que está sometida la grúa con un mayor nivel de precisión sería necesario desarrollar un análisis considerando elementos finitos, lo que se debiera complementar con los análisis de modelación para la reparación de la grúa, ya que sería recomendable un alto nivel de detalle en la modelación, considerando que es posible encontrar concentraciones de tensiones en la zona afectada lo que se suma a la heterogeneidad de los materiales y las superficies complejas, las que dificultan el cálculo teórico.
2. Otro aspecto de interés derivado del desarrollo del presente trabajo, lo constituyen los cálculos realizados en la fase experimental, ya que teóricamente el valor del esfuerzo en la zona de la grieta no es constante, ya que en el tiempo se presentan variaciones del área en la que actúa el campo de esfuerzos, aspecto que en este estudio se consideró constante, por lo que se sugiere que para futuros estudios en la materia se incorporen aquellas variables que generan heterogeneidad en el cálculo, las que asignarán mayor precisión al valor obtenido como cálculo final
3. Se sugiere la reparación de la grúa antes del tiempo límite estimado de 2,7 [años] considerado desde el mes de junio del 2019, considerándose necesario la contratación de un estudio especializado de ingeniería, que pueda efectuar el modelamiento por elementos finitos, así como también, el desarrollo de especificaciones técnicas para la ejecución de dicha reparación.

A continuación, se enuncian cuatro alternativas de reparación que fueron propuestas por el autor y evaluadas en conjunto con ASMAR V.

- **Alterativa 1: Parche Calzado (inserto)**

A grandes rasgos consiste en cambiar la zona de la columna dañada, cambiándola por un parche calzado (inserto) de mayor espesor que considere parte de la plancha de la plataforma del portal.

El diseño de la plancha que se instale deberá considerar espesor y geometría que permita bajar la concentración de tensiones.

- **Alternativa 2: Atiesadores Internos y Externos**

Esta alternativa considera la construcción de atiesadores en la zona afectada, sin reemplazo de la sección de la columna. La idea de los atiesadores es disminuir las tensiones en la zona de falla, transfiriendo estos esfuerzos a los diafragmas del portal.

- **Alternativa 3: Atiesadores internos, externos y anillo interior**

Esta alternativa considera la construcción de atiesadores en la zona afectada sin reemplazo de la sección de la columna, tal como en la alternativa 2, pero además de lo anterior, se considera un anillo interior, con el objetivo de rigidizar la sección crítica.

- **Alternativa 4: Parche calzado (inserto) y atiesadores internos y externos**

Esta alternativa considera la fusión de las alternativas 1 y 2 es decir, el reemplazo de un segmento de la columna y la incorporación de atiesadores. Esto con el objeto de reducir aún más las tensiones de trabajo y eliminar la incertidumbre asociada al mantener el material ya fatigado.

Referencias

FEM. (1998). *RULES FOR THE DESIGN OF HOISTING APPLIANCES 1.001.* FEDERATION EUROPEENNE DE LA MANUTENTION.

William D. Callister, J. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* Barcelona: Reverte.

American Society for Testing and materials. (1965). *Stress Analysis of cracks.* Baltimore: ASTM.

American society for metals handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, steels and High-Performance Alloys. 10 ed.* (Vol. v.1). United States of america: ASM, United States of America: ASM.

ASTM . (2002). *ASTM E23: Standar test method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.* Mississippi: Annual Book of ASTM Standards,.

Schutz, W. (1996). *A History of Fatigue.* Germany: Elsevier: Ottobrun.

Wohler, A. (1871). *Test to determinate the forces acting on railway carrieage axles and capacity of resistance of the axle.*

Halford, S. M. (2006). *Fatigue and durability of Structural Materials.* United States of America: ASM International.

Weibull, W. (1961). *FAtigue Testing and Analysis of Result.* Belfast: Pergamon Press.

Irwin, G. (1957). *Analysis of stresses and strain near the end of crack traversing a plate* (Vol. vol. 24). J. Appl. Mech.

Manson, S. (1965). *Fatigue: a complex subjet-some simple approximations* (Vol. vol. 5). Exp Mech.

Hertzberg, R. W. (1996). *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials.* United States of America: Jonh Wiley & Sons.

Sándoval, C. (2013). *Clasificación y selección de Strain gages y su aplicación en la industria mecánica.* Concepción : Universidad del Bio-Bio.

Rodriguez, C. A. (2013). *Clasificación y selección de strain gages y su aplicación en la industria mecánica.* Universidad del Bio-Bio.

Griffith, A. (1920). *The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transacions.*

Irwin, G. (1957). *Analysis of stresses an strains near the end of a crack traversing a plate. Journal of Applieed Mechanics.* ASME.

Ramos Morales, F., Duffus Scott, A., & Palomo Napoles, N. (2005). *Determinación de la tenacidad a la fractura de muestras de Acero 45 fundido, empleando las correlaciones entre el Kic y la energia de impacto en el ensayo de Charpy.*

Barson, J., & Rolfe, S. (1999). *Fracture and fatigue control in structures. Applications of fracture mechanics.* American Society for Testing and Materials, Filadelfia (E.E.U.U.).

Marandet, B., & Sanz, G. (1977). *Evaluation of the Toughnes of Thick Medium Strength Steels by LEFM and Correlation between Kic and Charpy V-Notch.* ASTM 631.

Sailors, R., & Corten, H. (1973). *Relationship between Material Fracture Toughness Using Fracture Mechanics and transition Temperature Test.* ASTM STP 514.

Rolfe, S. T., & Novak, S. T. (1970). *Slow Bend Kic Testing of medium Sthength High Toughness Steels.* ASTM STP 463:124-59.

Carreño Herrera, C. P., & Villarreal Mejia, M. C. (2006). *Caracterización Metalográfica y Evaluación de las propiedades mecánicas de tracción e impacto del acero ASTM A 572 Gr 50.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Soboyejo, W. (2003). *Mechanical Properties of Engineered Materials.* New York: Marcel Dekker.

Yoshida, S. (2015). *Deformaction and Fracture of Solid-state Material.* Southeastern Louisiana University, Hammond, LA. USA.

Habashi, M., & Tvrdy, M. (2015). *Relationships between KIC and CVN at the Lower Shelf of the Transition Curve CVN-T.* República Checa: David Publishing.

GOTTWALD Port Technology. (2013). *Vida útil de las grúas, Clasificacíon de grúas.* Düsseldorf, Alemania.

Paris, & Erdogan. (1963). *A critical analysis of crack propagation laws* (Vol. vol. 85). J. Fluids Eng.

ANEXOS

Índice de Anexos

ANEXO A. CLASIFICACIÓN DE GRÚA.....
ANEXO B. GUÍA DE DESPACHO DEL MATERIAL DE MUESTRA.....
ANEXO C. CERTIFICADO DE CALIDAD DEL ACERO MUESTRADO.....
ANEXO D. CICLOS DE CARGA REALIZADOS POR LA GRÚA .....
ANEXO E. ESTIMACIÓN DE ESFUERZO A PARTIR DEL PESO PROPIO DE LA ESTRUCTURA .....
ANEXO F. FACTOR "Y" DE LA FÓRMULA DE PARIS .....
ANEXO G. MEDICIONES DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS .....
ANEXO H. PREPARACIÓN DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS.....
ANEXO I. MEMORANDUM DE TRABAJOS .....

Anexo **A**

Clasificación de grúa

FAM

Förderanlagen Magdeburg

Base for design and calculation

For the steel structure	FEM 1.001, 1987, group U7 - Q4 = A8 considering chapter 2.1.4 concerning the individual classification of structural members. FEM "Guidelines for the Choice of Steel Qualities", edition of October 1974. DASt-Guideline 012 : Buckling Resistance Analyses for Plates.
For the mechanical equipment	FEM 1.001, 1987 and the most up-to-date knowledge the field of mechanical engineering.

Classifications

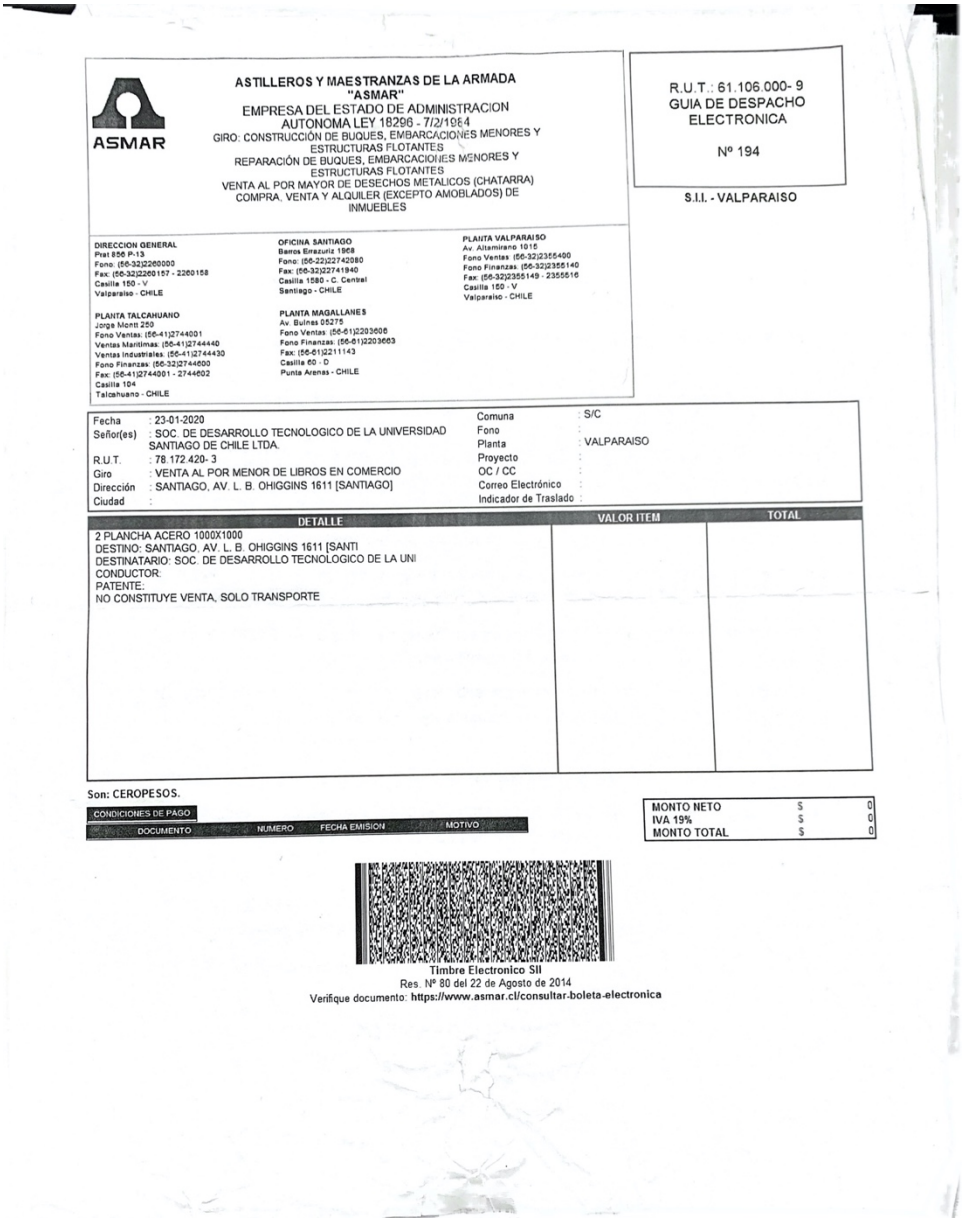
Hoisting gear	T8 - L 3 = M 8
Closing gear	T 8 - L 3 = M 8
Luffing gear	T 8 - L 3 = M 8
Slewing gear	T 6 - L 2 = M 6
Conveyor	T 8 - L 3 = M 8

For ropes, the safety factor against minimum breaking load will be at least 7,1 for grab operations

For accident prevention	The applicable local regulations.

