



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Diploma

en opción al título de **Ingeniero Mecánico**

Título: Simulación computacional del Sistema Cable-Torque del Sedimentador 120 A de la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara”

Autor: Efraín Camejo Lores

Tutores: Inst. Ing. Dannys Alfredo Berrío Landa _____
Ing. Ramón Baquero Arias _____

Moa, 2014
“Año 56 de la Revolución”

Tesis presentada en opción al título de
INGENIERO MECÁNICO

**TÍTULO: Simulación computacional del Sistema
Cable-Torque del Sedimentador 120 A
de la empresa “Cmdte. Ernesto Che
Guevara”**

AUTOR: Efraín Camejo Lores

**TUTORES: Inst. Ing. Dannys Alfredo Berrío Landa
Ing. Ramón Baquero Arias**

Moa. 2014

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

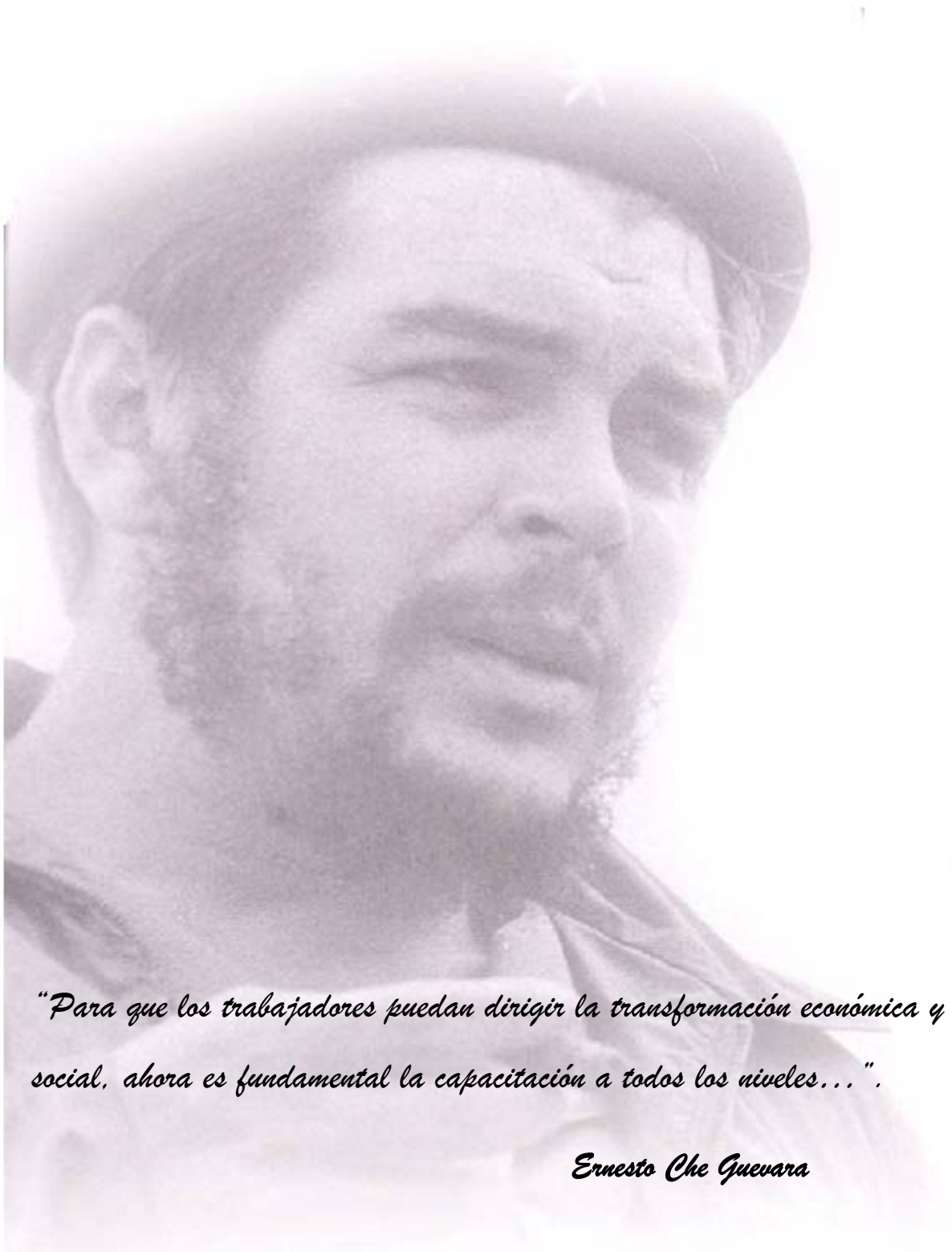
Yo: Efraín Camejo Lores, autor de este Trabajo de Diploma, y los tutores certificamos su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM) "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la facultad que estime conveniente.

Efraín Camejo Lores
Diplomante

Inst. Ing. Dannys Alfredo Berrío Landa
Tutor

Ing. Ramón Baquero Arias
Tutor

PENSAMIENTO



“Para que los trabajadores puedan dirigir la transformación económica y social, ahora es fundamental la capacitación a todos los niveles...”.

Ernesto Che Guevara

AGRADECIMIENTOS

A mis familiares más cercanos por su siempre incondicional ayuda.

A mi tutor, Ing. Dannys Alfredo Berrío Landa, por la atención prestada y la entrega con esta gran empresa

Al claustro de profesores del Departamento de Mecánica que tuve a lo largo de la carrera.

A mi novia y mis amistades por la ayuda brindada siempre.

A los compañeros del Departamento de Ingeniería y Proyecto de la Empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara" y en especial al Ing. Ramón Baquero Arias.

Y por último agradezco a la Revolución Cubana por darme la oportunidad de convertirme en un profesional.

DEDICATORIA

Dedicada especialmente a mí mamá, mí papá y mí hermana.

Dedicada al resto de mí familia, a mí novia y a mis amigos.

Dedicada a mí tutor y a todos los que confiaron y me dieron su apoyo.

RESUMEN

En el presente trabajo se efectuó la simulación computacional, mediante el software COSMOS Design STAR 4.5, del mecanismo cable-torque del sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado de la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara”. Para ello se utilizó una metodología de cálculo con lo que se determinaron los parámetros físicos y mecánicos de sedimentación y el sistema de accionamiento. Los resultados de las metodologías de cálculo permitieron analizar los principales parámetros para la simulación del mecanismo cable-torque por partes, estos resultados evidenciaron las diversas solicitaciones a las que están sometidas mencionadas partes, por lo que se pudieron verificar las tensiones, el esfuerzo, la deformación y el desplazamiento con las que opera este mecanismo y se propone, debido a los resultados obtenidos, un nuevo diseño para la disminuir y mejorar el rendimiento de estas solicitaciones. Se realizó un estudio de los costos de fabricación y de reparación del sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara. Estos oscilan entre 109 030.18 CUC y 833 005,87 respectivamente. Finalmente se realizó un análisis medioambiental donde se tuvo en cuenta el daño al que se expone el medio ambiente debido al vertimiento de desechos sólidos, líquidos y gaseosos por el sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado de la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara”.

ABSTRACT

In the present work, the computational simulation was made, by means of the software COSMOS Design STAR 4.5, of the mechanism cable-torque of the 120 A thickener of the Leaching and Laundry UEB of the "Comdte. Ernesto Che Guevara" company. For it a calculation methodology was used to determinate the physical and mechanics parameters of sedimentation mechanics and the actuator system were determined. The results of the calculation methodologies allowed to analyze the main parameters for the simulation of the cable-torque mechanism for parts, these results evidenced the diverse solicitations to that those mentioned parts are subjected, that's why the tensions, the efforts, the deformations and the displacement could be verified, due to the obtained results a new design for the to diminish and to improve the yield of these solicitations was proposed. It was carried out a study of the production and repair costs of the 120 A thickener the Leaching and Laundry UEB of the "Comdte. Ernesto Che Guevara" company. Those costs oscillate respectively between 109 030.18 CUC and 833 005,87. Finally, an environmental analysis was carried out where one kept in mind the damage to which the environment is exposed due to the spilling of solids wastes, liquids and gassy by the 120 A thickener of the Leaching and Laundry UEB at the "Comdte. Ernesto Che Guevara" company.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	5
1.1 Introducción	5
1.2 Estudios precedentes relacionados con los procesos de sedimentación	5
1.3 Tipos de Sedimentadores.....	10
1.3.1 Sedimentadores y decantadores estáticos	10
1.3.1.1 Criterios generales.....	10
1.3.2 Sedimentadores continuos.....	11
1.4 Zonas de un sedimentador	12
1.5 Procesos para la sedimentación.....	13
1.5.1 Sedimentación y nivel de descripción.	14
1.5.2 Sedimentación y grado de dispersión.	14
1.5.3 Caída libre o sedimentación individualizada.....	15
1.6 Descripción del proceso tecnológico UEB Lixiviación y Lavado	15
1.6.1 Separación entre el sólido y el licor dentro del sedimentador:	16
1.6.2 Accionamiento de los sedimentadores	17
1.6.3 Mecanismo de Accionamiento del SD 120 A.....	17
1.6.4 Instrucción para la explotación del sedimentador 120 A.....	18
1.7 Eficiencia en Sedimentadores	20
1.7.1 Sedimentadores cable torque	20
1.8 Simulación computacional de procesos industriales	21
1.8.1 El método de elementos Finitos.....	22
1.8.1.1 Principio de funcionamiento del método	23
1.9 Conclusiones del capítulo.....	23
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS APROPIADOS PARA LA SIMULACIÓN DE LOS BRAZOS DEL SISTEMA CABLE TORQUE	24
2.1 Introducción	24
2.2 Metodología para el diseño de sedimentadores	25
2.2.1 Cálculo y diseño de sedimentadores:.....	25

Efraín Camejo Lores

Simulación Computacional del sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”

2.2.2	Determinación del área mínima requerida para conseguir la clarificación.	25
2.2.3	Determinación del área mínima requerida para el espesamiento del sólido.	27
2.3	Cálculo del sistema de accionamiento según la capacidad de tracción o empuje	32
2.3.1	Determinación de la tensión estática (inicial)	32
2.3.2	Velocidad periférica	32
2.3.3	Distancia entre centros de poleas.....	33
2.3.4	Longitud de la correa.....	33
2.3.5	Verificación de los ciclos de flexión por segundo	34
2.3.6	Cálculo de la potencia nominal transmisible	34
2.3.7	Cantidad de correas	35
2.3.8	Cálculo de la vida útil de la correa	36
2.3.9	Según el Método de GoodYear	37
2.3.10	Coeficiente de empuje	39
2.4	Geometría básica del sedimentador.	39
2.5	Metodología secuencial para la simulación del comportamiento de los brazos.	40
2.5.1	Obtención de la geometría básica.....	40
2.5.2	Discretización de los elementos a simular	41
2.5.2.1	Brazo de Suspensión	41
2.5.2.2	Brazo de arrastre	41
2.5.3	Aplicación de cargas dinámicas al modelo.....	41
2.5.4	Separación en elementos finitos.....	42
2.6	Conclusiones del capítulo.....	42
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS		43
3.1	Introducción	43
3.2	Análisis de los resultados	43
3.2.1	Resultados del cálculo de los parámetros para la sedimentación	43
3.2.2	Resultados del cálculo de sistema de accionamiento	44
3.2.3	Resultados obtenidos en la simulación	45
3.2.3.1	Cuchillas raspadoras.....	45
3.2.3.2	Brazos de suspensión y de arrastre	46
3.3	Valoración económica	48

3.4	Impacto Medioambiental.....	51
3.5	Conclusiones del capítulo.....	52
CONCLUSIONES GENERALES		53
RECOMENDACIONES		54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		55
ANEXOS		

INTRODUCCIÓN

La producción minero metalúrgica es una actividad ardua que se lleva a cabo con complejas máquinas e instalaciones, generalmente de importación, costosas y de difícil adquisición, lo cual, al igual que los procesos, se caracteriza por ser grandes consumidores de energía en el país (Pérez, 1984).

La industria del níquel fue sometida durante el decenio de los años noventa a un amplio y profundo proceso de transformación productiva, tecnológicas y organizacionales, las cuales posibilitaron un amplio salto cualitativo y productivo de la misma, al tiempo que su efecto multiplicador hacia el resto de la economías e incrementó sustancialmente en el período referido.

Actualmente nuestro país se ha visto en la necesidad de actualizar su modelo económico con el objetivo de garantizar la continuidad e irreversibilidad del Socialismo, el desarrollo económico de la nación y la elevación del nivel de vida de la población. Para ello se aprobaron los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución entre los que se destacan los relacionados con la política industrial.

La aplicación adecuada de los medios de producción y de eficientes procesos tecnológicos que incrementen la producción, disminuyan costos, permiten crear condiciones seguras para el trabajo de los obreros y garantizan el aprovechamiento racional de los recursos minerales y energéticos. La industria cubana del níquel constituye una de las posibilidades concretas para el desarrollo económico del país y en las condiciones del mercado actual cobra importancia tanto en su volumen, como su costo.

El esquema tecnológico de la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” está basado en el esquema hidrometalúrgico de lixiviación carbonato-amoniaco o proceso CARON para la obtención de concentrados de Níquel y Cobalto (Ni + Co) a partir del mineral reducido (material laterítico). La cual confronta dificultades prácticas de bajas eficiencias y operatividad lo cual determina en gran medida su estabilidad y costos de producción.

La decisión de utilizar el proceso de lixiviación carbonato-amoniaco en la empresa se explica por las ventajas propias de esta tecnología. Es un proceso continuo que se realiza en las condiciones de presión atmosféricas. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencillez y amplia utilización de los aparatos conocidos (hornos de soleras múltiples, sedimentadores o espesadores, columnas de destilación, etc.). Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. El complejo minero-metalúrgico del níquel de la empresa está compuesto por catorce entidades. En este trabajo se trabaja en una de ellas, la Unidad Empresarial de Base Lixiviación y Lavado, donde existen diferentes equipos electromecánicos que utilizan mecanismos agitadores para mantener flujos en movimiento y evitar incrustaciones en paredes de tanques o depósitos.

La UEB¹ Lixiviación y Lavado de la mencionada empresa cuenta con 19 sedimentadores de ellos nueve de Lixiviación. El sistema de arrastre presente en uno de ellos, el sedimentador² 120 A, de fabricación soviética; cuenta con un conjunto de brazos encargados de arrastrar las cuchillas. Estos sedimentadores se utilizan para lixiviar el mineral reducido proveniente de la UEB Hornos de Reducción; que cumplen la importante función de espesar las pulpas y clarificar el licor, o sea ocurre una separación entre el licor lixiviado y los sólidos, ricos en níquel y cobalto (pulpa sedimentada). Los sólidos sedimentan formando una pulpa espesa que es movida hacia el centro por los brazos del accionamiento electromecánico, que giran a una velocidad de 0,015 rev/min tardando 18 minutos en dar una vuelta completa.

La fuente de movimiento la proporciona un pequeño motor de 5,5 kW que alimenta a un reductor potente que, mediante poleas, hace girar el eje central del tanque que es donde se encuentra los brazos.

Entre las tareas priorizadas está el mejoramiento de la posición de la industria del níquel en los mercados, mediante el incremento de la producción, elevación de la

1 Unidad Empresarial de Base.

2 SD. Sedimentador
Efraín Camejo Lores

calidad de sus productos y reducción de los costos, logrando una mejor utilización de los recursos minerales y mejorar la reparación y el mantenimiento de las instalaciones industriales, de acuerdo con el programa aprobado.

La producción de níquel representa una de las mayores posibilidades para el desarrollo de la economía cubana, ya que su precio tiene gran auge en el mercado internacional. La Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara, de Moa, figura entre las fábricas niquelíferas de mayor tradición con un peso importante en el aporte económico al país.

Situación problemática

La excesiva densidad del licor lixiviado en el sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara y las cargas continuas a las que están sometidos los brazos del mencionado sedimentador genera una fuerza excesivamente grande en las paradas y arranques del sistema de rotación. Esto da al traste con la rotura frecuente de los brazos. Las roturas señaladas implican la salida de funcionamiento del sedimentador y por consecuencia disminución de los parámetros de eficiencia de la UEB.

De lo anterior se infiere como **Problema de la Investigación:**

La disminución de los parámetros de eficiencia de la UEB debido a pérdidas por roturas de brazos.

Como **Objeto de Estudio** se plantea:

Sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara

Y su **Campo de Acción** es:

Evaluación de sistemas de elevación y arrastre de brazos de sedimentadores.

Se define como **Objetivo General:**

Simular mediante el Método de Elementos Finitos el sistema de cable-torque de dos brazos de arrastre del sedimentador 120 A de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara.

A partir del objetivo general declarado se establece la siguiente **Hipótesis**:

El cálculo de los parámetros del sistema de accionamiento y la simulación computacional del comportamiento del sistema cable torque del sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado de la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara”, permitirá establecer las condiciones óptimas para el aumento de la productividad.

Objeto de estudio

Sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara

Para dar cumplimiento al objetivo general se declaran como **Objetivos específicos**

- ✓ Desarrollar el marco teórico necesario para la simulación computacional de sistemas cable-torque
- ✓ Verificar las características mecánicas necesarias de los sistemas de agitación por cable torque
- ✓ Simular mediante el Método de Elementos Finitos el sistema objeto de estudio

Para dar cumplimiento de los objetivos específicos se desarrollan las siguientes **Tareas**

- ✓ Actualizar el estado del arte con relación a la temática estudiada
- ✓ Establecer las características mecánicas del accionamiento del sistema cable-torque
- ✓ Calcular los parámetros mecánicos del sistema cable-torque
- ✓ Simular mediante Método de Elementos Finitos el sistema cable-torque

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1 Introducción

Cuando se hace un estudio es de vital importancia conocer hasta dónde ha llegado la humanidad en la temática analizada, ello permitirá aprovechar de manera eficiente los conocimientos heredados generación tras generación, evitando así arribar a conclusiones erróneas según nuestros puntos de vista de hechos y cuestiones analizadas por otros autores.

El marco teórico del objeto de estudio, permite adentrarnos de forma preliminar, a las diferentes características, deficiencias y objetivos que existen en las investigaciones realizadas, las teorías existentes de los múltiples elementos que están presentes. Así como que nos da una reseña de lo que queremos estudiar y nos introduce en la investigación por lo que se consulta diversas bibliografías.

A continuación se realizará un análisis de los distintos aspectos relacionados con el tema expuesto en la bibliografía consultada, con la finalidad de disponer de los elementos básicos y las tendencias actuales que resulten esenciales para el correcto desarrollo del trabajo

Este capítulo tiene como **objetivo**:

Establecer el estado del arte, a partir de la revisión bibliográfica relacionada al tema de la investigación.

