



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

"Análisis, Simulación y Evaluación de los Esfuerzos y  
Deformaciones, entre el Método Analítico y el Método de  
Elementos Finitos, de una Compuerta Tipo Vagón para Desagüe  
de Fondo"

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**  
(Tesis de Grado)

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

David Ernesto Mera Orlando

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2015

## **AGRADECIMIENTO**

A mi madre y mi Padre que  
hicieron posible mi  
educación y me guiaron en  
cada momento de mi vida.

Al Ing. Federico Camacho,  
Director del TFG, por su  
invaluable ayuda.

# DEDICATORIA

A MIS PADRES

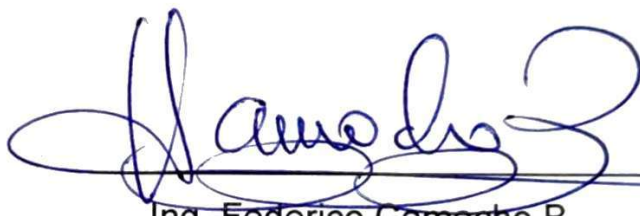
A MIS HERMANOS

A MI ESPOSA

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Jorge Duque R.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE



Ing. Federico Camacho B.  
DIRECTOR DEL TFG



Ing. Gonzalo Almeida P.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido desarrollado en el presente Trabajo Final de Graduación me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in black ink, consisting of a series of loops and flourishes, positioned above a horizontal line.

David Ernesto Mera Orlando

## RESUMEN

En este trabajo se realizó la comparación de los resultados de los esfuerzos y deformaciones ocasionados por las fuerzas hidrostáticas sobre una compuerta tipo vagón para desagüe de fondo, entre el método analítico y el método de elementos finitos, con la finalidad de determinar la precisión que existe entre ambos estudios.

La metodología que se empleó para desarrollar el método analítico, consiste en la investigación bibliográfica de los estándares y normas técnicas desarrolladas por la norma NBR 8883, Cálculo y manufactura de compuertas hidráulicas y la DIN – 19704, Hydraulic Steel Structures: Criteria For Design And Calculation, referencias técnicas especializadas en el tema hidráulico.

El método de elementos finitos se fundamenta en el diseño y simulación de la compuerta tipo vagón. El diseño se centra específicamente en la compuerta tipo vagón, lo cual incluye: la placa frontal, vigas, ruedas y estructura; Dicho diseño se lo desarrolló en el software comercial SolidWorks®, fundamentándose en las normas antes mencionadas.

La simulación se basa en el análisis de los esfuerzos y deformaciones sobre la compuerta tipo vagón, ocasionados por las fuerzas hidrostáticas, a través del software comercial de elementos finitos ANSYS®.

Es importante recalcar, que la precisión entre el método analítico y el método de elementos finitos se verá afectada directamente por el tipo y la calidad del mallado para modelar la compuerta vagón para desagüe de fondo, siendo esta afirmación la hipótesis en la cual se basa esta tesis.

## ÍNDICE GENERAL

|                                                                     | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| RESUMEN.....                                                        | ii   |
| ÍNDICE GENERAL.....                                                 | iv   |
| ABREVIATURAS.....                                                   | viii |
| SIMBOLOGÍA.....                                                     | ix   |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                              | xi   |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                                               | xiv  |
| ÍNDICE DE PLANOS.....                                               | xv   |
| INTRODUCCIÓN.....                                                   | 1    |
| <br><b>CAPÍTULO 1</b>                                               |      |
| 1. GENERALIDADES.....                                               | 4    |
| 1.1. Objetivos.....                                                 | 4    |
| 1.1.1. Objetivo general.....                                        | 4    |
| 1.1.2. Objetivos específicos.....                                   | 4    |
| 1.2. Descripción general de las compuertas de desagüe de fondo..... | 5    |
| 1.2.1. Tipo de compuertas para desagüe de fondo.....                | 5    |
| 1.2.2. Aplicaciones.....                                            | 9    |
| 1.2.3. Factores de influencia.....                                  | 15   |
| 1.3. Normas de diseño y construcción de compuertas tipo vagón.....  | 18   |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.3.1. DIN 19704, Criterio para cálculo y diseño.....                    | 21 |
| 1.3.2. NBR 8883, Cálculo y manufactura de compuertas<br>Hidráulicas..... | 24 |
| 1.3.3. AWWA C560-07, Compuertas tipo vagón.....                          | 23 |
| 1.4. Selección de la compuerta a analizar.....                           | 27 |
| 1.4.1. Definición de parámetros de trabajo.....                          | 27 |
| 1.4.2. Definición de las capacidades de la compuerta.....                | 31 |
| 1.4.3. Descripción de la compuerta a modelar.....                        | 34 |

## **CAPÍTULO 2**

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2. ESTUDIO ANALÍTICO DE LOS ESFUERZOS Y DEFORMACIÓN SOBRE<br>LA COMPUERTA..... | 36 |
| 2.1. Ingeniería conceptual de la compuerta.....                                | 36 |
| 2.1.1. Diseño de forma.....                                                    | 36 |
| 2.1.2. Diseño estructural.....                                                 | 39 |
| 2.2. Análisis de fuerzas hidrostáticas.....                                    | 42 |
| 2.2.1. Cálculo de la presión hidrostática sobre la compuerta.....              | 42 |
| 2.2.2. Cálculo del espesor de la placa frontal.....                            | 45 |
| 2.2.3. Número de vigas.....                                                    | 45 |
| 2.2.4. Cálculo de la posición de las vigas horizontales.....                   | 47 |
| 2.2.5. Diseño de las vigas.....                                                | 49 |
| 2.2.6. Diseño de las ruedas.....                                               | 52 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3. Análisis de los esfuerzos y deformación provocados por la<br>presión hidrostática sobre la compuerta..... | 68 |
| 2.3.1. Placa frontal.....                                                                                      | 68 |
| 2.3.2. Cálculo de la flexión en la plancha frontal.....                                                        | 71 |
| 2.3.3. Cálculo del esfuerzo en las vigas.....                                                                  | 73 |
| 2.4. Análisis de fuerzas hidrodinámicas.....                                                                   | 77 |
| 2.4.1. Cálculo de a presión hidrodinámica sobre la compuerta.....                                              | 77 |

### **CAPÍTULO 3**

#### **3. MODELADO CON EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| DE LA COMPUERTA .....                                                                                               | 86  |
| 3.1. Tipo de elementos finitos.....                                                                                 | 86  |
| 3.2. Tipo de mallado.....                                                                                           | 89  |
| 3.3. Proceso de análisis por elementos finitos.....                                                                 | 104 |
| 3.4. Simulación de fuerzas hidrostáticas.....                                                                       | 109 |
| 3.4.1. Análisis de la presión hidrostática sobre la compuerta ....                                                  | 109 |
| 3.4.2. Análisis de los esfuerzos y deformaciones provocados<br>por la presión hidrostática sobre la compuerta ..... | 119 |

### **CAPÍTULO 4**

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 4. EVALUACIÓN DE MÉTODOS.....         | 126 |
| 4.1. Método analítico.....            | 126 |
| 4.2. Método de elementos finitos..... | 129 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 4.3. Resultados..... | 140 |
|----------------------|-----|

## **CAPÍTULO 5**

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 144 |
|----------------------------------------|-----|

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

|       |                                            |
|-------|--------------------------------------------|
| DIN   | DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG             |
| AISI  | AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE          |
| AWWA  | American Water Works Association           |
| ABNT  | Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| ASME  | AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS   |
| FEM   | Finite Element Methods                     |
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral   |
| ASTM  | American Society for Testing and Materials |
| CAE   | Computer assisted engineering              |
| CAD   | Computer assisted design                   |
| CEI   | Comisión Electrotécnica Internacional      |
| NT    | Norma Técnica                              |

## SIMBOLOGIA

|                   |                                                        |
|-------------------|--------------------------------------------------------|
| $Q$               | Caudal                                                 |
| $\rho$            | Densidad                                               |
| $\gamma$          | Peso específico                                        |
| Kg                | Kilo gramo                                             |
| g                 | Gravedad                                               |
| KN                | Kilo Newton                                            |
| N                 | Newton                                                 |
| Pa                | Pascal                                                 |
| Rad               | Radianes                                               |
| MPa               | Mega pascal                                            |
| m                 | Metro                                                  |
| cm                | Centímetro                                             |
| mm                | Milímetro                                              |
| $m^2$             | Metros cuadrados                                       |
| $m^3$             | Metros cúbicos                                         |
| E                 | Modulo de elasticidad                                  |
| I                 | Inercia                                                |
| B                 | Ancho de compuerta                                     |
| h                 | Altura de compuerta                                    |
| H                 | Cabezal de agua                                        |
| W                 | Fuerza sobre la compuerta                              |
| $P_{m\grave{a}x}$ | Presión máxima sobre la compuerta                      |
| e                 | Centroide donde se ejerce la mayor fuerza hidrostática |
| N                 | Número de vigas                                        |
| $\sigma_{adm}$    | Esfuerzo admisible                                     |
| $\beta$           | Factor para cálculo de altura de vigas                 |
| $h_k$             | Altura de porciones de agua de cada viga               |
| $y_k$             | Posición de vigas                                      |

|                 |                                                                           |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $t$             | Espesor del alma de la viga                                               |
| $F$             | Carga sobre cada viga                                                     |
| $\tau_{adm}$    | Esfuerzo cortante admisible                                               |
| $h_v$           | Altura de la viga                                                         |
| $\theta$        | Desplazamiento angular en la viga                                         |
| $L$             | Longitud de soporte                                                       |
| $Pr$            | Fuerza sobre cada viga                                                    |
| $\theta_r$      | Diámetro de rueda                                                         |
| $\sigma_c$      | Esfuerzo sobre la pista                                                   |
| $\varepsilon_p$ | Espesor de la viga                                                        |
| $Ec$            | Flotabilidad de la compuerta                                              |
| $Fr$            | Fuerza de fricción en las rudas                                           |
| $F_{sl}$        | Fuerza de fricción en los sellos laterales                                |
| $F_{ss}$        | Fuerza de fricción en el sello superior                                   |
| $F_h$           | Fuerza hidrodinámica                                                      |
| $a, b$          | Dimensiones mínimas vertical y horizontal de la compuerta respectivamente |
| $t_p$           | Espesor de la plancha frontal                                             |
| $f_p$           | Flexión de la plancha frontal                                             |
| $C$             | Distancia del eje neutro de la viga al extremo                            |
| $\sigma'$       | Esfuerzo de Von Misses                                                    |
| $K_t, K_b$      | Coeficientes de la fuerza downpull                                        |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                      | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1.1. Compuerta tipo basculante [12].....                                                                                      | 6    |
| Figura 1.2. Compuerta tipo cilíndrica [12].....                                                                                      | 7    |
| Figura 1.3. Compuerta tipo lagarto [12].....                                                                                         | 8    |
| Figura 1.4. Compuerta tipo Stoney [12].....                                                                                          | 9    |
| Figura 1.5. Compuerta tipo vagón [12].....                                                                                           | 9    |
| Figura 1.6. DIN 19704-1 [11].....                                                                                                    | 21   |
| Figura 1.7. DIN 19704-2 [11].....                                                                                                    | 22   |
| Figura 1.8. DIN 19704-3 [11].....                                                                                                    | 22   |
| Figura 1.9. Norma técnica NBR-8883 [6].....                                                                                          | 26   |
| Figura 1.10. Caudal vs cabezal.....                                                                                                  | 33   |
| Figura 2.1. Tipos de sellos de goma [11].....                                                                                        | 38   |
| Figura 2.2. Diagrama de presión sobre compuertas tipo vagón sumergidas<br>[12].....                                                  | 43   |
| Figura 2.3. Compuertas planas sumergidas- División del diagrama de<br>presión en 4 partes iguales [12].....                          | 48   |
| Figura 2.4. Modelo matemático para una viga en Flexión [12].....                                                                     | 53   |
| Figura 2.5. Área de contacto Rueda-Pista [21].....                                                                                   | 55   |
| Figura 2.6. Sello tipo nota musical [19].....                                                                                        | 63   |
| Figura 2.7. Separaciones mínimas en la compuerta.....                                                                                | 69   |
| Figura 2.8. Modelo matemático de la compuerta [12].....                                                                              | 70   |
| Figura 2.9. Representación de la simulación de los esfuerzos en la viga..                                                            | 74   |
| Figura 2.10. Esfuerzos de tensión y esfuerzos Cortantes [18].....                                                                    | 74   |
| Figura 2.11. Compuerta parcialmente abierta [12].....                                                                                | 77   |
| Figura 2.12. Parámetros geométricos para túnel de la compuerta [12].....                                                             | 79   |
| Figura 2.13. Grado de inclinación de la compuerta.....                                                                               | 81   |
| Figura 2.14. Variación de Kb vs Apertura de compuerta para varios grados<br>de inclinación en la parte inferior de la compuerta..... | 82   |
| Figura 2.15. Fuerza downpull vs % Apertura para varios ángulos de<br>inclinación.....                                                | 85   |
| Figura 3.1. Elemento lineal [18].....                                                                                                | 88   |
| Figura 3.2. Elemento plano 2D [18].....                                                                                              | 88   |
| Figura 3.3. Elementos tridimensionales [18].....                                                                                     | 89   |
| Figura 3.4. Densidad de malla [18].....                                                                                              | 90   |

|              |                                                                                    |     |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.5.  | Nueva malla luego de refinar la malla original alrededor del círculo [18] .....    | 91  |
| Figura 3.6.  | Malla hexaédrica de un sistema de frenos, usando combinaciones de mallado [3]..... | 93  |
| Figura 3.7.  | Mallado tipo Cut Cell Cartesian [3].....                                           | 94  |
| Figura 3.8.  | Mallado tipo barrido automático [3].....                                           | 95  |
| Figura 3.9.  | Mallado tipo barrido de sólidos finos [3].....                                     | 96  |
| Figura 3.10. | Mallado tipo barrido multi zonas [3].....                                          | 97  |
| Figura 3.11. | Mallado tipo Hexaédrico puro [3].....                                              | 98  |
| Figura 3.12. | Mallado tetraédrico [3].....                                                       | 99  |
| Figura 3.13. | Tipo de mallado Patch Conforming [3].....                                          | 100 |
| Figura 3.14. | Tipo de mallado Patch Independent [3].....                                         | 101 |
| Figura 3.15. | Proceso de análisis por elementos finitos [3].....                                 | 106 |
| Figura 3.16. | Modelo geométrico de la compuerta.....                                             | 106 |
| Figura 3.17. | Ejemplo de densidad de mallado.....                                                | 107 |
| Figura 3.18. | Fuerzas aplicadas sobre las vigas horizontales [9] .....                           | 107 |
| Figura 3.19. | Análisis de resultados de la simulación en ANSYS.....                              | 108 |
| Figura 3.20. | Mallado tetraédrico Patch independent.....                                         | 111 |
| Figura 3.21. | Mallado tetraédrico Patch conforming.....                                          | 111 |
| Figura 3.22. | Mallado Hex Dominant all quad.....                                                 | 112 |
| Figura 3.23. | Mallado Sweep all quad.....                                                        | 112 |
| Figura 3.24. | Mallado tetraédrico Patch conforming.....                                          | 114 |
| Figura 3.25. | Mallado tetraédrico Patch independent.....                                         | 114 |
| Figura 3.26. | Mallado Hex Dominant quad/tri.....                                                 | 115 |
| Figura 3.27. | Mallado Hex Dominant all quad.....                                                 | 115 |
| Figura 3.28. | Elementos hexaédricos.....                                                         | 117 |
| Figura 3.29. | Elementos tetraédricos.....                                                        | 117 |
| Figura 3.30. | Mallado Tetraédrico .....                                                          | 118 |
| Figura 3.31. | Mallado Hexaédrico quad/tri.....                                                   | 118 |
| Figura 3.32. | Elementos hexaédricos.....                                                         | 119 |
| Figura 3.33. | Simulación del Factor de seguridad en la Viga.....                                 | 120 |
| Figura 3.34. | Simulación del Esfuerzo de Von Misses en la Viga .....                             | 120 |
| Figura 3.35. | Simulación de la Deformación máxima en la Viga.....                                | 121 |
| Figura 3.36. | Simulación de la Deformación máxima en el Conjunto Rueda Eje.....                  | 122 |
| Figura 3.37. | Simulación del Esfuerzo máximo en el Conjunto Rueda Eje .....                      | 122 |
| Figura 3.38. | Simulación del Factor de seguridad en el Conjunto Rueda Eje.....                   | 123 |

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.9. Simulación de la Deformación máxima en la Compuerta Vagón.....                                                       | 124 |
| Figura 3.40. Simulación del Esfuerzo máximo en la Compuerta Vagón....                                                            | 124 |
| Figura 3.41. Simulación del Factor de seguridad en la Compuerta Vagón.....                                                       | 125 |
| Figura 4.1. Resultados de los Esfuerzos de Von Misses de las simulaciones con los diferentes tipos de mallado en la viga..       | 131 |
| Figura 4.2. Resultados de los Factores de seguridad de las simulaciones con los diferentes tipos de mallado en la viga.....      | 132 |
| Figura 4.3. Resultados de las Máximas deformaciones de las simulaciones con los diferentes tipos de mallado en la viga.....      | 133 |
| Figura 4.4. Resultados de los Esfuerzos cortantes de las simulaciones con los diferentes tipos de mallado en la rodadura.....    | 136 |
| Figura 4.5. Resultados de los Factores de seguridad de las simulaciones con los diferentes tipos de mallado en la rodadura.....  | 137 |
| Figura 4.6. Resultados de los Esfuerzos de las simulaciones con los diferentes tipos de mallado en la compuerta.....             | 138 |
| Figura 4.7. Resultados de las Deformaciones máximas de las simulaciones con los diferentes tipos de mallado en la compuerta..... | 139 |
| Figura 4.8. Resultados de los Factores de seguridad de las simulaciones con los diferentes tipos de mallado en la compuerta..... | 140 |

## INDICE DE TABLAS

|          | Pág.                                                                                      |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tabla 1  | Coeficientes para esfuerzos admisibles en elementos<br>estructurales [12]..... 46         |
| Tabla 2  | Coeficientes y alturas de posicionamiento de las vigas sobre la<br>compuerta..... 49      |
| Tabla 3  | Fuerza aplicada sobre cada viga..... 50                                                   |
| Tabla 4  | Altura de vigas horizontales [12]..... 51                                                 |
| Tabla 5  | Máximos desplazamientos angulares en las vigas [12]..... 54                               |
| Tabla 6  | Esfuerzos Admisibles en elementos mecánicos [12]..... 58                                  |
| Tabla 7  | Dimensiones estándares de pernos y tuercas [13]..... 59                                   |
| Tabla 8  | Composición química de los aceros recomendados [13]..... 59                               |
| Tabla 9  | Dimensiones del sello lateral..... 63                                                     |
| Tabla 10 | Coeficientes – k [12] ..... 70                                                            |
| Tabla 11 | Esfuerzos en la plancha frontal..... 71                                                   |
| Tabla 12 | Coeficiente de Timoshenko [12]..... 72                                                    |
| Tabla 13 | Coeficientes de descarga para compuertas de elevación<br>vertical [12]..... 83            |
| Tabla 14 | Datos estadísticos de los resultados de las simulaciones<br>de la viga ..... 134          |
| Tabla 15 | Precisión de Resultados entre el Método FEM y el Método<br>Analítico..... 141             |
| Tabla 16 | Resultados de las simulaciones FEM del conjunto Eje Rueda,<br>con y sin soporte ..... 142 |

## INDICE DE PLANOS

(Ver en Apéndices)

|         |                                                  |
|---------|--------------------------------------------------|
| Plano 1 | Compuerta tipo Vagón: Conjunto Rueda-Eje-Soporte |
| Plano 2 | Compuerta tipo Vagón: Viga IPN 220               |
| Plano 3 | Compuerta tipo Vagón: Compuerta                  |
| Plano 4 | Compuerta tipo Vagón: Compuerta                  |

## INTRODUCCIÓN

La compuerta vagón es aquella cuyo tablero o plancha frontal se apoya y se mueve sobre ruedas instaladas simétricamente a ambos lados de la estructura portante de la misma. Estas ruedas son las que transmiten la carga hidráulica de la compuerta y a su vez a los caminos de rodadura fijados en la obra civil.

En el capítulo 1 se describen los diferentes tipos de compuertas planas que transmiten cargas a las estructuras de la obra civil que existen, como son la tipo oruga y las de tipo Stoney. Estos dos tipos de compuertas han caído en desuso por las frecuentes averías habidas a causa de su sistema de izaje de cadenas y rodillos.

Una vez que se elige el tipo de compuerta a estudiar, en el capítulo 2 se diseñarán los diferentes elementos estructurales y mecánicos que conforman la misma. La plancha frontal está constituida por una estructura revestida por una chapa de superficie plana, a su vez la estructura, está formada por varias vigas principales horizontales pudiendo ser reforzadas con cuadernas verticales. El tablero dispone de unos alojamientos para ubicar los ejes de las ruedas que transmiten los esfuerzos a los hierros fijos. Estos alojamientos deben ser mecanizados con precisión a fin de mantener la alineación de las ruedas instaladas en los ejes. La plancha frontal se

diseña con teorías de la elasticidad, según las normas de diseño especializadas del tema. Las ruedas deben ser iguales e intercambiables, se utilizan ruedas cilíndricas sobre carriles planos, aunque pueden ser con superficie de rodadura combada o esférica siempre que se eviten la concentración de cargas en los bordes y que las presiones de contacto de Hertz no superen las indicadas en la norma DIN 19704. La metodología de diseño y selección de las ruedas es en base a los Esfuerzos de Hertz. Los ejes de las ruedas deberán ser de acero inoxidable, o bien de acero al carbono con un recubrimiento de cromo-duro mecanizado y pulido. La sistemática para el diseño de los ejes y las vigas es mediante conocimientos básicos de la Mecánica de Sólidos.

Con estos antecedentes, en el capítulo 3 se aplicará la metodología del análisis de elementos finitos, para luego proceder a simular las diferentes fuerzas sobre la misma. El diseño en 3D se lo realiza con el software Solidworks, el cual permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. La simulación se la realiza mediante ANSYS Inc. El cual es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elementos finitos para estructuras y volúmenes finitos para fluidos. El software desarrolla y presta

soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real.

En el capítulo 4, se realiza la evaluación y comparación de ambos métodos de análisis, calculando así la precisión que tiene el estudio por elementos finitos.

Finalmente en el capítulo 5 se darán las respectivas conclusiones y recomendaciones del análisis propuesto.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1. Objetivos**

#### **1.1.1. Objetivo General**

Demostrar que la precisión entre el método analítico y el método de elementos finitos, se verá afectada directamente por el tipo y la calidad del mallado para modelar la compuerta vagón para desagüe de fondo.

#### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Definir las capacidades de la compuerta tipo vagón, tales como dimensiones y parámetros de trabajo.
- Diseñar la compuerta tipo Vagón para desagüe de fondo

- Aplicar las normas respectivas para el diseño de la compuerta
- Realizar el cálculo analítico de las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas sobre la compuerta
- Simular las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas mediante elementos finitos sobre la compuerta
- Evaluar y comparar los esfuerzos y deformaciones sobre la compuerta tipo vagón.

## **1.2. Descripción General de las Compuertas de Desagüe de Fondo**

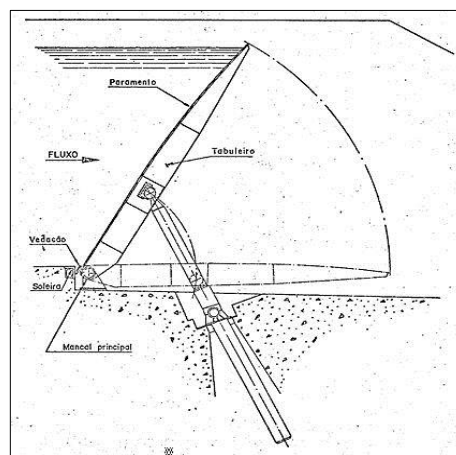
### **1.2.1. Tipo de Compuertas para Desagüe de Fondo**

Las compuertas son equipos mecánicos utilizados para: control de flujos de agua, control de inundaciones, proyectos de irrigación, crear reservas de agua, sistemas de drenaje, proyectos de aprovechamiento de suelo, plantas de tratamiento de agua, incrementar capacidad de reserva de las represas, etc. Existen diferentes tipos y pueden tener diferentes clasificaciones, según su forma, función y su movimiento.

Las diferentes formas o tipos de compuertas a utilizar dependerán principalmente el tamaño y forma del orificio en donde se ubican,

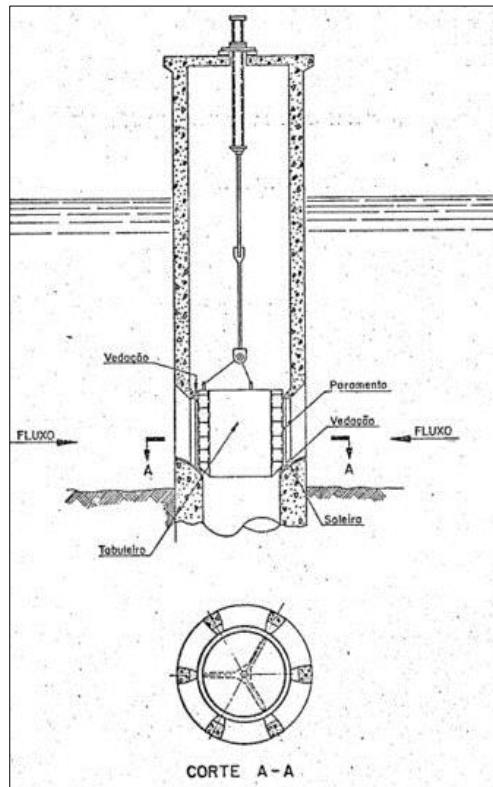
de la Presión hidrostática, del espacio disponible, del mecanismo de apertura y de las condiciones particulares de operación.

La Compuerta basculante puede ser utilizada tanto en la cima del vertedero de una presa como instalado en el fondo de un río o canal.



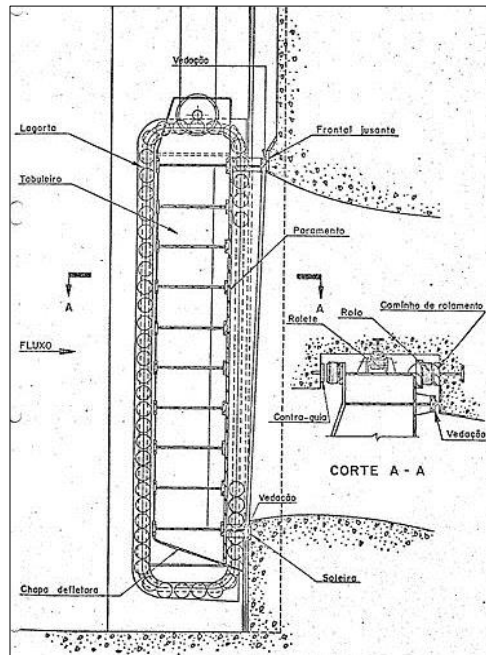
**FIGURA 1.1. COMPUERTA TIPO BASCULANTE [12]**

Las compuertas cilíndricas se utilizan para descargas en presión permitiendo la colocación de la sección de toma a cualquier profundidad, en un embalse. En el mismo pozo se pueden disponer tomas de agua a diversas alturas. Se acopla fácilmente a una tubería de salida.



**FIGURA 1.2. COMPUERTA TIPO CILÍNDRICA [12]**

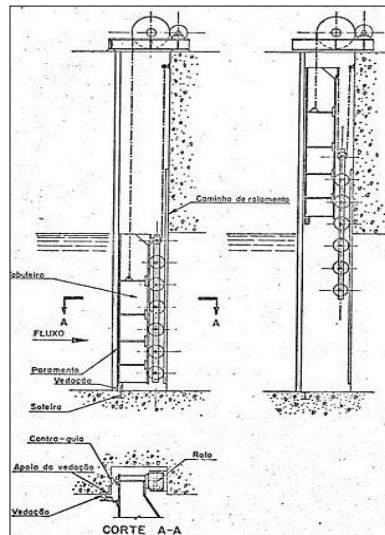
Las compuertas tipo "lagarto" son utilizadas para abrir o cerrar tomas en presión para descargas de fondo o para centrales hidroeléctricas.



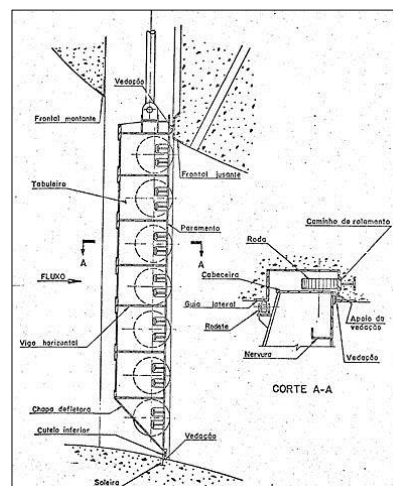
**FIGURA 1.3. COMPUERTA TIPO LAGARTO [12]**

Las compuertas de tipo "Stoney" son utilizadas para tomas en presión para descargas de fondo o para la toma de una central hidroeléctrica. (Ver Figura 1.4)

La compuerta tipo vagón es un tipo de compuerta hidráulica utilizado en descargas de fondos y bocatomas de presas. Es accionada por un pistón hidráulico o neumático. (Ver Figura 1.5)



**FIGURA 1.4. COMPUERTA TIPO STONEY [12]**



**FIGURA 1.5. COMPUERTA TIPO VAGÓN [12]**

### 1.2.2. Aplicaciones

Las diferentes formas de las compuertas dependen de su aplicación, el tipo de compuerta a utilizar dependerá principalmente

del tamaño y forma del orificio, del cabezal estático, del espacio disponible, del mecanismo de apertura y de las condiciones particulares de operación.

### **Control de flujo de agua**

Durante la temporada de abundantes lluvias, una gran cantidad de agua fluye hacia los embalses, generando que la fuerza tractiva de la corriente sobre el lecho del cauce produzca el desprendimiento de partículas de suelo de pequeño y gran tamaño.

En consecuencia de las grandes velocidades y los objetos transportados por el fenómeno provocan socavación del cauce y grandes destrozos a su paso dañando infraestructura subterránea (ductos); ocasionando pérdidas económicas, así como inseguridad a la población.

Diseñan presas de distintos tipos de material, concreto, mampostería y enrocamiento, el cual se define por las condiciones particulares de cada sitio, constructivas, accesos, geología, etc.

Sin embargo e independientemente del tipo de materiales con el que ha de ser proyectada la obra, dicha estructura debe ser

diseñada de tal forma que resista los esfuerzos que la corriente produce en el momento de un evento extraordinario.

### **Control de inundaciones**

Las medidas de control de inundaciones, son aquellas acciones que se toman para prevenir y evitar las inundaciones y una vez acaecidas las medidas para minimizar los daños.

Los orígenes de las inundaciones pueden ser muy variados, pudiéndose distinguir, en un principio, los de origen marino o fluvial.

Cuando una tormenta aporta más agua al terreno que la que éste puede absorber se produce un efecto de escorrentía. Esto puede ocurrir porque el aporte es torrencial, por ejemplo en una gota fría, o por factores que acrecientan los efectos de las fuertes tormentas, por ejemplo, la deforestación y las ocupaciones de las riberas de los cursos de agua y de los cauces reservados para las avenidas.

#### **Medidas Proactivas**

- Dique
- Reforestación
- Sistema de drenaje
- Rambla

### Medidas Reactivas

- Desagües
- Barrancos
- bombeo

### **Proyectos de irrigación**

Siendo Ecuador un país agricultor, es de suma importancia tener proyectos de irrigación significantes, los cuales aparte de servir para el crecimiento de la agricultura, también es un potencial para la creación de empleos.

Ecuador es un centro de atención del desarrollo agroindustrial del continente. Las condiciones favorables de clima, suelo y agua permiten, considerando las ventajas competitivas de la agricultura en cultivos “no tradicionales”, aprovechar las oportunidades y tendencias a nivel mundial.

La puesta en marcha de importantes proyectos de irrigación permitirá consolidar las bases para el desarrollo del Ecuador, no solo en la agroindustria pero también en otras actividades económicas como el comercio, la industria, el transporte, la

educación, vivienda, turismo, etc., transformando la base productiva de la región.

### **Crear reservas de agua**

Las características físicas principales de una reserva de agua o embalse, son las curvas cota-volumen, la curva cota-superficie inundada y el caudal regularizado.