Anexo **B**

Guía de despacho del material de muestra



ASTILLEROS Y MAESTRANZAS DE LA ARMADA
"ASMAR"
EMPRESA DEL ESTADO DE ADMINISTRACION AUTONOMA LEY 18296 - 7/2/1984
GIRO: CONSTRUCCIÓN DE BUQUES, EMBARCACIONES MENORES Y ESTRUCTURAS FLOTANTES
REPARACIÓN DE BUQUES, EMBARCACIONES MENORES Y ESTRUCTURAS FLOTANTES
VENTA AL POR MAYOR DE DESECHOS METALICOS (CHATARRA)
COMPRA, VENTA Y ALQUILER (EXCEPTO AMOBLADOS) DE INMUEBLES

ASMAR

R.U.T.: 61.106.000- 9
GUIA DE DESPACHO ELECTRONICA
Nº 194
S.I.I. - VALPARAISO

DIRECCION GENERAL
Prat 856 P-13
Fono: (56-32)2260000
Fax: (56-32)2260157 - 2260158
Casilla 150 - V
Valparaiso - CHILE

OFICINA SANTIAGO
Barros Errazuriz 1968
Fono: (56-22)2742080
Fax: (56-32)2741940
Casilla 1580 - C. Central
Santiago - CHILE

PLANTA VALPARAISO
Av. Altamirano 1015
Fono Ventas: (56-32)2355400
Fono Finanzas: (56-32)2355140
Fax: (56-32)2355149 - 2355516
Casilla 150 - V
Valparaiso - CHILE

PLANTA TALCAHUANO
Jorge Montt 259
Fono Ventas: (56-41)2744001
Ventas Maritimas: (56-41)2744440
Ventas Industriales: (56-41)2744430
Fono Finanzas: (56-32)2744600
Fax: (56-41)2744001 - 2744602
Casilla 104
Talcahuano - CHILE

PLANTA MAGALLANES
Av. Bulnes 05275
Fono Ventas: (56-61)2203606
Fono Finanzas: (56-61)2203663
Fax: (56-61)2211143
Casilla 60 - D
Punta Arenas - CHILE

Fecha	: 23-01-2020	Comuna	: S/C
Señor(es)	: SOC. DE DESARROLLO TECNOLOGICO DE LA UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CHILE LTDA.	Fono	:
R.U.T.	: 78.172.420- 3	Planta	: VALPARAISO
Giro	: VENTA AL POR MENOR DE LIBROS EN COMERCIO	Proyecto	:
Dirección	: SANTIAGO, AV. L. B. OHIGGINS 1611 [SANTIAGO]	OC / CC	:
Ciudad	:	Correo Electrónico	:
		Indicador de Traslado	:

DETALLE	VALOR ITEM	TOTAL
2 PLANCHA ACERO 1000X1000 DESTINO: SANTIAGO, AV. L. B. OHIGGINS 1611 [SANTI DESTINATARIO: SOC. DE DESARROLLO TECNOLOGICO DE LA UNI CONDUCTOR: PATENTE: NO CONSTITUYE VENTA, SOLO TRANSPORTE		

Son: CEROPESOS.

CONDICIONES DE PAGO

DOCUMENTO	NUMERO	FECHA EMISION	MOTIVO

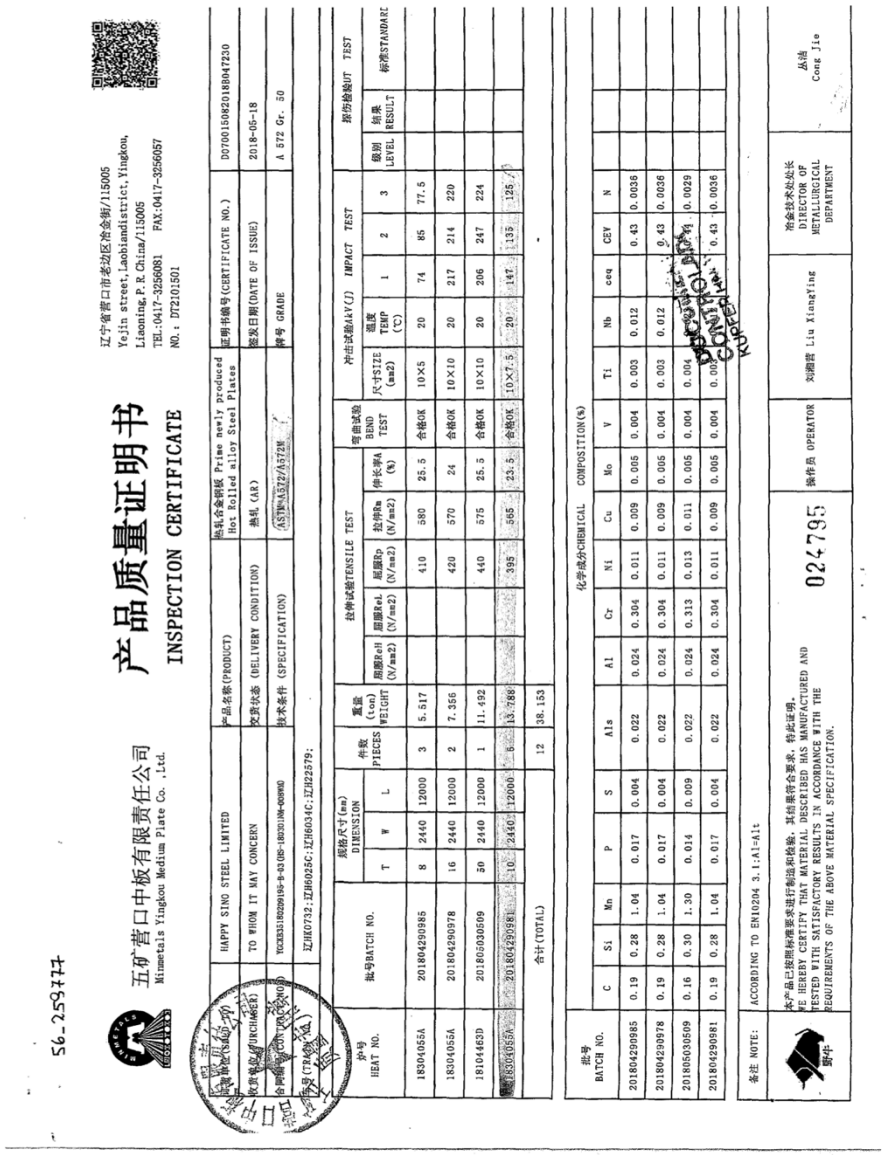
MONTO NETO	$	0
IVA 19%	$	0
MONTO TOTAL	$	0

Timbre Electronico SII
Res. Nº 80 del 22 de Agosto de 2014
Verifique documento: **https://www.asmar.cl/consultar-boleta-electronica**

Anexo **C**

Certificado de calidad del acero muestreado

Acero A:



五矿营口中板有限责任公司
Minmetals Yingkou Medium Plate Co. ,Ltd.

产品质量证明书
INSPECTION CERTIFICATE

辽宁省营口市老边区冶金街/115005
Yejin street,Laobiandistrict,Yingkou,
Liaoning,P.R.China/115005
TEL:0417-3256081 FAX:0417-3256057
NO.: D72101501

56-259774

收货单位(PURCHASER):	HAPPY SINO STEEL LIMITED	产品名称(PRODUCT)	热轧合金钢板 Prime newly produced Hot Rolled alloy Steel Plates
合同号(CONTRACT NO.):	TO WHOM IT MAY CONCERN	交货状态 (DELIVERY CONDITION)	热轧 (AR)
运输号(TRANSPORT NO.):	YCXXS518220190-B-03CHS-1803010M-200M0	技术条件 (SPECIFICATION)	ASTM A572/A572M
	IZHH0732;IZH6025C;IZH6034C;IZH225279;		

炉号 HEAT NO.	批号BATCH NO.	规格尺寸(mm) DIMENSION T	W	L	件数 PIECES	重量 (ton) WEIGHT	拉伸试验TENSILE TEST 屈服ReH (N/mm2)	屈服Rel. (N/mm2)	抗拉Rp (N/mm2)	抗拉Rm (N/mm2)	伸长率A (%)	弯曲试验 BEND TEST	冲击试验ANY(J) IMPACT TEST 尺寸SIZE (mm2)	温度 TEMP (℃)	1	2	3	探伤检验UT TEST 级别 LEVEL	结果 RESULT	标准STANDARD
18304056A	201804290985	8	2440	12000	3	5.517			410	580	25.5	合格OK	10×5	20	74	85	77.5			
18304056A	201804290978	16	2440	12000	2	7.356			420	570	24	合格OK	10×10	20	217	214	220			
181044630	201805030509	50	2440	12000	1	11.492			440	575	25.5	合格OK	10×10	20	206	247	224			
18304056A	201804290981	10	2440	12000	6	13.788			395	565	23.5	合格OK	10×7.5	20	147	135	125			
合计(TOTAL)					12	38.153														

批号 BATCH NO.	化学成分CHEMICAL COMPOSITION(%) C	Si	Mn	P	S	Als	Al	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti	Nb	ceq	CEV	N		
201804290985	0.19	0.28	1.04	0.017	0.004	0.022	0.024	0.304	0.011	0.009	0.005	0.004	0.003	0.012		0.43	0.0036		
201804290978	0.19	0.28	1.04	0.017	0.004	0.022	0.024	0.304	0.011	0.009	0.005	0.004	0.003	0.012		0.43	0.0036		
201805030509	0.16	0.30	1.30	0.014	0.009	0.022	0.024	0.313	0.013	0.011	0.005	0.004	0.004	0.008		0.43	0.0029		
201804290981	0.19	0.28	1.04	0.017	0.004	0.022	0.024	0.304	0.011	0.009	0.005	0.004	0.003	0.012		0.43	0.0036		

备注 NOTE: ACCORDING TO EN10204 3.1:A1=A1t

本产品已按照标准要求进行检验和检验，其结果符合要求，特此证明。
WE HEREBY CERTIFY THAT MATERIAL DESCRIBED HAS MANUFACTURED AND TESTED WITH SATISFACTORY RESULTS IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE ABOVE MATERIAL SPECIFICATION.