1.2 Estudios precedentes relacionados con los procesos de sedimentación

La sedimentación está enmarcada dentro de los procesos gravitacionales, sujeto a consideraciones teóricas con carácter de hipótesis. Se encontraron un grupo nutrido de investigaciones teóricas encaminadas a describir el comportamiento de la velocidad de sedimentación, y se han determinado dos direcciones científicas sobre la velocidad de desplazamiento de los granos o partículas; la determinista y la probabilística estadística (Beyris, 1997).

Se han llevado a cabo numerosos intentos para predecir la velocidad aparente de sedimentación de una suspensión concentrada. Robinsón (1926), estudió el efecto de diversos factores en la velocidad de sedimentación de suspensiones concentradas y sugirió una modificación de la ley de Stokes, ecuación (1.2), y utilizando la densidad (ρ_c) y la viscosidad (μ_c) de la suspensión en lugar de las propiedades del fluido, de esta manera:

$$V_{sed} = \frac{kd^2(\rho_s - \rho_c)g}{\mu_c} \quad (1.2)$$

Donde:

k - es una constante:

Robinsón determinó experimentalmente la viscosidad (μ_c) de la suspensión, pero puede obtenerse de forma aproximada por la siguiente ecuación de Einstein (1906).

$$\mu_c = \mu(1 + kC) \quad (1.3)$$

Donde:

k – es una constante para una forma dada de una partícula (2,5 para esferas).

C – es la concentración volumétrica de partículas,

μ – es la viscosidad del fluido.

La ecuación de Einstein es válida para valores de C hasta 0,02, para suspensiones más concentradas, Vand (1948) en su tratado sobre la viscosidad de soluciones y suspensiones sugiere la siguiente expresión:

$$\mu_c = \mu^{\frac{kc}{1-aC}} \quad (1.4)$$

Donde: a – constante, igual a 0,61 para las esferas.

En suspensiones finas, COE y Clevenger (1916), en su investigación sobre la viscosidad en tanques, estudiaron la sedimentación de pulpa procedente de la industria metalúrgica, llegando a la conclusión que una suspensión de partículas concentradas puede sedimentar en una de las dos formas siguientes:

Después de un breve periodo de aceleración inicial, la interface entre el líquido claro y la suspensión se desplaza hacia abajo con velocidad constante, formándose una capa de sedimento en el fondo del recipiente. Cuando la interfaces se ha aproxima a la capa de sedimento la velocidad a la que desciende disminuye hasta alcanzar el “punto crítico de sedimentación”, cuando se forma una interface directamente en el sedimento y el líquido claro.

Una segunda modalidad de sedimentación, menos corriente, es la que se obtiene cuando una gama de tamaño de las partículas es muy grande. La velocidad de sedimentación disminuye progresivamente durante toda la operación, sin existir ninguna zona de composición constante y extendiéndose la zona de compresión desde la interface superior hasta la capa de sedimento.

Las principales razones de la modificación de la velocidad de sedimentación de las partículas en una suspensión concentrada son las siguientes:

- Las partículas grandes sedimentan con relación a una suspensión de partículas más pequeñas, por lo que la densidad efectiva y la viscosidad del fluido aumentan.
- La velocidad ascendente del fluido desplazado durante la sedimentación es notable en una suspensión concentrada, y la velocidad aparente de sedimentación es menor que la velocidad real relativa al fluido.
- Los gradientes de velocidad en el fluido cercano a las partículas aumentan como resultado del cambio en el área y en forma de los espacios de flujo.
- Las partículas más pequeñas tienden a ser arrastradas hacia abajo por el movimiento de las partículas, experimentando por tanto una aceleración.

- Como en una suspensión concentrada las partículas se encuentran más juntas, la floculación es más acentuada en un disolvente ionizado, aumentando el tamaño efectivo de las partículas pequeñas.

Steinour (1944), obtuvo la expresión de la velocidad de la partícula con relación al fluido en su estudio de la tasa de sedimentación de pequeñas partículas uniformes, adoptando un enfoque similar, utilizando la viscosidad del fluido, la densidad de la suspensión y una función de la porosidad de la suspensión para tener en cuenta de los espacios de flujo:

$$V_p = \frac{d^2(\rho_s - \rho_c)g}{18\mu} f(e) \quad (1.3.1)$$

Consecutivamente, la fracción del área disponible para un flujo del fluido desplazado es e (porosidad de la suspensión), su velocidad ascendente es $V_{sed} (1e)/e$. de manera que la ecuación (1.6) se puede expresar de la siguiente forma:

$$V_p = V_{sed} + V_{sed} \frac{1-e}{e} = \frac{V_{sed}}{e} \quad (1.3.2)$$

Steinour a partir sus experimentos de sedimentación de tapioca en aceite, obtuvo la expresión una función de la porosidad de la suspensión, de esta manera:

$$f(e) = 10^{-1,82(1-e)} \quad (1.3.3)$$

Hawks ley (1950), en su investigación sobre el efecto de la concentración en el establecimiento de suspensiones y flujo a través de medios porosos también utilizó un método parecido y obtuvo la expresión.

$$v_p = \frac{v_{sed}}{e} = \frac{d^2(\rho_s - \rho_c)g}{18\mu} \quad (1.3.4)$$

En los casos anteriores se ha supuesto correctamente que el empuje ascendente que actúa sobre las partículas está determinado más por la densidad de la suspensión que

por la del fluido. La utilización de una viscosidad efectiva, sin embargo, es válida únicamente para una partícula que sedimenta en una suspensión fina. En la sedimentación de partículas uniformes, el aumento del rozamiento puede atribuirse a los pronunciados gradientes de velocidad más que a un cambio en la viscosidad.

La velocidad de sedimentación de partículas finas resulta difícil de predecir debido al gran número de factores que implica.

Para el caso de suspensiones gruesas, durante la sedimentación de partículas relativamente grandes en presencia de pequeñas (100 o más veces mayores que otras) puede considerarse que las primeras caen en una suspensión o sea, se considera el líquido con una determinada densidad y viscosidad determinada por las partículas pequeñas que le comunican sus propiedades.

Richardson y Zaki (1954) en su estudio de la sedimentación de partículas uniformes ($>100 \mu\text{m}$), suficientemente grande para que los efectos viscosos anómalos y floculación pueden ser despreciables, utilizaron datos sobre sedimentación y fluidización para establecer los efectos de la concentración y de las paredes del recipiente sobre las velocidades de sedimentación, obteniendo la ecuación de la velocidad de sedimentación en función de la velocidad de las partículas relativas al fluido por:

$$\frac{v_{sed}}{v_i} = e^n \quad (1.4.1)$$

La velocidad de caída de las partículas grandes en la suspensión no estructurada se puede determinar aproximadamente según las investigaciones del Instituto Mejano por:

$$v_{sed} = v_{ct} \frac{(\rho_s - \rho_p)}{\rho_s - \rho_p} \frac{\rho_m}{\rho_m} \quad (1.4.2)$$

Donde:

V_{ct} : - velocidad de caída contrariada: m/s

ρ_s - densidad el sólido; kg/m³

ρ_p - densidad de la pulpa: kg/m³

ρ_m - densidad de la pulpa compuesta solo de aquellas partículas cuya velocidad se determinas por la concentración volumétrica de las partículas en suspensión. kg/m³.

1.3 Tipos de Sedimentadores

La sedimentación o la decantación se realizan en reactores denominados sedimentadores o decantadores, de acuerdo con el tipo de partícula que se remueva en cada unidad. La clasificación más recomendable es la siguiente:

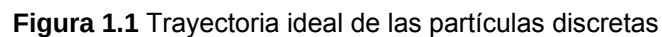
- Sedimentadores o decantadores estáticos
- Decantadores dinámicos o continuos
- Decantadores laminares.

A continuación se analizarán las diversas unidades

1.3.1 Sedimentadores y decantadores estáticos

1.3.1.1 Criterios generales

En este tipo de unidades puede producirse sedimentación o decantación, normalmente con caída libre, en régimen laminar turbulento o de transición. En estas unidades la masa líquida se traslada de un punto a otro con movimiento uniforme y velocidad V_H constante. Cualquier partícula que se encuentre en suspensión en el líquido en movimiento, se moverá según la resultante de dos velocidades componentes: la velocidad horizontal del líquido (V_H) y su propia velocidad de sedimentación (V_S). Véase la figura 1.



Este criterio sirve exclusivamente para explicar la teoría básica de la clarificación y es útil para diseñar ciertos tipos de sedimentadores.

El diseño de un sedimentador continuo puede realizarse a partir de los datos obtenidos en experimentos discontinuos. La sedimentación continua se realiza industrialmente en

tanques cilíndricos a los que se alimenta constantemente la suspensión inicial con un caudal inicial Q_0 y una concentración inicial C_0 (figura 3). Por la parte inferior se extrae un lodo con un caudal Q_u y una concentración C_u , normalmente con ayuda de rastrillos giratorios, y por la parte superior del sedimentador continuo se obtiene un líquido claro que sobrenada las zonas de clarificación (A), sedimentación (B-C) y compresión (D) que pueden distinguirse en la figura 2. En un sedimentador continuo, estas tres zonas permanecen estacionarias

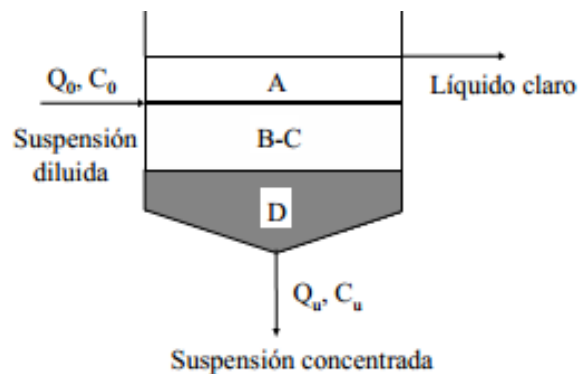


Figura 1.2 Zonas de un sedimentador continuo

1.4 Zonas de un sedimentador

Una unidad de sedimentación consta de las siguientes zonas, con diferentes funciones específicas:

- ✓ Zona de entrada y distribución de agua
- ✓ Zona de sedimentación propiamente dicha
- ✓ Zona de salida o recolección de agua
- ✓ Zona de depósito de lodos.

1.5 Procesos para la sedimentación

La sedimentación es una operación unitaria consistente en la separación por la acción de la gravedad de las fases sólida y líquida de una suspensión diluida para obtener una suspensión concentrada y un líquido claro.

Se pueden distinguir dos tipos de sedimentación, atendiendo al movimiento de las partículas que sedimentan:

- ✓ **Sedimentación libre:** se produce en suspensiones de baja concentración de sólidos. La interacción entre partículas puede considerarse despreciable, por lo que sedimentan a su velocidad de caída libre en el fluido.
- ✓ **Sedimentación por zonas:** se observa en la sedimentación de suspensiones concentradas. Las interacciones entre las partículas son importantes, alcanzándose velocidades de sedimentación menores que en la sedimentación libre. La sedimentación se encuentra retardada o impedida. Dentro del sedimentador se desarrollan varias zonas, caracterizadas por diferente concentración de sólidos y, por lo tanto, diferente velocidad de sedimentación.

Dependiendo de cómo se realice la operación, la sedimentación puede clasificarse en los siguientes tipos:

- ✓ **Sedimentación intermitente:** el flujo volumétrico total de materia fuera del sistema es nulo, transcurre en régimen no estacionario. Este tipo de sedimentación es la que tiene lugar en una probeta de laboratorio, donde la suspensión se deja reposar.
- ✓ **Sedimentación continua:** la suspensión diluida se alimenta continuamente y se separa en un líquido claro y una segunda suspensión de mayor concentración. Transcurre en régimen estacionario.

1.5.1 Sedimentación y nivel de descripción.

Si la sedimentación es un caso particular del flujo relativo de cuerpos sumergidos, este es, a su vez, un caso particular del flujo multifásico con transporte viscoso. Aunque es bien notorio para los amables lectores que recuerdan o están acostumbrados a estos fenómenos, cabe reiterar que la sedimentación es una operación basada en el transporte molecular de energía mecánica entre fase con distinta movilidad, y que el desplazamiento macroscópico no molecular de materia de una región a otra es una consecuencia de este fenómeno substancial y primario.

En el mismo nivel de descripción, la fenomenología de la sedimentación está relacionada con la de las demás operaciones basadas en la actuación simultánea o dominante de fuerzas, como es el caso de la centrifugación o de la impactación también en el campo mecánico o la electro-migración en presencia de campos electromagnéticos. En un nivel de descripción más profundo (partículas de tamaño coloidal e inferior) las fuerzas mecánicas son del orden de magnitud, o inferiores, a las fuerzas electromagnéticas que condicionan las interacciones moleculares, por lo que los modelos que describen la movilidad de partículas enlazan los meramente hidrodinámicos con los difusionales, pasando por los modelos que describen los fenómenos forétricos.

1.5.2 Sedimentación y grado de dispersión.

Las condiciones de flujo y la concentración las principales determinantes de la fenomenología de la sedimentación, la importancia de la concentración es más perceptible en el desarrollo de modelos, puesto que el concepto de flujo relativo permite unificar, por simetría fenomenológica, el tratamiento de situaciones tan diferentes en la práctica como el arrete, la fluidización o la propia sedimentación, así como el espesamiento y el flujo a través de lechos porosos.

1.5.3 Caída libre o sedimentación individualizada.

Las partículas sedimentadas dependiendo de una fuerza uniforme impulsora, la cual es el peso excluido de empuje accesimal por flotación, equilibrada con la resultante activa de fuerzas de rozamiento de superficies y forma que dependen del movimiento relativo respecto del fluido.

Este modo de sedimentación, descrito en sus elementos básicos, se da en los clarificadores de cabecera, como es en el caso de los desarenadores en el tratamiento de aguas.

Sedimentación coalescente o difusa: Las partículas interfieren entre ellas, y la velocidad de sedimentación depende de varios factores más (grado de agregación, y concentración tamaños y características superficiales de las partículas). Este modo se da en la sedimentación primaria.

Sedimentación masiva o impedida, de flujo de pistón: Las partículas interaccionan entre ellas de tal forma que sus posiciones se mantienen prácticamente fijas, unas con respecto a las otras, sedimentando el conjunto en forma de enjambre, con una velocidad global que algunos modelos suponen idéntica para todas las partículas. Este modo, descrito en sus elementos básicos, se da en los sedimentadores secundarios.

Sedimentación en comprensión o espesamiento: La interacción entre las partículas es total, las partículas no solo son soportadas de forma hidráulica, sino que en parte son soportadas por otras partículas, por lo que se producen reducciones de volumen debidas a la evacuación del fluido. Este modo se evidencia en la fase de sedimento de sedimentadores.

1.6 Descripción del proceso tecnológico UEB Lixiviación y Lavado

Las funciones fundamentales de esta planta son las de lixiviación del níquel y cobalto del mineral reducido en la UEB Hornos de Reducción, lavar las pulpas lixiviadas para recuperar el níquel disuelto, y enviar el licor producto rico en níquel y el sólido de cola a

la planta de recuperación de amoníaco donde se recupera el amoníaco y el dióxido de carbono para ser utilizado en el proceso nuevamente.

El proceso de sedimentación consiste en separar y obtener mediante el uso de un disolvente los componentes o elemento de una mezcla que sea soluble en dicho disolvente. Que en el casos del níquel y del cobalto del mineral reducido, se emplea una mezcla de hidróxido y carbono de amonio y como agente extrayente el oxígeno, el cual se le inyecta a la pulpa mediante aire de baja presión en los turboaeradores.

Dentro de la UEB de Lixiviación y Lavado encontramos varios sedimentadores, siendo el sedimentador uno de los equipos de la UEB de Lixiviación y Lavado de carácter muy importante. Es el proceso de separación de la parte sólida de la pulpa como resultado del precipitado de las partículas sólidas la acción de la fuerza de la gravedad, obteniéndose sedimento compacto con una alta densidad un líquido que rebosa (licor de reboso).

El sedimentador a tratar cuenta con una capacidad de $10\,000\text{ m}^3$. Posee un diámetro de 50 m y una altura de 5 m. Consta de una cercha central que tiene 2 brazos que tienen como función arrastrar la pulpa hacia el cono y distribuir la carga uniformemente. En la tabla aparecen las principales especificaciones tecnológicas de los tanques sedimentadores.

Tabla 1.1 Especificaciones tecnológicas de los tanques sedimentadores.

Especificación	Simbología	U/M	Valor
Área de sedimentación	A	m ²	1950
Altura	h	m	5.0

1.6.1 Separación entre el sólido y el licor dentro del sedimentador:

La rapidez en la separación de la fase sólida de la líquida contenida en la pulpa de entrada al sedimentador, viene dada por la velocidad de sedimentación que tengan las partículas; para lograr estos objetivos se instala en la línea de alimentación de la pulpa electroimanes, los cuales ejercen su influencia a la pulpa dada las características

magnéticas de éstas. Se incrementa la velocidad de sedimentación y por ende la separación entre el licor y el mineral.

1.6.2 Accionamiento de los sedimentadores

El mecanismo central es accionado por una unidad de accionamiento, siendo esas unidades accionadas por motor eléctrico A 02-51-6T de 5.5 kW que alimenta a un reductor muy potente (reductor cilíndrico, tipo –2Y-200-16-22 Y2 con una relación de transmisión de 71 y reductor tornillo sinfín con una relación de transmisión de 11.69) que, mediante una transmisión por correas, hace girar la cercha central en la cual se encuentran ubicados los brazos.

La causa mayor de las paradas lo constituye la rotura o flexión de las poleas, lo que puede ser corregido muy rápido si se detecta la avería rápidamente. El motor continuará moviéndose como si hubiera avería alguna y por tanto, de no detectarse a tiempo, puede solidificarse todo el mineral en el interior del tanque, con malas consecuencias para el proceso productivo, la reparación del tanque, el medio ambiente, etc.

1.6.3 Mecanismo de Accionamiento del SD 120 A

El dimensionado básico basado en pruebas y en la previa experiencia industrial determinó que el factor K recomendado era igual a 40. Esto corresponde a un torque de 1 100 000 lb·p ó 1 491 000 N·m.

Para el accionamiento de la corona deberán ser previstos de 2 a 4 reductores con motor eléctrico, de acuerdo con la especificación 0125-E11-0600-001, gemelos, con velocidad variable por medio de inversor de frecuencia.

La rotación prevista es de 3,5 rev/hr debiendo ser considerada la posibilidad de variación de 2,5 a 4,5 rev/hr. El accionamiento deberá tener control de torque, que actuará sobre un sistema de levantamiento que permitirá elevar los brazos raspadores por lo menos 600mm.

La pulpa que llega de la lixiviación alimenta el sedimentador 120 A, que posee un mecanismo con raspador cuyo objeto es promover la separación de las fases sólidas y líquidas del efluente. El tiempo de residencia en el sedimentador 120 A será de 214 minutos (3h 34min.).