Los embalses generados al construir una presa tienen distintos objetivos, tales como:

- Regular el caudal de un río o arroyo, almacenando el agua de los períodos húmedos para utilizarlos durante los períodos más secos para el riego, para el abastecimiento de agua potable, para la generación de energía eléctrica, para permitir la navegación o para diluir poluentes.
- Contener los caudales extremos de las avenidas o crecidas.
- Crear una diferencia de nivel para generar energía eléctrica, mediante una central hidroeléctrica;
- Crear espacios para esparcimiento y deportes acuáticos.

### **Sistemas de drenaje**

Estas medidas son necesarias para permitir que la construcción se ejecute en condiciones secas. El túnel de desagüe puede adaptarse temporalmente para dicho propósito durante la construcción, y después emplearse como una estructura de descarga cuando la presa este completa. Si no existe tal túnel de capacidad adecuada, es necesario tomar medidas alternativas adicionales, que pueden involucrar la construcción de ataguías temporales aguas arriba o aguas abajo o, en el caso de presas de concreto, omitir un bloque para dejar una brecha temporal o túnel a través de la estructura.

En el interior de cualquier presa siempre se presentan infiltraciones. Los flujos de infiltración y sus presiones internas resultantes deben dirigirse y controlarse. Los sistemas de drenaje internos para este propósito son un aspecto de todas las presas modernas. En las presas de relleno, el drenaje se efectúa mediante zonas permeables localizadas apropiadamente, las cuales conducen a tapices de drenaje horizontales o desagües. En las presas de concreto se forman drenajes verticales en el interior del paramento de aguas arriba, y la presión de filtración se alivia en una galería interna o en un desagüe de drenaje. En al caso de

presas de arco, las presiones de filtración en la roca de los estribos se alivian con frecuencia por sistemas de drenaje perforados y/o ventanas de drenaje o túneles.

### **1.2.3. Factores de influencia**

Una de las más importantes consideraciones del ingeniero, es la selección del tipo de compuerta más conveniente para la instalación hidráulica. No hay una rutina establecida para esto, la selección debería ser basada en un completo análisis de los factores que influyen como:

- **Peso**

Dependerá del tamaño, del diseño y de los distintos materiales a utilizar en la compuerta en cuestión.

- **Manufactura**

La fabricación de las compuertas hidráulicas se rigen por las normas NBR-8883, DIN-19704, Hydraulic Steel Structures: Criteria For Design And Calculation y otras más, como la DIN-19705 y normas de las AWWA (American Water Works Association).

➤ **Materiales a utilizar**

Para el diseño de compuertas tipo vagón, siempre hay que tener en cuenta el material a usar, debido a que se encuentra sumergida la mayor parte del tiempo, ya sea en agua salada como en agua de baja salinidad o dulce.

Además hay que considerar el material y geometría de los sellos para que los sellos no fallen con el tiempo debido al ambiente abrasivo y el agua no filtre por los costados de la compuerta.

➤ **Transporte**

La movilización de la compuerta es un factor muy importante a considerar, ya que compuertas de grandes dimensiones son complicadas de transportar, entonces en ese caso hay que decidir si la compuerta se la ensambla o se construye en el sitio de operación de la misma.

➤ **Tamaño**

Mediante un nomograma de cabezal de agua vs área de la compuerta, se puede encontrar el área de la compuerta, según el tipo de compuerta, cabezal de agua y caudal.

➤ **Especificaciones**

El fluido que ejercerá la presión sobre la compuerta en este caso, será agua. El cabezal total de la represa es de 10 metros. La mayor parte de la estructura será de acero estructural ASTM A36.

➤ **Mantenimiento**

Un correcto mantenimiento predictivo y correctivo es esencial para que el tiempo de vida de la compuerta sea duradero. Ya que la compuerta está sumergida la mayor parte del tiempo.

Un sistema anti corrosión debe ser implementado, ya sea pintura anti oxidante o nodos de sacrificio.

➤ **Elementos mecánicos**

Para el diseño se debe que considerar varios dispositivos para el montaje, como ruedas, sellos, tipos de accionamientos (hidráulico o eléctrico), etc.

➤ **Seguridad**

Para el diseño hay que considerar un alto factor de seguridad debido a la corrosión y grandes fuerzas

sometidas. En especial a los pasadores y ruedas que son las que soportan las fuerzas de reacción.

### **1.3. Normas de Diseño y Construcción de Compuertas Tipo Vagón**

Las normas son documentos técnico-legales oficiales, que sirven para evaluar y certificar procesos, equipos, maquinarias, etc. Y las cuales contienen características diferentes para cada tipo de aplicación.

Las normas técnicas son elaboradas por consenso de las partes interesadas, como lo pueden ser:

- Fabricantes.
- Administraciones.
- Usuarios y consumidores.
- Centros de investigación y laboratorios.
- Asociaciones y Colegios Profesionales.
- Agentes Sociales, etc.

Algunas características generales de las normas técnicas son:

- Se basan en los resultados de la experiencia y el desarrollo tecnológico.

- Son aprobadas por un organismo nacional, regional o internacional de normalización reconocido.
- Están disponibles al público.

Las normas ofrecen un lenguaje de punto común de comunicación entre las empresas, la administración pública, los usuarios y consumidores. Las normas establecen un equilibrio socioeconómico entre los distintos agentes que participan en las transacciones comerciales, base de cualquier economía de mercado, y son un patrón necesario de confianza entre cliente y proveedor. [14]

Por su parte, la ISO (la Organización Internacional de Normalización) es una Federación Mundial de Organismo. El trabajo de preparación de las normas internacionales normalmente se realiza a través de los comités técnicos de ISO, cada organismo miembro interesado en una materia para la cual se haya establecido un comité técnico tiene el derecho de estar representado en dicho comité. Las organizaciones internacionales, públicas y privadas, en coordinación con ISO, también participan en el trabajo. ISO colabora estrechamente con la Comisión

Electrotécnica Internacional (CEI) en todas las materias de normalización electrotécnica.

La norma técnica (NT) es un documento que contiene definiciones, requisitos, especificaciones de calidad, terminología, métodos de ensayo o información de rotulado.

La elaboración de una NT está basada en resultados de la experiencia, la ciencia y del desarrollo tecnológico, de tal manera que se pueda estandarizar procesos, servicios y productos.

En la elaboración de una Norma Técnica se pueden identificar las siguientes etapas:

➤ **Propuesta**

Iniciativa para proponer la creación de una NT puede provenir desde el interior de los Comités Técnicos de Normalización o la Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales, o desde una entidad privada o pública con interés en un tema.

➤ **Formulación**

Incluye a los representantes de todos los sectores involucrados (productores, consumidores y técnicos), y recopilan

antecedentes, investigaciones, opiniones, etc., de tal manera que prepara un documento inicial.

➤ **El Comité y la Audiencia Pública:**

Cada punto del documento es discutido por los miembros del Comité Técnico, tratando de lograr un acuerdo entre las partes involucradas, de lo contrario se somete a una votación.

➤ **Aprobación**

Luego de implementar las observaciones, el documento aprobado se convertirá en NT una vez que se publique.

### 1.3.1. DIN 19704 Criterio para cálculo y Diseño

| MANUSCRIPT TRANSLATION                                                                                                                    |                                                       |                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|
|                                                                                                                                           |                                                       | May 1998              |
|                                                                                                                                           | Hydraulic steel structures<br>Part 1: Design analysis | <u>DIN</u><br>19704-1 |
| ICS 93.140; 93.160                                                                                                                        |                                                       |                       |
| Descriptors: Hydraulic steel structures, water engineering, design analysis.                                                              |                                                       |                       |
| Stahlwasserbauten – Teil 1: Berechnungsgrundlagen                                                                                         |                                                       |                       |
| This standard, together with DIN 19704-2 and DIN 19704-3, May 1998 editions, supersedes DIN 19704 and DIN 19705, September 1976 editions. |                                                       |                       |

**FIGURA 1.6. DIN 19704-1 [11]**

| MANUSCRIPT TRANSLATION                                            |                                                                 |                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                   |                                                                 | May 1998                                                                                                                                  |
|                                                                   | Hydraulic steel structures<br>Part 2: Detailing and fabrication | <u>DIN</u><br>19704-2                                                                                                                     |
| ICS 93.140; 93.160                                                |                                                                 |                                                                                                                                           |
| Descriptors: Hydraulic steel structures, water engineering.       |                                                                 |                                                                                                                                           |
| Stahlwasserbauten – Teil 2: Bauliche Durchbildung und Herstellung |                                                                 |                                                                                                                                           |
|                                                                   |                                                                 | This standard, together with DIN 19704-1 and DIN 19704-3, May 1998 editions, supersedes DIN 19704 and DIN 19705, September 1976 editions. |

**FIGURA 1.7. DIN 19704-2 [11]**

| MANUSCRIPT TRANSLATION                                                            |                                                            |                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   |                                                            | May 1998                                                                                                                                  |
|                                                                                   | Hydraulic steel structures<br>Part 3: Electrical equipment | <u>DIN</u><br>19704-3                                                                                                                     |
| ICS 93.140; 93.160                                                                |                                                            |                                                                                                                                           |
| Descriptors: Hydraulic steel structures, water engineering, electrical equipment. |                                                            |                                                                                                                                           |
| Stahlwasserbauten – Teil 3: Elektrische Ausrüstung                                |                                                            |                                                                                                                                           |
|                                                                                   |                                                            | This standard, together with DIN 19704-1 and DIN 19704-2, May 1998 editions, supersedes DIN 19704 and DIN 19705, September 1976 editions. |

**FIGURA 1.8. DIN 19704-3 [11]**

La norma en mención también se basa en otros estudios realizados por otros códigos tales como:

- DIN EN 462-3 (1996-11) - Non-destructive testing - Image quality of radiographs - Part 3: Image quality classes for ferrous metals

- DIN V ENV 1995-1-1 (1994-06) - Eurocode 5: Design Of Timber Structures - Part 1-1: General Rules And Rules For Buildings
- DIN ISO 1629 (2004-11) - Rubber and latices - Nomenclature (ISO 1629:1995)
- DIN EN 10025 (1994-03)- Hot Rolled Products Of Non-alloy Structural Steels - Technical Delivery Conditions
- DIN EN 25817 (1992-09) - Arc-welded Joints In Steel - Guidance On Quality Levels For Imperfections
- DIN EN 24035 (1992-02) - Hexagon Thin Nuts (chamfered) - Product Grades A And B
- DIN EN 24034 (1992-02) - Hexagon Nuts - Product Grades C
- DIN EN 24032 (1992-02) - Hexagon Nuts, Style 1 - Product Grades A And B.
- DIN ISO 228-1 (2001-04)- Pipe threads where pressure-tight joints are not made on the threads - Part 1: Dimensions, tolerances and designation (ISO 228-1:2000)
- DIN 3092-1 (1985-05) - Socketing Of Wire Ropes; Casting In Metal; Safety Requirements And Testing
- DIN 19703 (1995-11) - Locks For Waterways For Inland Navigation - Principles For Dimensioning And Equipment

- DIN 18800-7 (2002-09) - Steel Structures - Part 7: Execution And Constructer's Qualification
- DIN 15020-1 (1974-02) - Lifting Appliances; Principles Relating to Rope Drives; Calculation and Construction
- DIN 86076 (2007-06) - Gasket Sheets For Ship Building - Requirements And Tests
- DIN 18800-1 (1990-11) - Structural Steelwork - Design And Construction
- DIN 7715-2 (1977-02) - Rubber Products; Dimensional Tolerances, Moulded Rubber Products
- DIN 53509-1 (2001-01) - Testing Of Rubber - Determination Of Resistance To Ozone Cracking - Part 1: Static Conditions

### **1.3.2. NBR-8883 Cálculo y Manufactura de Compuertas Hidráulicas.**

La norma NBR-8883 con título, “Cálculo y fabricación de compuertas hidráulicas” pertenece a la ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) y fue publicada en el año 2002.

Los objetivos principales de la norma son:

- Establecer los requisitos necesarios para el cálculo y fabricación de compuertas hidráulicas.

- Aplicar la norma a compuertas y a accionamientos hidráulicos, así como a sus componentes tales como: soportes, varillas, pines, vigas, cilindros hidráulicos, tuberías, etc.

La norma en mención también se basa en otros estudios realizados por otros códigos tales como:

- NBR 7259:201 – Compuertas Hidráulicas – Terminología
- NBR 11389:1990 – Sistema de pintura para equipos e instalaciones hidroeléctricas y termoeléctricas.
- ASME B36.10M Edition 00 – Welded and Seamless Wrought Steel Pipe.
- AWS D1.1:2002 – Structural Welding Code – Steel.
- DIN 18800:1990 – Structural steelwork Design and Construction.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  <p><b>ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas</b></p> <p>Sede:<br/>Rio de Janeiro<br/>Av. Treze de Maio, 13 / 28º andar<br/>CEP 20003-900 – Caixa Postal 1680<br/>Rio de Janeiro – RJ<br/>Tel.: PABX (21) 2210-3122<br/>Fax: (21) 2220-1762/2220-6436<br/>Endereço eletrônico:<br/>www.abnt.org.br</p> <p>Copyright © 2002.<br/>ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas<br/>Printed in Brazil/<br/>Impresso no Brasil<br/>Todos os direitos reservados</p> | OUT 2002                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>PROJETO NBR 8883</b> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <p><b>Cálculo e fabricação de comportas hidráulicas</b></p> <hr/> <p>Origem: NBR 8883:1996<br/>         ABNT/CB-04 - Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos<br/>         CE-04:007.03 - Comissão de Estudo de Grades e Comportas<br/>         NBR 8833 - Calculation and Manufacture of Hydraulic Gates<br/>         Descriptors: Hydraulic Gate<br/>         Esta Norma substitui a NBR 8883:1996<br/>         Esta Norma cancela e substitui a NBR 12283:1991</p> <hr/> <p>Palavra-chave: Comporta hidráulica</p> |                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 29 páginas              |

**FIGURA 1.9. NORMA TÉCNICA NBR-8883 [6]**

#### **1.4.3. AWWA C560-07 Compuertas tipo Vagón**

Esta norma fue preparada por el Comité de Normalización de Gestión del Agua, la misma que consta de tres partes:

1. Criterio para el diseño y el cálculo
2. Diseño Estructural y manufactura
3. Equipo eléctrico

La norma contiene especificaciones para el diseño de compuertas de inspección y para equipos asociados como bastidores de basura, bolardos flotantes, protecciones para impactos y puentes para canales. También es aplicable como analogía a tuberías presurizadas y sus accesorios.

Las especificaciones en relación a estructuras de acero pueden aplicar a estructuras expuestas a cargas hidrostáticas, elementos móviles y partes fijas. Estructuras de acero construidas en conjunto con estructuras metálicas hidráulicas se diseñan y construyen como especificado en normas relevantes al tema.

#### **1.4. Selección de la Compuerta a Analizar**

##### **1.4.3. Definición de Parámetros de Trabajo**

En la selección del tipo de compuerta, es importante adaptar las características de la compuerta con las condiciones de operación requeridas por la estructura hidráulica, algunos de las más importantes consideraciones son descritas a continuación.

##### **a) La capacidad de descarga**

En general, esto es la más importante consideración para el canal. Para grandes descargas, la opción debería ser colocar una compuerta sumergible, como compuertas

segmentadas o compuertas rodantes sujetas. La capacidad de la descarga es también afectada por la geometría de las columnas y los cimientos. Estas compuertas deben ser libres de obstáculos tales como aberturas laterales o voladizos.

#### **b) Descarga de escombros y hielo flotante**

Las compuertas que son aguas arriba son excesivamente usadas por la regulación precisa del nivel del agua o para el propósito de pasar escombros o hielo flotante, con un flujo pequeño de agua. En estos días existe la tendencia a usar compuertas de doble hoja, compuertas de ruedas fijas, o compuertas compuestas.

#### **c) Presión del cabezal de agua**

Tres tipos de compuerta son particularmente adecuadas para la operación de levantamiento sin sistemas de elevación: compuerta de sector, compuerta de tambor y compuerta trampa de oso. Estas compuertas son solamente operadas por la aplicación de un cabezal de agua debajo de ellos. El cabezal de presión crea un momento, que equilibra

o vence el momento igual al peso de la compuerta con las fuerzas de fricción opuestas a la dirección al movimiento de la compuerta. El nivel de agua en el interior de la cámara de la compuerta puede ser regulado manualmente o con una válvula de flotación automática.

#### **d) Cargas sobre las estructuras de concreto**

El empuje del agua es transmitido al concreto a través de las bisagras o rieles. El diseño de las partes empotradas es directamente influenciado por este apartado y puede ser determinante para la selección de las compuertas tipo oruga, en vez de la compuerta de ruedas fijas. A diferencia de las compuertas de ruedas fijas, las compuertas tipo oruga, tienen una capacidad de carga mayor, gracias a su gran cantidad de soportes, los cuales distribuyen la carga uniformemente en los rieles empotrados.

#### **e) Ausencia de vibraciones**

Esto es una característica muy importante para compuertas de fondo. A medida que incrementan las fuerzas de fricción entre la compuerta y sus guías, menor será la tendencia a

las vibraciones. Las compuertas deslizantes son usualmente empleadas en las salidas de fondo, debido a la alta resistencia a las fuerzas de fricción, que ocurren entre el marco de deslizamiento y la cara del asiento. También las compuertas segmentadas y las compuertas con ruedas fijas son recomendadas para desagües de fondo.

#### **f) Regulación hidráulica**

Las compuertas segmentadas, de tambor, de segmentos, trampa de oso y compuertas de aletas, pueden ser hidráulicamente regulables, mediante flotamiento y contrapesos, donde no se requieren sistemas de elevación. Este tipo de compuertas son usadas para mantener constante el nivel del agua cerca de zonas protegidas por las inundaciones.

#### **g) El cierre automático en caso de emergencia**

Las compuertas de entrada son usualmente diseñadas para el cierre automático por gravedad, debido al desbalance de las condiciones de presión, en caso de fallo de energía

eléctrica o para cerrar el flujo de agua en caso de que la compuerta falle.

Durante el cierre de emergencia el peso de la compuerta debe superar la resistencia por las fuerzas de fricción en los sellos y soportes.

Compuertas diseñadas para cierre automático, necesariamente deben ser operadas por polipastos hidráulicos o polipastos mecánicos con cables o cadenas. Elevadores de tornillo no pueden ser usados en este tipo de instalaciones a causa de sus características de bloqueo automático.

#### **1.4.3. Definición de las capacidades de la compuerta**

Para empezar a detallar la compuerta tipo vagón, primero se establecen los valores del cabezal y del caudal, ya que serán parámetros incidentes en la determinación de las dimensiones de la compuerta vagón.

El caudal de desagüe de fondo depende de la altura del embalse, entonces mediante la siguiente fórmula se determina los parámetros:

$$Q = C_d * v * A$$

Dónde,

$$v = \sqrt{2g\Delta h}$$

$$C_d = 0.61$$

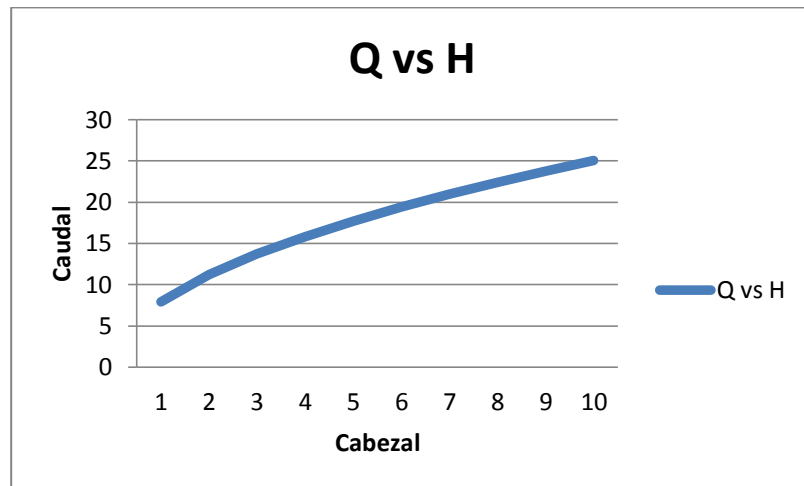
$$A = 4 \text{ m}^2$$

Entonces, reemplazando los valores se tiene:

$$Q = 10.81\sqrt{\Delta h}$$

Si se grafica la ecuación anterior, se tiene el caudal vs la altura del embalse.

Como se observa en la Figura 1.10, a medida que el cabezal aumenta, el caudal de desagüe se incrementa debido a que la presión en la vena contracta se agranda.



**FIGURA 1.10. CAUDAL VS CABEZAL**

Se selecciona un caudal y un cabezal acorde a los promedios que existen en el Ecuador: Cabezal 10 metros y Caudal 25 m<sup>3</sup>/s.

Una vez definidos los parámetros de trabajo, se procede a calcular la velocidad máxima que tendrá el agua en la vena contracta.

$$v = \sqrt{2g\Delta h}$$

Entonces,

$$v = 14 \frac{m}{s}$$

H. Rouse, afirma que los valores del Coeficiente de descarga (Cd) para compuertas planas verticales ( $\Theta=90^\circ$ ) son esencialmente constantes y con ligeras variaciones alrededor de 0.61. [4]

$$Q = C_d * v * A$$

$$A = 2.93 \text{ m}^2$$

Por cuestiones de fabricación, de cálculo y diseño de forma, se plantea una compuerta de 2 metros de ancho y de alto.

#### **1.4.3. Descripción de la compuerta a modelar**

La compuerta tipo vagón es un modelo de compuerta hidráulica utilizada en descargas de fondos y bocatomas de presas. Es accionada por un pistón hidráulico o neumático. Tienen aplicación principalmente en casos donde se tienen grandes vanos por obturar, combinados con altas cargas hidráulicas a soportar bajo las más severas condiciones de operación. Las aplicaciones principales están en instalaciones como lo son:

- Plantas de re-bombeo
  - Centrales Hidroeléctricas
  - Presas
  - Colectores pluviales
  - Colectores profundos y semi-profundos
  - Túneles de cierre para presas

Se componen de un tablero mecano-soldado con juntas de goma, que hacen la función de obturación. Estas juntas pueden ser a 3 o 4 lados (dos laterales, solera y dintel).

Las ruedas permiten el deslizamiento de la compuerta, además estos se usan para disminuir la fricción que existe entre la compuerta y los rieles cuando ésta abre o cierra el desagüe.

En la compuerta vagón se distinguirán los siguientes elementos:

- Placa frontal
- Vigas de soporte
- Elementos mecánicos de elevación.
- Conjunto: rueda, rodamiento y eje.

# **CAPÍTULO 2**

## **2. ESTUDIO ANALÍTICO DE LOS ESFUERZOS Y DEFORMACIONES SOBRE LA COMPUERTA**

Todas las partes de la compuerta serán analizadas por separado, concentrándose en tres piezas en especial, la plancha frontal, el conjunto rueda eje y las vigas.

### **2.1. Ingeniería Conceptual de la Compuerta**

Previo a un análisis de diseño, se comienza por el diseño de forma y estructural de la compuerta.

#### **2.1.1. Diseño de forma**

El diseño de forma se basa en una serie de planchas metálicas soldadas formando un cajón, en cuyo interior hay una serie de refuerzos (vigas) que dan rigidez al conjunto.

Dentro del diseño se abarcarán los siguientes elementos:

### **Plancha Frontal**

Se debe tener en cuenta que el material debe ser resistente tanto a los esfuerzos como a la corrosión, la compuerta será cuadrada y tendrá forma de tablero, el mismo que será reforzado por perfiles normalizados IPN, para darle más rigidez y resistencia al conjunto.

### **Vigas**

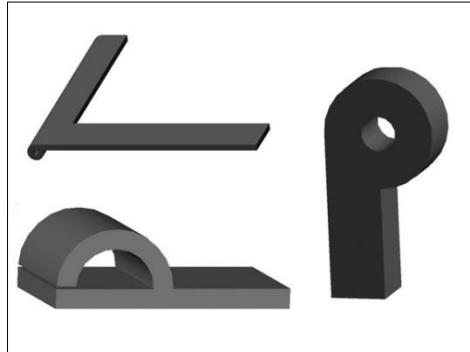
Los refuerzos de la compuerta pueden ser de dos tipos según la construcción: perfiles normalizados o refuerzos propios.

Para este estudio, se usa perfiles IPN, los cuales son elementos estructurales normalizados, cuyas características se pueden encontrar en la Tabla Perfiles IPN en la sección Apéndice.

Este tipo de perfil es muy utilizado debido a su amplia gama, se puede adaptar a una gran variedad de situaciones y estructuras.

### **Sellos**

Los elementos de estanqueidad, son los encargados de generar un sello lo más cerrado posible entre la compuerta y el marco estructural. Ya se ha comentado que la compuerta es la encargada de soportar la masa de agua principal; y estos elementos, se emplean para evitar las pequeñas fugas que puedan acontecer.



**FIGURA 2.1. TIPOS DE SELLOS DE GOMA [19]**

### **Ruedas**

Son elementos que ayudan al movimiento vertical de las compuertas que están diseñadas para desplazarse en un solo plano. Su diseño se basa en rodamientos para minimizar la fricción, los cuales están unidos a través de un eje de acero AISI 431.

Las ruedas deberán ser iguales y podrán ser intercambiables. Se usan ruedas cilíndricas sobre carriles planos, aunque pueden ser con superficie de rodadura combada para evitar la concentración de cargas en los bordes y que las presiones de contacto de Hertz no superen las indicadas en la norma DIN-19704. [21]

### **Sistema de izaje**

El sistema de izaje deberá ser cuidadosamente diseñado, con un factor de seguridad elevado, ya que estos elementos son los que sostendrán la compuerta durante la apertura y la clausura de la

misma. El sistema consta de orejas de sujeción y un pasador del cual se une el sistema de elevación.

### **2.1.2. Diseño estructural**

En el diseño estructural se procederá a especificar el método de diseño y el material que se usará en las partes de interés.

#### **Plancha frontal**

La plancha frontal así como las planchas laterales, elementos de refuerzo y las vigas se diseñan con acero ASTM A36.

Debido a que la compuerta pasa la mayoría de su tiempo en un ambiente corrosivo (sumergida), se suele realizar un tratamiento superficial a la compuerta para evitar su deterioro. El tratamiento suele ser la aplicación de pintura epóxica, la cual no solo protege de los elementos corrosivos, sino también de otros agentes adversos superficiales. Las propiedades mecánicas del acero ASTM A36 son: Resistencia a la fluencia 250 MPa, Resistencia máxima 550 MPa y el Módulo de elasticidad 210 GPa.

Las dimensiones de la plancha son: 2 metros de alto, 2 metros de ancho y 10 mm de espesor. [22]

## **Ruedas**

Por la complejidad de dicho elemento, los materiales suelen ser variados, pero predomina principalmente el acero AISI 304, recomendado por la norma Alemana DIN-19704.

El acero AISI 304 es el más versátil y uno de los más usados de los aceros inoxidables de la serie 300. Tiene excelentes propiedades para el conformado y el soldado. La resistencia a la corrosión es excelente, característica muy importante para la aplicación de esta tesis. Las propiedades mecánicas del acero AISI 304 son: Resistencia a la fluencia 310 MPa, Resistencia máxima 620 MPa y el Módulo de elasticidad 200 GPa. [10]

Las ruedas en sus extremos, tendrán unas tapas para el alojamiento de rodamientos y empaquetaduras para evitar la entrada de agua a los casquillos.

El número de ruedas depende, de las dimensiones de la compuerta y de las cargas a soportar, en este caso, se tiene 8 ruedas, 4 de cada lado, instaladas a la altura de las vigas horizontales, para que al igual que las vigas, queden cargadas equitativamente.

Las ruedas serán diseñadas a partir de la teoría de los Esfuerzos de Hertz, detalladas en la sección 2.2.5.

### **Ejes**

Los ejes de las ruedas serán diseñados en acero AISI 431, el cual contiene altas adiciones de cromo y níquel y está diseñado para obtener altas propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos, junto con buena resistencia al impacto. Este tipo de acero ofrece mejor resistencia a la corrosión que los tipos 410, 420, 430 y 440. El tipo 431 es frecuentemente utilizado en partes con mayor esfuerzo mecánico y una necesaria alta resistencia a la corrosión. La tabla 7 indica las propiedades mecánicas del acero en cuestión. Las propiedades mecánicas del acero AISI 431 son: Resistencia a la fluencia 657 MPa, Resistencia máxima 862 MPa y el Módulo de elasticidad 200 GPa.

### **Sellos**

En la práctica moderna, los sellos de compuertas son en su mayoría hechos de caucho, debido a su durabilidad, gran flexibilidad y resistencia satisfactoria. El sello de goma se puede fabricar en cualquier forma deseada, permitiendo de este modo al

diseñador para elegir la mejor forma para cada aplicación, en este caso se usa sellos tipo J.

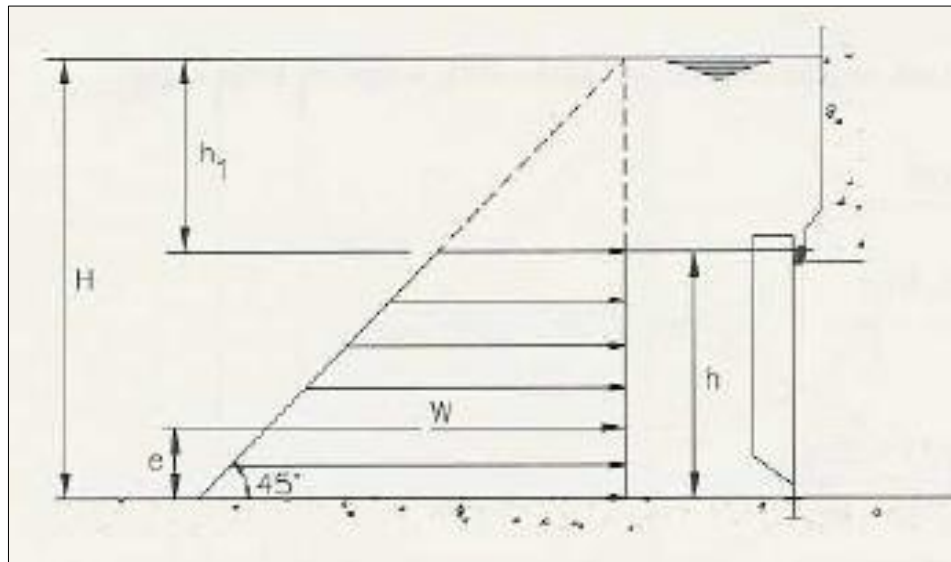
Su diseño puede ser de múltiples geometrías en función de las necesidades, pero como condición principal debe estar situado por todo el perímetro de contacto entre la compuerta y el marco estructural. (Ver Apéndice)

## **2.2. Análisis de fuerzas hidrostáticas**

### **2.2.1. Cálculo de la presión hidrostática sobre la compuerta**

Dentro del diseño de una compuerta, se debe tomar en cuenta que, el agua que será contenida por la compuerta vagón, estará ejerciendo una fuerza que puede variar de acuerdo a la posición, sin embargo el valor máximo de dicha fuerza, ocurre cuando la compuerta se encuentra cerrada y el nivel del agua se encuentra a la máxima altura del cabezal.

Para el diseño se considera una compuerta sumergida, donde solo un lado de la compuerta estará en contacto con el agua, tal como se observa en la figura 2.2.



**FIGURA 2.2. DIAGRAMA DE PRESIÓN SOBRE COMPUERTAS  
TIPO VAGÓN SUMERGIDAS [12]**

Dado esto, el empuje del agua sobre la compuerta viene dado por:

$$W = \gamma B h \left( H - \frac{h}{2} \right)$$

Donde,

$\gamma$ .- Peso específico del agua

B.- Ancho de compuerta

h.- Altura de la compuerta

H.- Cabezal de agua

Por lo que la fuerza de empuje es:

$$W = 353.16 \text{ KN}$$

Los esfuerzos principales en una compuerta vagón vienen dados por la fuerza hidráulica necesaria para obturar la conducción. Se usa un factor de aumento de las cargas estáticas de 1.5 con el fin de representar los efectos dinámicos sobre la compuerta [1], de este modo, se tiene que, por el lado de seguridad, la presión máxima sobre la compuerta está dada por:

$$P_{max} = 1.5 * \frac{W}{A}$$

$$P_{max} = 132.44 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

Como se observa en la Figura 2.2, se puede observar que para la configuración de compuerta del caso, el diagrama de presiones es de una forma trapezoidal, por ello, la posición de la fuerza de empuje es determinada por:

$$e = \frac{h}{3} \left( 1 + \frac{H-h}{2H-h} \right)$$

Donde,

h.- Altura de la compuerta

H.- Cabezal de agua

e.- Centroide donde se ejerce la mayor fuerza hidrostática.

$$e = 0.9630 \text{ m}$$

### 2.2.2. Cálculo del espesor de la placa frontal

Dentro de las consideraciones de diseño se tiene que tomar en cuenta el espaciamiento entre vigas, por lo que la distribución de presiones se dividirá en áreas iguales, la selección de las vigas para la compuerta sumergida se divide en varias etapas.