024795

操作员 OPERATOR 刘湘清 Liu XiangYing

冶金技术处处长 DIRECTOR OF METALLURGICAL DEPARTMENT 丛洁 Cong Jie

Acero B:

Anexo C

鞍钢矿业营口中板有限责任公司
Mineralsis Yingkou Medium Plate Co. ,Ltd.

产品质量证明书

INSPECTION CERTIFICATE

辽宁省营口市老边区冶金街/115005
Yejin street, Laobiandistrict, Yingkou, Liaoning, P. R. China/115005
TEL:0417-3256081 FAX:0417-3256057

NO.: DT2101501/A

订货单位(ORDERED TO)	EVRAZ STEEL LIMITED	产品名称(PRODUCT)	热轧合金钢板 Prime newly produced Hot Rolled alloy Steel Plates	证明书编号(CERTIFICATE NO.)	D0700150820188122118
收货单位(PURCHASER)	EVRAZ STEEL LIMITED	交货状态 (DELIVERY CONDITION)	热轧 (AR)	签发日期(DATE OF ISSUE)	2018-11-15
合同编号(CONTRACT NO.)	YGCKB3518080926З-B-02	技术条件 (SPECIFICATION)	ASTM A572/A572M	牌号 GRADE	A 572 Gr. 50
车号(TRAIN NO.)	辽H 6021C;辽HK0750;辽H23050;辽HD1153;辽HD1077;辽HK1002;辽HK2890;辽H6033C;辽HD1178;辽HK2891;辽HD1188;辽HC2229;辽HC1469;辽H6023C;				

炉号 HEAT NO.	批号BATCH NO.	规格尺寸(mm) DIMENSION			件数 PIECES	重量 (ton) WEIGHT	拉伸试验TENSILE TEST						弯曲试验 BEND TEST	冲击试验AkV(J) IMPACT TEST				探伤检验UT TEST		
		T	W	L			屈服ReH (N/mm2)	屈服ReL (N/mm2)	屈服Rp (N/mm2)	拉伸Rm (N/mm2)	原始标距Lo	伸长率A (%)		尺寸SIZE (mm2)	温度 TEMP (℃)	1	2	3	级别 LEVEL	结果 RESULT	标准STANDARD
18110834D	201810270091	32	2440	12000	2	14.710			360	550		24	合格OK	10×10	20	172	158	170			
18410300A	1801460	12	2440	12000	8	22.064			400	555		23.5	合格OK	10×10	20	141	128	116			
18310167A	201810170304	8	2440	12000	15	27.585			385	560		25	合格OK	10×5	20	69	73	61			
18110833D	201810270492	50	2440	12000	3	34.476			440	590		29	合格OK	10×10	20	202	200	210			
合计(TOTAL)					28	98.835														

批号 BATCH NO.	化学成分CHEMICAL COMPOSITION(%)																			
	C	Si	Mn	P	S	Als	Al	Cr	Ni	Cu	N	Mo	V	Ti	Nb	ceq	CEV			
201810270091	0.18	0.26	1.02	0.018	0.008	0.028	0.030	0.300	0.007	0.009	0.0033	0.006	0.004	0.014	0.019		0.42			
1801460	0.19	0.26	1.02	0.014	0.003	0.028	0.030	0.300	0.009	0.017	0.0051	0.002	0.004	0.020	0.016		0.42			
201810170304	0.19	0.26	1.02	0.024	0.002	0.032	0.035	0.310	0.006	0.008	0.0034	0.007	0.004	0.014	0.014		0.42			
201810270492	0.16	0.28	1.33	0.015	0.006	0.022	0.024	0.300	0.008	0.011	0.0035	0.005	0.004	0.017	0.024		0.45			

备注 NOTE:	ACCORDING TO EN10204 3.1:Al=Alt			
钢中	本产品已按照标准要求进行制造和检验，其结果符合要求，特此证明。 WE HEREBY CERTIFY THAT MATERIAL DESCRIBED HAS MANUFACTURED AND TESTED WITH SATISFACTORY RESULTS IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE ABOVE MATERIAL SPECIFICATION.	操作员 OPERATOR	李阳 Li Yang	冶金技术处处长 DIRECTOR OF METALLURGICAL DEPARTMENT

024720

Anexo **D**

Ciclos de carga realizados por la grúa

Estimación de Ciclos de carga grúa FAM

La estimación de los ciclos de carga de la grúa FAM se estimarán a partir de la información proporcionada por el mandante, de acuerdo con el horómetro de la grúa y su historial de trabajo previamente documentado.

1.1 Capacidad de la grúa FAM

Del Manual de Mantenimiento, según el mandante se tiene lo siguiente:

- Capacidad de carga: 28 [ton] para trabajo con pala.
- Alcance máximo: 42.5 [m].

1.2 Duración ciclo de trabajo

Durante una visita a terreno realizada a las instalaciones del Puerto, se pudo observar la grúa trabajando durante las maniobras de carga y descarga. En base a lo observado y a las mediciones realizadas, se estima que un ciclo completo debiera durar aproximadamente 69 seg. En base a esto, la cantidad de ciclos por hora vendría dada por:

- Ciclos por hora: 3600 / 69 = 52.2 [ciclos/hr].

Adicionalmente en base a la información proporcionada por los operadores, la carga promedio por cada ciclo se estima en 14.4 [ton] (80% de la capacidad máxima de la pala).

1.3 Clasificación de diseño de la grúa FAM

En base a la información entregada por el mandante, se determinó que el diseño de esta grúa fue hecho de acuerdo con las clasificaciones siguientes de la norma FEM 1.001:

1.3.1 Clasificación del equipo como un todo

A continuación, se enumeran las distintas clasificaciones de la grúa a partir de la norma FEM 1.001 como un todo:

- Clase de utilización: **U7**

Esta clase significa un número máximo de ciclos de carga entre $1 \cdot 10^6$ y $2 \cdot 10^6$.

- Espectro de cargas: **Q4**

Significa un factor de espectro entre 0.50 y 1.0. El factor de espectro refleja cuánto se acercan en promedio las cargas levantadas a la carga máxima admisible.

- Grupo de clasificación**: A8**

Con las clasificaciones de utilización y espectros de cargas, de acuerdo con lo señalado en la norma FEM 1001, se determina que el grupo de clasificación de la grúa es **A8**.

1.3.2 Clasificación de mecanismos individuales como un todo

A continuación, se detalla el resumen de la clasificación de los mecanismos individuales presentes en la estructura, principalmente en el área funcional, ver Tabla E-1. Donde se muestra la clase de utilización, el espectro de carga asociado al mecanismo y su grupo de clasificación:

Tabla E-0-1. resumen de clasificación de la grúa a partir de sus mecanismos individuales según la norma FEM 1.001.

N°	Mecanismo	Clase de Utilización	Espectros de Carga	Grupo de Clasificación
1	De elevación y cierre de la pala	**T8**	**L3**	**M8**
2	De cambio de alcance	**T8**	**L3**	**M8**
3	De giro	**T6**	**L2**	**M6**

Fuente: [FEM 1.001]

Clases de Utilización:

- La clase T8 significa un tiempo total de uso de entre 25.000 y 50.000 horas.
- La clase T6 significa un uso total del mecanismo de entre 6.300 y 12.500 horas.

Espectro de cargas:

- La clase L3 significa un factor de espectro entre 0.25 y 0.5.
- La clase L2 significa un factor de espectro entre 0.125 y 0.25.

1.3.3 Clasificación de componentes estructurales

La clase de utilización y la clase de espectro de esfuerzos para esta categoría no se indican, pero tienen que ser concordantes con la clasificación del equipo como un todo. En los elementos estructurales principales, la cantidad de ciclos de esfuerzos son en general iguales a la cantidad de ciclos de carga.
Considerando lo anterior, el grupo de clasificación para los componentes estructurales viene dado por:

- Grupo de clasificación: **E8**

1.4 Horas de trabajo de la grúa FAM

De acuerdo con lo informado por el mandante las horas totales que ha operado la grúa FAM desde su instalación, de acuerdo a sus horómetros, serían las presentadas en la Tabla E-2:

Tabla E-0-2. resumen total de horas de utilización de los mecanismos.

N°	Mecanismo	Horómetros (hrs)
1	Alcance	28,642
2	Giro	19,767
3	Izaje	28,560
4	Cierre	36,328

Fuente: [Horómetros de grúa FAM]

1.5 Carga total movilizada

En base a la información proporcionada por el mandante, la carga total descargada por la grúa FAM desde su instalación hasta mayo de 2019 es la Tabla E-3:

Tabla E-0-3. Carga total movilizada por la grúa FAM.

Año	Toneladas Totales	FAM	Carga
2003	1,255,231	62,762	Estimada 5%
2004	1,457,270	874,362	Estimada 60%
2005	1,312,097	787,258	Estimada 60%
2006	1,212,210	727,326	Estimada 60%
2007	1,270,927	762,556	Estimada 60%
2008	1,775,737	1,065,442	Estimada 60%
2009	1,775,913	1,065,548	Estimada 60%
2010	1,463,258	877,955	Estimada 60%
2011	1,548,921	1,008,450	Real
2012	1,572,873	1,457,658	Real
2013	1,756,535	1,667,293	Real
2014	2,107,740	2,097,513	Real
2015	2,263,312	2,261,601	Real
2016	2,409,067	1,854,868	Real
2017	2,624,342	1,881,520	Real
2018	2,536,969	1,745,905	Real
2019	950,941	716,335	Real
Σ	29,293,343	20,914,352	71%

Fuente: [Registro operador: KCM-H. Álvarez- Marcelo Núñez]

OBS: Los valores estimados fueron acordados en conjunto con ASMAR V. Y el mandante.

1.6 Horas de trabajo total

Las horas totales de trabajo se han estimado en base a las siguientes consideraciones:

a) Las horas de cierre, izaje y giro serían simultáneas, por lo que se considera sólo la mayor de ellas, y que corresponde a las horas de cierre.

b) Las horas de cambio de alcance son en parte simultáneas con las de cierre y suspensión. En efecto, durante la visita a terreno y la medición de un ciclo de carga, se pudo observar que de los 69 [seg] que dura un ciclo completo, 7 [seg] asociados al mecanismo "cambio de alcance" no son simultáneos con el cierre. En base a esto, se puede obtener las horas totales de trabajo de la grúa de acuerdo con lo señalado a continuación.

- Horas Totales = Horas de Cierre · 69 seg / 62 seg = 40,430 [Hrs].

1.7 Ciclos de carga

Se hace una estimación de la cantidad de ciclos de carga que llevaría la grúa, en base tanto a la carga movilizada como a las horas de trabajo:

1.7.1 Ciclos en base a la carga movilizada

Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente extracto de la planilla de diseño utilizada para el cálculo de la descarga de elementos en terreno (ver Tabla E-4).

Tabla E-0-4. Tabla que indica los registros de descargas totales de la grúa en su historial y el número de ciclos estimados a partir de esta misma.