El sedimentador posee tres motores; siendo dos motores para rotación de las palas, comandados por un inversor de frecuencia (ST-120-A) y un motor para levantamiento de las mismas comandado por un relé inteligente; posibilitando así un mejor ajuste en la operación frente a las diferencias de composición del efluente, así como también un conjunto de dispositivos de protección funcional localizado en su panel de comando.

El sedimentador posee un transmisor de posición (ZE-120-A) de las palas que envía pulsos al PLC indicando la elevación de las mismas, conteniendo adicionalmente dos llaves de fin curso para indicación de alarmas de posición baja/alta de levantamiento de las palas.

También en el sedimentador están previstos: sistema de torque con 3 celdas de carga (WE/WIT-120-A-1/2/3) con tres llaves para indicación de alarmas de torque bajo / alto / mucho alto de la rotación de las palas; un sensor de “cero-speed” que impide el accionamiento de los motores; y un medidor de nivel de interface (LT-120-A) para indicación en la sala de control con alarmas de interface alta/muy alta.

Están previstos tres paneles para el accionamiento de este mecanismo PN-SD-120-A situado en la “caseta 2” y responsable por la partida local/remota del panel. PC-SD-120-A situado no pasadizo próximo del accionamiento del sedimentador 120 A y que irá enviar las señales al PLC hacer las maniobras vía remota. Y el PI-SD-120-A que será el panel donde estarán instalados los instrumentos del sedimentador citados arriba.

1.6.4 Instrucción para la explotación del sedimentador 120 A.

El sedimentador 120 A tiene como función sedimentar los sólidos que se encuentran en la pulpa después que ésta ha sido lixiviada en una disolución carbonato amoniacal.

Para el aseguramiento de un trabajo efectivo y sin averías, es necesario cumplir con las siguientes medidas:

- El arranque del sedimentador se realiza de acuerdo a las instrucciones tecnológicas.
- El trabajo en los sedimentadores lo debe realizar el personal que ha pasado los estudios correspondientes de la enseñanza sobre el programa de trabajo de los sedimentadores.
- Antes de arrancar el sedimentador comprobar:
 - Existencia de lubricantes en los reductores, en la transmisión abierta y en los cojinetes de empuje y apoyo.
 - Que no encuentren objetos ajenos al proceso tecnológico en el tanque.
 - La existencia y el estado de la cerca.
 - Existencia y buen estado de la iluminación.
 - La capacidad de trabajo de la señalización acústica y por luces.
 - La capacidad de trabajo del dispositivo de control de los rastrillos.
 - Existencia de líquido en el cierre hidráulico.
 - El ajuste de la polea acoplamiento (coupling)
- En el tiempo que el sedimentador está operando, es necesario cumplir las siguientes exigencias:
 - Cumplir con todas las exigencias de las instrucciones tecnológicas.
 - Comprobar que no haya calentamiento, ruido y vibraciones en los cojinetes, motoras y reductoras.
 - Revisar el accionamiento de los interruptores de la instalación para el control de la rotación de los rodillos.
 - Revisar periódicamente la regulación de la polea de embrague.
 - Realizar la lubricación de las diferentes partes de los mandos del sedimentador de acuerdo con la carta de lubricación.
 - Para eliminar el posible escape de gas al medio ambiente, revisar el cierre hidráulico y si es necesario rellenarlo con agua.
 - En los turnos de noche velar por la capacidad de trabajo de la iluminación

periférica para que el servicio del sedimentador se realice sin peligros.

- Sobre el mal estado del sedimentador se le informará al jefe de turno y se toman las medidas para su eliminación.
- El paro del sedimentador se realiza de acuerdo a las instrucciones tecnológicas.

1.7 Eficiencia en Sedimentadores

La eficiencia de absorción de O_2 en los Turboaeradores es de un 30 a 40 % en la primera etapa de sedimentación y de 25 a 35 % en la segunda. El % de Ni lixiviado por etapas es de 72 % en la primera etapa y de 7 % en la <segunda. Por su parte el porcentaje de níquel lavado es de 79.8%.

La eficiencia de lavado calculada con 3 etapas de lixiviación, 5 etapas de lavado menor de 99.55 % habiéndose tomado para los cálculos como eficiencia operativa. La evaporación de amoníaco en los sedimentadores se calculó considerando su definición en el aire a las distintas temperaturas en los sedimentadores, ignorándose el efecto del carbonato de amonio y los iones complejos de Ni y Co en solución, por lo que puede considerarse una cifra estimada dentro de un rango de exactitud. La concentración de amoníaco en los gases de salida (saturada) de los turboaeradores es de 12,5 % en volumen (base húmeda). El calor específico del licor de contacto y licor producto, se tomó como 1kcal/kg°C.

1.7.1 Sedimentadores cable torque

Los sedimentadores cable torque poseen el mismo rendimiento antes mencionado, pero tienen una ventaja que los convierte desde un punto de vista más eficientes, la cual es la gran maniobrabilidad mecánica que presenta, la cual los hace romperse menos y ser reparados más rápido que los otros. Los sedimentadores que utilizan la tecnología cable-torque poseen ciertas ventajas respecto a los rusos, brasileños y alemanes:

- Mejor rendimiento
- Mayor facilidad de fabricación
- Mayor facilidad de montaje y desmontaje
- Más fiables en casos de averías

- Menos costos de reparación
- Menos agregados
- Mejor mantenimiento y reparación.

1.8 Simulación computacional de procesos industriales

Existen en el mercado de los sistemas computacionales diversos tipos de software de simulación, tanto para la simulación discreta como continua. Entre los de simulación de procesos se destacan Promodel y Arena para la simulación discreta, y en la simulación continua resalta el MATLAB³ con Simulink; National Instrument contribuye con LabView⁴ y Swanson Analysis Systems asiste con el ANSYS⁵. Los mencionados softwares son preferidos por los ingenieros de diseño, control, mecatrónica, mecánica, aeronáutica, entre otros. En cuanto a software libre, Scilab y Xcos son la mejor opción, por una parte, por su similitud con MATLAB, de Simulink, y por otra por el soporte que proporciona el consorcio Scilab y Digiteo. Además la disponibilidad y facilidad para acceder a su uso así como el que sea libre y gratuito, dan la oportunidad de incursionar en el campo de la simulación discreta o continua con Scilab.

Un gran campo de aplicación de la simulación se encuentra en los procesos industriales y en el estudio académico de tales procesos. No se trata de la simulación de sistemas estoicos, también de la simulación dinámica de procesos continuos como los que existen en la industria química y alimentaria. Esta es la parte que interesa en esta investigación. Modelar tales procesos puede resultar muy complicado, y tal complicación puede llegar a hacer que la simulación resulte más costosa incluso que ciertos tipos de instalaciones. De aquí se desprende la pregunta ¿por qué simular? En primera instancia, con la computación y su estado actual, resulta accesible para instituciones académicas y pequeñas empresas realizar simulación con propósitos de

³ MATLAB. Abreviatura de MATrix LABoratory, "Laboratorio de Matrices". Disponible para las plataformas Unix, Windows y Mac OS X

⁴ LabVIEW. Herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación

⁵ ANSYS desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real.

optimización de recursos, estudios de diseños, adiestramiento de personal y se ahorra en adquisición de equipo.

1.8.1 El método de elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos⁶ es un método de cálculo numérico basado en ecuaciones diferenciales para resolver problemas relacionados con la ingeniería. Este método ha sido aplicado con notable éxito a prácticamente cualquier área de la ciencia e ingeniería como son: problemas de estructuras, mecánica de fluidos, propagación de ondas, problemas de conducción de calor, procesos de difusión-convección, procesos de reacción-difusión y problemas de campos electromagnéticos, permitiendo simular y realizar gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejos, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

Dicho método tiene un número significativos de ventajas que lo han hecho muy difundidos, estas incluyen la capacidad de modelar cuerpos con formas complejas y manipular condiciones de carga generales con relativa facilidad; además de modelar cuerpos complejos de diferentes materiales debido a que las ecuaciones de elementos son evaluadas individualmente. También manipular un ilimitado número y tipos de condiciones de fronteras, variar las dimensiones de los elementos y usar elementos pequeños donde sea necesario. Es fácil y barato alterar el modelo de elementos finitos y se pueden incluir efectos dinámicos. Además soluciona problemas de no linealidad del material y geométrica con grandes deformaciones y rotación con una mejor facilidad de implementación en un programa computacional.

La utilización del método de elementos finitos para el caso de los brazos del sedimentador, se realiza con el objetivo de determinar aquellas zonas donde las tensiones locales pudieran ser mayores, para prevenir una futura rotura de los mismos y darles la mayor confiabilidad de trabajo.

⁶ Método de Elementos Finitos. Por sus siglas en español MEF

1.8.1.1 Principio de funcionamiento del método

Para aplicar del MEF se sigue una secuencia de paso lógicos que permite el análisis de cada uno de los elementos que se desea simular:

1. Discretización y selección de la función de interpolación para la incógnita
2. Obtención de las matrices de respuestas de los elementos finitos y ensamblaje de las matrices de los elementos finitos.
3. Obtención de la matriz de comportamiento del modelo completo, la resolución y obtención de resultados.

1.9 Conclusiones del capítulo

- El análisis bibliográfico permitió conocer las características principales del funcionamiento del sedimentador 120 A ubicado en la UEB de Lixiviación y Lavado, así como la clasificación de dichas máquinas.
- Quedaron expuestos los aspectos generales sobre los softwares de simulación, principalmente los que usan el Método de Elementos Finitos para la obtención de comportamientos.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS APROPIADOS PARA LA SIMULACIÓN DE LOS BRAZOS DEL SISTEMA CABLE TORQUE

2.1 Introducción

El objeto de la ingeniería es proveer a la sociedad de los requisitos que la civilización contemporánea exige; es el camino por el que los recursos naturales se transforman satisfactores sociales. A la ingeniería no le concierne el análisis de los fenómenos naturales y el establecimiento de modelos matemáticos para los mismos, lo cual es labor de la ciencia pura, sino su aplicación en la consecuencia de una meta definida, sea esta una máquina, un dispositivo eléctrico o electrónico, una carretera o cualquier otro bien.

En los momentos actuales para el desarrollo económico del país se requiere de un incremento productivo en la producción de níquel en nuestra empresa estatal socialista, basado en la puesta en explotación de modo racional de todos los equipos con que se cuenta.

Para el desarrollo de toda investigación se necesita herramientas para poder arribar a buenos resultados. La correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos, y es por eso que resulta indispensable el desarrollo de métodos adecuados de evaluación y toma de decisiones

Este capítulo tiene como **objetivo**:

Establecer métodos y procedimientos de cálculos para predecir el comportamiento de los parámetros fundamentales del sedimentador 120A de la UEB⁷ de Lixiviación y Lavado de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara.

⁷ UEB: Unidad Empresarial de Base

2.2 Metodología para el diseño de sedimentadores

2.2.1 Cálculo y diseño de sedimentadores:

El parámetro de diseño más importante para un tanque de sedimentación es el área del sedimentador. El tiempo de retención y la longitud de las canaletas o colectores del efluente son también relevantes. Estos parámetros deben definirse a partir de pruebas de laboratorio para una muestra de agua en particular. En ausencia de datos experimentales y para aguas "estándar o promedio" los valores de diseño están dentro del siguiente rango.

Sedimentador primario:

Tiempo de Retención:	1.5 a 2.5 horas
Relación Gasto/Área:	800-1200 gal/ft ² ×d (30-50 mt ³ /mt ² ×d)
Flujo en Canaletas:	20,000 gal/ft × d (250 mt ³ / t× d)

Tanque circular:	Rango	Promedio
Profundidad:	3.0-4.5 m	3.5 m
Diámetro:	3-60 m	12-45 m
Velocidad del Rastrillo:	0.02- 0.05 rev/min	0.03 rev/min

2.2.2 Determinación del área mínima requerida para conseguir la clarificación.

El área mínima requerida A_c para la clarificación depende de la velocidad V_s para la que las partículas en suspensión sedimentan antes de alcanzar la concentración crítica interfacial X_c . En condiciones de caudal constante, la velocidad del clarificado que rebosa por la parte superior del sedimentador, o vertedero, no debe exceder de V_s si se desea evitar el arrastre de las partículas y la clarificación.

Por lo tanto, el área mínima requerida para la clarificación A_c puede calcularse a partir de la expresión:

$$A_c = \frac{Q_e}{V_s} \quad (2.1)$$

Donde Q_e es el caudal (m^3/s), V_s es la velocidad de sedimentación por zonas (m/s) y A_c el área mínima requerida para la clarificación (m^2).

El valor de la velocidad de sedimentación en la zona de sedimentación libre, V_s , puede calcularse a partir de la pendiente de la tangente de dicha zona de las curvas de sedimentación, tal y como se muestra en la (figura 1). El valor de t se puede leer como la velocidad a la cual las partículas en suspensión sedimentan antes de alcanzar la concentración crítica X_c y viene dada por la pendiente de la tangente AB de la curva correspondiente a la concentración inicial X_0 :

$$V_s = \frac{OA}{OB} = \frac{HO}{t} (m/s) \quad (2.2)$$

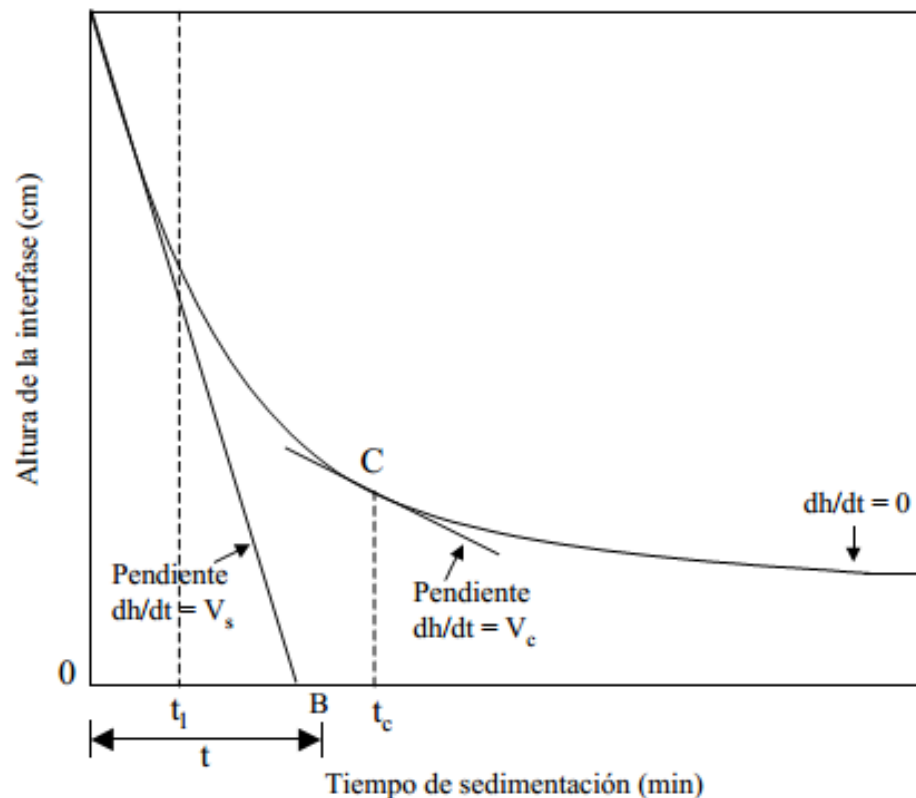


Figura 2.1. Representación gráfica de la altura en función del tiempo

2.2.3 Determinación del área mínima requerida para el espesamiento del sólido.

El hecho de que el área de la sección del sedimentador pueda calcularse para asegurar la clarificación de la suspensión no significa que se alcance la concentración deseada de sólido en la disolución de salida, X_u . Generalmente el área de la sección requerida para el espesamiento suele ser mayor que la requerida para la clarificación.

El procedimiento desarrollado por Yoshioka y Dick para la determinación de la sección mínima requerida para el espesamiento se basa en las siguientes consideraciones:

En primer lugar ha de considerarse que los ensayos de sedimentación llevados a cabo en el laboratorio no corresponden a un funcionamiento en continuo (figura 2). La capacidad del sedimentador discontinuo para arrastrar los sólidos a su parte inferior, con una concentración X_i , en funcionamiento discontinuo, viene dada por:

$$G_B = X_i V_s \quad (2.3)$$

en la que:

G_B = caudal de sólido ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

X_i = concentración de sólido en disolución (kg/m^3)

V_s = velocidad de sedimentación en la zona para una concentración X_i (m/s).

A partir de la ecuación (2.3) puede obtenerse la curva de flujo discontinuo: en la figura 4 se representa una curva típica G en función de X . Esta curva presenta un punto máximo debido a que la velocidad de sedimentación disminuye según se incrementa la concentración de la suspensión.

A concentraciones muy elevadas, cuando la suspensión se aproxima a una posición de equilibrio, $V_i \rightarrow 0$ y, por lo tanto, según la ecuación (2.3), $G_B \rightarrow 0$. Por otro lado, a concentraciones muy bajas, cuando $X_i \rightarrow 0$, la ecuación (2.3) indica que G_B también se aproxima a 0. Esto sugiere que se debe alcanzar un máximo para G_B en alguna concentración intermedia X_i , lo que explica la forma de la curva de flujo discontinuo.

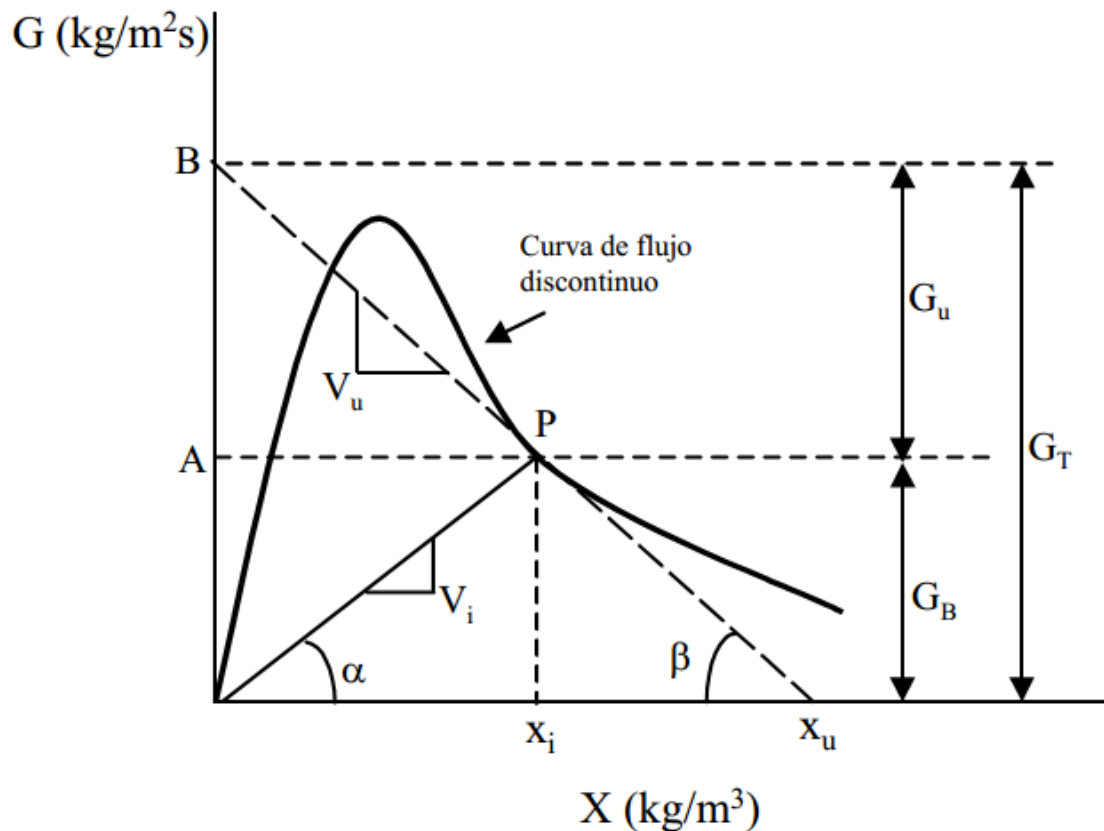


Figura 2.2 Procedimiento gráfico para determinar G_T .