La placa frontal conforma la mayor parte del peso de la compuerta. Es por eso, que en el diseño se debe prestar mucha atención a la dimensión de la misma, para poder lograr el mínimo espesor posible que soporte las fuerzas estructurales. Por lo general, el espesor mínimo es de 8 mm, el cual permite soldar los elementos de refuerzo sin mayores deformaciones. Para compuertas tipo vagón pequeñas, que tienen un excelente mantenimiento, la placa frontal puede ser hasta de 6.5 mm. [22]

Debido a que el cabezal es pequeño, se seleccionará un espesor de 10 mm para la placa frontal de esta compuerta.

### 2.2.3. Número de vigas

Para obtener el número de vigas, se aplica la siguiente ecuación:

$$N = \frac{100 * h}{t_p} * \sqrt{\frac{H}{2\sigma_{adm}}}$$

Dónde,

N.- Número de Vigas

h.- Altura de la compuerta

H.- Cabezal

$\sigma_{adm}$ .- Esfuerzo admisible del Acero A36

**TABLA 1**  
**COEFICIENTES PARA ESFUERZOS ADMISIBLES EN**  
**ELEMENTOS ESTRUCTURALES [12]**

| Type of Stress                                  | Load Case |            |             |
|-------------------------------------------------|-----------|------------|-------------|
|                                                 | Normal    | Occasional | Exceptional |
| Tension and bending stress                      | 0.68      | 0.76       | 0.89        |
| Bending stress if a stability proof is required | 0.59      | 0.68       | 0.79        |
| Shear                                           | 0.39      | 0.44       | 0.51        |
| Combined stress                                 | 0.76      | 0.82       | 0.92        |
| Combined stress in the skin plate               | 0.87      | 0.87       | 0.92        |

Entonces se tiene que:

$$N = 3.44$$

Por facilidad de diseño, cálculo y por ser conservador, se seleccionan 4 vigas horizontales.

#### 2.2.4. Cálculo de la posición de las vigas horizontales

$$\beta = \frac{N(H-h)^2}{H^2 - (H-h)^2}$$

N.- Número de vigas

H.- Cabezal total

h.- Altura de la compuerta

Reemplazando se tiene:

$$\beta = 7.11$$

La profundidad  $h_k$  es la distancia que limita las porciones de agua de cada viga, y se determinan con la siguiente ecuación:

$$h_k = H \sqrt{\frac{k + \beta}{N + \beta}}$$

H.- cabezal total

N.- número de vigas

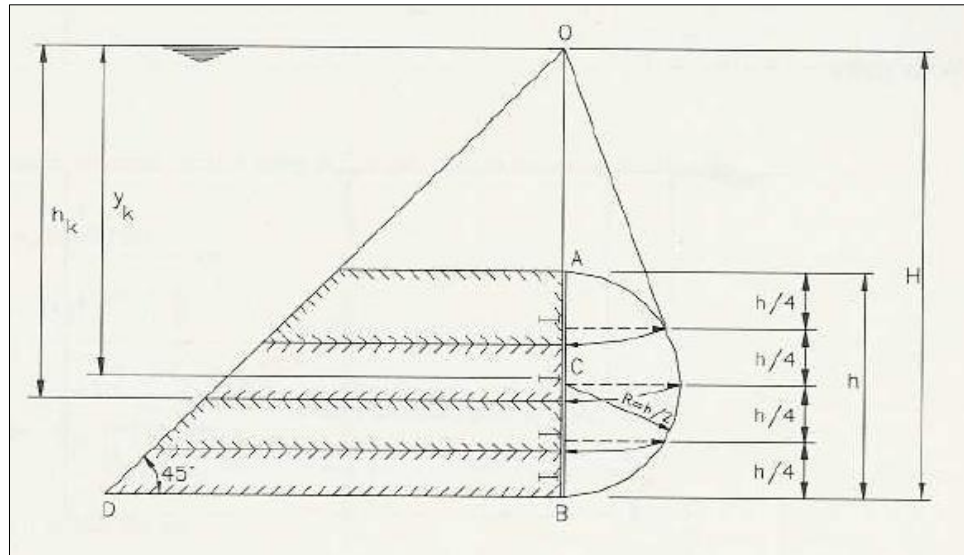
K.- 1,2,3....

$$h_k = 3\sqrt{k + 7.11}$$

Una vez que se obtienen los valores  $h_k$ , se procede a determinar las posiciones de las vigas horizontales, las cuales se determinan por:

$$y_k = \frac{2H}{3\sqrt{n+\beta}} \left[ (k + \beta)^{3/2} - (k - 1 + \beta)^{3/2} \right]$$

$$y_k = 2 * \left[ (k + 7.11)^{3/2} - (k - 1 + 7.11)^{3/2} \right]$$



**FIGURA 2.3. COMPUERTAS PLANAS SUMERGIDAS-  
DIVISIÓN DEL DIAGRAMA DE PRESIÓN EN 4 PARTES  
IGUALES [12]**

Mediante este método, se asegura que las vigas utilizadas estén cargadas de igual manera. Es importante mencionar que los resultados mostrados, son tomados desde un nivel de referencia superior, es decir, desde la superficie, la configuración de la compuerta queda de la siguiente manera:

**TABLA 2**  
**COEFICIENTES Y ALTURAS DE POSICIONAMIENTO DE LAS**  
**VIGAS SOBRE LA COMPUERTA**

| H(m) | h(m) | N | k | $\beta$ | hk   | $Y_k$ |
|------|------|---|---|---------|------|-------|
| 10   | 2    | 4 | 1 | 7.11    | 8.54 | 8.27  |
|      |      |   | 2 |         | 9.05 | 8.80  |
|      |      |   | 3 |         | 9.54 | 9.30  |
|      |      |   | 4 |         | 10   | 9.77  |

### 2.2.5. Diseño de las vigas

Una vez que se determina el número de vigas a usar en la compuerta, se procede a calcular el espesor de las vigas. Para vigas sujetadas en los extremos, el espesor mínimo se encuentra mediante la siguiente formula:

$$t = \frac{F}{2 h \tau_{adm}} \quad [5]$$

Donde,

t.- Espesor del alma de la viga

F.- Carga de agua sobre la viga

h.- Altura del alma

$\tau_{adm}$ .- Esfuerzo cortante permisible

La carga de agua sobre cada viga se la determinará mediante los valores  $h_k$ , ya que a cada viga le tocaría una porción de agua que ejerce fuerza sobre ellas como se detalla en la Figura 2.3.

$$F_k = P * A_k$$

Donde,

$$P = \rho * g * h_k$$

$$A_k = a_k * b$$

**TABLA 3**

**FUERZA APLICADA SOBRE CADA VIGA**

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| <b><math>F_1</math></b> | <b>135.57 KN</b> |
| <b><math>F_2</math></b> | 135.69 KN        |
| <b><math>F_3</math></b> | 137.43 KN        |
| <b><math>F_4</math></b> | 135.24 KN        |

Una vez obtenidas las fuerzas sobre cada viga, se procede a calcular la altura del alma de las vigas según las recomendaciones de la norma NBR 883, especificada en la Tabla 4.

**TABLA 4**  
**ALTURA DE VIGAS HORIZONTALES [12]**

| Table 5.5 Depth of Horizontal Girders |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Head on Sill                          | Web Height            |
| up to 15 m                            | from 1/12 up to 1/9 L |
| from 15 m to 30 m                     | from 1/9 up to 1/7 L  |
| over 30 m                             | from 1/7 up to 1/5 L  |

$$h_v = \frac{1}{9}L$$

Donde,

L.- longitud de la viga

$$0.16 < h_v (m) < 0.22$$

Siempre se busca ser conservador, debido a esa anotación, se elige la mayor altura posible.

$$h_v = 0.22 \text{ m}$$

El esfuerzo cortante permisible según la Tabla 9 sería:

$$\tau_{adm} = (0.39) S_y$$

$$\tau_{adm} = 97.5 \text{ MPa}$$

Entonces, el espesor mínimo de las vigas sería:

$$t = 3.2 \text{ mm}$$

Para resumir, se tienen las siguientes dimensiones mínimas:

$$t = 3.2 \text{ mm} \qquad h_v = 0.22 \text{ m}$$

En la Tabla 3 se pueden observar varios tipos de vigas, pero la que cumple con los requerimientos antes determinados es la viga IPN 220, con dimensiones: 220 mm de altura y un espesor de 8.1 mm. en el alma.

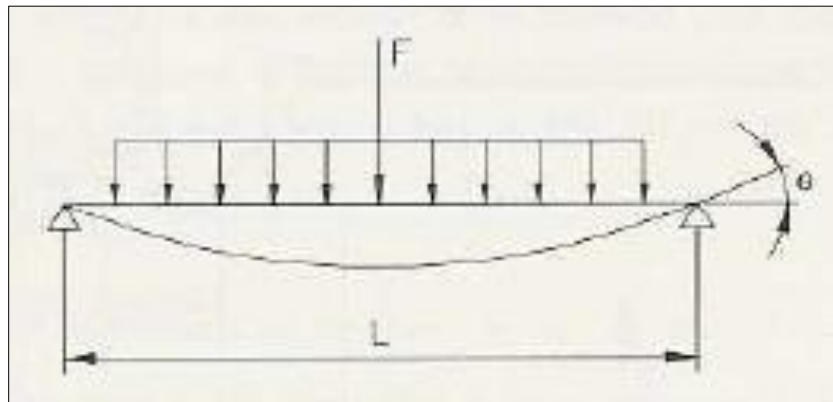
#### **2.2.6. Diseño de las Ruedas**

Las ruedas están diseñadas para soportar la máxima fuerza hidrostática actuando sobre la compuerta. Por cuestiones de diseño, las ruedas, al igual que las vigas, se las coloca a una distancia recomendada para que la carga se distribuya equitativamente (ver Figura 2.3).

## Rodamientos

En el caso de usar rodamientos auto alineantes, se debe calcular el ángulo de inclinación en los extremos, producido debido a la fuerza hidrostática, entonces:

$$\theta = \frac{FL^2}{24EI}$$



**FIGURA 2.4 MODELO MATEMÁTICO PARA UNA VIGA EN FLEXIÓN [12]**

Donde,

F.- fuerza hidrostática sobre la viga

L.- longitud de soporte

E.- módulo de elasticidad

I.- momento de inercia de la viga

Entonces,

$$\theta = \frac{(66217.5)(2^2)}{24(210\,000 * 10^6) \left(\frac{3060}{100^4}\right)}$$

$$\theta = 0.0017 \text{ rad} = 0.09^\circ$$

La Tabla 55 muestra los valores permitidos de los desplazamientos angulares para rodamientos auto alineantes manufacturados por SKF; se puede afirmar que el valor del desplazamiento es apto para cualquier tipo de rodamiento.

**TABLA 5**

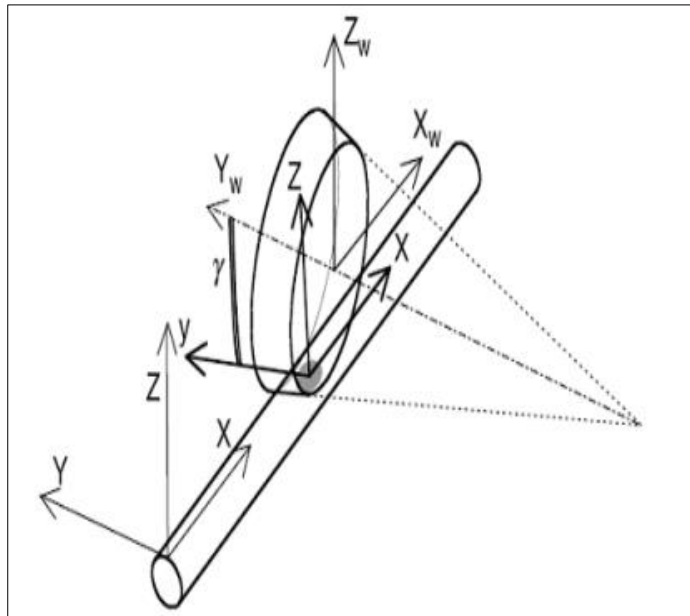
**MÁXIMOS DESPLAZAMIENTOS ANGULARES EN VIGAS [12]**

| Bearing dimension series | Maximum permissible angular misalignment (Degrees) |
|--------------------------|----------------------------------------------------|
| 213                      | 1.0                                                |
| 222C, 222                | 1.5                                                |
| 223C                     | 2.0                                                |
| 230C                     | 1.5                                                |
| 231C                     | 1.5                                                |
| 232C                     | 2.5                                                |
| 238C                     | 1.0                                                |
| 239C                     | 1.5                                                |
| 240C                     | 2.0                                                |
| 241C                     | 2.5                                                |

**Ruedas**

Las ruedas se diseñan en base a los esfuerzos de Hertz, el mismo que está en función de la presión de contacto entre la rueda y la

pista. En este caso en particular, se presenta un contacto rectangular entre ruedas cilíndricas y pistas planas, como se aprecia en la Figura 2.5.



**FIGURA 2.5. ÁREA DE CONTACTO RUEDA-PISTA [21]**

Según los esfuerzos de Hertz se tiene que,

$$P_r = W/8$$

Donde,

W.- Fuerza hidrostática máxima

$P_r$ .- Fuerza sobre cada rueda

$$P_r = 529.74 \text{ [KN]}/8$$

$$P_r = 66.21 \text{ KN}$$

Cada rueda de ancho  $\epsilon$  y diámetro  $\varphi_r$  ejerce una fuerza  $P_r$  sobre la pista de rodadura, donde el área de contacto es rectangular con eje de simetría en la proyección del eje sobre la huella y, una presión de Hertz máxima dada por la expresión siguiente y limitada por  $1.85\sigma_u$ . Donde  $\sigma_u$  es la resistencia máxima a la fluencia del acero AISI 304 recocido. [21]

$$W = \sqrt{\frac{P_r \cdot E}{\pi \epsilon \varphi_r (1 - \mu^2)}} \leq 1.85\sigma_u$$

$$\epsilon \varphi_r \geq \sqrt{\frac{P_r \cdot E}{\pi (1.85\sigma_u)^2 (1 - \mu^2)}}$$

$$\epsilon \varphi_r \geq \frac{(66210)(210000 \times 10^6)}{\pi (1.85 \times 517 \times 10^6)^2 (1 - 0.3^2)}$$

$$\epsilon \varphi_r \geq 53.16 \text{ cm}^2$$

Una combinación de dimensiones de ruedas que cumple con esta condición es:

$$\epsilon = 5 \text{ cm}$$

$$\varphi_r = 15 \text{ cm}$$

## Eje

El eje de las ruedas, deberá ser acero aleado de alta dureza para soportar los esfuerzos cortantes por recomendación de las normas técnicas. El eje se diseña con el coeficiente de seguridad dado en la Tabla 6, por lo que el diámetro mínimo  $\theta_e$ , en acero AISI 304 recocido, es:

$$\begin{aligned}\phi_e &= \sqrt{\frac{4P}{\pi \frac{\tau_{ssy}}{n}}} \\ \phi_e &= \sqrt{\frac{4(66210)}{\pi \frac{(0.577)(205 \times 10^6)}{4.34}}} \\ \phi_e &= 5.6 \text{ cm}\end{aligned}$$

Por fabricación se aumenta el diámetro del eje a 7 cm.

Entonces el esfuerzo cortante sobre el eje seria,

$$\begin{aligned}\tau_{ssy} &= \frac{4Pn}{\pi \theta_e^2} \\ \tau_{ssy} &= 74.66 \text{ MPa}\end{aligned}$$

**TABLA 6**  
**ESFUERZOS PERMISIBLES EN ELEMENTOS MECÁNICOS**

| Table 5.2 Coefficients for Allowable Stresses, Mechanical Elements |           |            |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|------------|
| Type of Stress                                                     | Load Case |            |
|                                                                    | Normal    | Occasional |
| Tension and compression                                            | 0.40      | 0.50       |
| Shear                                                              | 0.23      | 0.29       |

### **Pernos de sujeción**

Cabe recalcar que el conjunto Rueda, eje y rodamiento, se diseña con un soporte que ayuda a disminuir los esfuerzos en el eje. Dicho soporte se lo coloca soldado a la cara lateral de la compuerta, mientras que el eje se emperna al soporte mediante una brida.

El acero usado en los pernos es de alta resistencia, los cuales se especifican bajo las normas ASTM A325 y A490 en la Tabla 7 y 8. El perno A325 es fabricado bajo tratamiento térmico y con un acero temperado de medio carbono, mientras que el perno A490 es de un acero de baja aleación y templado, por ende tiene propiedades mecánicas más altas que el A325.

**TABLA 7**  
**DIMENSIONES ESTÁNDARES DE PERNOS Y**  
**TUERCAS [13]**

| Diámetro Nominal del Perno <i>db, in.</i> | Dimensiones de Pernos Estructurales de Cabeza Hexagonal Pesada |                        |                                 | Dimensiones de Tuercas Hexagonales Pesadas  |                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
|                                           | Ancho a través de cara plana <i>F, plg.</i>                    | Altura <i>H1, plg.</i> | Longitud Roscada <i>T, plg.</i> | Ancho a través de cara plana <i>W, plg.</i> | Altura <i>H2, plg.</i> |
| 1/2                                       | 7/8                                                            | 5/16                   | 1                               | 7/8                                         | 31/64                  |
| 5/8                                       | 1 1/16                                                         | 25/64                  | 1 1/4                           | 1 1/16                                      | 39/64                  |
| 3/4                                       | 1 1/4                                                          | 15/32                  | 1 3/8                           | 1 1/4                                       | 47/64                  |
| 7/8                                       | 1 7/16                                                         | 35/64                  | 1 1/2                           | 1 7/16                                      | 55/64                  |
| 1                                         | 1 5/8                                                          | 39/64                  | 1 3/4                           | 1 5/8                                       | 63/64                  |
| 1 1/8                                     | 1 13/16                                                        | 11/16                  | 2                               | 1 13/16                                     | 1 7/64                 |
| 1 1/4                                     | 2                                                              | 25/32                  | 2                               | 2                                           | 1 7/32                 |
| 1 3/8                                     | 2 3/16                                                         | 27/32                  | 2 1/4                           | 2 3/16                                      | 1 11/32                |
| 1 1/2                                     | 2 3/8                                                          | 15/16                  | 2 1/4                           | 2 3/8                                       | 1 15/32                |

**TABLA 8**  
**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS**  
**RECOMENDADOS PARA PERNOS [13]**

| Designación del acero    | Temperatura de revenido (°C) | Propiedades mecánicas |                       |              |                              |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|------------------------------|
|                          |                              | Ductilidad            | Límite elástico (MPa) | Dureza (MPa) | Resistencia a tracción (MPa) |
| AISI 1340 <sup>(2)</sup> | 205                          | 0,08-0,14             | 1430-1755             | 4550-5550    | 1625-1990                    |
|                          | 425                          | 0,11-0,17             | 1035-1270             | 3400-4150    | 1130-1395                    |
|                          | 650                          | 0,17-0,27             | 555-690               | 2300-2800    | 720-880                      |
| " 4130 <sup>(1)</sup>    | 205                          | 0,08-0,12             | 1315-1610             | 4200-5150    | 1450-1770                    |
|                          | 425                          | 0,10-0,16             | 1070-1315             | 3450-4200    | 1150-1410                    |
|                          | 650                          | 0,17-0,27             | 630-775               | 2250-2750    | 730-895                      |

### Pista

El espesor de la pista se calcula en función de la presión de contacto contra la rueda, sabiendo que será diseñada en acero AISI 431, tiene que:

$$\sigma_c = 0.418 \sqrt{\frac{PE}{R\epsilon}}$$

Dónde,

P.- Carga sobre la rueda

E.- Módulo de elasticidad

R.- Radio de la rueda

$\epsilon$ .- Ancho de rueda

$$\sigma_c = 804.88 \text{ MPa}$$

El máximo esfuerzo cortante sería:

$$\tau_{max} = \frac{1}{3} \sigma_c \quad [6]$$

$$\tau_{max} = 268.29 \text{ MPa}$$

Y se da a una profundidad de  $h' = 0.4b$ .

Dónde,

$$b = 3.041 \sqrt{\frac{PR}{E\epsilon}} \quad [6]$$

$$b = 2.09 \text{ mm}$$

$$h' = 0.4b = 0.84 \text{ mm}$$

Entonces el espesor mínimo de la pista es:

$$5h' = \varepsilon_p$$

$$\varepsilon_p = \mathbf{4.18 \text{ mm}}$$

### **Sistema de izaje**

La fuerza necesaria para la condición de apertura de la compuerta es la suma de todas las fuerzas ejercidas sobre la compuerta y el peso de la compuerta, la cual está dada por:

$$F_a = (G - E) - F_r + F_{sl} + F_{ss} + F_h$$

Dónde,

$F_a$ .- Fuerza de apertura de la compuerta.

$G$ .- Peso de la compuerta.

$E$ .- Flotabilidad de la compuerta.

$F_r$ .- Fuerza de fricción en las ruedas.

$F_{sl}$ .- Fuerza de fricción en los sellos laterales.

$F_{ss}$ .- Fuerza de fricción en el sello superior.

$F_h$ .- Fuerza hidrodinámica.

## Diseño de Sellos

La compuerta está diseñada a un cierre de 3 lados, los 2 laterales y el superior. Los sellos serán de neopreno, los cuales son perfiles de caucho EPDM y pueden ser de diferentes formas.

Para obtener un cierre adecuado tiene que darse el contacto entre el sello y una superficie totalmente libre de corrosión (asperezas), para lo cual se utilizan placas de acero inoxidable colocadas en los hierros fijos que van empotrados en la obra civil.

## Sellos laterales

Para los sellos laterales, con la información previa analizada, se diseñan con sellos de nota musical, ya que son los sellos más usados con una gran funcionalidad. Para calcular la fuerza de fricción en los sellos laterales tiene que:

$$F_{sl} = 2 \mu N$$

$$N = \frac{Pl}{J} (J^2 + a^2 + aB) \quad [9]$$

Dónde,

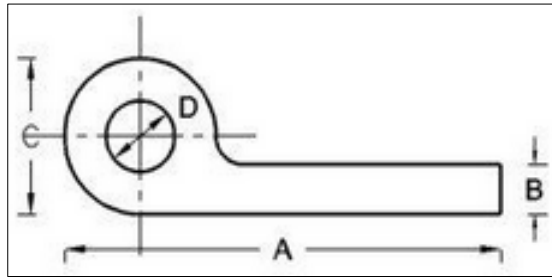
$\mu$ .- Coeficiente de fricción dinámico del neopreno.

P.- Presión hidrostática en el sello.

$l$ .- Longitud total del sello.

$$a = C - B. \quad [9]$$

$$J = (A - C/2)/2 \quad [9]$$



**FIGURA 2.6 SELLO TIPO NOTA MUSICAL [19]**

Se escoge para este caso el sello de código P-01-g, con medidas:

**TABLA 9**

**DIMENSIONES DEL SELLO LATERAL**

| A (mm) | B (mm) | C (mm) | D (mm) |
|--------|--------|--------|--------|
| 78     | 12     | 35     | 15     |

Entonces,

$$N = 15052.8 \text{ N}$$

$$F_{sl} = 30.10 \text{ KN Estático}$$

$$F_{sl} = 24.09 \text{ KN Dinámico}$$

### Sello superior

Bajo la misma premisa de los sellos laterales, se escoge el sello de nota musical, teniendo como resultado otra fuerza de fricción que analizar.

$$F_{ss} = \mu N$$

$$N = \frac{Pl}{2J} (J^2 + a^2 + aB)$$

$$F_{sl} = 7.52 \text{ KN}$$

### Peso de la Compuerta

El peso de la compuerta estará constituido principalmente por las vigas y por la placa frontal, sumando un volumen de acero aproximado de  $0.1 \text{ m}^3$ .

$$G = \rho_{acero} Vg$$

$$G = 7850 \times 0.13 \times 9.8$$

$$G = 10 \text{ KN}$$

### Flotabilidad

El empuje del agua sobre la compuerta está dado por:

$$E = \rho_{agua} Vg$$

$$E = 1000 \times 0.13 \times 9.8$$

$$E = 1.27 \text{ KN}$$

### Fuerza de fricción en las ruedas

La fricción en las ruedas se las calcula por la siguiente fórmula:

$$F_r = \frac{W}{R} (\mu r + f)$$

Dónde,

Fr.- Fuerza de fricción de las ruedas

W.- Carga sobre la rueda

R.- Radio de la rueda

r.- Radio del eje

u.- Coeficiente de fricción del rodamiento

f.- Coeficiente de rodadura

Según la norma DIN 19704, el coeficiente de rodadura “f” puede ser 0.02, para aceros de dureza 150-300 BHN y el coeficiente de fricción del rodamiento se lo puede tomar como 0.003 [11].

$$F_r = 17.72 \text{ KN}$$

### Fuerza de apertura para la compuerta

$$F_a = (G - E) + F_r + F_{sl} + F_{ss} + F_h$$

$$F_a = (10 - 1.27) - 17.72 + 30.10 + 7.52 + 100$$

$$F_a = 129.21 \text{ KN}$$

La fuerza  $F_a$ , se aplicará directamente al sistema de izaje, el cual está conformado por un pin o pasador y dos orejas.

### Pasador

Una parte fundamental del mecanismo de izaje, es el pasador, mismo que se diseña con acero AISI 1020, el cual estará sometido a esfuerzos cortantes, siendo lo anterior, una consideración importante para el desarrollo de este sistema:

$$n = 4.34$$

$$n = \frac{\sigma_y}{\tau}$$

Si se sabe que:

$$\tau = \frac{P/2}{A_{corte}}$$

Dónde,

P.- Fuerza sobre el pasador

Ac.- Área transversal del pasador

Igualando

$$d = \sqrt{\frac{2Pn}{\sigma_y \pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{2(129.21 \times 10^3)(4.34)}{(350 \times 10^6)\pi}}$$

$$d = 0.035m = \mathbf{40 \text{ mm}}$$

El diámetro del pasador tiene dimensiones mínimas de 40 mm, para poder soportar las cargas a la cual estaría sometido, tales como las fuerzas de fricción en los sellos y ruedas, el peso de la compuerta, la fuerza hidrodinámica, etc.

### Oreja

Para el diseño de las orejas, se utiliza acero AISI 1020 [12], entonces:

$$\sigma_{contacto} = \frac{P/2}{d e}$$

Para acero AISI 1020:

$$S_y = 350 \text{ MPa}$$

Por la tabla 16, se sabe que el factor de seguridad es:

$$n = 4.34$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma}$$

$$\sigma = \sigma_{contacto}$$

$$\frac{P/2}{d e} = \frac{S_y}{n}$$

$$e = 0.019 \text{ m} = \mathbf{20 \text{ mm}}$$

Por consideraciones prácticas se determinará que el radio de la oreja será 1.5 veces el diámetro del pasador, con esta referencia se evita que falle por desgarramiento, entonces:

$$r = 1.5 \times d_{pasador}$$

$$r = 1.5 \times 40 \times 10^{-3}$$

$$r = 0.060 \text{ m} = \mathbf{60 \text{ mm}}$$

## 2.3. Análisis de los Esfuerzos y Deformaciones Provocados por la Presión Hidrostática sobre la Compuerta.

### 2.3.1. Placa frontal

Una vez que se tiene el número de vigas y el diseño de las vigas, se procede a calcular los esfuerzos producidos por las fuerzas hidrostáticas sobre la compuerta. Según la norma NBR-8883, los esfuerzos de flexión sobre la placa frontal debidos a la presión del agua, se calculan con la teoría basada en la elasticidad, a través de la fórmula:

$$\sigma = \pm \frac{k}{100} * p * \frac{a^2}{t^2}$$

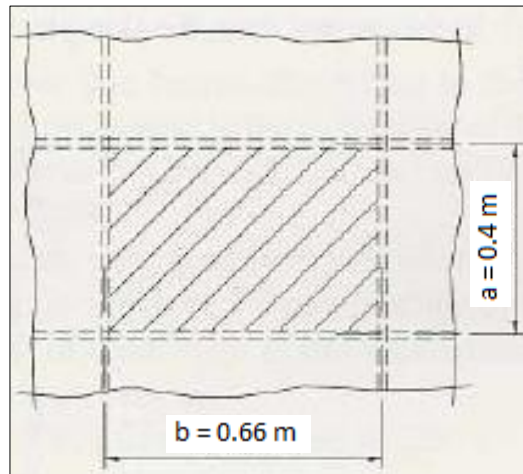
Dónde,

k.- Factor adimensional

p.- Presión del agua

$t_p$ .- Espesor de la placa

a.- Menor dimensión de la placa



**FIGURA 2.7. SEPARACIONES MÍNIMAS EN LA COMPUERTA**

Dónde,

a.- Menor dimensión de la placa

b.- Mayor dimensión de la placa

Para determinar el factor adimensional “k”, primero se definen los parámetros “b” y “a”. Por simetría tiene,

$$\frac{b}{a} = \frac{0.66}{0.4} = 1.65$$

$$\frac{b}{a} \approx 1.75$$

TABLA 10

## COEFICIENTES - K (NBR-8883) [12]

| b/a      | Unfixed mounting of the 4 edges |                  | Rigid fixing of the 4 edges |                  |                  |                  | Rigid fixing of 3 edges and unfixed mount of the fourth edge |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|----------|---------------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|          | (a)                             |                  | (b)                         |                  |                  |                  | (c)                                                          |                  |                  |                  | (d)              |                  |                  |                  |
|          | $\pm\sigma_{1x}$                | $\pm\sigma_{1y}$ | $\pm\sigma_{1x}$            | $\pm\sigma_{1y}$ | $\pm\sigma_{4x}$ | $\pm\sigma_{3x}$ | $\pm\sigma_{1x}$                                             | $\pm\sigma_{1y}$ | $\pm\sigma_{4y}$ | $\pm\sigma_{3x}$ | $\pm\sigma_{1x}$ | $\pm\sigma_{1y}$ | $\pm\sigma_{2y}$ | $\pm\sigma_{3x}$ |
| $\infty$ | 75.0                            | 22.5             | 25.0                        | 7.5              | 34.2             | 50.0             | 37.5                                                         | 11.3             | 47.2             | 75.0             | 25.0             | 7.5              | 34.2             | 50.0             |
| 3.00     | 71.3                            | 24.4             | 25.0                        | 7.5              | 34.3             | 50.0             | 37.4                                                         | 12.0             | 47.1             | 74.0             | 25.0             | 7.6              | 34.2             | 50.0             |
| 2.50     | 67.7                            | 25.8             | 25.0                        | 8.0              | 34.3             | 50.0             | 36.6                                                         | 13.3             | 47.0             | 73.2             | 25.0             | 8.0              | 34.2             | 50.0             |
| 2.00     | 61.0                            | 27.8             | 24.7                        | 9.5              | 34.3             | 49.9             | 33.8                                                         | 15.5             | 47.0             | 68.3             | 25.0             | 9.0              | 34.2             | 50.0             |
| 1.75     | 55.8                            | 28.9             | 23.9                        | 10.8             | 34.3             | 48.4             | 30.8                                                         | 16.5             | 46.5             | 63.2             | 24.6             | 10.1             | 34.1             | 48.9             |
| 1.50     | 48.7                            | 29.9             | 22.1                        | 12.2             | 34.3             | 45.5             | 27.1                                                         | 18.1             | 45.5             | 56.5             | 23.2             | 11.4             | 34.1             | 47.3             |
| 1.25     | 39.6                            | 30.1             | 18.8                        | 13.5             | 33.9             | 40.3             | 21.4                                                         | 18.4             | 42.5             | 47.2             | 20.8             | 12.9             | 34.1             | 44.8             |
| 1.00     | 28.7                            | 28.7             | 13.7                        | 13.7             | 30.9             | 30.9             | 14.4                                                         | 16.6             | 36.0             | 32.8             | 16.6             | 14.2             | 32.8             | 36.0             |

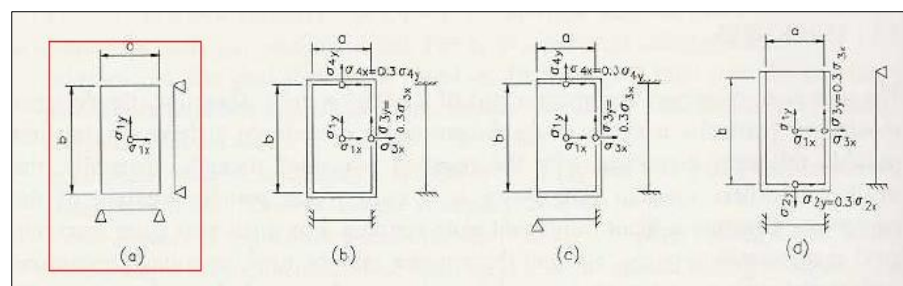


FIGURA 2.8. MODELO MATEMÁTICO DE LA COMPUERTA

[12]

Para el caso en cuestión, la compuerta se modela como simplemente apoyada en los 4 lados.

Entonces los esfuerzos serían,

**TABLA 11**  
**ESFUERZOS SOBRE LA PLANCHA FRONTAL**

| $\sigma_{1x}$ (MPa) | $\sigma_{1y}$ (MPa) |
|---------------------|---------------------|
| 118                 | 61                  |

Si,

$$\sigma_{adm} = 0.68 * 250 = 170 \text{ MPa}$$

Se nota que el mayor esfuerzo sobre la placa frontal no excede al valor de esfuerzo permisible, entonces se puede concluir que el espesor de la placa está correctamente seleccionado.

$$118 \text{ MPa} \leq 170 \text{ MPa}$$

### 2.3.2. Cálculo de la flexión en la plancha frontal

La máxima flexión se da en el centro de la plancha frontal de la compuerta y se determina de la siguiente manera:

$$f_p = \frac{\alpha * p * a^4}{E * t^3}$$

Dónde,

p.- Presión ejercida sobre la compuerta

a.- Menor dimensión de la placa

$t_p$ .- Espesor de la placa

E.- Módulo de elasticidad

$\alpha$ .- Coeficiente dado en la tabla x según las dimensiones de la placa frontal

**TABLA 12**  
**COEFICIENTE DE TIMOSHENKO [12]**

| Table 5.4 $\alpha$ -Coefficient (Timoshenko) |        |        |        |        |        |        |          |
|----------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| b/a                                          | 1.0    | 1.2    | 1.4    | 1.6    | 1.8    | 2.0    | $\infty$ |
| $\alpha$                                     | 0.0138 | 0.0188 | 0.0226 | 0.0251 | 0.0267 | 0.0277 | 0.0284   |

Entonces la flexión sería:

$$f = \frac{0.0267 * 132435 * 0.4^4}{210\,000 * 10^6 * 0.01^3}$$

$$f = 0.430 \text{ mm}$$

La máxima deflexión en la compuerta es de 1/1000, o 1mm, en este caso, la deformación es de 0.430 mm, por ende, el diseño es adecuado para el cabezal dado [12].

### 2.3.3. Cálculo del esfuerzo en las Vigas

#### Cálculo del esfuerzo de tensión

Se define el esfuerzo máximo de las vigas con carga uniformemente distribuida así:

$$\sigma = \frac{q.L^2.c}{8.I}$$

Dónde,

c.- Distancia desde el eje neutro

q.- Carga por unidad de longitud (F/B)

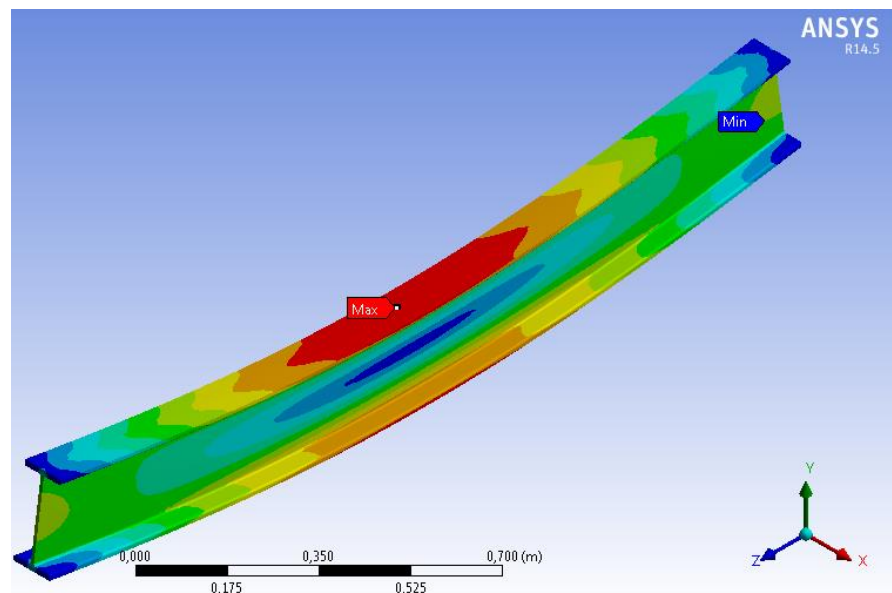
L.- Longitud de viga

I.- Momento de inercia

Entonces,

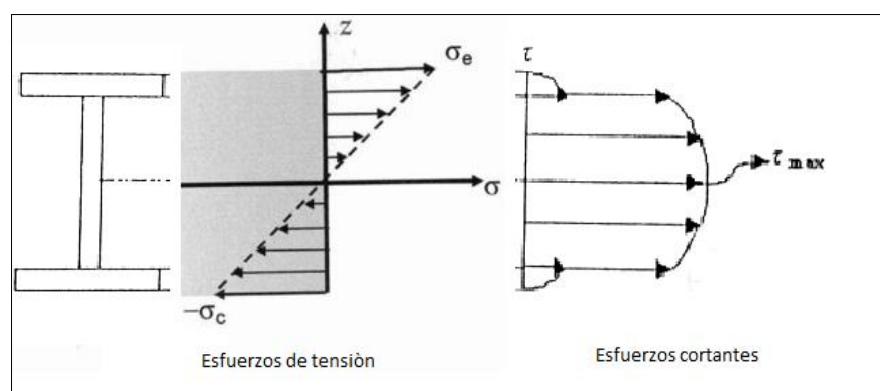
$$\sigma = 119.01 \text{ MPa}$$

Se busca el máximo esfuerzo en las vigas, este se da en la parte superior de la misma, tal como se muestra en la figura 2.9.



**FIGURA 2.9. REPRESENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LA VIGA**

En la sección superior de la viga solo hay esfuerzos normales, más no cortantes, como lo indica la figura 2.10,



**FIGURA 2.10. ESFUERZOS DE Tensión Y ESFUERZOS CORTANTES EN LA VIGA [8]**

Entonces el esfuerzo de Von Misses sería:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$\tau = 0$$

$$\sigma' = \sigma$$

$$\sigma' = 119.01 \text{ MPa}$$

El esfuerzo máximo permisible en las vigas es de 170 Mpa, según la Tabla 1, en este caso el esfuerzo de Von Misses o esfuerzo máximo producido por la fuerza hidrostática es de 119.01 MPa, corroborando el correcto diseño de las vigas.

### **Cálculo del esfuerzo cortante máximo en las vigas**

A pesar de no influir en el Esfuerzo máximo sobre la viga, debido a que no existe cortante en los puntos críticos, es importante notar la presencia del cortante máximo en la viga, entonces,

$$\tau_{max} = \frac{V}{e(h - e')}$$

Dónde,

V.- Fuerza cortante

e.- Espesor del alma

h.- Altura de la viga

e'.- Espesor medio de la viga

$$\tau_{max} = 38.9 \text{ MPa}$$

### **Cálculo de la flexión en las vigas**

La flexión en las vigas horizontales debería ser limitada, para que no afecte a la seguridad y el movimiento. La máxima deflexión ocurre en la mitad de la viga y se determina mediante:

$$f_v = \frac{5.F.L^3}{384.E.I}$$

Dónde,

F.- Carga hidrostática sobre la viga

L.- Longitud de soporte de la viga

E.- Módulo de elasticidad

I.- Momento de inercia

Entonces,

$$f_v = 2.14 \text{ mm}$$

La máxima deflexión de las vigas principales es usualmente limitada a 1/750 de la longitud de soporte, en este caso sería 2.66 mm. [12]

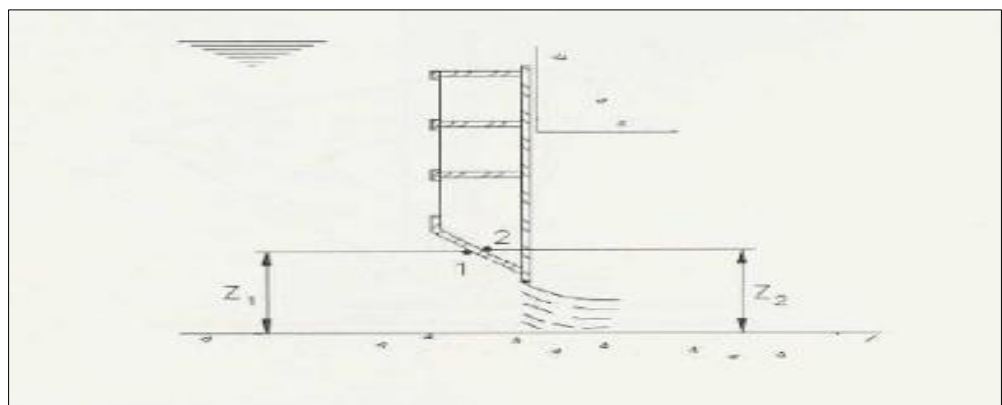
$$2.14 \text{ mm} \leq 2.66 \text{ mm}$$

Se puede concluir que las vigas están correctamente diseñadas, ya que la flexión no supera el valor máximo que recomienda la norma NBR-883.

## 2.4. Análisis de Fuerzas Hidrodinámicas

### 2.4.1. Cálculo de la Presión Hidrodinámica sobre la Compuerta

Previamente se determinó las fuerzas hidrostáticas, sin embargo, todas las consideraciones para la distribución de presiones cambian, cuando la compuerta está parcialmente abierta, la condición estática se rompe, por lo que existirán altas velocidades en el fondo de la compuerta, lo que hace que reduzca la presión local, tal como se observa en la figura 2.11.

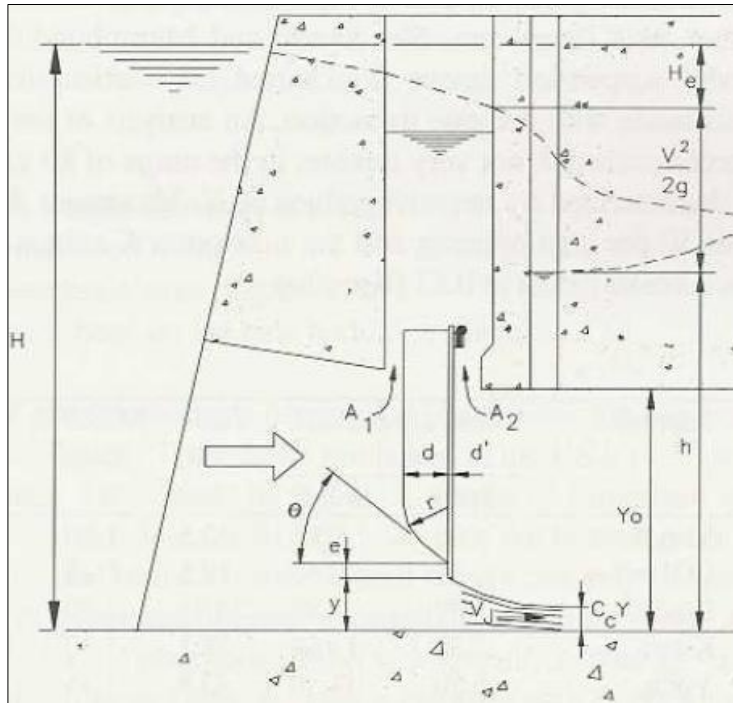


**FIGURA 2.11. COMPUERTA PARCIALMENTE ABIERTA [12]**

El fondo de la compuerta está bajo una diferencia de presiones, que causa una fuerza hacia abajo, denominada como la fuerza “downpull”, que vendría a representar una fuerza hidrodinámica. Para la determinación del comportamiento de esta fuerza, se utilizarán ecuaciones de corte experimental.

“La fuerza downpull y la fuerza de sustentación, ocurren típicamente en compuertas tipo vagón de salida de alta presión. La magnitud de la fuerza downpull y de la fuerza de sustentación están en función del cabezal, la configuración de la puerta, de la geometría de la guía y de las condiciones de flujo. Estas fuerzas son el resultado de los cambios de presión debido al flujo de agua por debajo o sobre la parte superior de la compuerta. La fuerza downpull es una reducción en la fuerza de empuje debido a las presiones bajas en la parte inferior de la compuerta ocasionadas por el flujo de alta velocidad por debajo de la compuerta. En este caso, cuando la cara de la placa frontal está frente al cabezal de agua, la fuerza de sustentación es el aumento relativo de la fuerza de flotación en la parte inferior de la compuerta en comparación con el peso muerto de la compuerta con solo presión atmosférica en la parte superior de la misma.” [17]

En el análisis hidrodinámico entran en consideración otros parámetros como el espesor de la compuerta, espesor del sello, porcentaje de apertura de la compuerta, etc.



**FIGURA 2.12. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PARA TÚNEL DE LA COMPUERTA [12]**

De la figura 2.13, se obtiene los siguientes parámetros:

A1.- Área entre la placa frontal y la cara frontal del marco estructural

A2.- Área la cara posterior de la compuerta y el marco estructural

$\Theta$ .- Angulo de biselado del fondo de la compuerta

e.- Extensión del labio inferior de la compuerta

d.- Espesor de la compuerta

Cc.- Coeficiente de contracción

Y.- Apertura de la compuerta

Yo.- Altura de la compuerta

Una vez definidos estos parámetros, procedemos a determinar la fuerza downpull sobre la compuerta.

La principal porción de la fuerza downpull es determinado por la siguiente ecuación:

$$P_1 = (K_T - K_B) B d \gamma \frac{V_j^2}{2g}$$

Dónde,

Kt, Kb.- Coeficientes de la fuerza downpull en la parte superior e inferior de la compuerta respectivamente.

B.- Ancho de compuerta

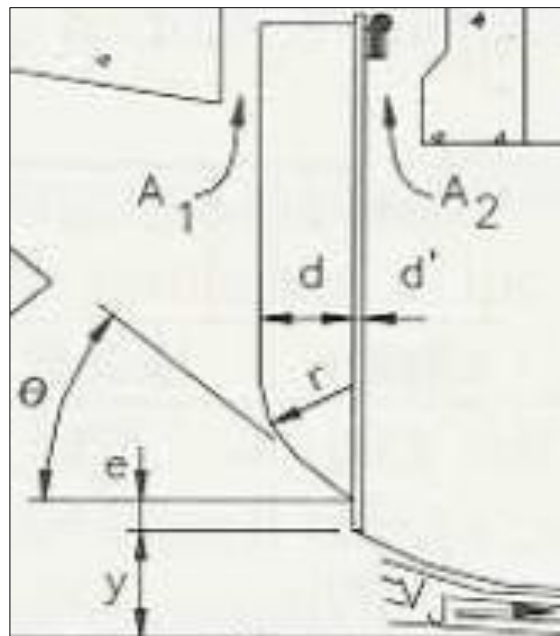
Vj.- Velocidad en la vena contracta.

D.- Espesor de la compuerta

Si se asume un  $A_1 = \infty$ , se puede decir que:

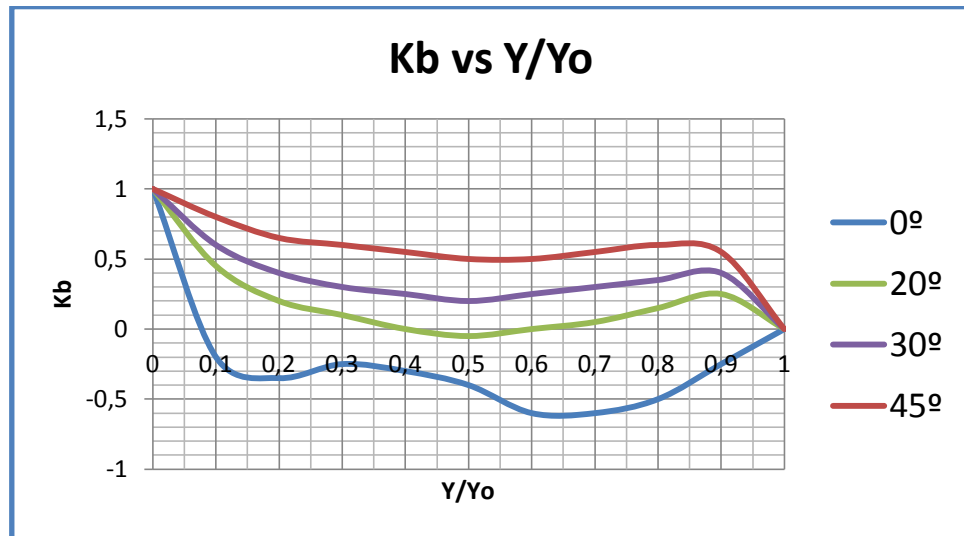
$$P_1 = (1 - K_B) B d \gamma \frac{v_j^2}{2g}$$

El coeficiente  $K_B$  de la fuerza downpull está en función de la apertura de la compuerta y en función del grado de inclinación que tenga la compuerta en la parte inferior. Es por esto que el diseño de la parte inferior de la compuerta es fundamental para el análisis de los esfuerzos resultantes sobre la misma-



**FIGURA 2.13. GRADO DE INCLINACIÓN DE LA COMPUERTA [12]**

La gráfica de  $K_b$  vs  $Y/Y_o$  para varios ángulos de inclinación en la parte inferior de la compuerta sería:



**FIGURA 2.14. VARIACIÓN DE  $K_b$  VS APERTURA DE COMPUERTA PARA VARIOS GRADOS DE INCLINACIÓN EN LA PARTE INFERIOR DE LA COMPUERTA**

El espesor de la compuerta está dado por:

$$\frac{y_o}{d} = 6$$

Dónde,

$Y_o$ .- Altura de compuerta

$d$ .- Espesor de compuerta

$$\frac{2}{6} = d$$

$$d = 0.33 \text{ m}$$

Entonces  $P_1$  será:

$$P_1 = (1 - K_B)(2)(0.33)(1000)(9.8) \frac{V_j^2}{2(9.8)}$$

$$P_1 = (330)(1 - K_B)V_j^2$$

### Velocidad $V_j$

Al iniciar la apertura de la compuerta, la velocidad es máxima e igual a:

$$V_j = \sqrt{2 * 9.8 * (10)} = 14 \text{ m/s}$$

En la descarga máxima, la velocidad será, según la ecuación:

$$V_j = \frac{Q}{BC_c y} = \frac{12.5}{C_c y}$$

**TABLA 13**  
**COEFICIENTES DE DESCARGA PARA COMPUERTAS DE**  
**ELEVACIÓN VERTICAL [12]**

| Table 8.2 Discharge Coefficients for Vertical Lift Gates |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| % of gate opening                                        | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   |
| Discharge coefficient, $C_v$                             | 0.73 | 0.73 | 0.74 | 0.74 | 0.75 | 0.77 | 0.78 | 0.80 | 0.80 |

Una segunda parte de la fuerza downpull aparece por la diferencia de presión actuando en las proyecciones horizontales de la

compuerta como se da en el sello superior. Si la compuerta está presionada contra la pared posterior la fuerza downpull P2 es dada por:

$$P_2 = K_T \cdot A_s \cdot \gamma \cdot \frac{V_j^2}{2g}$$

Dónde,

$A_s$ .- Área proyectada de la parte superior del sello

$$A_s = B \times A$$

$$A_s = 0.1 \text{ m}^2$$

Entonces P2 seria:

$$P_2 = (0.1) \cdot (1000) \cdot (9.8) \cdot \frac{V_j^2}{2(9.8)}$$

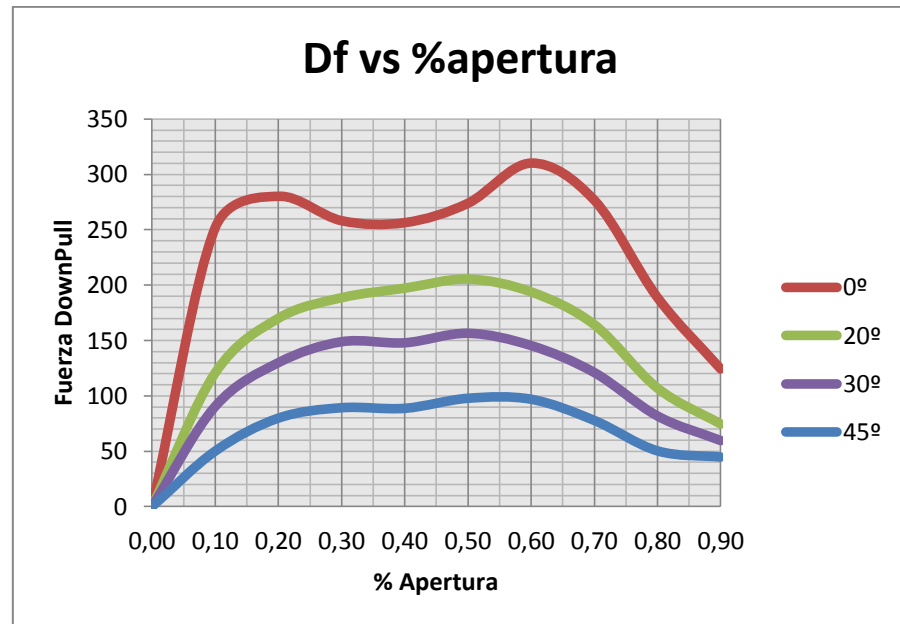
$$P_2 = 50 \cdot V_j^2$$

La fuerza P2, actúa solo cuando el sello superior permanece presionado contra el marco estructural. Entonces P2 solo actuará cuando (y=0) hasta y=0.293.

Entonces,

$$P_2 = 50 * 14^2 = 9800 \text{ N}$$

Entonces, Como se aprecia en la Figura 2.15, una compuerta con ángulo de inclinación en su parte inferior de  $45^\circ$  produce menos fuerza downpull sobre la misma, con un valor máximo de 100 KN.



**FIGURA 2.15. FUERZA DOWNPULL VS % APERTURA PARA VARIOS ÁNGULOS DE INCLINACIÓN**

# **CAPÍTULO 3**

## **3. MODELADO CON EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LA COMPUERTA**

### **3.1. Tipo de Elementos Finitos**

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método de cálculo utilizado en diversos problemas de ingeniería, que se basa en considerar al cuerpo o estructura dividido en elementos discretos, con determinadas condiciones de vínculo entre sí, generándose un sistema de ecuaciones que se resuelve numéricamente y proporciona el estado de tensiones y deformaciones. También se utiliza en matemáticas como método nodal aproximado para resolver ecuaciones diferenciales en forma numérica.

La base del método de los elementos finitos es la representación de un cuerpo por un ensamble de subdivisiones llamadas

elementos. Estos elementos se interconectan a través de puntos llamados nodos.

Una manera de discretizar un cuerpo o estructura es dividirla en un sistema equivalente de cuerpos pequeños, tal que su ensamble representa el cuerpo original. La solución que se obtiene para cada unidad se combina para obtener la solución total. Por ende, La solución del problema consiste en encontrar los desplazamientos de estos puntos y a partir de ellos, las deformaciones y las tensiones del sistema analizado. Las propiedades de los elementos que unen a los nodos, están dadas por el material asignado al elemento, que definen la rigidez del mismo, y la geometría de la estructura a modelar (a partir de las Leyes de la Elástica). Las deformaciones y las fuerzas externas se relacionan entre sí mediante la rigidez y las relaciones constitutivas del elemento. [10]

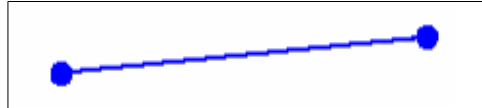
Los tipos de elementos utilizados generalmente en la resolución a través de MEF son:

➤ Elementos Lineales (1-D)

Estos pueden ser:

- Resortes
- Barras

- Vigas
- Caños

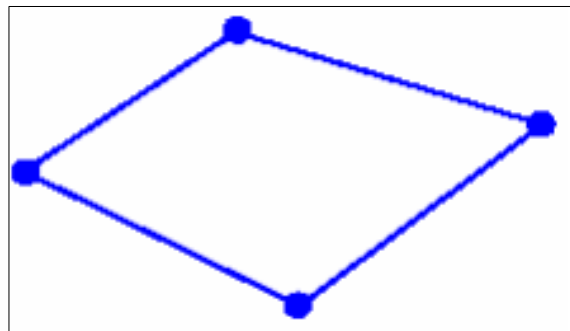


**FIGURA 3.1. ELEMENTO LINEAL [18]**

➤ Elementos Planos (2-D)

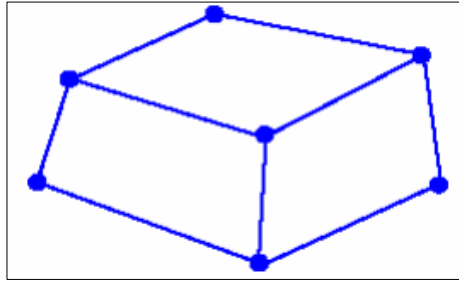
Estos pueden ser:

- membranas
- placas



**FIGURA 3.2. ELEMENTO PLANO 2D [18]**

➤ Elementos Sólidos (3-D)



**FIGURA 3.3. ELEMENTOS TRIDIMENSIONALES [18]**

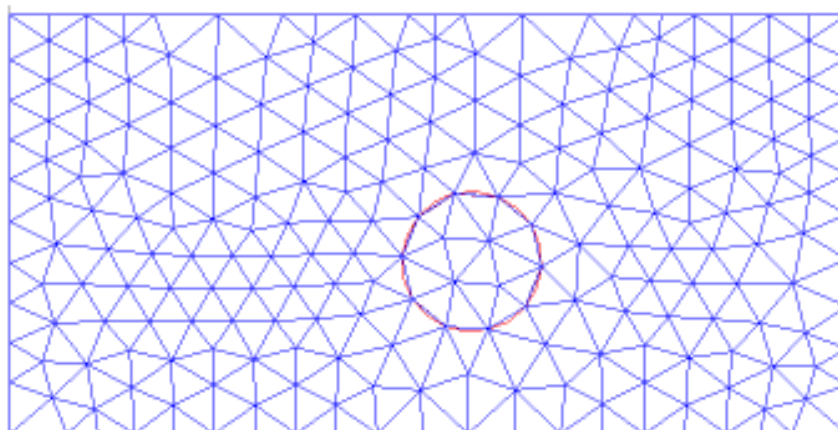
Es importante destacar que se puede utilizar combinaciones de estos elementos actuando en conjunto.

### **3.2. Tipo de Mallado**

Generar una correcta malla de elementos finitos es el paso más importante para lograr precisos y fiables resultados. El programa ANSYS cuenta con un generador automático de mallas, el cual puede sustancialmente simplificar esta tarea.

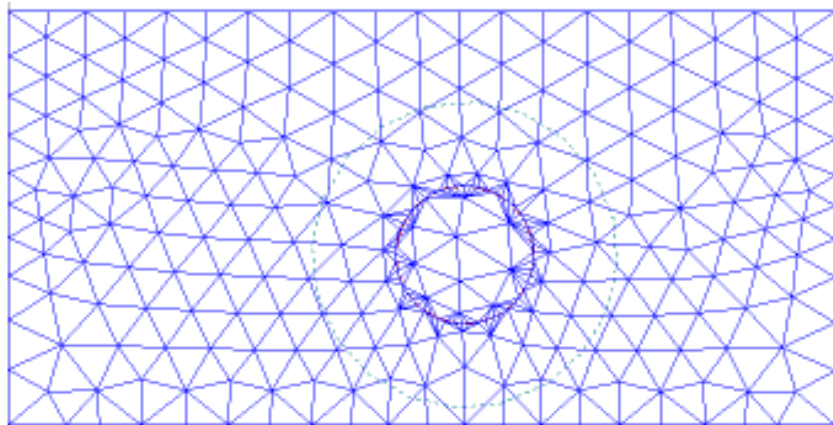
Sin embargo, ciertas reglas deben seguirse cuando se crea mallas de elementos finitos:

- La densidad de la malla básica puede ser definida según las necesidades del caso. El objetivo es entonces encontrar una densidad óptima de malla, lo cual depende mayormente de la experiencia del usuario.



**FIGURA 3.4. DENSIDAD DE MALLA [18]**

- La malla de elementos finitos debe ser suficientemente fina en los lugares donde se espera gradientes de tensión más grandes (puntos de soportes, esquinas, aberturas, etc.). La difusión del refinamiento debe ser por lo menos de 3-5 veces el refinamiento deseado en el centro del refinamiento. Además, ambos valores (densidad y difusión de refinamiento) deben ser razonables desde el punto de vista de la densidad de la malla establecida que se aplica a la región circundante. Esto garantiza una suave transición entre regiones con diferentes densidades de mallas. Líneas singulares deben abordarse de la misma forma. Para problemas más complicados es útil en primer lugar, llevar a cabo el análisis con mallas más gruesas y luego de examinar el resultado, refinar la malla en consecuencia.



**FIGURA 3.5. NUEVA MALLA LUEGO DE REFINAR LA MALLA ORIGINAL ALREDEDOR DEL CÍRCULO [18]**

La generación de malla es uno de los puntos más críticos en lo que respecta a la simulación de ingeniería. Si se crean muchos elementos puede ocasionar que la solución se demore demasiado tiempo, y muy pocos elementos pueden mostrar resultados incorrectos. La tecnología de mallado de ANSYS provee los medios para balancear los requerimientos del cliente para obtener la malla indicada para todo tipo de simulación.

El mallado automático de ANSYS puede generar los siguientes tipos de mallas:

- Tetraédrico
- Hexaédrico

- Inflación de prismas por capas
- Inflación de hexaedros por capas
- Núcleo hexaédrico
- Body fitted Cartesian
- Cut cell Cartesian

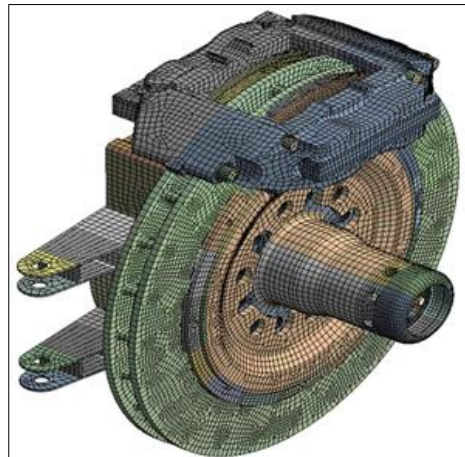
Usuarios avanzados pueden cambiar de método sin mucha complicación y a su vez usar varios métodos a la vez.

Objetos diferentes requieren diferente análisis de mallas. Por ejemplo, la dinámica de fluidos necesita una muy alta calidad de malla, tanto en forma de elemento como en el cambio de tamaño entre elementos. Un análisis mecánico estructural necesita usar eficientemente la malla, ya que el tiempo es crucial y la cantidad de elementos influye directamente sobre el mismo.

### **Método de mallado: Hexaédrico**

La tecnología de mallado de ANSYS provee múltiples métodos para generar una malla de solo elementos hexaédricos. Dependiendo en la complejidad del modelo, la calidad, el tipo y el tiempo de mallado pueden variar. El mallado automático de ANSYS

puede generar elementos hexaédricos o también una malla hexaédrica controlada, para optimizar la eficiencia y la precisión de la solución.



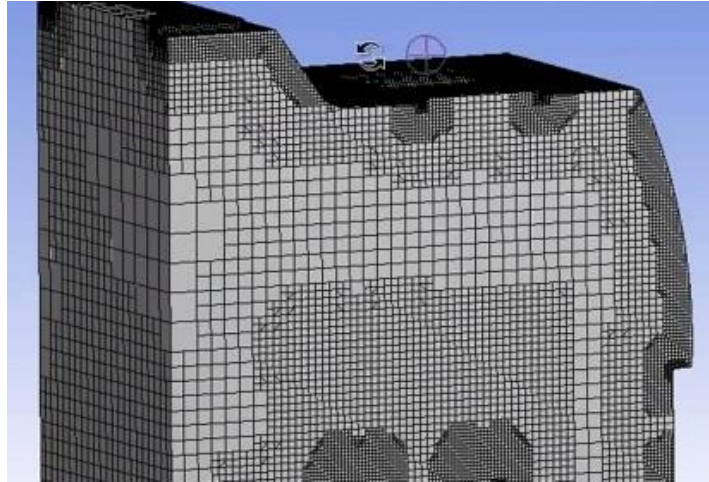
**FIGURA 3.6. MALLA HEXAÉDRICA DE UN SISTEMA DE FRENOS, USANDO COMBINACIONES DE MALLADO HEXAÉDRICO. [3]**

El método de mallado hexaédrico tiene varios sub-métodos, como lo son:

#### **Cut cell Cartesian**

Este método genera un gran porcentaje de celdas hexaédricas en un plano cartesiano, del cual se obtienen resultados de flujo de fluidos precisos.

Cerca de la superficie, se usan varios tipos de elementos que permiten que la malla se adapte a superficies con filo.

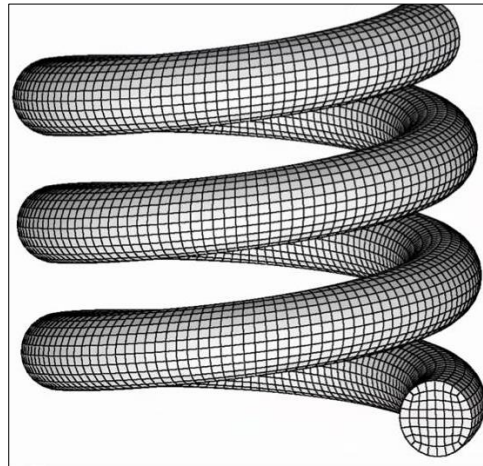


**FIGURA 3.7. MALLADO TIPO CUT CELL CARTESIAN [3]**

### **Barrido automático**

Los cuerpos barribles, son automáticamente detectados con mallado hexaédrico, para todas las partes del cuerpo.

El tamaño del elemento se puede modificar según las necesidades, teniendo más control sobre el barrido automático.

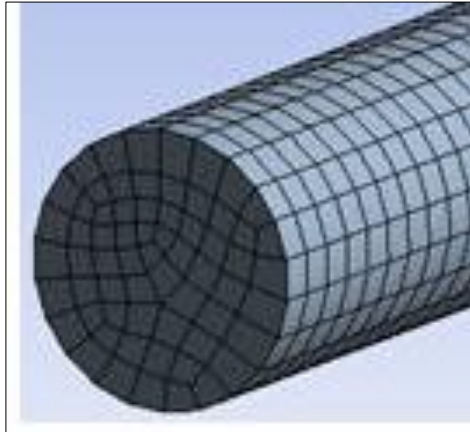


**FIGURA 3.8. MALLADO TIPO BARRIDO AUTOMÁTICO [3]**

### **Barrido de sólidos finos**

Este método puede generar rápidamente un mallado hexaédrico para sólidos de bajo espesor que tienen múltiples caras como fuente y objetivo. Se puede usar en conjunto con otros métodos de mallado.

Así como en el barrido automático, también se puede controlar el tamaño del elemento para poder dirigir a conveniencia el barrido de sólidos finos.

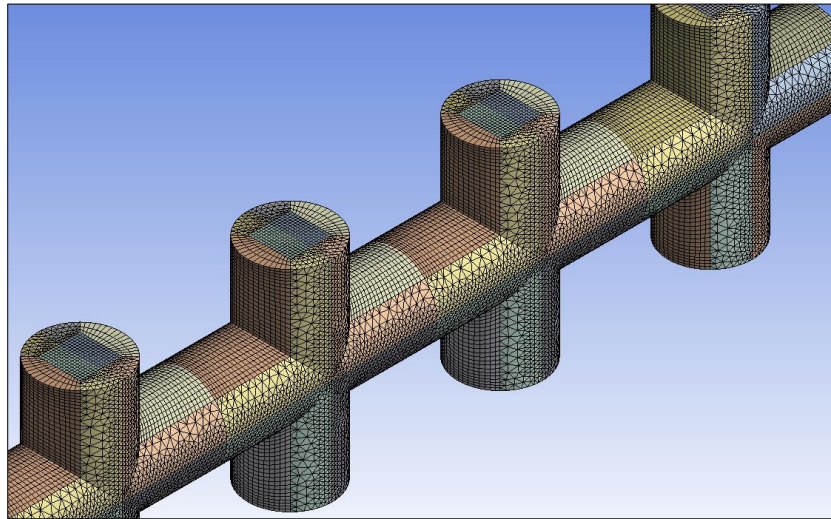


**FIGURA 3.9. MALLADO TIPO BARRIDO DE SÓLIDOS  
FINOS [3]**

### **Barrido Multi Zonas**

Este barrido es más avanzado, usa descomposición automatizada para poder intentar crear automáticamente un mallado hexaédrico puro o casi puro en geometrías complejas.

Este método es capaz de soportar múltiples selecciones de fuentes y objetivos, y a su vez controlar el tamaño de los elementos.

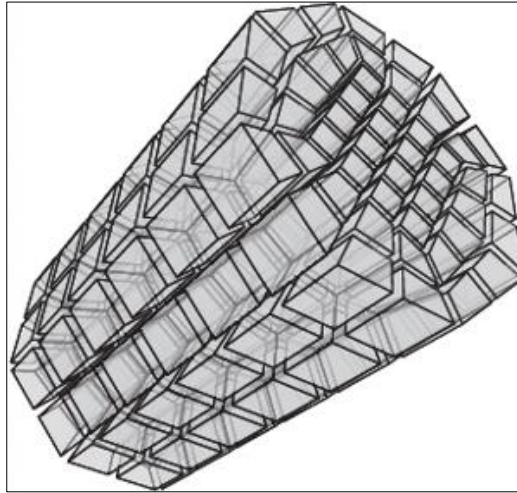


**FIGURA 3.10. MALLADO TIPO BARRIDO MULTI ZONAS [3]**

### **Hexaédrico puro**

Este procedimiento usa un enfoque de malla sin estructura para generar una superficie con solo formas cuadrilaterales para luego llenarla con un mallado hexaédrico puro.

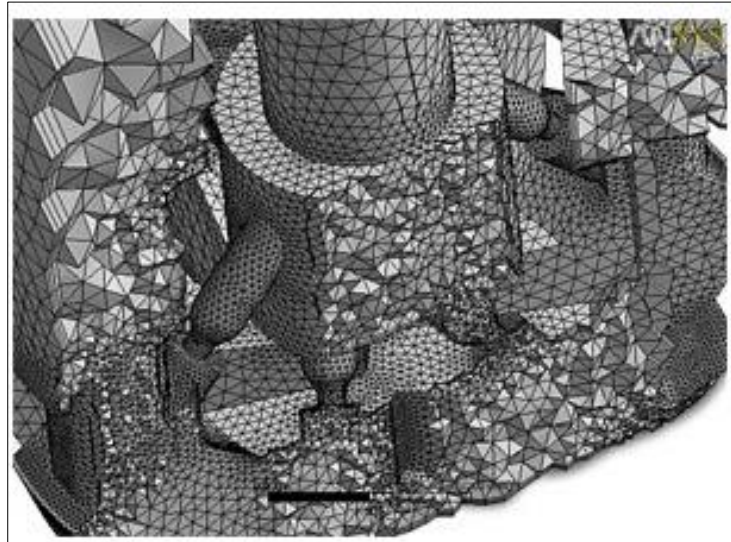
Este acercamiento generalmente brinda unos buenos elementos hexaédricos en los límites de una parte no uniforme, con un elemento híbrido hexaédrico, prisma, piramidal, tetraédrico que usa el programa internamente.



**FIGURA 3.11. MALLADO TIPO HEXAÉDRICO PURO [3]**

**Método de mallado: Tetraédrico**

La combinación de superficies robustas, inflación y mallado tetraédrico aseguran una malla de alta calidad, apropiada para cualquier simulación. Con esta técnica se puede controlar el tamaño, conectividad, mapeo y la topología de los elementos.

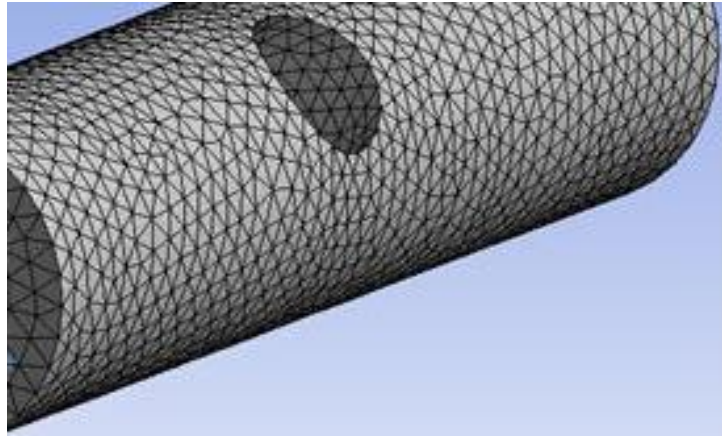


**FIGURA 3.12. MALLADO TETRAÉDRICO [3]**

### **Patch Conforming**

Este método usa un acercamiento de abajo hacia arriba, primero crea el mallado superficial y luego el volumétrico. El programa usa internamente múltiples algoritmos de mallado de superficie triangular para asegurar una buena calidad de mallado superficial en el primer mallado.

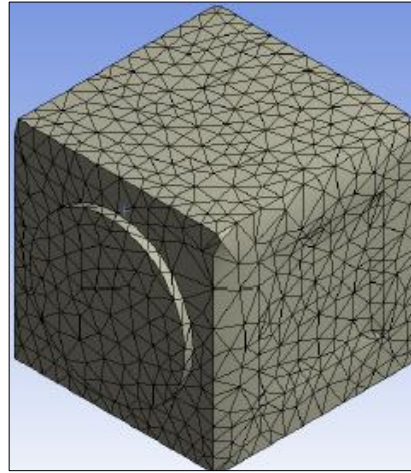
Entre todo este proceso de mallado, se pueden encontrar opciones avanzadas para definir el tamaño de los elementos, refinamiento, suavidad y calidad de la malla.



**FIGURA 3.13. TIPO DE MALLADO PATCH CONFORMING [3]**

### **Patch independent**

A diferencia del método Patch Conforming, éste tiene un enfoque de arriba hacia abajo, es decir, primero crea una malla volumétrica para luego extraer la malla superficial de los límites. Los problemas más comunes con el mallado vienen de una geometría mal hecha. Si la geometría es la base para crear la malla, esta será en ciertas ocasiones no satisfactoria.



**FIGURA 3.14. TIPO DE MALLADO PATCH  
INDEPENDENT [3]**

### **Generación del Modelo matemático**

El propósito del análisis por elementos finitos es de recrear matemáticamente el comportamiento de un sistema de ingeniería real, en otras palabras, el análisis debe ser un modelo matemático preciso de un prototipo físico.

Se entiende por generación del modelo matemático por la generación de los nodos y elementos que representan el volumen espacial y la conectividad del sistema actual.

Se pueden utilizar dos métodos diferentes para generar un modelo matemático: el modelado de sólidos y la generación directa.

Con el modelado de sólidos, se describen los límites geométricos del modelo, se controla el tamaño y la forma deseada del elemento para luego ordenar al programa ANSYS que genere todos los nodos y elementos de forma automática.

Por el contrario, con el método de generación directa, hay que determinar la ubicación, el tamaño y la forma de cada elemento antes de definir estas entidades en el modelo ANSYS.

### **Modelado de sólidos**

Las ventajas del modelado de sólidos son:

- Es generalmente más apropiado para los modelos grandes o complejos, especialmente los modelos 3-D.
- Permite trabajar con un número relativamente pequeño de datos.
- Permite operaciones geométricas (tales como arrastrar y rotar) que no se pueden hacer con los nodos y elementos.
- Facilita el uso de características de optimización de diseño del programa ANSYS.
- Es indispensable para un mallado adaptable.

- Se requiere con el fin de hacer el refinamiento del área de la malla después de aplicar cargas.
- Fácilmente permite modificaciones a la geometría.

Sin embargo, el modelado de sólidos tiene las siguientes desventajas:

- Puede ocupar mucho espacio y tiempo del CPU.
- A veces se puede "fallar" (el programa no será capaz de generar la malla de elementos finitos) en determinadas circunstancias.

### **Generación directa**

En el lado positivo, la generación directa:

- Es beneficiosa para los modelos pequeños o sencillos.
- Le proporciona un control completo sobre la geometría y la numeración de cada nodo y cada elemento.

Sin embargo, la generación directa:

- Normalmente demora mucho tiempo a excepción de los modelos simples.

- No se puede utilizar con un mallado adaptable.
- Hace que la optimización del diseño sea menos conveniente.
- Se dificulta la modificación de la malla (herramientas como refinamiento del área de mallado, SmartSizing, etc. no pueden ser utilizadas).
- Se puede llegar a ser tedioso, requiere más atención a cada detalle de su mallado.

### **3.3. Proceso de Análisis por Elementos Finitos**

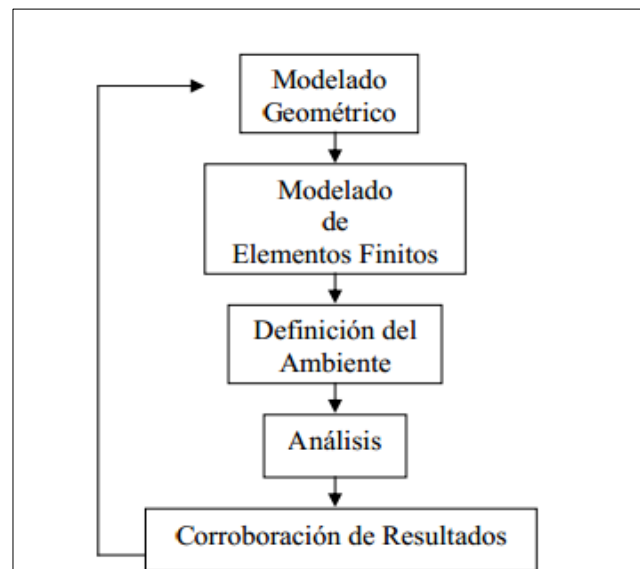
El proceso de análisis por elementos finitos se puede describir como:

- Modelado Geométrico: Creación del modelo matemático del objeto o del conjunto. Reproducción del sólido en forma precisa y de la geometría de la superficie. (Ver figura 3.16)
- Modelado de Elementos Finitos: Subdividir la geometría del modelo en elementos discretos. Asignar las propiedades del material y del elemento. (Ver figura 3.17)

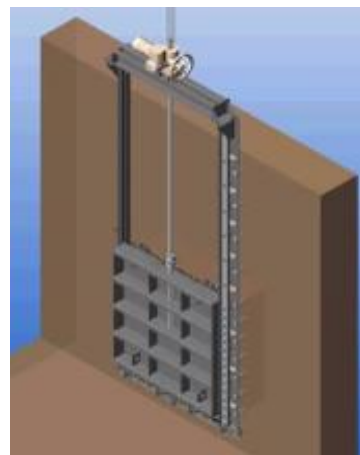
➤ Definición del Ambiente: Aplicar las cargas y las condiciones de borde para simular el ambiente de la operación. (Ver figura 3.18)

➤ Análisis: Computar los resultados (tensiones, deformaciones, etc.) a partir de análisis estáticos, dinámicos o de transferencia de calor. (Ver figura 3.19)

➤ Corroboración de Resultados: Comparar los resultados con los criterios de diseño. Rediseñar la estructura y repetir el proceso si fuese necesario. (Ver figura 3.15)



**FIGURA 3.15. PROCESO DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS [3]**



**FIGURA 3.16. MODELO GEOMÉTRICO DE LA COMPUERTA**

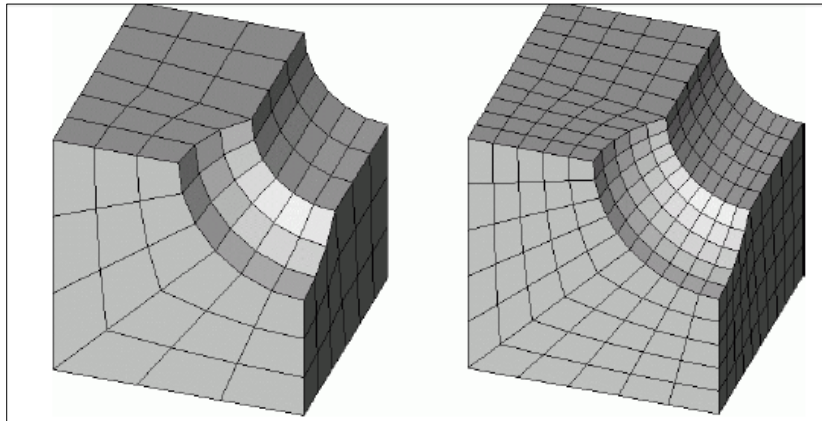


FIGURA 3.17. EJEMPLO DE DENSIDAD DE MALLADO

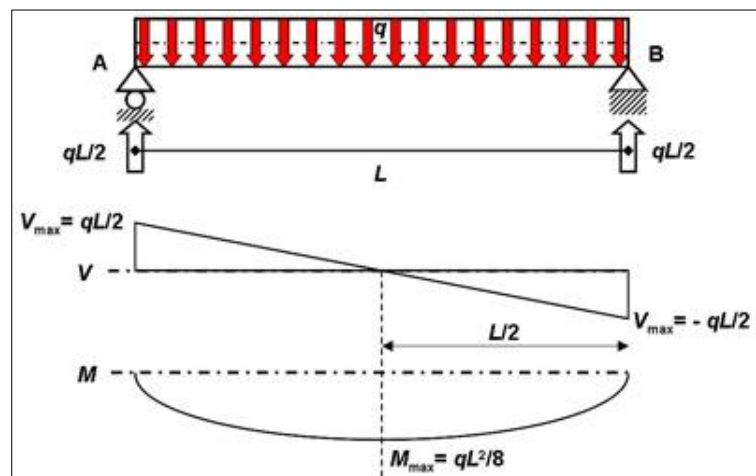
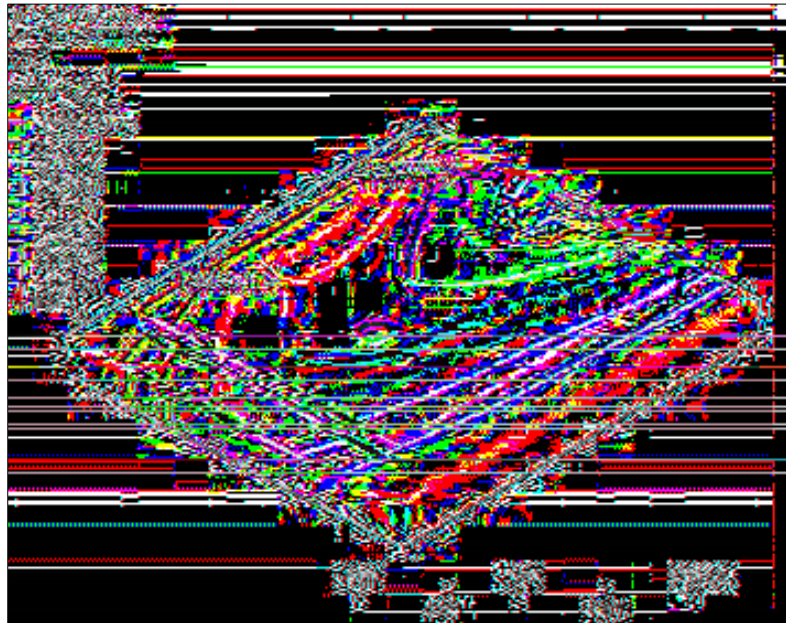


FIGURA 3.18. FUERZAS APLICADAS SOBRE LAS VIGAS HORIZONTALES [9]



**FIGURA 3.19. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA  
SIMULACIÓN EN ANSYS**

En la actualidad, el uso de este Método FEM ha crecido notablemente debido a la utilización de softwares avanzados (además de un hardware potente que debe poseer gran velocidad y mucha memoria).

Los softwares más utilizados en la actualidad son:

- Ansys
- Dyna 3D
- Abaqus

### **3.4. Simulación de Fuerzas Hidrostáticas**

#### **3.4.1. Análisis de la presión hidrostática sobre la compuerta.**

En el capítulo 2, se determina la fuerza total sobre cada uno de los componentes de la compuerta. A partir del modelo matemático propuesto, se obtiene la fuerza hidrostática total del agua sobre la compuerta y la posición de la resultante desde el fondo del embalse. A partir de esto se realiza el proceso de análisis por elementos finitos a cada componente en estudio.

#### **Proceso de análisis de elementos finitos de las vigas horizontales.**

Modelado Geométrico.

Las vigas son seleccionadas de la Tabla de Perfiles IPN (Apéndice), la cual muestra todos los tipos de vigas IPN.

Definición del Ambiente

El diseño de la compuerta consta de cuatro vigas, las cuales tienen dimensiones de la cara frontal de 2 metros de largo por 0.098

metros de ancho; entonces la presión sobre cada una de las vigas será:

$$F_{Total} = W/4$$

$$F_{Total} = 132.43 \text{ KN}$$

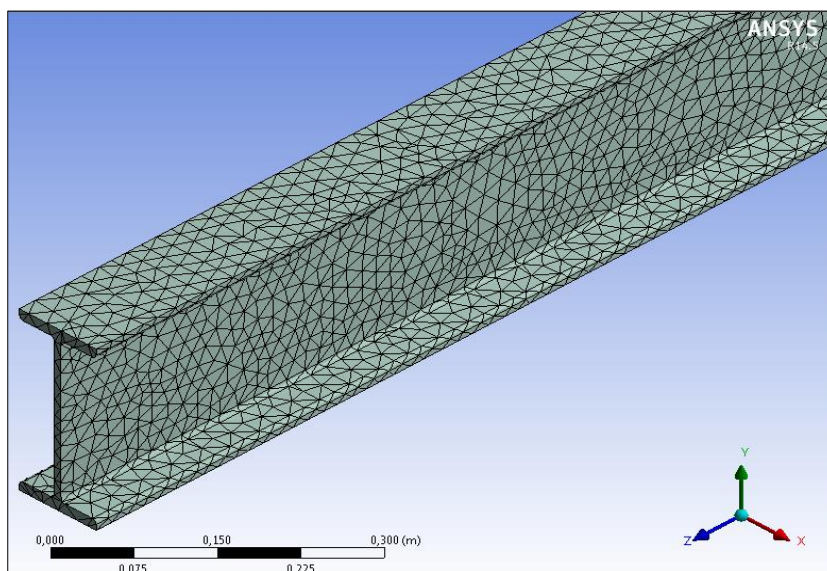
Entonces:

$$P_{viga} = \frac{F_{Total}}{A_{frontal}}$$

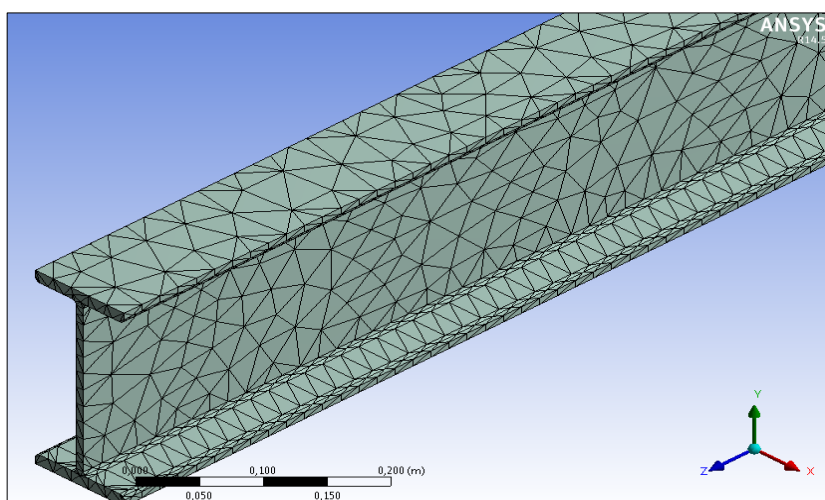
$$P_{viga} = 6.7 \times 10^5 \text{ Pa}$$

### Modelado de Elementos Finitos

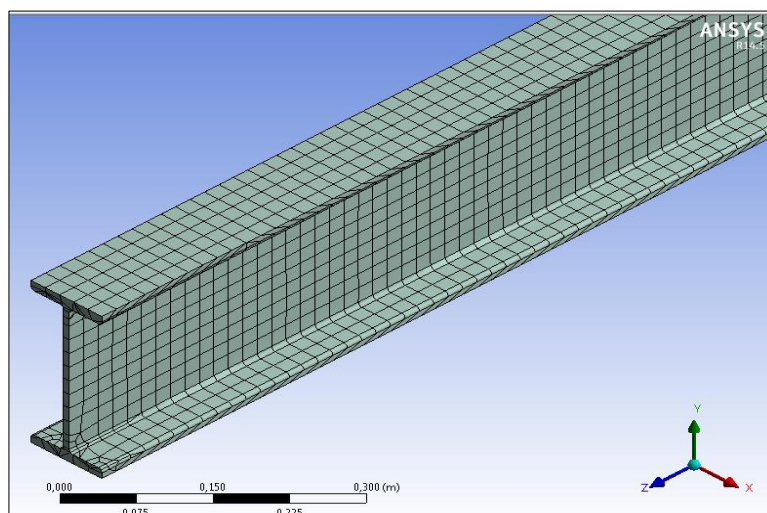
Como descrito anteriormente, hay distintos tipos de mallados, a continuación los ejemplos de los mismos, aplicados en la viga IPN.



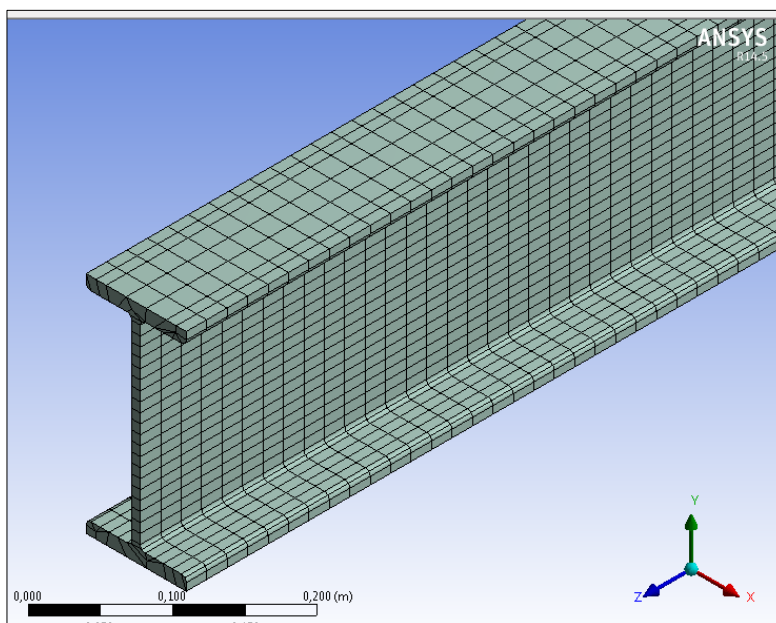
**FIGURA 3.20. MALLADO TETRAÉDRICO PATCH  
INDEPENDENT**



**FIGURA 3.21. MALLADO TETRAÉDRICO PATCH  
CONFORMING**



**FIGURA 3.22. MALLADO HEX DOMINANT ALL QUAD**



**FIGURA 3.23. MALLADO SWEEP ALL QUAD**

## **Proceso de análisis de elementos finitos del conjunto rueda-eje**

### Modelado Geométrico

En la sección 2.2.6.3 se diseñan los ejes según las especificaciones del caso, y se detalla el modelo geométrico. (Ver Apéndice)

### Definición del Ambiente

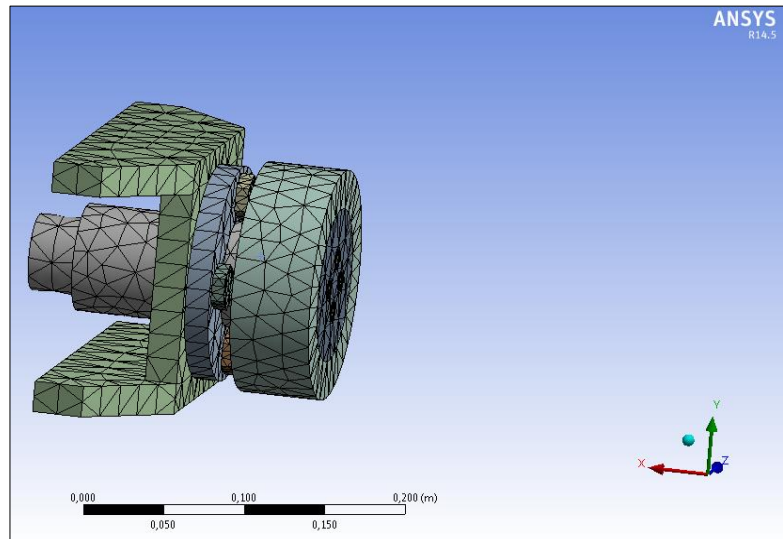
Son 8 ejes en total, por lo tanto se tiene que la fuerza en cada eje es:

$$F_{Total} = W/8$$

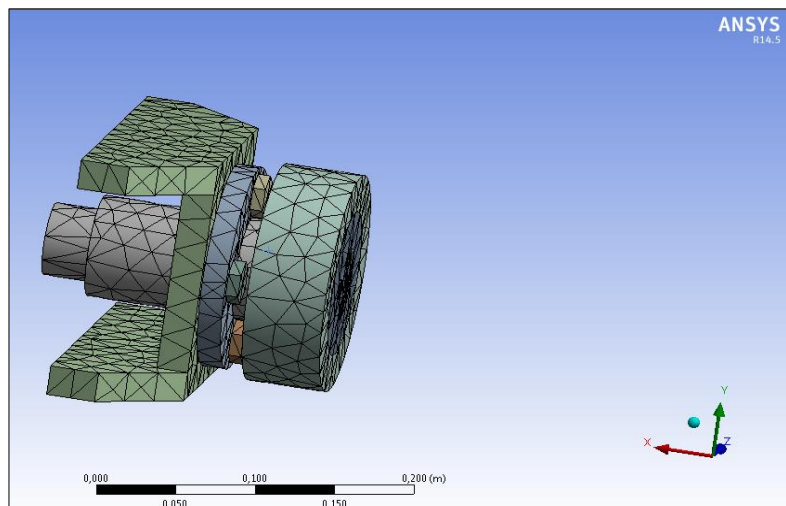
$$F_{Total} = 66.21 \text{ KN}$$

### Modelado de Elementos Finitos

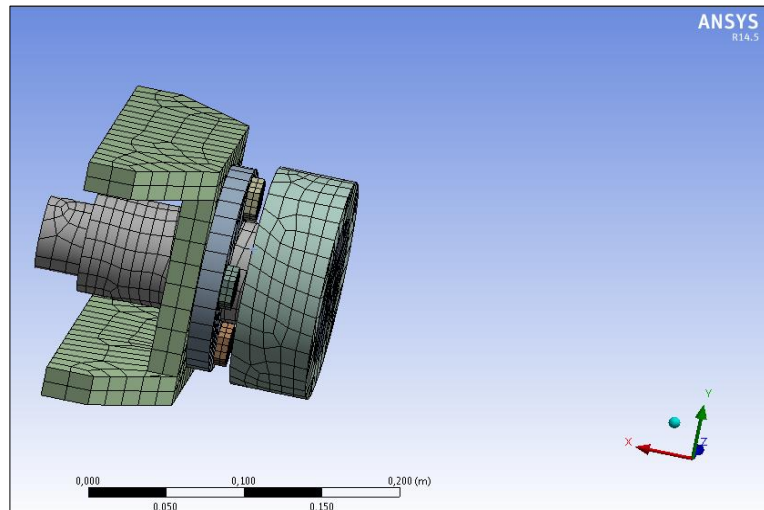
Como descrito anteriormente, hay distintos tipos de mallado, a continuación se tiene varios ejemplos de los mismos, aplicados al conjunto en cuestión.



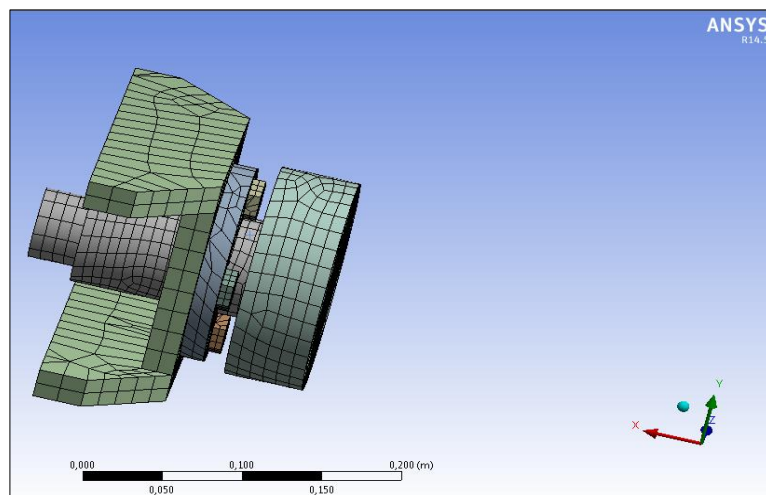
**FIGURA 3.24. MALLADO TETRAÉDRICO PATCH  
CONFORMING**



**FIGURA 3.25. MALLADO TETRAÉDRICO PATCH  
INDEPENDENT**



**FIGURA 3.26. MALLADO HEX DOMINANT QUAD/TRI**



**FIGURA 3.27. MALLADO HEX DOMINANT ALL QUAD**

**Proceso de análisis de elementos finitos de la compuerta**

Modelado Geométrico

La compuerta tipo vagón, es el conjunto de varios elementos estructurales y mecánicos, ensamblados ya sea por soldadura o con pernos. (Ver apéndice)

#### Definición del Ambiente

La compuerta se encuentra sumergida a 10 metros de profundidad, lo que produce una fuerza que se ejerce sobre la misma de 353.16 KN. Se toma en cuenta las fuerzas dinámicas añadiendo un factor de 1.5 a la fuerza hidrostática. La presión por lo tanto sería de 132.43 MPa.

#### Modelado de Elementos Finitos

Como descrito anteriormente, hay distintos tipos de mallados, a continuación los ejemplos de los mismos.

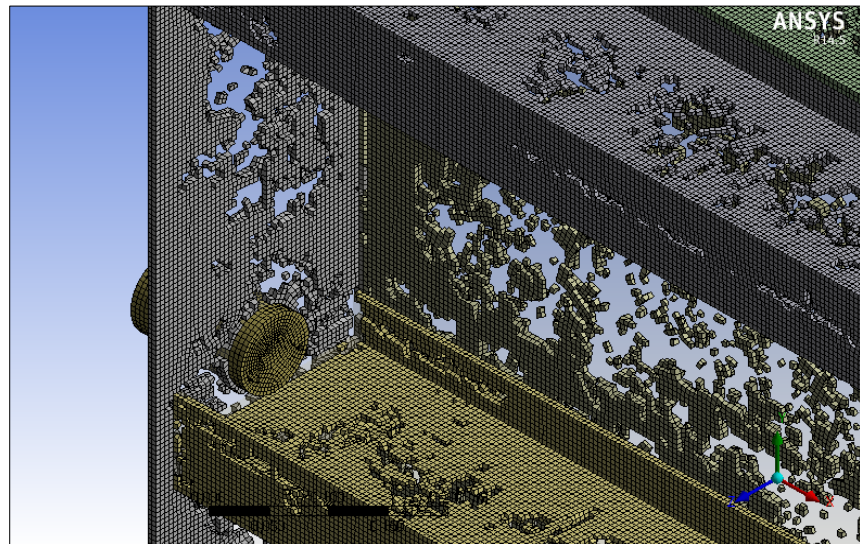


FIGURA 3.28. ELEMENTOS HEXAÉDRICOS

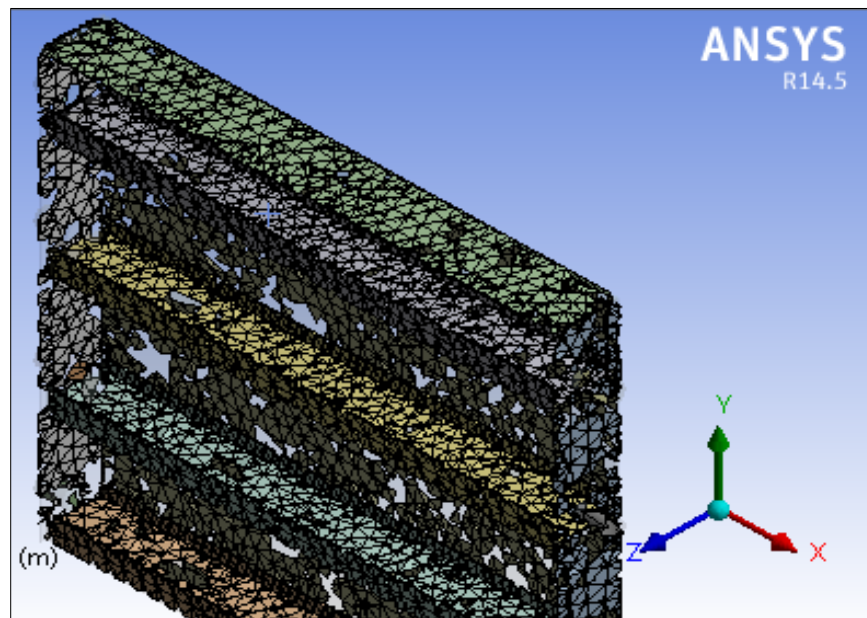
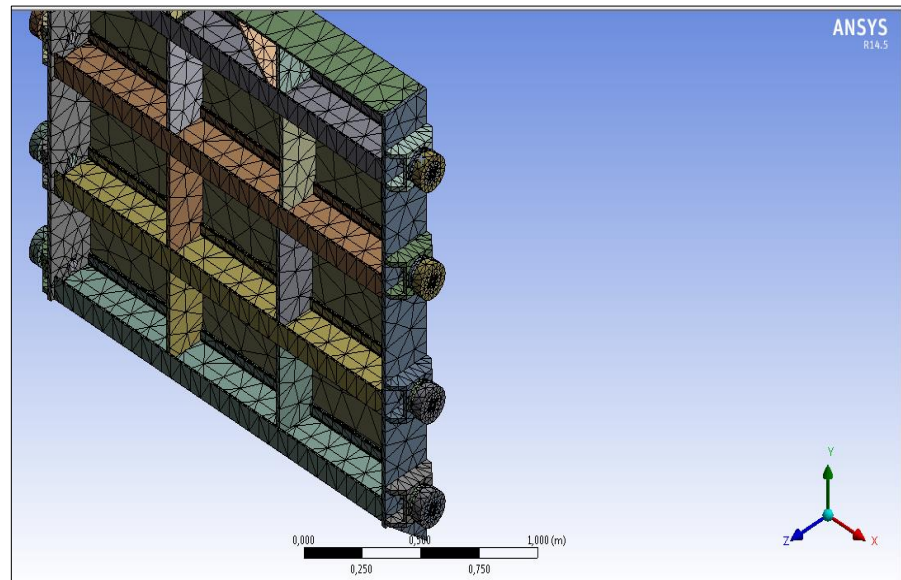
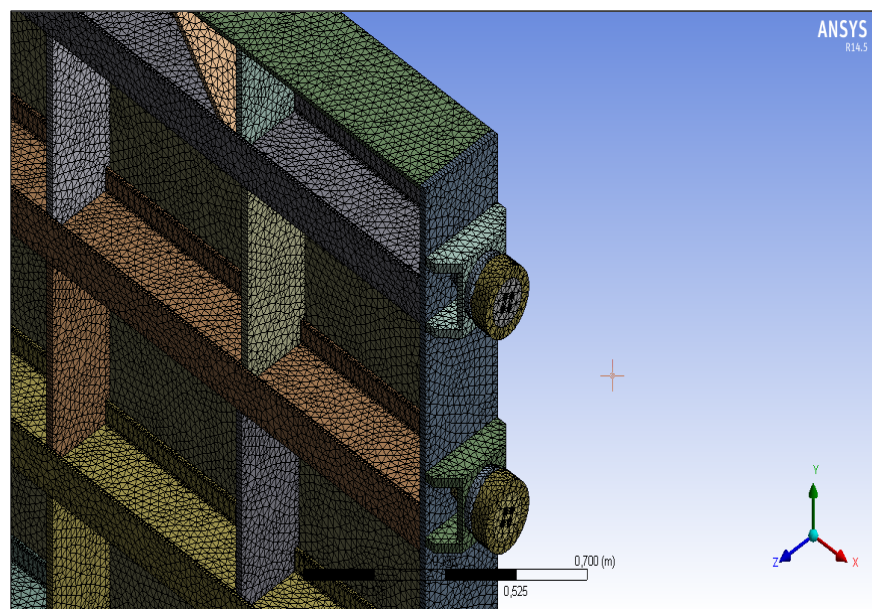


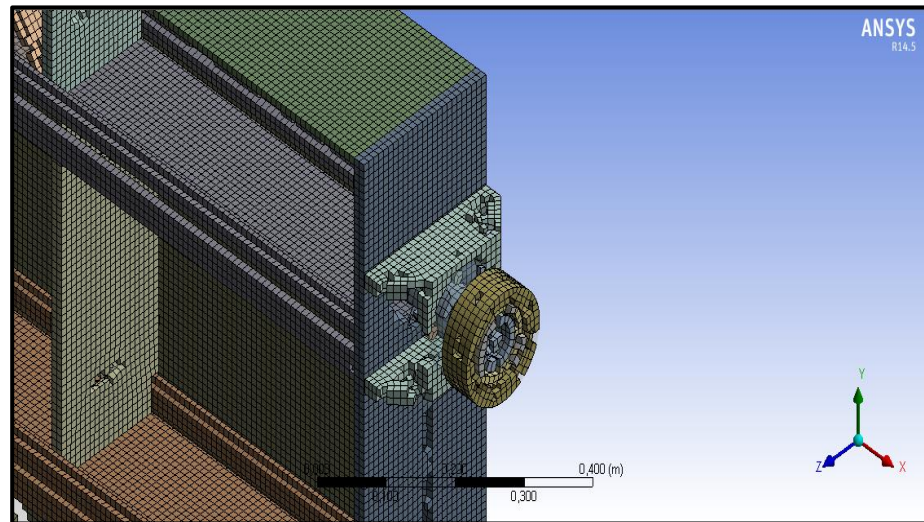
FIGURA 3.29. ELEMENTOS TETRAÉDRICOS



**FIGURA 3.30. MALLADO TETRAÉDRICO**



**FIGURA 3.31. MALLADO HEXAÉDRICO QUAD/TRI**



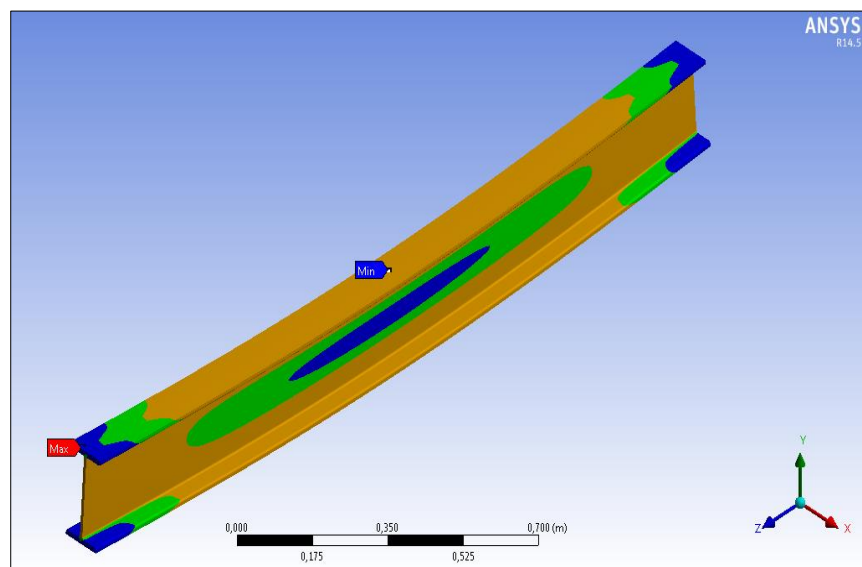
**FIGURA 3.32. ELEMENTOS HEXAÉDRICOS**

### **3.4.2. Análisis de los Esfuerzos y Deformaciones Provocados por la Presión Hidrostática sobre la Compuerta.**

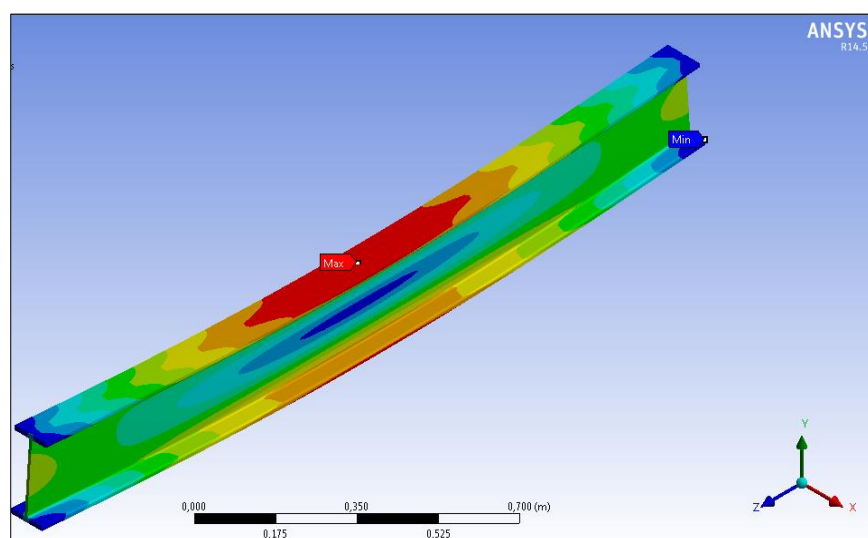
#### **Vigas**

A continuación se presenta las figuras de las simulaciones para los diferentes resultados de la viga IPN.

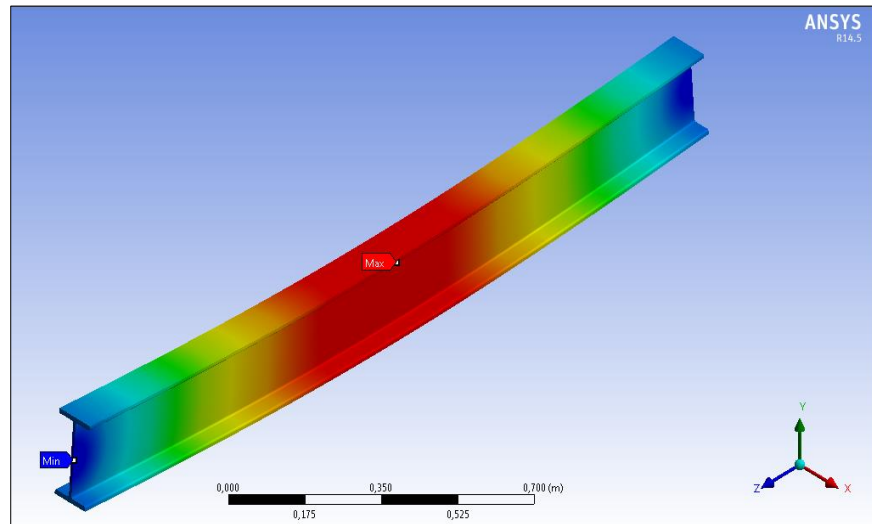
Mediante el análisis de elementos finitos se puede corroborar la afirmación que el punto central superior de la viga es el punto crítico, el cual recibe mayor parte de la carga hidrostática y sufre la mayor deformación, lo cual se puede apreciar en las figuras 3.34 y 3.35 respectivamente.



**FIGURA 3.33. SIMULACIÒN DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN LA VIGA**



**FIGURA 3.34. SIMULACIÒN DEL ESFUERZO DE VON MISSES EN LA VIGA**

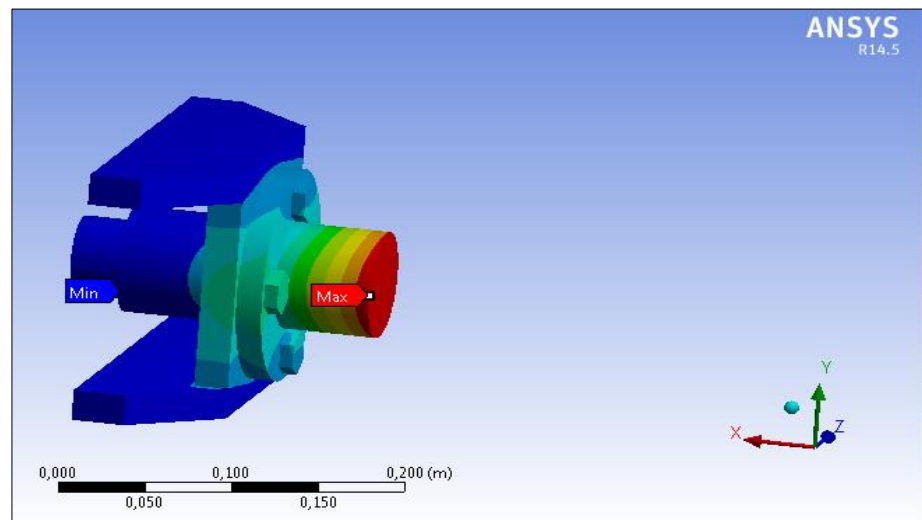


**FIGURA 3.35. SIMULACIÓN DE LA DEFORMACIÓN MÁXIMA EN LA VIGA**

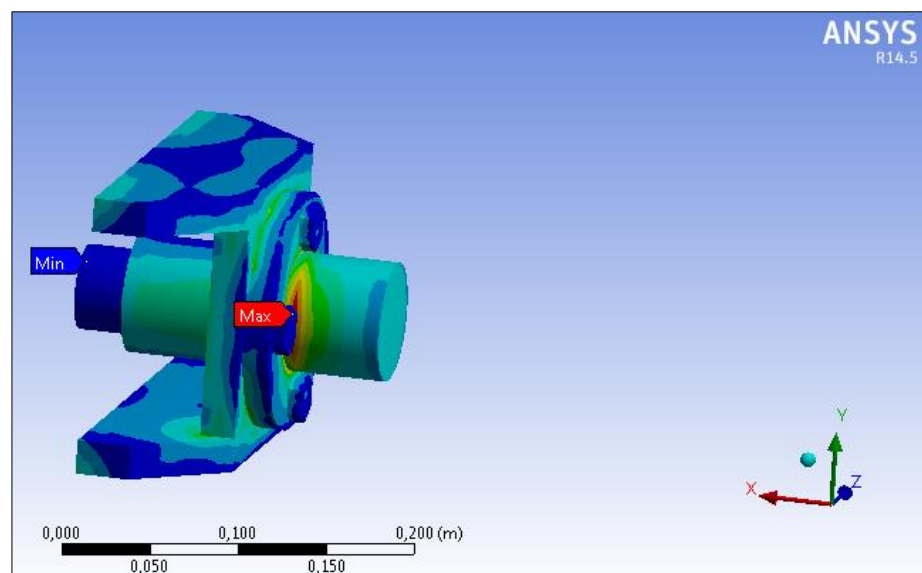
### **Rodadura**

El conjunto rueda, eje y soporte se lo analiza tomando en cuenta el material de los pernos, del soporte, del eje y de la rueda, ya que varían por recomendación de las normas técnicas.

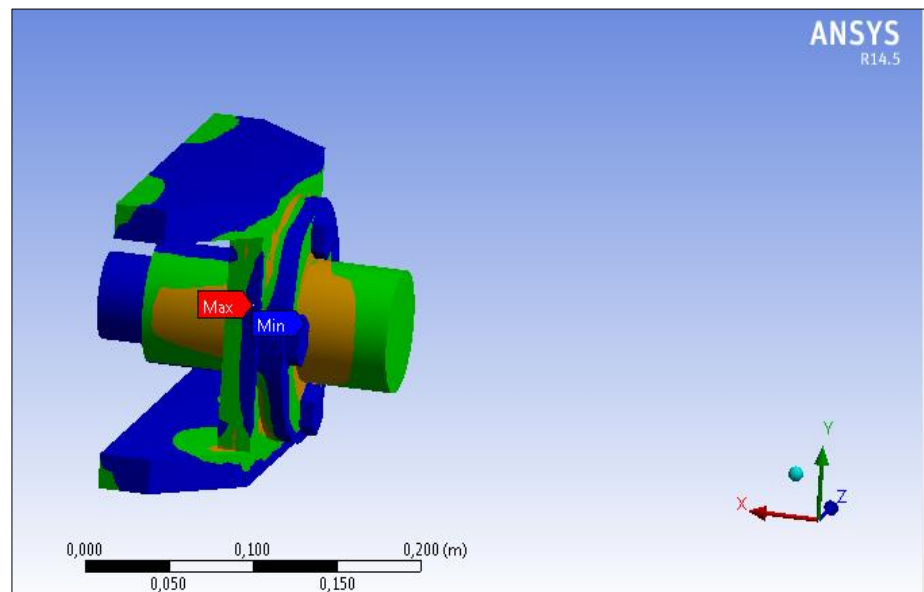
Se puede acotar que el conjunto sufre su mayor deformación en el extremo del eje, mientras que los máximos esfuerzos se dan en la unión entre el eje y el soporte, como se puede ver a continuación.



**FIGURA 3.36. SIMULACIÒN DE LA DEFORMACIÒN MÁXIMA  
EN EL CONJUNTO RUEDA EJE**



**FIGURA 3.37. SIMULACIÒN DEL ESFUERZO MÁXIMO  
CORTANTE EN EL CONJUNTO RUEDA EJE**



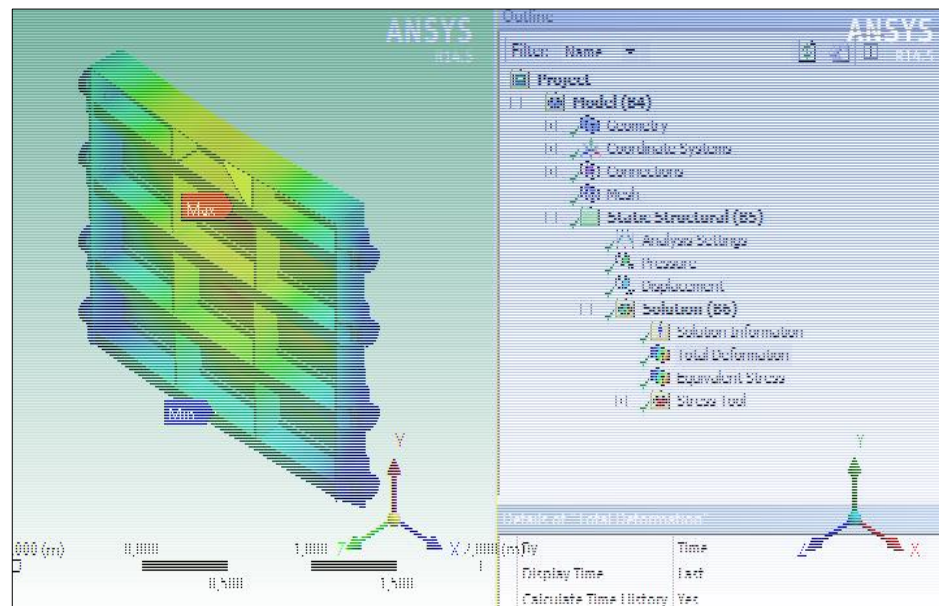
**FIGURA 3.38. SIMULACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD  
EN EL CONJUNTO RUEDA EJE**

### **Compuerta**

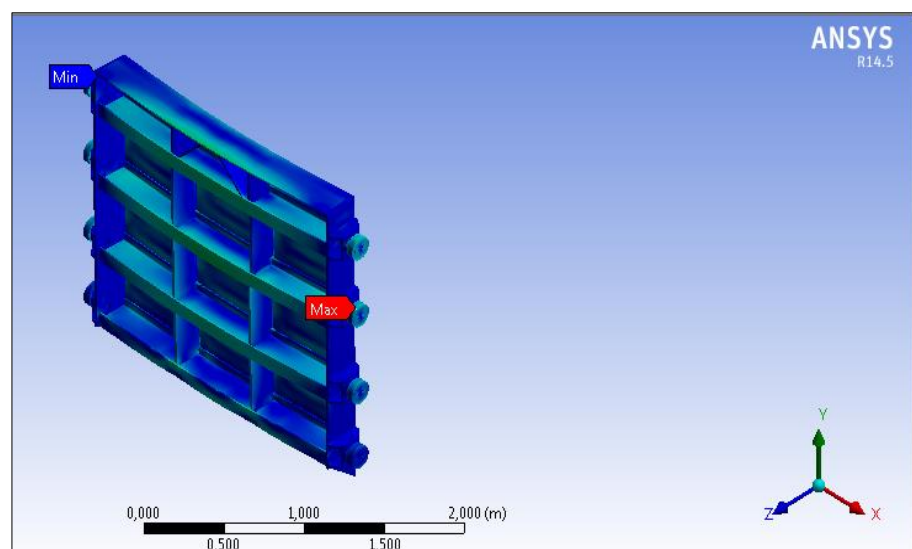
En esta sección se analiza la simulación de la compuerta con todos sus elementos, dando como resultado la mayor deformación en el centro de la misma y la menor en la parte inferior.

Los esfuerzos se concentran en el conjunto de rodadura, específicamente en la brida de sujeción del soporte al eje, por ende el mínimo factor de seguridad se encuentra en ese punto, mientras que el menor esfuerzo se da en los pernos de sujeción de los soportes.

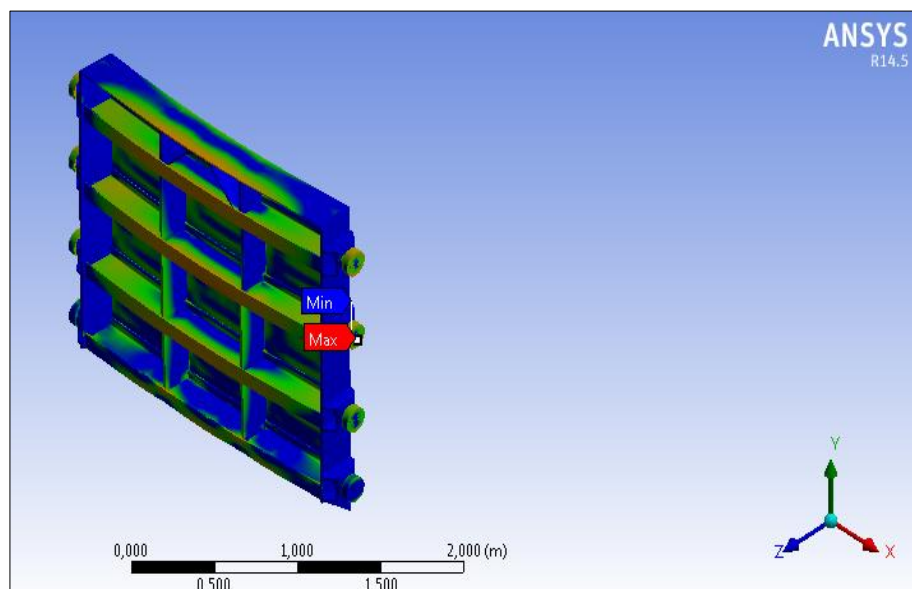
A continuación se puede apreciar lo antes mencionado:



**FIGURA 3.39. SIMULACIÓN DE LA DEFORMACIÓN MÁXIMA  
EN LA COMPUERTA VAGÓN**



**FIGURA 3.40. SIMULACIÓN DEL ESFUERZO MÁXIMO EN  
LA COMPUERTA VAGÓN**



**FIGURA 3.41. SIMULACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD  
EN LA COMPUERTA VAGÓN**

# **CAPÍTULO 4**

## **4. EVALUACIÓN DE MÉTODOS**

A continuación se presenta información referente a los dos casos de estudio de la compuerta tipo vagón, tanto del estudio analítico como del método de elementos finitos. Los datos mostrados serán utilizados para comparaciones posteriores entre sí como se propuso en este estudio.

### **4.1. Método Analítico**

El método analítico, como descrito anteriormente, se basa en las normas técnicas especializadas en el tema hidráulico, como lo es la norma NBR 8883 y la norma DIN 19704.

Cabe recordar que se usa un factor de aumento de las cargas estáticas de 1.5 con el fin de representar los efectos dinámicos sobre la compuerta.

## **Vigas**

Las vigas se pueden analizar de varias formas, empotrada en los extremos, simplemente apoyada o una combinación de ambas. La norma NBR 8883 recomienda un apoyo simple en las vigas, los resultados de los esfuerzos y deformaciones máximas se detallan a continuación:

- Esfuerzo de Von Misses = 119.01 MPa
- Esfuerzo Cortante máximo = 38.9 MPa
- Deformación Máxima = 2.14 mm

Es importante resaltar, que los esfuerzos normales y cortantes y la deformación admisible en las vigas son recomendados por la norma NBR 8883, siendo estos: 170 MPa y 97.5 MPa y 2.66 mm respectivamente. Entonces el factor de seguridad sería 1.42.

## **Conjunto eje-ruedas**

El conjunto rueda-eje es una parte fundamental de la compuerta, ya que es el cual soporta toda la fuerza hidrostática, debido a que es el punto de apoyo del obturador. Dicho conjunto consta de: un

eje, una rueda, un soporte, un rodamiento, 4 pernos para la brida de soporte y 4 pernos para asegurar la tapa de la rueda al eje.

Analíticamente se ha estudiado solo el eje, asumiendo que existe solo esfuerzo cortante sobre el mismo, en tal caso el Máximo Esfuerzo Cortante en el eje sería 74.66 Mpa.

De la misma manera, la norma brasilera recomienda un esfuerzo máximo admisible para elementos mecánicos en la compuerta de 118.28 MPa. Por ende el Factor de Seguridad del eje sería 1.58.

### **Plancha frontal**

La plancha frontal es una pieza muy importante y especial del obturador. Tanto la rigidez, como el peso de la compuerta van a variar significativamente según el espesor y el tamaño de la plancha, es por eso que hay que tener mucho criterio al momento de diseñar la misma, tomando en cuenta la corrosión, peso, costo y proceso de manufactura de la misma. Los Esfuerzos Máximos y Deformaciones provocados sobre la plancha son 118 Mpa y 0.430 mm respectivamente. Los esfuerzos y la deformación admisible para la plancha frontal serían: 170 MPa y 1 mm respectivamente, valores recomendados por la norma NBR 8883. Entonces el Factor de Seguridad es 1.48.

## **4.2. Método de Elementos Finitos**

El análisis de resultados del método de elementos finitos se concentra en tres estudios realizados independientemente. La comparación entre el método analítico y el de elementos finitos para el cálculo y diseño de las vigas, la disminución de los esfuerzos en el conjunto eje-rueda mediante la aplicación de un soporte y en la simulación de la compuerta con todos sus elementos.

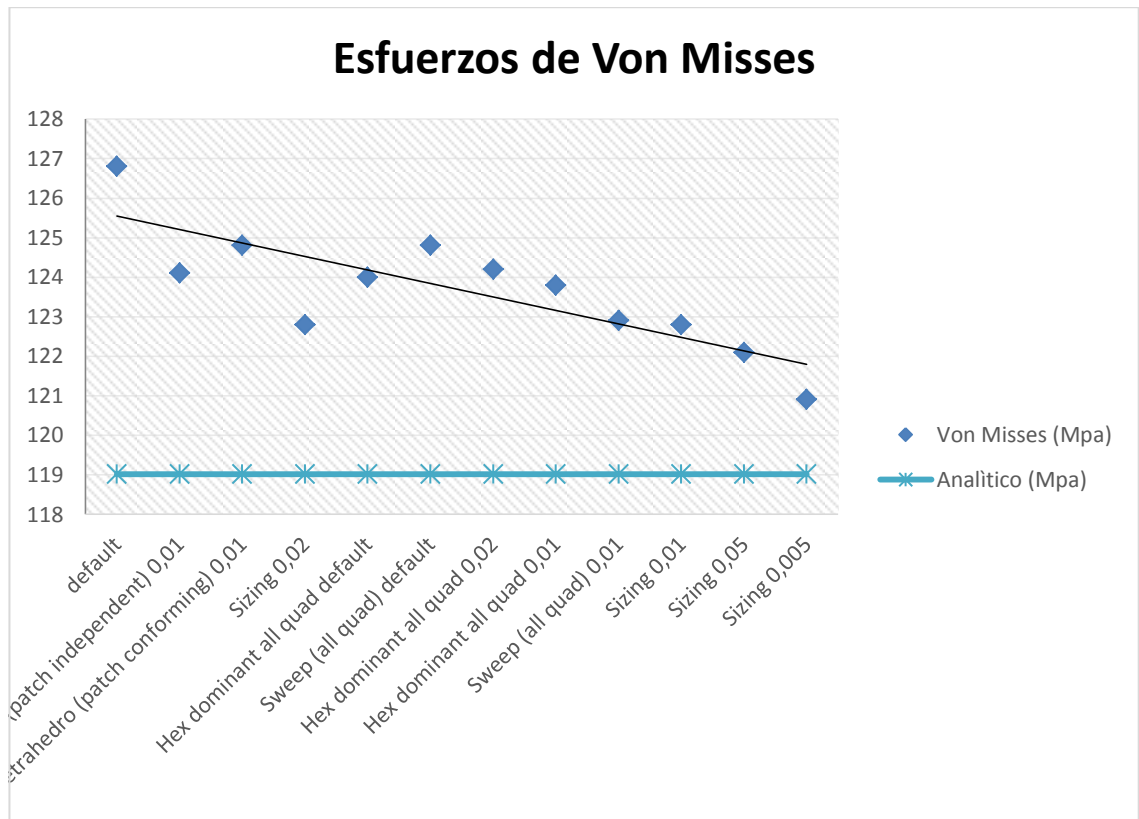
### **Viga IPN**

La viga IPN 220, ha sido simulada 12 veces con las mismas condiciones externas pero, con diferentes Tipos de Elementos FEM.

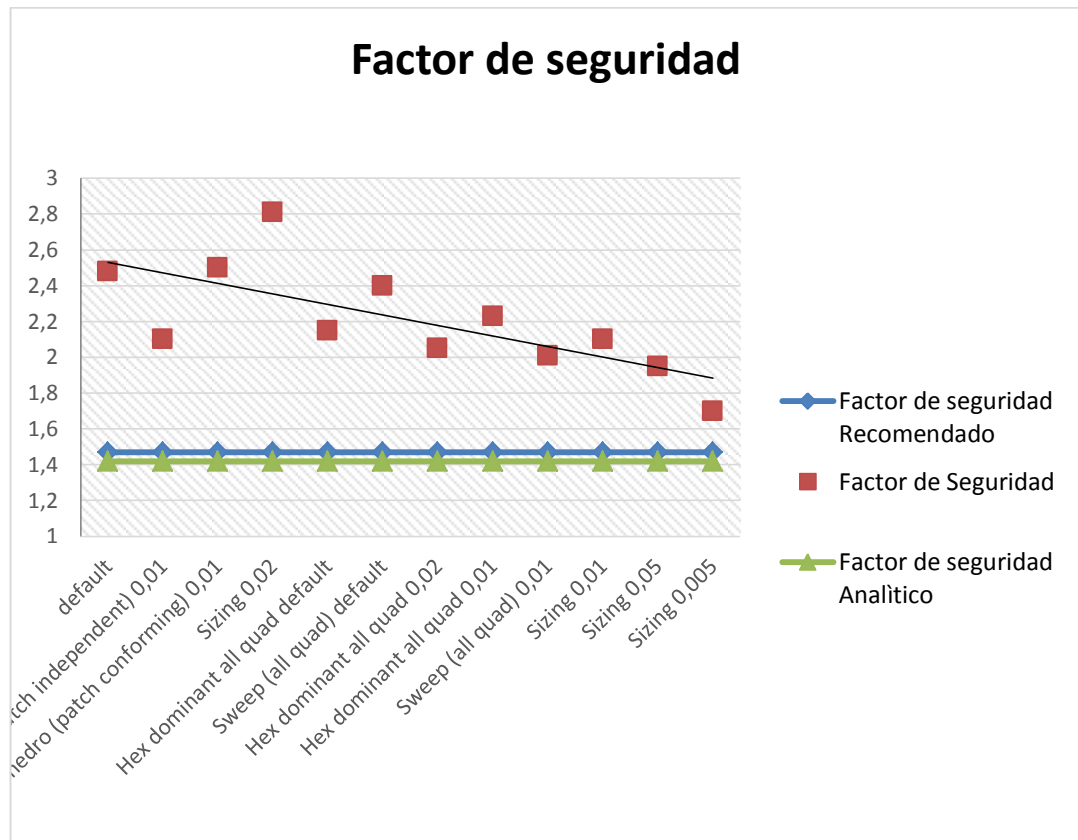
Como se puede apreciar en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3, los resultados si varían según el tipo de mallado en el cuerpo, como se había planteado en la hipótesis de este estudio. Además se nota que existe cierto error entre los resultados analíticos y de elementos finitos, lo cual se lo puede atribuir al software ANSYS, ya que este toma en cuenta todos los concentradores de esfuerzos, mientras que el analítico no lo hace.

Todos los elementos mecánicos que son propensos a soportar esfuerzos sufren deformaciones, por más mínimas que sean estas. En este caso la deformación tanto analítica como la de elementos finitos concuerdan con una leve diferencia en los resultados finales y no sobrepasan la deformación admisible de la viga.

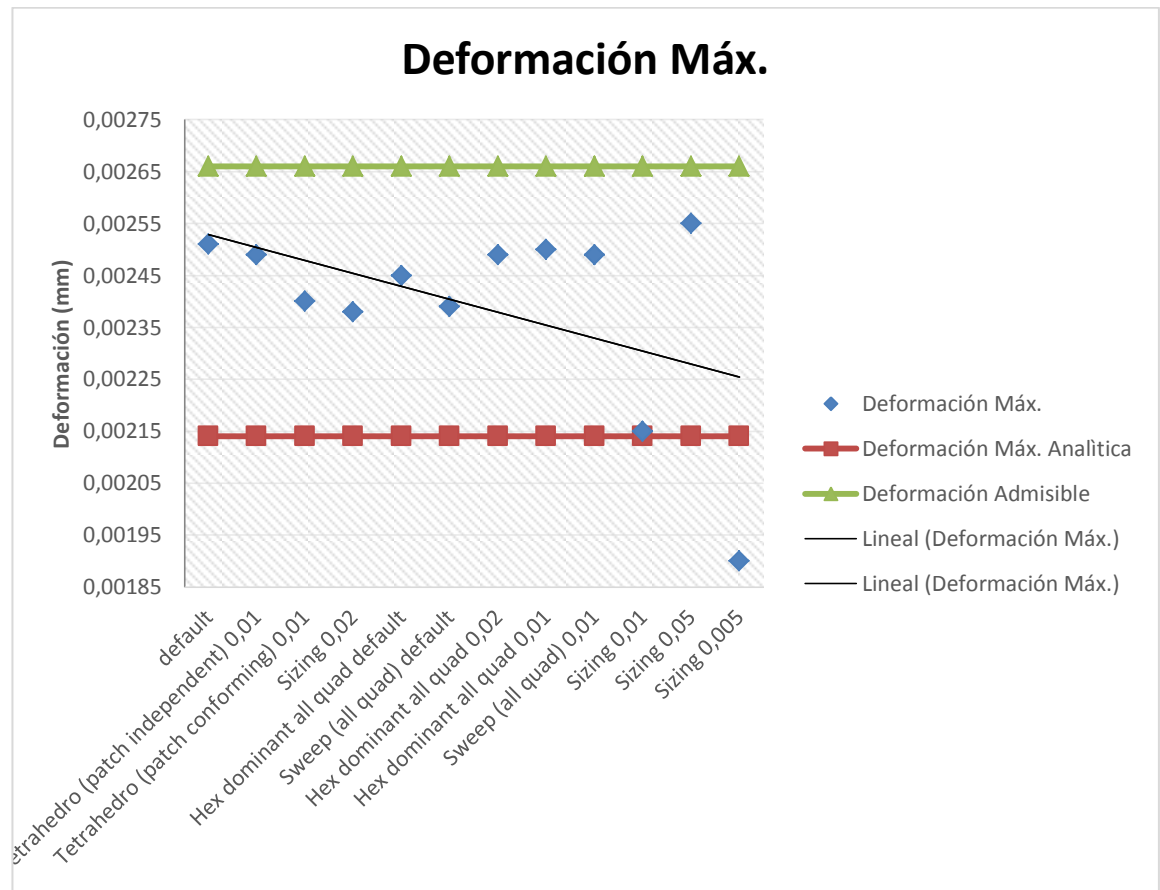
El factor de seguridad es el resultado que hay que analizar más a fondo, ya que es el que da la pauta para aprobar cualquier tipo de diseño mecánico. En la Figura 4.2, se puede analizar que no hay una diferencia significativa entre el Factor de Seguridad Analítico y el que recomienda la norma, mientras que el Factor de Seguridad que muestra el Método FEM es un poco más elevado, dando un resultado aceptable ya que es preferible que sea mayor el factor de seguridad que menor al recomendado.



**FIGURA 4.1. ESFUERZOS DE VON MISSES SOBRE LA VIGA VS TIPOS DE ELEMENTOS FEM**



**FIGURA 4.2. FACTORES DE SEGURIDAD DE LA VIGA VS TIPOS DE ELEMENTOS FEM**



**FIGURA 4.3. DEFORMACIONES DE LA VIGA VS TIPOS DE ELEMENTOS**

**FEM**

**TABLA 14**  
**DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS RESULTADOS DE LAS**  
**SIMULACIONES DE LA VIGA**

| Resultado            | Media    | Desviación Estándar |
|----------------------|----------|---------------------|
| Von Misses (Mpa)     | 123,67   | 1,45                |
| Factor de Seguridad  | 2,21     | 0,28                |
| Deformación Máx. (m) | 0,00239  | 0,000179            |
| Elementos            | 23624,92 | 33717,81            |
| Calidad              | 48%      | 31%                 |

A partir de la desviación estándar se puede resumir que los datos tomados de las diferentes simulaciones, si varían entre uno y el otro, como se planteó en la hipótesis.

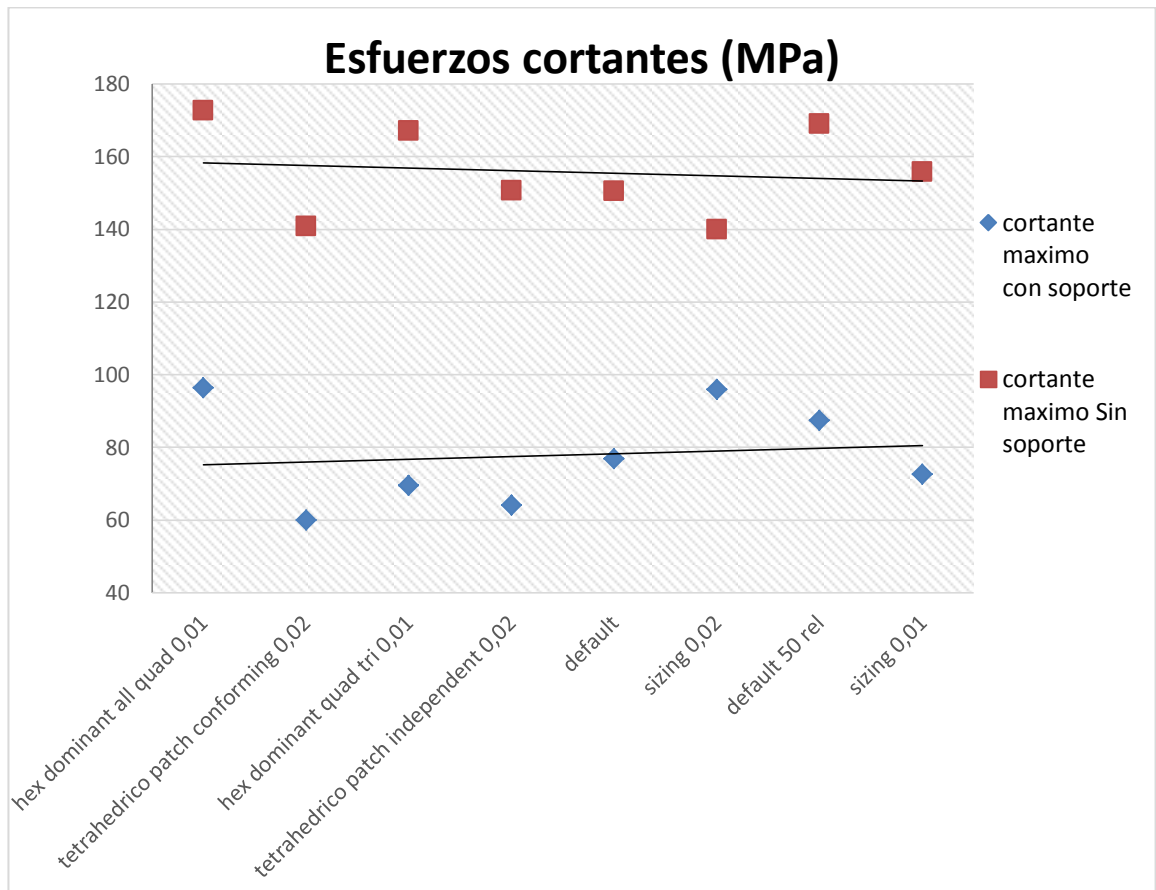
Los Esfuerzos de Von Misses y la Deformación Máxima tienen una variación que no es muy significativa, caso contrario, la desviación estándar del Factor de Seguridad si es de tomar en cuenta, ya que las parámetros de seguridad recomendados por las normas deben ser aplicados estrictamente, entonces se puede decir que el tipo de mallado si influye en la decisión final sobre la aprobación del diseño.

## **Rodadura**

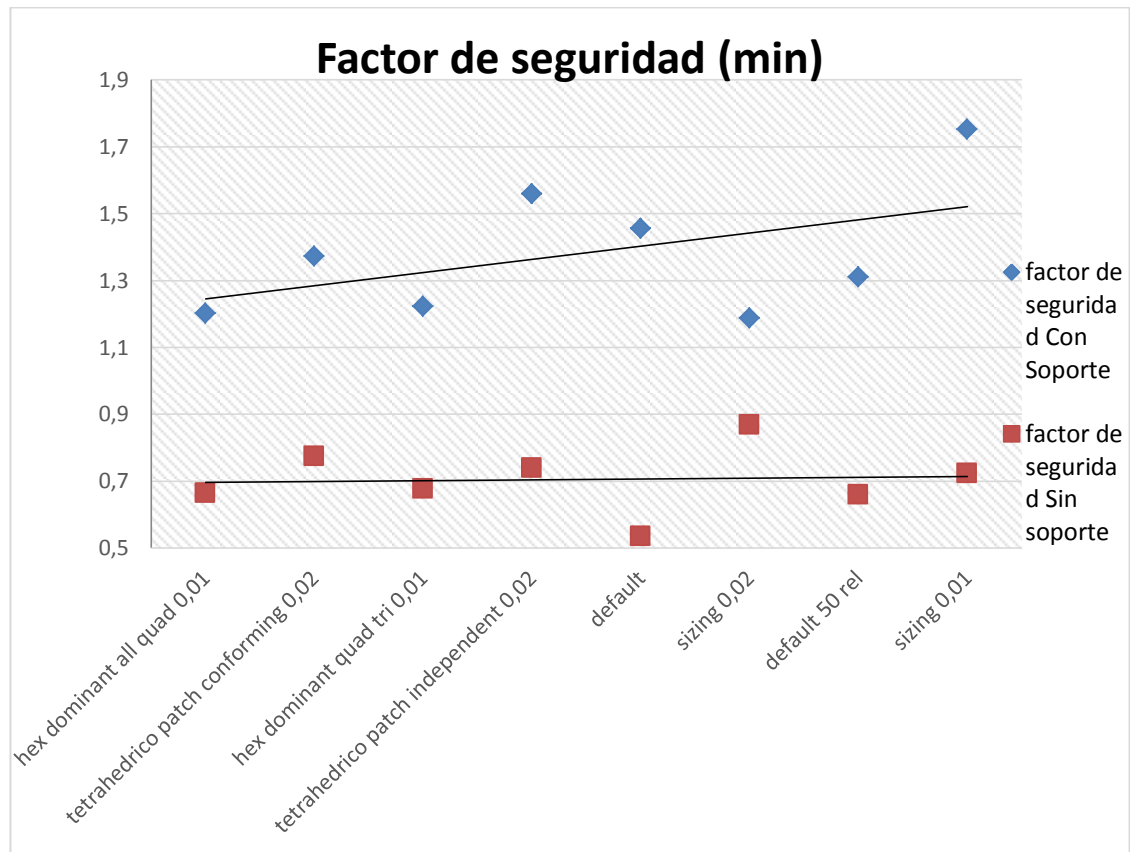
La compuerta tipo vagón consta de 8 ruedas, las mismas que giran sobre un eje diseñado para soportar los esfuerzos cortantes sobre el mismo. El análisis que se realiza a este conjunto (rueda-eje), se basa en la búsqueda de la disminución de los esfuerzos sobre el conjunto o consecuentemente en el aumento del factor de seguridad.

Con la ayuda de un soporte que sirva de apoyo, se busca que el eje, sufra la mínima deformación posible y por ende no falle o no se rompa.

En las figuras 4.4 y 4.5, se puede apreciar el aumento del factor de seguridad debido a la aplicación de un soporte, tanto como la disminución de los esfuerzos cortantes sobre la viga.



**FIGURA 4.4. COMPARACIÓN DE LOS ESFUERZOS CORTANTES EN EL EJE, CON Y SIN SOPORTE**



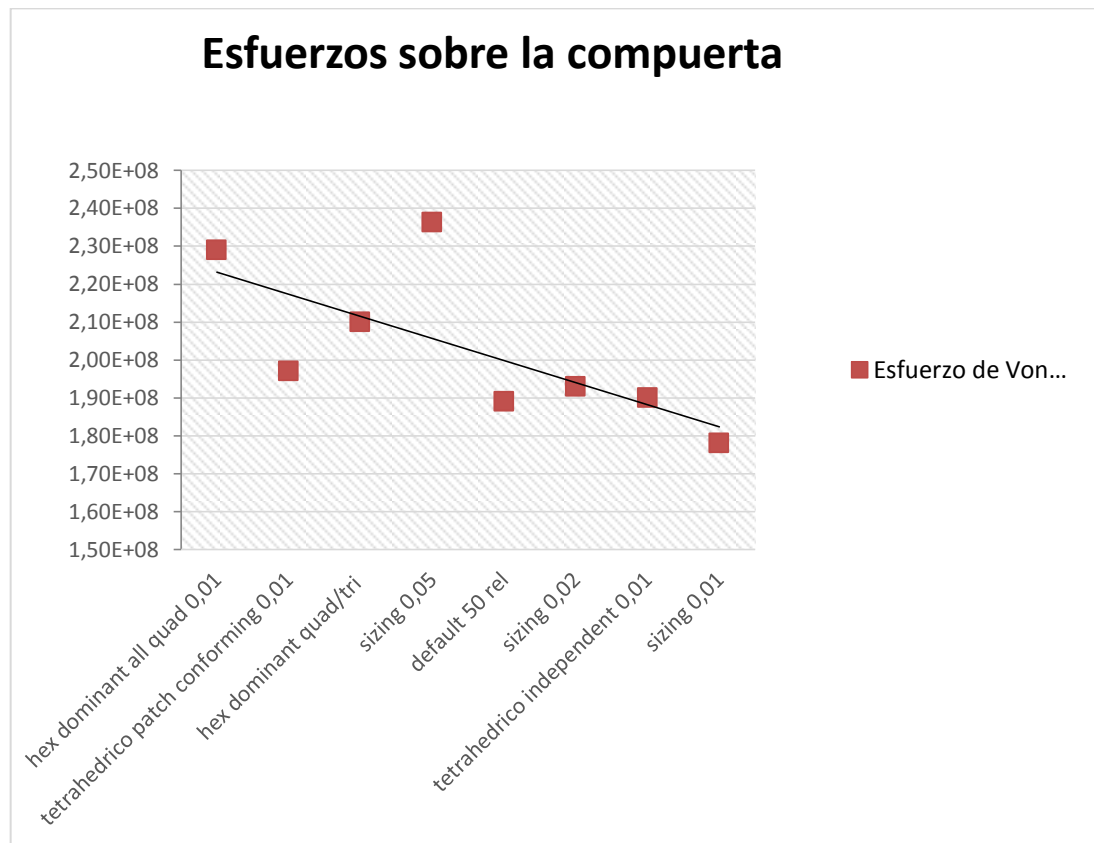
**FIGURA 4.5. COMPARACION DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD EN EL EJE, CON Y SIN SOPORTE.**

### Compuerta

La compuerta tipo vagón es un conjunto de elementos mecánicos y estructurales como descrito anteriormente, los cuales se analizan en este estudio minuciosamente. En la sección del estudio analítico, se examinan los elementos por separado, para luego ser

simulados en conjunto y hacer las correcciones necesarias para que el diseño soporte todas las cargas que se le aplican.

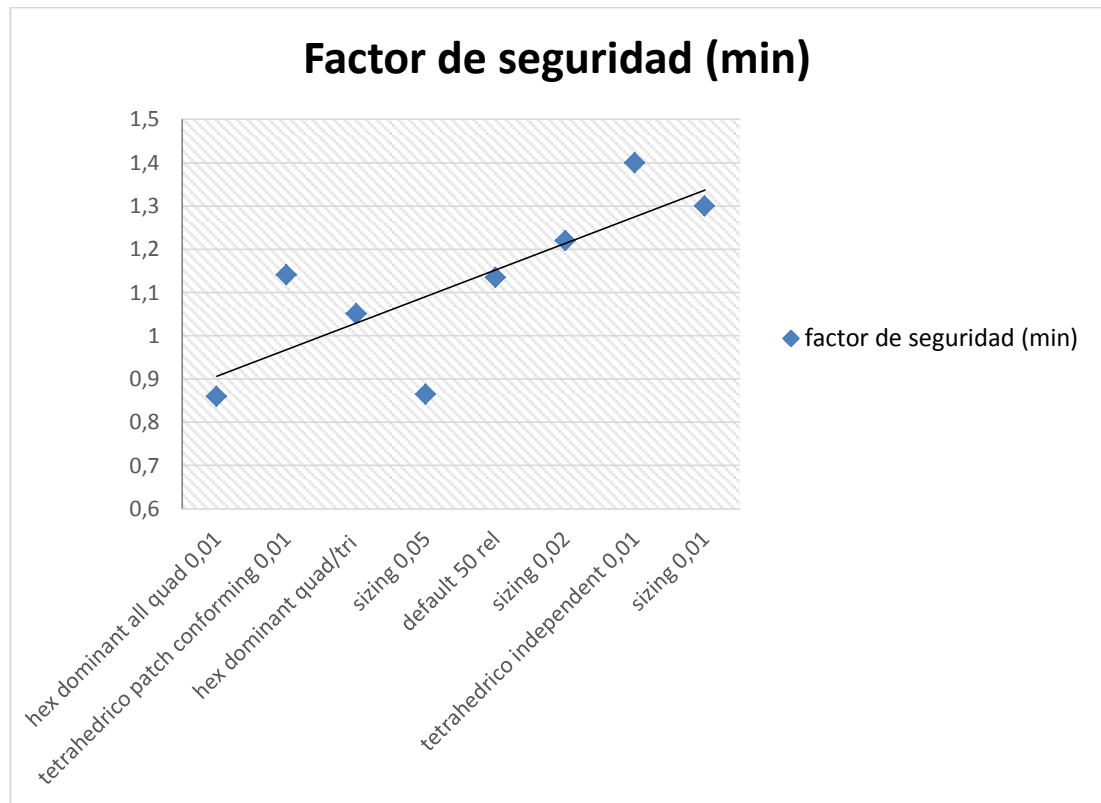
A continuación se tienen los resultados de las diferentes simulaciones para las distintas soluciones como lo son: esfuerzos máximos, deformación máxima y factor de seguridad, ver figuras 4.6, 4.7 y 4.8.



**FIGURA 4.6. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE LOS  
ESFUERZOS SOBRE EL OBTURADOR**



**FIGURA 4.7. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE LAS  
DEFORMACIONES MÁXIMAS EN EL OBTURADOR**



**FIGURA 4.8. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DEL OBTURADOR**

### 4.3. Resultados

#### Vigas IPN

A continuación se realiza la evaluación y comparación de los diferentes métodos propuestos para el cálculo y diseño de una compuerta tipo vagón.

La presión de 0.675 MPa es la máxima presión que se ejerce sobre cada cara de las vigas IPN, generando esfuerzos normales y

cortantes en la misma, los cuales a su vez crean las deformaciones en la viga.

Como explicado en el Capítulo 2, el esfuerzo de Von Misses, es el máximo esfuerzo generado en la viga, el mismo que es igual al Esfuerzo Normal ya que en el punto de estudio o punto crítico, no existe Esfuerzo Cortante.

La deformación máxima ocurre en el punto crítico de la viga, es decir en la sección central superior de la misma. (Ver figura 2.10)

Dos características que hay que tener en cuenta al momento de simular en ANSYS, son la cantidad de elementos finitos que se crean en el cuerpo y la calidad del mallado, ya que esto, repercutirá directamente tanto en el tiempo de simulación como en la precisión de los resultados.

**TABLA 15**  
**PRECISIÓN DE RESULTADOS ENTRE EL MÉTODO FEM Y EL MÉTODO**  
**ANALÍTICO**

| #  | TIPO DE FEM                        | PRESIÓN (MPa) | VON MISSES (Mpa) | FACTOR DE SEGURIDAD | DEFORMACIÓN MÁX. (mm) | CANTIDAD DE ELEMENTOS | CALIDAD | PRECISIÓN |
|----|------------------------------------|---------------|------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|---------|-----------|
| 1  | Default                            | 0.675         | 126,8            | 2,48                | 2.51                  | 1080                  | 3%      | 79,5%     |
| 2  | Tetraedro (patch independent) 0,01 |               | 124,1            | 2,1                 | 2.49                  | 1060                  | 4%      | 83,9%     |
| 3  | Tetraedro (patch conforming) 0,01  |               | 124,8            | 2,5                 | 2.40                  | 2640                  | 12%     | 81,1%     |
| 4  | Sizing 0,02                        |               | 122,8            | 2,81                | 2.38                  | 5134                  | 21%     | 79,7%     |
| 5  | Hex dominant all quad default      |               | 124              | 2,15                | 2.45                  | 5834                  | 37%     | 83,9%     |
| 6  | Sweep (all quad) default           |               | 124,8            | 2,4                 | 2.39                  | 6200                  | 48%     | 82,1%     |
| 7  | Hex dominant all quad 0,02         |               | 124,2            | 2,05                | 2.49                  | 30803                 | 63%     | 84,5%     |
| 8  | Hex dominant all quad 0,01         |               | 123,8            | 2,23                | 2.50                  | 108022                | 71%     | 82,6%     |
| 9  | Sweep (all quad) 0,01              |               | 122,9            | 2,01                | 2.49                  | 13200                 | 73%     | 85,3%     |
| 10 | Sizing 0,01                        |               | 122,8            | 2,1                 | 2.15                  | 13400                 | 74%     | 88,8%     |
| 11 | Sizing 0,05                        |               | 122,1            | 1,95                | 2.55                  | 11726                 | 81%     | 85,6%     |
| 12 | Sizing 0,005                       |               | 120,9            | 1,7                 | 1.90                  | 84400                 | 94%     | 91,2%     |
|    | Analítico                          | NO            | 119,01           | 1,47                | 2.14                  | NO                    | NO      |           |

## Rodadura

Como descrito en la sección 4.2.2. Rodadura, se busca minimizar los esfuerzos cortantes sobre el eje y a su vez aumentar el factor de seguridad.

Se puede apreciar en la figura 4.4, que los esfuerzos disminuyen notablemente alrededor de un 50%, lo cual se traduce a un aumento del factor de seguridad promedio de las simulaciones de 0.70 a 1.38. Esto quiere decir que el eje sin la presencia de un soporte que ayude a resistir las cargas va a fallar.

De la Tabla 16, se puede acotar que indudablemente la aplicación de un soporte en el conjunto eje-rueda, si ayuda a la disminución de los esfuerzos cortantes, en un 50%. Así mismo, el factor de seguridad aumenta alrededor del 50%, proporcionando resultados más confiables, al momento de aplicar las cargas a la compuerta.

**TABLA 16**

**RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES FEM DEL CONJUNTO EJE RUEDA, CON Y SIN SOPORTE**

|             | CORTANTE<br>MÁXIMO (Mpa) | DEFORMACIÓN<br>MÁX (mm) | CANTIDAD DE<br>ELEMENTOS | FACTOR DE<br>SEGURIDAD |
|-------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| CON SOPORTE | 77,83                    | 0.106                   | 5253,75                  | 1,38                   |
| SIN SOPORTE | 155,84                   | 0.380                   | 1650,88                  | 0,71                   |

## **Compuerta**

La compuerta es un conjunto de elementos mecánicos y estructurales, los cuales fueron diseñados cuidadosamente para soportar cargas tanto hidrostáticas como hidrodinámicas para un cabezal de agua de 10 m y un caudal de 25 m<sup>3</sup>/s.

Cada elemento mecánico como estructural tiene un factor de seguridad o un esfuerzo admisible recomendado por las normas técnicas como la NBR 8883 y la DIN 19704. El programa ANSYS simula los esfuerzos sobre el conjunto y proyecta resultados positivos, corroborando el correcto diseño de la compuerta y la capacidad de soportar todos los esfuerzos sobre la misma.

Se puede observar en la figura 4.8, que el factor de seguridad está sobre 1, esto quiere decir que sí soporta las cargas aplicadas. Cabe recalcar que se toma en cuenta un factor de 1.5 a las fuerzas hidrostáticas para simular las cargas hidrodinámicas.

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- I. Se ha desarrollado un modelo de simulación simple y versátil, aplicable a compuertas tipo vagón para desagüe de fondo de diferentes dimensiones, operando en posición abierta, cerrado o en transición.
- II. El modelo está basado en principios básicos de hidrodinámica, cinética del movimiento, dinámica de fluidos y esfuerzos de Hertz. No se han utilizado relaciones empíricas ligadas a estudios previos sobre compuertas de estas características.
- III. Se realizó la selección de los modelos matemáticos para el dimensionamiento y análisis de los diferentes elementos mecánicos y estructurales de la compuerta.

- IV. Los mallados volumétricos tetraédricos, generalmente proveen una solución más automática, con la opción de configurar el mallado y mejorar la precisión, en las regiones críticas. Se considera una mejor alternativa ya que se adapta a la forma del objeto en cuestión.
- V. Los mallados hexaédricos proveen una solución más precisa, pero es más difícil de generar ya que se complica al momento de acoplarse al objeto en estudio, pero a diferencia del mallado tetraédrico, este tiene menor cantidad de elementos, traduciendo en disminución de tiempo de simulación.
- VI. Como descrito en el Capítulo 3, el mallado tetraédrico se divide en dos, los cuales son: patch conforming, el cual captura cada detalle geométrico del objeto a analizar y el método patch independent el cual puede llegar a ignorar ciertos detalles del objeto. (ver figuras 3.24. y 3.25.)
- VII. Mientras más técnicas de mallado se apliquen a los cuerpos, no quiere decir que, mejor va a ser la calidad del mallado, ya que depende significativamente del diseño de forma del cuerpo.

- VIII. Mientras más técnicas de mallado se apliquen, mayor será el tiempo de simulación, debido a que el software busca la manera de acoplar cada elemento finito a la forma del cuerpo en cuestión.
- IX. Siempre existirá una diferencia entre el estudio analítico y el de elementos finitos, ya que el último en mención, analiza todos los concentradores de esfuerzo, arrojando datos más reales.
- X. Es importante recalcar, que la precisión entre el método analítico y el método de elementos finitos se ve afectada directamente por el tipo y la calidad del mallado para modelar la compuerta vagón y sus elementos.
- XI. Se puede concluir que el tipo y tamaño de elementos finitos si influyen en los resultados finales, por ende se debe buscar el tipo de elemento ideal para cada cuerpo o volumen.
- XII. Cabe recalcar que todas las figuras del literal 3.2, se comparan con el Tipo de Método FEM, los cuales se encuentran en orden ascendente según su calidad de mallado. A partir de esto, se puede acotar que a medida que la calidad del mallado aumenta, más precisión presenta el Análisis de FEM.

- XIII. Mediante la aplicación del software ANSYS y la iteración con distintos tipos de soportes que se le aplicó al eje de la rueda, se logró disminuir los esfuerzos en el eje en un 50%.
- XIV. La compuerta está diseñada correctamente para soportar las cargas hidrostáticas e hidrodinámicas que muestra el presente estudio.
- XV. En base a los resultados experimentales y teóricos y a las comparaciones establecidas en este trabajo, se puede decir que el modelo propuesto, para los dos casos estudiados, es capaz de predecir los esfuerzos producidos por la fuerza hidrostática sobre los elementos mecánicos y estructurales de la compuerta tipo vagón, siempre y cuando la selección del Método FEM sea el adecuado.

### **Recomendaciones**

- a. Para ejecutar el programa de simulación solamente se requiere conocer la geometría de la compuerta, y aplicar tres características del programa (soportes, fuerzas aplicadas y tipo de análisis a estudiar), sin embargo, la integración de los resultados resulta un poco complicada para alguien que no está familiarizado con la

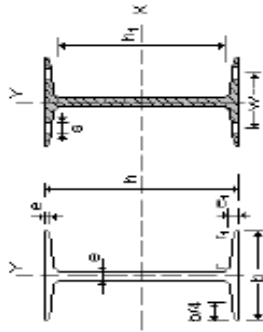
secuencia de análisis o la estructura de programación, por lo que se recomienda mejorar estos aspectos para que el software adquiriera una mayor aplicabilidad.

- b. Es importante analizar la naturaleza de los sólidos antes de aplicar el modelo propuesto. Por ejemplo, se debe saber anticipadamente cómo y dónde van a variar las deformaciones de la compuerta según las fuerzas y soportes aplicados.
- c. Se debe tener cuidado al momento de realizar los ensambles de los diferentes cuerpos de la compuerta, ya que si existe alguna intersección de cuerpos, el programa ANSYS resaltará que consta un error y no permitirá la simulación.
- d. Es muy importante aplicar los materiales reales de cada elemento, ya que sus esfuerzos de fluencia varían notablemente como por ejemplo el acero A36 al acero AISI 304.
- e. El modelo matemático es otra característica que se debe analizar o estudiar, previamente a la simulación del cuerpo.

# APÉNDICE

## Perfiles IPN

| Perfil  | Dimensiones |         |                |                      |                      |                      |         | Términos de sección  |                                   |                                   |                                   |                      |                                   |                                   |                      |                                   |                                   | Agujeros |         |                      | Peso<br>p<br>kg/m |
|---------|-------------|---------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|---------|----------------------|-------------------|
|         | h<br>mm     | b<br>mm | e =<br>r<br>mm | e <sub>1</sub><br>mm | r <sub>1</sub><br>mm | h <sub>1</sub><br>mm | u<br>mm | A<br>cm <sup>2</sup> | S <sub>x</sub><br>cm <sup>3</sup> | I <sub>x</sub><br>cm <sup>4</sup> | W <sub>x</sub><br>cm <sup>3</sup> | i <sub>x</sub><br>cm | I <sub>y</sub><br>cm <sup>4</sup> | W <sub>y</sub><br>cm <sup>3</sup> | i <sub>y</sub><br>cm | I <sub>z</sub><br>cm <sup>4</sup> | I <sub>z</sub><br>cm <sup>4</sup> | w<br>mm  | a<br>mm | e <sub>2</sub><br>mm |                   |
| IPN 80  | 80          | 42      | 3,9            | 5,9                  | 2,3                  | 59                   | 304     | 7,58                 | 11,4                              | 77,8                              | 19,5                              | 3,20                 | 6,29                              | 3,00                              | 0,91                 | 0,93                              | 87,5                              | 22       | -       | 4,43                 | 5,95              |
| IPN 100 | 100         | 50      | 4,5            | 6,8                  | 2,7                  | 75                   | 370     | 10,6                 | 19,9                              | 171                               | 34,2                              | 4,01                 | 12,2                              | 4,88                              | 1,07                 | 1,72                              | 268                               | 28       | -       | 5,05                 | 8,32              |
| IPN 120 | 120         | 58      | 5,1            | 7,7                  | 3,1                  | 92                   | 439     | 14,2                 | 31,8                              | 328                               | 54,7                              | 4,81                 | 21,5                              | 7,41                              | 1,23                 | 2,92                              | 685                               | 32       | -       | 5,67                 | 11,2              |
| IPN 140 | 140         | 68      | 5,7            | 8,6                  | 3,4                  | 109                  | 502     | 18,3                 | 47,7                              | 573                               | 81,9                              | 5,61                 | 35,2                              | 10,7                              | 1,40                 | 4,86                              | 1540                              | 34       | 11      | 6,29                 | 14,4              |
| IPN 160 | 160         | 74      | 6,3            | 9,5                  | 3,8                  | 125                  | 575     | 22,8                 | 68,0                              | 935                               | 117                               | 6,40                 | 54,7                              | 14,8                              | 1,58                 | 7,08                              | 3138                              | 40       | 11      | 6,91                 | 17,9              |
| IPN 180 | 180         | 82      | 6,9            | 10,4                 | 4,1                  | 142                  | 640     | 27,9                 | 93,4                              | 1450                              | 161                               | 7,20                 | 81,3                              | 19,8                              | 1,71                 | 10,3                              | 5924                              | 44       | 13      | 7,53                 | 21,9              |
| IPN 200 | 200         | 90      | 7,5            | 11,3                 | 4,5                  | 159                  | 709     | 33,5                 | 125                               | 2140                              | 214                               | 8,00                 | 117                               | 26,0                              | 1,87                 | 14,6                              | 10520                             | 48       | 13      | 8,15                 | 26,3              |
| IPN 220 | 220         | 98      | 8,1            | 12,2                 | 4,9                  | 175                  | 775     | 39,0                 | 162                               | 3090                              | 278                               | 8,80                 | 162                               | 33,1                              | 2,02                 | 20,1                              | 17760                             | 52       | 13      | 8,77                 | 31,1              |
| IPN 240 | 240         | 106     | 8,7            | 13,1                 | 5,2                  | 192                  | 844     | 46,1                 | 208                               | 4250                              | 354                               | 9,59                 | 221                               | 41,7                              | 2,20                 | 27,0                              | 28730                             | 56       | 17      | 9,39                 | 36,2              |
| IPN 260 | 260         | 113     | 9,4            | 14,1                 | 5,6                  | 208                  | 906     | 53,4                 | 257                               | 5740                              | 442                               | 10,4                 | 288                               | 51,0                              | 2,32                 | 36,1                              | 44070                             | 60       | 17      | 10,15                | 41,9              |
| IPN 280 | 280         | 119     | 10,1           | 15,2                 | 6,1                  | 225                  | 966     | 61,1                 | 318                               | 7590                              | 542                               | 11,1                 | 364                               | 61,2                              | 2,45                 | 47,8                              | 64580                             | 62       | 17      | 11,04                | 48,0              |
| IPN 300 | 300         | 125     | 10,8           | 16,2                 | 6,5                  | 241                  | 1030    | 69,1                 | 381                               | 9800                              | 653                               | 11,9                 | 451                               | 72,2                              | 2,58                 | 61,2                              | 91850                             | 64       | 21      | 11,83                | 54,2              |
| IPN 320 | 320         | 131     | 11,5           | 17,3                 | 6,9                  | 257                  | 1090    | 77,8                 | 457                               | 12510                             | 782                               | 12,7                 | 555                               | 84,7                              | 2,67                 | 78,2                              | 128800                            | 70       | 21      | 12,72                | 61,1              |
| IPN 340 | 340         | 137     | 12,2           | 18,3                 | 7,3                  | 274                  | 1150    | 86,8                 | 540                               | 15700                             | 923                               | 13,5                 | 674                               | 98,4                              | 2,80                 | 97,5                              | 178300                            | 74       | 21      | 13,51                | 68,1              |
| IPN 360 | 360         | 143     | 13,0           | 19,5                 | 7,8                  | 290                  | 1210    | 97,1                 | 638                               | 19610                             | 1090                              | 14,2                 | 818                               | 114                               | 2,90                 | 123                               | 240100                            | 76       | 23      | 14,50                | 76,2              |
| IPN 380 | 380         | 149     | 13,7           | 20,5                 | 8,2                  | 306                  | 1270    | 107                  | 741                               | 24010                             | 1260                              | 15,0                 | 975                               | 131                               | 3,02                 | 150                               | 318700                            | 82       | 23      | 15,29                | 84,0              |
| IPN 400 | 400         | 155     | 14,4           | 21,6                 | 8,6                  | 323                  | 1330    | 118                  | 857                               | 29210                             | 1460                              | 15,7                 | 1160                              | 149                               | 3,13                 | 183                               | 419600                            | 86       | 23      | 16,18                | 92,6              |
| IPN 450 | 450         | 170     | 16,2           | 24,3                 | 9,7                  | 363                  | 1478    | 147                  | 1200                              | 45850                             | 2040                              | 17,7                 | 1730                              | 203                               | 3,43                 | 288                               | 791100                            | 94       | 25      | 18,35                | 115               |
| IPN 500 | 500         | 185     | 18,0           | 27                   | 10,8                 | 404                  | 1626    | 180                  | 1620                              | 68740                             | 2750                              | 19,6                 | 2480                              | 268                               | 3,72                 | 449                               | 1403000                           | 100      | 28      | 20,53                | 141               |
| IPN 550 | 550         | 200     | 19,0           | 30                   | 11,9                 | 445                  | 1787    | 213                  | 2120                              | 99180                             | 3610                              | 21,6                 | 3490                              | 349                               | 4,02                 | 618                               | 2389000                           | 110      | 28      | 23,0                 | 167               |
| IPN 600 | 600         | 215     | 21,6           | 32,4                 | 13                   | 485                  | 1924    | 254                  | 2730                              | 139000                            | 4630                              | 23,4                 | 4670                              | 443                               | 4,30                 | 875                               | 3821000                           | 120      | 28      | 24,88                | 199               |



A = Área de la sección

$S_x$  = Momento estático de media sección, respecto a X.

$I_x$  = Momento de inercia de la sección, respecto a X.

$W_x = 2I_x / h$  : h. Módulo resistente de la sección, respecto a X.

$i_x = (I_x / A)^{1/2}$  : Radio de giro de la sección, respecto a X.

$I_y$  = Momento de inercia de la sección, respecto a Y.

$W_y = 2I_y / b$  : b. Módulo resistente de la sección, respecto a Y.

$i_y = (I_y / A)^{1/2}$  : Radio de giro de la sección, respecto a Y.

$I_z$  = Módulo de torsión de la sección.

$I_t$  = Módulo de alabeo de la sección.

u = Perímetro de la sección.

a = Diámetro del agujero del roblón normal.

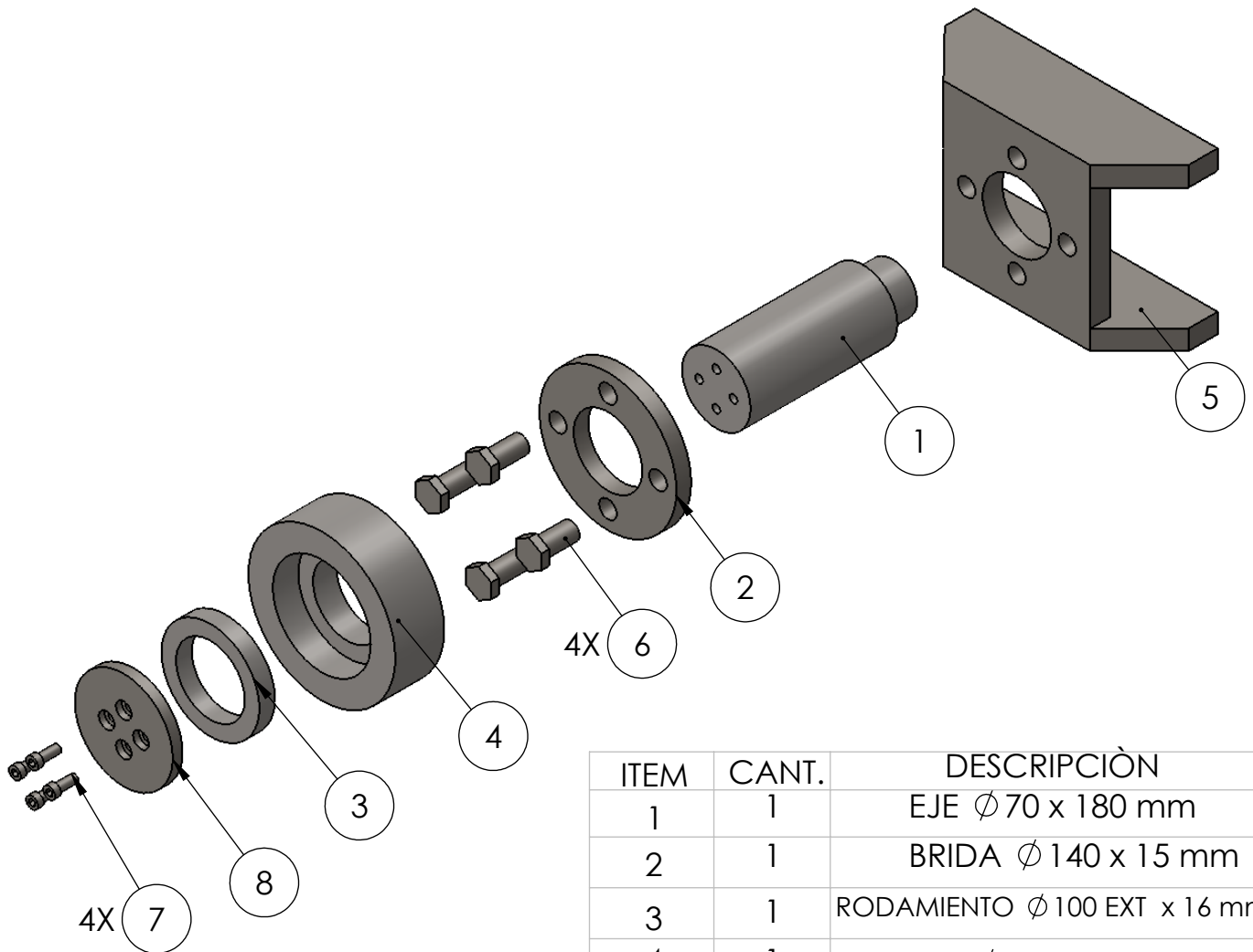
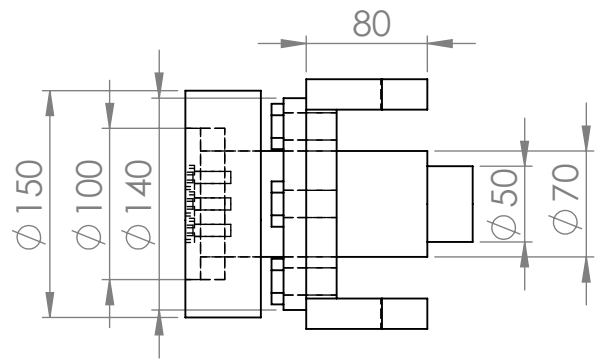
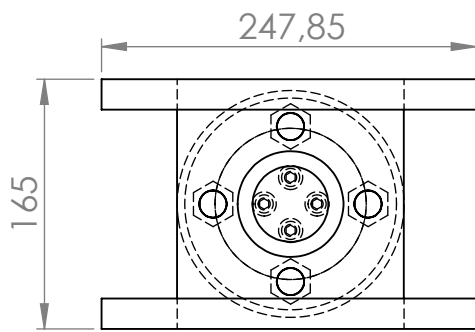
w = Granul, distancia entre ejes de agujeros.

$h_1$  = Altura de la parte plana del alma.

$e_1$  = Espesor del ala en el eje del agujero.

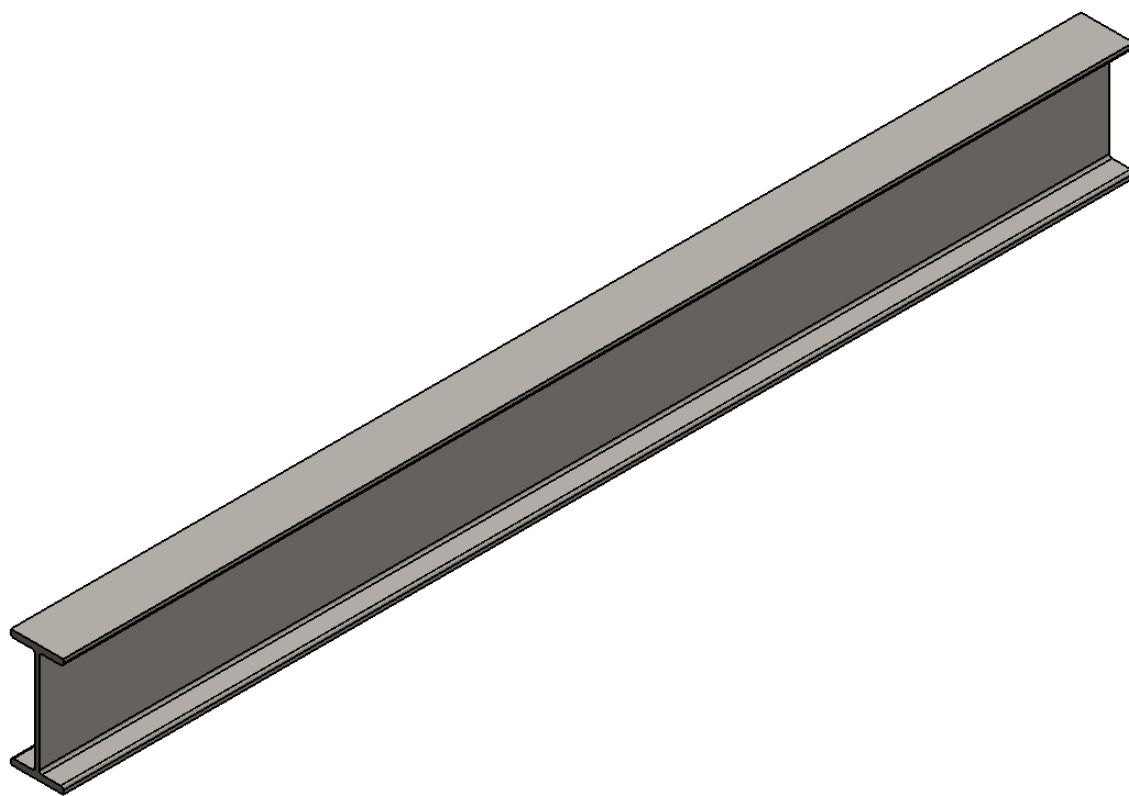
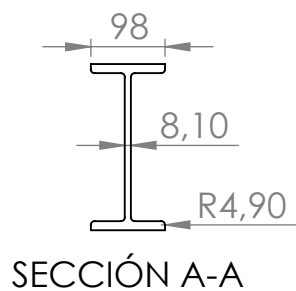
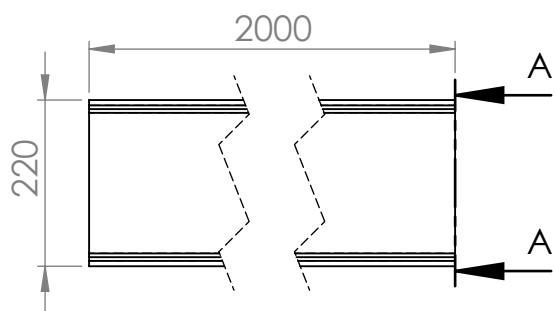
p = Peso por metro.

| Propiedades                      | Caucho natural | Neopreno    | Estireno-Butadieno |
|----------------------------------|----------------|-------------|--------------------|
| Esfuerzo a la tensión (MPa)      | 10.3 a 27.5    | 10.3 a 27.5 | 10.3 a 27.5        |
| Rango de dureza, Shore A         | 30 a 90        | 40 a 95     | 40 a 100           |
| Gravedad específica              | 0.93           | 1.23        | 0.94               |
| Resistencia a la abrasión        | Excelente      | Excelente   | Excelente          |
| Resistencia a aceites            | Pobre          | Buena       | Mala               |
| Resistencia al clima             | Pobre          | Excelente   | Buena              |
| Resistencia a bajas temperaturas | Excelente      | Buena       | Buena              |

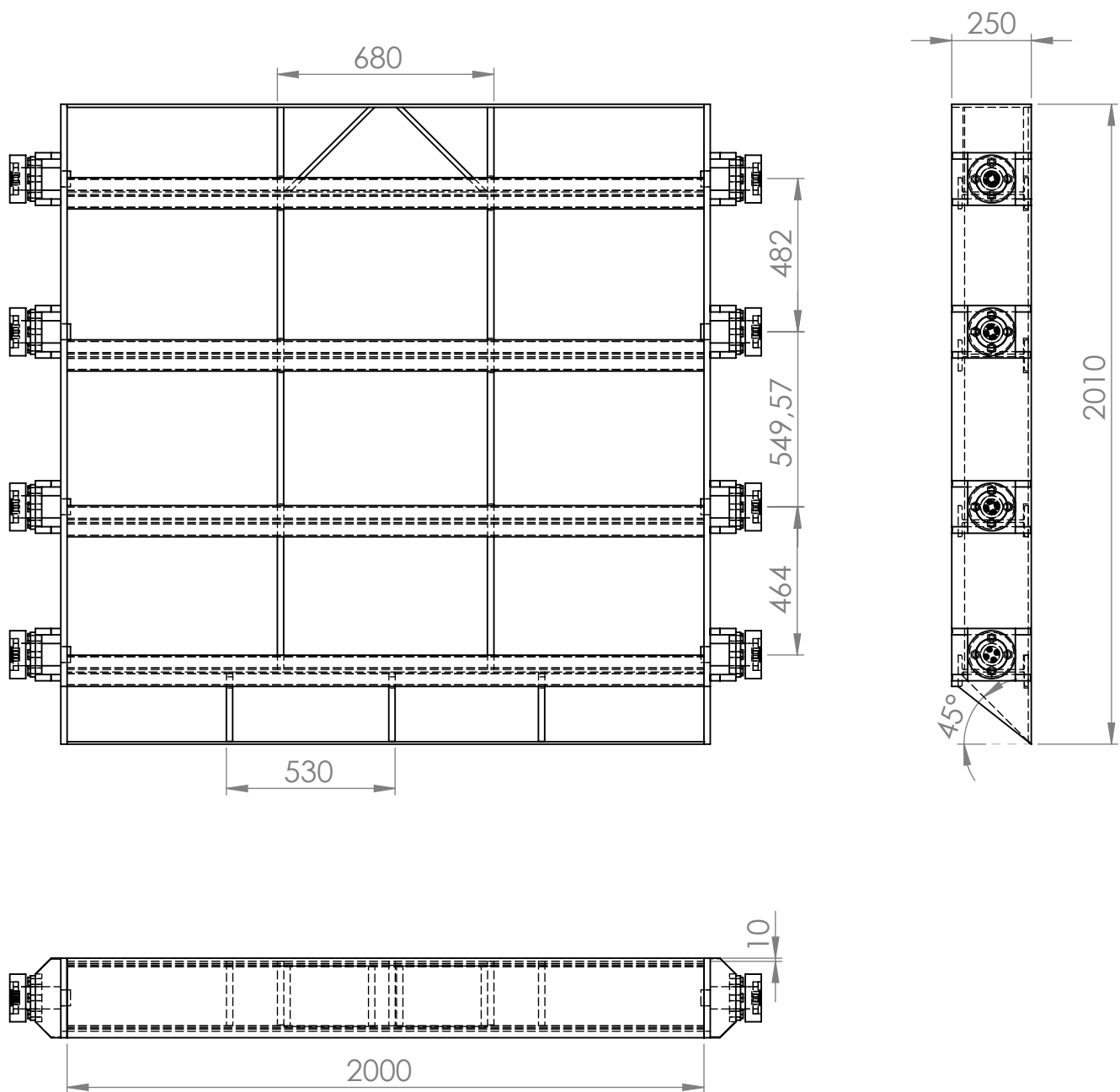


| ITEM | CANT. | DESCRIPCION                              |
|------|-------|------------------------------------------|
| 1    | 1     | EJE $\varnothing 70 \times 180$ mm       |
| 2    | 1     | BRIDA $\varnothing 140 \times 15$ mm     |
| 3    | 1     | RODAMIENTO $\varnothing 100$ EXT x 16 mm |
| 4    | 1     | RUEDA $\varnothing 150$ EXT x 50 mm      |
| 5    | 1     | SOPORTE 20 mm (espesor)                  |
| 6    | 4     | PERNOS M18 x4                            |
| 7    | 4     | PERNOS M8 x4                             |
| 8    | 1     | TAPA $\varnothing 100 \times 5$ mm       |

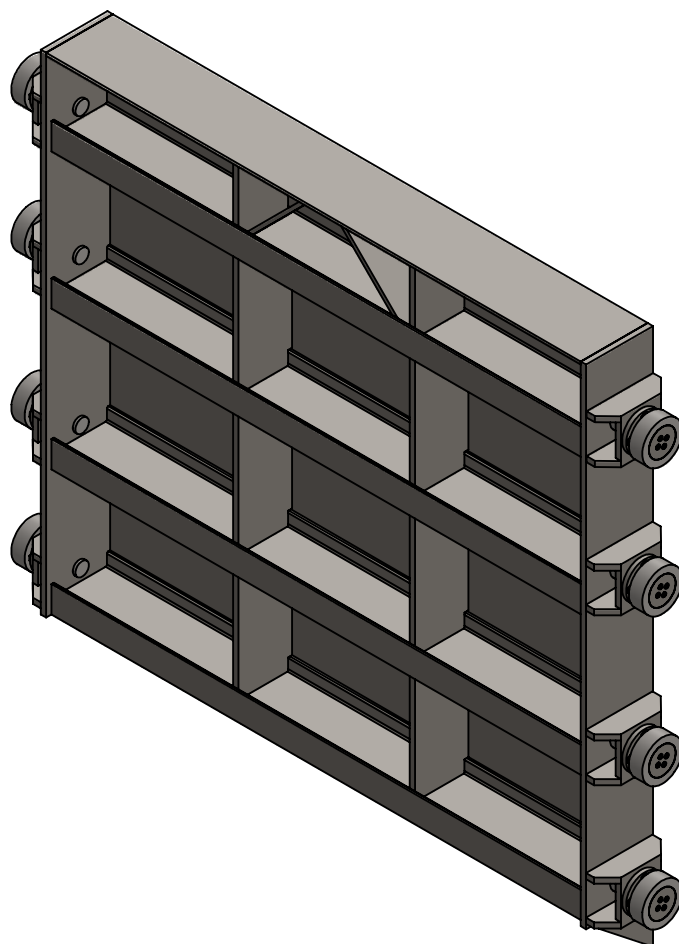
|                                                                                                                             |  |                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------|------------|
| FIMCP-ESPOL                                                                                                                 |  | NOMBRE            | FECHA      |
|                                                                                                                             |  | DIB: DAVID MERA   | 23/02/2015 |
| TESIS:<br>COMPUERTA TIPO VAGÓN                                                                                              |  | REV: ING. CAMACHO | 23/02/2015 |
|                                                                                                                             |  | APR: ING. CAMACHO | 23/02/2015 |
|  CONTIENE:<br>CONJUNTO RUEDA-EJE-SOPORTE |  | No. PLANO         | 1          |
|                                                                                                                             |  | ESCALA:           | 1:5        |
|                                                                                                                             |  | MATERIAL:         | VARIOS     |
|                                                                                                                             |  | PESO (KG):        | 20.2       |



|                                                                                     |                               |            |              |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------|--------------|------------|
| FIMCP-ESPOL                                                                         |                               |            | NOMBRE       | FECHA      |
|                                                                                     |                               | DIB:       | DAVID MERA   | 23/02/2015 |
|                                                                                     |                               | REV:       | ING. CAMACHO | 23/02/2015 |
| TESIS:<br><br>COMPUERTA TIPO VAGÒN                                                  |                               | APR:       | ING. CAMACHO | 23/02/2015 |
|                                                                                     |                               | No. PLANO  | 2            |            |
|                                                                                     |                               | ESCALA:    | 1:10         |            |
|  | CONTIENE:<br><br>VIGA IPN 220 | MATERIAL:  | ACERO A36    |            |
|                                                                                     |                               | PESO (KG): | 62.4         |            |



|                                                                                                         |  |            |              |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------|--------------|------------|
| FIMCP-ESPOL                                                                                             |  |            | NOMBRE       | FECHA      |
|                                                                                                         |  | DIB:       | DAVID MERA   | 23/02/2015 |
|                                                                                                         |  | REV:       | ING. CAMACHO | 23/02/2015 |
|                                                                                                         |  | APR:       | ING. CAMACHO | 23/02/2015 |
| TESIS:<br>COMPUERTA TIPO VAGÓN                                                                          |  | No. PLANO  | 3            |            |
|                                                                                                         |  | ESCALA:    | 1:20         |            |
|                                                                                                         |  | MATERIAL:  | VARIOS       |            |
|  CONTIENE: COMPUERTA |  | PESO (KG): | 1046         |            |



|                                                                                                         |  |            |              |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------|--------------|------------|
| FIMCP-ESPOL                                                                                             |  |            | NOMBRE       | FECHA      |
|                                                                                                         |  | DIB:       | DAVID MERA   | 23/02/2015 |
|                                                                                                         |  | REV:       | ING. CAMACHO | 23/02/2015 |
|                                                                                                         |  | APR:       | ING. CAMACHO | 23/02/2015 |
| TESIS:<br>COMPUERTA TIPO VAGÓN                                                                          |  | No. PLANO  | 4            |            |
|                                                                                                         |  | ESCALA:    | 1:20         |            |
|                                                                                                         |  | MATERIAL:  | VARIOS       |            |
|  CONTIENE: COMPUERTA |  | PESO (KG): | 1046         |            |

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. American Water Works association ANSI / AWWA C563-04 First Edition, Fabricated Composite Slide Gates.
2. ANSI/AISC 360-05, Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, Illinois, USA. 2005.
3. ANSYS Inc. ANSYS Modeling and Meshing Guide. Canonsburg, Pennsylvania. 2004. 276 pág.
4. ASCE (American Society of Civil Engineers), Water Control Gates: Guidelines for Inspection and Evaluation. Virginia, 2012. 304 pág.
5. Argyris J. H., Kelsey S., Energy Theorems and Structural Analysis, Aircraft Engineering. Oct. 1954.
6. Associacao Brasileira de Normas Tecnicas, NBR – 8883, 1996 Calculation of Hydraulic Gates. Brazil, 2008. 42 pàg.
7. Bathe K. J., Finite Element Procedures, Prentice-Hall, 1996.
8. BUDYNAS, Richard y NISBETT, Keith. Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley, 8va edición, México. McGrawHill, 2008. 1092 pág.

9. CASTILLO, Argimiro. Pre dimensionado de vigas. Publicación. Venezuela. Universidad de los Andes, Facultad de Arquitectura y Arte. Sistemas Estructurales II.
10. CELIGUETA, Juan. Método de los Elementos finitos para Análisis Estructural. San Sebastián, España. Escuela Superior de Ingenieros. 2011. 287 Pág.
11. Deutsches Institut Fur Normung E.V, DIN – 19704, Hydraulic Steel Structures: Criteria For Design And Calculation. Germany, 1998. 24 pág.
12. ERBISTI, Paulo C.F. Design of hydraulic gate. Netherlands, Balkema Publishers, 2004. 351 pág.
13. GARZÓN, Christian. Pernos Estructurales De Alta Resistencia. Revista Ciencia Vol. 14, 1. 2011. 78 Pág.
14. HERNÁNDEZ, Hernández, Yesenia. Normas técnicas. Juárez, México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Informática y Sistemas. 2010. 33 Pág.
15. LEWIN, Jack. Hydraulic Gates and Valves. THOMAS TELFORD, 1995
16. MASNOU, Marc Malgosa. Estudio de los diferentes métodos de dimensionamiento para uniones atornilladas y soldadas de acuerdo

con la normativa vigente. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña, 2007.

17. Murray R. I. y Simmons W. P. Hydraulic Downpull Forces on large Gates. USA, United States Department of Interior Bureau of Reclamation. 1966. 42 pág.
18. PEZZOTTI, Santiago y ANTICO, Federico. Introducción a la teoría de elementos finitos, Universidad Nacional de La Plata. 2008. 29 pág.
19. Prodeplasticos SAS, Gate rubber seals [Diapositivas]. Cali- Colombia. Carrera 2 No 30 – 34. 30 slides.
20. RODRIGUEZ, David. Diseño y modelamiento de las uniones soldadas de las Compuertas planas para presas. Tesis. Bogotá, Colombia. Universidad Libre de Colombia, Departamento de postgrados, 2012. 88 pág.
21. TENELANDA Edison y ZUÑIGA Milton. Comportamiento tribológico de las ruedas y rieles de los ferrocarriles sometidos a recargue por soldadura eléctrica en la empresa Ferrocarriles del Ecuador. Tesis. Riobamba, Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Facultad de Ingeniería de mantenimiento, 2012. 110 pág.
22. Timoshenko S., Woinowski-Krieger S., Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 1959.