Cap. Pala (m^3)	Totales (ton)	Pala Usada	Peso Pala (ton)	Carga Max de la pala (ton)	Carga Útil Max. (ton)	Factor de Carga considerada	Carga Estimada por ciclo	N° Ciclos Estimados Grúa
20	20,914,352	Triguera	10.00	28	18.00	80%	14.40	1,452,386

Fuente: [ASMAR V.]

Por lo que en base sólo a la carga movilizada, se estima que la grúa llevaría un total de **1,452,386 [ciclos]** a mayo de 2019.

1.7.2 Ciclos en base a horas de trabajo

Considerando lo señalado en el punto 1.2 (con respecto a la cantidad de ciclos / hora) y a lo expuesto en el punto 1.6 (con respecto a las horas totales de trabajo para la grúa), la cantidad de ciclos vendría dada por lo indicado en la Tabla E-5:

Tabla E-0-5. Tabla resumen de la cantidad de ciclos de la grúa según sus horas de trabajo.

N°	Descripción del movimiento	Horómetro [hrs]	Categoría	Ciclos / Hora	N° Ciclos Estimados
1	Grúa como equipo	40,430	U7	52.2	2,109,368

Fuente: [ASMAR V.]

Por lo que, en base a las horas totales trabajadas, se estima que la grúa llevaría un total de **2,109,368** ciclos a mayo de 2019.

1.7.3 Ciclos Totales a mayo de 2019

Considerando que se estimó el número de ciclos de carga de dos formas distintas, para efectos de estimación general se considerará el promedio de los valores obtenidos en los puntos 1.7.1 y 1.7.2.

A mayo de 2019:

- Ciclos de diseño grúa FAM: (1,452,386 + 2,109,368) / 2 = **1,780,877 [Ciclos]**.

Anexo **E**

Estimación del esfuerzo a partir del peso propio de la estructura

Cálculo de esfuerzos en la zona de la grieta

1. Sistema de unidades

El sistema de unidades a emplear en los cálculos será el sistema métrico decimal (mks). Todas las dimensiones serán expresadas preferentemente en milímetros. Los niveles y elevaciones serán en metros. Las tensiones serán en kg/cm2 o MPa.

2. Análisis geometría grúa FAM

Se considera el siguiente esquema (ver Figura F-1), donde se aprecian los puntos extremos de cada elemento móvil.

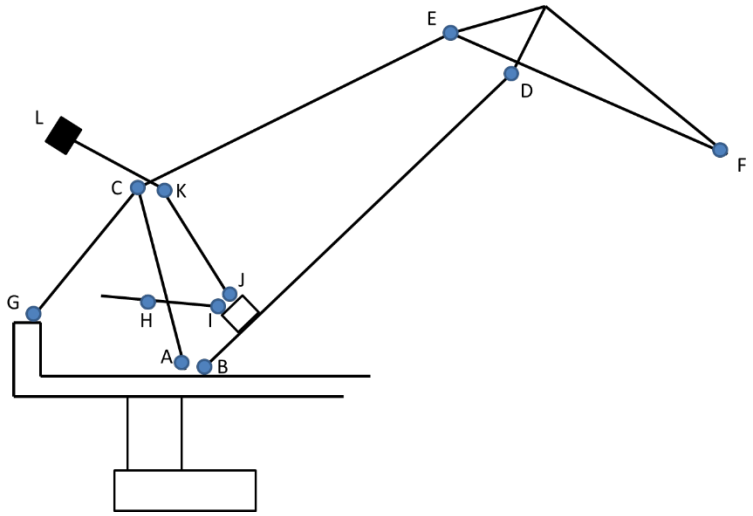


Figura F-2-1Grúa FAM, esquema de modelo de análisis geométrico. Fuente: [Autor]

2.1. Dimensiones de Elementos

Varias de las dimensiones fueron tomadas a partir de los planos de la grúa proporcionados por el mandante y fabricante. Las dimensiones no indicadas en esos planos se tomaron a escala de otros planos y por inspección en terreno. Las dimensiones de los elementos principales se detallan en la Tabla F-1:

Tabla F-2-1: dimensiones de elementos principales de la grúa FAM.

- Largo Pluma: 32.400 [mm].
- Largo Plumín: 5.600 + 16.800 [mm], 720 [mm] de articulación a eje cuerda inferior (medido de plano a escala).
- Largo Tirante: 25.700 [mm].
- Contrapeso móvil: 8.000 + 1.850 [mm], 740 [mm] de articulación a eje estructura (todo medido de plano a escala).
- Biela contrapeso móvil: 9.900 [mm] largo (medido de plano a escala).
- Punto I (articulación husillo-pluma): 5.000 y 1.620 [mm] desde inicio pluma (1.620 [mm] medido de plano a escala).
- Punto J (articulación biela-pluma): 5.500 y 1.800 [mm] desde inicio de la pluma (medido de plano a escala).
- Punto H (apoyo husillo): 5.310 y 610 [mm] desde inicio caballete (medido de plano a escala).

Fuente: [Planos grúa FAM].

2.2. Ángulos de la pluma con la horizontal:

Del análisis geométrico, para el ángulo formado entre la pluma y la horizontal, se tiene que:

- Con 43º se obtiene el alcance máximo de 43,0 [m] (Figura F-2).
- Con 81º se obtiene el alcance mínimo de operación de 10,50 [m] (Figura F-3).

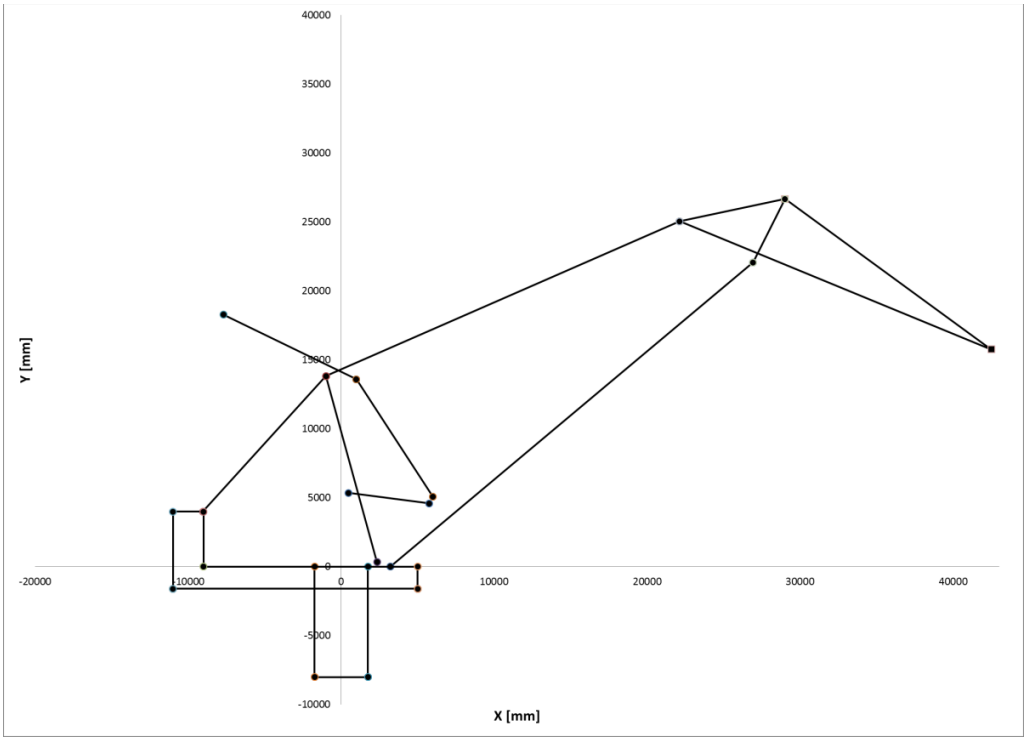


Figura F-2-2: Modelo de análisis geometría de la grúa: 42.95° entre la pluma y la horizontal. Fuente: [Autor].

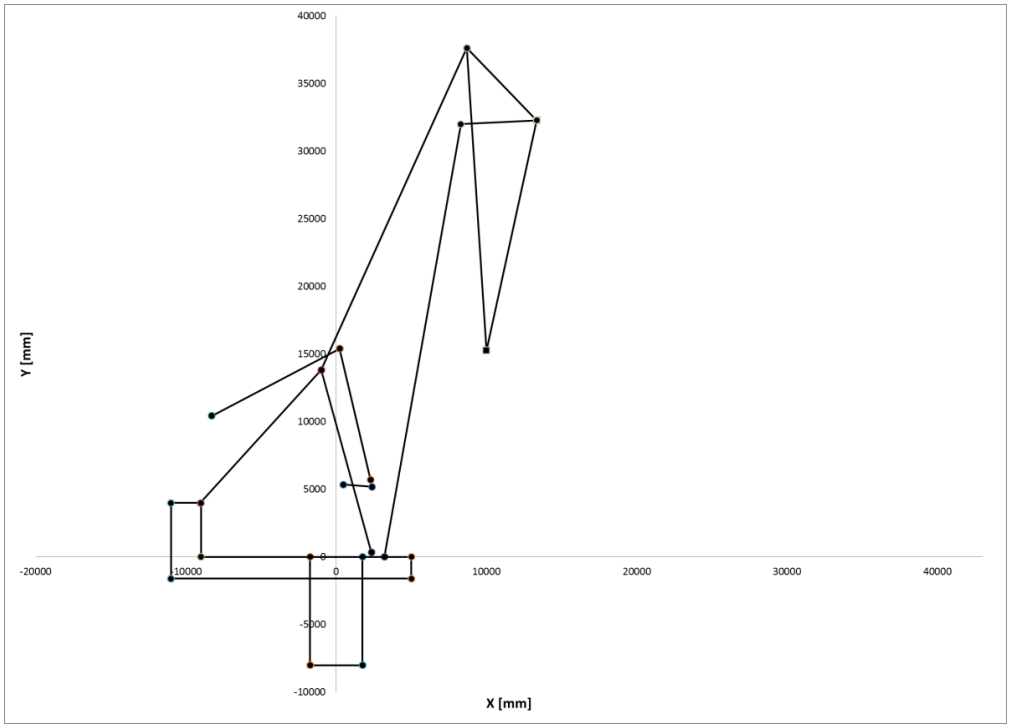


Figura F-2-3: Modelo de análisis geometría de la grúa: 80.95° entre la pluma y la horizontal. Fuente: [Autor].

2.3. Coordenadas:

Dadas las dimensiones, puntos de la grúa y los ángulos mencionados anteriormente, se considera además un rango intermedio con un ángulo de inclinación de 62º para un mejor entendimiento del problema, se determinan las coordenadas de los puntos fijos y variables de la grúa. Se definen las coordenadas X e Y, como se indica a continuación y los resultados se presentan en la Tabla F-2:

- X: respecto al centro de la columna (torre)
- Y: respecto al piso Casa de Máquinas y articulación inferior de la pluma, aproximadamente a la cota +23.890 m NRS

Tabla F-2-2: Resumen de posición de coordenadas de los puntos fijos y variables para los puntos de la grúa previamente definidos.