Consideremos ahora la sedimentación que realmente se produce en un sedimentador continuo. Los sólidos se transportan hacia la parte inferior tanto por gravedad como por el movimiento que resulta por la separación del sólido en el fondo del sedimentador. La ecuación de flujo total será la siguiente:

$$G_T = G_B + G_u \quad (2.4)$$

en la que:

G_T = flujo total de sólidos (kg sólidos / m^2s).

G_B = Caudal de sólidos en funcionamiento discontinuo (kg sólidos / m^2s).

G_u = flujo de sólidos que sale al exterior (kg sólidos / m^2s).

El término G_u puede escribirse también:

$$G_u = X_i V_i \quad (2.5)$$

Donde V_u es la velocidad del sólido debida a la extracción que se hace por la parte inferior (m/s). El flujo total G_T puede hacerse variar por el diseñador controlando V_u ya que está determinado por el caudal de bombeo de extracción.

Sustituyendo en la ecuación (2.4) los valores de G_B y G_u dados por las ecuaciones (2.3) y (2.5) se obtiene:

$$G_T = X_i V_i + X_u V_u \quad (2.6)$$

Si pudiera obtenerse un valor G_T tal que se obtuviese el valor deseado de X_u , es decir, de la concentración de sólido de la disolución de salida del sedimentador, la mínima sección A_t del sedimentador en continuo requerida para el espesamiento del sólido podría obtenerse rápidamente a partir de:

$$A_t = \frac{M}{G_T} = \frac{\text{kg sólidos} / \text{s}}{\text{kg sólidos} / \text{m}^2 \text{s}} = \text{m}^2 \quad (2.7)$$

En la ecuación anterior, $M = Q_0 X_0$, siendo Q_0 el caudal del influente y X_0 la concentración de sólidos en esta corriente.

Para obtener el valor de G_T a partir de la curva de flujo discontinuo de la figura 2.2, se señala en el eje de abscisas el valor X_u o concentración deseada de sólidos en la disolución a extraer, especificada por el diseñador. Desde X_u se traza una tangente a la curva de flujo discontinuo tal y como se indica en la figura. P es el punto de tangencia. La intersección de esta tangente con el eje de ordenadas nos permite establecer la distancia OB, que corresponde al caudal de sólidos límite (G_T) que puede permitirse para obtener la concentración de la disolución de salida X_u . Esto puede concluirse considerando los pasos que se indican a continuación:

Paso 1. Considerar el punto de tangencia T, correspondiente a la abscisa X_i . La ordenada del punto de tangencia (distancia OA) es igual a G_B . Si se traza una línea recta que una el origen O con el punto de tangencia T, la pendiente de esta línea es igual a V_i puesto que:

$$OA = OX_i \tan \alpha \quad G_B = X_i \tan \alpha \quad (2.8)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (2.3):

$$G_B = X_i V_i \quad \text{resulta que } V_i = \tan \alpha.$$

Paso 2. De la figura 2.2 se puede deducir que:

$$B = X_u \tan \beta \quad (2.9)$$

Considerando ahora la velocidad de salida de sólido V_u :

$$V_u = \frac{Q_u}{A_t} \quad (2.10)$$

Multiplicando simultáneamente numerador y denominador de la ecuación anterior por X_u se transforma en la siguiente:

$$V_u = \frac{Q_u X_u}{A_t X_u} \quad (2.11)$$

Por otra parte, el balance de materia para sólidos en suspensión en el clarificador nos permite obtener la siguiente expresión:

$$Q_0 X_0 = Q_u X_u + Q_e X_e \quad (2.12)$$

Teniendo en cuenta que para un sedimentador bien diseñado la pérdida de sólidos con el líquido que rebosa o líquido clarificado ($Q_e X_e$) debe ser despreciable, una forma aproximada del balance de materia podría ser:

$$Q_0 X_0 = M \approx Q_u X_u \quad (2.13)$$

Utilizando la ecuación (2.13), la ecuación (2.11) nos permite escribir:

$$V_u \approx \frac{Q_0 X_0}{A_t X_u} = \frac{M}{A_t X_u} \quad (2.14)$$

A partir de la ecuación (2.7) se puede obtener:

$$M = A_t G_t \quad (2.15)$$

Sustituyendo este valor en el numerador de la ecuación (2.14) y simplificando:

$$V_u = \frac{G_T}{X_u} \quad (2.16)$$

de donde:

$$G_T = X_u V_u \quad (2.17)$$

Comparando las ecuaciones (2.9) y (2.17) se puede deducir que la pendiente de la línea βX_u de la figura 2.2 es igual a la velocidad de salida de sólido V_u y que la intersección en el punto B da un valor igual al flujo total límite G_T . Teniendo en cuenta que, a partir de la ecuación (2.4) $G_T = G_B + G_u$, se deduce que la distancia vertical AB en la figura 2.2 debe ser igual al valor G_u del caudal o flujo de los sólidos extraídos.

Por lo tanto, el procedimiento gráfico para determinar la sección mínima A_t que se requiere para el espesamiento, debe ser el siguiente:

1. Construir la curva de flujo de circulación de sólidos en discontinuo a partir de la ecuación (2.3) utilizando el valor de V_i obtenido a partir de los ensayos de laboratorio en discontinuo para diferentes concentraciones de sólidos X_i .
2. A partir del valor específico de la concentración del sólido extraído X_u , en la abcisa, trazar una tangente a la curva de circulación de sólidos. La intersección de esta tangente con el eje de ordenadas nos dará el flujo total de sólidos G_T .
3. Calcular tanto el área mínima requerida para la clarificación A_c así como el área mínima requerida para el espesamiento A_t . Se seleccionará la mayor de las dos como área en la que se basará el diseño del sedimentador.

2.3 Cálculo del sistema de accionamiento según la capacidad de tracción o empuje

La capacidad de tracción o empuje de una transmisión por correa la determina la adherencia entre la correa y la ranura de las poleas. Para ello, se obtienen experimentalmente los valores de carga útil que pueden ser transmitidos por una correa, en condiciones establecidas, sin que se produzca una pérdida de adherencia (patinaje o un deslizamiento elástico excesivo) y que la vida útil de la correa sea aceptable.

2.3.1 Determinación de la tensión estática (inicial)

(Dobrovolski, 1976) plantea que el factor más importante que determina la capacidad de tracción o empuje de una transmisión es la tensión inicial S_0 o el esfuerzo σ_0 .

Los fabricantes de correas trapezoidales recomiendan el empleo de otra, algo más simple, donde el efecto del ángulo de contacto α y el coeficiente de fricción f entre la correa y la polea es considerado con dos nuevos factores: f_t y c_α .

$$S_0 = 500 \cdot \left(\frac{f_t - c_\alpha}{c_\alpha} \right) \cdot \frac{N_d}{z \cdot V} + \rho \cdot V^2 \quad ; \text{ (N)} \quad (2.18)$$

Donde:

N_d -potencia de diseño; kW

z -cantidad de correas

V -velocidad de la correa; m/s

ρ -masa por metro de correa; kg/m.

c_α -coeficiente por ángulo de contacto.

f_t -factor de tensado, $f_t = 2,02$

2.3.2 Velocidad periférica

La velocidad de la correa debe ser lo mayor posible, para disminuir la cantidad de correas necesarias en la transmisión, pero nunca debe superar la velocidad máxima

límite $V_{\max}$ que el efecto de la fuerza centrífuga no disminuya la capacidad tractiva de la correa.

$$V = \frac{\pi D_1 n_1}{60 \cdot 1000} \leq V_{\max}; (\text{m/s}) \quad (2.19)$$

Las correas trapezoidales estandarizadas toleran $V_{\max} \leq 20 - 30$ (m/s).

2.3.3 Distancia entre centros de poleas

La distancia entre centros de poleas debe ser elegida de forma tal que permita colocar las poleas sin chocar (criterio $a_{\min}$) y que la distancia no sea excesivamente grande ante las condiciones practicas (criterio $a_{\max}$). Una de estas orientaciones puede ser la brindada en la norma rusa GOST que recomienda:

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max} \quad (2.20)$$

$$a_{\min} = 0,55 \cdot (D_2 + D_1) + h \quad (2.21)$$

$$a_{\max} = 2 \cdot (D_2 + D_1) \quad (2.22)$$

Donde:

h - es la altura de la sección transversal de la correa

D_1 - diámetro de la polea menor

D_2 - diámetro de la polea mayor

Se recomienda fijar la distancia interaxial entre los límites de $a_{\min}$ y $a_{\max}$. Para aumentar la longevidad de la correa es recomendable cuando no hay restricciones de espacio tomarla $a \gg a_{\min}$. La distancia óptima (a_{opt}) entre los ejes de rotación se recomienda seleccionarlo de acuerdo con el diámetro de la polea mayor y la relación de transmisión.

2.3.4 Longitud de la correa

Una vez elegida la tentativa distancia entre centros a , puede ser calculada la longitud de correa L correspondiente, para una transmisión por correa abierta y dos poleas:

$$L = 2a + \frac{1}{2}(D_1 + D_2) + \frac{(D_1 + D_2)^2}{4a} ;(\text{mm}) \quad (2.23)$$

Es necesario precisar la distancia interaxial:

$$a = 0,25 \left[L - \pi \frac{(D_2 + D_1)}{2} + \sqrt{\left(L - \pi \frac{(D_2 + D_1)}{2} \right)^2 - 8 \left(\frac{(D_2 + D_1)}{2} \right)^2} \right] ; (\text{mm}) \quad (2.24)$$

2.3.5 Verificación de los ciclos de flexión por segundo

La experiencia ha confirmado que las flexiones sufridas por la correa al doblarse sobre las poleas pueden tener una influencia significativa en el calentamiento de la correa y por consiguiente en la vida útil de ella. Por ello, es recomendable que las correas no superen ciertos valores admisibles de flexiones por segundo $[i_f]$.

$$i_f = 1000 \cdot n_p \cdot \frac{V}{L_n} ;(\text{s}^{-1}) \quad (2.25)$$

Donde:

i_f - flexiones por segundo de un segmento de correa; s^{-1}

n_p - cantidad de poleas en contacto con la correa

V - velocidad de la correa; m/s.

L_n - longitud normalizada de la correa; mm

Donde:

$[i_f] = 30\text{s}^{-1}$ perfil normal.

$[i_f] = 60\text{s}^{-1}$ perfil estrecho.

$[i_f] = 100\text{s}^{-1}$ perfil estrecho de francos abiertos.

2.3.6 Cálculo de la potencia nominal transmisible

No existe una exacta coincidencia de las magnitudes de potencia nominal transmisible por correa entre los diferentes fabricantes y normas, en la actualidad ha tenido una gran aceptación y generalización la siguiente fórmula de cálculo, brindada por Asociación de Fabricantes de Goma (RMA) para el cálculo de la referida potencia:

$$[N_1] = D_1 \cdot n' \cdot \left[K_1 - \frac{K_2}{D_1} - K_3 \cdot (D_1 \cdot n')^2 - K_4 \cdot \log_{10}(D_1 \cdot n') \right] + K_2 \cdot n' \cdot \left(1 - \frac{1}{K_u} \right) \quad (2.26)$$

Donde:

$[N_1]$ - Potencia transmisible por correa; kW

D_1 - Diámetro de la polea menor; mm

K_u - Factor por razón de transmisión

n' - n_1 /1000 mil revoluciones por minuto en la polea rápida

K_1, K_2, K_3 y K_4 - Factores empíricos evaluables en la Tabla 2.1.

Tabla. 2.1 Factores de cálculo K_1, K_2, K_3 y K_4 en la fórmula de la potencia nominal transmisible por correa para secciones de perfil normal.

Perfil	K_1	K_2	K_3	K_4
A	0,03826	1,232	$7,043 \times 10^{-9}$	0,006244
B	0,06784	3,261	$1,403 \times 10^{-8}$	0,01074
C	0,1261	9,004	$2,653 \times 10^{-8}$	0,04270
D	0,2763	32,23	$6,301 \times 10^{-8}$	0,04270

Para perfiles normales:

$$K_u = \frac{1}{1 + 0,35 \cdot \log_{10} \left(\frac{1 + 10^x}{2} \right)} \quad (2.27)$$

$$x = - \left(\frac{1}{0,35} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{i} \right) \quad (2.28)$$

2.3.7 Cantidad de correas

$$Z \geq \frac{N \cdot f_s}{[N_1] \cdot c_a \cdot c_1} \quad (2.29)$$

Donde:

N - Potencia a transmitir; kW

Z - Cantidad de correas

c_a - Coeficiente de ángulo de contacto.

f_s - Factor de servicio (Tabla 2.2).

c_1 - Coeficiente por corrección de la longitud

Donde:

Para perfiles normales:

$$C_L = 1 + \left[\frac{\log_{10} L_n - \log_{10} L}{\log_{10} L_n - 1,65} \right] \quad (2.30)$$

Donde:

L - Longitud previa de la correa; (mm).

L_n - Longitud normalizada de la correa; (mm).

2.3.8 Cálculo de la vida útil de la correa

En la literatura especializada aún no se ha creado teóricamente un método de cálculo exacto, en el cual se tomen en consideración todos los factores principales que influyen en la vida útil de la correa de transmisión. Los datos exactos que se tienen de las investigaciones realizadas permiten sólo aproximarse a una valoración por separado de la influencia de los esfuerzos que cambian cíclicamente y del calentamiento de la correa en su duración.

La ecuación de la longevidad de una correa se puede representar en forma de:

$$\sigma_{máx}^m \cdot 3600 \cdot u \cdot x \cdot H = \sigma_{fat}^m \cdot N_{base} \quad (2.31)$$

Donde:

$$H = \frac{N_{base}}{3600 \cdot u \cdot x} \left(\frac{\sigma_{fat}^m}{\sigma_{máx}^m} \right)^m ; \text{ horas} \quad (2.32)$$

En la actualidad, la información disponible de los valores de σ_{fat} , N_b y m en correas de perfil estrecho es insuficiente y por consiguiente el cálculo según este método es limitado a las correas de perfil clásico.

Tabla 2.2 Factor de servicio de la correa

MÁQUINA MOVIDA	MÁQUINA MOTRIZ					
	✓ Motor eléctrico sincrónico. ✓ Motor de combustión interna multicilindro. ✓ Turbinas.			✓ Motor eléctrico de alto par. ✓ Motor de combustión interna monocilindro.		
	8 h/día	16 h/día	24 h/día	8 h/día	16 h/día	24 h/día
Carga ligera. ✓ Agitadores de líquidos. Bombas y compresores centrífugos. ✓ Transportadores de banda. ✓ Ventiladores. ✓ Máquinas herramientas de corte continuo.	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Carga normal ✓ Bombas y compresores de 3 y más cilindros. ✓ Transportadores de cadena. ✓ Fresadoras.	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Carga pesada ✓ Bombas y compresores de uno y dos cilindros. ✓ Elevadores de cangilones. ✓ Cepilladoras y mortajadoras.	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
Carga muy pesada ✓ Mecanismos de elevación de grúas. ✓ Prensas. ✓ Cizallas.	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8

2.3.9 Según el Método de GoodYear

El método de cálculo de la vida útil evaluando las fuerzas en la correa ha sido desarrollado en la actualidad por algunas firmas estadounidenses productoras de correas como The Gates Rubber Co. y GoodYear. El fundamento del cálculo es semejante al método explicado anteriormente (según los esfuerzos) pero basado en amplios ensayos de laboratorios y de explotación.

El cálculo de la vida útil de la correa en una transmisión de la polea se realiza empleando la siguiente ecuación:

$$H = 1477 \cdot \frac{L_n^{1,25}}{V} \cdot \left(\frac{T_{fat}^m}{T_1} \right); \text{ horas} \quad (2.33)$$

Donde:

L_n - Longitud de la correa; (mm)

V - Velocidad de la correa; (m/s)

T_{fat} - Fuerza límite por fatiga; (N)

T_1 , - Fuerza a la entrada de cada polea en el ramal de carga; (N)

m - Exponente de la curva de fatiga; $m = 11,11$

Donde:

$$T_1 = S_0 + 500 \cdot \frac{N_d}{z \cdot V} + T_{fc} + T_{tflex1}; \text{ (N)} \quad (2.34)$$

$$T_{fc} = \rho \cdot V^2 \quad (2.35)$$

$$T_{tflex1} = 589 \cdot \frac{C_b}{D_1^{1,5}}; \text{ (N)} \quad (2.36)$$

$$T_{tflex1} = 589 \cdot \frac{C_b}{D_2^{1,5}}; \text{ (N)} \quad (2.37)$$

Donde:

S_0 - Tensión estática; (N)

N_d - Potencia de diseño; (kW)

z - Cantidad de correas

V - Velocidad de la correa; (m/s)

T_{fc} - Fuerza normal en la correa por efecto de la fuerza centrífuga; (N)

T_{tflex1} - Fuerza por flexión de la correa; (N)

ρ - Masa por metro de correa; (kg/m) Tabla 2.3

D_1, D_2 - Diámetros de poleas; (mm).

C_b - Constante de flexión- Ver Tabla 2.3

Tabla 2.3 Coeficiente para el cálculo de la vida útil según el Método GoodYear.