	α = 42.95[°]		**α = 62[°]**		**α = 80.95[°]**	
Punto	**X [mm]**	**Y [mm]**	**X [mm]**	**Y [mm]**	**X [mm]**	**Y [mm]**
A	2.345	340	2.345	340	2.345	340
B	3.200	0	3.200	0	3.200	0
C	-1.000	13.826	-1.000	13.826	-1.000	13.826
D	26.915	22.076	18.411	28.607	8.296	31.997
E	22.118	25.053	15.559	33.480	8.692	37.628
F	42.501	15.766	29.246	15.749	9.985	15.267
G	-9.050	4.000	-9.050	4.000	-9.050	4.000
H	475	5.347	475	5.347	475	5.347
I	5.756	4.593	4.117	5.176	2.386	5.193
J	5.999	5.065	4.193	5.701	2.287	5.715
K	980	13.599	649	14.946	225	15.398
L	-7.690	18.275	-8.973	12.833	-8.283	10.433

Es importante destacar que los puntos A, B, C, G & H son puntos fijos en el espacio.

3. Análisis de pesos totales y centros de gravedad

Se presenta la figura (F-4) donde se muestra los principales componentes de la grúa y su ubicación en esta.

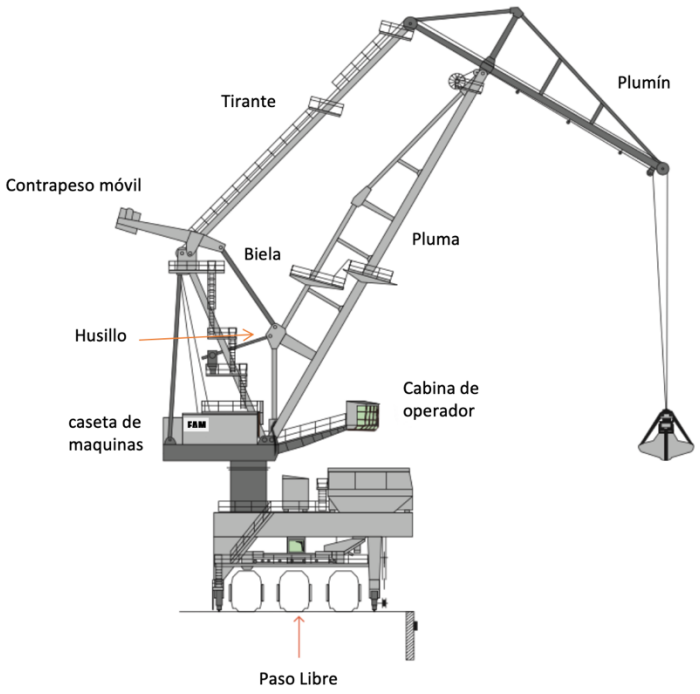


Figura F-4. principales componentes de la grúa FAM. Fuente: [TUKAN].

3.1. Partes móviles

Dado que todos los elementos del cuadrilátero móvil están contenidos en un plano, basta con un análisis bidimensional para la determinación de las posiciones de los centros de gravedad (CG) de las diferentes piezas.

3.1.1. Pluma

De acuerdo con lo definido en reunión con ASMAR V. y la empresa mandante, los pesos y posición del centro de gravedad lo que además del peso total de 39,3 [tonf] para la pluma y plataformas, se considera 0,63 toneladas, producto de los dos pasadores de la rótula inferior de la pluma.

Dado lo anterior, en la Tabla F-3 se muestra el peso total de la pluma, desglosado en los pesos parciales siguientes, con una estimación, además, de la ubicación del centro de gravedad de cada uno, en el eje de la pluma, medido desde la articulación inferior (desde B a D).

Tabla F-3: Peso total de la pluma desglosada y sus respectivos centros de gravedad de cada uno.

Elemento	Peso [tonf]	Centro de Gravedad [m]
Estructura Pluma y Plataformas	39,3	11,50
Articulación inferior	0,63	0

3.1.2. Plumín

El peso total de 16,8 [tonf] se considera desglosado en los pesos parciales siguientes (Tabla F-4), con una estimación del centro de gravedad de cada uno, a lo largo del eje de la cuerda inferior del plumín, medido desde la articulación superior con el tirante (desde E hacia F). También se hace una estimación del centro de gravedad en sentido transversal a ese eje.

Tabla F-4: Peso total plumín desglosado y sus respectivos centros de gravedad.

Elemento	Peso [tonf]	Centro de Gravedad Longitudinal [m]	Centro de Gravedad Transversal [m]
Estructura Plumín	13,5	10,50	0,50
Poleas Traseras	1,1	0,00	0,00
Poleas Delanteras	1,6	22,40	0,00
Rodillos, guía y cables	0,6	11,20	0,55

3.1.3. Tirante

El peso total de 11,5 [tonf] se considera desglosado en los pesos parciales siguientes (Tabla F-5), con una estimación del centro de gravedad de cada uno, en el eje del tirante, medido desde la articulación inferior (desde C hacia E).

Tabla F-5: Peso total del tirante desglosado y sus respectivos centros de gravedad.

Elemento	Peso [tonf]	Centro de Gravedad [m]
Estructura Tirante	8,8	12,85
Plataformas Superiores	1,0	21,40
Plataforma Inferior	0,5	2,00
Escalera	1,2	12,85

Fuente: [Planos grúa FAM]

3.1.4. Contrapeso móvil

El peso total de 48,6 [tonf] (sin la biela) se considera desglosado en los pesos siguientes (Tabla F-6), con una estimación del centro de gravedad de cada uno, a lo largo del eje de las vigas de la estructura, medido desde el extremo libre del volado (desde L hacia K). También se hace una estimación del centro de gravedad en sentido transversal a ese eje.

Tabla F-6: Peso total del contrapeso móvil junto con sus respectivos CG longitudinal y transversal.

Elemento	Peso [tonf]	Centro de Gravedad Longitudinal [m]	Centro de Gravedad Transversal [m]
Estructura Vigas del contrapeso	10,6	5,70	-0,10
Contrapeso	38,0	1,10	0,00

Fuente: [Planos grúa FAM]

3.1.5. Biela

El peso total y la posición del centro de gravedad medido desde la articulación inferior (J hacia K) es el presentado en la Tabla F-7:

Tabla F-7: Peso total Biela y la posición de su centro de gravedad.

Elemento	Peso [tonf]	Centro de Gravedad [m]
Peso Total	4,0	4,50

Fuente: [Planos grúa FAM]

3.1.6. Husillo

El peso total de 6,0 [tonf] se considera desglosado en una parte fija: 3,5 [tonf], y una parte móvil: 2,5 [tonf]. El centro de gravedad de la parte móvil se considera a 2,80 m de su articulación con la pluma (I).

3.1.7. Resumen

De lo anterior, las posiciones de los CG de cada componente del cuadrilátero móvil, relativas a sus extremos, se muestran en la Tabla F-8:

Tabla F-8: Tabla resumen de cada componente y sus centros de gravedad.

Elemento	Largo [m]	Centro de Gravedad [m]	Observaciones
Pluma	32,40	11,32	de B hacia D
Plumín	22,40	10,97	de E hacia F
Tirante	25,70	13,12	de C hacia E
Contrapeso móvil	9,85	2,1	de L hacia K
Biela	9,90	4,5	de J hacia K
Husillo (parte móvil)	5,34	2,8	de I hacia H

Luego, dado lo anterior, se tiene que las coordenadas de los centros de gravedad de cada elemento del cuadrilátero móvil, para cada una de las posiciones de análisis, son las presentadas en la Tabla F-9:

Tabla F-9: Coordenadas de los centros de gravedad de cada elemento móvil, para diferentes posiciones de análisis.

Elemento		α = 42.95[°]		α = 62[°]		α = 80.95[°]	
	Peso [tonf]	**X [mm]**	**Y [mm]**	**X [mm]**	**Y [mm]**	**X [mm]**	**Y [mm]**
Pluma	39,93	11.485	7.712	8.514	9.994	4.980	11.178
Plumín	16,8	32.275	20.887	22.595	25.053	9.745	26.701
Tirante	11,5	10.802	19.557	7.454	23.859	3.948	25.977
Contrapeso móvil	48,6	-5.851	17.261	-6.917	13.264	-6.459	11.474
Biela	4	3.718	8.944	2.582	9.903	1.350	10.116
Husillo (parte móvil)	2,5	2.984	4.989	1.320	5.307	-405	5.418

El peso total de las partes móviles es 123,33 [tonf], y dicha resultante se ubica en las coordenadas:

- (X, Y) = (6,997 [m]; 14,359 [m]) Para $\boldsymbol{\alpha} = 43°$
- (X, Y) = (3,914 [m]; 14,529 [m]) Para $\boldsymbol{\alpha} = 62°$
- (X, Y) = (0,798 [m]; 14,638 [m]) Para $\boldsymbol{\alpha} = 81°$

3.2. Partes fijas

El resumen de los pesos y posiciones de los centros de gravedad respectivos que se consideran se muestran en la Tabla F-10:

Tabla F-10: Resumen de los pesos y posiciones de los CG.

Partes Fijas	Peso [tonf]	X [mm]	Y [mm]
Plataforma, parte central	49,30	-3.700	-360
Plataforma, partes laterales	12,40	-2.600	-400
Contrapeso Fijo	49,00	-9.580	400
Caballete	22,10	580	7.420
Tirantes	4,60	-5.340	8.530
Husillo (parte fija)	3,50	0	5.350
Caseta de Máquinas	8,00	-4.000	2.750
Tecle Casa de Máquinas	3,70	-5.500	3.200
Escaleras	1,60	-2.600	9.000
Winches	28,00	-4.200	1.000
Rodamiento y Brida	9,70	0	-2.350
Viga de Apoyo Cabina	9,20	0	-900
Sala Eléctrica	7,00	-5.800	1.500
Contrapeso Fijo Hormigón[1]	11,39	-4.050	-1.350
Refuerzos Vigas Maestras	3,30	-4.130	-770
Vigas Tecle Nivel Husillo	1,2	-2.000	5.500
Columnas y Bridas	13,00	0	-4.530

La resultante de los pesos de las partes fijas es 236,99 [tonf], y está ubicada en la coordenada (X, Y) = (-4,10 [m]; 0,86 [m]).

3.3. Brazo cabina

Para el brazo de la cabina de operador, las consideraciones tomadas son las siguientes:

[1] De acuerdo con lo informado y visto en terreno, existe un contrapeso de hormigón masa, no informado en los planos de FAM, de aproximadamente 20 toneladas. Se inspeccionó el sector de la caseta de máquinas, determinándose que el contrapeso tiene las siguientes dimensiones: 3,30 [m] x 3 [m] x 0.5 [m], es decir 4,95 m^3. Considerando un peso específico de 2,3 ton/m^3, se tiene que el peso total de este elemento es 11,39 toneladas.

- Peso: 9,5 [tonf]
- X_{cg}: 12,4 [m] con brazo extendido
- X_{cg}: 2,4 [m] con brazo recogido

Además del peso propio del brazo de la cabina (8,8 [tonf]), se considera un peso uniformemente distribuido de 700 [kgf] asociados a la malla metálica de protección y elementos secundarios no considerados en el plano, resultando un peso total de 9,5 [tonf].

3.4. Total, pesos propios

A manera de resumen de lo mostrado en los puntos 3.1, 3.2 y 3.3, se muestran a continuación en la Tabla F-11, los pesos propios y coordenadas de las partes móviles y fijas de la zona superior de la grúa.

Tabla F-11: Resumen pesos propios y coordenadas de la zona superior de la grúa.

		Coordenadas CG	
	Peso [tonf]	**X [m]**	**Y [m]**
Partes fijas	236,99	-4,104	0,862
Partes móviles (α = 42.95°)	123,33	6,997	14,359
Partes móviles (α = 62°)	123,33	3,914	14,529
Partes móviles (α = 80.95°)	123,33	0,798	14,638
Brazo cabina extendido	9,50	12,400	0,000
Brazo cabina recogida	9,50	2,400	0,000

3.5. Momento flector debido a cargas de peso propio

De la misma manera, es posible determinar el momento flector en la columna debido a los pesos propios.

El momento flector estará dado por la suma de los pesos de cada elemento, por su distancia al eje de la columna (es decir, su coordenada X) expresada en la ecuación F-1:

$$M = \sum X_{cg}^{i} \cdot w_i \qquad (F\text{-}1)$$

A partir de esta ecuación se puede estimar los momentos flectores para los diferentes ángulos como también para las diferentes partes de la grúa, los cuales se presentan en la Tabla F-12:

Tabla F-12: Momento flector en la columna debido a los pesos propios.

		α = 42.95°		**α = 62°**		**α = 80.95°**	
	Peso [tonf]	**X [m]**	**M [t-m]**	**X [m]**	**M [t-m]**	**X [m]**	**M [t-m]**
Partes fijas	236,99	-4,10	-972,66	-4,10	-972,66	-4,10	-972,66
Partes móviles	123,33	7,00	863,00	3,91	482,72	0,80	98,47
Cabina	9,5	12,40	117,80	2,40	22,80	12,40	117,8
Total	**369,82**		**8,13**		**-467,14**		**-756,40**

Además, se produce un momento transversal, dado por la ubicación lateral excéntrica de la cabina y la sala eléctrica (fuera del plano en que se realizó el análisis geométrico). El momento adicional por tal efecto es:

$$M = (9{,}2 + 9{,}5) \cdot 7 - 7 \cdot 4{,}5 = 99{,}4\ [t - m]$$

3.6. Posición de la grúa para momento nulo en la columna

Se determina la posición de la pluma de manera tal que el momento en la columna sea cero en el plano definido por el cuadrilátero móvil (pluma, plumín, husillo, tirante). Se realiza esta estimación con el fin de establecer, a partir de estos cálculos, una posición de la grúa en la cual se podría emplear para una posterior reparación en la columna, reparación que queda fuera del alcance de esta memoria de título.

Por tanteo, se llega a que el ángulo de la pluma respecto a la horizontal para dicha condición es $\boldsymbol{\alpha} = 43{,}29°$, o bien, equivalentemente, con un alcance de la grúa de 42,29 [m].
Para esta condición, las coordenadas de los puntos de la grúa para la condición de momento nulo en la columna están expresados en la Tabla F-13:

Tabla F-13: posición de los puntos de los elementos previamente definidos de la grúa para un momento nulo en la columna, las casillas sombreadas A, B, C, G, & H son puntos fijos de la grúa en el espacio.

α = 43,29º		
	X [mm]	**Y [mm]**
A	2.345	340
B	3.200	0
C	-1.000	13.826
D	26.782	22.218
E	22.021	25.251
F	42.293	15.724
G	-9.050	4.000
H	475	5.347
I	5.728	4.608
J	5.969	5.082
K	984	13.636
L	-7.771	18.150

Las coordenadas de los centros de gravedad de cada elemento (móvil) son las que se muestran en la Tabla F-14:

Tabla F-14: Coordenadas de centros de gravedad de los elementos móviles de la grúa para un ángulo de 43,29º.

				α =	43,29º
Elemento	**L**	**LCG**	**Peso [t]**	**X [mm]**	**Y [mm]**
Pluma	32.400	11.319	39,93	11.439	7.762
Plumín	22.399	10.970	16,8	32.123	20.968
Tirante	25.700	13.120	11,5	10.752	19.659
Contrapeso móvil	9.851	2.100	48,6	-5.914	17.170
Biela	9.900	4.500	4	3.703	8.970
Husillo (parte móvil)	5.335	2.800	2,5	2.971	4.996

Luego, considerando que el brazo de la cabina se encuentra extendido a 12,40 [m], se obtienen los resultados presentados en la Tabla F-15:

Tabla F-15: Peso total de los elementos y sus respectivos momentos debido a las excentricidades de estas para una condición del brazo de cabina extendido a 12,40[m].

		α = 43,29°	
	Peso [tonf]	**X [m]**	**M [t - m]**
Partes fijas	236,99	-4,10	-972,66
Partes móviles	123,33	6,93	854,86
Cabina	9,5	12,40	117,80
Total	**369,82**		**0,0**

Una segunda manera de obtener momento nulo en la columna, en el plano del cuadrilátero móvil, es a máximo alcance, regular la distancia del brazo de la cabina. En efecto, si este se extiende dicho brazo a 11,55 [m], la resultante de estos momentos queda estimada en la Tabla F-16:

Tabla F-16: Peso total de los elementos y sus respectivos momentos debido a las excentricidades de estas para una condición del brazo de cabina extendido a 11,55[m].

		α = 42.95°	
	Peso [ton]	**X [m]**	**M [t - m]**
Partes fijas	236,99	-4,10	-972,66
Partes móviles	123,33	7,00	863,00
Cabina	9,5	11,55	109,73
Total	**369,82**	**14,45**	**0,06**

La información anterior, puede servir de manera referencial, para el diseño de la faena de cambio de rodamiento o una posible reparación estructural. No obstante, hay que tener en consideración que la obtención de momento nulo en la columna no es condición necesaria para la ejecución de dicha tarea.

En términos de reacciones, finalmente la variación en la carga vertical y momento flector con respecto a la columna es el presentado en la Tabla F-17:

Tabla F-17: resumen de reacciones para diferentes condiciones del ángulo de la pluma.

Ángulo de la pluma	**Carga vertical [tonf]**	**Momento [tonf m]**
42,95°	369,82	8,13
62,00°	369,82	-467,14
80,95°	369,82	-756,40

4. Cálculo del esfuerzo en la columna para el caso estático

Para la estimación del esfuerzo longitudinal a la cual está sometida la columna es necesario estimar el esfuerzo axial del elemento producto del peso propio de sus componentes, además el esfuerzo de flexión asociado a la excentricidad de esta propia carga. Es posible utilizar el principio de superposición, suponiendo además que es posible aplicar la teoría de esfuerzo y deformación para determinar el esfuerzo total en la zona, la cual está dada por la Ecuación F-2 para un caso particular donde la excentricidad de la carga produce tensión en elemento:

$$\sigma = \frac{M}{W} - \frac{P}{A} \qquad (F\text{-}2)$$

Donde, M es el momento flector, W es el módulo resistente determinado por $W = I_y/Z_{max}$, donde I_y es la inercia de la sección y Z_{max} es la distancia del punto más alejado de la fibra neutra siendo esta de tensión máxima, P es la carga axial asociado al peso propio de la estructura y A es el área de la columna. Los esfuerzos de tensión se consideran positivos, mientras que los esfuerzos de compresión se consideran negativos. Esta convención de signos ayuda a determinar la naturaleza de los esfuerzos finales.

Para el caso en que **la pluma está recogida y la pala vacía** (caso más desfavorable), se tiene:

$$P = 369.82\ [t]$$
$$M = 756{,}40\ [t - m]$$

El momento de inercia de la sección, considerando la sección completa de la columna es:

$$I = 41199011\ [cm^4]$$

Las distancias a las caras interior y exterior de la pared de la columna son respectivamente:

$$d_{in} = 172.5\ [cm]$$
$$d_{ex} = 175\ [cm]$$

De modo que

$$W = 236728\ [cm^3]$$

De modo que la tensión "teórica" en las cercanías de la zona de la fisura por acción de los pesos propios de la estructura en reposo en el caso más desfavorable (alcance mínimo) es:

$$\sigma_0 = 304\ [kg/cm2]$$

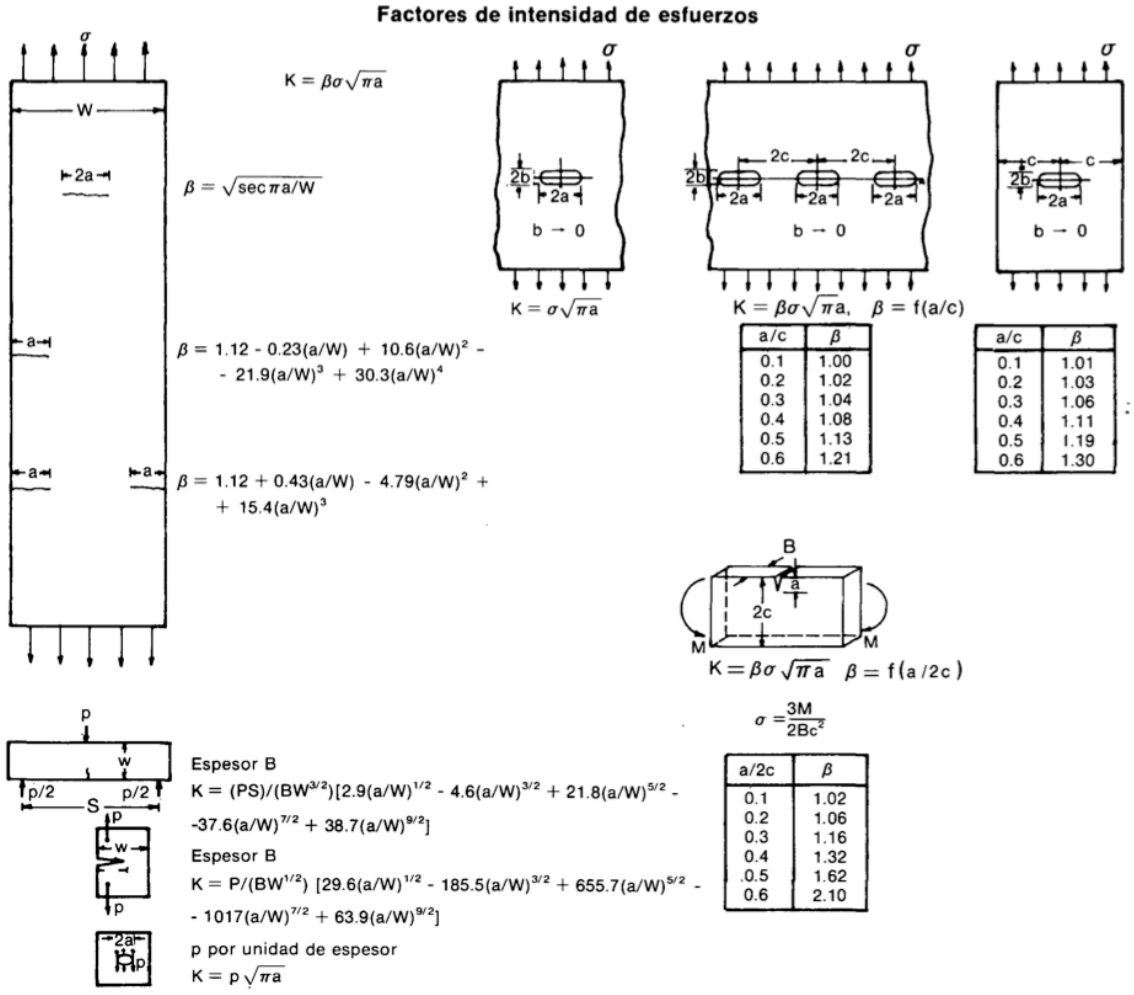
Los esfuerzos calculados mediante la Ecuación F-2 no son completamente precisos. La utilización de esta ecuación no cumple con el principio de Saint-Venant, ya que, la aplicación de las fuerzas no está lo suficientemente alejada de la zona donde están aplicadas las cargas, lo cual no arroja un resultado certero, pero si una muy buena aproximación para este estudio en particular.

El presente resultado queda sujeto a una mejor aproximación en otra posterior memoria de título mediante elementos finitos donde se puede profundizar con más detalle las discontinuidades, soldaduras y uniones presentes en la estructura.

Anexo **F**

Factor **Y** en fórmula de Paris

Según la ASTM el factor que en este trabajo se nombró como Y, en la siguiente Figura es nombrada como *β:*



a/c	β
0.1	1.00
0.2	1.02
0.3	1.04
0.4	1.08
0.5	1.13
0.6	1.21

a/c	β
0.1	1.01
0.2	1.03
0.3	1.06
0.4	1.11
0.5	1.19
0.6	1.30

a/2c	β
0.1	1.02
0.2	1.06
0.3	1.16
0.4	1.32
0.5	1.62
0.6	2.10

Figura G-1-1. Factor Y (factor beta "β" en la imagen). fuente: [ASTM

Anexo **G**

Mediciones de las galgas extensiométricas

A continuación, se presentan las mediciones de cada galga extensiométrica con las cuales se siguió el procedimiento descrito en el capítulo IV de este documento, cada gráfico de tensión vs tiempo, representa las mediciones para cada galga (1, 2, 3 y 4).

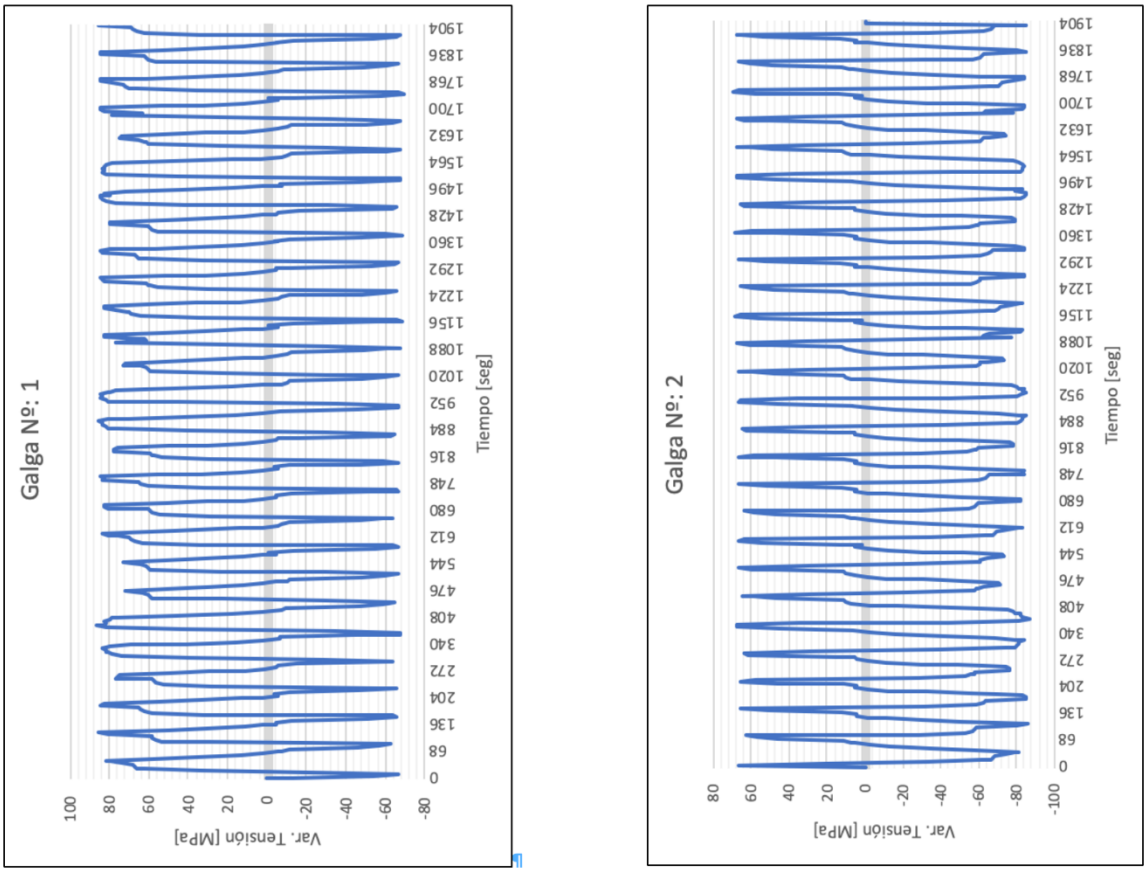


Figura H-2-1. Mediciones de Galgas extensiométricas 1 y 2. Fuente: [Autor].

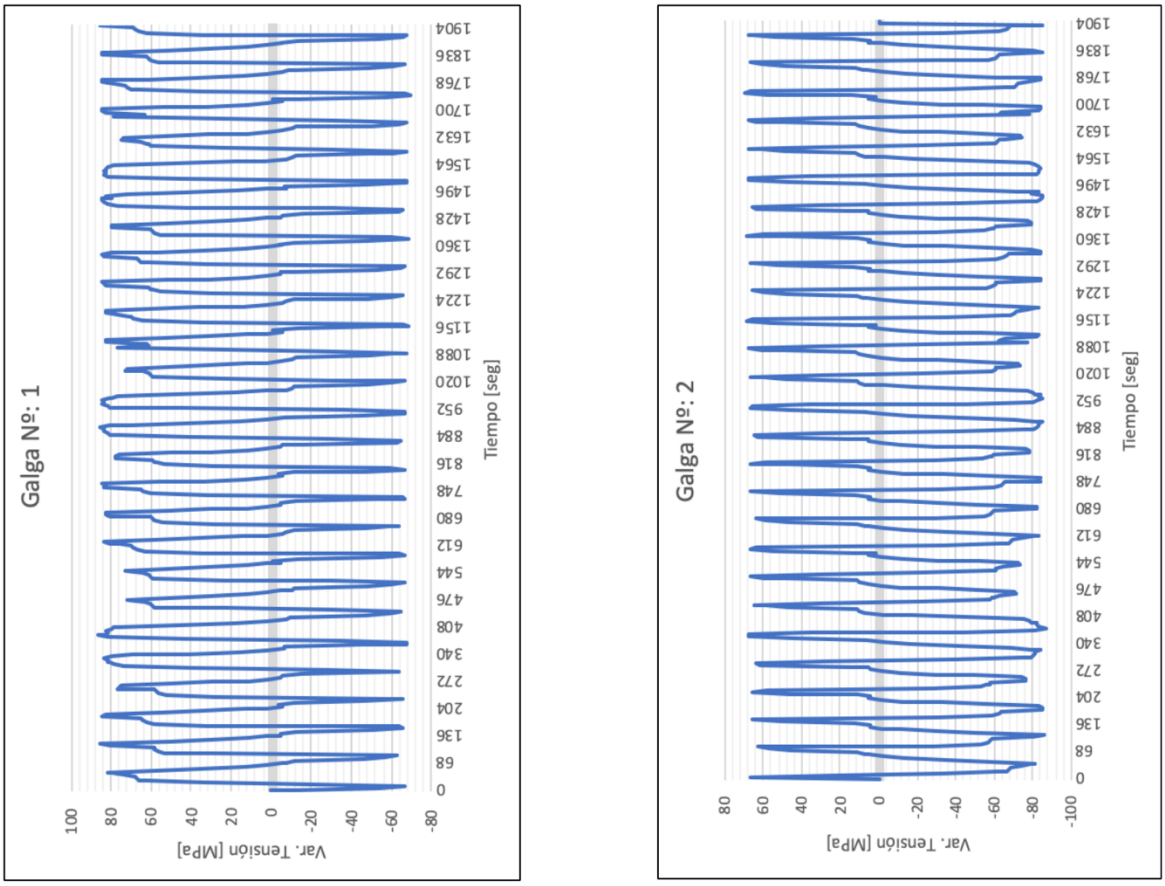


Figura H-2-2. Mediciones de Galgas Extensiométricas 3 y 4. Fuente: [Autor]

Anexo **H**

Instalación de galgas extensiométricas

Todas las galgas extensiométricas utilizadas para el monitoreo de la estructura se instalaron en terreno. Con el fin de optimizar el tiempo de instalación y disminuir los posibles errores en la medición, se adaptó la metodología propuesta por el fabricante y por IDIEM (Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales), laboratorio de la Universidad de Chile, con los que se trabajó en conjunto para la implementación y toma de datos.

1.1 Preparación de las galgas

La preparación de las galgas se realizó en laboratorio; luego se trasladaron a terreno para su instalación. Su manipulación se realizó sobre una superficie (placa de acrílico) previamente limpiada con alcohol. Por cada una se cortó 30 [cm] de cable de 3 hilos y se retrajo la aislación protectora de cada hilo 3 [cm] aproximadamente. Con una pinza previamente limpiada con alcohol, se separó levemente sus terminales para proceder a soldar uno de los terminales a uno de los hilos del cable. Se unieron los dos hilos restantes del cable y se soldaron al segundo terminal. Se aislaron por separado los terminales evitando que entraran en contacto. Se verificó la conexión realizada midiendo la resistencia de la galga desde el extremo libre del cable. Ésta corresponde a la resistencia indicada por el fabricante, que según el modelo de la galga utilizada fue de 120 Ω.

1.2 Preparación de la superficie

Se pulió previamente la superficie a la cual se adhirió la galga hasta remover todo el residuo de pintura y óxido hasta obtener una superficie lisa. Se limpió la superficie pulida con alcohol hasta remover todas las impurezas (grasa, polvo, etc.) y se marcó la posición del sensor utilizando un marcador punta fina, alineando el eje del elemento a monitorear con el eje de la galga en la dirección paralela al eje del cilindro. Se limpió nuevamente la superficie con alcohol.

1.3 Pegado de las galgas extensiométricas

Se agregaron unas gotas de adhesivo instantáneo sobre la galga, asegurando que toda la superficie quede cubierta por éste. La galga extensiométrica se alineó con la marca realizada en el lugar a monitorear y se presionó contra la superficie, siempre en la misma dirección, para eliminar los excesos de adhesivo y las burbujas de aire que pudiesen existir entre ambos elementos (ver Figura I-1).



Figura I-1-1. Galga extensiométrica N.º 4 instalada al interior de la columna base de la grúa.

Se aplicó una capa de mínimo 0.5 [cm] de espesor de silicona neutra sobre toda la superficie de la galga, como protección contra la humedad. Además, se cubrió la galga instalada con cinta aislante, manteniendo un registro de la posición y del rotulo de éste.

Anexo I

Memorándum de trabajos

A continuación, se presentarán los memorándums de trabajo realizados por el autor y enviados hacia las diferentes partes partícipes de la realización de esta memoria de título.

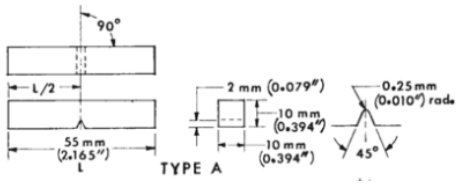
ASMAR
ASTILLEROS
DESDE 1895

MEMORANDUM Nº 1

Proyecto	**Memoria de titulo: "*estudio de la propagación de la grieta en acero para una grúa level luffing fam en el puerto de San Antonio*"**	
1. SOLICITUD, CONSULTA E INFORMACIÓN		
De: Gonzalo Lagos (estudiante memorista UTFSM)		Fecha: 10.10.19
consulta	Estimados, Por medio del presente documento realizare las informaciones, solicitudes y avances pertinentes de mi proyecto de memoria que estoy realizando en conjunto con ASMAR V. • Se envió a revisión, previa aprobación del jefe de proyectos de ASMAR V, hacia el profesor correferente de la universidad y al profesor guía, consultor de ASMAR V, el documento de inscripción de la memoria exigida por el departamento de obras civiles de la universidad. • Con respecto a los ensayos a realizar, se hizo una revisión bibliográfica donde se encontró una correlación que relaciona los datos obtenidos por el ensayo Charpy obteniendo el valor de Kic, la fuente es confiable y es parte de un paper. Se discutio presencialmente con el jefe de proyectos de ASMAR, donde se aprobó por parte de ASMAR como un método aceptable para el desarrollo de la memoria, esto considerando los altos gastos que se incurririan para realizar el ensayo de fractura y el tiempo que se tomara en llevarlo a cabo, es por esto que solicito la autorizacion de mi profesor guia para poder continuar por ese camino y solo realizar el ensayo de Charpy con sus respectivas probetas la cual se detallara en el memorandum nº 2.	
Profesor guía	**Jefe de proyectos ASMAR**	**Profesor correferente**

Anexo I

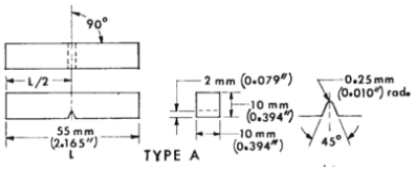
MEMORÁNDUM Nº 2

<table>
<tr><td>Proyecto</td><td colspan="3">Memoria de titulo: “estudio de la propagación de la grieta en acero para una grúa level luffing fam en el puerto de San Antonio”</td></tr>
<tr><td colspan="4">1. SOLICITUD, CONSULTA E INFORMACIÓN</td></tr>
<tr><td colspan="3">De: Gonzalo Lagos (estudiante memorista UTFSM)</td><td>Fecha: 11.10.19</td></tr>
<tr><td>consulta</td><td colspan="3">Estimados,
Con respecto al ensayo Charpy a realizar, se determinó la compra por parte de ASMAR de dos planchas de acero A572G50 de distintos proveedores los cuales si no hay ningún inconveniente serían Aceros Otero y Kupfer SA para el diseño de las probetas, las cuales tienen las siguientes características:
• 2 coladas diferentes, ideal de diferentes proveedores (Otero y Kupfer) + 1 importada que esta por definir, pero que se encontró en la literatura con sus ensayos y datos para efectos de comparación.
• Por cada colada saldrán 14 probetas, 10 son en la dirección longitudinal de las fibras de la plancha y 4 son en la dirección transversal, para finalmente realizar un total de 28 ensayos, esto para tener una mejor representación del material según la norma ASTM E23.
• Cada plancha de acero tendrá un espesor de 12mm ya que se considera que con el rectificado disminuira su espesor, para alcanzar los 10mm de espesor que necesita las probetas.
• Las dimensiones de las probetas serán de 10mm de alto x 10mm de espesor x 55mm de largo, con una entalla en el centro donde la forma de esta se está por determinar, posterior a recomendación del profesor guía, pero que en primera instancia sea como se indica en la siguiente imagen:
 

Entonces a partir de esto, necesito la autorización de mi profesor guía para realizar el ensayo de fatiga; también que me autorice la cantidad de probetas a ensayar donde se determinó por recomendaciones de laboratorio y en base a la norma ASTM E23. También en la norma ASTM E23 aparecen 3 tipos de entalla, donde se eligió la 45º, que aparece en la imagen, en base a que en la literatura se ha encontrado que es la más utilizada y al parecer la más sencilla de realizar, se pedirá al laboratorio que las diseñe ya que ASMAR no posee maquinaria con tal precisión.
Y por ultimo se está definiendo el lugar a ensayar, en primera instancia es en la universidad de Santiago (USACH) pero está condicionado a si existe una positiva respuesta del departamento de mecánica de la UTFSM para realizar el ensayo allí, ya que existe un beneficio de tiempo y costos al realizarlo en ese lugar y también a la espera de si el profesor guía tiene otra propuesta.</td></tr>
<tr><td>Profesor guía</td><td>Jefe de proyectos ASMAR</td><td colspan="2">Profesor coreferente</td></tr>
</table>

ASMAR
ASTILLEROS
DESDE 1895

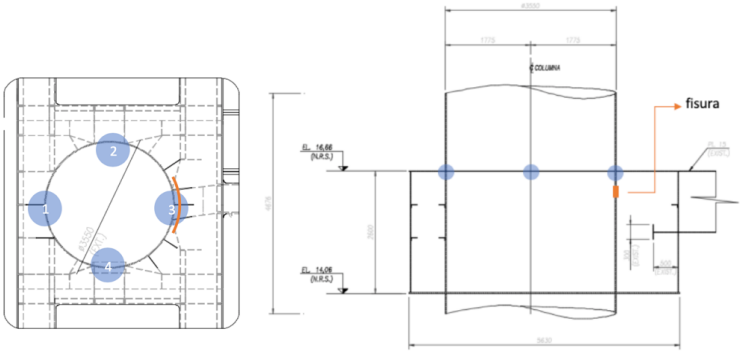
MEMORANDUM Nº 3

Proyecto	**Memoria de titulo: "*estudio de la propagación de la grieta en acero para una grúa level luffing fam en el puerto de San Antonio*"**	
1. SOLICITUD, CONSULTA E INFORMACIÓN		
De: Gonzalo Lagos (estudiante memorista UTFSM)		Fecha: 16.01.20
información	Estimados, Con respecto al ensayo de tenacidad del impacto y lo conversado ayer en el laboratorio SIMET de la USACH con el profesor Alfredo Artigas en conjunto con Don Lautaro Ramirez de ASMAR V., se decidió realizar el ensayo de la tenacidad del impacto de acuerdo a las normas ASTM E23 y ASTM E370, la cual exigen 3 probetas por temperatura ensayada para satisfacer la variabilidad del ensayo, la cual se realizará bajo las siguientes características: • Se entregarán 2 planchas del acero A572gr50 de 1x1 m con espesores de 10mm y 12mm, las cuales serán entregadas al laboratorio SIMET para la preparacioón de 18 probetas de charpy con las siguientes dimensiones:  • Se realizará un ensayo de metalografía en el laboratorio SIMET para determinar la linea de fabricación del acero previo ensayo de tenacidad, con el fin de determinar la dirección más desfavorable, la cual es la dirección transversal. • Se utilizarán 3 cupones de ensayos (3 probetas por cupón) para las siguientes temperaturas: -10ºC, 5ºC y 20ºC para la plancha de 10mm y otros 3 cupones para las mismas temperaturas: -10ºC, 5ºC y 20ºC para la plancha de 12mm, con el fin de determinar la curva de transción dúctil-fragíl y obtener el valor de la energía absorbida a Tº ambiente.	

Profesor guía	**Jefe de proyectos ASMAR**	**Profesor correferente**

ASMAR
ASTILLEROS
DESDE 1895

MEMORANDUM Nº 4

Proyecto	**Memoria de titulo: "*estudio de la propagación de la grieta en acero para una grúa level luffing fam en el puerto de San Antonio*"**
1. SOLICITUD, CONSULTA E INFORMACIÓN	
De: Gonzalo Lagos Elgueta (estudiante memorista UTFSM)	Fecha: 28.01.20
Información	Estimados, Con respecto a la medición del estado de tensiones ubicado en la zona de la fisura de la grúa, está se realizará en dos partes: • La primera parte, es mediante un análisis estático de la estructura, la cual es con respecto a los pesos de los elementos que están sobre la columna que generan esfuerzos en esta zona, los cuales se determinarán mediante planos y dimensionamientos entregados por el mandante a partir de la posición de reposo de la grúa y a distintos alcances de su brazo , y con esto analizar también la variación de momento en las diferentes configuraciones de alcance. • La segunda parte se realizará a partir de mediciones mediante el uso de *strain gauge* (galgas extensiométricas) para analizar el caso dinámico, la cual tiene relacion con la medición de esfuerzos en el uso rutinario de la grúa en un régimen normal, donde se trabajará en conjunto con el laboratorio **IDIEM** de la Universidad de Chile, ellos facilitarán todo el equipamiento necesario para la medición de los *strain gauges* y la organización de los resultados obtenidos. Se instalarán 4 dispositivos (*strain gauge*) ubicados según el siguiente esquema: 

Memorándum N.º 4, continuación:

ASMAR
ASTILLEROS
DESDE 1895

	El tiempo de medición dependerá de lo necesario para caracterizar todo el ciclo de carga, sus valores promedio y los valores más extremos. cabe mencionar que se debe tener en consideración que los *strain gauge* sólo analizarán las cargas externas que se presentan después de haber instalado estas galgas, es decir, la información que se obtendrá no considerará los esfuerzos generados por el peso propio de los elementos en las mediciones de las galgas. Por lo que el cálculo para el estado de tensiones en esa zona consiste en la suma del caso dinámico y el caso estático.

Profesor guía	**Jefe de proyectos ASMAR**	**Profesor correferente**