Perfil	ρ (kg/m)	Factor C_b		Tfat (N)
		Flexión normal	Flexión inversa	
A	0,11	399	479	418
B	0,20	1701	1943	727
C	0,33	5069	8926	1288
D	0,68	21561	25873	2664

2.3.10 Coeficiente de empuje

Partiendo de esta propiedad de las correas (explicarlo por su estructura fibrosa) no es racional aumentar la tensión inicial $\sigma_0 = 12 \text{ kgf/cm}^2$ para correas trapezoidales. No obstante la experiencia muestra que existe cierto valor óptimo de σ_0 , entonces pasado algunas horas de trabajo debido al estirado de la correa, el esfuerzo de todas maneras disminuye aproximadamente hasta esta magnitud. Los estiramientos repetidos pueden acelerar la rotura de la correa.

$$\varphi = \frac{p}{2S_0} \quad (2.38)$$

El valor σ_0 de este punto corresponde al máximo valor de la carga en condiciones de aprovechamiento racional de la correa. Si $\varphi < \varphi_0$ la capacidad de empuje de la correa no se aprovecha del todo. Si $\varphi > \varphi_0$ la correa trabaja inestablemente y se desgasta con rapidez.

A base de numerosas investigaciones se pueden aconsejar los siguientes valores medios de los coeficientes de empuje.

Para las correas trapezoidales $\varphi_0 = 0,7 - 0,9$

2.4 Geometría básica del sedimentador.

El sedimentador 120 A de la UEB de Lixiviación y Lavado de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara cuenta con la siguiente geometría:

Diámetro: 50 m

Altura total: 9.534 m

Altura real: 5.5 m

Altura de llenado: 5.1 m

2.5 Metodología secuencial para la simulación del comportamiento de los brazos.

2.5.1 Obtención de la geometría básica

Para modelar la geometría del sistema cable torque se utilizó el software Mechanical Desktop 2005. Se recurrió a las herramientas especiales para la edición de sólidos en 3D, utilizando las dimensiones reales del sistema y las mediciones efectuadas *in-situ* (Véase Anexo 2) se logró obtener la geometría con altos niveles de precisión. Las dimensiones esenciales del sistema se comportan como ilustra la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Dimensiones fundamentales del sistema

Nombre	Valor	Magnitud Física
CERCHA CENTRAL		
Altura	7.557	m
Ancho	2.410	m
Peso total	7 076.40	kg
Altura	5.00	m
Material	AISI 1020	-
BRAZOS		
Altura respecto al piso del SD	5.594	m
Largo:	9.302	m
Peso total de un brazo:	6018.95	Kg
Volumen	0.274896	m ³
Material	AISI 1020	
CUCHILLAS RASPADORAS		
Cuchillas rectas	27	U
Cuchillas curvas	1	U
Largo del soporte de las cuchillas	23.0947	m
Volumen	0.0050668	m ³
Peso total	40.0277 kg	kg

2.5.2 Discretización de los elementos a simular

Para llevar a cabo la simulación del sistema cable torque del sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y lavado fue necesario discretizarlo. El sistema fue separado en cuatro elementos o partes componentes. A continuación se efectúa un análisis individualizado de cada uno de estas partes componentes.

2.5.2.1 Brazo de Suspensión

Este elemento, fundamental del sistema cable torque analizado está compuesto por tres barras huecas de sección transversal circular intersectadas de forma diagonal en un ángulo de 25° sexagesimales. Estas barras poseen un diámetro exterior 426 mm, de diámetro interior de 410 mm y un espesor de 16 mm. (Véase Anexo 3)

2.5.2.2 Brazo de arrastre

Los brazos de arrastre soportan las 28 cuchillas raspadoras de la pulpa dentro del sedimentador. Por su ubicación y frecuente contacto con la pulpa están fabricados de AISI 1020. Poseen un diámetro exterior de 273 mm, diámetro interior de 259,3 mm y un espesor de 12,7 mm. (Véase Anexo 4)

Fueron incluidas para simular las 28 cuchillas raspadoras del brazo de arrastre. Para la obtención de los resultados y en vista de optimizar el proceso de simulación se analizaron estos elementos de forma individual en el Cosmos Design Star 4.5.

2.5.3 Aplicación de cargas dinámicas al modelo

Durante este proceso se le aplicaron al modelo las cargas presentes en el proceso de sedimentación. Se tuvieron en cuenta valores como:

- Torque que se le aplica a la cercha central de sedimentador
- Tensión en los cables de arrastre
- Resistencia a la rotación en las cuchillas
- Resistencia a la rotación que ejerce la pulpa sobre el brazo de arrastre

Cada una de estas fuerzas fue obtenida mediante cálculos empíricos y comprobados con mediciones realizadas en la UEB Lixiviación y Lavado de la Empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”. El Anexo 4 muestra la distribución de las cargas en el sistema.

2.5.4 Separación en elementos finitos

Luego de aplicar las cargas a los elementos componentes del sistema previamente discretizados se obtuvieron cuatro ficheros de análisis que fueron posteriormente sometidos al proceso de separación en elementos finitos (mallado) de forma satisfactoria. (Véase Anexo 5) Estos fueron separados en 104 565 elementos finitos que se distribuyen de la siguiente forma:

Tabla 2.4. Distribución de elementos finitos por partes componentes

Parte componente	Número elementos finitos
Brazo de suspensión	32 813
Brazo de arrastre	35 776
Cuchilla Recta	17 775
Cuchilla Curva	18 201

Posteriormente se procedió a efectuar la simulación de cada una de las partes componentes, proceso en el que se tuvieron en cuenta los materiales que las componen, la temperatura de trabajo así como los parámetros mencionados en el epígrafe anterior.

2.6 Conclusiones del capítulo

- Se determinaron los parámetros del sistema de espesamiento de los sedimentadores
- Quedó establecida la metodología para el cálculo de la resistencia mecánica del mecanismo de arrastre del sedimentador 120 A de la UEB de Lixiviación y Lavado.
- Se expusieron los fundamentos necesarios para efectuar el proceso de simulación mediante el Método de Elementos Finitos

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

En el presente capítulo realizaremos la evaluación crítica de los resultados obtenidos, teniendo la modelación del mismo, se representan las principales tensiones y donde ejercen su máximo esfuerzo por lo que tendremos una bastante aproximación del comportamiento de los brazos del sedimentador 120 A sistema cable torque, para realizar el diseño de los elementos anteriormente expuestos del sedimentador 120 A de la UEB de Lixiviación y Lavado, el cual nos proporcionara un logro para la industria y para la economía del país. También se llevará a cabo la valoración económica, donde se analizaran los resultados obtenidos a nivel de empresas en el proceso productivo. Se hace una breve reseña en cuanto al impacto ambiental, que es tan importante para la especie humana y el entorno que nos rodea. A partir de la importancia que podamos atribuirles y la aplicación de estos criterios como futuros profesionales, daremos curso a nuevos pilares de la ciencia y la técnica.

Este capítulo tiene como **objetivo**:

Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado según la interpretación de las regularidades observadas.

3.2 Análisis de los resultados

3.2.1 Resultados del cálculo de los parámetros para la sedimentación

Tabla 3.1. Resultados de cálculo de los parámetros para la sedimentación

No. Ecuación	Nombre	Valor	Magnitud Física
2.1	Área mínima requerida para conseguir la clarificación (A_c)	531.579	m^2
2.3	Caudal del sólido (G_B)	53.192	m^3/h
2.4	Flujo total del sólido (G_F)	86.780	m^3/h
2.5	Flujo de sólido que sale al exterior (G_u)	33.595	m^3/h
2.7	Área mínima requerida para determinar el espesamiento del sólido (A_t)	39.57	m^2

Los resultados obtenidos del cálculo de los parámetros necesarios para la sedimentación permitieron aumentar el nivel de precisión de la metodología utilizada en el cálculo del sistema de accionamiento. La misma tiene en cuenta variables como el caudal del sólido (ecuación 2.3) y área mínima para determinar el espesamiento del sólido (ecuación 2.7).

3.2.2 Resultados del cálculo de sistema de accionamiento

El sistema de accionamiento se calculó mediante una hoja (previamente programada) de Mathcad. (Ver Anexo 2). En la misma se tuvieron en cuenta las ecuaciones necesarias expuestas en el capítulo anterior y posterior a su cómputo arrojaron los siguientes valores.

Tabla 3.2. Resultados de cálculo del sistema de accionamiento

No. Ecuación	Nombre	Valor	Magnitud Física
2.18	Tensión Estática (S_0)	2.53×10^3	N
2.19	Velocidad periférica (V)	10.629	m/s
2.21	Distancia entre centros (A_{min})	249.25	mm
2.22	Distancia entre centros (A_{max})	870	mm
2.23	Longitud de la correa (L)	1.136×10^3	mm
2.24	Distancia interaxial (a_w)	217.317	mm
2.25	Ciclos de flexión (if)	16.458	s^{-1}
2.26	Potencia nominal transmitida (N_1)	3.541	kW
2.27	Coeficiente para perfiles normales (x)	-0.965	-
2.28	Coeficiente para perfiles normales (K_u)	1.099	-
2.29	Cantidad de correa (Z)	3	U
2.33	Longevidad (Método de Good Year) (H)	1.434×10^{30}	horas
2.38	Coeficiente de empuje (θ)	0.014	-

3.2.3 Resultados obtenidos en la simulación

3.2.3.1 Cuchillas raspadoras

Después someter a estudio, mediante el Método de Elementos Finitos, las cuchillas raspadoras; teniendo en cuenta las diversas sollicitaciones a que están sometidas las mismas, (figura 3.1) se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados de la simulación de las cuchillas raspadoras

PARÁMETRO	CUCHILLA RECTA	CUCHILLA CURVA	MAGNITUD FÍSICA
Tensiones de Von Mises	1.87211×10^{10}	3.40136×10^{10}	N/m ²
Esfuerzo Equivalente	0.0935299	0.209742	
Deformación	0.41742	0.11809	m
Módulo de Elasticidad	2×10^{11}		N/m ²
Coeficiente de Poisson	0.29		
Resistencia a la flexión	7.7×10^{10}		N/m ²
Densidad Másica	7900		kg/m ³
Resistencia a la tensión	4.2051×10^8		N/m ²
Límite de Fluencia	3.5157×10^8		N/m ²
Coeficiente de expansión Térmica	1.5×10^5		Kelvin
Conductividad Térmica	47		W/(m·K)

Como se puede apreciar los valores de Deformación y de Tensiones de Von Mises se encuentran dentro del rango permitido. Mediante la simulación fueron obtenidos los comportamientos de ambas cuchillas en función de la Fuerza Equivalente y Desplazamiento. (Ver Anexo 9A y 9B)

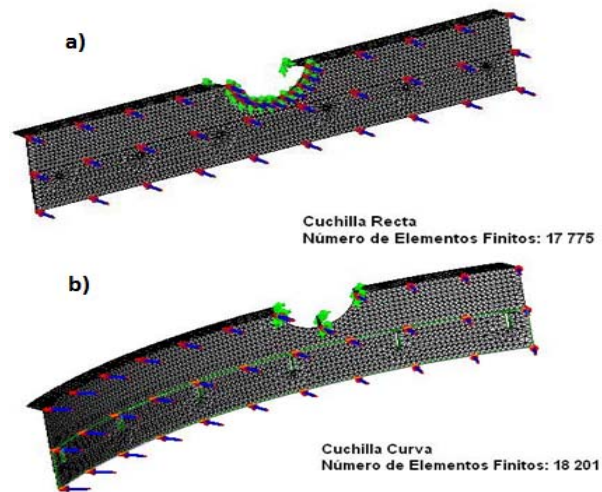


Figura 3.1 Cuchillas del brazo de arrastre.

a) Cuchilla recta, b) Cuchilla Curva

3.2.3.2 Brazos de suspensión y de arrastre

La simulación de los brazos de suspensión y de arrastre permitió determinar el comportamiento de los mismos bajo las solicitaciones que tienen lugar dentro del sedimentador. Para efectuar el proceso de análisis por el Método de Elementos Finitos se tuvieron en cuenta cada una de las cargas y tensiones a las que están sometidos mencionadas partes del Sistema Cable-Torque (Figuras 3.2 y 3.3). El estudio realizado a ambos brazos arrojó los siguientes resultados

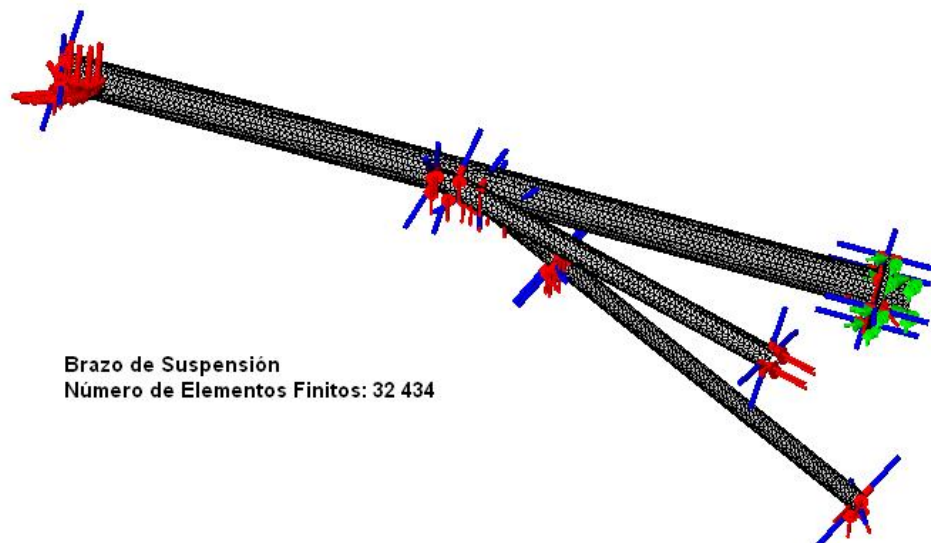


Figura 3.2 Brazo de suspensión sometido a cargas

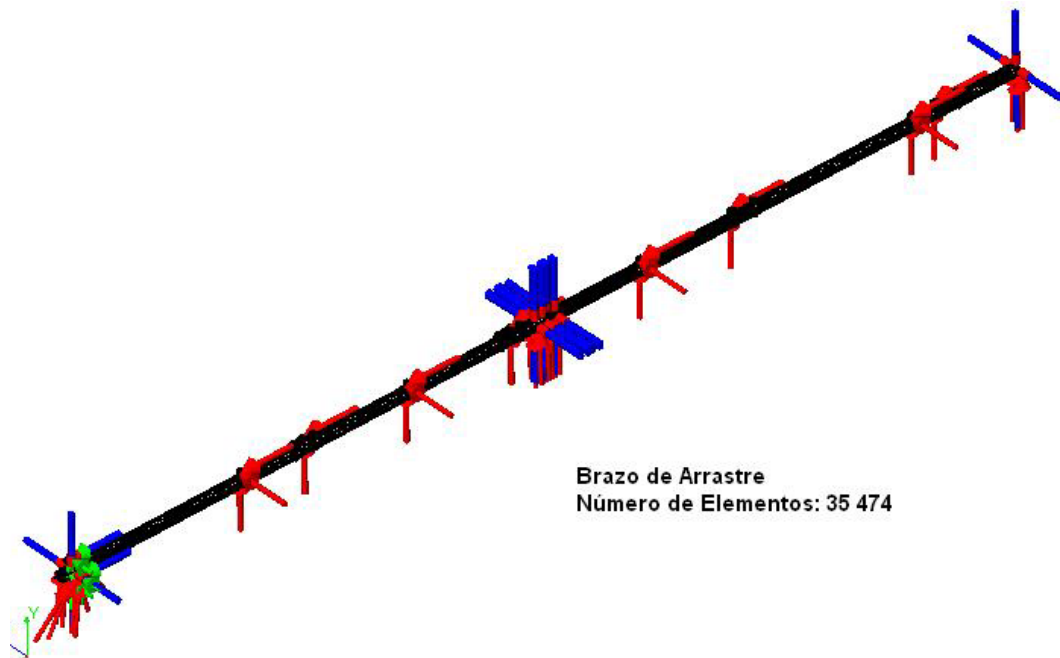


Figura 3.3 Brazo de arrastre sometido a cargas

Tabla 3.4 Resultados de la simulación de los brazos de suspensión y arrastre

PARÁMETRO	BRAZO DE SUSPENSIÓN	BRAZO DE ARRASTRE	MAGNITUD FÍSICA
Tensiones de Von Mises	1.87211×10^{10}	8.94088×10^{10}	N/m ²
Esfuerzo Equivalente	0.0935299	0.0778036	
Deformación	0.41742	0.06593	m
Módulo de Elasticidad	2×10^{11}		N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.29		
Resistencia a la flexión	7.7×10^{10}		N/m ²
Densidad Másica	7900		kg/m ³
Resistencia a la tensión	4.2051×10^8		N/m ²
Límite de Fluencia	3.5157×10^8		N/m ²
Coefficiente de expansión Térmica	1.5×10^5		Kelvin
Conductividad Térmica	47		W/(m·K)

Como se observa en la tabla anterior los resultados obtenidos como fruto de la simulación de los brazos se encuentran fuera de los estándares de normalidad. Los valores de las Tensiones de Von Mises obtenidos, en el brazo de arrastre y en el de suspensión, son de 1.87211×10^{10} y 8.94088×10^{10} respectivamente. Como se observa el éste último valor, referente al brazo de arrastre está por encima de los límites de

fluencia del material del que están compuestos. Esta situación es la causante de las deformaciones apreciadas en las mediciones *in-situ*. Finalmente se determina que el brazo de arrastre, que porta las 28 cuchillas raspadoras está sometido a una serie de cargas por encima de las que, por su materia y geometría, es incapaz de soportar.

3.3 Valoración económica

Los sedimentador por sistema cable torque como toda maquinaria industrial poseen un programa de mantenimiento y reparación, a continuación se analizan los parámetros económicos del sedimentador 120 A de la UEB de Lixiviación y Lavado de la fábrica Cmdte. Ernesto Che Guevara. En la tabla siguiente se muestran los costos que genera la sustitución de las partes componentes o piezas del sedimentador 120 A de la mencionada UEB. Resaltar que han sido tenidos en cuenta los costos por concepto de capital humano vinculados al proceso de reparación y/o mantenimiento de citado sedimentador.

Tabla 3.1 Costo de fabricación de los elementos del SD 120 A.

NO	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA	CANTIDAD	PRECIO (CUC)	IMPORTE (CUC)
1	Brazos cable torque	2	14 628.32	29 256.64
2	Cercha cable torque	1	50 615.7	50 615.7
3	Feed-Well ⁸ inoxidable cable torque	1	8 910.6	8 910.6
4	Cuchillas rectas cable torque	56	289.25	16 198
5	Cuchillas curvas cable torque	2	500.9	1 001.8
6	Raspadores cable torque	8	380.93	3 047.44
TOTAL	-	-	-	109 030.18

Tabla 3.2 Costo de reparación del SD 120 A.

DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO (CUP)	REAL FÍSICO	VALOR EJECUTABLE (CUP)
Forros para piso(chapa 5; 1-6mm)	187.35	0.78	146.16
Chapas 5; (1-6mm)	253.96	0.78	198.09
Soportes con vigas y soldadura	603.36	0.26	156.87

⁸ Canal de distribución de la pulpa, a la entrada del sedimentador.

Tabla 3.2 Costo de reparación del sedimentador 120 A. (Continuación)

Soportes con planchuelas soldadas	1127.40	0.01	11.27
Piezas de conexión de tuberías	8.82	3	26.46
Arme y desarme de andamio	2.28	40	91.20
Montaje de barandas	7.21	12	86.52
Feed-Well	356.47	1	356.47
Nivelación de Feed-Well	130.57	2	261.14
Montaje de brazos	545.47	1	545.47
Tensar los cables	109.86	8	878.88
Tornillos	1.87	108	212.76
Restablecer techo del TK	83.80	30	2514
SUBTOTAL			5 485.26
SUMINISTRO CALIENTE			
Viga C 160	583.53	2	1 167.06
Angular 50x50	964.74	0.252	243.11
Angular 25x25	963.230	0.096	92.47
Tubo de Ni	9.020.110	3.80	34 276.42
Tubo de acero	70.840	68	4 817.12
Coupling hidráulico ⁹	189.86	12	2 278.32
Rejilla para piso 30x30	341.91	5	1 709.55
Electrodo E-316 de 4 mm	13.76	5	68.80
Electrodo E-316 de 4 mm	6.72	5	33.60
Electrodo E-316 de 3.2 mm	12.11	5	60.55
Electrodo de carbón de 8 mm	0.30	300	90
Válvula de diámetro 200 mm (60%)	1 528.45	6	9 170.70
Válvula de diámetro 250 mm (60%)	1 222.76	2	2 445.52
Válvula de diámetro 400 mm (60%)	1 235	1	1 235
Tubo de acero inoxidable	9 020.11	2.55	23 001.28
SUBTOTAL			80 689.5
SUMINISTRO A LA ECRIN			
Andamios metálicos	0.66	40	26.40
Electrodo 7018 de 4 mm	10.355	10	10.36
Acetileno	31.430	3	94.29

⁹ Acoplamiento Hidráulico. Nótese que se trata de una unión diferente de las generalmente utilizadas para fluidos.

Oxigeno	8.460	4	33.84
Electrodo 7018 de 3.2 mm	1.057	10	10.57
SUBTOTAL			175.46
Total de costo directo			52 072.37
Gastos directos a la obra	9.5%		4 946.88
Gastos indirectos	8.5%		4 426.15
Subtotal de gasto	12.36%		7 594.65
Transportación			0.00
Imprevistos debido a portadores de corriente			5.00
Presupuesto total de independientes	8.92%		6 163.37
Costo total			75 203.42
Utilidad	20%		4 805.52
Total de servicio			80 008.94
RECURSOS MANO DE OBRA			
Ayudante de construcción del grupo salarial	513.16	1.91	980.14
Armador de estructura del grupo salarial	4.89	2.44	11.94
Auxiliar de Mtto. de sistema de acueducto	6.00	2.12	12.72
Instalador de tuberías del grupo salarial	119.14	2.72	324.06
Mecánico de mantenimiento del grupo salarial	0.63	3.42	2.15
Mecánico de mantenimiento del grupo salarial	8.16	2.93	23.91
Mecánico de mantenimiento del grupo salarial	23.23	2.72	63.19
Mecánico montador del grupo salarial IV	133.60	3.42	456.91
Mecánico montador del grupo salarial V	82.00	2.44	200.08
Pailero del grupo salarial IX	19.60	3.42	67.03
Pailero del grupo salarial VI	50.12	2.72	136.31
Pailero del grupo salarial IV	41.60	2.29	95.26
Operario de const. y mtto y reparación de acueducto	6.00	2.29	13.74

Soldador del grupo salarial VII	17.78	2.93	52.11
Soldador del grupo salarial VI	13.88	2.72	37.75
Soldador del grupo salarial V	11.70	2.44	28.55
SUBTOTAL	1051.50		2505.88
RECURSOS DE EQUIPOS			
Camión plancha	1.05	15.03	15.71
Grúa de izaje 14ton	144.94	21.27	3082.79
Grúa de izaje 45ton	26.00	44.48	1156.48
Soldador eléctrico por motor	21.88	4.14	90.58
Soldador elect. arco por transf	21.48	1.98	42.54
Soldador autógeno y equipo oxicortador	49.98	3.32	165.93
SUBTOTAL	265.32		4554.03

Luego de los resultados obtenidos en los diferentes aspectos de la fabricación y reparación, obtenemos como costo total de fabricación 109 030.18 CUC, y como costo total de reparación 833 005,87 CUP.

3.4 Impacto Medioambiental

El interés por salvaguardar el medio ambiente donde vivimos, es cada vez de mayor intensidad, aún más si conocemos que su contaminación podría traer como consecuencia nuestra propia destrucción. El desarrollo de impetuoso de las fuerzas productivas ha implicado el incremento de las fuerzas de los riesgos de contaminación atmosférica, de la misma manera el desarrollo de vertiginoso de la industria ha creado derechos y leyes para la construcción de depósitos o basureros en lugares especiales.

Con este trabajo se reducen los mantenimientos y al incrementarse la eficiencia de la planta se expulsa hacia la atmósfera menor cantidad de gases, líquidos y sólidos en el área de trabajo disminuyendo la contaminación del medio ambiente. Por otra parte se hace necesaria la precaución durante los mantenimientos ejecutados a estos equipos, pues el lubricante empleado, una vez cambiado debe depositarse en recipientes de

recuperación, estipulado así por la Seguridad Industria para evitar la interacción del mismo con el medio.

Existe la posibilidad de daños directos al ser humano en caso de algún escape inoportuno de amoniaco. El amoniaco tiene gran acción irritante en cualquier tejido húmedo, la taquicardia y la taquipnea, son algunos síntomas originados por la irritación de las vías respiratorias, pudiendo llegar a retener la respiración. Debido a la alta solubilidad del amoniaco este tiene gran facilidad para disolverse en el sudor del cuerpo humano.

3.5 Conclusiones del capítulo

- A través de las metodologías de cálculo empleadas, se obtuvieron los parámetros de sedimentación y sistema de accionamiento del sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado.
- Mediante la obtención de los parámetros antes mencionados, se realizó la simulación computacional por medio del COSMOS Design STAR 4.5 de los elementos fundamentales del mecanismo del sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado.
- Se realizó la valoración económica, obteniendo los datos de fabricación y reparación del mecanismo del sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado, obtenidos en el departamento de mantenimiento de dicha UEB.
- Brindamos un análisis del impacto ambiental, basándonos principalmente en el estado crítico del medio ambiente y en los daños ocasionados al organismo humano, a través los gases y desperdicios sólidos y líquidos.

CONCLUSIONES GENERALES

- El procedimiento de cálculo expuesto permitió la determinación de los parámetros necesarios para la simulación computacional del mecanismo del sistema cable torque. El mismo se obtiene del análisis particular de las situaciones físicas que se presentan durante la implementación del objeto de estudio en la UEB Lixiviación y Lavado de la Empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”.
- Se lograron establecer las características mecánicas y físicas del mecanismo del sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado, mediante una metodología de cálculo para los parámetros de sedimentación y sistema de accionamiento.
- Se obtuvieron los modelos del comportamiento del sistema cable torque mediante la simulación del mecanismo del sedimentador 120 A de la UEB Lixiviación y Lavado con el empleo del software computacional COSMOS Design STAR 4.5 con

RECOMENDACIONES

- Recomendar a la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara le implemento de dos nuevos brazos en el sedimentador 120 A de la EUB Lixiviación y Lavado, tanto de arrastre, como de suspensión. Con el objetivo de disminuir las tensiones evitando daños por rotura y lograr un aumento en el rendimiento del mismo.
- Emplear el presente informe como material de consulta en las actividades docentes afines a la temática estudiada.
- Continuar el desarrollo de la presente investigación mediante la simulación computacional del sistema para cuatro brazos de arrastre.
- Implementar un sistema histórico de control de las variables principales del sedimentador 120 A de la UEB de Lixiviación y Lavado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aneiros, J. M. Problemas de Diseño de Elementos de Máquinas, 1987.
2. Baranóv, G. G. Teoría de los Mecanismos. Editorial MIR, Moscú. 1985.
3. Balandín, C. M. 1988: Filtrovaniye grubodispersnij materialov. Nedra, Moskva, 104 p.
4. Berres, S.; Bürger, R.; Karlsen, K. H. & Tory, E. M. 2003: Strongly degenerate parabolic-hyperbolic systems modeling polydisperse sedimentation with compression. J. Appl. Math 64(1): 41-80.
5. Beyris P.E. y Ferrer, E. 1996. Comportamiento de distintos tipos de iones durante el proceso de sedimentación de las pulpas lateríticas. Minería y Geología XXIII (2): 75-77.
6. Beyris M. P.E. y J. Falcón H. 2000: Consideraciones del efecto de la composición granulométrica en el proceso de sedimentación. Evento CINAREM'2000.
7. Botey J. Caracterización del mecanismo Cable torque de la Planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara. Tesis de ingeniería.
8. Brown, G. G. 1965: Operaciones básicas de la ingeniería química. Instituto Cubano del Libro. La Habana, 269 p.
9. Bürger, R.; Concha, F. & Karlsen, K. N. 2001: Phenomenological model of filtration processes: 1. Cake formation and expression. Chemical Engineering Science56: 4537-4553.
10. B.J. Gladman, S.P. Usher, P.J. Scales. Understanding the Thickening Process. Dept. of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Australia, 2006
11. Carman, P. C. 1997: Fluid flow trough granular beds. JUBILEE SUPPLEMENT-Trans IChemE, Vol 75 (December): S32-S48.
12. Chuianov, G. G. 1987: Obezvoshivanie, pileulavlivanie i ojrana okrushaiushei credi. Nedra, Moskva, 200 p. Costa Lopez, J. "Curso de Química Técnica" Ed. Reverté (1991)

13. Coe, H. S., and Clevenger, G. H. (1916). "Methods for determining the capacities of slime-settling tanks." Trans. Am. Inst. of Mining, Metallurgical and Petr. Engrs., 55, 356.
14. Colectivo de autores. Atlas de diseño de elemento de máquina, Tomo I y II. 1986.
15. Coulson J.M. y Richardson J.F. "Ingeniería Química" Vol 1 y 2. Ed. Reverté (1979-81).
16. Dobrovolski, R. Elementos de Máquinas. Editorial MIR, Moscú, 1980.
17. Falcón J., Beyris P., Ferrer E. y Montero M. 1997. Sedimentación de las pulpas crudas de minerales lateríticos de la planta Moa Nickel S.A. Minería y Geología XIV (1): 31 - 36.
18. Falcón J. Hernández A. 1987. Influencia de la composición iónica de la pulpa limonítica sobre la velocidad de sedimentación Minería y Geología V(3):67-80.
19. Falcón J., Beyris P., Ferrer E. y Montero M. 1997. Sedimentación de las pulpas crudas de minerales lateríticos de la planta Moa Nickel S.A. Minería y Geología XIV (1): 31 - 36.
20. Feodosiev, V. I, Resistencia de Materiales. Editorial Mir. Moscú ,1985.
21. Fernández, L.G. Resistencia de los materiales. Editorial Pueblo y Educación. La Habana.Cuba.1986.511 p.
22. Garcell, L. A y Cerpa N. 1993. Caracterización reológica de las pulpas de limonita de Moa. Tecnología Química. XIII(2) : 30-41
23. Garrido, P.; Concha, F. & Bürger, R. 2003: Settling velocities of particulate systems: 14 Unified model of sedimentation, centrifugation and filtration of flocculated suspension. Int. J. Miner. Process [en línea] 72: 57-74. Consulta: 10 enero 2010. Disponible en: www.sciencedirect.com
24. González, I., Folleto de Transmisiones Mecánicas. ISMMM, 2009.
25. Hernández Muñoz A. "Depuración de aguas residuales" Col. Ing. Caminos Canales y Puertos. Colección Senior nº 9. (1990)
26. Joanna R. Karl J. R. y Wells S. A. Numerical model of sedimentation/thickening with inertial effects. The Journal of Environmental Engineering. Portland State Univ., Portland

27. Kasatkin, A. G. 1987: Operaciones Básicas y Aparatos en la Tecnología Química. Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 2t.
28. Kynch, G.J. (1952) A theor y of sedimentation, Trans. Faraday Soc. 48, 166-176.
29. Lu. W. M.; Tung, K. L.; Pan, C. H. & Hwang, K. J. 1998: The effect of particle sedimentation on gravity filtration. Separation Science and Technology (12): 1723-1746.
30. Metcalf & Eddy, Inc. (1991). Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse. McGraw- Hill, Inc., New York.
31. Mariño, A. 2002: Variables para el control de la concentración de sólidos alcanzable por sedimentación gravitacional. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis doctoral] 100 p.
32. Mariño, A.; Falcón, J.; Sales-Valadao. E. & Almenares R. S. 2007: Nuevo enfoque para el pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional. Minería y Geología [en línea] 23 (3) Consulta: 15 enero 2014. Disponible en: [http:// www.ismm.edu.cu/sites/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/sites/revistamg)
33. Mariño, A.; Falcón, J. & Sales-Valadao, E. S. 2001: Predicción de los valores máximos de concentración de sólidos en el producto espesado. Información tecnológica 12(3): 181-188.
34. Mariño P. A., Falcón Hernández J. y Sales Valadao G. E. Correlación teórica entre las concentraciones de sólidos en el lodo sedimentado por gravedad y en la la torta sin escurrir. Minería y Geología. Vol. 26 n.4/ octubre-diciembre de 2010 / p.79-103
35. McCabe W.L. y Smith J.C. "Operaciones Básicas de Ingeniería" Ed Reverté (1969).
36. Mott L. R. Diseño de elementos de máquinas. Cuarta Edición. Prentice Hall, México. 2006.
37. Nebot, Miguel. 1969. Prueba de sedimentación con pulpas sometidas a un campo magnético. Trabajo de investigación. E.C.P.S.A. Moa.
38. Niemann, G. Elementos de Máquinas Ed. S. A. Barcelona, España, 1987.
39. Niemann, G. Tratado teórico practico de Elementos de Máquinas. Ed. Labor S.A Barcelona, España, 1967.

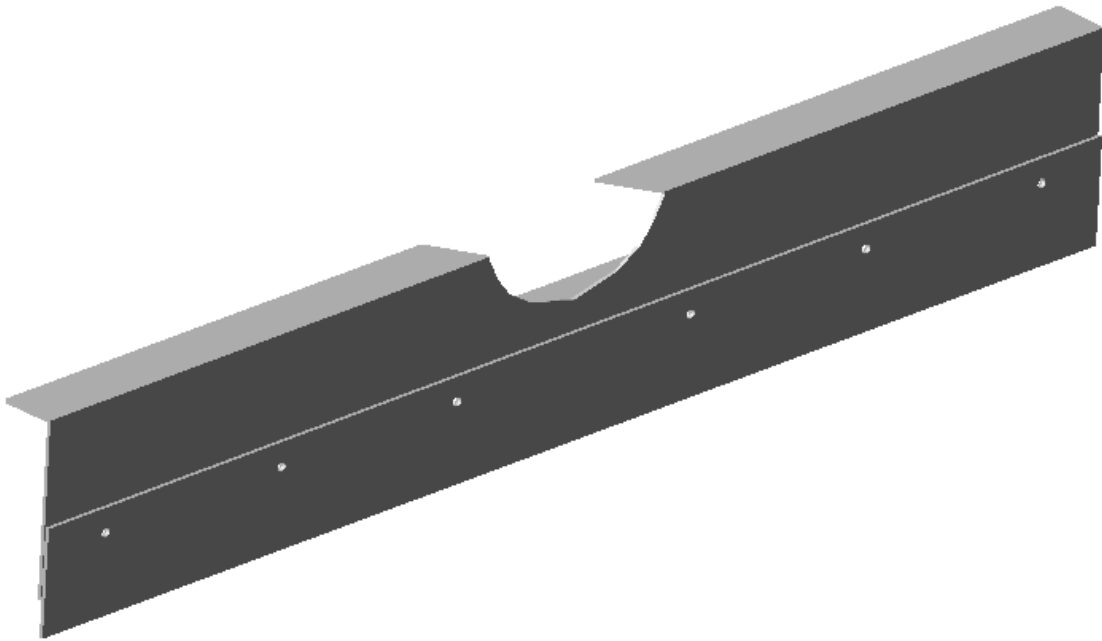
40. Novoa Ortega, R. Influencia del pH y otros factores de la sedimentación de la pulpa mineral. Revista Cenic, 7, Feb1976.
41. Perry D.H. y Chilton C.H. "Manual del Ingeniero Químico" Ed. Mc Graw-Hill (1982).
42. Quintana Puchol. 1984. Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa. (I): Análisis granulométrico. Minería y Geología. II (3):135-1461984.
43. Quintana Puchol. 1985. Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa (II): Análisis físico mineralógico. Minería y Geología. III (1) :95-104.
44. Ramalho R. S. "Tratamiento de aguas residuales" Ed. Reverté (1991)
45. Ramalho, R. S. (1977). Introduction to Wastewater Treatment Processes. Academic Press.
46. Reshetov, D. Elementos de Máquinas Editorial Pueblo y Educación, 1987. La Habana Cuba.
47. Richardson, J.F. and Zaki, W.N. (1954) Sedimentation and fluidization: Part I. Trans. Instn. Chem. Engrs. (London) 32, 35-53.
48. Rivero L, G. Determinación del factor de contacto entre los flancos del tornillo sin-fin con perfil derivado de cono. Dr. Ing. Luis Martínez Delgado (tutor). Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Ingeniería Mecánica. CUJAE. Ciudad de la Habana. 2002.
49. Robinson, C.S. (1926) Some factors influencing sedimentation, Ind. Eng. Chem. 18, 869-871.
50. Rodríguez, G. I. Folleto de transmisiones mecánicas. ISMMM, 2009.
51. Rodríguez, H. O. Dibujo Aplicado para Ingenieros, Tomo II, 2000.
52. Rojas Purón L. D. Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa laterítica. Tesis Doctorado en Ciencias Técnicas. Cujae- ISMMM. 2006.
53. Rojas Purón, L.A y P.E. Beyris. 1994. Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Sotto Alba". Minería y Geología. XI (1). Pág. 13-17
54. Rudenko, K. G. & Shemajanov, M. I. 1981: Obeznozhivanie i pileulavlivanie. Nedra, Moskva, 350 p.

55. Shigley, J.E; Mischke, C.R. Diseño en Ingeniería Mecánica. Editorial MC Graw Hill, 2001.
56. Steinour, H.H. (1944a) Rate of sedimentation. Non-flocculated suspensions of uniform spheres. Ind. Eng. Chem.36, 618-624.
57. Shushikob. A., 1971: Filtrovanié, teoria i praktika razdelenia suspensii. Ed. Jimia, Moskva, 440 p.
58. Smiles, D. E. 1975: Sedimentation and self-weight filtration in industrial slurries. Process Chem. Eng. 28: 13-16. Sincero 2002 –Wastewater Treatment 1
59. Talmadge, W. P. and E. B. Fitch (1955). Ind. Eng. Chem. 47, 38.
60. Tillerf. M., & Yeh, CH. S. 1987: Compressibility of particulate structures in relation to thickening, filtration and expression – A review. Separation Science and Technology22(2 y 3): 1037-1063
61. Vian A. "Elementos de Ingeniería Química"Ed. Alhambra (1975).
62. Yanqiu, Zhang, etc. (1988). "Amendment of Design of Secondary Settling Tank", Environmental Engineering. Vol 16, No 6, Ministry of Industry, Beijing, China.

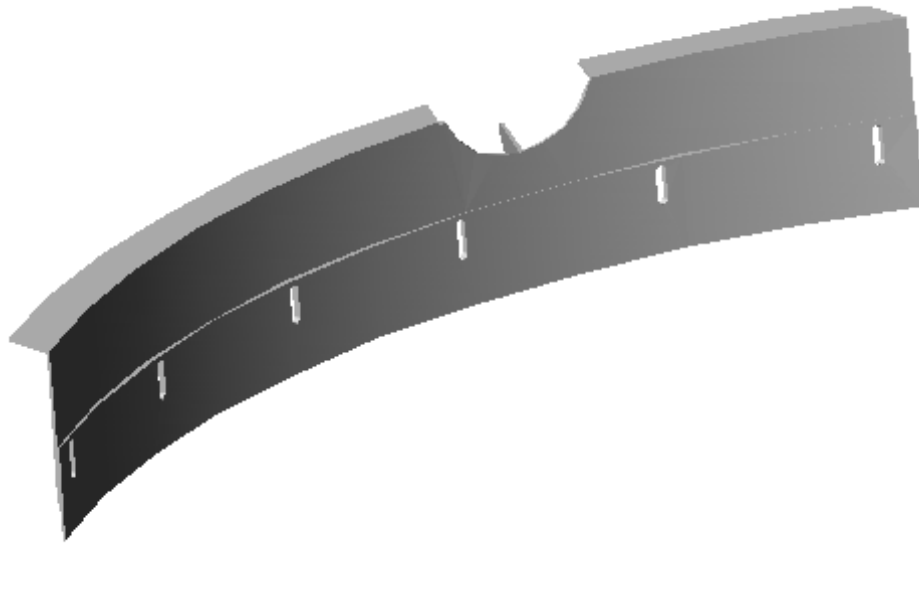
ANEXOS

Anexo 1	Metodología del Mathcad	Carta	
Anexo 2	Plano del Sistema Cable Torque 3D		A0
Anexo 3	Plano del Sistema Cable Torque 2D Vista Frontal	A0	
Anexo 3	Geometría del Brazo de Suspensión		A3
Anexo 4	Geometría del Brazo de Arrastre	A3	

ANEXO 5 Geometría Básica de la Cuchilla Recta 3D



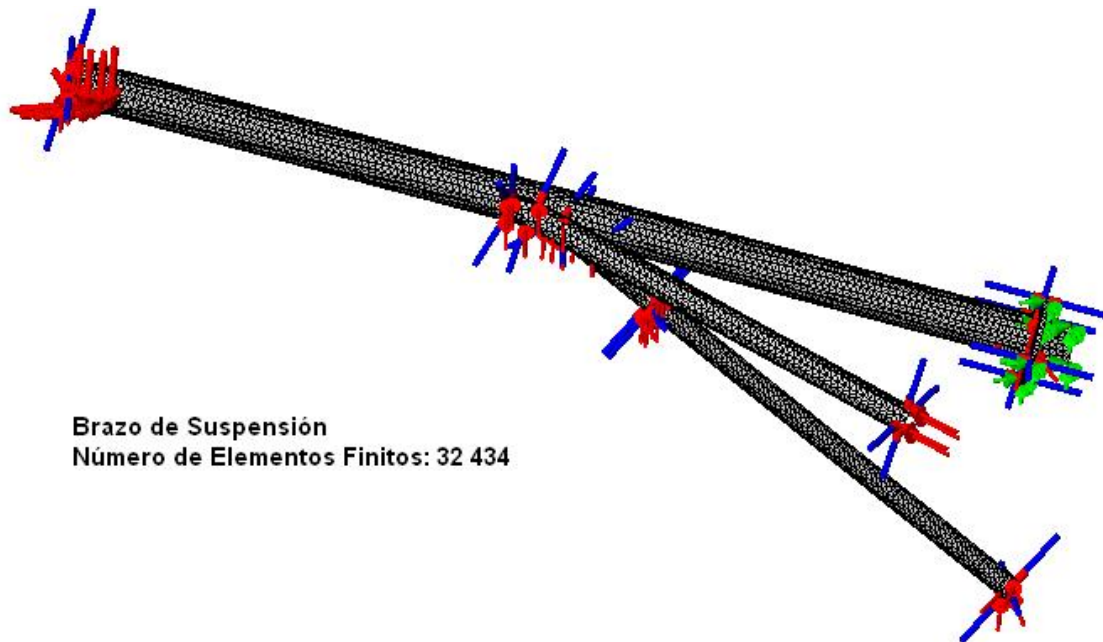
ANEXO 6 Geometría Básica de la Cuchilla Curva 3D



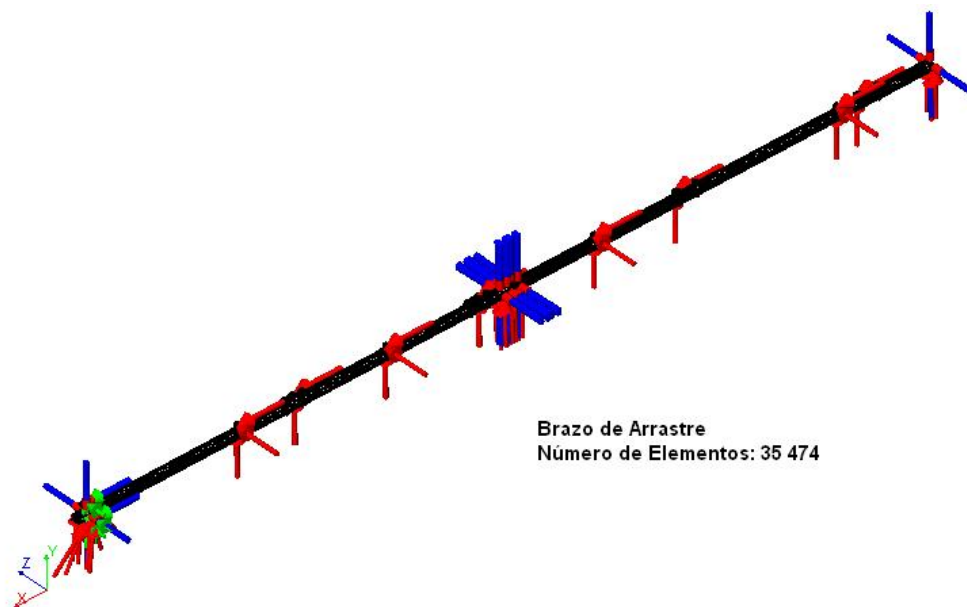
Efraín Camejo Lores

Simulación Computacional del sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara"

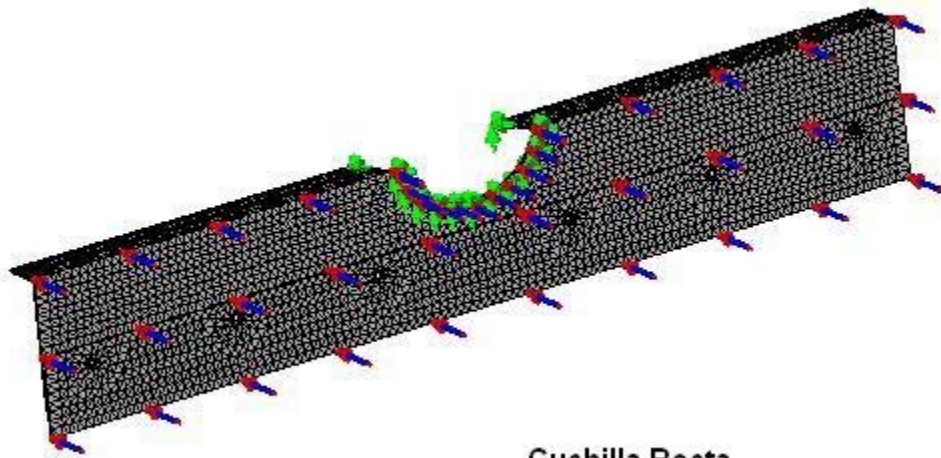
ANEXO 7 Cargas Aplicadas a las partes componentes



A. Cargas aplicadas al Brazo de Suspensión

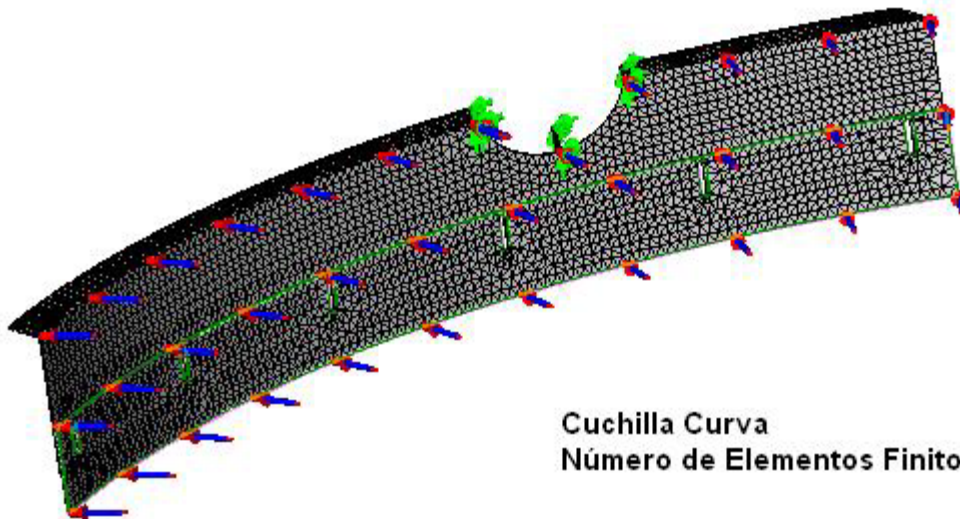


B. Cargas Aplicadas al Brazo de Arrastre



Cuchilla Recta
Número de Elementos Finitos: 17 775

B. Cargas Aplicadas a las Cuchillas Rectas

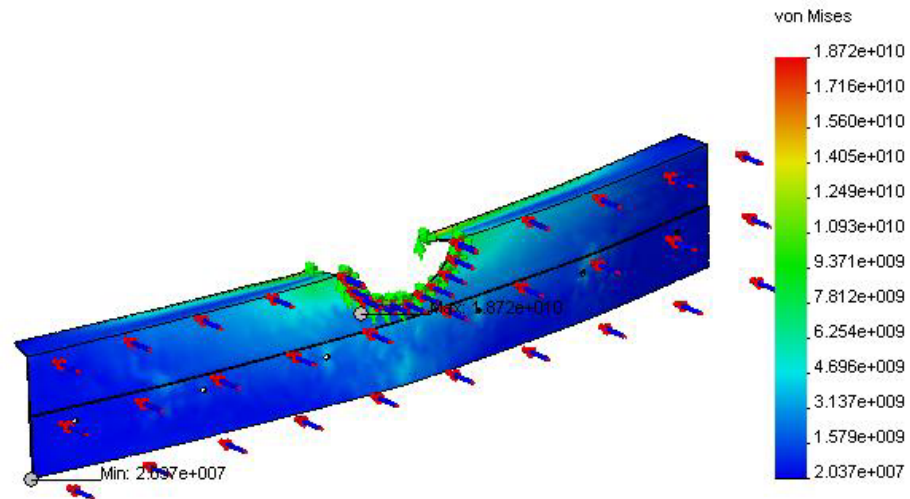


Cuchilla Curva
Número de Elementos Finitos: 18 201

D. Cargas Aplicadas a la Cuchilla Curva

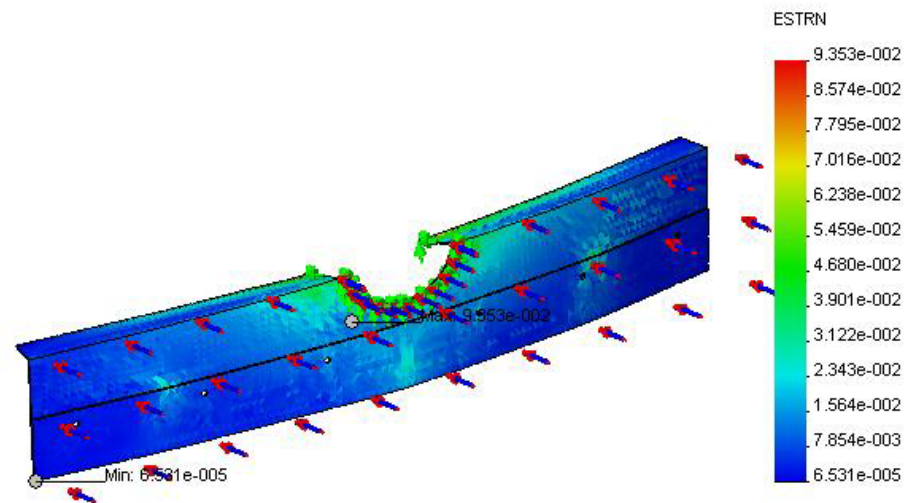
ANEXO 9 MODELOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE LA CUCHILLA RECTA

cuchilla-Fuerza en la cuchilla :: Static Nodal Stress
Units : N/m² Deformation Scale 1 : 0.448927



A. Tensión en la cuchilla recta

cuchilla-Fuerza en la cuchilla :: Static Strain
Deformation Scale 1 : 0.448927

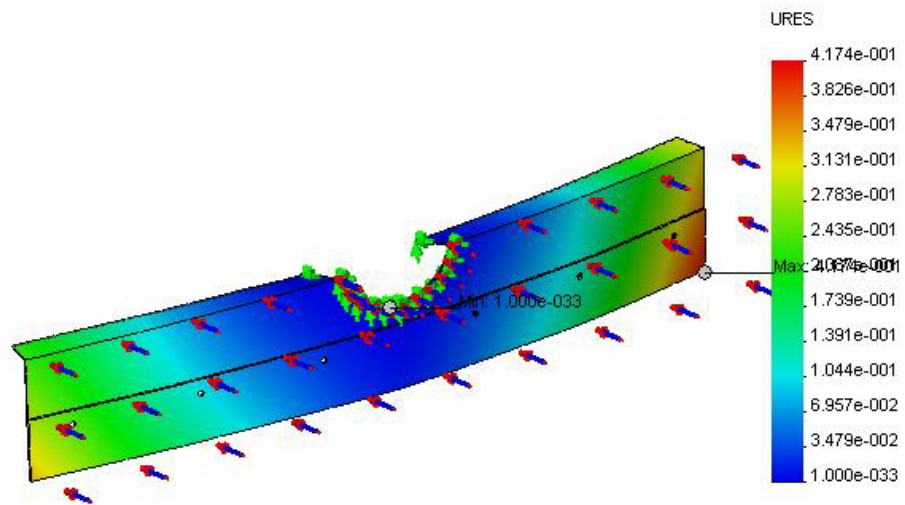


B. Fuerza en la cuchilla recta

Efraín Camejo Lores

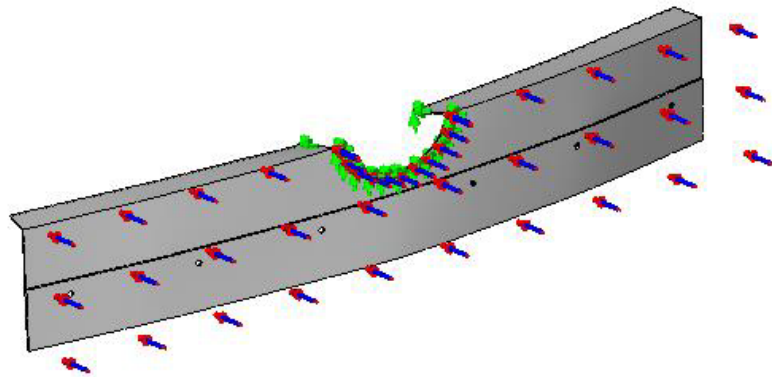
Simulación Computacional del sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”

cuchilla-Fuerza en la cuchilla :: Static Displacement
Units : m Deformation Scale 1 : 0.448927



C. Desplazamiento en la cuchilla recta

cuchilla-Fuerza en la cuchilla :: Deformed Shape
Deformed Shape Deformation Scale 1 : 0.448927



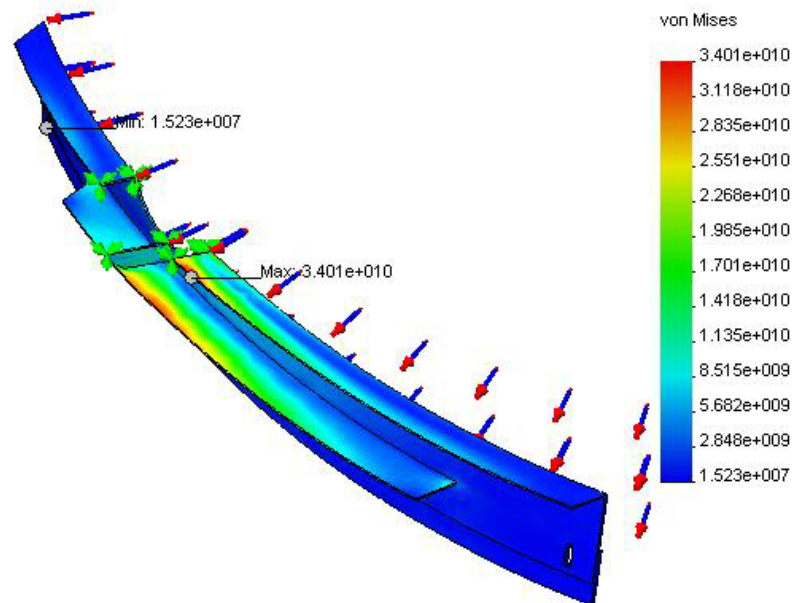
D. Deformación en la cuchilla recta

Efraín Camejo Lores

Simulación Computacional del sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara"

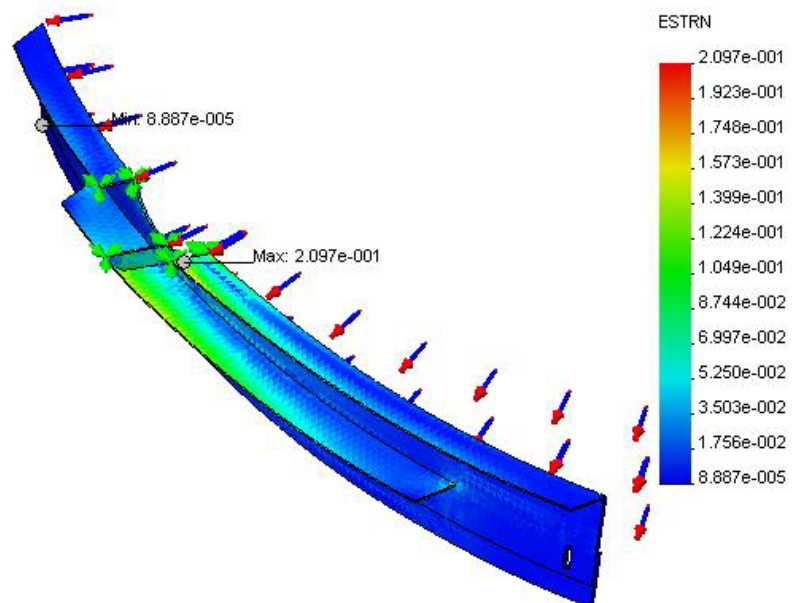
ANEXO 10 MODELOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE LA CUCHILLA CURVA

CUCHILLA curva-Fuerza en la cuchilla curva :: Static Nodal Stress
Units : N/m² Deformation Scale 1 : 0.118086



A. Tensión en la cuchilla curva

CUCHILLA curva-Fuerza en la cuchilla curva :: Static Strain
Deformation Scale 1 : 0.118086

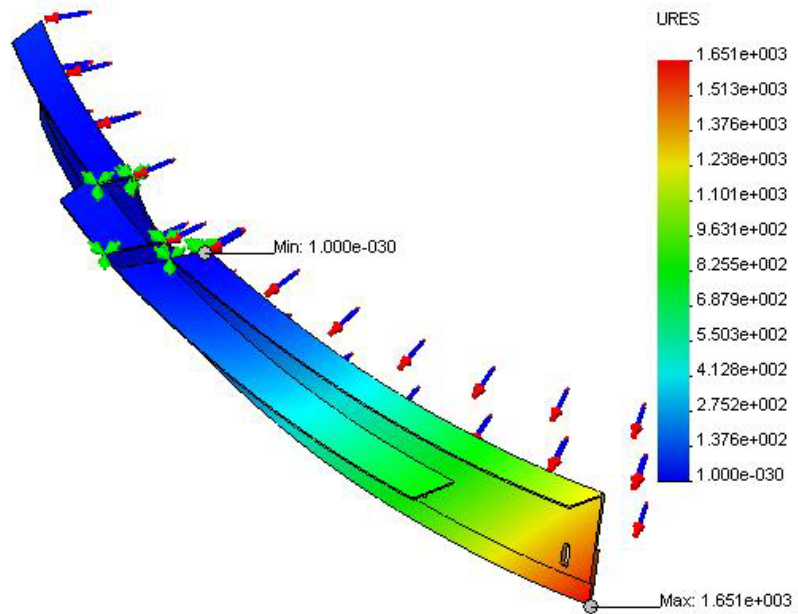


B. Fuerza en la cuchilla curva

Efraín Camejo Lores

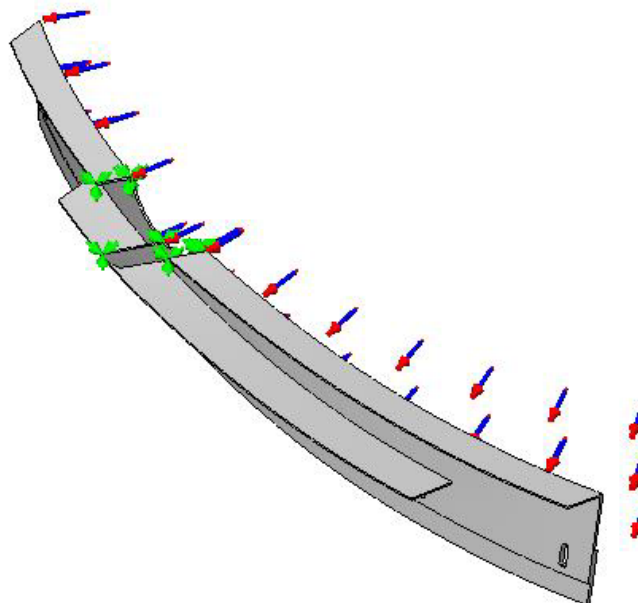
Simulación Computacional del sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara"

CUCHILLA curva-Fuerza en la cuchilla curva :: Static Displacement
Units : mm Deformation Scale 1 : 0.118086



C. Desplazamiento en la cuchilla curva

CUCHILLA curva-Fuerza en la cuchilla curva :: Deformed Shape
Deformed Shape Deformation Scale 1 : 0.118086



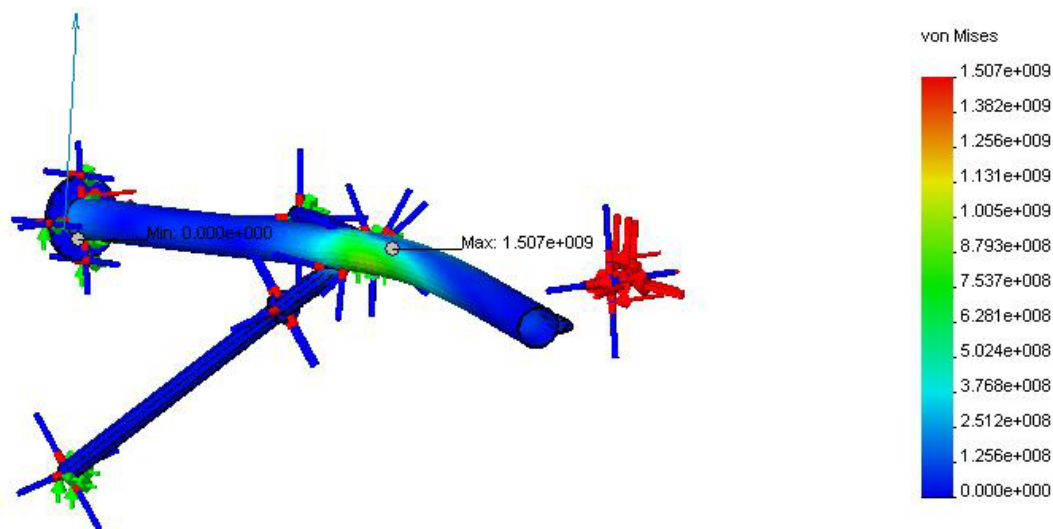
D. Deformación en la cuchilla curva

Efraín Camejo Lores

Simulación Computacional del sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara"

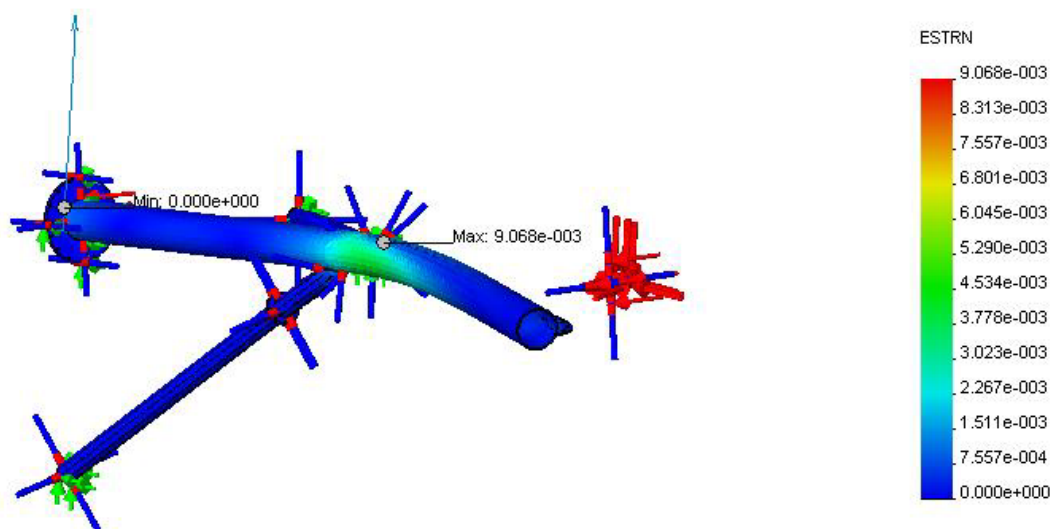
ANEXO 10 MODELOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE LOS BRAZOS DE SUSPENSIÓN

Brazo de Suspension para Simular dechino-Brazo de Suspensión :: Static Nodal Stress
Units : N/m² Deformation Scale 1 : 6.37837



A. Tensión en el brazo de suspensión

Brazo de Suspension para Simular dechino-Brazo de Suspensión :: Static Strain
Deformation Scale 1 : 6.37837

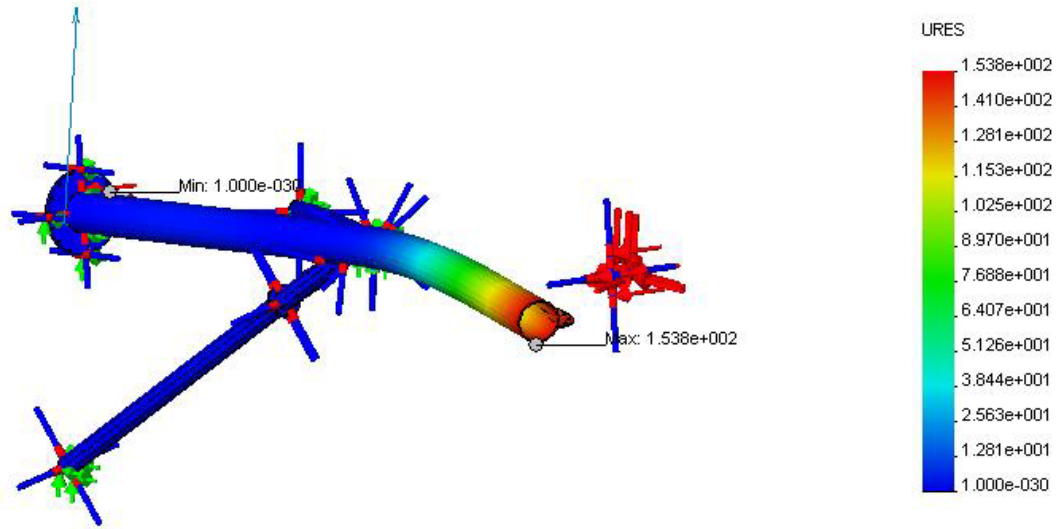


B. Fuerza en el brazo de suspensión

Efraín Camejo Lores

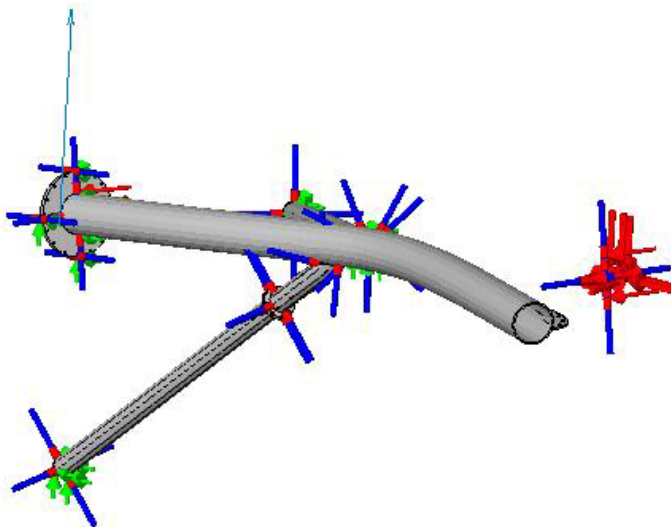
Simulación Computacional del sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara"

Brazo de Suspension para Simular dechino-Brazo de Suspensión :: Static Displacement
Units : mm Deformation Scale 1 : 6.37837



C. Desplazamiento en el brazo de suspensión

Brazo de Suspension para Simular dechino-Brazo de Suspensión :: Deformed Shape
Deformed Shape Deformation Scale 1 : 6.37837



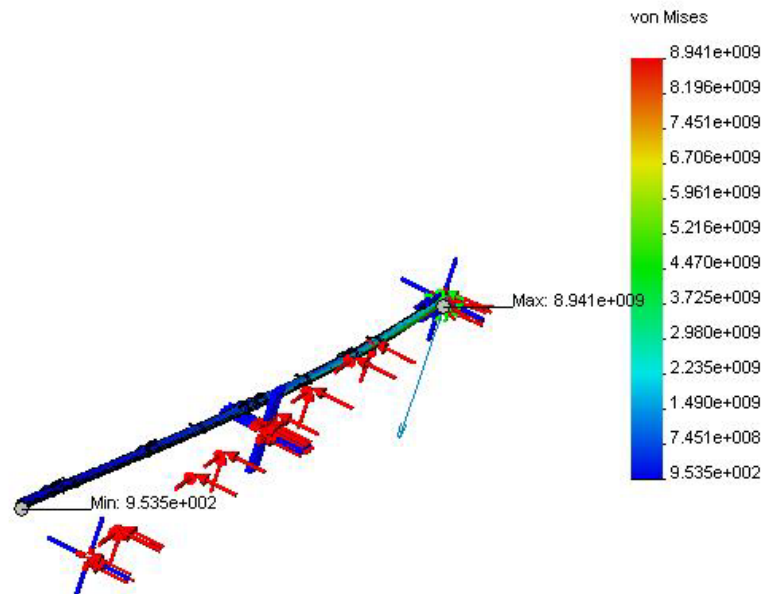
D. Desplazamiento en el brazo de suspensión

Efraín Camejo Lores

Simulación Computacional del sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara"

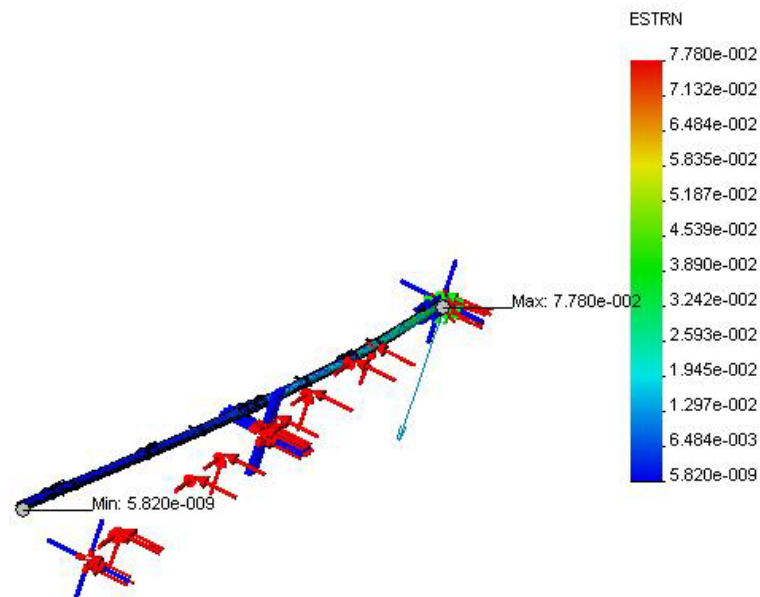
ANEXO 10 MODELOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE LOS BRAZOS DE ARRASTRE

Brazo de Arrastre sat-Brazo de Arrastre :: Static Nodal Stress
Units : N/m² Deformation Scale 1 : 0.0659295



A. Tensiones en el brazo de arrastre

Brazo de Arrastre sat-Brazo de Arrastre :: Static Strain
Deformation Scale 1 : 0.0659295

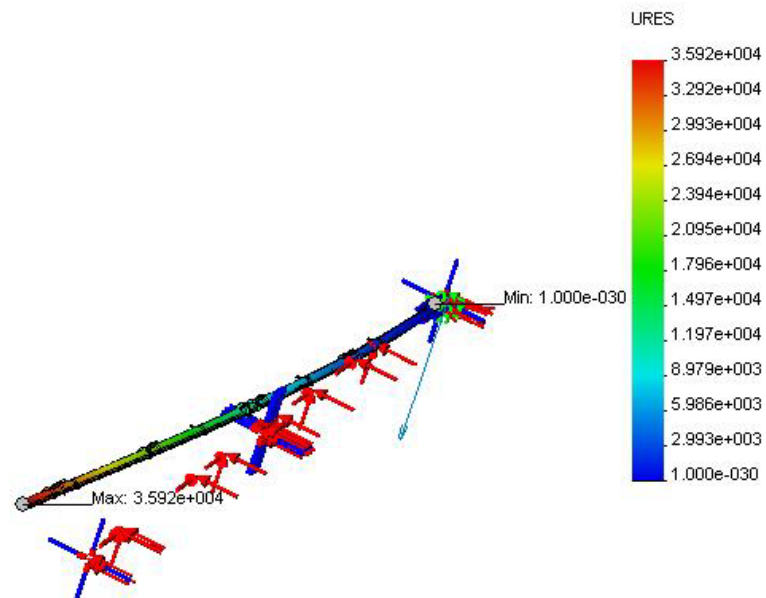


B. Fuerzas en el brazo de arrastre

Efraín Camejo Lores

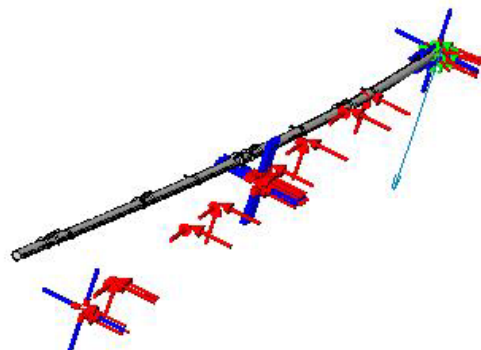
Simulación Computacional del sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara"

Brazo de Arrastre sat-Brazo de Arrastre :: Static Displacement
Units : mm Deformation Scale 1 : 0.0659295



C. Desplazamiento en el brazo de arrastre

Brazo de Arrastre sat-Brazo de Arrastre :: Deformed Shape
Deformed Shape Deformation Scale 1 : 0.0659295



D. Deformación en el brazo de arrastre

Efraín Camejo Lores

Simulación Computacional del sistema cable-torque del Sedimentador 120 A de la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara"