

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“MODELACIÓN NUMÉRICA DEL
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE
HARNERO VIBRATORIO R-MD, MEDIANTE
ACOPLAMIENTO ENTRE EL MÉTODO DE
ELEMENTOS FINITOS Y ELEMENTOS DISCRETOS”**

DIEGO ALEJANDRO ESCOBAR MOSCOSO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO, MENCIÓN PRODUCCIÓN

PROFESOR GUÍA: DR. ING. FRANCO PERAZZO M.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. LUIS PÉREZ P.

Noviembre, 2016

DEDICATORIA

Con cariño a mi madre.....

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

AGRADECIMIENTOS

Al concluir este trabajo de título solo me queda agradecer a todas las personas que tuve el placer de conocer en esta hermosa casa de estudios, a los que me acompañaron en las buenas y en las malas, y a los que formé lazos que perdurarán a través del tiempo.

Primero que nada, debo mencionar a la persona que hizo que todo esto fuese posible, mi madre Isabel de las Mercedes Moscoso Ponce, que me dio la oportunidad de desarrollarme como estudiante y que me brindó un apoyo incondicional durante estos largos 20 años que me ha tocado estudiar, desde kínder hasta la universidad, y por todo el sacrificio que esto fue para ella.

A la rama de fútbol varones que me dio la oportunidad de crear los lazos más fuertes de amistad, me brindó las derrotas más duras y las victorias más sabrosas. Sin la presencia de esta familia deportiva, dirigida por el profesor Jorge Soriano, no podría haber sido tan gratos estos años en la universidad. Si comienzo a mencionar uno por uno a los amigos que encontré en esta familia deportiva quizás olvide a alguno o puede que no me alcance el espacio.

Agradecer también a la familia Cadenasso Moscoso que me acogieron, me brindaron cariño y me hicieron sentir uno más de ellos, acompañándome y cuidándome en los momentos más complicados de mi carrera. Sin el apoyo de ellos esta aventura que emprendí en soledad no habría sido lo mismo, solo el hecho de haber sentido ese cariño familiar me dio ese empujoncito necesario para seguir adelante.

También quiero agradecer a mis amigos mecánicos, a mis amigos del SEAD y a todos los que fui conociendo durante este largo camino. Del SEAD a parte de los amigos que hice, quisiera agradecer a don Carlos Pizarro que me dio la oportunidad de mantener un trabajo estable y paralelo a mi carrera, y así poder tener un apoyo económico.

Agradecer al profesor Franco Perazzo, que quiso trabajar conmigo en este tema y me acompañó durante este tiempo, ayudándome y guiándome hasta alcanzar el objetivo final.

Finalmente agradecer al departamento de ingeniería mecánica por el apoyo brindado por sus docentes y la cercanía que he encontrado, son uno de los pocos departamentos que existe una relación tan cercana profesor-alumno.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

RESUMEN

En los procesos de molienda de la minería, los harneros vibratorios ubicados a continuación de los molinos SAG son los equipos más expuesto a presentar fallas estructurales, debido a sus condiciones de operación; lo cual está muy lejos de lo esperado, y por esto se debe estudiar su comportamiento en condiciones normales de operación. Se debe lograr entender el comportamiento estructural de este equipo para así poder obtener una solución adecuada a las fallas que presenta. Debido a que existen diferentes condiciones de trabajo se debe procurar alcanzar la mayor cercanía a la realidad en las simulaciones.

El siguiente trabajo de investigación presenta un análisis de elementos discretos y elementos finitos mediante el acoplamiento entre dos softwares, en base a la problemática mencionada en el párrafo anterior. Esta problemática alude a un harnero vibratorio que opera en la línea de molienda SAG, en la planta más moderna de la empresa Anglo American sur, ubicada en Santiago, y que presenta fallas recurrentes en su estructura, ocasionadas principalmente por las condiciones de operación a las que está expuesto.

La metodología de trabajo escogida considera seis tipos de análisis diferentes, donde se compara la aplicación de dos tipos de cargas que modelan el mineral, inducidas por una ecuación e inducidas por un software, a un equipo vibrador.

Primero se estudian las fallas más recurrentes, la geometría y las condiciones de contorno de este tipo de harnero para poder replicarlas en los programas de trabajo, programas los cuales servirán para el diseño de un modelo CAD del equipo, para la modelación del flujo del mineral y para el análisis estructural. A continuación de la modelación del CAD se comienzan los análisis de elementos discretos en ROCKY y posteriormente elementos finitos en ANSYS, obteniendo análisis de la estructura usando criterios de falla estáticos (Von Mises) y criterios de falla dinámicos (fatiga).

Finalmente se obtienen resultados para diferentes flujos de minerales y para cada uno de los casos de interés, donde se muestran los análisis comparativos en función de las deformaciones, los esfuerzos y los factores de seguridad, destacando los componentes y sus principales fallas. Además, se proponen medidas de diseño para mitigar las fallas y mejorar el rendimiento de este equipo vibrador.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

ABSTRACT

In the grinding processes of minery, the vibrating screen located next to the SAG mills are the most exposed equipment to developed a failure, due to the operation conditions, far from what it is expected, and, that is why it must be studied in normal conditions of operation. To obtain appropriate solutions to the failures is important to comprehend the structural behavior of the equipment. Due to there are different conditions of work in the equipment is important to reach the closer reality in simulations.

The following research job present an analysis of discrete elements and finite elements through the coupling between two softwares, considering the problematic mentioned in the previous paragraph. This issue alludes a vibrating screen that operates in the line of milling SAG, in the most modern plant of Anglo American Sur company, located in Santiago, and that has recurrent flaws in structure, caused mainly due to operation conditions to which it is exposed.

The methodology of work chosen considers six types of different analysis, which compare the application of two types of loads that model the mineral, induced by an equation and a software, to a vibrating screen.

First, the most common failures are studied, the geometry and boundary conditions that this type of vibrating screen to be able to replicate in work softwares, software that will help in the design of a CAD model of the equipment, for the mineral flow modeling and structural analysis. Following the CAD design, discret elements were analyzed in ROCKY and finite elements using ANSYS, obtaining an analysis of the structure using static failure criteria (Von Mises) and dynamic failure criteria (fatigue).

Finally, results were presented to different types of mineral flows, and for each one of the cases of interest, comparative analysis in function of the deformations, tensions, and security factors, highlighting the components and their principals flaws. Besides, design measures are proposed to mitigate failures and improve the performance of the vibrating screen.

GLOSARIO

ANSYS	: Software de modelación numérica.
CAD	: “Computer-aided design” (diseño asistido por ordenador)
DEM	: Discrete Element Method.
FEM	: Finite Element Method.
INVENTOR	: Software de diseño CAD.
ROCKY	: Software de modelación numérica.
STL	: Stereo Lithography, extensión para modelación en Rocky.
STEP	: Tipo de extensión que admite ANSYS para los CAD.
Trommel	: filtro o clasificador de alta eficiencia.
SAG	: asociación que recibe el proceso de molienda semi-autógena.
Pebbles	: Roca que no ha sido seleccionada por el trommel ni el harnero.
Inlet	: Entrada.
Output	: Salida.
F.S.	: Factor de seguridad.
C/A	: Con acoplamiento.
ROM	: Run of mine, que significa mineral en bruto de mina.
Deck	: malla de clasificación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
GLOSARIO.....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VI
1 ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS	VIII
2 ÍNDICE DE TABLAS	XV
CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	3
CAPÍTULO II	4
2 ANTECEDENTES GENERALES.....	4
2.1 Antecedentes generales de la investigación	4
2.2 Alcance de la investigación.....	4
2.3 Datos generales de la empresa.....	5
CAPÍTULO III	13
3 DESCRIPCIÓN DE LA CLASIFICACIÓN A TRAVÉS DE HARNEROS.....	13
3.1 Clasificación de Minerales	13
3.2 Descripción de los Harneros	16
3.3 Descripción del movimiento de los Harneros Vibratorios	23
3.4 Descripción del Harnero Vibratorio a estudiar.....	25
CAPÍTULO IV.....	30
4 CRITERIOS Y CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA EN ESTUDIO	30
4.1 Descripción del Problema	30
4.2 Características del Problema	31
CAPÍTULO V	34
5 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL ESTUDIO	34
5.1 Determinación de las fuerzas que generan el mineral	34
5.2 Determinación de la Rigidez de los Resortes	46
<i>Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos</i>	

5.3	Determinación de los parámetros para el análisis modal	50
CAPÍTULO VI.....		51
6	MODELACIÓN DEL CAD.....	51
6.1	Características del software de trabajo.....	51
6.2	Modelación de componentes.....	52
6.3	Características de los componentes.....	54
CAPÍTULO VII		59
7	PRINCIPIOS DEL ANÁLISIS FEM EN GENERAL	59
7.1	Introducción Método de Elementos Finitos.	59
7.2	Concepto General del Método.....	60
7.3	Formulación del Método de Elementos Finitos.....	63
CAPÍTULO VIII		66
8	MODELACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE ANSYS	66
8.1	Análisis de elementos finitos utilizando ANSYS.....	66
8.2	Resultados (Static Structural).....	96
8.3	Resultados (Modal)	119
CAPÍTULO IX.....		122
9	DESARROLLO DE LA MODELACIÓN DEM EN GENERAL	122
9.3	Generalidades del método de elementos discretos	122
9.4	Descripción del programa de análisis de elementos discretos.....	125
CAPÍTULO X.....		126
10	MODELACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE ACOPLAMIENTO ENTRE ANSYS WORKBENCH Y ROCKY DEM	126
10.1	Desarrollo de los cálculos mediante Rocky.....	126
10.2	Desarrollo de los cálculos en ANSYS acoplado con Rocky	145
10.3	Casos a analizar.....	147
10.4	Resultados	150
10.5	Mejoras propuestas para el diseño.....	175
CONCLUSIONES		178
REFERENCIA		180
ANEXOS.....		186
1	Análisis estático con acoplamiento y descarga no uniforme.....	186
2	Análisis estático con acoplamiento, descarga uniforme y mejoras en el diseño	193
3	Análisis Modal	200
<i>Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos</i>		

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

<i>Figura 1: Divisiones Anglo American Chile.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2: Mapa Santiago Centro a ingreso a ruta Los Bronces.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3: Esquema División Los Bronces.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4: Diagrama de flujo chancado y molienda.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5: Estratificación del material.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 6: Etapas de clasificación.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7: Grizzly típico.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8: Harnero vibratorio y sus elementos.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9: Harnero horizontal.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10: Harnero de inclinación simple.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 11: Harnero de inclinación doble.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 12: Harnero de inclinación triple.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 13: Harnero de banana o inclinación múltiple.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 14: Tipos de movimientos de harneros vibratorios.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 15: Empresa Haver & Boecker Andina.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 16: Harnero vibratorio Haver&Boecker.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 17: Accionamiento post excitadores XL-CLASS.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 18: Fractura pieza principal interior.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 19: Reparación viga de descanso.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 20: Harnero en operación.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 21: Imagen trommel molino SAG.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 22: Tamaño y porcentaje de granulometría.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 23: Descarga SAG a trommel-harnero.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 24: Diagrama de flujo másico.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 25: Diagrama de flujo del mineral.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 26: Distribución de las cargas.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 27: Excitador MU 40.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 28: Tipo de resorte del harnero.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 29:Resortes en series.....</i>	<i>48</i>

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

<i>Figura 30:Resortes en paralelo.</i>	49
<i>Figura 31: Vista isométrica CAD harnero vibratorio.</i>	52
<i>Figura 32: Vista frontal CAD harnero vibratorio.</i>	53
<i>Figura 33: Vista isométrica modelo CAD harnero.</i>	53
<i>Figura 34: Placa lateral harnero.</i>	54
<i>Figura 35: Vista isométrica tubo de trabamiento delantero.</i>	55
<i>Figura 36: Vista isométrica tubo trabamiento trasero.</i>	56
<i>Figura 37: Vista isométrica transversal de alimentación.</i>	57
<i>Figura 38: Vista isométrica malla de harneado.</i>	58
<i>Figura 39: Vista isométrica soporte superior delantero.</i>	58
<i>Figura 40: Separación con Elementos Finitos.</i>	60
<i>Figura 41: Viga en voladizo.</i>	61
<i>Figura 42: Nodos y elementos viga en voladizo.</i>	62
<i>Figura 43:Desplazamientos nodales en un elemento sólido hexaédrico 3D.</i>	64
<i>Figura 44: Plataforma de inicio ANSYS Workbench.</i>	67
<i>Figura 45: Conjunto de Programas en el toolbox de ANSYS Workbench.</i>	67
<i>Figura 46: Programas acoplados en ANSYS.</i>	68
<i>Figura 47: Pre- Stress Modal.</i>	68
<i>Figura 48: Importar geometría en ANSYS Workbench.</i>	69
<i>Figura 49: Geometría importada ANSYS.</i>	69
<i>Figura 50: Modelo del harnero en SpaceClaim</i>	70
<i>Figura 51: Ventana de ingreso de nuevos materiales.</i>	71
<i>Figura 52: Ventana base de datos materiales.</i>	72
<i>Figura 53: Materiales ingresados a la ventana principal.</i>	72
<i>Figura 54: Ingreso de propiedades a los materiales.</i>	73
<i>Figura 55: Materiales ingresados al Software.</i>	74
<i>Figura 56: Seleccionar material.</i>	75
<i>Figura 57: Ingreso de relaciones de contactos.</i>	75
<i>Figura 58: Contacto entre componentes del harnero.</i>	76
<i>Figura 59: Generación de mallado.</i>	79
<i>Figura 60: Ingresar tamaño de elemento para zonas de bajo interés.</i>	80
<i>Figura 61: Componentes que son de mayor interés para el mallado.</i>	81
<i>Figura 62: Vista isométrica malla del harnero.</i>	83

<i>Figura 63: Vista isométrica (zoom) malla del harnero.</i>	83
<i>Figura 64: Ingreso del soporte para el equipo.</i>	84
<i>Figura 65: Ingresar Spring al harnero de descarga.</i>	85
<i>Figura 66: Componentes verticales y transversales para el caso de 24 resortes.</i>	86
<i>Figura 67: Componentes verticales y transversales para el caso de 4 resortes.</i>	88
<i>Figura 68: Ingreso fuerza de gravedad.</i>	89
<i>Figura 69: Cargas generadas por los Excitadores.</i>	90
<i>Figura 70: Momentos generados por los excitadores.</i>	90
<i>Figura 71: Curva de variación de las cargas aplicadas al harnero.</i>	93
<i>Figura 72: Curva correspondiente a la teoría de falla de Soderberg.</i>	94
<i>Figura 73: Menú de la aplicación de esfuerzos Von Mises.</i>	95
<i>Figura 74: Menú para la selección de F.S. estático o dinámico (fatiga).</i>	96
<i>Figura 75: Deformación total máxima harnero completo.</i>	97
<i>Figura 76: Deformación total máxima harnero sin malla.</i>	99
<i>Figura 77: Deformación total máxima viga madre.</i>	100
<i>Figura 78: Esfuerzo máximo viga madre.</i>	101
<i>Figura 79: Deformación total máxima viga descanso delantera.</i>	104
<i>Figura 80: Esfuerzo máx. viga descanso delantera.</i>	105
<i>Figura 81: Deformación total máxima viga descanso posterior.</i>	107
<i>Figura 82: Esfuerzo máx. viga descanso posterior.</i>	108
<i>Figura 83: Deformación total máxima placa lateral derecha.</i>	111
<i>Figura 84: Esfuerzo máx. placa lateral derecha.</i>	112
<i>Figura 85: Deformación total máxima placa lateral izquierda.</i>	114
<i>Figura 86: Esfuerzo máx. placa lateral izquierda.</i>	115
<i>Figura 87: Menú de inicio de Rocky dentro de ANSYS Workbench.</i>	127
<i>Figura 88: Menú Rocky con geometría cargada.</i>	127
<i>Figura 89: Menú de incorporación de geometría.</i>	127
<i>Figura 90: Plataforma principal Rocky.</i>	128
<i>Figura 91: Selección de resistencia a la rodadura y gravedad.</i>	128
<i>Figura 92: Mostrar estructura en 3D.</i>	129
<i>Figura 93: Selección tamaño de triángulos.</i>	130
<i>Figura 94: Mostrar malla en Rocky.</i>	130
<i>Figura 95: Crear entrada de mineral.</i>	131

<i>Figura 96: Seleccionar ubicación para la entrada de las partículas.</i>	131
<i>Figura 97: Harnero con la entrada de las partículas en la zona posterior.</i>	131
<i>Figura 98: Ingresar material a Rocky.</i>	132
<i>Figura 99: Ingresar material P265GH a Rocky.</i>	132
<i>Figura 100: Ingresar material Poliuretano a Rocky.</i>	133
<i>Figura 101: Selección de material en Rocky.</i>	133
<i>Figura 102: Ingresar interacción de los materiales.</i>	134
<i>Figura 103: Ingresar movimiento a la estructura.</i>	135
<i>Figura 104: Ingresar el tipo de movimiento.</i>	135
<i>Figura 105: Coordenadas de desplazamiento y movimiento.</i>	136
<i>Figura 106: Ingresar partículas a Rocky.</i>	137
<i>Figura 107: Ingresar tamaño de distribución de partículas.</i>	138
<i>Figura 108: Ingresar tipo de forma de la partícula.</i>	138
<i>Figura 109: Seleccionar salida de partículas (Input).</i>	139
<i>Figura 110: Ingresar flujo de partículas.</i>	140
<i>Figura 111: Iniciar simulación Rocky.</i>	140
<i>Figura 112: Seleccionar nueva ventana de diagramas en Rocky.</i>	141
<i>Figura 113: Seleccionar cuadro de expresiones en Rocky.</i>	141
<i>Figura 114: Fuerzas nodales instantáneas proyectadas en el equipo.</i>	142
<i>Figura 115: Ingreso de fuerzas a la tabla de variables.</i>	142
<i>Figura 116: Proyecciones de las fuerzas nodales instantáneas en el tiempo.</i>	143
<i>Figura 117: Tabla con valores de fuerzas nodales variables.</i>	143
<i>Figura 118: Menú ANSYS Workbench al terminar la simulación en Rocky.</i>	144
<i>Figura 119: Menú ANSYS Workbench al terminar y actualizar la simulación en Rocky.</i>	145
<i>Figura 120: Importar fuerzas desde Rocky hacia ANSYS.</i>	145
<i>Figura 121: Harnero con una parte de la superficie de la malla seleccionada.</i>	146
<i>Figura 122: Cuadro de acoplamiento de fuerzas de Rocky a ANSYS.</i>	147
<i>Figura 123: Flujo de mineral uniforme pasando por el harnero en Rocky.</i>	148
<i>Figura 124: Flujo de mineral no uniforme pasando por el harnero en Rocky.</i>	149
<i>Figura 125: Vista isométrica diseño CAD harnero modificado.</i>	176
<i>Figura 126: Deformación total máxima harnero completo modificado.</i>	177
<i>Figura 127: Deformación harnero completo C/A.</i>	186
<i>Figura 128: Deformación harnero sin malla C/A.</i>	187

<i>Figura 129: Viga madre C/A.</i>	188
<i>Figura 130: Viga descanso delantera C/A.</i>	189
<i>Figura 131: Viga descanso posterior C/A.</i>	190
<i>Figura 132: Placa lateral derecha C/A.</i>	191
<i>Figura 133: Placa lateral izquierda C/A.</i>	192
<i>Figura 134: Deformación harnero completo C/A mejorado.</i>	193
<i>Figura 135: Harnero sin malla C/A mejorado.</i>	194
<i>Figura 136: Viga madre C/A mejorado.</i>	195
<i>Figura 137: Viga descanso delantera C/A mejorado.</i>	196
<i>Figura 138: Viga descanso posterior C/A mejorado.</i>	197
<i>Figura 139: Placa lateral derecha C/A mejorado.</i>	198
<i>Figura 140: Placa lateral izquierda C/A mejorado.</i>	199
<i>Figura 141: Forma modal de primer orden.</i>	200
<i>Figura 142: Forma modal de segundo orden.</i>	201
<i>Figura 143: Forma modal de tercer orden.</i>	202
<i>Figura 144: Forma modal de cuarto orden.</i>	203
<i>Figura 145: Forma modal de quinto orden.</i>	204
<i>Figura 146: Forma modal de sexto orden.</i>	205
<i>Figura 147: Forma modal de séptimo orden.</i>	206
<i>Figura 148: Forma modal de octavo orden.</i>	207
<i>Figura 149: Forma modal de noveno orden.</i>	208
<i>Figura 150: Forma modal de décimo orden.</i>	209

Gráfico 1: Detenciones a causa de fallas de harnero.....	31
Gráfico 2: Fuerzas aplicadas al equipo en función del flujo de mineral.....	44
Gráfico 3: Fuerza excitadores en operación.	45
Gráfico 4: Determinación factor de la constante de elasticidad cl.....	48
Gráfico 5: Deformación total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (harnero completo)..	98
Gráfico 6: Deformación total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (harnero sin malla)..	99
Gráfico 7: Deformación total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga madre).	101
Gráfico 8: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga madre).....	102
Gráfico 9: F.S. estático mín. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga madre).	102
Gráfico 10: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga madre).	103
Gráfico 11: Def. total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso delantera).	104
Gráfico 12: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso delantera)..	105
Gráfico 13: F.S. estático. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso delantera)....	106
Gráfico 14: F.S. dinámico vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso delantera). .	106
Gráfico 15: Def. total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso posterior).	108
Gráfico 16: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso posterior)..	109
Gráfico 17: F.S. estático vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso posterior).	109
Gráfico 18: F.S. dinámico vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso posterior)..	110
Gráfico 19: Def. total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (Placa lateral derecha)....	111
Gráfico 20: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral derecha).	112
Gráfico 21: F.S. estático vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral derecha).	113
Gráfico 22: F.S. dinámico vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral derecha).....	113
Gráfico 23: Def. total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral izquierda). ..	114
Gráfico 24: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral izquierda). ...	115
Gráfico 25: F.S. estático vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral izquierda).	116
Gráfico 26: F.S. dinámico vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral izquierda). ...	116
Gráfico 27: Fuerzas proyectadas carga uniforme Rocky.	148
Gráfico 28: Fuerzas proyectadas carga no uniforme Rocky.	150
Gráfico 29: Deformación total máx. vs flujo de mineral (harnero completo).	152
Gráfico 30: Deformación total máx. vs flujo de mineral (harnero sin malla).	154
Gráfico 31: Deformación total máx. vs flujo de mineral (viga madre).....	156
Gráfico 32: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral (viga madre).	157
Gráfico 33: F.S. estático mín. vs flujo de mineral (viga madre).	157

Gráfico 34: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral (viga madre). 158

Gráfico 35: Deformación total máx. vs flujo de mineral (viga descanso delantera). 159

Gráfico 36: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral (placa lateral derecha). 160

Gráfico 37: F.S. estático mín. vs flujo de mineral (viga descanso delantera). 161

Gráfico 38: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral (viga descanso delantera). 161

Gráfico 39: Deformación total máx. vs flujo de mineral (viga descanso posterior). 163

Gráfico 40: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral (viga descanso posterior). 164

Gráfico 41: F.S. estático mín. vs flujo de mineral (viga descanso posterior). 165

Gráfico 42: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral (viga descanso posterior). 165

Gráfico 43: Deformación total máx. vs flujo de mineral (placa lateral derecha). 167

Gráfico 44: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral (placa lateral derecha). 168

Gráfico 45: F.S. estático mín. vs flujo de mineral (placa lateral derecha). 169

Gráfico 46: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral (placa lateral derecha). 169

Gráfico 47: Deformación total máx. vs flujo de mineral (placa lateral izquierda). 171

Gráfico 48: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral (placa lateral izquierda). 171

Gráfico 49: F.S. estático mín. vs flujo de mineral (placa lateral izquierda). 172

Gráfico 50: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral (placa lateral izquierda). 172

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Descripción de la producción.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2: Fuerzas producidas por el material.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3: Valores característicos de los materiales.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 4: Tipos de contactos.</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 5: Datos ingreso de condiciones de malla.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 6: Ingresar Spring coordenada Y.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 7: Ingresar Spring coordenada X.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 8: Ingresar Spring coordenada Z.</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 9: Valores sugeridos por J. Shigley para factores de seguridad.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 10: Parámetros modales para equipo con 24 resortes.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 11: Parámetros modales para equipo con 4 resortes.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 12: Coeficientes de interacción entre los materiales.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabla 13: Velocidades de translación.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 14: Tamaño de distribución.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 15: Datos ingresar fuerzas importadas desde Rocky.....</i>	<i>146</i>
<i>Tabla 16: Variación porcentual de la deformación para el harnero completo.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 17: Variación porcentual de la deformación para el harnero sin malla.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 18: Variación porcentual de la deformación y el esfuerzo para la viga madre.</i>	<i>155</i>
<i>Tabla 19: Variación porcentual deformación y el esfuerzo máx. (viga descanso delantera)...</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 20: Variación porcentual deformación y esfuerzo máx. (viga descanso posterior).</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 21: Variación porcentual deformación y esfuerzo máx. (placa lateral derecha).</i>	<i>166</i>
<i>Tabla 22: Variación porcentual deformación y esfuerzo máx. (placa lateral izquierda).</i>	<i>170</i>
<i>Tabla 23: Comparación de los valores para todos los casos.</i>	<i>176</i>

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Durante muchos años la minería en Chile ha sido el corazón de la economía, por todo el alcance que ésta tiene y además por el dinero que genera. Es por ello que este rubro ha atraído grandes inversiones extranjeras para los procesos de extracción y manejo de los distintos minerales que se encuentran en los yacimientos.

Dentro de esta industria el principal mineral que se extrae en el país es el cobre, el cual en su mayoría se exporta en diferentes formatos, ya sea como concentrado, ánodos o cátodos. Los principales yacimientos de extracción de este mineral se encuentran ubicados en la zona norte de Chile, en el bien llamado norte grande por las dimensiones que cubre, en donde trabajan diferentes empresas nacionales e internacionales en la explotación de este producto natural. Si bien la gran mayoría de las empresas están ubicadas en la zona norte también existen un par de éstas que están ubicadas en la zona central como la empresa Anglo American S.A, que tiene una de sus instalaciones ubicada en la región metropolitana, en la cordillera de los andes. Esta división tiene el nombre de Los Bronces y se dedica principalmente a la extracción de cobre y en menor proporción a molibdeno, en un rajo abierto que está a una altura cercana a los 4000 mts. Esta división de Anglo American representa la mayor en términos de producción con respecto a sus otras instalaciones en el país, por lo que toma una gran relevancia para la empresa los problemas que se generen en esta división y que puedan afectar a las metas de producción anuales ya establecidas.

Con motivos de expandir su producción en 2011 comenzó a funcionar una nueva planta de molienda llamada Confluencia, la cual tiene una capacidad del 70% de la producción anual de la empresa, esto quiere decir, que esta inversión agrandó en más de un 200 % la producción que venía trabajando en años anteriores.

La planta nueva al poco tiempo de su puesta en marcha comenzó a presentar las primeras fallas, centrándose éstas principalmente en los harneros vibratorios de descarga del molino SAG, equipos que por las condiciones de operación presentan fallas catastróficas, las que se repiten con una frecuencia alta para una planta con este nivel de tecnología. Al presentarse de forma tan repetitivas las fallas con el pasar del tiempo estos equipos se convirtieron en el cuello de botella para la producción, es decir, en donde se concentra la principal fuente de falla que provoca el estancamiento de la planta para poder aumentar el flujo de producción. También se les llama cuello de botella a los equipos que tienen menor índice de confiabilidad.

El problema que ha provocado este tipo de equipos vibratorios, no tan solo para Anglo American, sino que también para la mayoría de las mineras con índices de producción similares, ha llevado a múltiples estudios para comprender las fallas de estos equipos, siendo las simulaciones utilizando el método elementos finitos una de las principales. Este tipo de metodología se aplica con softwares especializados, en los cuales se estudia el comportamiento de cualquier estructura en función de las condiciones de contorno que se le vayan incorporando.

Las condiciones de contorno entre más cercana a la realidad sean mejor serán los resultados, por lo que hacer hincapié en obtener estos valores es de vital importancia. Una de las condiciones de contorno que más dificultad presenta para el estudio es la que proyecta el flujo de mineral que pasa a través del harnero vibratorio, es por esto que se hace importante para el análisis encontrar un modelo que represente este tipo de cargas.

El programa de simulación de elementos discretos, ROCKY, responde a las inquietudes que se mencionan en el párrafo anterior, debido a que trabaja con sólidos a granel y además puede analizar cómo se comportan las cargas generadas de estas partículas en cualquier tipo de estructura. Al poder extraer esta información y utilizarla como condición de contorno se puede idealizar de mejor manera el problema de los harneros.

La forma en que se resolverá este problema será mediante el acoplamiento de dos softwares de modelación numérica, uno de elementos finitos y otro de elementos discretos, en donde a través del estudio del mineral y las cargas que este provoca en la estructura, la vibración que ejercen los excitadores y el amortiguamiento de los resortes, se podrá estudiar cómo se comporta el harnero en sus condiciones de operación ideales.

1.2 Objetivos

Los harneros de descarga de los molinos SAG son equipos que presentan fallas estructurales de manera recurrente, generando innumerables pérdidas en el área de mantenimiento y producción. Sin embargo, tras numerosos estudios no se ha logrado determinar el origen de estas fallas, siendo la fatiga la más estudiada.

Es por ello que en este trabajo como principales objetivos se estudiará y modelará el comportamiento de los harneros Haver & Boecker de descarga que operan en los molinos SAG, a través de la complementación de dos softwares, uno de elementos finitos y otro de elementos discretos, ANSYS y Rocky respectivamente, con el fin de obtener resultados cercanos a la práctica y poder entender el origen de sus fallas.

Los principales objetivos a desarrollar son los siguientes:

- Comprender el principio de funcionamiento del harnero R-MD, sus principales componentes, piezas y elementos estructurales y Análisis de condiciones de operación.
- Caracterizar el tipo de falla presente en el equipo, materiales involucrados, datos de alimentación y reparación. Estudio de los informes de falla elaborados, análisis del estado del arte de las fallas documentadas en equipos de similares características.
- Elaborar modelo CAD apropiado del harnero, para los posteriores análisis con softwares Rocky y ANSYS.
- Desarrollar simulación y calibración de los resultados numéricos.
- Analizar resultados, propiedades de solución y metodología utilizada.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Antecedentes generales de la investigación

La gran minería representa para Chile una importante fuente de trabajo y desarrollo tecnológico, por lo que cualquier problema que exista en éstas se puede utilizar para desarrollar algún tipo de investigación. La mayoría de éstas son para mejoras en la producción y para optimizar los recursos.

Por lo mencionado en el párrafo anterior en este informe se desarrollará un estudio enfocado principalmente en la utilización de los métodos de elementos finitos y elementos discretos, aplicado a un problema a través de dos softwares de análisis, y se establecerán los parámetros necesarios para comprender las fallas que se producen éstos.

2.2 Alcance de la investigación

La investigación desarrollada en este estudio pretende generar una base teórica que permita saber cuáles son las principales fallas que se presentan en la estructura para un equipo en particular. Es por ello que en esta investigación se estudiarán los aspectos teóricos básicos del método de elementos finitos y elementos discretos, y así poder aplicarlos al estudio en equipos a través del uso de dos softwares especializados para los casos estáticos y dinámicos.

La utilización de estos softwares de modelación y análisis de elementos finitos permite que el alumno estudie de manera virtual estos problemas, y así pueda entender directamente el comportamiento estructural. Además, estas herramientas de trabajo ayudan a simplificar los cálculos matemáticos complejos, que a mano alzada podrían ser casi imposibles.

2.3 Datos generales de la empresa

En este ítem se mostrará parte de la historia de la empresa minera, en donde se extrajo este problema de estudio. Se hablará además de su historia de su ubicación y sus procesos.

2.3.1 Nombre e Historia

Anglo American es una compañía minera global con sede en Londres, Reino Unido, gran productor de diamantes, cobre, níquel, hierro mineral, carbón térmico y metalúrgico, y el mayor productor mundial de platino, con alrededor del 40% de la producción mundial. Tiene operaciones en África, Asia, Australasia, Europa, Norteamérica y Sudamérica. En Sudamérica la empresa se encuentra asentada principalmente en Brasil, Perú y en Chile desde el 2002.

En Chile, la empresa posee el 50,1 % de las minas Los Bronces y El Soldado y la fundición Chagres, la que gestiona y opera. También tiene una participación del 44 % en la mina Collahuasi. En Perú, tiene un interés del 81,9 % en el proyecto Quellaveco, ubicado en el sur del país. Es la segunda empresa minera privada más grande de Chile con una participación de mercado de un 4.5% del total de la industria mundial del cobre. El primer lugar lo ocupa BHP Billiton con una participación de mercado del 15%. Sus principales competidores son: BHP Billiton, Codelco, Río Tinto y Xstrata. Esta empresa explora, explota, procesa y comercializa cobre en forma de cátodos, ánodos, y blíster, así como cobre y molibdeno contenido en concentrados y ácido sulfúricos.

La prioridad de la empresa, en todas y cada una de las operaciones de cobre, es crear un valor duradero para las comunidades donde se insertan. Con esto la compañía ganó el prestigioso premio “Más para Chile” por su programa de desarrollo de pymes “Emerge”, que ha brindado apoyo a más de 50.000 puestos de trabajo en pequeñas y medianas empresas.

Cuenta con cinco Divisiones productivas en cuatro regiones del país y una oficina central en Santiago. Las Divisiones son: Mantos Blancos (Antofagasta), Mantoverde (Copiapó), Los Bronces (Santiago), El Soldado (Nogales) y Chagres (Catemu), que es la fundición de Anglo American. Además, es dueña del 44% de Collahuasi, ver Figura 1.



Figura 1: Divisiones Anglo American Chile.

2.3.2 Ubicación y Accesos

La división Los Bronces, tal como se aprecia en la Figura 2, se encuentra ubicada en la Región Metropolitana, a 65 kilómetros de Santiago y a 3.500 metros sobre el nivel del mar. Dado que ésta se encuentra ubicada en el sector oriente de la capital, más bien en la comuna de las Condes, su acceso queda más expedito por la autopista costanera norte llegando así al ingreso del camino a farellones en el sector de las puertas, luego de esto se sigue el ascenso por esta ruta única de camino a farellones en donde en el tramo final se debe desviar hacia la ruta La Diputada en la cual se controla el ingreso en el sector de la Hermita para todo vehículo. Cabe destacar que para trabajadores de la empresa como para contratistas existen buses de acercamiento de la marca TANDEM los cuales son los únicos autorizados a subir esto por políticas de transporte y descongestión de la empresa.

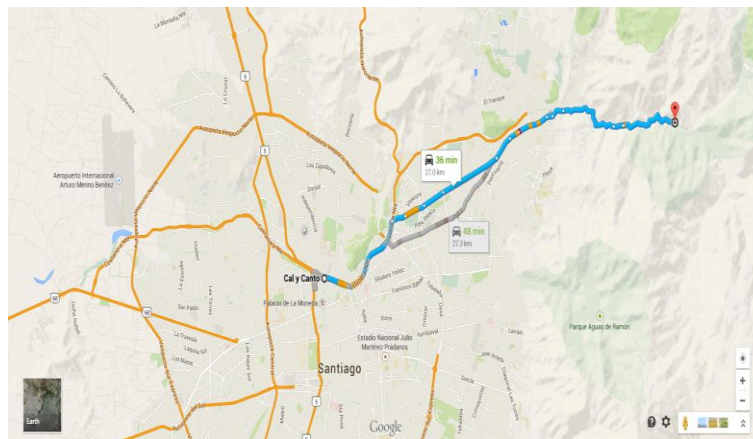


Figura 2: Mapa Santiago Centro a ingreso a ruta Los Bronces.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

2.3.3 Materia Prima, origen y cantidad

La materia prima que se extrae en esta empresa minera es el mineral de calcopirita el cual proporciona aproximadamente la mitad de mineral de cobre del mundo. En general, los minerales de sulfuro proporcionan cobre, como la covelita, bornita y calcosina. También lo hacen los carbonatos, como la azurita y la malaquita, y el óxido llamado cuprita.

La producción de Los Bronces fue de 416.300 toneladas de cobre fino en 2013, un 14% más que en 2012, debido a un mejoramiento en su desempeño operacional. La planta de confluencia de esta producción total ve pasar el 70% de todo este producto bruto (35.900.000 toneladas).

La mina perteneciente a la División Los Bronces que se observa en la Figura 3, es de cobre y molibdeno que se explota a rajo abierto. El mineral que se extrae es molido y transportado por un minero-ducto de 56 kilómetros a la planta de flotación Las Tórtolas, en la que se produce cobre y molibdeno contenido en concentrados. Además, en la División se produce cobre en cátodos vía proceso hidro-metalúrgico (lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención) (1).

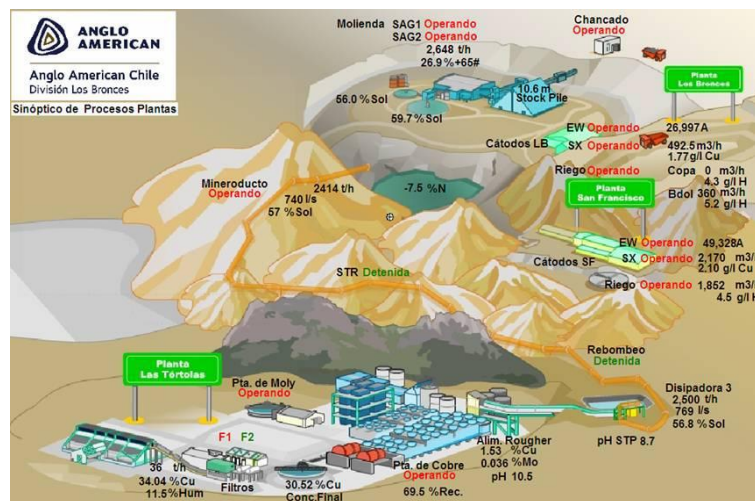


Figura 3: Esquema División Los Bronces.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

2.3.4 Productos elaborados, aceptación y estadísticas de producción

En 2014 produjo 404.511 toneladas de cobre fino, entre cátodos de alta pureza y cobre contenido en concentrado, además de 3.811 toneladas de molibdeno contenido en concentrado.

Los principales productos que se extraen en la división “Los Bronces”, ver Tabla 1, son:

- Concentrado de cobre
- Concentrado de molibdeno

Tabla 1: Descripción de la producción.

LOS BRONCES	2013	2012	2011	2010	2009
Producción total de cobre (ton)	416.300	365.214	221.762	221.410	238.423
Cobre contenido en concentrado (ton)	378.000	321.971	178.748	174.699	189.999
Cobre en cátodos (ton)	37.700	40.741	38.377	42.569	45.490
Molibdeno (ton)	3.344	981	948	1.927	2.768

2.3.5 Proceso productivo

Luego de pasar por el chancador primario el mineral ROM (run of mine, mineral bruto de mina) baja por correas transportadoras en dirección de las plantas de molienda los bronces y la planta Confluencia para así depositarse en el stock pile de donde se va acumulando y pasando de forma gradual al molino SAG para después formar una pulpa con aproximadamente 55% de sólidos las que se van por un minero-ducto de más de 50 kilómetros a la planta de flotación Tórtolas ubicada en Colina. Esto se puede observar de mejor en la Figura 4.

Cada etapa del proceso productivo consiste a grandes rasgos en (1):

2.3.5.1 Mina

Mina a rajo abierto: Operación minera en la que el proceso extractivo se realiza en la superficie.

Perforación: El macizo rocoso se perfora en los puntos de mayor debilidad para la introducción de los explosivos.

Tronadura: Mediante una reacción físico-química se produce la explosión, donde los explosivos producen la fisura y fragmentación del macizo rocoso.

Extracción: El mineral tronado es removido con cargadores frontales y/o palas.

Carguío y transporte: Los minerales son cargados y transportados a distintos destinos según la calidad del mineral. El estéril (mineral de ley menor a 0,2%) se lleva a los botaderos. El mineral que tiene una ley mayor a 0,5% es tratado vía flotación, a diferencia del mineral de ley entre 0,3% y 0,5% que es depositado en pilas para ser tratado vía lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención.

2.3.5.2 Planta de Molienda

Chancado: El mineral es reducido de tamaño a 6 pulgadas.

Molienda: El material se reduce mediante molinos hasta conformar una pulpa de 55% sólidos, con tamaños de partícula de 180 micrones.

Minero-ducto: El mineral molido es enviado en forma hidráulica a través de un minero-ducto de 56 kilómetros hasta la planta de flotación Las Tórtolas.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

2.3.5.3 Planta de Flotación

Flotación: Proceso físico-químico que permite la separación de los minerales sulfurados de cobre y otros elementos como el molibdeno, del resto de los minerales que componen la mayor parte de la roca original. La pulpa proveniente de la molienda, que tiene ya incorporados los reactivos necesarios para la flotación, se introduce en unos receptáculos como piscinas, llamados celdas de flotación. Estas celdas son espacios cerrados donde se realiza la concentración del cobre mediante el burbujeo de aire en una solución. Las partículas de cobre son hidrofóbicas y se adhieren a las burbujas de aire y suben a la superficie desde donde rebasan a canaletas que se encuentran a los costados.

Espesamiento y filtrado: Mediante el espesamiento del material y uso de grandes filtros, el concentrado es secado hasta reducir su humedad a un 9%.

Cobre contenido en concentrado: Producto minero obtenido a partir de la flotación del mineral de cobre. Sus principales componentes son cobre, azufre y hierro. El concentrado se puede ir al mercado donde es comercializado, o puede ser enviado a la división Chagres, donde se almacena para luego ser fundido y transformado en ánodos de cobre.

Depósito de relaves: Un batería de hidro-ciclones clasifica la pulpa de relave final. La parte gruesa de este material es utilizada para la construcción del muro del depósito de relaves y la parte final, se acumula en su interior. El agua usada se recicla para su reutilización en el proceso.

2.3.5.4 Planta de Cátodos

Los cátodos son producidos a partir del mineral de más baja ley, el cual es depositado en los botaderos.

Formación de pilas: El mineral es acumulado sobre una membrana impermeable en montículos (pilas) de varias toneladas.

Lixiviación: Se riega el mineral con una solución preparada (generalmente ácido sulfúrico o sulfato férrico), que percola a través de toda la pila, luego se recolectan los líquidos enriquecidos que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral.

Extracción por solventes: El cobre es transferido desde el área de lixiviación a una solución compuesta por diluyente y extractante. La solución captura los iones de cobre en forma selectiva. De esta reacción se obtiene, por un lado, una solución empobrecida en cobre que se denomina refino, y por otro lado el orgánico cargado. Este orgánico es tratado para mejorar la concentración de cobre, produciendo el electrolito.

Electro-obtención: El electrolito es llevado a la nave de electro-obtención, que contiene celdas donde está la solución y que alternan un ánodo y un cátodo, que están conectadas conformando un circuito por el que se hace transitar corriente eléctrica. El cobre en solución es atraído por el polo negativo, pegándose partícula por partícula en la superficie del cátodo en forma metálica

2.3.6 Diagrama de flujo de producción

En la Figura 4 se muestra una breve descripción del proceso de producción de esta minera en donde se puede apreciar a continuación del molino SAG, la figura del harnero.

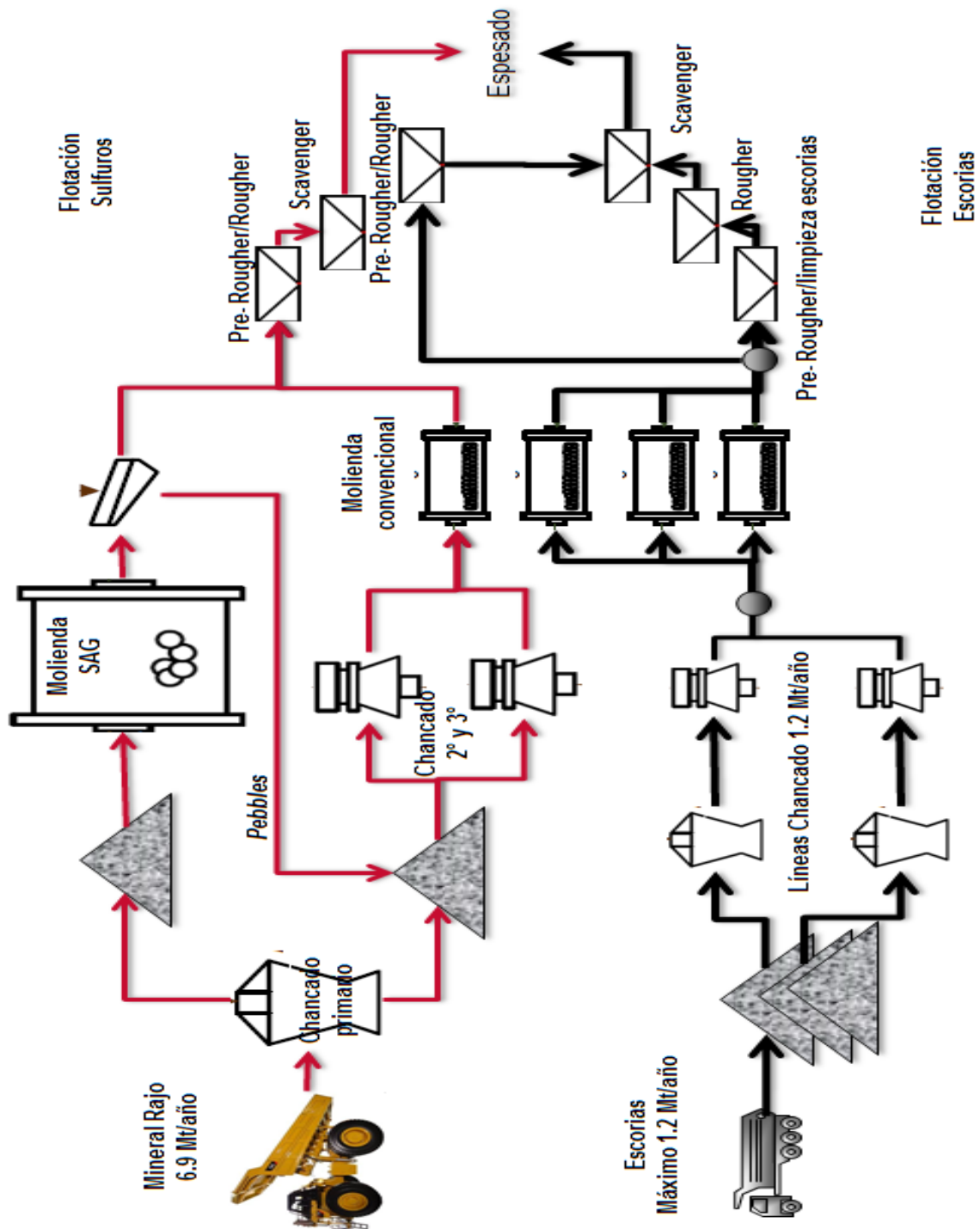


Figura 4: Diagrama de flujo chancado y molienda.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE LA CLASIFICACIÓN A TRAVÉS DE HARNEROS

3.1 Clasificación de Minerales

Luego de extraer las rocas en los yacimientos de mineral, y pasar por el chancador primario se deben transportar a los molinos, para así ir reduciendo su tamaño hasta alcanzar un volumen más pequeño. Para no ir procesando de nuevo las rocas más finas y solo re-procesar las que no cumplen con el tamaño esperado se utiliza un sistema de clasificación.

El principio empleado en la clasificación para producir la separación, depende de la magnitud de los tamaños de las partículas que componen el sistema. Cuando se trata de tamaños gruesos, como este caso, la separación se produce por el impedimento físico de una superficie provista de aberturas, la que retiene sobre ella aquellas partículas con tamaños mayores que su abertura; en este caso la operación se denomina “Harneado”.

3.1.1 Clasificación de minerales a través de harneros

Los harneros son equipos de diferentes tamaños que principalmente funcionan con una red de aberturas que permite seleccionar a través éstas los tamaños esperados para cualquier sólido a granel.

Los minerales, como se procesan en grandes cantidades, hacen que el diseño de estos equipos de clasificación sea un desafío para las empresas proveedoras, debido a que tienen que ser resistentes a las duras condiciones de operación a las que se someterán.

3.1.1.1 Estratificación

Una vez colocado el material sobre la plancha de impacto y esparcido a todo el ancho de ésta, las partículas comienzan a desplazarse hacia adelante debido al movimiento del harnero. En este instante el material hace su primer contacto con la malla y se produce el fenómeno de estratificación, que consiste en la formación de un lecho, en el cual las partículas grandes ascienden mientras las pequeñas pasan por los espacios entre ellas, acercándose a la superficie de la malla, para ser aceptadas o rechazadas por las aberturas de ésta. La estratificación de partículas siempre ocurre en la zona del primer contacto del material con la superficie de la malla y continúa repitiéndose una y otra vez hasta que las partículas pasan por las aberturas o son descargadas al final de la malla. Sin este fenómeno, el proceso de separación o clasificación no podría ocurrir.

Numerosos factores tanto relacionados con el material o con el harnero afectan la tasa de estratificación (2), entre los cuales destacan:

- Mayor estratificación con el aumento de la diferencia de tamaño de partículas.
- La humedad superficial en el mineral disminuye la estratificación.
- A mayor flujo de alimentación la estratificación disminuye.
- A mayor altura del lecho o camada de mineral la estratificación disminuye.
- A mayor ángulo de inclinación del harnero la estratificación disminuye.
- A mayor amplitud y frecuencia de vibración la estratificación aumenta.

3.1.1.2 Clasificación

Una vez ocurrido el proceso de estratificación, existen dos etapas en las cuales las partículas finas se separan de las partículas gruesas.

La primera consiste en la clasificación por saturación y ocurre en el primer tercio del harnero, en esta etapa las superficies de las mallas se saturan con partículas finas, todas tratando de pasar por las aberturas en el mismo instante (3).

La segunda etapa es conocida como Clasificación por Repetición, pues al desplazarse por la superficie de la malla, las partículas tratan una y otra vez de pasar por las aberturas, repitiéndose este proceso de prueba y error hasta que pasan o son descargadas al final de la malla (en la Figura 5 y en la Figura 6 se puede apreciar el fenómeno de estratificación y las etapas de clasificación por saturación y por repetición respectivamente). En la Figura 6 se puede apreciar que el harneo por saturación ocurre en el primer tercio de la malla, que es donde todo el volumen de material pasa sobre la malla y donde la mayor cantidad de material pasa a través de las aberturas, convirtiendo a esta zona en la de mayor abrasión y desgaste (3).

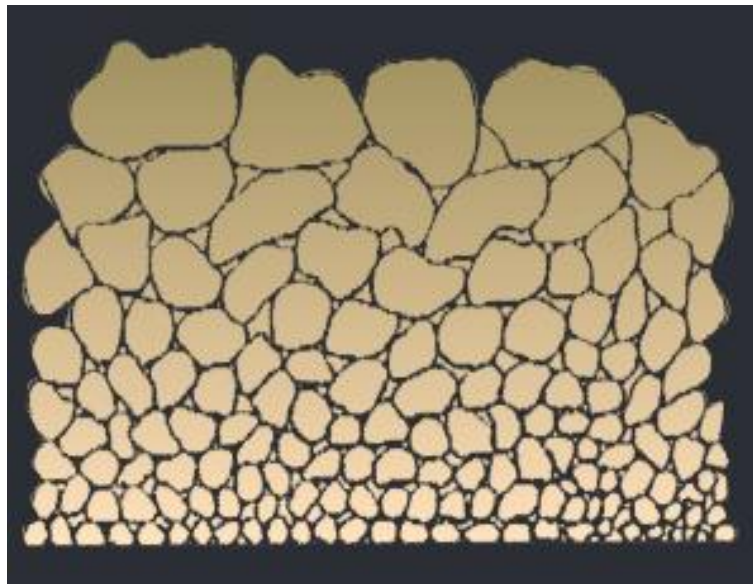


Figura 5: Estratificación del material.

Para que el fenómeno de estratificación ocurra, es necesario controlar el espesor de la camada de material sobre la malla. Si es muy delgada, las partículas finas y las gruesas son lanzadas al aire, perdiendo la oportunidad de que las finas hagan contacto con la malla y pasen por las aberturas. Si la camada es muy gruesa, entonces las partículas finas son desplazadas por las gruesas y no ocurre una estratificación completa (3).

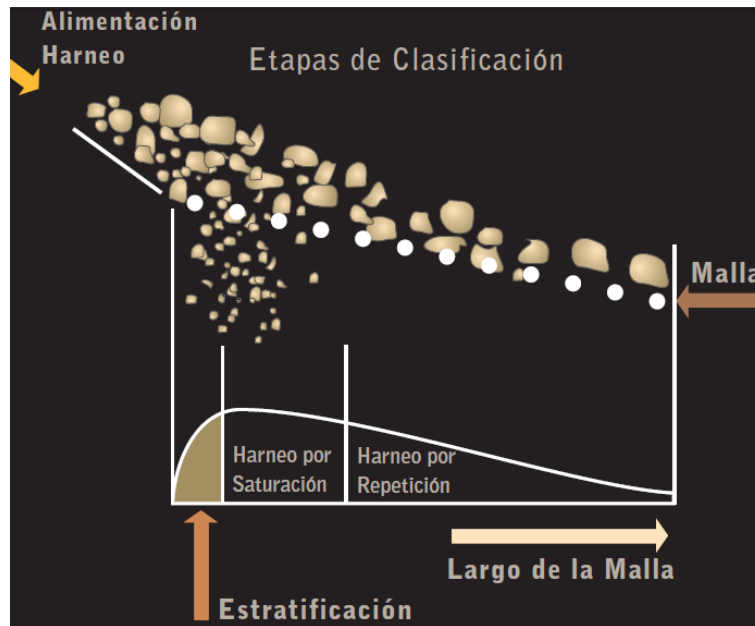


Figura 6: Etapas de clasificación

En la etapa de harneo por repetición el objetivo es brindar a las partículas más oportunidades de pasar por las aberturas, siendo ésta la etapa final de clasificación. En ella, el mayor problema es la velocidad que toman las partículas debido al ángulo de operación del harnero, lo cual reduce el tiempo de exposición a las aberturas y las probabilidades de pasar a través de éstas (3).

3.2 Descripción de los Harneros

Los harneros se diseñan para cubrir varias funciones y capacidades de producción, por lo que existen varios tipos de éstos que son utilizados para diferentes procesos. Los harneros que se estudiarán en este capítulo serán netamente aquellos que están destinados a la minería o que están diseñados para capacidades grandes de producción.

3.2.1 Tipos de Harneros

En la industria básicamente, existen 2 tipos de harneros:

- Harneros Estáticos.
- Harneros Vibratorios.

Los Harneros Estáticos se utilizan principalmente para separar material mayor a 150 mm o cuando no se necesita realizar una clasificación muy certera. El más usado es el que se conoce como grizzly, que consiste en perfiles de acero espaciados -150 mm o más- e inclinados a más de 25°. Normalmente, el material se desliza por un chute que alimenta al grizzly. Al pasar sobre las barras de éste, las partículas inferiores a la abertura entre las barras pasan, mientras que las mayores se deslizan sobre los perfiles y llegan a una zona de almacenamiento o directamente al chancador (en la Figura 7 se puede apreciar un grizzly típico, muy fácil de construir y de operar).



Figura 7: Grizzly típico.

Los Harneros Vibratorios se caracterizan por tener un sistema de accionamiento que cumple dos objetivos: 1) estratificar el material que llega a la malla, acercando las partículas finas a la superficie de ésta, y 2) transportar el material sobre la superficie de la malla para llevar hacia el punto de descarga a aquellas partículas que fueron rechazadas (3).

En la Figura 8, se pueden apreciar los componentes básicos de un harnero vibratorio, incluyendo el sistema generador de movimiento para estratificar y transportar el material.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Además, se puede apreciar la plancha de impacto ubicada antes de la malla del primer deck, que busca evitar daños a esta malla (3).



Figura 8: Harnero vibratorio y sus elementos.

Para desplazar el material sobre la superficie de las mallas y permitir que éste pase a través de las aberturas, los generadores de movimiento de los harneros vibratorios pueden producir un movimiento elíptico o un movimiento puramente lineal. En ambos casos, el material es desplazado en línea recta y nunca hacia los lados; por lo cual éstos deben ser alimentados siempre a todo el ancho de la plancha de impacto ubicada antes de la malla (3).

En la mayoría de los harneros vibratorios el movimiento es generado por un sistema con contrapesos o ejes excéntricos accionados por un motor eléctrico, ya sea con acople directo o con un sistema de transmisión de potencia que utiliza correas en V. La mayoría de los generadores de movimiento permiten ajustar la amplitud y la frecuencia del harnero, de manera que el usuario pueda adaptar los parámetros operacionales del harnero a las características físicas del material (3).

Los harneros vibratorios pueden ser operados en forma horizontal o inclinados, dependiendo de cuáles sean los objetivos de la aplicación. Los harneros se instalan inclinados para agilizar el paso del material sobre tamaño hacia el punto de descarga. Pero debido a la inclinación del harnero el material tiende a tomar velocidad, reduciendo el tiempo de exposición de las partículas a las aberturas, lo que a su vez reduce las probabilidades de las partículas de pasar por éstas (3).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

3.2.2 Tipos de Harneros Vibratorios

En el mercado existen diversos tipos de harneros vibratorios, los cuales se pueden agrupar en dos categorías, harneros planos y harneros de ángulo variable. En el primero el ángulo de inclinación puede variar desde 0 a 45 grados, según los requerimientos de harneado. Para el segundo tipo de harnero la inclinación varía a lo largo de éste, dejando una zona de alta pendiente (alimentación) que puede llegar a los 35 grados y una zona baja que puede ser horizontal (descarga). El movimiento que realiza el harnero se efectúa con un ángulo de inclinación respecto al plano del piso, lo que permite que el mineral descienda o avance desde la zona de carga hasta la de descarga (4).

3.2.2.1 Harneros planos

Harnero horizontal

El movimiento del material solo se desarrolla por la vibración del sistema. La vibración del sistema es generada por la rotación de dos o tres ejes con masas excéntricas, en el primer caso ambos ejes giran en sentidos opuestos y están montados de tal manera que la línea de acción entre ellos pase por el centro de gravedad del montaje del harnero formando un movimiento vibratorio lineal, en el segundo caso el movimiento es generado por un eje central que activa el movimiento de los otros dos ejes obteniendo un movimiento de forma elíptica como se muestra en la Figura 9 (4).

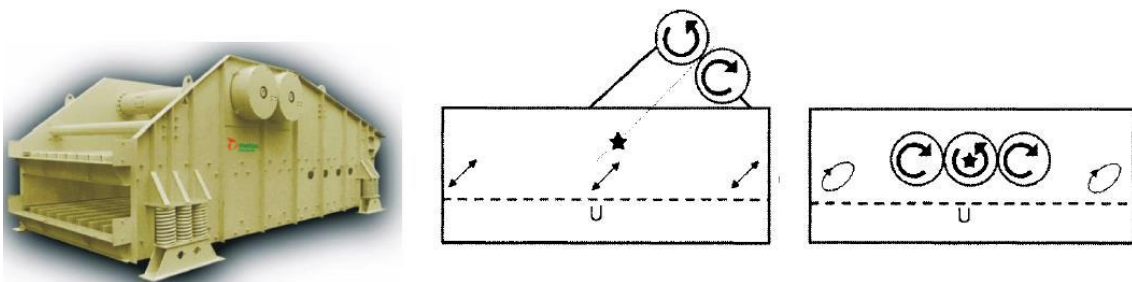


Figura 9: Harnero horizontal.

La precisión en separación de tamaño de partículas en los harneros horizontales es superior que los harneros inclinados, sin embargo, debido a que la fuerza de gravedad no ayuda al transporte de mineral a lo largo de la superficie de mallas, tienen una menor capacidad de carga (4).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Los harneros horizontales se usan en aplicaciones donde la eficiencia de separación es crítica como es el caso de la descarga en el molino SAG, por lo que este trabajo se enfoca en este tipo de harneros (4).

Harnero de inclinación simple

Los harneros de inclinación simple trabajan bajo un movimiento vibratorio de tipo circular producido por un eje excéntrico el cual se ubica en el centro de gravedad del equipo. A medida que se distancia verticalmente el eje motriz desde el centro de masa del equipo, se produce un movimiento elíptico en los extremos de alimentación y descarga del harnero, pero siempre manteniendo el movimiento circular en la parte central (4).

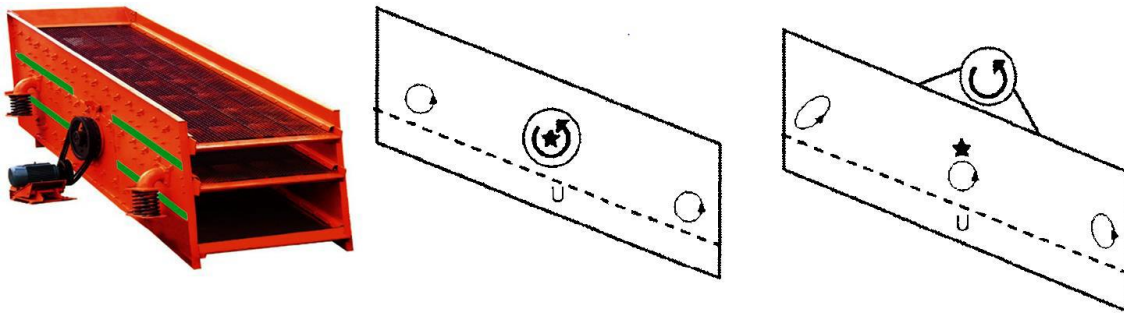


Figura 10: Harnero de inclinación simple.

Estos harneros se instalan inclinados para agilizar el paso de material de sobre tamaño hacia el punto de descarga, pero debido a la inclinación del equipo el material tiende a tomar velocidad reduciendo el tiempo de exposición de las partículas a las aberturas de la malla, lo que a su vez reduce las probabilidades de las partículas a pasar por éstas. Como se mencionó anteriormente este tipo de harneros tiene una mayor capacidad de carga, pero a su vez una disminuida eficiencia de separación (4).

El vibrador puede girar a favor o contra flujo, con el propósito de retener más mineral, si se pretende mejorar la clasificación.

3.2.2.2 Harnero de ángulo variable

Harnero de inclinación doble

Los harneros de inclinación doble son compactos, y poseen una gran capacidad de procesamiento por lo que su selectividad en relación a la eficiencia de harneado se ve disminuida (Figura 11).



Figura 11: Harnero de inclinación doble.

Se compone de dos ejes excéntricos en la parte inferior, los cuales giran en sentidos opuestos provocando un movimiento de forma lineal.

Harnero de inclinación triple

Los harneros de inclinación triple, como se muestra en la Figura 12, presentan un movimiento de forma circular en el centro y de forma elíptica en los extremos debido a que su eje de transmisión se encuentra sobre el centro de gravedad (4).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

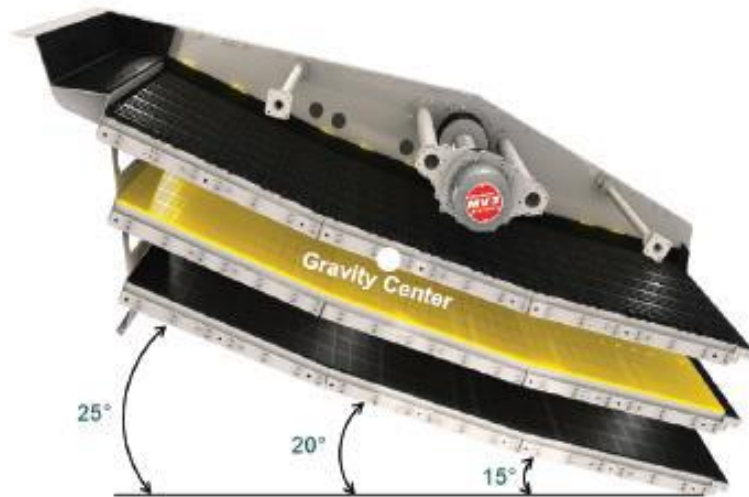


Figura 12: Harnero de inclinación triple.

La forma de trabajo de estos equipos combina capacidad con selectividad, debido a la poca variación del ángulo de inclinación. Esta manera de operar permite a estos harneros manejar grandes cargas y al mismo tiempo las partículas permanecen más tiempo en la superficie de harneado (4).

Harnero banana o inclinación múltiple

Los harneros de este tipo se utilizan en variadas aplicaciones para la clasificación de altos tonelajes de material, donde la eficiencia y la capacidad son de carácter importante (ver harnero en la Figura 13) (4).

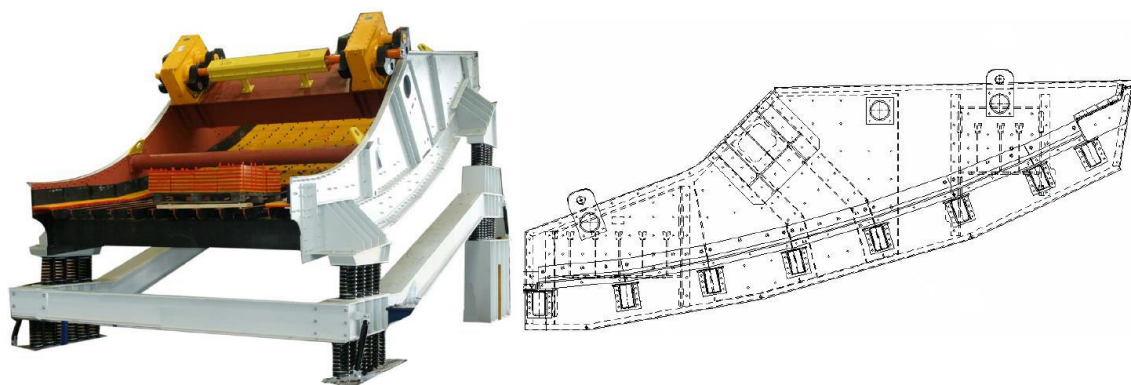


Figura 13: Harnero de banana o inclinación múltiple.

Se les llama harneros “banana”, debido a que la superficie de las mallas tiene un ángulo variable a lo largo de todo el equipo adoptando una curvatura semejante a la de un “plátano”.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Estos equipos tienen una pendiente variable de alrededor de 40 a 30 grados en el extremo de alimentación la que se va reduciendo hasta llegar entre 0 a 15 grados en el extremo de descarga, en reducciones paulatinas de 3,5 a 5 grados, y son diseñados generalmente con sistemas vibradores de carrera lineal (4).

Las secciones empinadas en la alimentación hacen que el mineral fluya rápidamente, permitiendo que la selección se produzca de manera más rápida que dentro de un harnero convencional. Hacia el extremo de descarga del harnero la pendiente disminuye lo que hace ralentizar el flujo de material restante, permitiendo una detección más eficiente (ver Figura 13).

La capacidad de los harneros banana es significativamente mayor y puede ser de hasta tres o cuatro veces la de un harnero vibratorio convencional (4).

Muy demandada actualmente por el mercado de minería, la criba Banana tiene como característica principal la utilización de varias inclinaciones del deck (malla de clasificación), que resulta en mayor capacidad y velocidad de transporte, resultando en una altura menor de la camada de mineral, facilitando la aproximación de los finos en las aberturas.

3.3 Descripción del movimiento de los Harneros Vibratorios

El movimiento de un harnero vibratorio es generado por un sistema con contrapesos conectados a un eje y accionados por un motor eléctrico, ya sea por un acople directo o mediante un sistema de poleas con correas en V (3). La mayoría de los sistemas motrices permite adaptar la amplitud y la frecuencia de trabajo del harnero para ajustar los parámetros operacionales según las necesidades del usuario. Generalmente la frecuencia de operación varía entre 700[rpm] y 1000[rpm] con una amplitud entre 1,5[mm] y 6[mm] (4).

El sistema de accionamiento de los harneros vibratorios tiene dos objetivos:

- Estratificar el material que llega a la malla, acercando las partículas finas a la superficie de ésta.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

- Transportar el mineral sobre la superficie de la malla para llevar hacia el punto de descarga aquellas partículas que fueron rechazadas.

El sistema vibratorio de los harneros puede generar tres tipos de movimiento, los que se pueden clasificar en circular, elíptico y lineal, como se muestra en la Figura 14 (4).

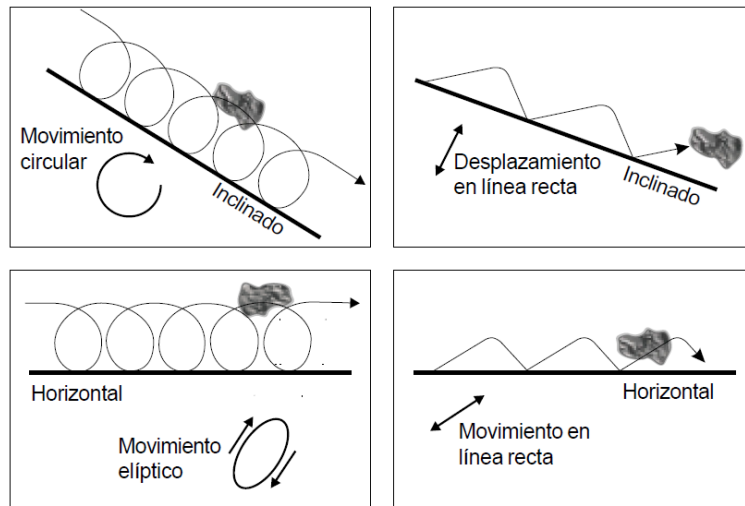


Figura 14: Tipos de movimientos de harneros vibratorios.

3.3.1.1 Movimiento circular:

Se produce cuando el eje de un harnero de tipo inclinado se encuentra precisamente en el centro de gravedad del equipo, de vez en cuando el eje con excitadores está instalado por encima o por debajo del centro de gravedad.

3.3.1.2 Movimiento Lineal:

El movimiento de vibración lineal se induce mediante el uso de dos ejes que giran en sentidos opuestos, la línea de movimiento forma un ángulo de 30 a 60 grados con la horizontal, este movimiento es típicamente usado en harneros horizontales y harneros de inclinación múltiple o tipo banana.

3.3.1.3 Movimiento elíptico:

Se produce cuando existen tres ejes, generalmente se usa en harneros horizontales y harneros banana con la finalidad de obtener un beneficio de eficiencia.

3.4 Descripción del Harnero Vibratorio a estudiar

El equipo utilizado para la investigación es un harnero de descarga SAG de marca Haver & Boecker y modelo R-MD. Éste es un harnero de tipo horizontal con una inclinación simple, cercana a los 6 grados con respecto a la horizontal, y de una capacidad de proceso de 5000 t/h.

3.4.1 Empresa

Haver & Boecker Latinoamericana Máquinas (HBL), ver Figura 15, es una empresa brasileña de capital alemán, perteneciente al grupo HAVER, subsidiaria de Haver & Boecker Drahtweberai und Maschinenfabrik, con sede en la ciudad de Oelde, Región de Westfalia, Alemania (5).

La organización técnica y comercial está dividida en tres sectores diferentes:

- División Cemento, Cal, Yeso y Morteros
- División Química y Alimentos
- División Minería
- División de Piezas y Servicios

Cada uno de estos sectores cuenta con especialistas en las áreas respectivas que permiten ofrecer soluciones completas y a la medida para atender a las necesidades específicas de los diferentes mercados (5).

Los sectores cuentan aún con la asistencia del sector de automatización que complementa la atención, a través de productos de tecnología avanzada, tales como: sistema de supervisión,

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

automatización completa de softwares para adquisición de datos (pesos y estadísticas diversas) (5).



Figura 15: Empresa Haver & Boecker Andina.

3.4.2 Descripción General

Los harneros vibradores R-MD son de construcciones robusta generalmente horizontales siendo más indicadas para el desagüe del material retenido. Se utilizan harneros con inclinaciones en algunas aplicaciones con una proporción muy elevada de material fino y principalmente para aquellas donde no hay una preclasificación por medo de un trommel, proporcionando mayor capacidad específica de harneado. Debido a su gran tamaño, estos equipos son accionados por medio de excitadores y pueden alcanzar una producción de hasta 5000 t/h (6).

Estos harneros de gran tamaño tienen el objetivo de sacar el material fino para la continuidad del proceso, siendo que el material grueso sigue para el chancador de pebbles (6).



Figura 16: Harnero vibratorio Haver&Boecker.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Los equipos de este tipo son diseñados para la clasificación de cualquier material a granel (minerales y agregados), los cuales pueden ser delgados, medios o gruesos, y con cribado húmedo o seco (ver Figura 16) (5).

Las principales características de estos harneros de clasificación son:

- Accionamiento libre circular o circular excéntrico o lineal, dependiendo de la necesidad;
- Amplitud variable o constantes, respectivamente;
- Frecuencia ajustable;
- Cribado seco o húmedo;
- Varios tamaños disponibles de acuerdo con el diseño del cliente;
- Cuando se diseña para productos polvorientos, éste está totalmente blindado, para captar el polvo;

3.4.3 Componentes del Harnero

El harnero vibratorio R-MD se encuentra compuesto por una estructura de acero rígida que se encuentra asentada en una cama de resortes y que es impulsada por excitadores, los cuales brinda el movimiento oscilatorio necesario para que el mineral descienda a través del harnero y así sea seleccionado.

3.4.3.1 Estructura principal

La estructura principal es la base más importante del harnero, ya que se encuentra compuesta por la mayoría de las piezas de este equipo, 63 en total sin contar pernos ni las mallas de harneado, y es la encargada de soportar todas las cargas que se generan en la operación (ver Figura 16).

Al ser una estructura de acero rígida se encuentra compuesta por diferentes tipos de este material de acuerdo a la función que utilice el componente, por ejemplo, las placas laterales que soportan toda la estructura son de un material estructural llamado P265GH.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

3.4.3.2 Cama de resortes

La cama de resortes que soporta la estructura del equipo tiene como principales funciones atenuar las cargas que se producen en la operación, cargas debido al material a granel que atraviesa al harnero, y ayudar al movimiento oscilatorio que inducen los excitadores. La forma en que se encuentran dispuestos los resortes es a través de cuatro grupos que divide en dos secciones la estructura, la inferior que es la encargada de fijar toda la estructura al piso de la planta y la superior que tiene la función principal del harneado.

La cama de resortes está formada por una cantidad de 24 muelles, alineados en 4 grupos de 7 en cada apoyo de la parte frontal y 5 ubicados en los soportes de la parte posterior (ver Figura 16). Cada uno de estos elementos de amortiguación son hechos de material SAE 5160 que presenta como principales propiedades ser un acero al alto carbono aleado al Cromo – Manganeso, de gran durabilidad en trabajo de compresión y tracción, buena templabilidad. Este acero es también conocido como acero muelle.

Las aplicaciones incluyen a parte de resortes también muelles, cuchillos, ballestas y resortes planos de cualquier espesor. Se emplea además en barras de torsión, resortes de suspensión de automóviles

3.4.3.3 Accionamiento por excitadores XL-CLASS

Los actuales mercados exigen cada vez tasas más altas de producción y mayores disponibilidades de los equipos. El uso de ejes limita el ancho del harnero debido a la deformación mecánica del mismo. La solución de The Haver screening Group está en la XL-CLASS accionada por excitadores. Soportado por un puente especialmente diseñado, la tecnología del excitador permite que el harnero sea construido con anchos mayores. El excitador es una unidad de accionamiento totalmente sellada, compuesta de ejes cortos apoyados por rodamientos muy cercanos (ver Figura 17). Una cuidadosa selección de tamaños de los rodamientos permite una larga vida útil de los mismos, ofreciendo una mayor disponibilidad de los harneros (6).

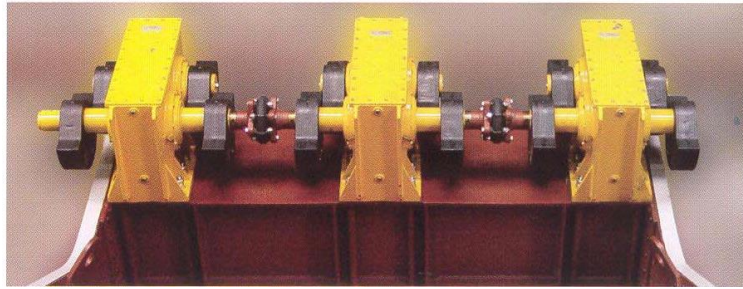


Figura 17: Accionamiento post excitadores XL-CLASS.

El accionamiento XL-CLASS presenta como características principales:

- Accionamiento lubricado por aceite, facilidad de intercambio de las unidades del excitador;
- Vida útil del rodamiento hasta 50.000 horas o más (dependiendo de la aplicación);
- Frecuencias ajustables a las velocidades de 750 has 1050 RPM;
- Facilidad de cambio de amplitud por adiciones de peso en los contrapesos del excitador;
- Permite variadas configuraciones de cubiertas de clasificación;
- Aberturas desde 16 hasta 20 pulgadas;
- Inclinación horizontal desde 0 hasta 15 grados;
- Ancho de 4300 mm (14 pies);
- Largo 11000 mm (36pies);

CAPÍTULO IV

CRITERIOS Y CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA EN ESTUDIO

4.1 Descripción del Problema

El proceso de molienda en la planta confluencia cuenta con 3 equipos que trabajan de forma simultánea, dos molinos de bolas y un molino SAG, de los cuales la mayor cantidad de mineral se procesa en este último, debido esto las fallas que se presenten en la línea de molienda del SAG pueden generar grandes pérdidas económicas para la empresa.

Por lo mencionado en el párrafo anterior se concentra la mayoría de la atención del departamento de mantenimiento en las tendencias que se presentan con respecto a las fallas y detenciones en la línea de molienda del SAG, en donde la mayoría de estas fallas se centra en el equipo que selecciona el mineral, que se encuentra ubicado a continuación de la salida del Trommel. Los equipos de selección funcionan bajo condiciones de operación agresivas que no les permiten tener un tiempo de buen funcionamiento que sea acorde a las expectativas de la empresa.

Los harneros vibratorios son equipos de gran tamaño, que funcionan accionados por excitadores los que les permiten tener un movimiento oscilatorio, para así poder deslizar por su cama de harneado el mineral, de esta forma ir seleccionado las partículas de menor tamaño y las que estén sobre la medida esperada pasen a la correa transportadora que está a continuación. Al estar estos equipos sometidos al movimiento oscilatorio producido por los excitadores, y además a los impactos originados por la caída del mineral, se producen fallas recurrentes en la estructura que hacen a este equipo el cuello de botella de la línea de molienda SAG.

Según la información recopilada en la empresa, con respecto a las fallas que presentaron los harneros vibratorios entre las fechas de enero del 2013 y enero del 2015, las detenciones de plantas, en tiempo de trabajo, ocasionadas por los harneros de descarga fueron cercanas a las 70 horas, las que son equivalentes al 0,5% de las horas totales trabajadas entre estos dos años. Esta cantidad de horas corresponde a un total de 28 detenciones, que equivale en términos simples a

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

un promedio de 2,5 horas por detención. Este número de detenciones y el tiempo promedio de éstas genera un horizonte de buen funcionamiento de 624 horas entre cada falla, es decir, que los harneros fallan en promedio cada 624 horas de trabajo, lo que en días equivaldría a 26, valor que está por debajo del mes de funcionamiento (un mes de 30 días tiene 720 horas) y de las pretensiones de una planta de este nivel.

4.2 Características del Problema

Los harneros vibratorios son equipos que trabajan bajo condiciones de operación agresivas, y debido a esto sus fallas son principalmente de carácter estructural. Los mantenimientos por este motivo se hacen recurrentes los que pueden ser correctivos o preventivos.

Los datos recopilados para este estudio se basaron en dos años de operación de la planta de molienda de Confluencia, entre las fechas enero del 2013 y enero del 2015. Dentro de esta información se identificaron las fallas ocasionadas por los harneros vibratorios las que fueron ordenadas por mes y cantidad como se puede observar en el siguiente gráfico.

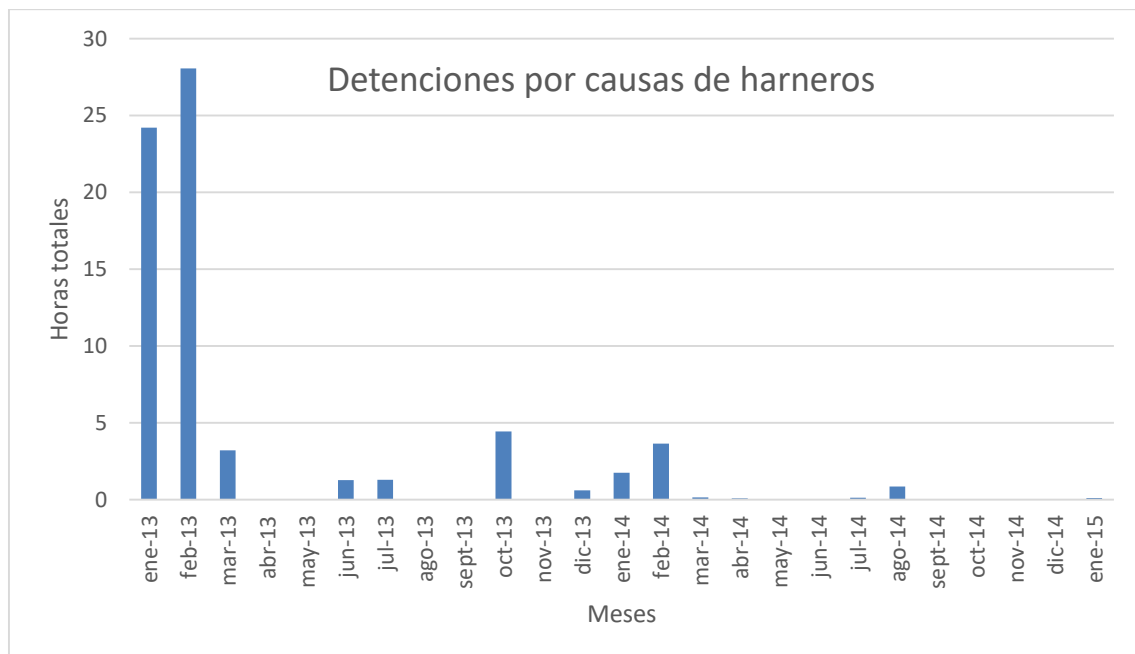


Gráfico 1: Detenciones a causa de fallas de harnero.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

El Gráfico 1 muestra las detenciones que tuvo la línea de producción del molino SAG, por motivos de fallas del harnero de descarga, y la cantidad de horas por cada mes. Dentro de este gráfico se encuentran contenidas 28 detenciones de la planta producto de fallas ocasionadas por los harneros. Estas detenciones significan para el departamento mantenimiento un tiempo total de no operación cercano a las 70 horas, lo que en tiempo promedio por cada detención resulta 2,5 horas.

De las 28 detenciones ocasionadas por los harneros de descarga SAG, solo el 10 % del total de éstas son de mantenimiento programado, y el 90% restantes de detenciones no programadas, debido a que estos equipos fallan de manera inesperadas para la planificación de los departamentos de mantenimiento. Las razones que provocaron esta cantidad de detenciones en su mayoría son de carácter estructural, debido a que este tipo representa el 32 % de las fallas no programadas, por sobre el 20% de las fallas eléctricas, el 12 % de las fallas operacionales, el 12% de las fallas motrices y el 24 % de otros tipos de falla.

Las fallas estructurales que se presentan en este tipo de equipos son específicamente en la zona lateral, donde se ubican las placas principales que sostienen la mayor cantidad de componentes que forman el cuerpo del harnero, y las vigas de descanso que están destinadas para izar la estructura. Según los informes del departamento de mantenimiento estas fallas se caracterizan por el agrietamiento y rupturas de estos componentes.

Las grietas que se producen principalmente en las placas laterales, se ubican en la zona bajo la viga madre como se puede ver en la Figura 18, en donde, en una ocasión una pequeña grieta se convirtió en una gran fractura, la que produjo una falla catastrófica para el equipo y la detención no esperada de la planta.



Figura 18: Fractura pieza principal interior.

La otra falla estructural que se presenta con mayor frecuencia es el agrietamiento de los extremos de las vigas de descanso, vigas ubicadas en la zona frontal y posterior del harnero. En la Figura 19 se puede observar los parches que se soldaron a uno de los extremos de estas vigas para evitar que las grietas produjesen rupturas durante la operación. Si bien las rupturas de estos componentes generan detenciones no programadas, éstas no representan una pérdida de tiempo tan significativa como las rupturas de las piezas principales.



Figura 19: Reparación viga de descanso.

En la Figura 20 se puede observar la disposición que tiene el equipo de harneado en la planta SAG, y con esto donde se encuentran ubicadas los componentes críticos de estos equipos, placas laterales y vigas de descanso. De esta forma se puede manejar que una falla de las placas principales por su compleja instalación representa un tiempo de detención de la planta considerable, debido a que esto implica el cambio del equipo, y ese tiempo está por sobre el promedio de 2,5.



Figura 20: Harnero en operación.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL ESTUDIO

Antes de comenzar las simulaciones en el programa ANSYS Workbench, se deben manejar ciertos parámetros operacionales correspondientes al proceso de molienda, debido a que el modelo de elementos finitos requiere el ingreso de las condiciones de contorno para realizar así los cálculos con mayor precisión.

Las condiciones de borde más importantes que predominan en la operación de los harneros vibratorios son aquellas fuerzas inducidas por la descarga del mineral y el movimiento de los excitadores, además de las reacciones de los resortes que sostienen este equipo.

5.1 Determinación de las fuerzas que generan el mineral

El mineral al momento de caer y deslizarse sobre el harnero genera cargas dinámicas que influyen en el comportamiento operacional de este equipo, por lo que es de carácter necesario realizar un estudio de estas fuerzas y proyectarlas de tal manera que sean utilizadas como condiciones de contorno en el modelo de elementos finitos.

5.1.1 Características del Flujo Másico del Mineral

Para obtener los flujos correspondientes a las cantidades de masas que se manejan en el proceso de harneado, es necesario observar el flujo de alimentación del harnero, flujo proveniente del chancador primario y que llega a la planta de molienda SAG a través de una correa transportadora, y con ello calcular las diferentes cantidades de mineral que se procesan en cada etapa. El cálculo del flujo de alimentación es equivalente al que descarga el molino SAG hacia el Trommel (ver Figura 21) menos el porcentaje de agua que se adhiere durante el proceso de molienda. Este flujo se calcula con algunos parámetros conocidos como el porcentaje de sólidos, el porcentaje de mineral grueso, etc. Ya que se conoce el porcentaje de finos, que selecciona el Trommel, se puede calcular el flujo de mineral que pasa a través del harnero.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

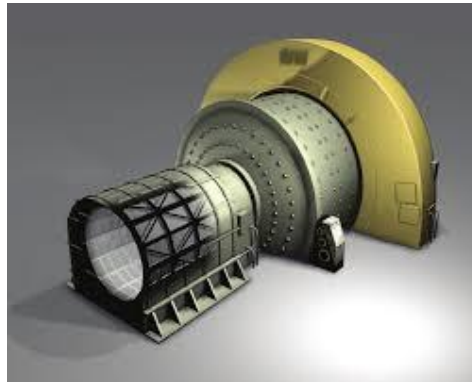


Figura 21: Imagen trommel molino SAG.

La manera de descarga directa desde el molino SAG al trommel genera que, del total del mineral que circula en este proceso de molienda, solo un porcentaje pase a través del harnero, esto se debe a que en general la función del trommel, al igual que el harnero, es seleccionar los minerales finos. En el paso del flujo del mineral a través del trommel se clasifican un 70 % del flujo del mineral saliente desde la descarga del molino SAG, debido a esto solo un 30 % del total del flujo de alimentación pasará a ser seleccionado por el harnero vibratorio.

Si bien los flujos de mineral son para este estudio los principales datos que se deben analizar por la relevancia que tienen al momento de la operación del harnero vibratorio, también existen algunas condiciones que son de igual categoría para la investigación, como la granulometría, tamaño del mineral en cada etapa del proceso, que es de vital importancia al momento de hacer el cálculo de elementos discretos, a través del programa de análisis ROCKY. La Figura 22 muestra una tabla con los porcentajes y tamaños granulométricos del mineral al momento de ser descargados desde el molino SAG ordenados por turnos.

GRANULOMETRIA					
	GRANUL. (Instantáneo)	T - A (00:00-08:00)	T - B (08:00-16:00)	T - C (16:00-24:00)	DIA (00:00-24:00)
CVB-007 P20	0.22 in	0.15 in	0.13 in	0.19 in	0.15 in
CVB-007 P50	1.21 in	0.82 in	0.69 in	2.58 in	0.79 in
CVB-007 P80	2.72 in	in	in	2.58 in	in
Granul. 1/2"	32.89 %	41.15 %	43.97 %	0.00 %	41.75 %
Granul. 1.5"	50.00 %	56.76 %	59.17 %	0.00 %	57.36 %
Granul. 2"	69.19 %	74.24 %	75.54 %	0.00 %	74.65 %
Granul. 4"	89.92 %	88.93 %	88.72 %	0.00 %	89.00 %
Granul. 5"	97.52 %	94.56 %	93.60 %	0.00 %	94.43 %

Figura 22: Tamaño y porcentaje de granulometría.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

5.1.2 Antecedentes para la obtención del flujo másico

El sistema de monitoreo en línea de la planta de molienda Confluencia permite a los operarios observar en tiempo real el comportamiento de los distintos equipos que funcionan dentro de la planta, es por ello que se puede saber en cada instante la cantidad de mineral que está ingresando al molino SAG. De acuerdo a los periodos observados se puede establecer algunos rasgos de la operación, teniendo en cuenta una cota máxima y una mínima para el flujo del mineral.

La manera de entender los procesos y poder extraer la información necesaria para el estudio del comportamiento del harnero vibratorio es diferenciando las tres etapas que éste tiene; la etapa de molienda; la etapa de seleccionado a través del Trommel y por último la selección a través del harnero vibratorio (ver Figura 23). En estas tres etapas se encuentran 3 diferentes tipos de flujos (m_1 , m_2 , m_3).

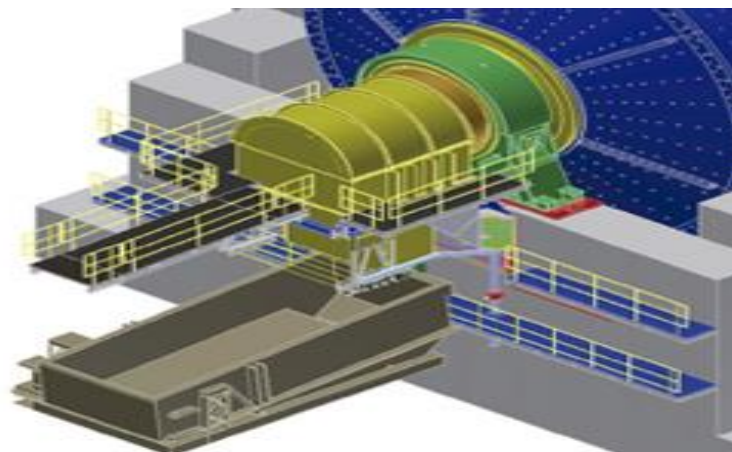


Figura 23: Descarga SAG a trommel-harnero.

5.1.3 Obtención de datos operacionales

En este ítem se desarrollará el estudio de las condiciones de operación, principalmente las fuerzas que se generan externas al equipo vibrador y las que se inducen por parte de su fuente motriz.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

5.1.3.1 Flujo de masa del harnero

La operación del harnero se considera como un proceso de flujo en estado estable, esto significa que la cantidad total de masa al interior del harnero no cambia con el tiempo, es decir la masa en los límites del sistema es siempre la misma.

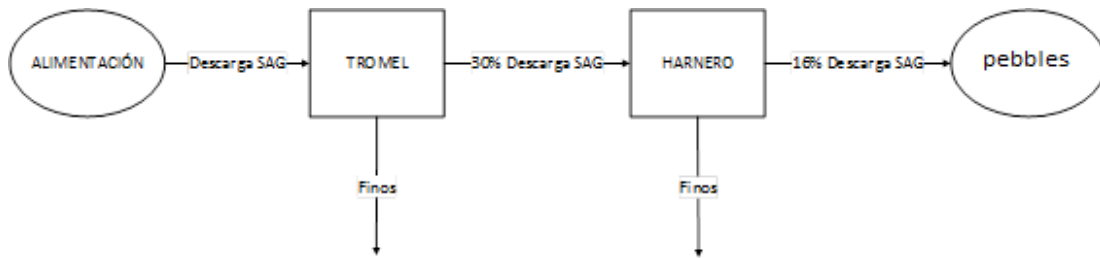


Figura 24: Diagrama de flujo másico.

Aplicando el principio de conservación de la masa se tiene,

$$\sum \dot{m}_{entrada} = \sum \dot{m}_{salida}$$

Donde $\dot{m} = \frac{dm}{dt}$ y representa el cambio de cantidad de masa en el tiempo.

La forma que ingresa el mineral al molino SAG es a través de la descarga del chute de traspaso que recibe su alimentación (m_1) de la correa transportadora CVB-007 (ver Figura 25), correa que transporta al mineral desde el chancador primario hasta la planta y sus respectivos molinos. Luego de ingresado el mineral al molino se produce el chancado semi-autógeno, se denominan así porque para moler el mineral emplean además del mismo mineral, bolas de acero, las que, al girar el contenido en el molino, las rocas y bolas caen y ayudan a moler el mismo mineral. Además, en el proceso de chancado se les ingresa un porcentaje de agua junto con otros agentes químicos al proceso como se puede ver en la Figura 25.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

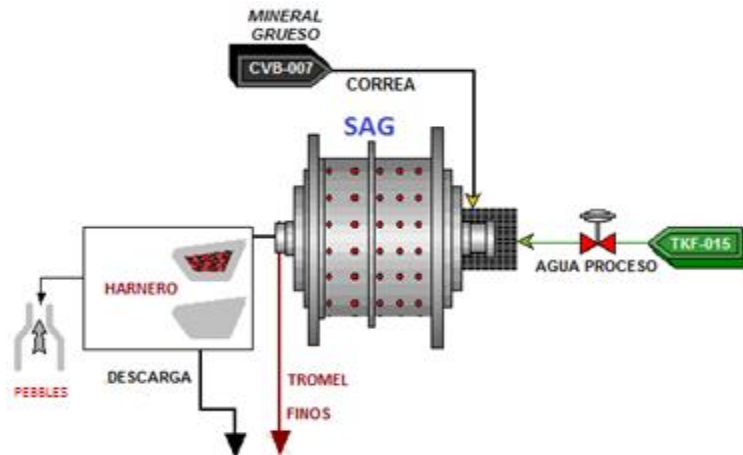


Figura 25: Diagrama de flujo del mineral.

La mezcla que se forma entre el mineral chancado, el agua y los químicos es el flujo que se descarga de forma total y que se selecciona en primera instancia en el Trommel. Siguiendo se descarga desde el éste hacia el harnero vibratorio el porcentaje de mezcla que no fue seleccionado (m_2), y con ello se inicia la etapa de selección a través del equipo de harneado.

A la mayor capacidad de operación se registraron los datos a través de la página web de monitoreo continuo de la planta de molienda y se obtuvieron los siguientes:

\dot{m}_1 : Flujo CVB-007= Flujo de alimentación.

S: Porcentaje de solido al interior del molino.

\dot{m}_3 : Flujo de material grueso que va a los molinos de pebbles.

\dot{m}_{agua} : Flujo de agua que se incorpora al proceso.

Los datos calculados,

\dot{m}_2 : Flujo Descarga del Trommel = Flujo alimentación harnero,

Donde,

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 * (1 - P) + \dot{m}_{agua} \quad ,$$

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

La ecuación anterior corresponde al flujo de mineral que sale desde el Trommel hacia el harnero vibratorio y que se puede expresar mediante la suma del porcentaje de mineral no seleccionado en el Trommel más la cantidad de agua incorporada al proceso.

\dot{m}_4 : Flujo Descarga del material fino,

Donde,

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_2 - \dot{m}_3 ,$$

La ecuación anterior corresponde al mineral seleccionado mediante el proceso de harneado y se calcula considerando el principio de conservación de la masa, en donde se establece como la diferencia entre la entrada de mineral al harnero menos la salida de mineral grueso hacia los pebbles.

5.1.3.2 Determinación de distribución de las cargas

Tiempo de residencia

Se denomina tiempo de residencia, al tiempo promedio mediante el cual una partícula de mineral grueso o pebbles, recorre la trayectoria desde la alimentación hasta la descarga del harnero. La determinación de este parámetro es fundamental para obtener las cargas reales que realiza el flujo másico de mineral en el equipo (7).

La forma de estimar el tiempo de residencia del mineral en el harnero vibratorio es a través de una prueba presencial en la cual se estima el tiempo que demora cierta partícula en recorrer todo el largo de este equipo. Partícula que puede ser diferenciada del resto al darle un color diferente a las demás y que se deposita por la parte posterior, en la zona de descarga del trommel, y que se observa hasta que cae por el lado contrario del equipo seleccionador.

El tiempo arrojado por las pruebas fue cercano a los 25 [seg], tiempo que será usado para el cálculo del flujo de mineral que pasa por el harnero en el siguiente Ítem.

Distribución de cargas generadas por el mineral en el harnero

En el CAPÍTULO III se explica el proceso de harneado y en él se puede observar la Figura 6, la cual muestra la estratificación de mineral en los harneros y permite identificar que la mayor carga del flujo másico de mineral se asienta en el primer tercio del harnero, esto debido a que el mineral no se clasifica de manera uniforme a lo largo del equipo. Para el análisis se considera que el 70% del mineral fino clasificado ejerce carga solo en el primer tercio del harnero, debido a la clasificación por saturación, y el 30% restante de la carga, correspondiente al resto del mineral fino, se distribuye en los siguientes dos tercios del harnero, ya que se aplica el método de clasificación por repetición (ver Figura 26). Para el caso del mineral grueso es posible asumir que aplica una carga uniforme a lo largo del equipo en ambas bandejas. Por otro lado, la información entregada por la empresa indica que 70% de la carga total se aplica en la criba superior y el 30% en la criba inferior (4).

Con los parámetros calculados en la sección anterior, es posible obtener las fuerzas debido a la carga de mineral que actúan en el harnero.

Los nuevos parámetros necesarios para el cálculo son,

$m_{s\ 3/8}$: Masa de mineral en primer tercio de la criba superior.

$F_{s\ 3/8}$: Fuerza producida por la carga de mineral en el primer tercio criba superior.

$m_{i\ 3/8}$: Masa de mineral en el primer tercio de la criba inferior.

$F_{i\ 3/8}$: Fuerza producida por mineral en el primero tercio de la criba inferior.

$m_{s\ 5/8}$: Masa de mineral en el segundo tercio de la criba superior.

$F_{s\ 5/8}$: Fuerza producida por la carga de mineral en el segundo tercio de criba superior

$m_{i\ 5/8}$: Masa de material en segundo tercio criba inferior.

$F_{i\ 5/8}$: Fuerza producida por la carga de mineral en segundo tercio criba inferior.

Calculando el flujo de mineral para la condición de operación, 5000 t/n, se tiene:

$$\dot{m}_1 = 5.000 \text{ [t/n]}$$

S: 73,2 %.

$$\dot{m}_{\text{agua}} = 1,79 \text{ [t/h]}$$

$$\dot{m}_2 = 1.500 \text{ [t/n]}$$

$$\dot{m}_3 = 800 \text{ [t/h]}$$

$$\dot{m}_4 = 706 \text{ [t/h]}$$

$$t_r = 25 \text{ [seg]}$$

Fuerzas en Primero Tercio Criba Superior,

$$m_{s\ 3/8} = \left(0,7 * \dot{m}_4 + \frac{3}{8} * \dot{m}_3\right) * \frac{t_r}{3600} * 0,7 * 1000 = 3860,7 \text{ [Kg]} ,$$

$$F_{s\ 3/8} = m_{s\ 3/8} * g = 37873,5 \text{ [N]}$$

Fuerzas en Primero Tercio Criba inferior,

$$m_{i\ 3/8} = \left(0,7 * \dot{m}_4 + \frac{3}{8} * \dot{m}_3\right) * \frac{t_r}{3600} * 0,3 * 1000 = 1654,6 \text{ [Kg]} ,$$

$$F_{i\ 3/8} = m_{i\ 3/8} * g = 16231,5 \text{ [N]}$$

Fuerzas en Segundo Tercio Criba Superior,

$$m_{s\ 5/8} = \left(0,3 * \dot{m}_4 + \frac{5}{8} * \dot{m}_3\right) * \frac{t_r}{3600} * 0,7 * 1000 = 3455,8 \text{ [Kg]} ,$$

$$F_{s\ 5/8} = m_{s\ 5/8} * g = 33901,4 \text{ [N]}$$

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Fuerzas en Segundo Tercio Criba inferior,

$$m_{i\ 5/8} = \left(0,3 * \dot{m}_4 + \frac{5}{8} * \dot{m}_3\right) * \frac{t_r}{3600} * 0,3 * 1000 = 1483 [Kg] ,$$

$$F_{i\ 5/8} = m_{i\ 5/8} * g = 14548,23 [N]$$

las fuerzas calculadas representan la carga que genera el mineral en una porción del harnero, por lo cual se deben dividir para poder proyectarlas en la geometría en el software de modelación ANSYS, es decir, como se introducen las cargas generadas por el mineral al igual que fuerzas remotas, en las vigas que sostienen la estructura, 8 vigas en la malla superior y 8 en la inferior, se deben recalculan las fuerzas para cada una de estas vigas, por ejemplo, la fuerza superior 3/8 representa la carga generada por el mineral en aproximadamente el 30 % de la malla superior. Dentro de este porcentaje hay 3 vigas por lo cual se debe distribuir la fuerza total en estas 3 vigas.

Recalculando las fuerzas para cada viga del harnero queda:

Fuerzas para vigas en Primero Tercio, 3 vigas, Criba Superior,

$$F_{s\ 3/8} (1) = 12624,5 [N] ,$$

Fuerzas para vigas en Primero Tercio, 3 vigas, Criba inferior,

$$F_{i\ 3/8} (1) = 5410,5 [N] ,$$

Fuerzas para vigas en Segundo Tercio, 3 vigas, Criba Superior,

$$F_{s\ 5/8} (1) = 6780,3 [N] ,$$

Fuerzas en Segundo Tercio Criba inferior,

$$F_{i\ 5/8} (1) = 2910 [N] ,$$

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Las fuerzas quedan dispuestas en el harnero como se puede ver en la Figura 26, en donde se ordenan de derecha a izquierda según el tamaño, debido a que desde la zona derecha ingresa el mineral.

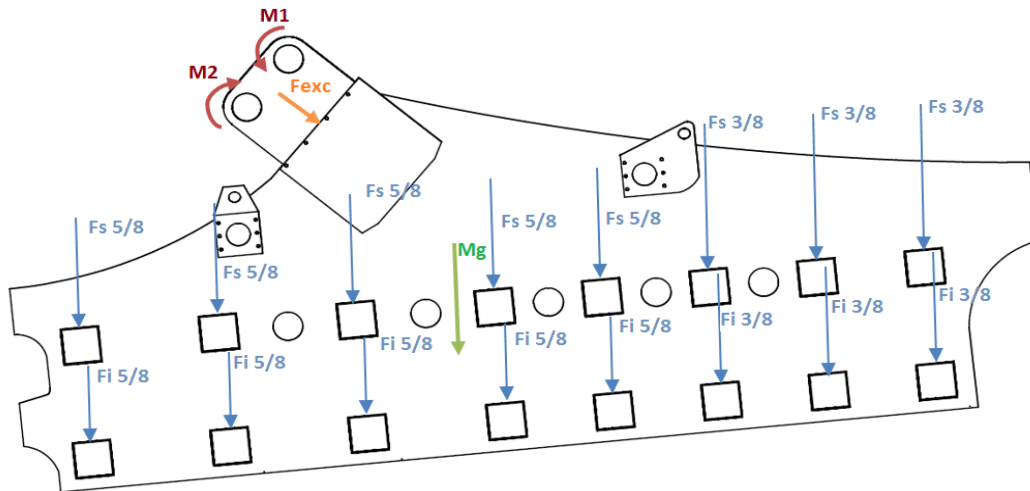


Figura 26: Distribución de las cargas.

A modo de estudiar el comportamiento de la estructura en función de las cargas aplicadas por variación del flujo de mineral se realizó el cálculo de las fuerzas para distintos flujos como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2: Fuerzas producidas por el material.

\dot{m}_2 [ton/h]	$F_{s\ 3/8}$ (1) [N]	$F_{s\ 5/8}$ (1) [N]	$F_{i\ 3/8}$ (1) [N]	$F_{i\ 5/8}$ (1) [N]
0	0	0	0	0
50	420	225,5	157,1	67,32
100	839,9	451	314,2	134,64
200	1679,8	902	628,3	269,3
400	3359,61	1804	1256,6	538,6
600	5039,41	2706	1885	807,8
800	6719,2	3608	2513,3	1077,11
1000	8399,01	4510	3141,6	1346,39
1300	10918,7	5862,3	4084,05	1750,31
1500	12624,53	6780,3	5410,5	2910

Las fuerzas que se muestran en la Tabla 2 se ingresan al software de simulación ANSYS y para cada una de éstas se realiza el cálculo de elementos finitos para así obtener una minara global de cual es realmente el impacto de este flujo en el comportamiento estructural del harnero vibratorio.

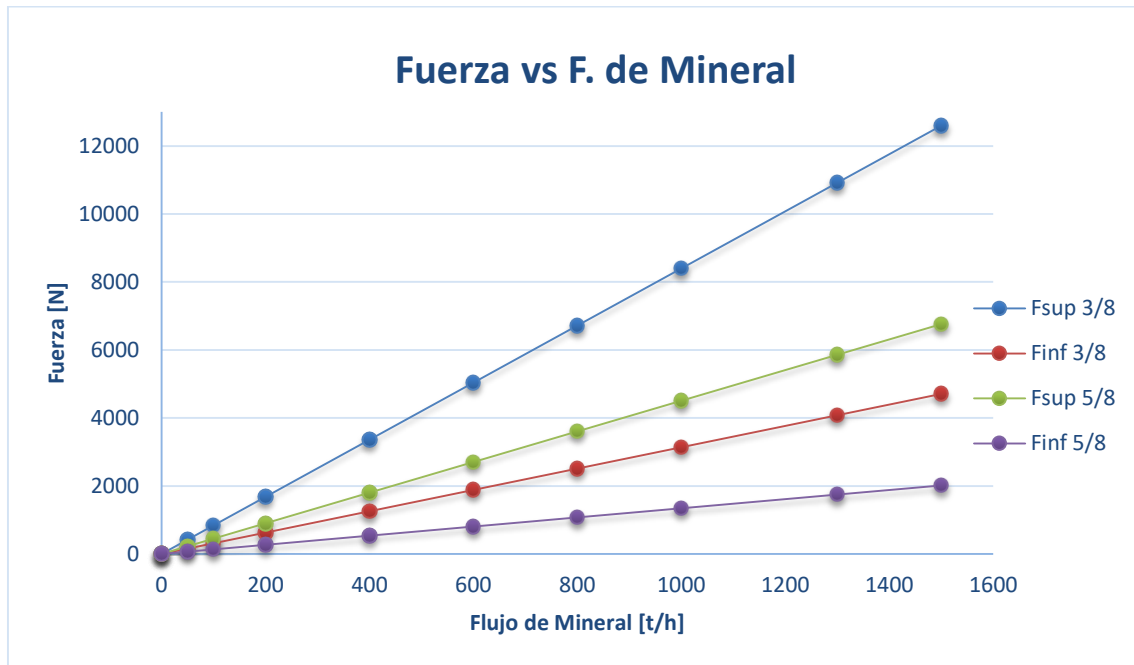


Gráfico 2: Fuerzas aplicadas al equipo en función del flujo de mineral.

5.1.3.3 Cargas y Momentos producido por los excitadores

los excitadores que proporcionan el movimiento oscilatorio al harnero generan cargas dinámicas dentro de las cuales se destacan fuerzas y momentos, los que son de gran importancia para el análisis del comportamiento de la estructura a través del método de elementos finitos.

El modelo del excitador que utiliza el harnero vibratorio es un MU 40 de marca VIMEC y que tiene como principales características el torque de 3108 kg mm y las revoluciones máximas que alcanza que son 1800 R.P.M (8). La manera que son accionados es a través de un motor eléctrico de 45 KW de potencia como se puede ver en la Figura 27.

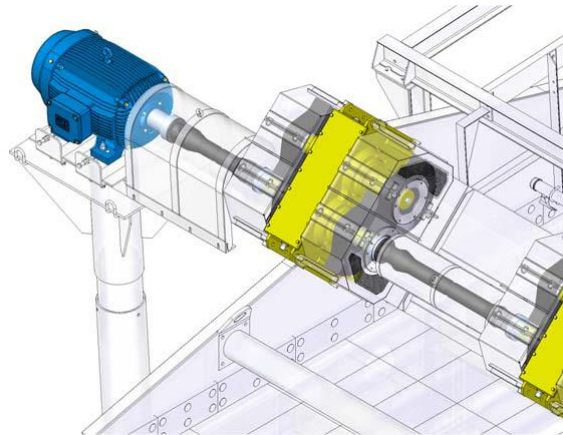


Figura 27: Excitador MU 40.

Las cargas que se generan por el accionamiento de los excitadores son modeladas por la ecuación $F = 4,37 \times 10^5 \sin(8,776t)$, donde t representa el tiempo en segundos (9). La manera en que se comporta las fuerzas proporcionadas por los excitadores en función del tiempo, tiempo de 1 segundo, es como se puede observar en el Gráfico 3, en donde los valores oscilan entre ± 400.000 [N].



Gráfico 3: Fuerza excitadores en operación.

Estas fuerzas y momentos se proyectan en el modelo al igual que condiciones de contorno, como se puede ver en la Figura 26, en donde los momentos se fijan a dos ejes y las fuerzas van normales a la plataforma que sostiene estos equipos excitadores.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

5.2 Determinación de la Rigidez de los Resortes

El harnero vibratorio R-MD se compone de 24 resortes, distribuidos de a 7 unidades en los soportes delanteros (Figura 28) y de 5 unidades en los soportes posteriores. Los 24 resortes que componen el sistema de amortiguamiento del harnero presentan las mismas características físicas, mecánicas y químicas, por lo que los cálculos que se realicen para sus constantes de rigidez será la misma para todos.

El problema de estudio aborda de dos maneras diferentes el sistema de amortiguamiento del harnero, en la primera es considerando la totalidad de los resortes, 24 resortes, y la segunda se idealiza considerando solo un resorte equivalente por cada apoyo, cuyas constantes de rigidez longitudinal y transversal son k_y y $k_x(k_z)$ respectivamente. Esto con el fin de estudiar la eficiencia de los resortes (spring) que trae el software ANSYS Workbench para este tipo de simulaciones.

Primero se determinan las características de los resortes reales y luego se calcula el resorte equivalente.

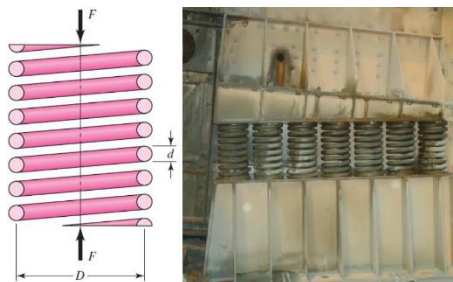


Figura 28: Tipo de resorte del harnero.

Los resortes del harnero corresponden a resortes helicoidales de compresión de alambre redondo, como el mostrado en la Figura 28. Donde “ D ” es el diámetro medio de la espira y “ d ” el diámetro del alambre. El tipo de resorte de compresión se puede considerar como un tipo de resorte donde ambos extremos son planos y esmerilados (10).

La constante de rigidez longitudinal de cada resorte se obtiene mediante la expresión,

$$k_y = \frac{d^4 G}{8D^3 N}$$

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

donde “G” es la constante de rigidez al cortante y “N” es el número de espiras activas.

El material de los resortes es un acero aleado con cromo y vanadio SAE5160 H, para el cual su módulo de corte es $G= 80$ [GPa].

Se realizaron mediciones en terreno para obtener el número de espiras activas $N=9$, el diámetro medio de espiras es $D=180$ [mm] y el diámetro del alambre es $d=30$ [mm], con estos datos definidos es posible realizar el cálculo.

$$k_y = \frac{30^4 * 80.000}{8 * 180^3 * 9} = 150 \left[\frac{N}{mm} \right],$$

La rigidez transversal de cada resorte se obtiene de la siguiente ecuación de Wahl (11).

$$k_x = \frac{k_y}{1,44c_1 \left(0,204 * \frac{h_s^2}{D^2} + 0,265 \right)},$$

donde,

c_1 : Constante determinada del Gráfico 4 en función de,

$$\frac{\delta_{st}}{l_0} \quad \text{y} \quad \frac{l_0}{D}$$

δ_{st} : Deflexión estática del resorte repartida en los 24 resortes, la cual se midió en terreno y tiene un valor de 100 [mm].

l_0 : Longitud libre del resorte la cual también se midió en terreno, y tiene un valor de 422 [mm].

Entonces se tiene que,

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

$$\frac{\delta_{st}}{l_0} = \frac{100}{422} = 0,237 \quad \text{y} \quad \frac{l_0}{D} = \frac{422}{180} = 2,34$$

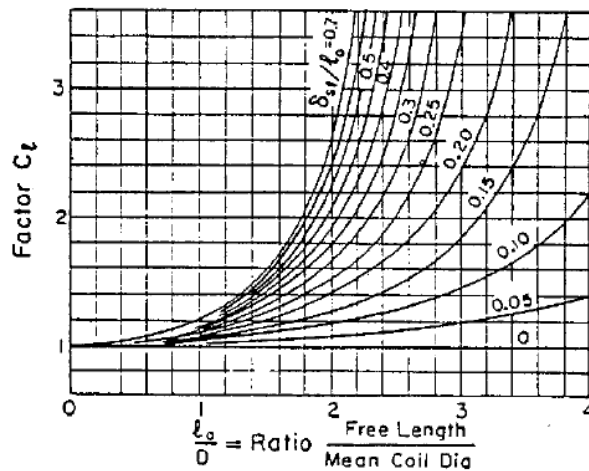


Gráfico 4: Determinación factor de la constante de elasticidad C_l .

Del gráfico el valor de C_l se puede aproximar a 2.

$$h_s = l_0 - \delta_{st} = 422 - 100 = 322 \text{ [mm]},$$

entonces,

$$k_x = \frac{150}{1,44 * 2 * \left(0,204 * \frac{322^2}{180^2} + 0,265 \right)} = 56,75 \left[\frac{N}{mm} \right],$$

En el modelo dinámico del harnero la rigidez de los resortes es simplificada a un equivalente en la componente axial “y”, y en las componentes transversales “x”, “z”, esto se puede relacionar de la siguiente manera dependiendo si se encuentran en serie o en paralelo (12).

- Resortes en serie

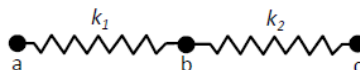


Figura 29: Resortes en series.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

$$k_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}},$$

- Resortes en paralelo

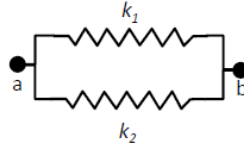


Figura 30: Resortes en paralelo.

$$k_{eq} = k_1 + k_2,$$

En base a lo anterior se puede inducir qué en la componente vertical, eje y, y en la transversal, eje x, los resortes se encuentran relacionados en paralelo equivalente ($k_{y\text{eq}}$ y $k_{x\text{eq}}$).

El coeficiente de elasticidad de los resortes se calcula para diferentes casos de estudio, éstos van relacionados con el número de resortes verticales con los que se estudie, los cuales son dos, 24 resortes verticales y 4 resortes verticales.

5.2.1 Cálculo de constantes de elasticidad para 24 resortes verticales

Componente	Numero de resortes	Tipo	valor
Eje y	24		$k_y = 150 \left[\frac{N}{mm} \right]$
Eje x	24		$k_x = 56,75 \left[\frac{N}{mm} \right]$
Eje z	4 delanteros	serie	$k_{eq\ z\ del} = \frac{k_x}{7} = 8,11 \left[\frac{N}{mm} \right]$
	4 posteriores	serie	$k_{eq\ z\ pos} = \frac{k_x}{5} = 11,35 \left[\frac{N}{mm} \right]$

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

5.2.2 Cálculo de constantes de elasticidad para 4 resortes verticales.

Componente	Numero de resortes	Tipo	valor
Eje y	2 delanteros	paralelo	$k_{eq\ y\ del} = 7 * k_y = 1050 \left[\frac{N}{mm} \right]$
	2 posteriores	paralelo	$k_{eq\ y\ pos} = 5 * k_y = 750 \left[\frac{N}{mm} \right]$
Eje x	2 delanteros	paralelo	$k_{eq\ x\ del} = 7 * k_x = 397,25 \left[\frac{N}{mm} \right]$
	2 posteriores	paralelo	$k_{eq\ x\ pos} = 5 * k_x = 283,75 \left[\frac{N}{mm} \right]$
Eje z	4 delanteros	serie	$k_{eq\ z\ del} = \frac{k_x}{7} = 8,11 \left[\frac{N}{mm} \right]$
	4 posteriores	serie	$k_{eq\ z\ pos} = \frac{k_x}{5} = 11,35 \left[\frac{N}{mm} \right]$

5.3 Determinación de los parámetros para el análisis modal

El análisis modal es una herramienta de estudio que permite analizar las características dinámicas intrínsecas de un sistema mecánico cualquiera, teniendo como objetivo encontrar los parámetros modales correspondientes a las frecuencias naturales y los modos de vibración, los cuales están determinados por la distribución de masa y rigidez.

Según estudios realizados por empresas externas la medición para la frecuencia de trabajo del harnero vibratorio es de 13,43 [Hz] considerando que el equipo funciona a 860 RPM.

CAPÍTULO VI

MODELACIÓN DEL CAD

La modelación en CAD es la etapa previa al análisis de elementos finitos y elementos discretos por lo que su importancia es grande, debido a que al consolidar un modelo que tenga restricciones bien definidas, se facilita de gran manera la etapa de importar estas geometrías a los softwares de análisis.

La estructura del harnero vibratorio R-MD es un diseño de grandes dimensiones por lo que su modelación debe ser lo más simple posible, esto debido a que al ser esquemas muy complejos dificultan los estudios posteriores por la cantidad de elementos que se generan en los análisis MEF y DEM.

El programa escogido para la modelación del equipo de harneado es Autodesk Inventor Profesional 2015, que por su interfaz clara y sencilla permite al usuario trabajar sin problemas y sin mucha complejidad obtener los modelos esperados.

6.1 Características del software de trabajo

El software que se utilizó para la modelación del harnero vibratorio R-MD es Autodesk Inventor Profesional 2015 que además de su sencilla interfaz cuenta con la cantidad de extensiones necesarias para importar la geometría a diferentes tipos de softwares de análisis, por ejemplo, cuenta con STEP y STL que son extensiones que se pueden ser utilizadas en ANSYS y ROCKY respectivamente.

Autodesk Inventor es un sistema de modelado sólido basado en operaciones geométrica, que proporciona todas las herramientas necesarias para ejecutar proyectos de diseño, desde el primer boceto hasta el dibujo final. Incluye operaciones de modelado 3D entre las que destacamos las siguientes (13):

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

- Crear dibujos 2D para fabricación y modelos 3D
- Crear operaciones, piezas, y sub-ensamblajes adaptativos.
- Administrar piezas y ensamblajes grandes.
- Usar VBA para acceder al API de Autodesk Inventor.
- Realizar animaciones de los mecanismos
- creados y generar vistas diversas.

6.2 Modelación de componentes

El modelo de la geometría se realizó en base a un manual de mantenimiento, Manual Haber & Boecker, que cuenta con la cantidad necesaria de información para poder obtener la mayoría de las cotas importantes para la modelación de los componentes, las otras cotas que no se pueden sacar desde el manual de mantenimiento se sacan en terreno haciendo mediciones al harnero que se encuentra Stand by dentro de la planta de molienda. El modelo que resultó a partir de los datos obtenidos y la información recopilada se puede ver en la Figura 31 y Figura 32. Debido a la complejidad que se alcanzó con este modelo se eliminaron algunos detalles para que el modelo fuese más simple y así facilitar el mallado de este en el análisis MEF y DEM.

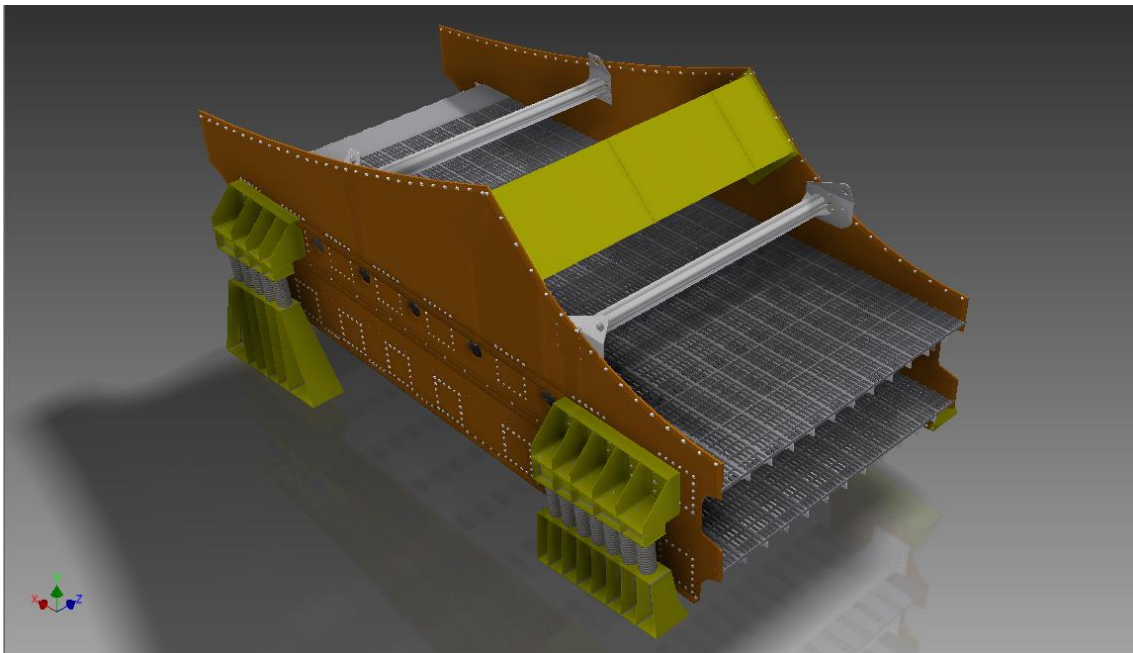


Figura 31: Vista isométrica CAD harnero vibratorio.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

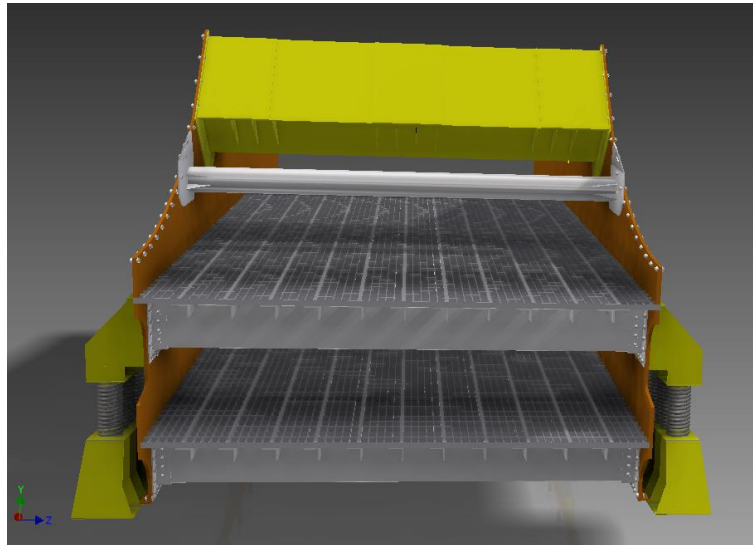


Figura 32: Vista frontal CAD harnero vibratorio.

La modelación final y simplificada del harnero vibratorio R-MD, luego de eliminar algunos componentes que no representaban mayor análisis estructural, alcanzó en su totalidad una cantidad de 69 componentes como se puede ver en la Figura 33. De todos los componentes se tuvo que estudiar su composición y características mecánicas para sus posteriores análisis como se puede ver en el siguiente ítem (6.3).

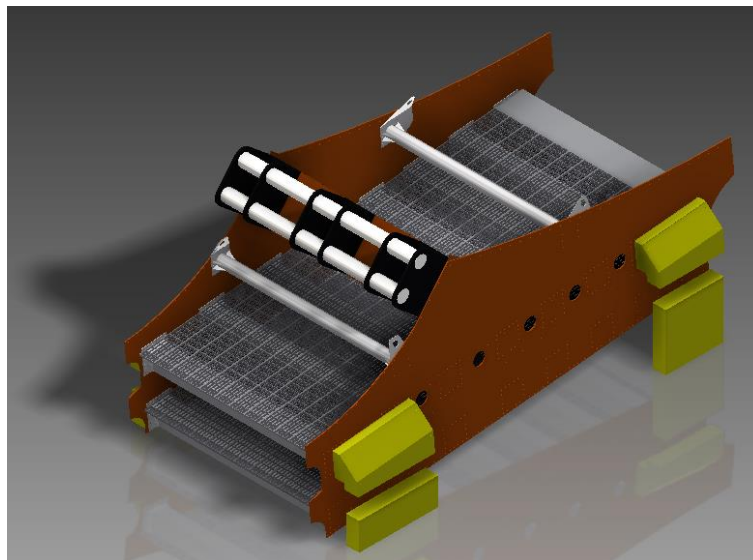


Figura 33: Vista isométrica modelo CAD harnero.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

6.3 Características de los componentes

Los componentes de la estructura presentan diferentes características y materiales por lo que es de importancia diferenciar bien cuáles son éstos y que función cumplen. La importancia en estudiar sus características reside en el hecho que esta información será utilizada en los análisis posteriores de elementos finitos y elementos discretos.

6.3.1 Placa lateral Harnero

La Placa lateral del harnero vibratorio es la pieza estructural más importante del equipo, debido a que el harnero cuenta con dos de éstas, las que contienen la totalidad de las piezas de la estructura, es decir, soportan todas las componentes del harnero. Esto se puede ver en la Figura 34 en donde se aprecia la cantidad de perforaciones que tiene la chapa destinadas a conectar con el resto de los componentes.

Las Chapas laterales son de un material anti abrasivo de nombre P265GH que tiene como características químicas y mecánica las siguientes (14):

- Densidad: 7,85 [g/cm³]
- Resistencia a la tracción: 410 [MPa]
- Esfuerzo de fluencia: 265 [Mpa]
- Fuerza de producción mínima: 255 [MPa]

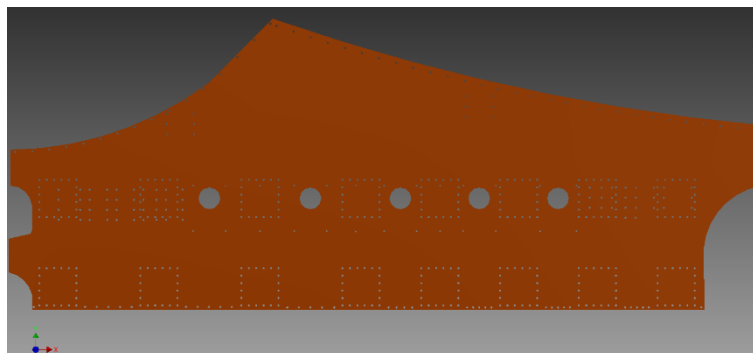


Figura 34: Placa lateral harnero.

6.3.2 Tubo de trabamiento o viga de descanso L=3660 delantero

El tubo de trabamiento como lo llama la empresa proveedora es una viga encargada de sostener el cuerpo del harnero al ser izado junto con la viga posterior de igual nombre. Se puede ver en la Figura 35 que la viga tiene orejas para la función mencionada de izaje.

Esta viga es de un acero SAE1020 de características (15):

- Densidad: 7,88 [g/cm³]
- Esfuerzo de fluencia: 205 [MPa]
- Esfuerzo máximo: 380 [MPa]
- Módulo de elasticidad: 205 [GPa]
- Limite elástico: 343 [MPa]
- Resistencia a la tracción: 490 [MPa]

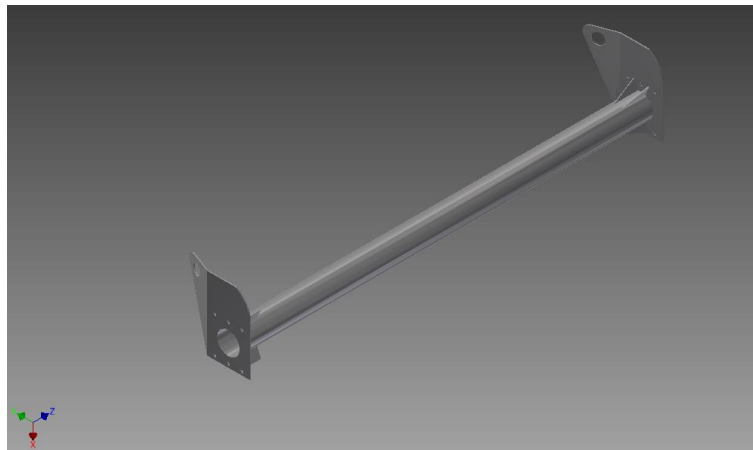


Figura 35: Vista isométrica tubo de trabamiento delantero.

6.3.3 Tubo de trabamiento o viga de descanso L=3660 trasero

El tubo de trabamiento trasero al igual que el delantero tiene la función aparte de sostener la estructura servir como elemento para el izaje en los cambios de equipos en la planta de molienda. Si bien están destinados a la misma función estos tubos/vigas presentan diferentes diseños como se puede observar en la Figura 36. Además de su diseño, el material que lo compone también difiere, debido a que este soporte trasero es de acero estructural A36.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Las características del acero A36 (16) son:

- Densidad: 7,85 [g/cm³]
- Límite elástico: 250 [MPa]
- Resistencia a Tracción: 400 [MPa]
- Módulo de Young: 200 [GPa]
- Esfuerzo de Fluencia: 152 [MPa]

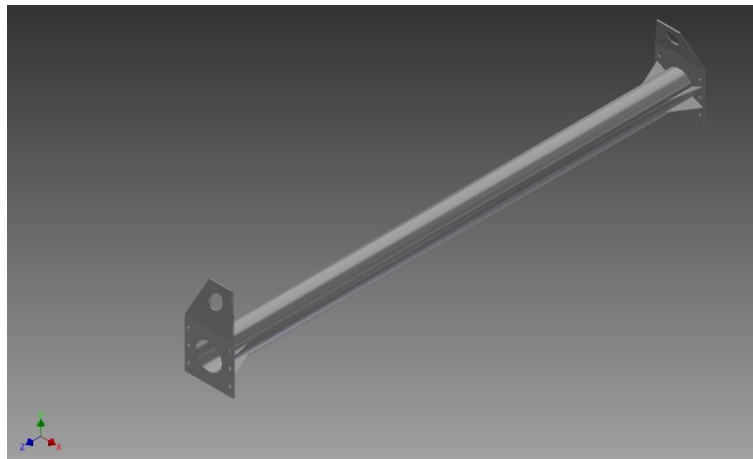


Figura 36: Vista isométrica tubo trabamiento trasero.

6.3.4 Transversales de alimentación

Las vigas transversales son de vital importancia en la estructura debido a que representan cerca del 70 % de la totalidad de las piezas. Son conjuntos compuestos por dos chapas y un perfil cuadrado como se muestra en la Figura 37, y éstas se encuentran distribuidas en un número de 16 compuestos en la estructura principal del equipo de harneado, siendo parte del esqueleto principal junto con las chapas laterales. Las 16 vigas transversales se distribuyen en dos corridas de 8 barras, es decir, en dos niveles por los cuales se asienta las mallas de harneado.

El material del cual está compuesto este conjunto es el acero ASTM A36 de características señaladas en el ítem anterior (6.3.3).

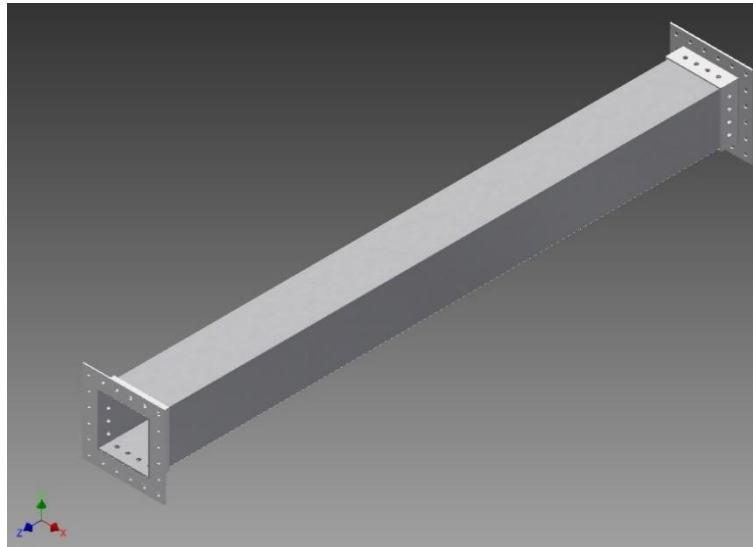


Figura 37: Vista isométrica transversal de alimentación.

6.3.5 Malla de harnero

La malla de harneado del equipo vibrador está diseñada en 3 partes para cada nivel, es decir, la malla superior la componen 3 partes diseñadas en inventor y lo mismo para la malla inferior. El diseño de la malla de harneado cuenta de dos componentes idénticas y una diferente con una zona plana como se muestra en la Figura 38, esto debido a que en esa parte es donde cae el mineral.

El material que están diseñadas estas mallas es un polímero de alta densidad de nombre Poliuretano PU-90 que presenta las siguientes características (17):

- Densidad: 1,15 [g/cm³]/32-48
- Esfuerzo de fluencia: 11,77 [MPa]
- Resistencia a Tracción: 45[MPa]
- Resistencia a la compresión: 12 [Mpa]

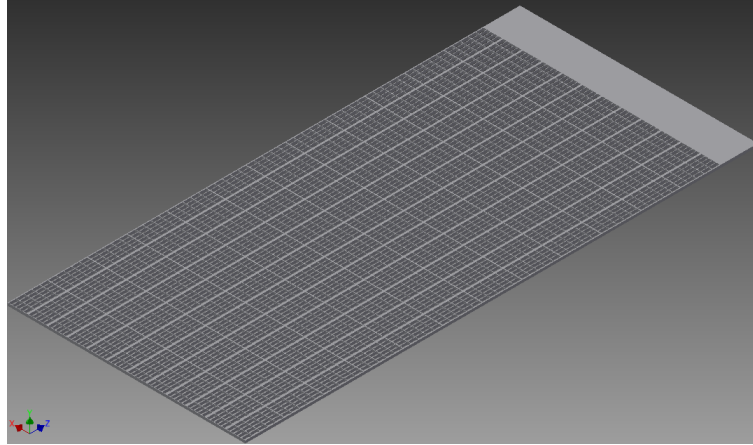


Figura 38: Vista isométrica malla de harneado.

6.3.6 Console P/mola delantero

El harnero vibratorio R-MD se encuentra unido al suelo de planta a través de una cama de resortes que está sujeta al equipo entre los soportes superiores y los soportes inferiores. Los soportes superiores son componentes importantes para la inclinación del equipo, ya que la base que conecta al soporte con los resortes tiene una inclinación de un ángulo de 5,56 grados y el resto del cuerpo alineado con la chapa principal, como se puede ver en la Figura 31 y Figura 33. La dimensión para los soportes frontales es diferente que, para los traseros, esto se debe a que la cantidad de resortes en la zona delantera es superior a la trasera.

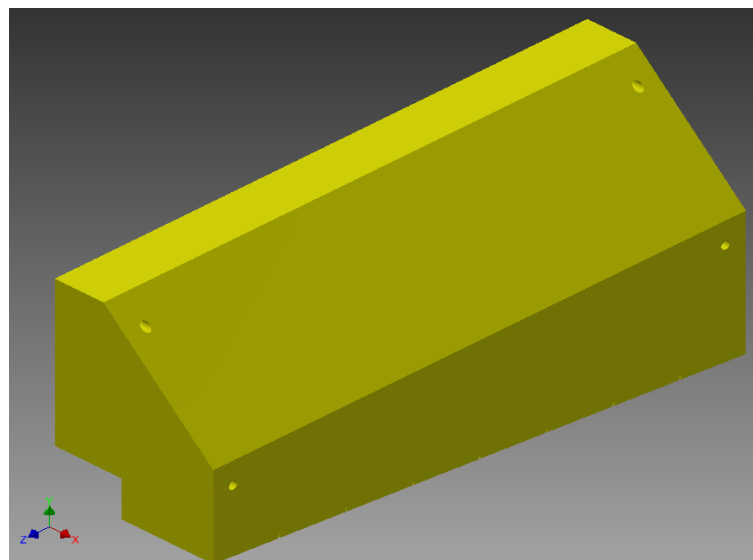


Figura 39: Vista isométrica soporte superior delantero.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

CAPÍTULO VII

PRINCIPIOS DEL ANÁLISIS FEM EN GENERAL

7.1 Introducción Método de Elementos Finitos.

El método de elementos finitos, es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería, hoy comúnmente empleado para la resolución de problemas que involucran un alto grado de complejidad, de matemáticas aplicadas así como las fisicomatemáticas, ya que la gran mayoría de los problemas que se presentan en estas áreas, comúnmente involucran geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de propiedades de materiales, por lo que generalmente no es posible obtener alguna solución analítica directamente de expresiones matemáticas (18).

El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste tanto económico como en tiempo de desarrollo (19).

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo, no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño real (19).

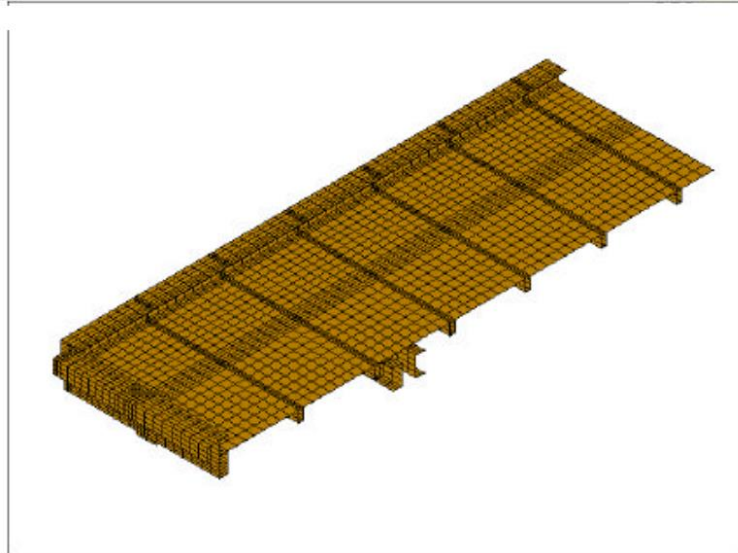


Figura 40: Separación con Elementos Finitos.

El método de los elementos finitos como formulación matemática es relativamente nuevo; aunque su estructura básica es conocida desde hace bastante tiempo, en los últimos años ha sufrido un gran desarrollo debido a los avances informáticos. Han sido precisamente estos avances informáticos los que han puesto a disposición de los usuarios gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos con elementos finitos. Pero no hay que llevarse a engaño, el manejo correcto de este tipo de programas exige un profundo conocimiento no solo del material con el que se trabaja, sino también de los principios del MEF (19).

7.2 Concepto General del Método

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no (19).

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- Dominio. Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno. Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor, etc.
- Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, esfuerzos, temperaturas, entre otras.

El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide. Los elementos se introducen al método de los elementos finitos 6 A. Carnicero definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre sí los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen: esfuerzos, deformaciones, etc. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo (19).

Por ejemplo, si el sistema a estudiar es una viga en voladizo con una carga puntual en el extremo y una distribución de temperaturas tal y como muestra la Figura 41.

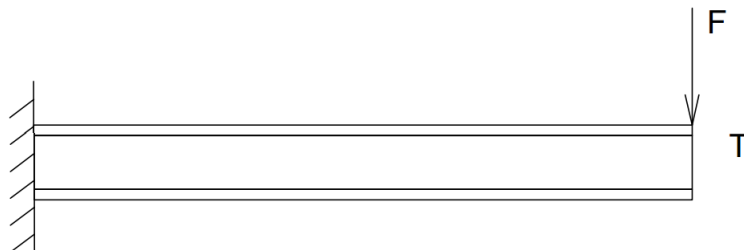


Figura 41: Viga en voladizo.

El discretizado del dominio puede ser:

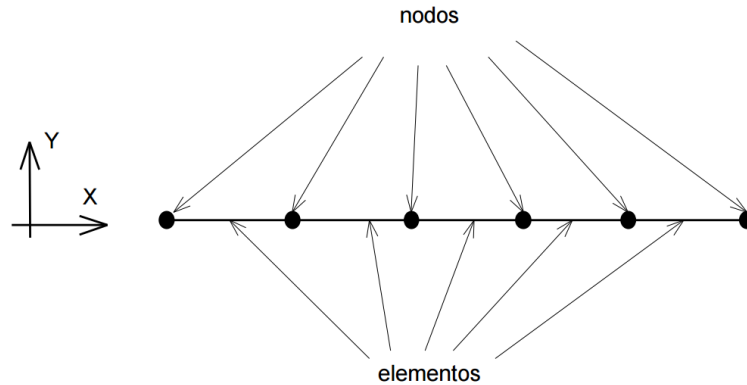


Figura 42: Nodos y elementos viga en voladizo.

Los grados de libertad de cada nodo serán:

- Desplazamiento en dirección x
- Desplazamiento en dirección y
- Giro según z
- Temperatura

El sistema, debido a las condiciones de contorno: empotramiento, fuerza puntual y temperatura, evoluciona hasta un estado final. En este estado final, conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema podemos determinar cualquier otra incógnita deseada: esfuerzos, deformaciones, entre otras. También sería posible obtener la evolución temporal de cualquiera de los grados de libertad (19).

Planteando la ecuación diferencial que rige el comportamiento del continuo para el elemento, se llega a fórmulas que relacionan el comportamiento en el interior del mismo con el valor que tomen los grados de libertad nodales. Este paso se realiza por medio de unas funciones llamadas de interpolación, ya que éstas ‘interpolan’ el valor de la variable nodal dentro del elemento (19).

El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación de las matrices mediante ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento (en el caso estructural serán las llamadas matrices de rigidez, amortiguamiento y masa, aunque esta terminología ha sido aceptada en otros campos de conocimiento) se ensamblan y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas, lineales o no, que resolviéndolas nos proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema (19).

7.3 Formulación del Método de Elementos Finitos.

En el análisis estructural el MEF tiene como punto de partida la relación de las fuerzas que actúan entre todos los nodos, impuestas por las condiciones de borde, y los desplazamientos en cualquiera de ellos.

La formulación del problema se realiza en forma matricial para el caso en 3D, en donde se pretende encontrar la ecuación que gobierna el modelo,

$$\{F\} = [K]\{u\}$$

donde,

$\{F\}$: Corresponde a las fuerzas que actúa sobre todas las componentes de los desplazamientos nodales (grados de libertad).

$\{u\}$: Es el vector de desplazamientos nodales.

$[K]$: Es la matriz de rigidez del sistema, la cual depende de la geometría y materiales de modelo.

Una vez conocida la matriz de rigidez que define el comportamiento de cada elemento se ensamblan y se obtiene un conjunto de ecuaciones lineales, que al resolver permiten encontrar el valor de los desplazamientos nodales (20).

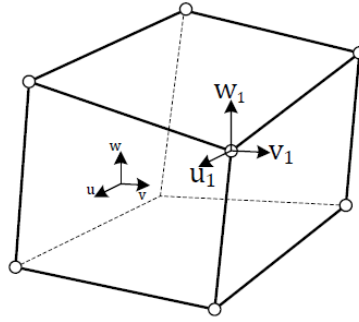


Figura 43:Desplazamientos nodales en un elemento sólido hexaédrico 3D.

El campo de desplazamientos en un punto cualquiera del dominio está definido por un vector $\{u\}$, el cual tiene tantas componentes como desplazamientos existan.

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix}$$

Considerando un elemento finito, el campo de desplazamientos se aproxima haciendo uso de las funciones de interpolación,

$$\{u\}=[N]\{\delta e\},$$

donde $[N]$ es la matriz de la función de interpolación y δe es el vector de los desplazamientos nodales del elemento y se expresa como,

$$\{\delta e\}=\{U_1V_2W_3U_1V_2W_3\cdots U_1V_2W_3\}^T$$

Con esta relación es posible obtener desplazamientos en cualquier punto al interior de los elementos en función de los desplazamientos nodales.

La matriz de la función de interpolación puede tener tantas filas como desplazamientos tenga el punto, y tantas columnas como grados de libertad haya entre todos los nodos del elemento.

Una vez conocidos los desplazamientos nodales se puede encontrar las deformaciones unitarias $\{\varepsilon\}$ en cualquier punto del elemento,

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = [B]\{\delta^e\}$$

donde $[B]$ es un operador lineal que relaciona los desplazamientos nodales del elemento con la deformación unitaria cualquiera en un punto interior del elemento.

A partir de la relación entre el esfuerzo y deformación, es posible deducir el campo de esfuerzos,

$$\sigma = [E]\{\varepsilon\},$$

Donde $[E]$ representa la matriz de elasticidad, la cual depende del material utilizado.

CAPÍTULO VIII

MODELACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE ANSYS

8.1 Análisis de elementos finitos utilizando ANSYS

El análisis de elementos finitos a través de la plataforma ANSYS para la ingeniería es un gran avance, debido que esta herramienta permite realizar cálculos más complejos para estructuras de mayor dimensión y de geometrías más complicadas.

Los cálculos que se pueden resolver con la herramienta ANSYS simplifican en demasía la labor del ingeniero para el análisis de elementos finitos, ya que resolver matrices de grandes dimensiones puede ser demasiado tedioso desarrollarlos de forma manual.

8.1.1 Inicio del Análisis

El inicio del análisis se da con la instalación del software de trabajo, que en este caso es ANSYS y ROCKY en un ordenador que cuente con el mínimo de la capacidad de trabajo que exigen estos programas para desarrollar su trabajo de cálculo.

Lo siguiente es verificar que se cuenten con los tipos de extensiones de las geometrías que se necesitan para poder comenzar a correr los programas y con ello se puede iniciar el proceso de análisis de elementos finitos y elementos discretos a través de los softwares ANSYS y ROCKY respectivamente.

8.1.1.1 Abrir Software

Al iniciar el software ANSYS Workbench 16.1 se desplegará una ventana de trabajo que incluye en la zona izquierda un cuadro (toolbox) (ver Figura 44) que concentra la gama programas que vienen incluidas en éste. Estos programas se encuentran ordenados en grupos de acuerdo a sus funcionalidades (ver Figura 45), estos grupos son: Analysis Systems, Component Systems, Custom Systems, Design Exploration, ESSS Systems, External Connection Systems, y dentro de éstos se encuentran los dos programas que se utilizarán para esta simulación “Static Structural” y

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

“modal” que se encuentran en Analisis Systems, de forma separada, y en “Custom Systems” de manera agrupada. La forma agrupada se utilizará en esta simulación, ya que permite acoplar estos dos análisis (estático y modal) en un solo grupo de trabajo.

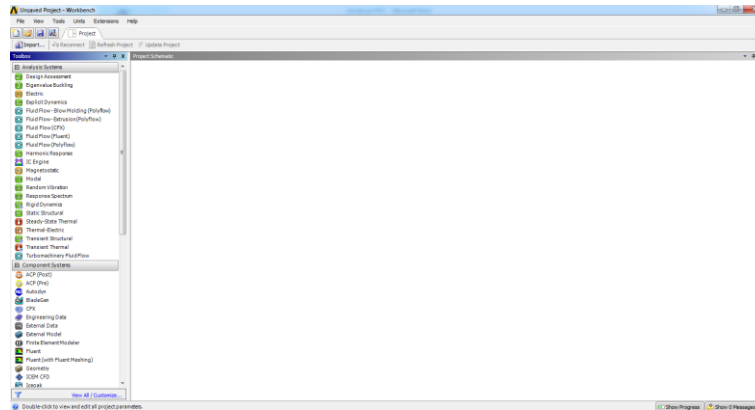


Figura 44: Plataforma de inicio ANSYS Workbench.

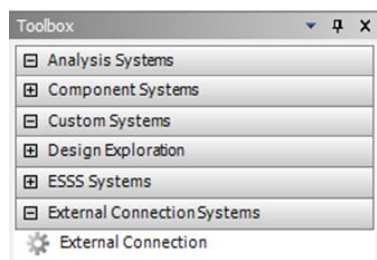


Figura 45: Conjunto de Programas en el toolbox de ANSYS Workbench.

La mayor ventaja que proporciona utilizar estos dos softwares juntos es que al realizar las operaciones de mallado, sujeción y condiciones de contorno basta realizarlas en uno para que se incorporen al otro.

8.1.1.2 Seleccionar Software de trabajo

La manera en que se debe de comenzar a trabajar en ANSYS, es trasladando el conjunto de programas hacia la ventana de trabajo. Para hacer correr los softwares Static Structural y Modal por separados, se debe hacer presionando sobre cada uno y seguido de esto arrastrarlos hasta la ventana “Project Schematic”, pero para el caso cuando están juntos se debe hacer click dos veces para que aparezca en “Project Schematic”, esto se puede ver en la Figura 47.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

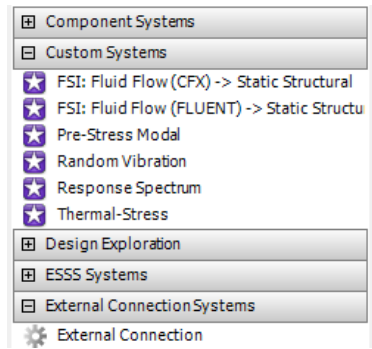


Figura 46: Programas acoplados en ANSYS.

Para empezar, se tiene que tener claro cuál es el conjunto que contiene la unión de los programas requeridos para este análisis, debido a que en el grupo “Custom Systems” hay 6 alternativas como se observa en la Figura 46. La opción que contiene los softwares requeridos es “Pre-Stress Modal”, contiene la unión de los programas Static Structural y Modal, y como se menciona en el párrafo anterior para poder utilizarla se debe presionar dos veces sobre ella. Luego de esto aparecen los programas unidos como se puede ver en la Figura 47.

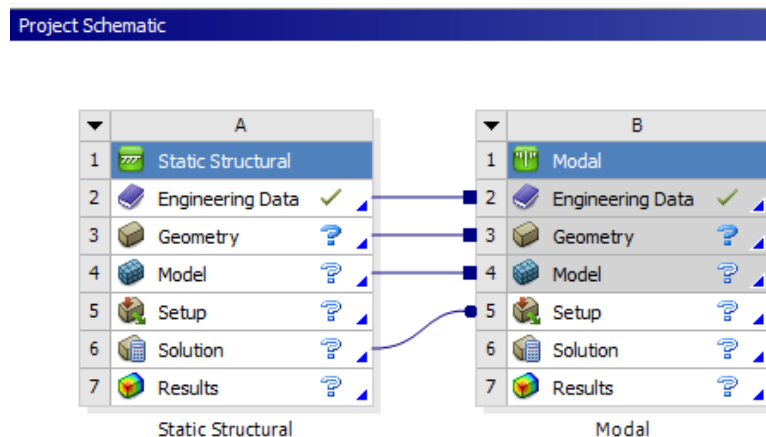


Figura 47: Pre- Stress Modal.

8.1.1.3 Importar Geometría

En el momento que se carga el multi-sistema (Static Structural-Modal) de análisis en la ventana de trabajo (Figura 47) se puede importar la geometría necesaria para esta investigación, geometría previamente diseñada en el software Inventor (6.2 Modelación de componentes), y con ella comenzar a realizar las operaciones de estudio. Cabe destacar que para el software ANSYS Workbench es necesario importar geometrías que estén definidas en el formato STEP (stp).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

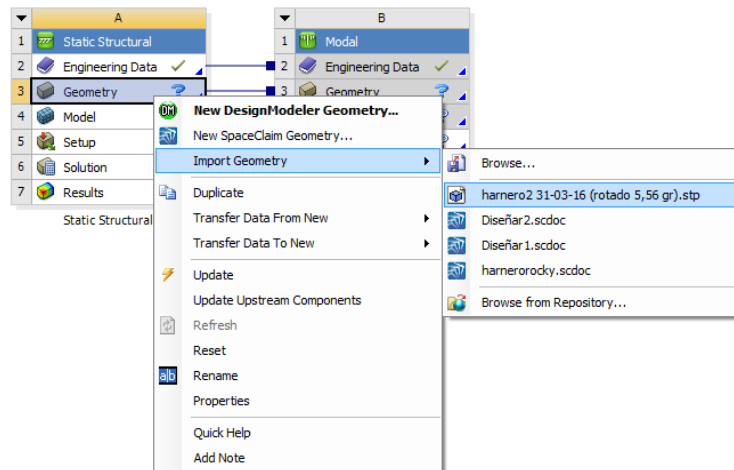


Figura 48: Importar geometría en ANSYS Workbench.

Como se puede observar en la Figura 48, la manera de importar la geometría es relativamente sencilla, debido a que solo se debe seleccionar con el botón derecho del mouse sobre el cuadro que dice “Geometry”, siempre en los sistemas múltiples esto se realiza en el primer programa que en este caso es Static Structural, y luego se elige “Import Geometry” donde aparece la opción “Browse...”, con la cual se puede buscar en el ordenador la geometría, la que para este análisis es “harnero2 31-03016”.

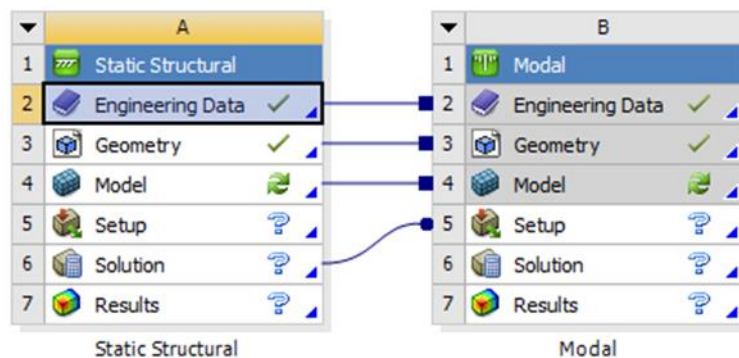


Figura 49: Geometría importada ANSYS.

Luego de importar la geometría el software indica con un ticket verde que se encuentra cargada para ambos programas (Static Structural y Modal), pero a la vez se muestra una imagen de un papel blanco con un cubo azul dentro (Figura 49) que indica que se debe revisar mediante los programas de diseño que vienen incluidos en ANSYS.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Como se observa en la Figura 48 existen dos softwares de diseño asociados ANSYS 16.1, que sirven para crear nuevas geometrías como también para editarlas. Debido a que la geometría de esta investigación fue modelada en otro programa de diseño, Autodesk Inventor, solo resta revisar que la estructura del harnero a estudiar se encuentre completa y además que sus partes estén vinculadas de manera que se pueda realizar los análisis requeridos.

El software de diseño elegido para revisar la geometría del harnero como se muestra en la Figura 50 es el SpaceClaim, debido a que presenta mayor facilidad para editar los CAD que vienen diseñados desde otros programas.

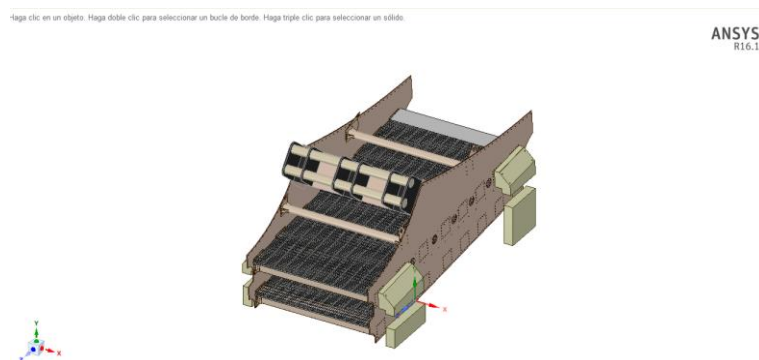


Figura 50: Modelo del harnero en SpaceClaim

8.1.1.4 Definir Materiales

Los materiales que componen la estructura son para esta investigación de vital importancia, debido a que la estructura del harnero de descarga SAG R-MD contiene una combinación de diferentes aceros, en el caso de la estructura principal, y polímeros, en el caso de la malla de harneado. Es por ello que ingresar estos materiales al software da una posibilidad al análisis de acercar los resultados aún más a la realidad.

Las características de los materiales que se deben ingresar en este punto se encuentran especificadas en el punto 6.3 del CAPÍTULO VI, y la forma que corresponde agregarla se explicará a continuación.

Primero: seleccionar (doble click) en la ventana de trabajo la opción “Engineering Data” (ver Figura 49) y luego esperar que aparezca una nueva pestaña paralela a la pestaña “project” como se ve en la Figura 51.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

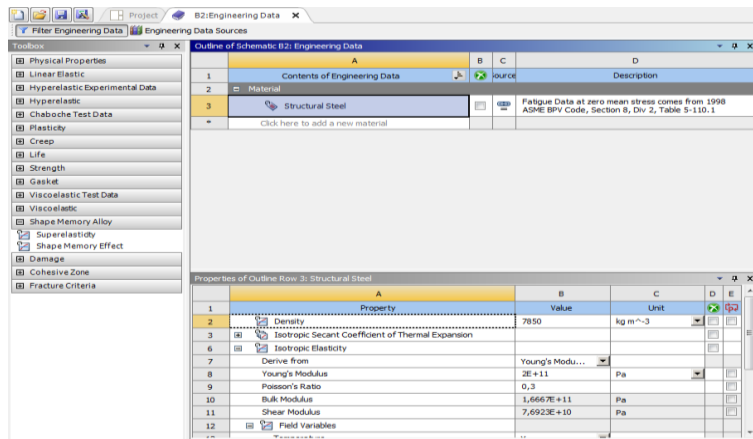


Figura 51: Ventana de ingreso de nuevos materiales.

Segundo: para poder introducir un nuevo material al software ANSYS Workbench se deben ingresar todas las características físicas, químicas y mecánicas que éstos posean, por lo que se hace muy complejo para algunos aceros especiales que por sus políticas de diseño las empresas no dan a conocer toda la información que se requiere para poder ingresarlos.

Para poder solucionar este problema es recomendable editar un material que ya esté ingresado a la base de datos del programa, que pertenezca a la misma familia (acero, polímero, etc.) y que presente características similares, por ejemplo, como se observa en la el software cuenta con un acero estructural predeterminado (Structural Steel) que puede ser de similares características a la mayoría de los aceros que componen esta estructura (A36, P265GH, SAE 1020).

La manera en que se debe realizar la edición de las características mecánicas, principalmente, de los materiales de la base de dato de ANSYS, para obtener los nuevos materiales, es a través de la opción “Engineering Data Sources”, en donde se pueden encontrar una gama de materiales predeterminados que para este caso serán seleccionados del grupo “General Materials”. Para seleccionar los materiales a editar se debe elegir la opción “General Materials”, y luego en la ventana inferior “Contens of General Materials” marcar la cruz amarilla hasta que aparezca el libro azul al lado derecho de esta cruz (ver Figura 52). Para este caso se utilizarán dos, Polyethylene para el Poliuretano y Structural Steel para los demás aceros como se menciona en el párrafo anterior.

Engineering Data Sources			
A	B	C	D
1	Data Source	Location	Description
3	General Materials		General use material samples for use in various analyses.
4	General Non-linear Materials		General use material samples for use in non-linear analyses.
5	Finite Materials		Material samples for use in an explicit analysis.

Outline of General Materials				
A	B	C	D	E
1	Contents of General Materials	Add	Source	Description
2	Material			
3	Air		General_Materi	General properties for air.
4	Aluminum Alloy		General_Materi	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-31, page 5-277.
5	Concrete		General_Materi	
6	Copper Alloy		General_Materi	
7	Gray Cast Iron		General_Materi	
8	Magnesium Alloy		General_Materi	
9	Polyethylene		General_Materi	
10	Silicon Anisotropic		General_Materi	
11	Stainless Steel		General_Materi	
12	Structural Steel		General_Materi	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
13	Titanium Alloy		General_Materi	

Figura 52: Ventana base de datos materiales.

Luego de seleccionados estos dos materiales (Structural Steel y Polyethylene) se debe regresar a la ventana principal de los materiales presionando de nuevo “Engineering Data Sources” y revisar que éstos estén ingresados como se observa en la Figura 53.

Outline of Schematic B2, C2, D2, E2, F2: Engineering Data			
A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data	Source	Description
2	Material		
3	Polyethylene		General_Materials.xml
4	Structural Steel		General_Materials.xml

Figura 53: Materiales ingresados a la ventana principal.

El último paso para agregar los nuevos materiales al programa es ingresar las características que se muestran en la Tabla 3, en donde se especifica el valor de cada una de sus propiedades.

Tabla 3: Valores característicos de los materiales.

Nombre	Características ingresadas	Valor
P265GH	Density (Densidad)	7.850 $\frac{Kg}{m^3}$
	Tensile Ultimate Strength (Resistencia a la tracción) (Rm):	410 [MPa]
	Tensile Yield Strength (Esfuerzo de fluencia) (Re):	265 [MPa]
	Compressive Yield Strength	250 [Mpa]
	Young's Modulus	200 [GPa]
SAE1020	Density (Densidad)	7.880 $\frac{Kg}{m^3}$
	Tensile Ultimate Strength (Resistencia a la tracción) (Rm):	420 [MPa]
	Tensile Yield Strength (Esfuerzo de fluencia) (Re):	205 [Mpa]
	Compressive Yield Strength	250 [Mpa]
	Young's Modulus	200 [GPa]
A36	Density (Densidad)	7.850 $\frac{Kg}{m^3}$
	Tensile Ultimate Strength (Resistencia a la tracción) (Rm):	400 [MPa]
	Tensile Yield Strength (Esfuerzo de fluencia) (Re):	250 [Mpa]
	Compressive Yield Strength	152 [MPa]
	Young's Modulus	200 [GPa]
POLIURETANO	Density (Densidad)	1.150 $\frac{Kg}{m^3}$
	Tensile Ultimate Strength (Resistencia a la tracción) (Rm):	69 [MPa]
	Tensile Yield Strength (Esfuerzo de fluencia) (Re):	31 [MPa]
	Compressive Yield Strength	138 [MPa]
	Young's Modulus	0,7 [GPa]

La manera en que se ingresan las propiedades de los materiales se puede ver de forma clara en la Figura 54, en donde se aprecia el ingreso de la densidad (density) con sus respectivas unidades.

Property	Value	Unit
Density	7850	kg m^-3
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modu...	
Young's Modulus	2E+11	Pa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
Field Variables		
Temperature	Yes	
Shear Angle	No	
Degradation Factor	No	

Figura 54: Ingreso de propiedades a los materiales.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Los materiales nuevos quedarán guardados y ordenados como se observa en la Figura 55 y se podrán utilizar una vez finalizado este proceso y cuando se seleccionen los materiales para cada componente (8.1.1.5 Seleccionar Materiales). Para terminar solo se debe cerrar la pestaña “Engineering Data” y volver a la plataforma principal de trabajo.

	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	A36	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	P265GH	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
5	POLIUTERANO	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
6	SAE1020	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Figura 55: Materiales ingresados al Software.

Luego de ingresar los nuevos materiales (Ítem anterior Definir Materiales) al programa “Pres-stres Modal”, se debe actualizar la plataforma presionando con el botón derecho sobre “Model” y seleccionando la opción “Refresh” hasta que cambien las flechas en círculo por un tick verde (ver Figura 47). Ya con esta operación realizada se puede abrir el programa “Model” en el cual se pueden ingresar las condiciones operacionales necesarias que permitan correr de buena manera la simulación.

8.1.1.5 Seleccionar Materiales

Los componentes de la estructura del harnero se forman de materiales disímiles, por lo que se hace necesario, para obtener buenos resultados en la simulación, diferenciar para cada uno el material el material que lo compone. Para esto se ingresó, previamente, en el ítem 8.1.1.4 los materiales que pueden ser asignados a todos los componentes del harnero por lo cual dentro del programa “Model” se pueden usar sin ningún problema.

Para poder seleccionar el tipo de material que corresponde a cada componente se debe ingresar a la opción “geometry” en el programa “Model” (ver Figura 56), en donde al abrirla se desplegará un listado con todos los componentes de la estructura que para este caso son 69, las que se mencionan y explican de manera más profunda en ítem 6.3 (Características de los componentes). Seguido de esto se puede seleccionar cualquiera de ellas, marcándolas con el mouse, y en la ventana inferior aparecerá un listado de opciones en donde se debe seleccionar

“Material” y luego la primera opción “Assignment” en donde se puede cambiar como también introducir un nuevo material como se observa en la Figura 56.

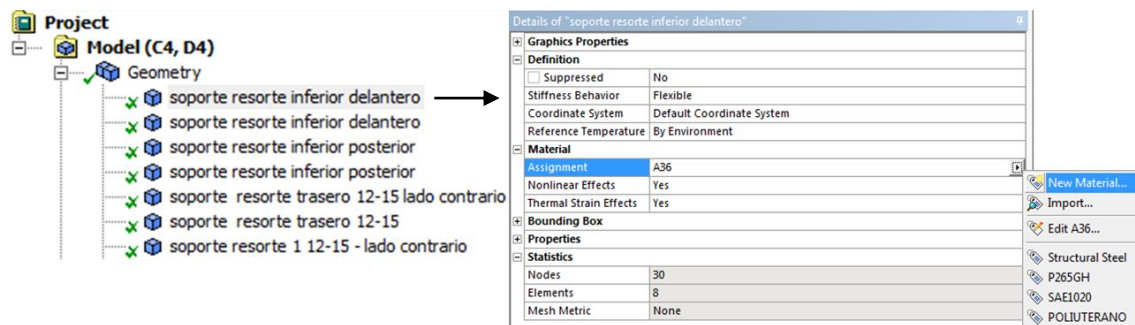


Figura 56: Seleccionar material.

8.1.1.6 Revisar Relaciones de Ensamblado

Ya con el programa “Model” abierto se puede comenzar a ingresar las condiciones operacionales, siendo una de las primeras las relaciones de ensamblado que determinan el comportamiento que tendrán los componentes de la estructura entre sí. Para poder revisarlos e ingresar el tipo de relaciones de ensamblado se debe seleccionar la opción “Connections” y luego abrir la carpeta “Contacts” (ver Figura 57).

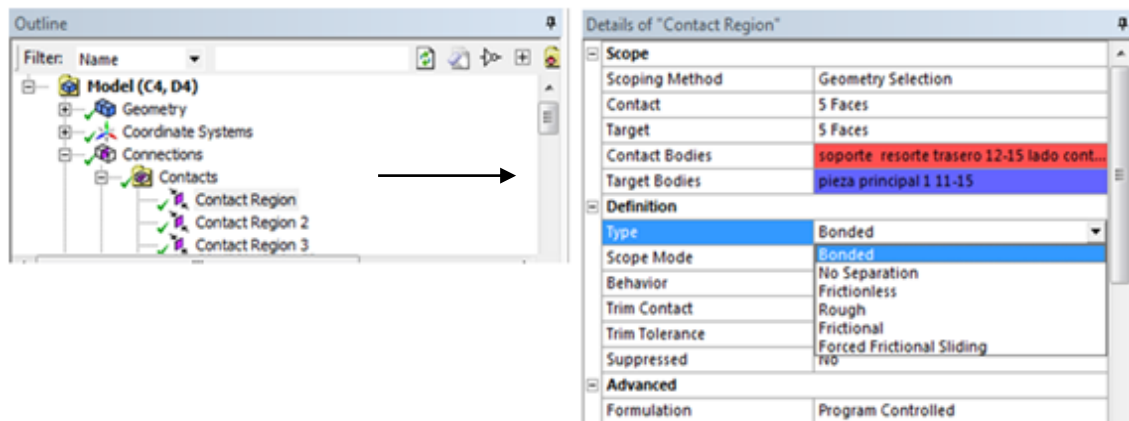


Figura 57: Ingreso de relaciones de contactos.

En seguida al abrir la carpeta “Contacts” aparecerán todas las relaciones que existen entre los componentes de la estructura nombradas como “Contact Region”. Estas relaciones se identifican en la opción “Scope” en donde se señala a la pareja de contacto como “Contact Bodies” y “Traget Bodies” y que identifica como contacto principal a la primera y contacto relacionado a

la segunda. Como ejemplo de esto se puede observar la en donde aparece como contacto principal el soporte resorte trasero y como contacto secundario la pieza principal (ver Figura 57).

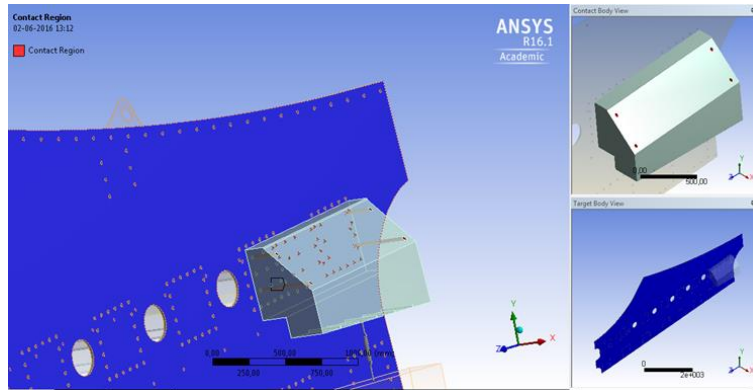


Figura 58: Contacto entre componentes del harnero.

La Figura 58 muestra el contacto asociado para el ejemplo anterior entre el soporte trasero y la pieza principal. En este caso lo más importante es revisar el tipo de contacto que hay entre las estructuras y seleccionar el que sea más apropiado para este caso.

La manera de agregar el tipo de contacto es relativamente simple, debido a que solo se tiene que seleccionar la opción “Definition” (ver Figura 57), esto después de marcar cualquier “Contac region”, y con ello elegir de la sección “Type” el tipo de contacto que sea más conveniente, tipos de contactos que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Tipos de contactos.

Tipo de contacto	Descripción
Unión Rígida (Bonded)	<p>Dos caras (o aristas) in contacto de unión rígida están acopladas entre sí tanto en su dirección tangencial y normal. (21)</p> <p>Ambas superficies se adhieren como pegamento. Ellas no se pueden separar. No permite deslizar. Las superficies estarán juntas independientemente de las diferencias, penetración, sobrecarga y comportamiento de las partes/contactos. Siempre tenemos algunas tolerancias en nuestros diseños. Por ejemplo, puede tener cinco mil de diferencia entre dos partes. Pero si no se quiere mover las partes con respecto a las otras, puedes usar el contacto de unión rígida (bonded contact). No importa cuánto sea la diferencia, si no quieres tener movimiento relativo entre los dos, usa contacto de unión rígida- solo asegúrate que tienes un radio mayor a la diferencia. (22)</p> <p>Éste es un defecto y un tipo lineal de contacto. Tendría el menor tiempo de solución que cualquiera de los otros tipos de contactos. Si se ha configurado ANSYS Mechanical para detectar contactos en la geometría importada, verías contactos de unión rígida presentes donde quiera que haya espacios entre dos partes. Y la especificación de ANSYS para estos contactos es ignorar esos espacios. Éste es un tipo de contacto muy práctico. Si tienes problemas para que la solución converja con cualquiera de los NL contactos, puedes tratar con unión rígida o no separación para solucionar el modelo. (22)</p>
Sin separación (No Separation)	<p>Dos caras (o aristas) en contacto sin separación son acopladas entre sí solamente en dirección normal. La dirección tangencial permite un pequeño desplazamiento entre unos y otros. No contacto lineal se introducen ya que se asume la teoría de desplazamiento pequeño por el deslizamiento (21)</p> <p>Similar al contacto de unión rígida excepto que las superficies permiten deslizar un poco. Eso significa que se permite el movimiento relativo entre las superficies. Use esto cuando estés seguro que las cargas serian siempre tal que las superficies no se separen. Tener en cuenta que el desplazamiento permitido es sin fricción, pero el desplazamiento es muy limitado. (22)</p>
Sin fricción (Frictionless)	<p>Dos caras (o aristas) en contacto sin fricción son libres de separarse. Y, cuando está en contacto, pueden deslizarse en dirección tangencial sin las fuerzas de roce. Este tipo de contacto introduce contactos no lineales. No se asume ninguna teoría de desplazamiento pequeño. (21)</p> <p>Las superficies se pueden separar dependiendo de la carga, pero no deslizar ($\mu = \infty$). (22)</p>
Áspero (Rough)	<p>Dos caras (o aristas) en contacto áspero son libres de separarse. Pero, cuando están en contacto, no pueden deslizar en dirección tangencial, debido a la gran fricción entre ellos. Este tipo de contacto también introduce contactos no lineales. No se asume ninguna teoría de desplazamiento pequeño. (21)</p> <p>Las superficies pueden deslizarse libremente ($\mu = 0$) y los contactos pueden abrir y cerrar dependiendo de la carga. Bajo modelos con</p>

	restricciones se pueden generar errores de cuerpo rígido. No solamente en éste, pero cualquier contacto NL se le permite separar. (22)
Por fricción (Frictional)	<p>Dos caras (o aristas) en contacto por fricción sol libres de separarse. Pero, cuando están en contacto, pueden deslizarse solamente cuando el esfuerzo de cizalle entre ellos excede un valor crítico. Calculado multiplicando el esfuerzo normal con un coeficiente de fricción, que se introduce como una propiedad de contacto. Este tipo de contacto también introduce contactos no lineales. No se asume ninguna teoría de desplazamiento pequeño. (21)</p> <p>Las superficies permiten deslizar con un coeficiente de fricción definido (μ = definido) y puede abrir y cerrar. Esto es real como tener dos superficies deslizantes una contra otra. El desplazamiento se producirá después de la resistencia de umbral (valor de tensión de esquileo dependiendo μ). 0,2 es considerado como el 'número mágico' mundo FEA. Convergería a cualquier μ por debajo de este valor fácilmente (22).</p> <p>Tenga en cuenta que, en todos los contactos de NL, caso de contacto de carga y rigidez derivada en un momento deciden el comportamiento de contacto. Y por lo tanto es muy importante limitar el modelo muy bien. En caso de tener problemas converge a una solución, utilice el tipo de contacto lineal. Hay otras técnicas como cambiar FKN, FTOLN, FKT, actualización de rigidez cada iteración, aplicando cargas lentamente etc. (22)</p>
Deslizamiento friccionado forzado (Forced Frictional Sliding)	Similar al contacto por fricción excepto que no hay estado “pegado”; i. e. Dos caras (o aristas) en contacto con deslizamiento cuando el esfuerzo de cizalle está bajo del valor crítico. (21)

Para el caso del harnero vibratorio R-MD se utilizará el tipo de contacto de unión rígida (bonded), esto debido a que todas las partes que componen la estructura están asociadas de manera solidaria eliminando cualquier tipo de desplazamiento entre ellas.

8.1.2 Generación de Malla

El software ANSYS Workbench contiene dentro de toda su gama de programas el “Mech” incluido, especializado en el diseño de mallas, que puede ser utilizado de forma individual en la ventana de trabajo, como también está contenido dentro de la mayoría de los programas de análisis de elementos finitos. Debido a esto último, no es necesario abrir el programa “Mesh” en el caso que se esté trabajando con “Static Structural”, ya que éste lo contiene. Para el estudio del harnero vibratorio R-MD se puede realizar el mallado dentro del programa “Model” como se puede observar en la Figura 59.

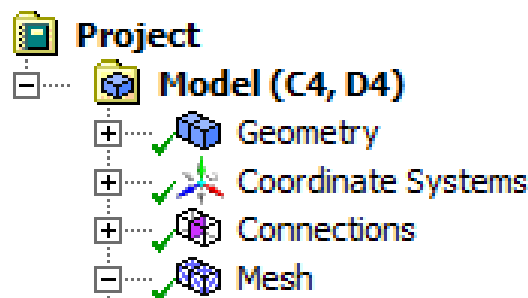


Figura 59: Generación de mallado.

La manera de generar un mallado conveniente para el estudio del harnero se expondrá en los siguientes ítems.

8.1.2.1 Agregar tamaño de elemento para componentes de bajo interés.

Una de las formas más eficientes para elaborar un buen mallado en ANSYS se realiza a través de la diferenciación del tamaño de elementos, para los componentes que tienen mayor y menor relevancia, y así obtener resultados más precisos para aquellas zonas que sean de más interés. Lo importante de esto es que al aumentar/disminuir el tamaño de los elementos en algunas zonas evitas, en el caso de aumentar, que el software realice mayor cantidad de cálculos en aquellos lugares que no presentan mayor importancia para el análisis; y al disminuir el tamaño de elementos aumentas la cantidad de cálculos en la zona que presenta mayor importancia para el análisis final.

La forma en que se puede agregar un tamaño específico a alguna zona de la estructura es presionando el botón derecho sobre la opción “Mesh” en el programa y seleccionando “Body Sizing”. Luego aparecerá en la parte inferior los detalles a ingresar para éste, como se puede ver en la Figura 60 en donde se debe seleccionar en la parte de “Geometry” los componentes que se quiere diferenciar el tamaño de elementos.

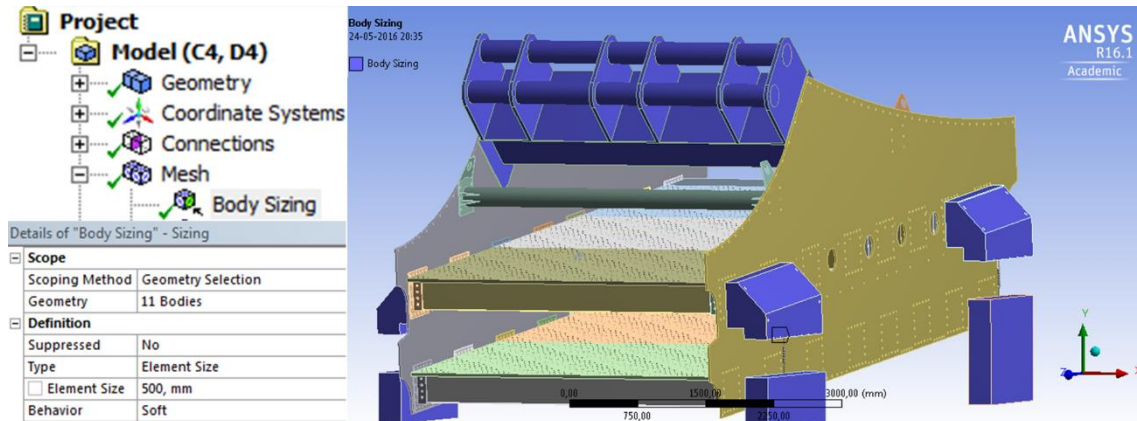


Figura 60: Ingresar tamaño de elemento para zonas de bajo interés.

En el caso de los componentes que no representan interés para los cálculos son 11, los 8 soportes que están al costado de las placas principales y los 3 elementos que componen la viga madre, y con ello se define el tamaño en la opción “Element Size”, en este caso será de 500 mm, y por último se cambia de “Soft” a “Hard” el comportamiento de ésta en la opción “Behavior” (ver Figura 60), esto para que le mallado no sea tan suave en estas zonas.

8.1.2.2 Agregar tamaño de elementos para componentes de mayor interés.

De manera similar a la utilizada en el ítem anterior (8.1.2.1) se diferencian las componentes de la estructura de mayor interés en donde se seleccionan 4, que son las dos placas laterales y las vigas de descanso (ver Figura 61). Éstas son elegidas debido a las tasas de fallas que presentan para este tipo de equipos.

Los valores que se ingresarán para este “Body Sizing” será un tamaño de elemento de 20 [mm] (Element Size) y además se selecciona la opción “Soft”, a diferencia del cálculo de las componentes de menor interés, para el comportamiento del mallado (Behavior) en la zona escogida.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

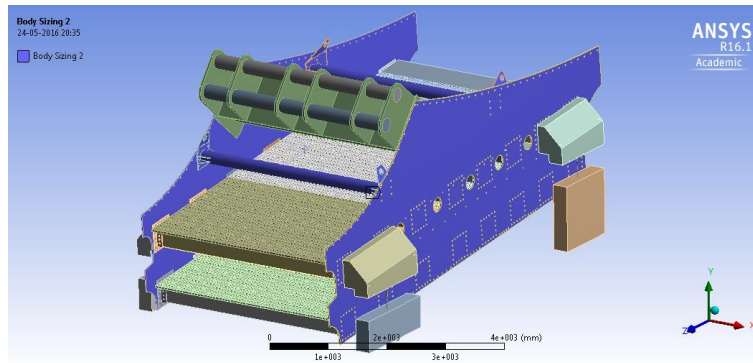


Figura 61: Componentes que son de mayor interés para el mallado.

8.1.2.3 Ingresar condiciones generales para crear la malla

Al finalizar el proceso de diferenciación de tamaños de elementos se deben ingresar las condiciones generales que sean más convenientes para el desarrollo de la malla. Para esto se puede observar en la Tabla 5 las opciones que se deben cambiar y en el ítem que se encuentran.

De los 61 elementos que componen el equipo vibratorio solo en 15 se ha diferenciado su tamaño de elementos, por lo que se debe ingresar un tamaño para el resto de las 69 componentes, en donde el tamaño de elementos de las mallas es la que rige a los demás componentes, las que para este estudio no presentan mayor relevancia.

El tamaño de elementos de la malla de harneado rige el de los 54 restantes, esto con el fin de no tener problemas al acoplar las cargas provenientes desde el programa Rocky al ANSYS Workbench se debe definir el mismo tamaño de elementos. Para esto se ha definido un tamaño de 100 [mm] (ver Tabla 5) con el objetivo de no tener muchos nodos y elementos, pero a la vez no tener un tamaño grande de elementos.

Al terminar se debe hacer click con el botón derecho del mouse en la opción “Mesh” (ver Figura 60), seleccionar “Generate Mesh” y esperar hasta que el programa termine de crear la malla.

Tabla 5: Datos ingreso de condiciones de malla.

Details of “Mesh”			
Display		Patch Conforming Options	
Display Style	Body Color	Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Defaults		Patch Independent Options	
Physics Preference	Mechanical	Topology Checking	No
Relevance	0	Advanced	
Sizing		Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Use Advanced Size function	Off	Shape Checking	Standard Mechanical
Relevance Center	Medium	Element Midside Nodes	Dropped
Element Size	100,0 mm	Straight Sided Elements	
Initial Size Seed	Active Assembly	Number of Retries	Default (4)
Smoothing	Medium	Extra Retries For Assambly	Yes
Transition	Fast	Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Span Angle Center	Medium	Mesh Morphing	Disabled
Minimum Edge Length	6,8082e-002 mm	Defeaturing	
Inflation		Pinch Tolerance	Please Define
Use Automatic Inflation	None	Generate Pinch on Refresh	No
Inflation Option	Smooth Transition	Automatic Mesh	On
Transition Ratio	0,272	Defeaturing Tolerance	Default
Maximum Layers	5	Statistic	
Growth Rate	1,2	Nodes	715.200
Inflation Algorit	Pre	Elements	1.051.458
View Advanced Options	No	Mesh Metric	None

La malla del harnero vibratorio creada con las condiciones observadas en la Tabla 5 será el mismo modelo para todas las simulaciones de este estudio, es decir se estandarizará esta malla para los cálculos con las cargas puntuales y los cálculos con las cargas provenientes del programa Rocky. Esta malla tendrá una cantidad definida de nodos y elementos, 715.200 y 10.051.458 respectivamente, la cual servirá para revisar que en todas las simulaciones se esté trabajando con la misma malla. La malla estandarizada se puede ver en la Figura 62 y en la Figura 63, en donde se hace un plano general isométrico de la malla del harnero completo en la primera y en la segunda un plano cercano isométrico de la malla del harnero completo.

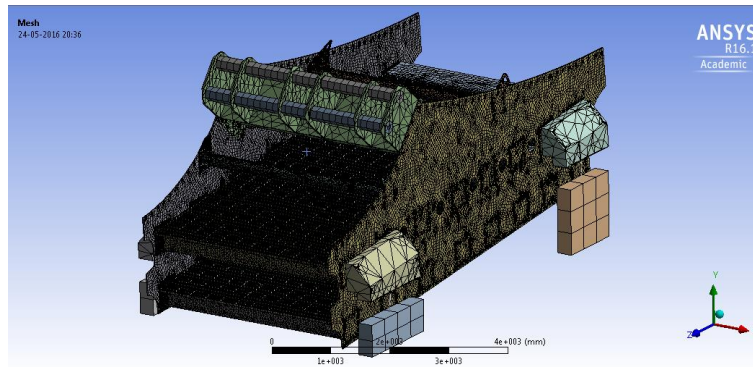


Figura 62: Vista isométrica malla del harnero.

La malla finalizada muestra la forma en que se diversifican los diferentes tipos de Sizing que se agregaron en los ítems 8.1.2.1 y 8.1.2.2 y esto se puede observar de forma clara en la Figura 63, en donde se puede distinguir la diferencia de tamaño entre la malla de la placa lateral, viga madre y la malla de harneado (20 [mm], 500 [mm], y 100 [mm] respectivamente).

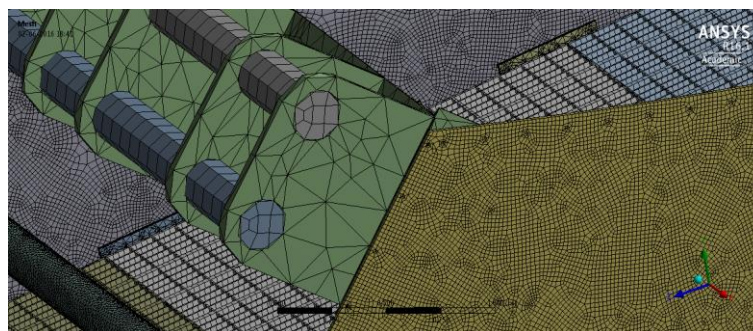


Figura 63: Vista isométrica (zoom) malla del harnero.

8.1.3 Ingresar Condiciones de Contorno

Al finalizar el proceso de mallado se puede comenzar a trabajar directamente con los programas de análisis estructural, que para este caso serán “Static Structural” y “Modal” para algunos casos, y con ello ingresar las condiciones de contorno que afectan a la estructura en un ambiente de trabajo normal.

La diferencia al utilizar el sistema múltiple (Static Structural y Modal) y solo el sistema “Static Structural” se centra en el hecho que el primero se puede utilizar con cargas ingresadas al software y no cargas acopladas provenientes de Rocky. Es por lo mencionado antes que los resultados de análisis modal serán solamente para las simulaciones con cargas ingresadas de forma intuitiva.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

8.1.3.1 Soporte de la Estructura

Al observar al equipo vibratorio en la ventana del programa “Model” (ver Figura 50), se puede distinguir a simple vista que se encuentra flotando en el vacío, por lo que se debe fijar a algún soporte para que éste emule la superficie del suelo en donde éste estaría trabajando. Es por ello que dentro de la gama de funciones de ANSYS existe la opción “Fixed Support” la cual permite como su nombre lo dice un soporte fijo a la estructura.

Los cuatro soportes inferiores son los que en la realidad estarían en contacto con el piso de la planta de molienda por lo que se seleccionan sus caras inferiores, y presionando el botón derecho se debe ingresar “Fixed Support” y éste aparecerá como se observa en la Figura 64.

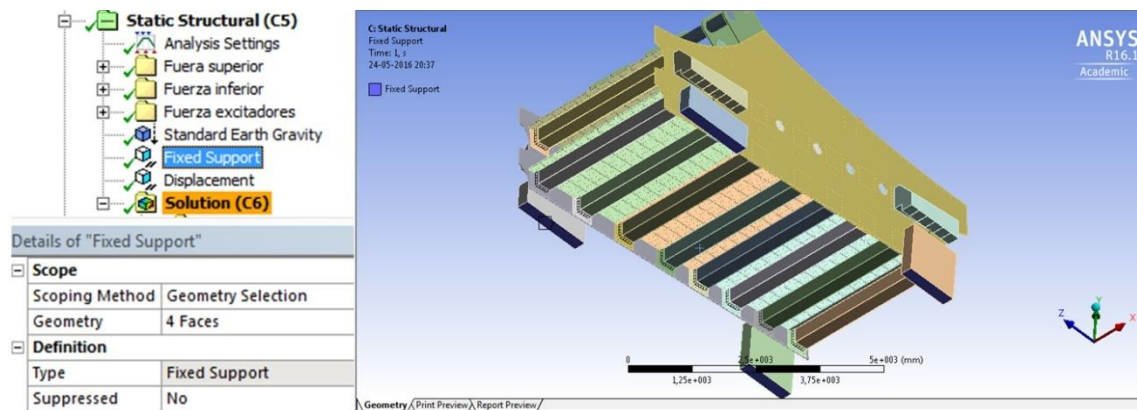


Figura 64: Ingreso del soporte para el equipo.

8.1.3.2 Ingresar Restricciones de Movimientos

En el ítem anterior se definió el soporte de la estructura que la restringe en un espacio fijo, es decir, fija el harnero a la superficie en donde sus soportes inferiores quedan apostados y con ello le brindan el apoyo necesario, pero como se observa en la Figura 64 el equipo se encuentra separado en dos partes; la superior que contiene la mayoría de sus componentes, 65 piezas; y la inferior que contiene los 4 soportes que fijan la estructura a la superficie. Las dos partes del harnero se encuentran separadas debido a que en ese espacio deberían ir una cama de resortes, 24 resortes, que amortiguan los movimientos y las cargas que se generan en la operación de selección de mineral.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

El software ANSYS Workbench dentro de sus funciones contiene una opción para integrar resortes (Spring) al modelo CAD lo que facilita mucho el cálculo, debido a que solo se debe ingresar la constante de rigidez y definir su ubicación para obtener éste.

La forma de utilizar esta función es yendo a la opción "Connections" y seleccionando en la parte superior de la ventana del "Model" las dos alternativas que existen para insertar resortes, las que son "Body-Ground" y "Body-Body", la primera fija un extremo del resorte a una cara del equipo y la otra a un punto en el espacio, y la segunda fija ambos extremos a dos caras del equipo (ver Figura 65). Seguido de esto se debe seleccionar las o la superficie que se fijará un extremo del resorte y la otra cara o espacio donde estará fijado el extremo restante.

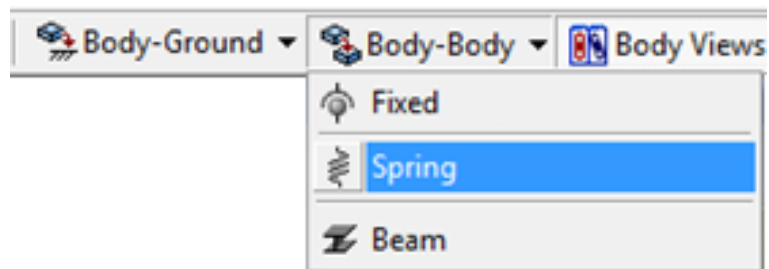


Figura 65: Ingresar Spring al harnero de descarga.

Para el cálculo del harnero vibratorio se ha seleccionado dos opciones a seguir con respecto a los resortes, la primera tiene que ver con el uso de todos los resortes con los que trabaja el equipo, 24 para este caso, y la otra es realizar un cálculo de los resortes equivalentes y utilizar solamente uno en cada soporte del harnero, 4 en total.

Por último, cabe destacar que el resorte (Spring) que proporciona el programa ANSYS Workbench trabaja de forma unidireccional, es decir, su constante trabaja solo en la dirección que se establezca discriminando el accionar que se puede generar con el desplazamiento axial de éstos, es por ello que para cubrir los distintos ejes se calculó en el ítem 5.2 la rigidez en la dirección vertical como también en la dirección transversal. Debido a lo mencionado por cada resorte que se instale se instalarán también sus componentes transversales (x, z).

Resortes

-Sostenido con 24 resortes verticales.

Según el estado natural de operación de estos equipos las camisas de resortes en las que se sostiene la parte superior del harnero está subdividida en 4 grupos de resortes; donde los delanteros son dos grupos de 7 resortes, uno a cada lado, y los posteriores son grupos de 5 resortes. Para el análisis se diseñó previamente en el CAD las ranuras necesarias para insertar los resortes a una distancia equidistante uno con otro y así facilitar la simulación como se ve en la Figura 66.

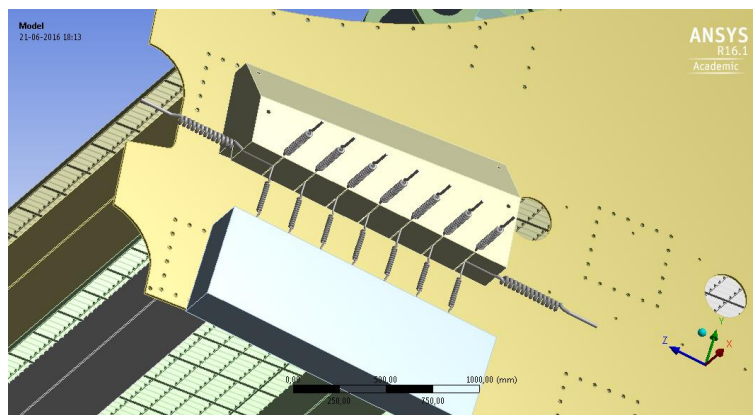


Figura 66: Componentes verticales y transversales para el caso de 24 resortes.

Para las componentes verticales del resorte se pueden ingresar al utilizar la función “Face” se puede escoger la cara que está dentro en la parte superior de la ranura y con ello el software reconoce como el centro de la cara el lugar donde irá el extremo superior del resorte. El otro extremo se fija seleccionando la cara del soporte inferior que al no tener una ranura que guíe escoge el centro de toda la cara para fijar el extremo inferior, pero esto no es lo que se espera debido a que los 7 resortes deben estar des forma perpendicular a la superficie superior (ver Figura 66), es por esto que se debe copiar las coordenadas (x, y) del extremo superior y reemplazarlo en las coordenadas del extremo inferior. (notar que el tamaño para este caso después de fijar ambos extremos debe ser 422 [mm])

Tabla 6: Ingresar Spring coordenada Y.

Extremo fijo al harnero		Extremo fijo a la coordenada	
Reference		Mobile	
Scope	1 Face	Scope	1 Face
Body	Soporte resorte 1	Body	Soporte inferior
Coordinate System	Global Coordinate System	Coordinate System	Global Coordinate System
Reference x Coordinate	-57,0 mm	Reference x Coordinate	-57,0 mm
Reference y Coordinate	152,2 mm	Reference y Coordinate	-269,8 mm
Reference z Coordinate	424,83 mm	Reference z Coordinate	424,83 mm

Para las componentes transversales de los resortes se utilizó la opción “Body-Ground” en donde un extremo se fija al soporte superior y el otro a unas coordenadas que permitan que el resorte tenga la dimensión y dirección correcta. Para esto al igual que los resortes verticales, los transversales correspondientes a la coordenada x, son 7 y el correspondiente a la coordenada z corresponde a un equivalente de 2 resortes. Los resortes correspondientes al eje x se fijan a la misma ranura y en la misma cara que los del eje y, cara superior de la ranura ver Figura 66, con la diferencia que el otro extremo se fija de acuerdo a las coordenadas ingresadas de forma manual. Las coordenadas para el extremo libre para el caso del eje x se fija copiando las mismas coordenadas z e y desde el extremo que está fijado al soporte superior y la coordenada x se calcula sumando el valor que aparece en el extremo superior más el largo del resorte, 422 [mm], y además se agrega el valor del coeficiente elástico para este eje x (ver Tabla 7).

Tabla 7: Ingresar Spring coordenada X.

Extremo fijo al harnero		Extremo fijo a una coordenada	
Reference			
Scope	1 Face		
Body	Soporte resorte 1		
Coordinate System	Global Coordinate System	Coordinate System	Global Coordinate System
Reference x Coordinate	-57,0 mm	Reference x Coordinate	365,0 mm
Reference y Coordinate	152,2 mm	Reference y Coordinate	152,2 mm
Reference z Coordinate	424,83 mm	Reference z Coordinate	424,83 mm

La forma de ingresar la coordenada z se realiza calculando la constante equivalente para la cantidad de resortes que estén en cada soporte. Como estos resortes trabajan en compresión se deben instalar dos resortes uno en cada extremo del soporte en las ranuras más cercanas los costados de éstos (ver Figura 66).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

El extremo de los dos resortes que se instala a cada soporte superior del harnero para la componente z se deben fijar en la cara vertical interna de las ranuras más próximas a cada extremo de éstos con su componente de coeficiente de elasticidad equivalente calculada en el ítem 5.2.1. Luego de ingresar el coeficiente de elasticidad y fijar el extremo de los resortes a los soportes superiores se deben copiar las coordenadas x e y en el extremo libre y sumar la longitud del resorte a la componente z (422 [mm]) como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8: Ingresar Spring coordenada Z.

Extremo fijo al harnero		Extremo fijo a una coordenada	
Reference			
Scope	1 Face		
Body	Sopte resorte 1		
Coordinate System	Global Coordinate System	Coordinate System	Global Coordinate System
Reference x Coordinate	-57,0 mm	Reference x Coordinate	-57,0 mm
Reference y Coordinate	152,2 mm	Reference y Coordinate	152,2 mm
Reference z Coordinate	424,83 mm	Reference z Coordinate	846,83 mm

-Sostenido con 4 resortes verticales.

Con el objetivo de estudiar el comportamiento del software ANSYS Workbench para simulaciones que contuvieran grandes cantidades de resortes se redujo la cantidad de resortes verticales a cuatro en vez de los 24 que son en la realidad. Los cuatro resortes verticales se distribuyen entre los cuatro soportes que tiene el harnero, calculando cada uno de éstos como un equivalente de 7 resortes en paralelo para los soportes delanteros y 5 resortes en paralelo para los posteriores.

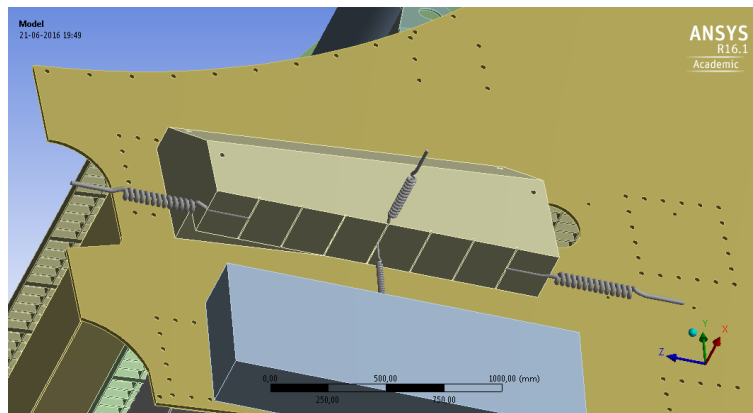


Figura 67: Componentes verticales y transversales para el caso de 4 resortes.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

8.1.3.3 Ingresar y orientar la Fuerza de Gravedad

La manera de ingresar e orientar la fuerza de gravedad es muy simple dentro del programa “Static Structural”, esto debido a que solo se debe presionar con el botón derecho del mouse en la carpeta verde de “Static Structural (C5)” y seleccionar la opción “Estándar Earth Gravity”.

El valor de la fuerza de gravedad viene predeterminado ($9,81 \text{ m/s}^2$) y solo se debe ingresar la dirección en cual se aplicará al modelo CAD, que para este caso es en la dirección “-y”. La fuerza de gravedad como se puede observar en la Figura 68 se ubica en la zona correspondiente al centro de masa del equipo.

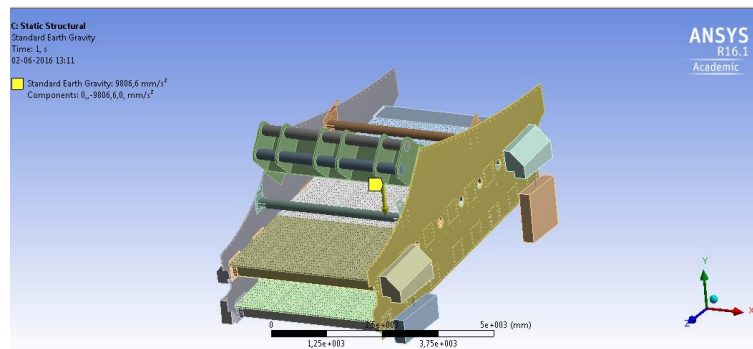


Figura 68: Ingreso fuerza de gravedad.

8.1.3.4 Cargas y Momentos Generados por los Excitadores

Cargas

Las fuerzas que ejercen los excitadores sobre el harnero para inducir el movimiento oscilatorio de éste se aplican en la viga madre como se observa en la Figura 69. Estas cargas se ingresan al modelo marcando la opción “Static Structural” con el botón derecho del mouse y luego seleccionando “Remote Force”, donde se escoge la dirección y se ingresan los datos tabulados de la fuerza, datos obtenidos en el ítem 5.1.3.3 Cargas y Momentos producidos por los excitadores.

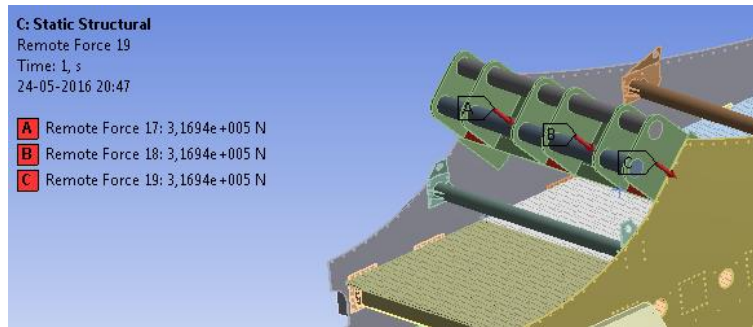


Figura 69: Cargas generadas por los Excitadores.

Momentos

Los excitadores además de generar las cargas excéntricas que dan el movimiento ondulatorio al harnero, generan momentos en los ejes que sostienen los pesos. Estos momentos vienen dados por el proveedor de estos equipos excitadores y van directamente relacionados con las revoluciones.

Los valores que se deben ingresar para los momentos se pueden obtener en el ítem 5.1.3.3, en donde se especifican las características principales de los excitadores. Para ingresar los momentos se debe realizar la misma operación que se hizo para las fuerzas, pero en vez de seleccionar “Remote Force” se selecciona “Moment”.

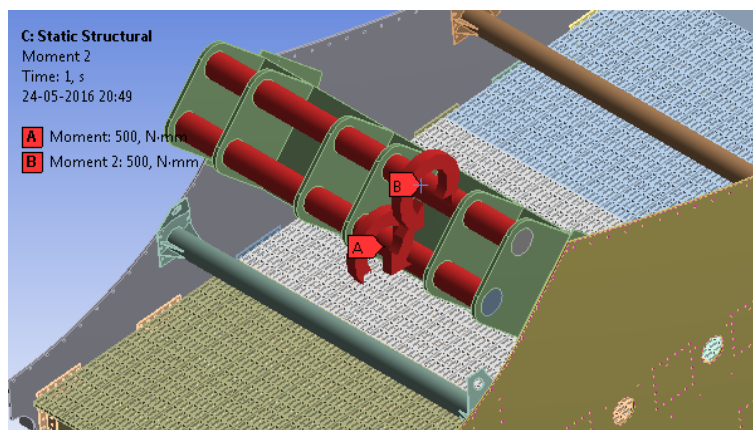


Figura 70: Momentos generados por los excitadores.

8.1.3.5 Cargas Generadas por el Mineral

Las cargas que genera el mineral al pasar sobre la estructura del harnero fueron modeladas en el capítulo 5, más bien en el apartado 5.1, en donde se formularon las ecuaciones que gobiernan este fenómeno de manera empírica. Estas ecuaciones dividen en zonas la cama de harneado del harnero en zona de mayor y zona de menor tensión, siendo la caída del mineral proveniente del trommel la de mayor impacto. Como se especifica en el ítem 5.1 las fuerzas se dividen entre los tercios de la cama de harneado, por lo que se debe ingresar de acuerdo a esto las fuerzas al software de modelación.

La manera de ingresar las fuerzas que ejerce el mineral al programa ANSYS es a través de la opción “Force”, que aparece en la misma opción donde se ingresa “Remote Force” y “Moment”, en donde se debe especificar el valor, la dirección y el lugar donde serán aplicadas. Para facilitar la aplicación de estas fuerzas serán seleccionadas las caras superiores de las vigas que soportan la malla para proyectar las fuerzas, es decir, de las 16 vigas que soportan los dos niveles de la malla de harneado se proyectaran las fuerzas calculadas en el ítem 5.1, dejando las primeras tres barras para el primer tercio y las siguientes 5 para los dos tercios restantes.

Para ver la distribución de cómo se deben ingresar las fuerzas, se debe revisar la Figura 26 del apartado 5.1.3.2.

8.1.3.6 Criterio de Diseño Utilizado en ANSYS

El comportamiento del metal estructural se clasifica de manera típica como dúctil o frágil, para los cuales existen diversas teorías de fallas. En el caso de este trabajo el material usado es el acero estructural ASTM A36 clasificado como dúctil, por lo que en primera instancia se evalúa la condición estática bajo dos teorías de fallas (esfuerzo cortante máximo (ECM) y Von Mises), las cuáles se han comprobado que dan excelentes resultados en materiales dúctiles cuando las resistencias en tracción y compresión son similares (23).

- **Teoría de Von Mises**

$$\sigma_{VM} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{2}$$

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

donde,

σ_{VM} es el esfuerzo de Von Mises y $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ son los esfuerzos principales.

Incorporando un factor de seguridad,

$$\sigma_{VM} = \frac{S_y}{\eta},$$

donde, S_y es la resistencia a la fluencia del material y η es el factor de seguridad en carga estática.

- **Teoría de Esfuerzo cortante máximo (ECM)**

El esfuerzo cortante máximo ocurre a 45° de la superficie en tensión simple siendo un criterio conservador donde,

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2}$$

Incorporando un factor de seguridad,

$$\tau_{max} \geq \frac{S_y}{2n}$$

- **Fatiga**

Debido a que el harnero en estudio está sometido a la acción de cargas dinámicas generadas por el accionamiento del eje motriz con los contrapesos, es necesario incorporar un criterio de falla dinámico, para lo cual se evalúa la falla por fatiga presentando los resultados mediante un factor de seguridad.

La falla por fatiga es producida por esfuerzos repetidos o fluctuantes que varían con el tiempo cuyas magnitudes son inferiores a la resistencia última del material e incluso menores que la resistencia de fluencia (23).

En el análisis se utiliza el criterio de falla de Soderberg por ser el más conservador relacionado con este tipo de falla, por lo que entrega el factor de seguridad más bajo y se expresa como sigue,

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{s_y} = \frac{1}{n}$$

donde,

σ_a : Esfuerzo alterno

σ_m : Esfuerzo medio

S_e : Límite de resistencia a la fatiga

El factor de seguridad tiene que ser $n > 1$ para la estructura satisfaga el criterio de diseño para vida infinita y no se genere la falla antes del millón de ciclos.

El giro del eje motriz da origen a cargas de inversión completa las cuales se incorporan en ANSYS mediante una función sinusoidal mostrada en la Figura 71, la cual oscila en intervalo cerrado de [-1,1], haciendo cambiar el signo de los esfuerzos (24).

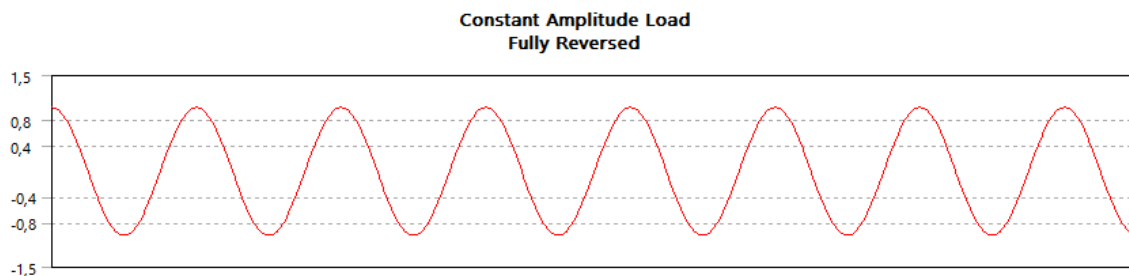


Figura 71: Curva de variación de las cargas aplicadas al harnero.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

El programa ANSYS permite incorporar tres criterios de falla por fatiga (Goodman, Gerber, Soderberg), siendo el criterio de Soderberg usado para mostrar los resultados por ser el criterio de falla más conservador y entregar el factor de seguridad más bajo (24). En la Figura 72 se muestra la curva del criterio adoptado por el software.

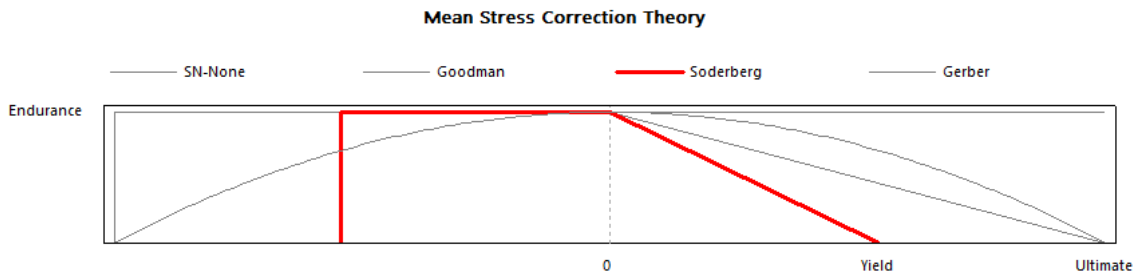


Figura 72: Curva correspondiente a la teoría de falla de Soderberg.

La siguiente tabla muestra algunos factores de seguridad sugeridos por el libro de diseño mecánico J. Shigley, los cuales se pueden utilizar como guía para la evaluación de los valores para los factores de seguridad obtenidos.

Tabla 9: Valores sugeridos por J. Shigley para factores de seguridad.

Tipo de Carga	Acero, metales dúctiles		Hierro Fundido, Metales quebradizos	Madera de construcción
	Basado en la resistencia máxima	Basado en la resistencia de la fluencia	Basado en la resistencia máxima.	
Carga permanente	3 - 4	1,5 - 2	5 - 6	7
Repetida, una dirección, gradual (Choque suave)	6	3	7 - 8	10
Repetida, invertida, gradual (choque suave)	8	4	10 - 12	15
Choque, impacto	10 - 15	5 - 7	15 - 20	20

8.1.4 Ingresar Solución

La manera de ingresar las soluciones en el programa ANSYS es similar para ambos casos, caso estático y el caso modal, solo se deben ingresar al seleccionar la opción “Solution (C6)” con el botón derecho del mouse y con ello seleccionar el tipo de solución que sea apto para cada caso.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

8.1.4.1 Static Structural

La manera de ingresar las soluciones para el modo “Static Structural” en el programa ANSYS es a través de 4 variables: deformación total, esfuerzo equivalente, factor de seguridad estático y factor de seguridad dinámico (componentes críticos).

- Deformación total: esta variable indica la deformación total máxima que experimenta la estructura.
- Esfuerzo equivalente: éste se emplea para tener una idea de cómo es el estado tensional al que está sometido el sólido. Dentro del programa se encuentran varias opciones de teorías de fallas para trabajar siendo el criterio de Von Mises escogido para este cálculo.

En Figura 73 se puede observar el menú de ingreso del esfuerzo equivalente, el cual al seleccionarlo se deben ingresar la o las piezas a analizar.

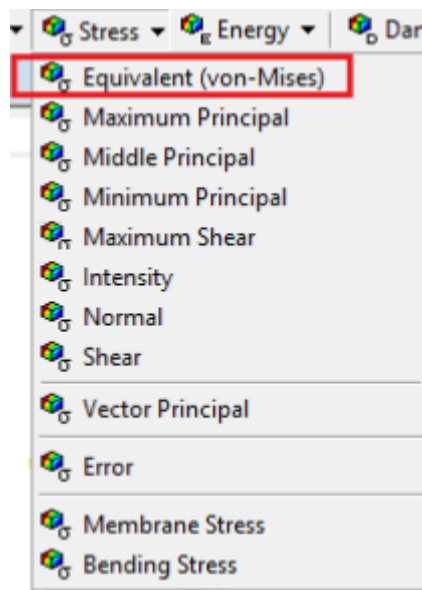


Figura 73: Menú de la aplicación de esfuerzos Von Mises.

- F.S. estático y dinámico: es el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometido para el caso estático y para el caso dinámico. Según el caso se debe ingresar el factor de seguridad al seleccionar las opciones “Stress Tool” y “Fatigue Tool” para el caso estático y el caso dinámico respetivamente.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

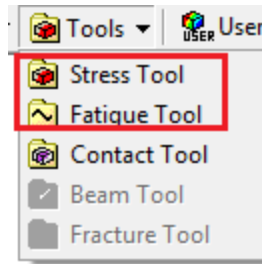


Figura 74: Menú para la selección de F.S. estático o dinámico (fatiga).

8.1.4.2 Modal

El ingreso de las soluciones para el modelo “modal” es diferente al del modelo “Static Structural”, debido a que éste primero permite el ingreso de deformaciones (total y direccionales) y los factores de seguridad correspondientes. La deformación total es la más representativa para este tipo de análisis ya que nos muestra cómo se deforma la estructura para cada módulo.

8.2 Resultados (Static Structural)

El análisis de los resultados como fue mencionado en los ítems anteriores se realizó para la estructura completa del harnero, y para los componentes críticos que indican los informes de fallas de estos equipos.

Los resultados entregados son para un rango de producción que va desde el trabajo sin mineral hasta las 1500 toneladas por hora, que permite observar el comportamiento de este equipo en función del cambio de flujo de mineral.

Se compara también en estos resultados el impacto que tiene para la simulación la cantidad de resortes que se apliquen en el software de trabajo, es decir, cómo varían los resultados en función de la cantidad de resortes que se utilicen.

Se utilizó la teoría de falla de Von Mises para los análisis de los esfuerzos y los factores de seguridad estáticos, mientras que para los análisis de los factores de seguridad dinámicos se utilizó el criterio de Soderberg.

8.2.1 Análisis I: Harnero completo

El equipo se analizó de forma completa rescatando solamente la deformación total máxima, debido a que los esfuerzos se concentraban en los elementos que serán analizados más adelante (vigas y placas laterales).

8.2.1.1 Deformación total máxima

La variación que experimenta la deformación total máxima en relación al flujo del mineral se puede observar en el Gráfico 5 como una recta para ambos casos, 24 resortes y 4 resortes. Estas rectas a simple vista parece que se comportasen de forma paralela, pero hay una pequeña diferencia en sus pendientes que hace que la recta inferior, 24 resortes, crezca un 10 % más en comparación a la superior de 4 resortes

Al analizar estos resultados se puede estimar que el cambio de la deformación para los casos de 24 resortes y 4 resortes es de 13,5 % y 14,5 % respectivamente, es decir, la variación que sufre la deformación total máxima del harnero completo entre 0 y 1500 toneladas está dentro del rango de 13 a 15 %.

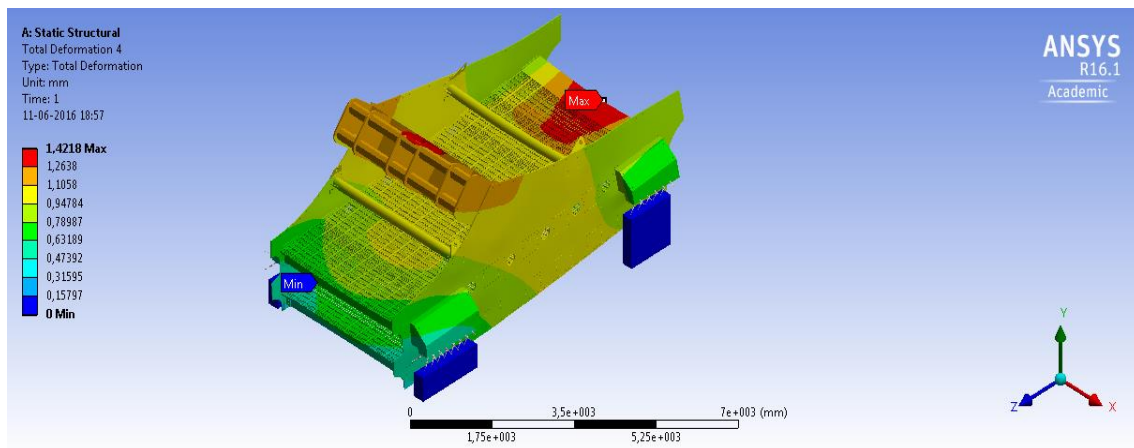


Figura 75: Deformación total máxima harnero completo.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

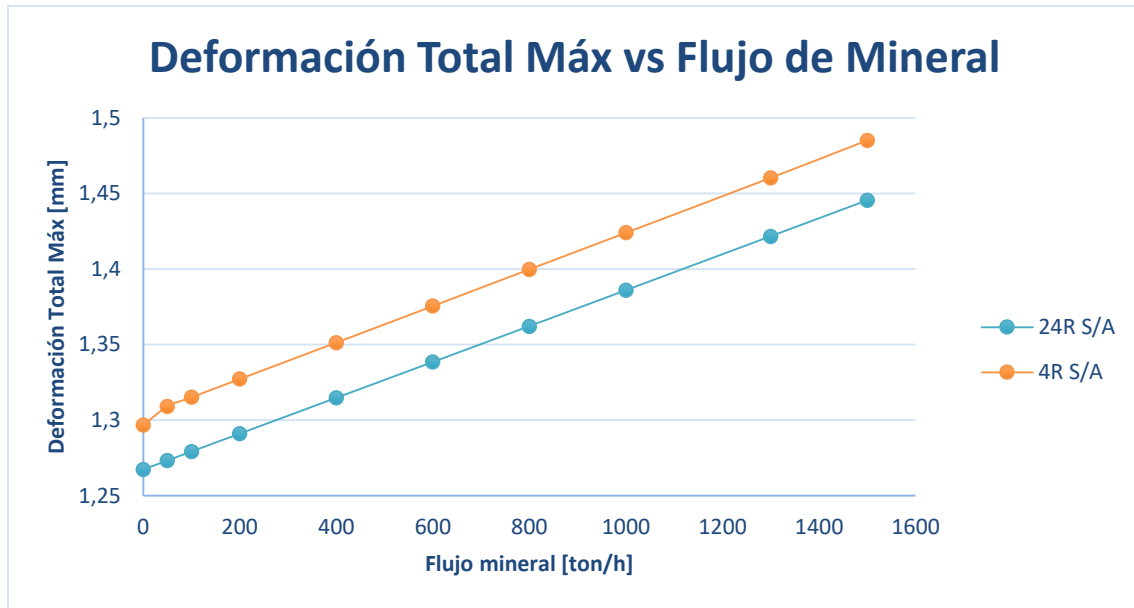


Gráfico 5: Deformación total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (harnero completo).

8.2.2 Análisis II: Harnero sin Malla

A diferencia del análisis anterior al harnero completo se le sacó la malla de harneado, debido a que está concentraba la mayoría de la deformación total máxima. De esta forma se estudia la deformación para la estructura base del harnero manteniendo las mismas condiciones de contorno.

8.2.2.1 Deformación total máxima

La variación de la deformación total máxima al igual que caso del harnero completo se comporta de forma lineal (Gráfico 6). La relación entre las rectas, 4 resortes superior y 24 resortes inferior, tiende a ser paralelas, pero al igual que en el ítem anterior la pendiente de la recta inferior crece en un 2% más que la pendiente de la recta superior.

El cambio de la deformación total máxima al ser sus pendientes similares también tiende a ser idéntico para ambos casos y a diferencia del caso anterior, harnero completo, mayor. Para el caso de 4 resortes el cambio entre la deformación al no pasar mineral y al pasar 1500 toneladas hora es cercano al 17,4% y para el caso de 24 resortes entre el mismo rango de flujo de mineral tiene un valor de 17,7%.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

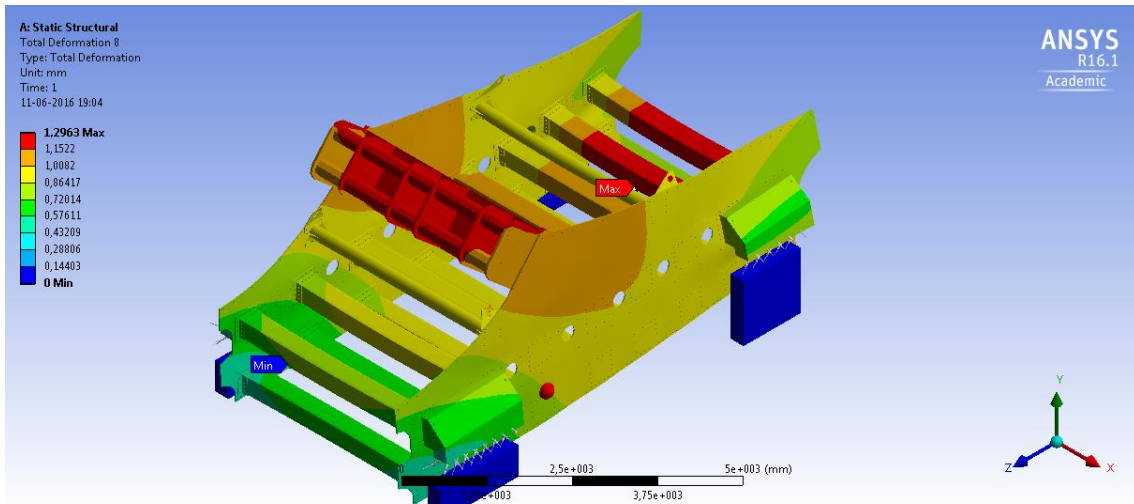


Figura 76: Deformación total máxima harnero sin malla.

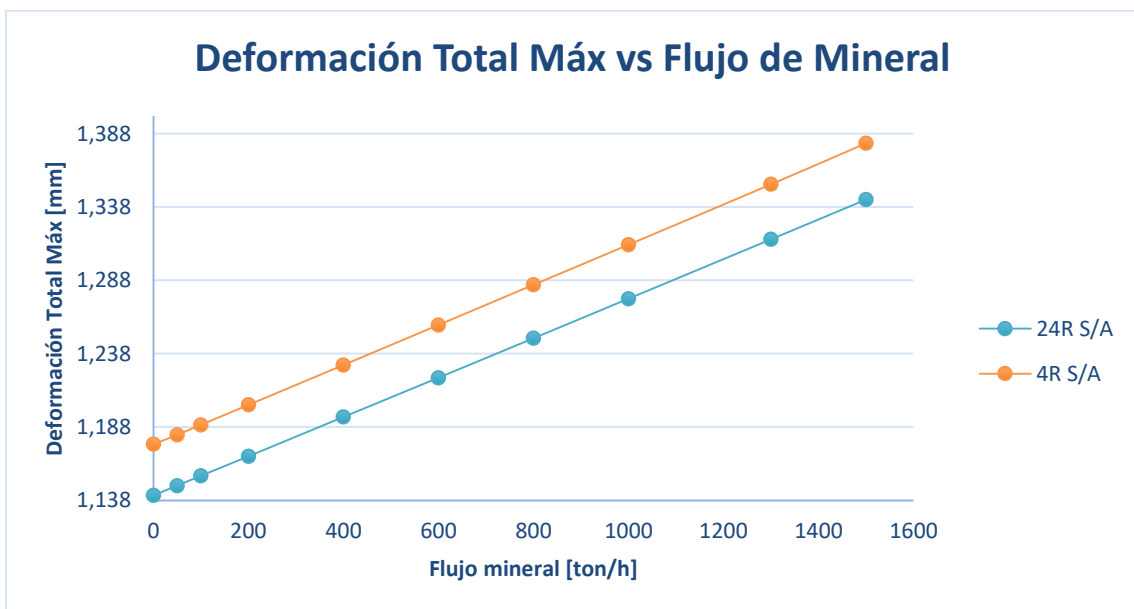


Gráfico 6: Deformación total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (harnero sin malla).

8.2.3 Análisis III: Viga Madre

La viga madre si bien no tiene contacto directo con el flujo de mineral de igual forma se ve afectado su comportamiento estructural por la variación de este mismo. Esto se debe a que el impacto del mineral en la estructura base genera que el movimiento del equipo de harneado sea irregular y afecte a todos los componentes que lo conforman.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

De acuerdo a los registros históricos de fallas este componente presenta interrupciones importantes por causa de la operación, y debido a esto que se analizó la deformación total máxima, el fuerza y los factores de seguridad estático y dinámico.

Los resultados encontrados para este componente son de características lineales como los obtenidos en los ítems anteriores, 8.2.1 y 8.2.2, por lo que es de carácter relevante observar la variación que tiene las variables de estudio (deformación total máxima, tensión, factores de seguridad) en función del aumento del flujo del mineral.

Las rectas que describen el comportamiento de las variables difieren en gran medida de acuerdo a la cantidad de resortes como se puede observar en los gráficos, siendo los valores relacionados para el caso de 4 resortes, como se está dando la tendencia, mayores en un porcentaje cercano a 2 a los obtenidos en los análisis con 24 resortes.

8.2.3.1 Deformación total máxima

La deformación total máxima en la viga madre varía para ambos casos, 24 y 4 resortes, en un 5% con el cambio de flujo de mineral (ver Gráfico 7), es decir, la deformación total aumenta en un 5% al variar el flujo de mineral de 0 a 1500 toneladas. En la Figura 77 se puede observar como la deformación máxima se genera en el centro de la viga madre y ésta se produce principalmente por el movimiento axial de los excitadores.

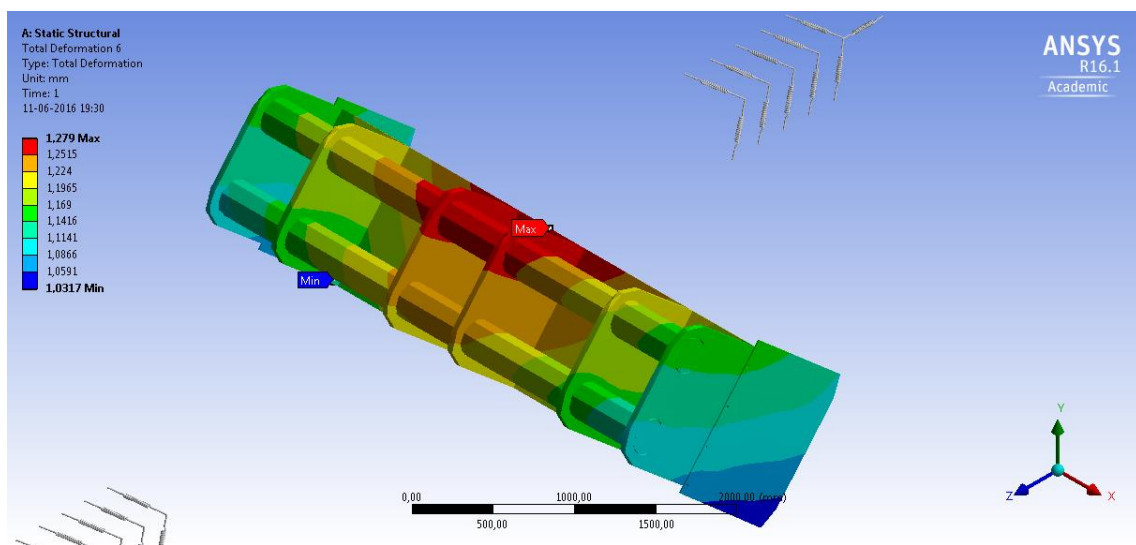


Figura 77: Deformación total máxima viga madre.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

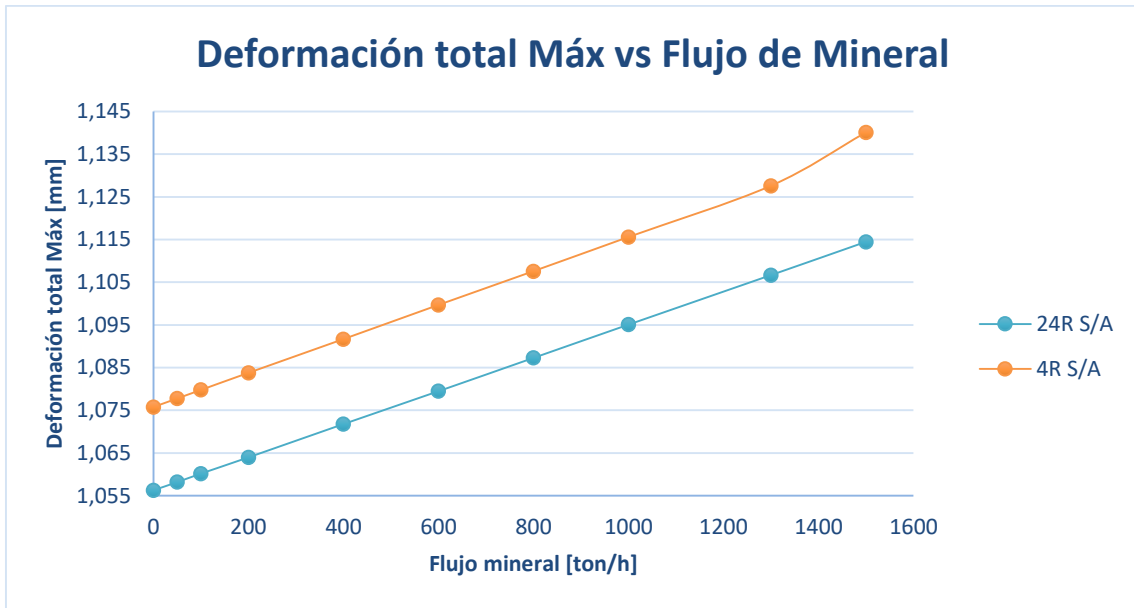


Gráfico 7: Deformación total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga madre).

8.2.3.2 Esfuerzo equivalente

El esfuerzo por su parte en ambos casos incrementa su valor en un 2,3% entre el rango mínimo y máximo del flujo de mineral como se puede observar en el Gráfico 8. La manera en que se proyecta el esfuerzo para ambos análisis es de carácter lineal, en el caso cuando pasa mineral por el equipo, pero con un salto importante entre la operación sin mineral y la con paso de mineral.

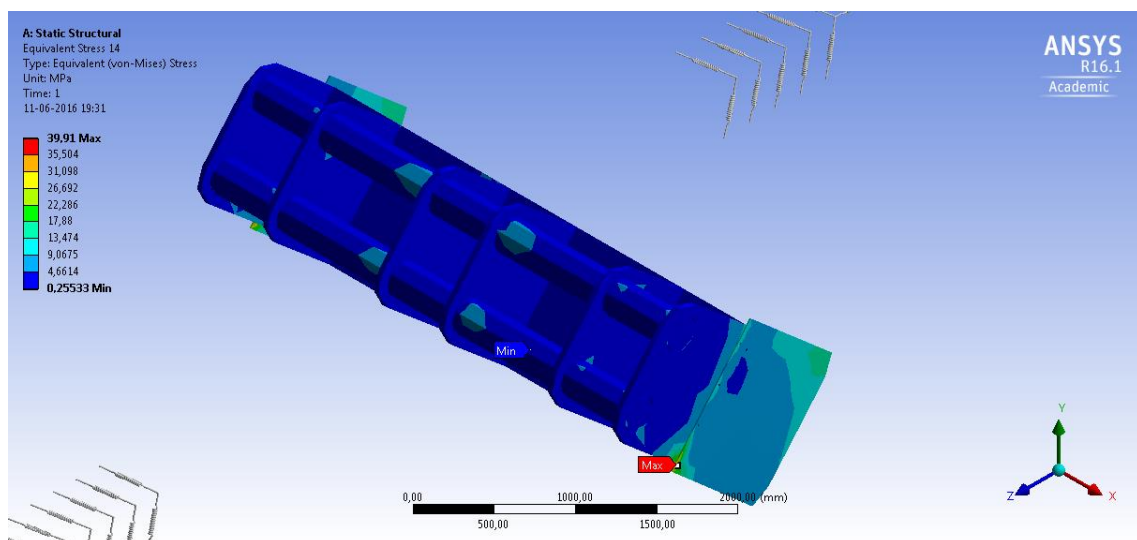


Figura 78: Esfuerzo máximo viga madre.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

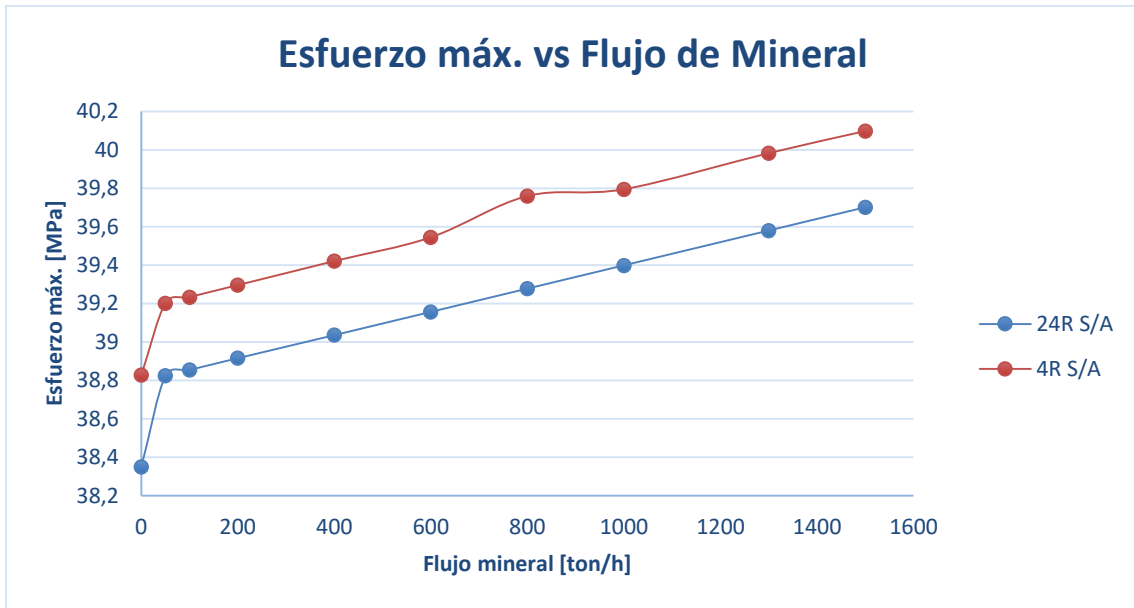


Gráfico 8: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga madre).

8.2.3.3 Factor de seguridad estático y dinámico

Los factores de seguridad estáticos y dinámicos difieren bastante en sus valores, pero para ambos casos representan valores altos para la seguridad de este componente, es decir, el componente para esta cantidad de flujo de mineral no debería presentar problemas.

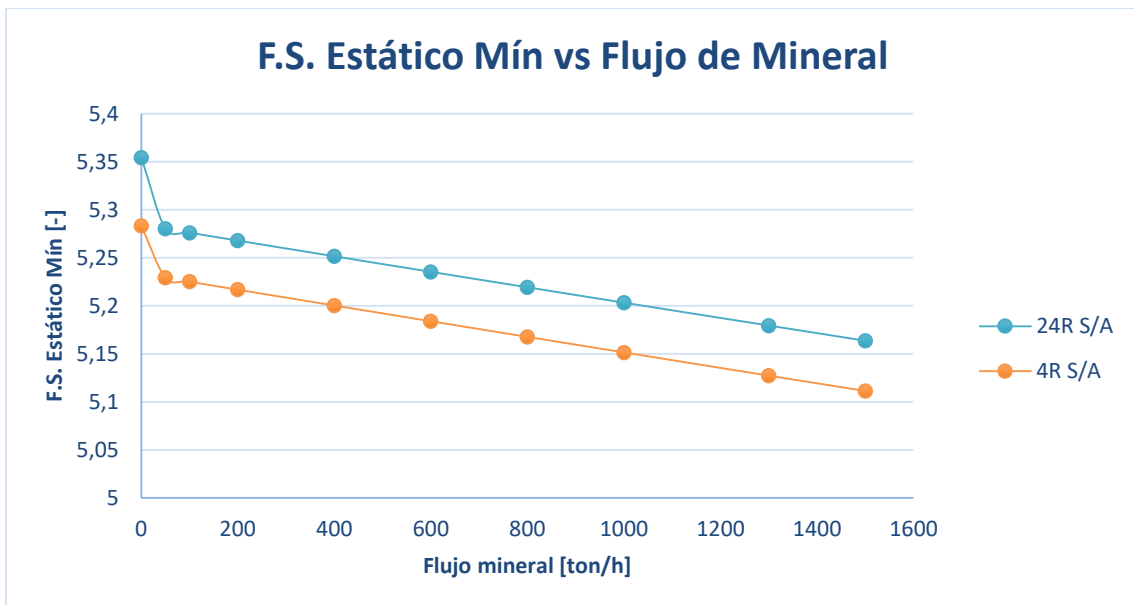


Gráfico 9: F.S. estático mín. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga madre).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

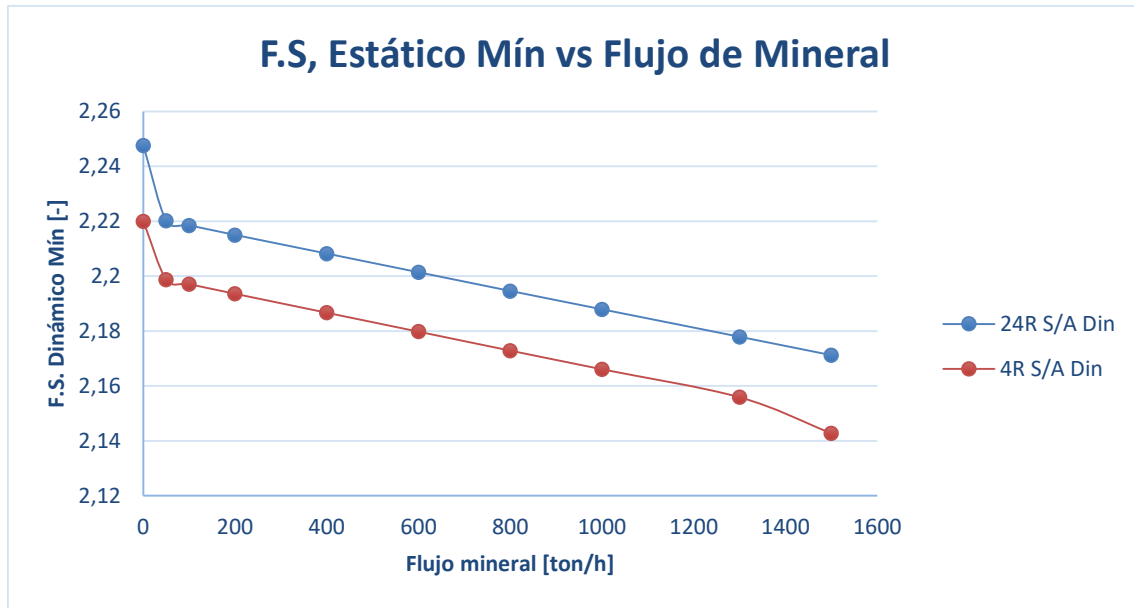


Gráfico 10: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga madre).

8.2.4 Análisis IV: Viga descanso delantera

La viga de descanso delantera está diseñada principalmente para sostener el cuerpo del harnero, pero también se utiliza para el izaje de este equipo. Estas vigas presentan fallas de material por lo que existen concentraciones de esfuerzos importantes. Si bien los valores encontrados en la deformación, esfuerzo máx. y factor de seguridad son bajos, se puede observar las zonas donde se concentran los esfuerzos lo que permite comparar con la realidad estos resultados.

8.2.4.1 Deformación total máxima

La deformación total máxima si bien en la Figura 79 los valores máximos se proyectan en los costados, es más relevante analizar que las deformaciones más grandes, a excepción de las orejas de la viga, se producen desde el centro de ésta hacia los lados.

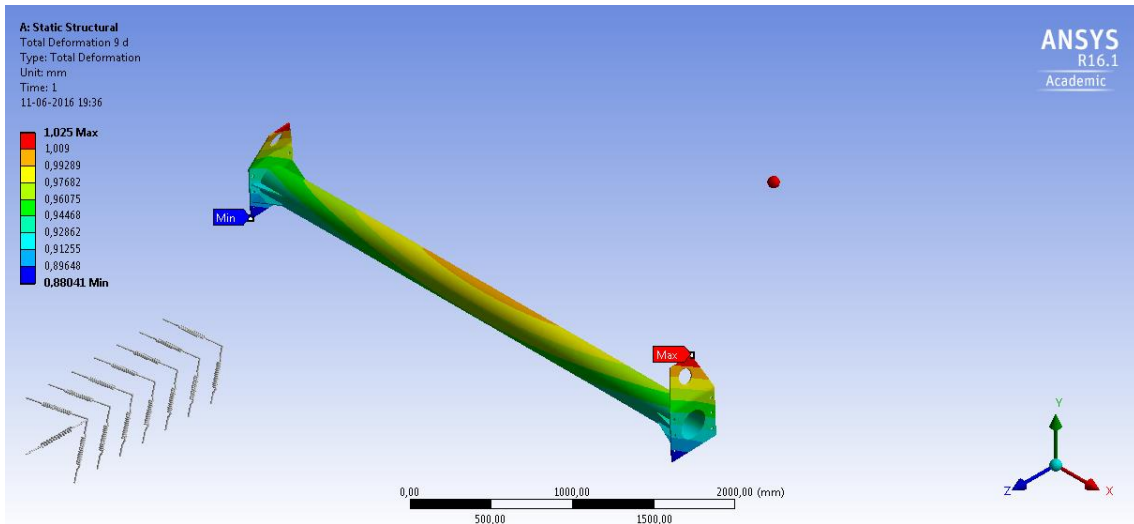


Figura 79: Deformación total máxima viga descanso delantera.

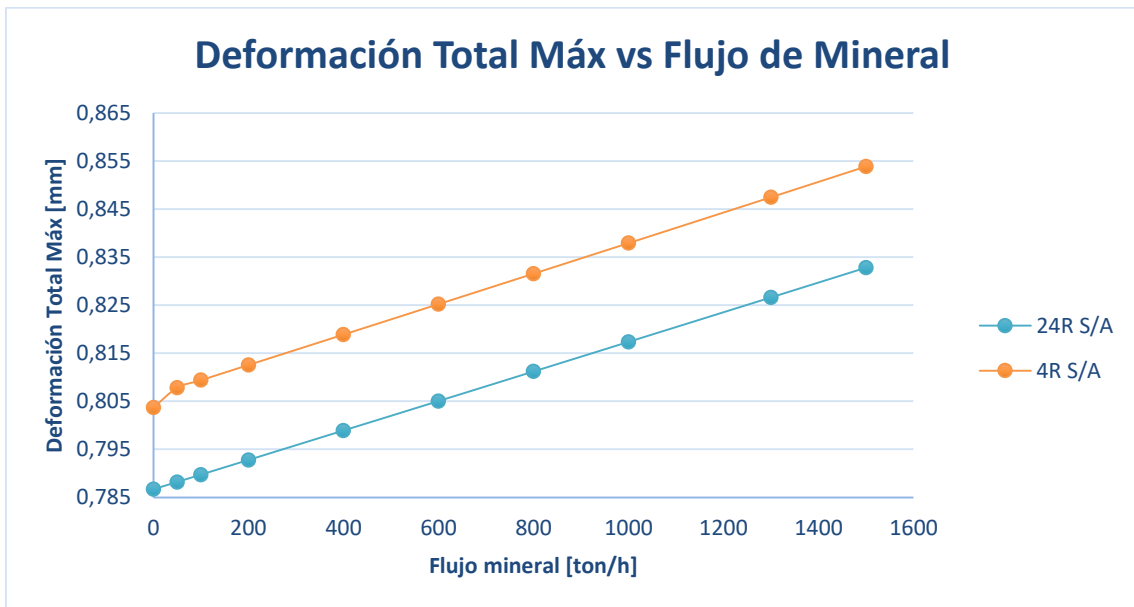


Gráfico 11: Def. total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso delantera).

8.2.4.2 Esfuerzo equivalente

El esfuerzo equivalente en el Gráfico 12 nos muestra valores muy bajos para este componente, pero nos muestra que porcentaje de ésta varía con el flujo del mineral. Como se observa en la Figura 80 los esfuerzos se concentran en la zona extrema de la viga de descanso, en el lugar que une la barra cilíndrica con la placa que fija a ésta a la estructura.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

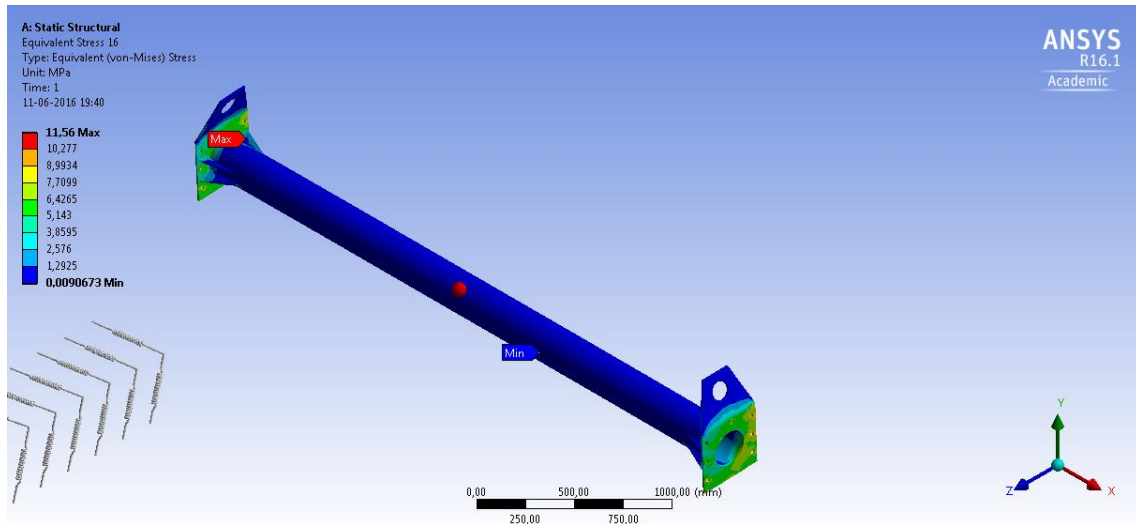


Figura 80: Esfuerzo máx. viga descanso delantera.

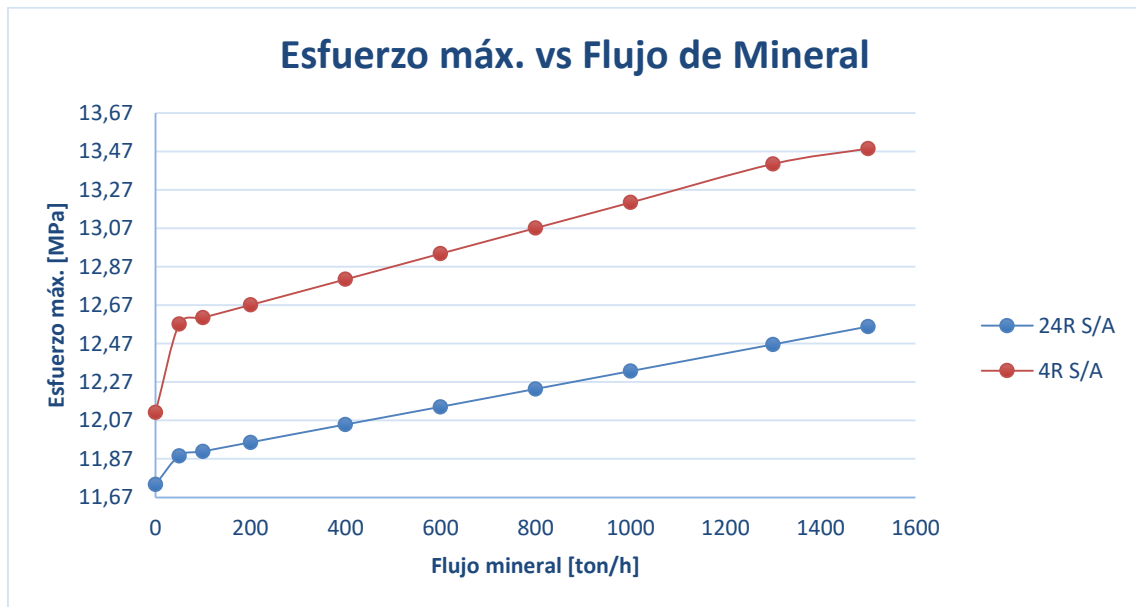


Gráfico 12: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso delantera).

8.2.4.3 Factor de seguridad estático y dinámico

Los Factores de seguridad para este componente son los más altos debido a que no genera mucho estrés en éste. El Gráfico 13 y Gráfico 14 muestran como varían los valores en función del flujo de mineral, siendo el factor de seguridad estático constante y el factor de seguridad dinámico el que disminuye.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

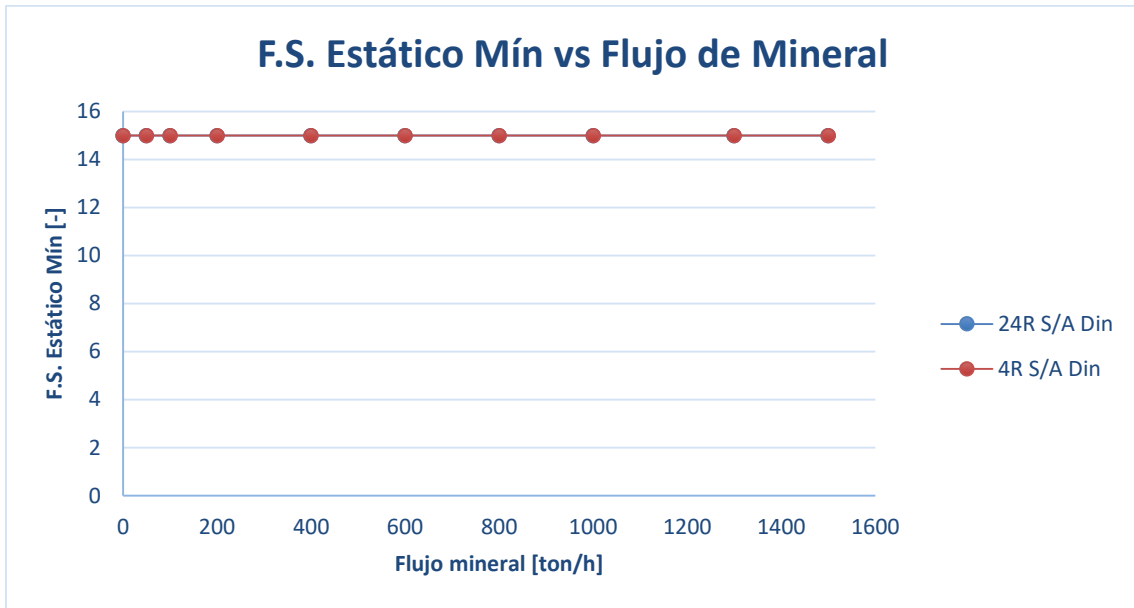


Gráfico 13: F.S. estático. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso delantera).

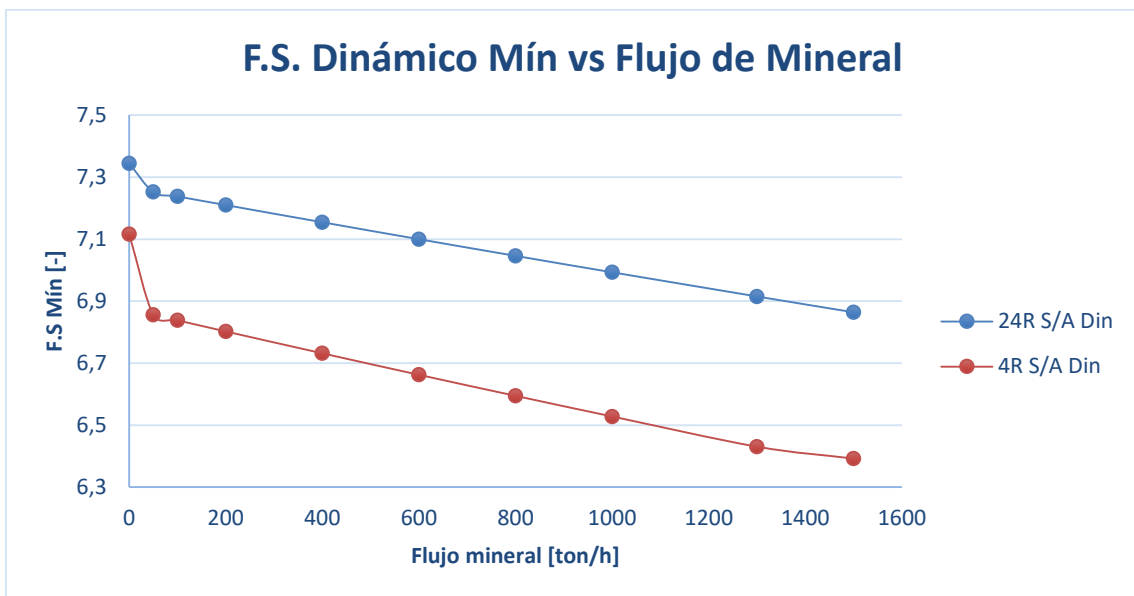


Gráfico 14: F.S. dinámico vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso delantera).

8.2.5 Análisis V: Viga descanso posterior

Al igual que la viga de descanso delantera, la viga de descanso posterior está diseñada para sostener la estructura del harnero y, además para sostener el equipo al ser izado. Esta viga se encuentra dentro de los componentes críticos del equipo por lo que también es importante analizar su comportamiento.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

De acuerdo a los análisis de los resultados, los valores obtenidos son igual bajos, pero en comparación a la viga de descanso delantera éstos son más altos, debido a que esta viga se encuentra en la misma dirección que las fuerzas generadas por los excitadores.

La diferencia que muestran los resultados para los casos de 24 resortes y 4 resortes sigue siendo la misma que en los componentes anteriores, los resultados del primero están casi 2,5 % más bajo en promedio que los resultados para el análisis con 4 resortes.

8.2.5.1 Deformación total máxima

La deformación total máxima al igual que en la viga de descanso delantera se presentan de manera simétrica con respecto al centro, pero a diferencia ésta se concentra en los extremos de la barra como se puede ver en la Figura 81. En el Gráfico 15 se puede observar que al igual que en todos los componentes ya analizados la deformación se comporta de forma lineal siendo mayor para el caso de estudio con 4 resortes.

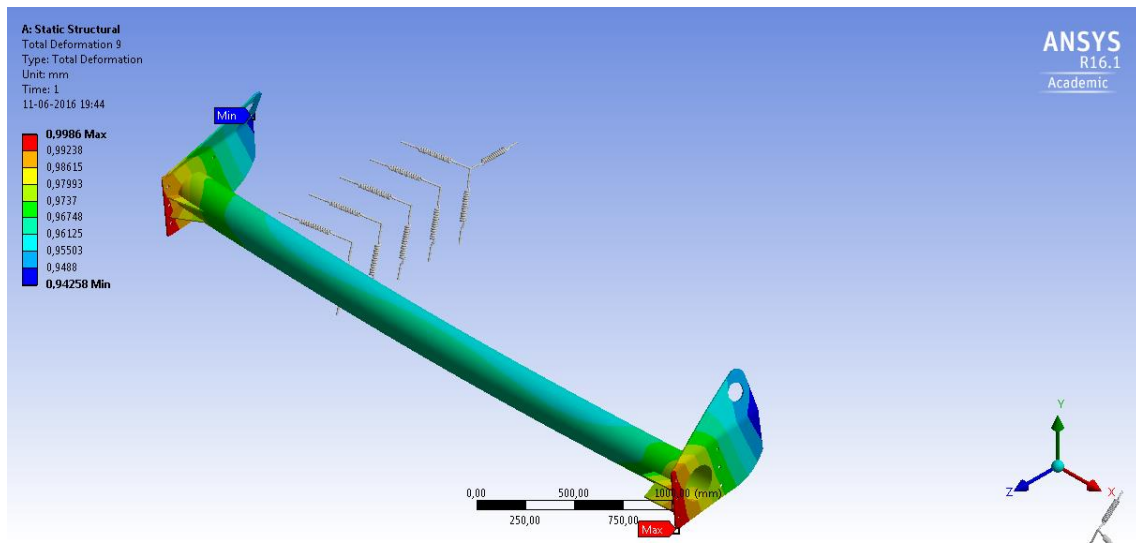


Figura 81: Deformación total máxima viga descanso posterior.

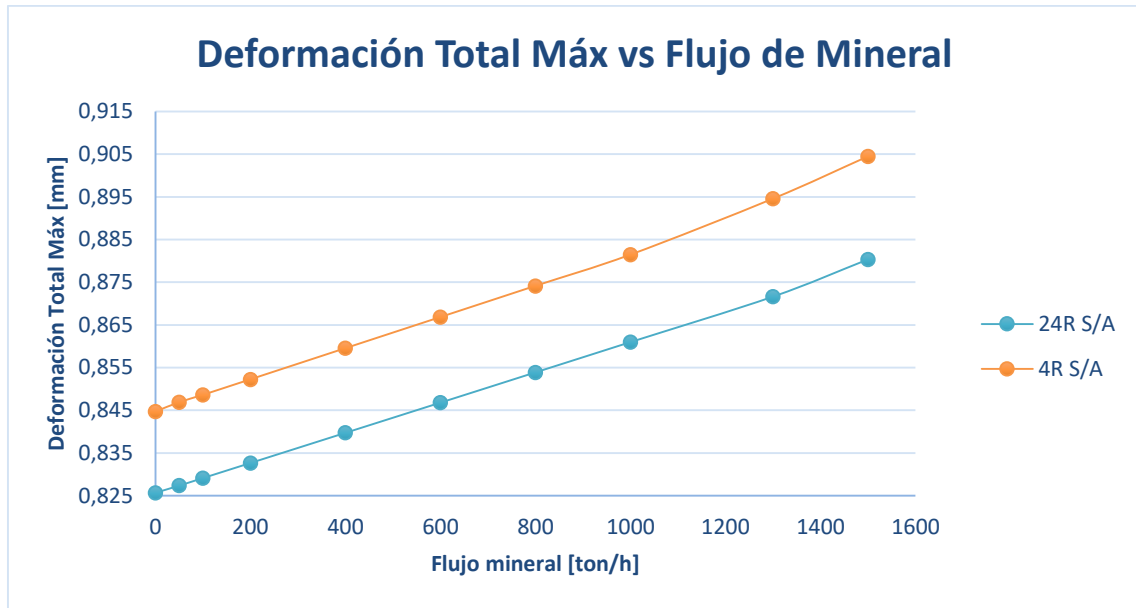


Gráfico 15: Def. total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso posterior).

8.2.5.2 Esfuerzo equivalente

El esfuerzo equivalente nos entrega los resultados esperados, debido a que la concentración de esfuerzos confirma las zonas donde recurrentemente se presentan las fallas (Figura 82). Estas fallas aparecen en la zona donde se une el cilindro con las placas y por lo general acaban en rupturas. Los valores de los esfuerzos que se encuentran en el Gráfico 16 son muy superiores a los que se presentan en la viga de descanso delantera, pero son bajos en comparación al valor admisible para el tipo de acero del cual están diseñados.

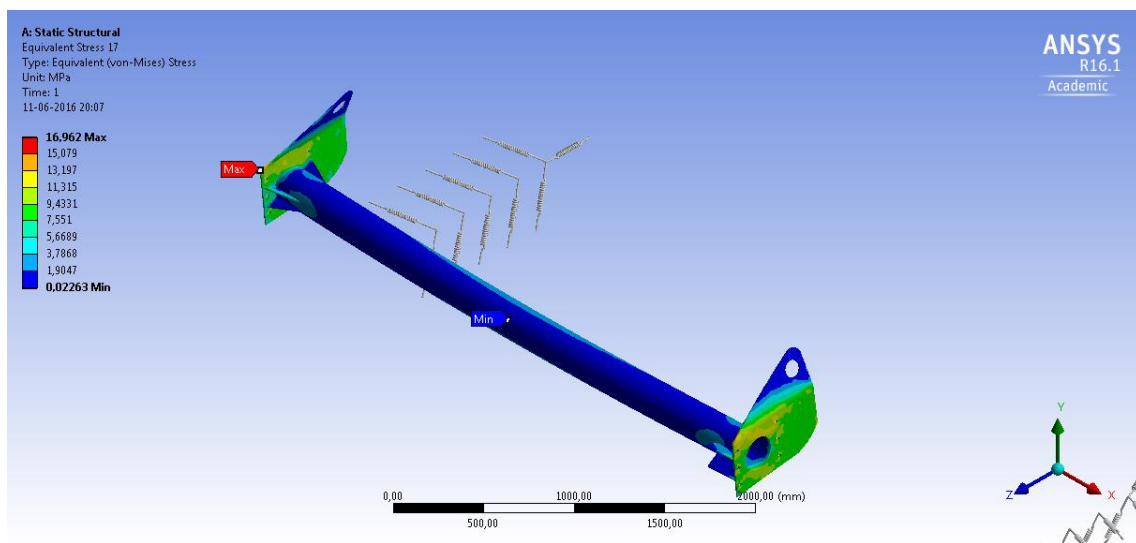


Figura 82: Esfuerzo máx. viga descanso posterior.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

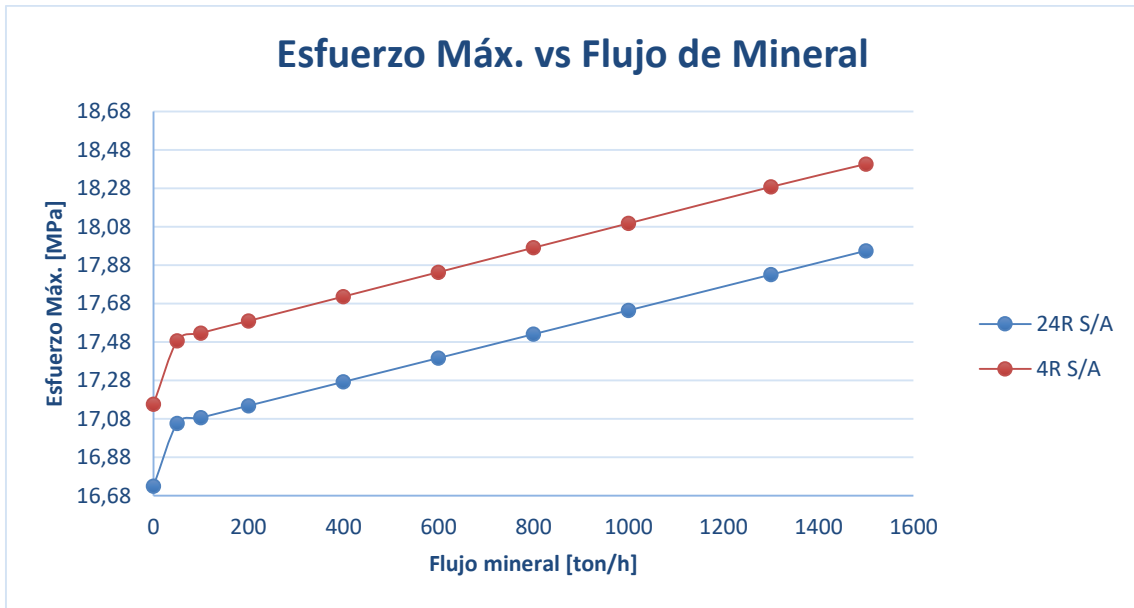


Gráfico 16: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso posterior).

8.2.5.3 Factor de seguridad estático y dinámico

Los factores de seguridad para esta viga presentan valores altos para el caso estático y dinámico, debido a que los valores de los esfuerzos son bajos. Al igual que en todos los componentes el comportamiento de los factores de seguridad es lineal siendo los valores de los factores de seguridad estáticos mayores que los valores de los factores de seguridad dinámicos.

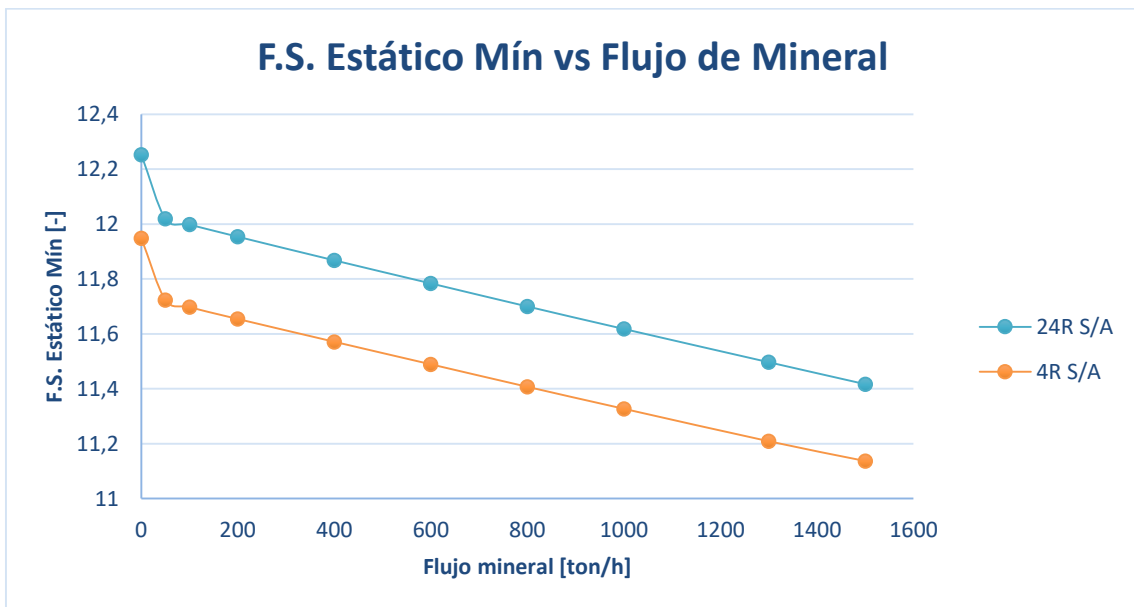


Gráfico 17: F.S. estático vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso posterior).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

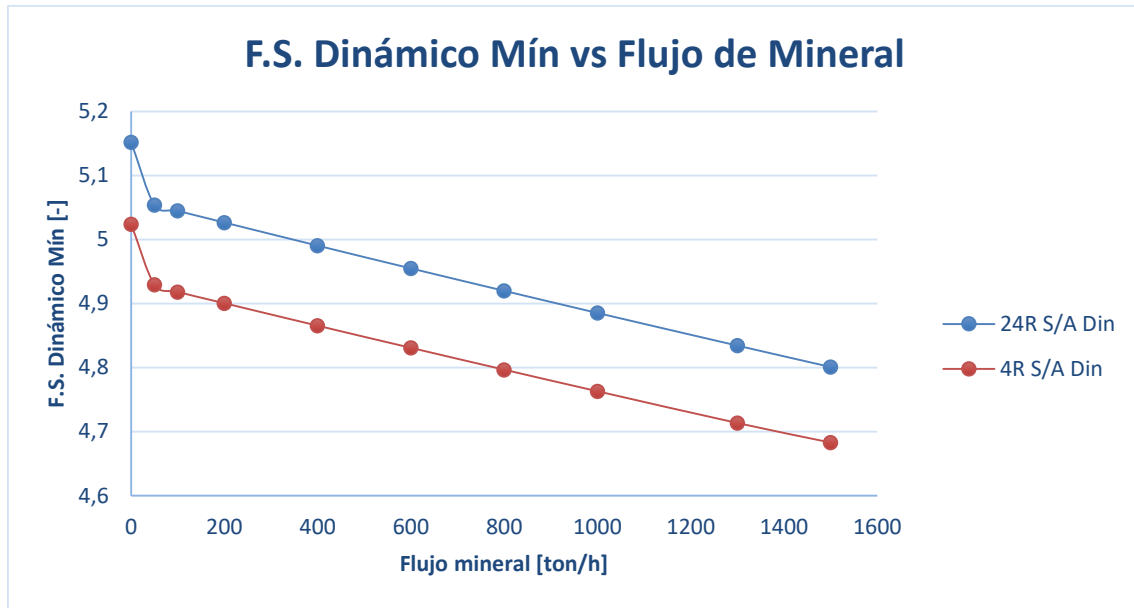


Gráfico 18: F.S. dinámico vs flujo de mineral, sin acoplamiento (viga descanso posterior).

8.2.6 Análisis VI: Placa lateral derecha

Las placas laterales del harnero vibratorio son de vital importancia en el funcionamiento del equipo, debido a que sobre éstas está sostenida la mayoría de los componentes. Por lo antes mencionado se definen a estas placas como las componentes más críticas, debido a que sus fallas son de carácter catastrófico.

Los resultados obtenidos para la placa lateral derecha son similares a los obtenidos en los componentes anteriores, repitiendo la superioridad de los resultados que se obtienen al utilizar en la simulación 4 resortes por sobre los 24 resortes. El comportamiento también sigue siendo lineal para los resultados.

8.2.6.1 Deformación total máxima

La Deformación total máxima como se puede observar en la Figura 83 se proyecta en la zona media donde se sostiene la viga madre. Las fuerzas generadas por los excitadores hacen que la viga madre las transfiera a las placas laterales que las sostienen.

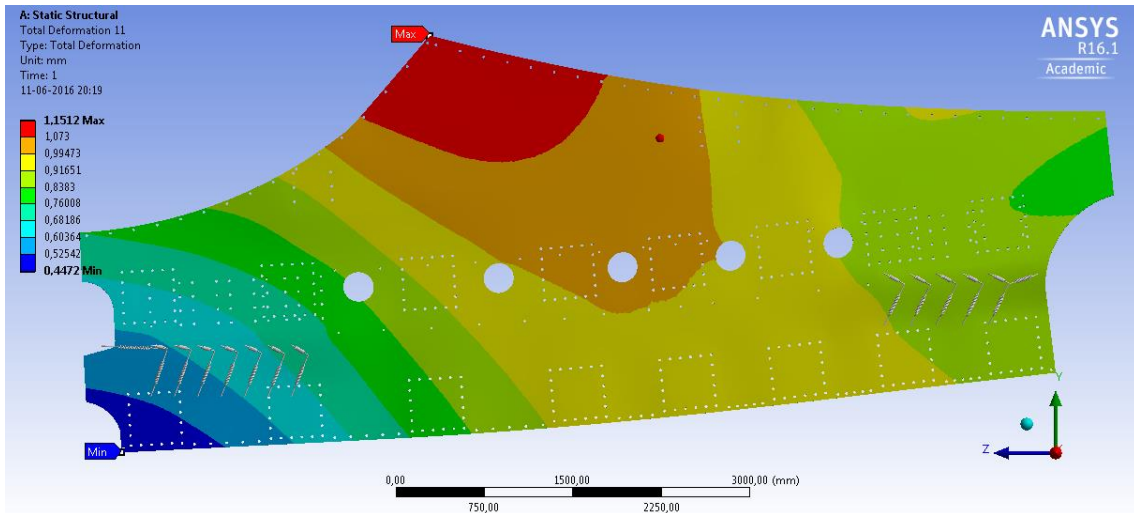


Figura 83: Deformación total máxima placa lateral derecha.

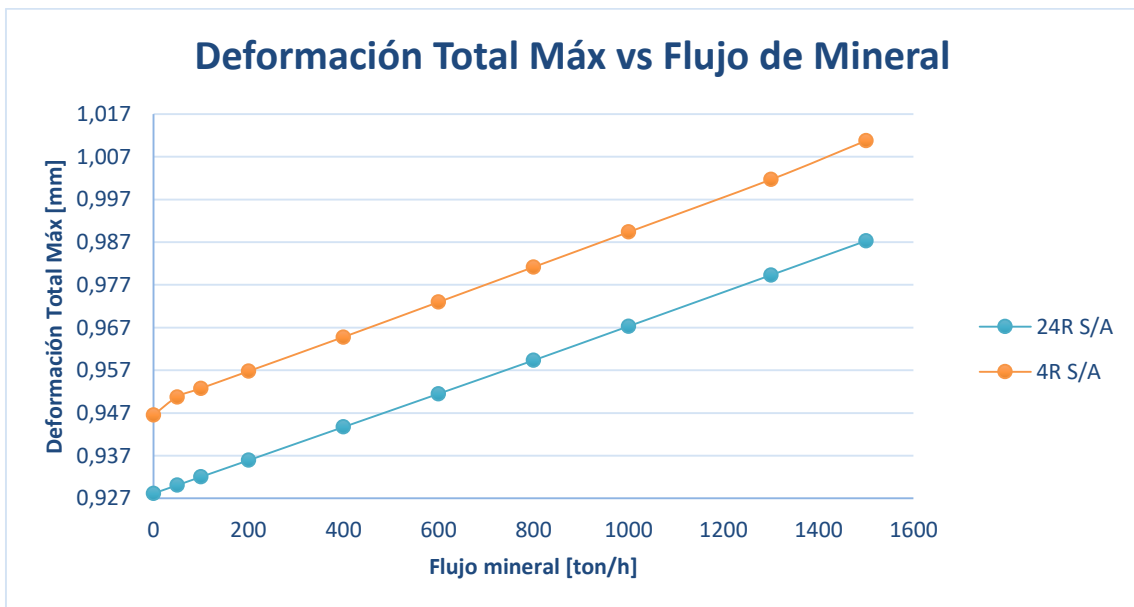


Gráfico 19: Def. total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (Placa lateral derecha).

8.2.6.2 Esfuerzo equivalente

El esfuerzo equivalente en la placa lateral derecha concentra los valores más altos cercanos al apoyo que tiene la viga madre sobre ésta.

De acuerdo a las investigaciones los resultados obtenidos están muy cerca de la realidad, debido a que las que presenta este componente se generan en la misma zona donde se concentran los esfuerzos.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

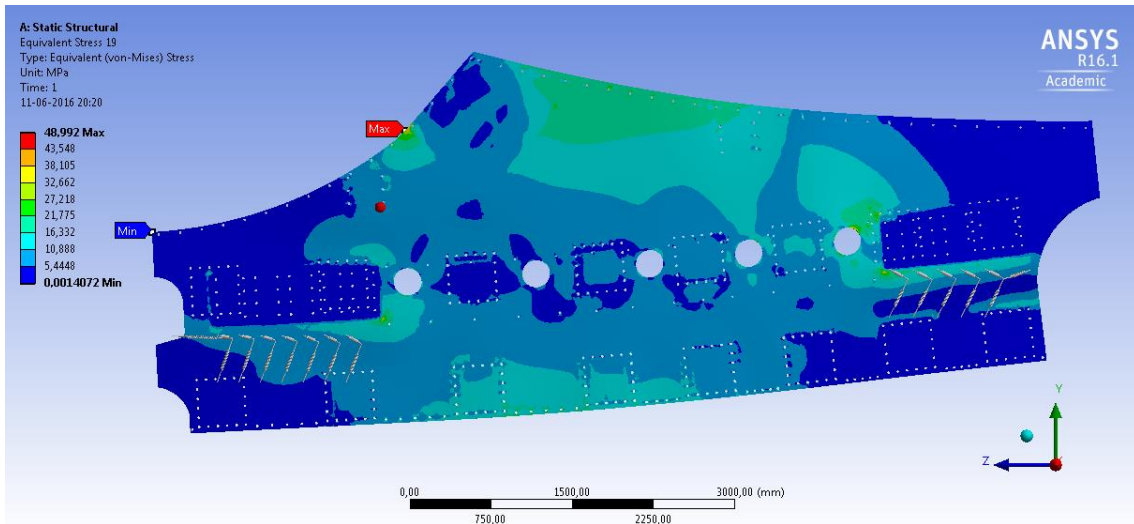


Figura 84: Esfuerzo máx. placa lateral derecha.

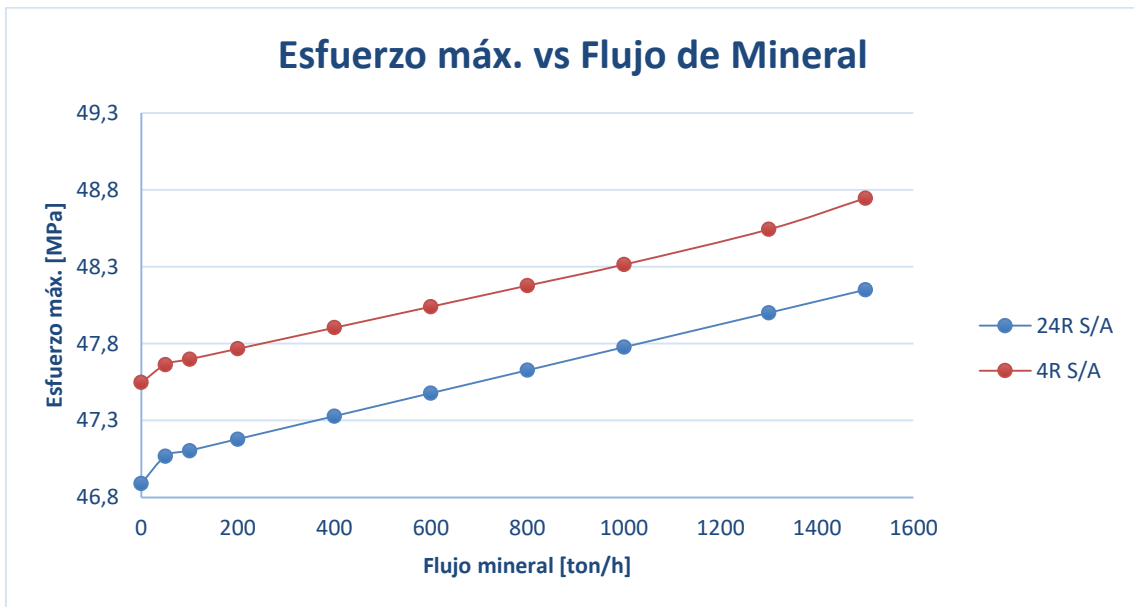


Gráfico 20: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral derecha).

8.2.6.3 Factor de seguridad estático y dinámico

El factor de seguridad estático al igual que los componentes anteriores presenta resultados que son buenos para este tipo de diseño (ver Gráfico 21), sin embargo, los resultados obtenidos en el factor de seguridad están cercanos a la unidad (Gráfico 22), que es el valor mínimo que se espera para el diseño.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

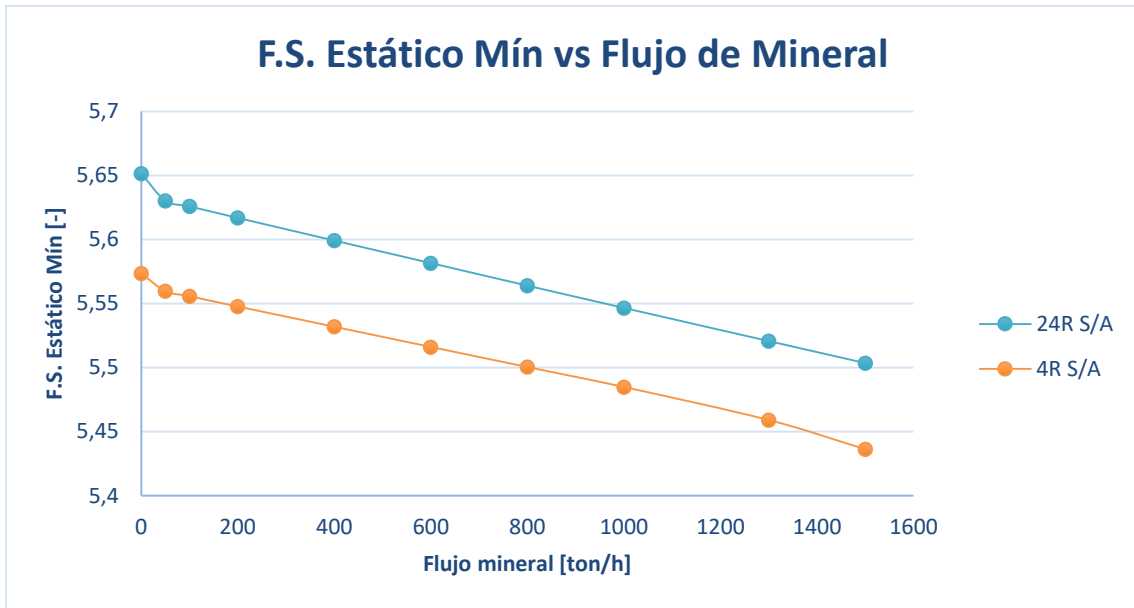


Gráfico 21: F.S. estático vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral derecha).

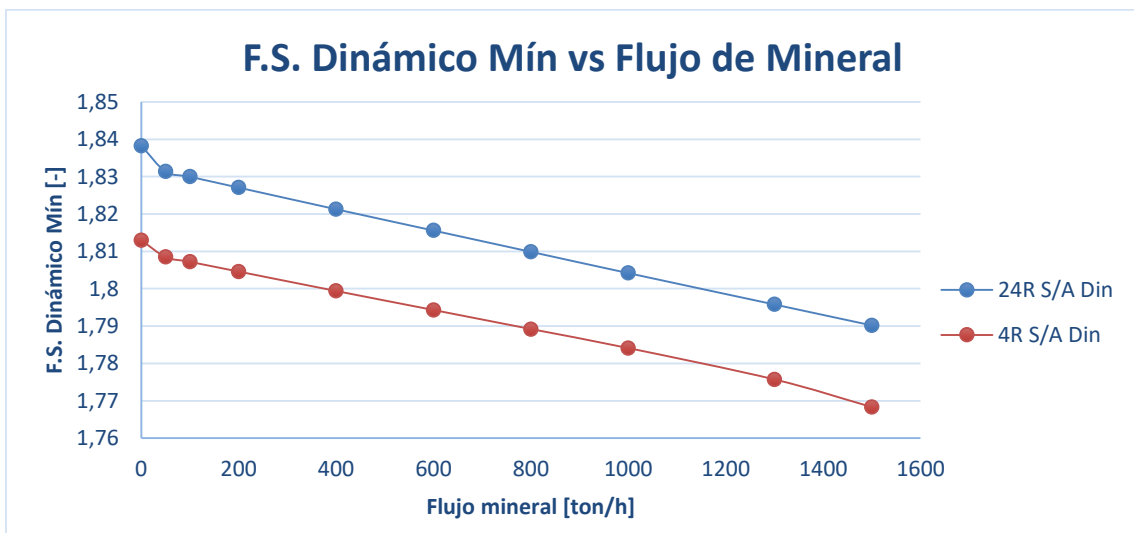


Gráfico 22: F.S. dinámico vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral derecha).

8.2.7 Análisis VII: Placa lateral izquierda

La placa lateral izquierda al igual que la placa del lado opuesto presenta resultados bastante cercanos con la realidad, debido a que se concentran en las zonas que se han identificado como críticas por los informes de fallas.

Los valores de los resultados obtenidos para la placa lateral izquierda también presentan diferencias en comparación a la placa lateral derecha, debido a que el software detecta una leve

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

inclinación de las fuerzas que hace que esta placa tenga menores resultados numéricos con respecto a los obtenidos en el componente anterior (8.2.6).

8.2.7.1 Deformación total máxima

La deformación total máxima al igual que en el componente tiene sus valores máximos en torno al apoyo de la viga madre, en la zona central del componente (ver Figura 85). Su comportamiento es de carácter lineal y como viene dando la tendencia los resultados para los análisis con 4 resortes están por sobre los análisis con 24 resortes.

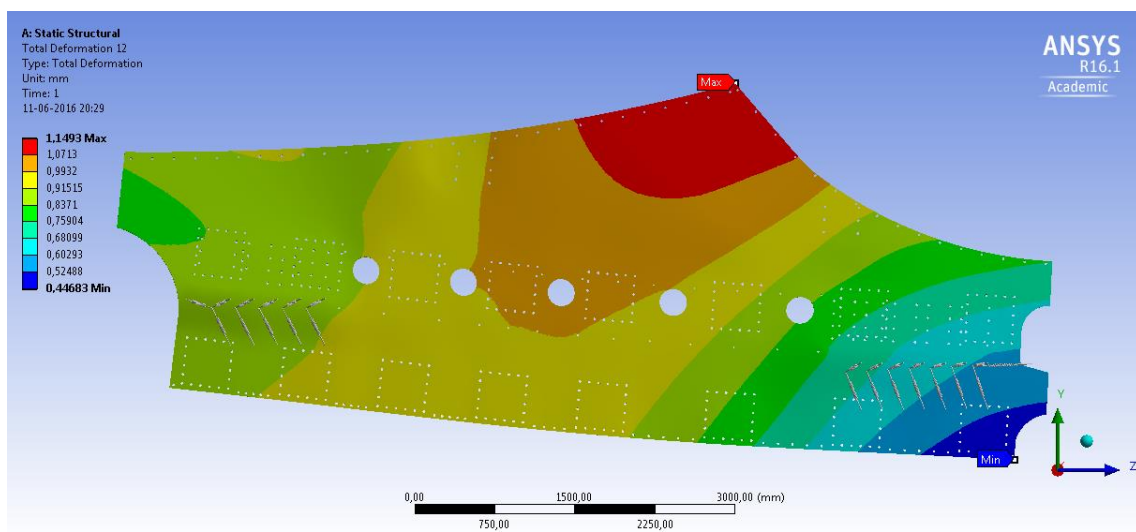


Figura 85: Deformación total máxima placa lateral izquierda.

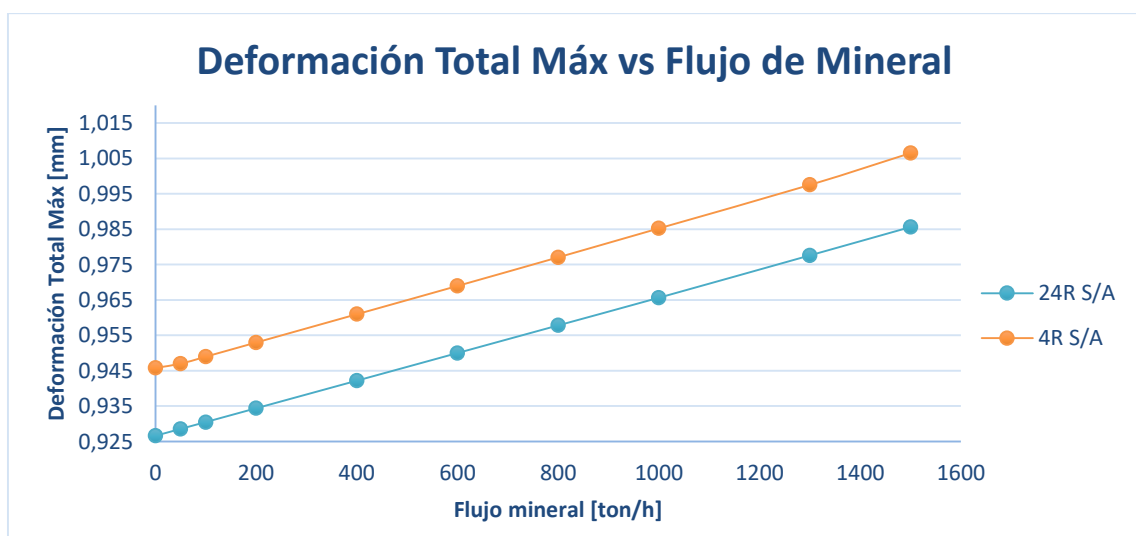


Gráfico 23: Def. total máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral izquierda).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

8.2.7.2 Esfuerzo equivalente

El esfuerzo equivalente tiene sus valores más altos cercanos al apoyo de la viga madre de forma similar a la del lado opuesto. Los valores que rodean a los soportes también son elevados, pero las fallas se presentan recurrentemente en la zona bajo el apoyo de la viga madre (ver Figura 86).

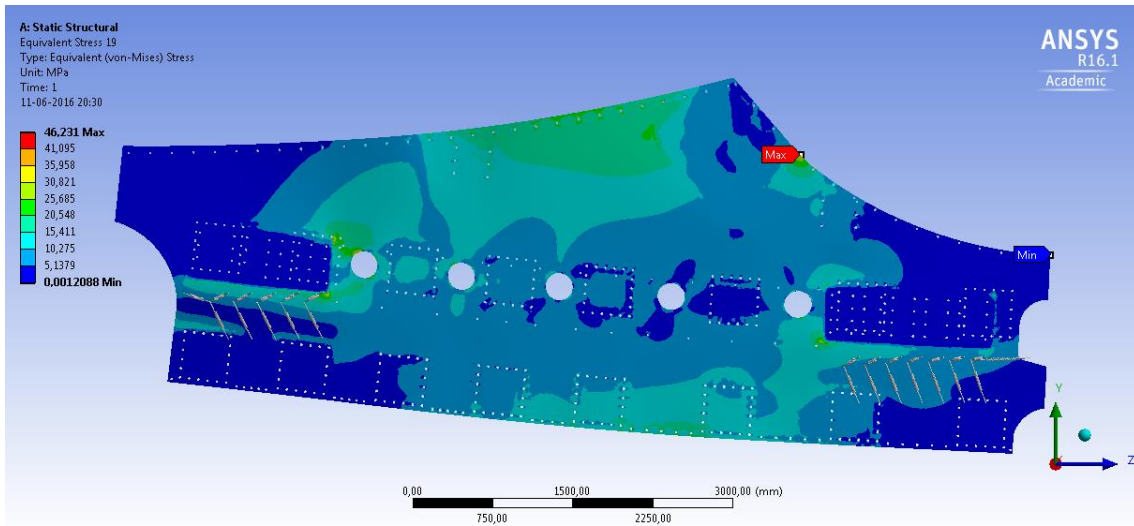


Figura 86: Esfuerzo máx. placa lateral izquierda.

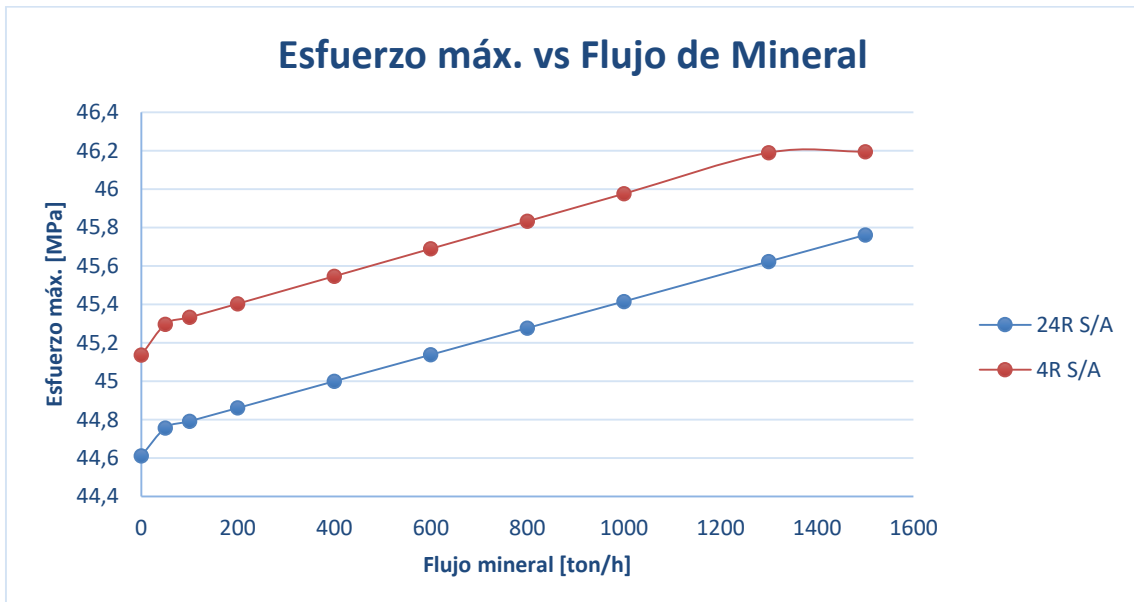


Gráfico 24: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral izquierda).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

8.2.7.3 Factor de seguridad estático y dinámico

Los valores de los factores de seguridad que se observan en el Gráfico 25 y el Gráfico 26 muestran resultados similares a los obtenidos en la placa lateral derecha, pero con un 5% más altos que ésta, es decir, los valores de la placa lateral izquierda son 5% más altos que los de la placa lateral derecha.

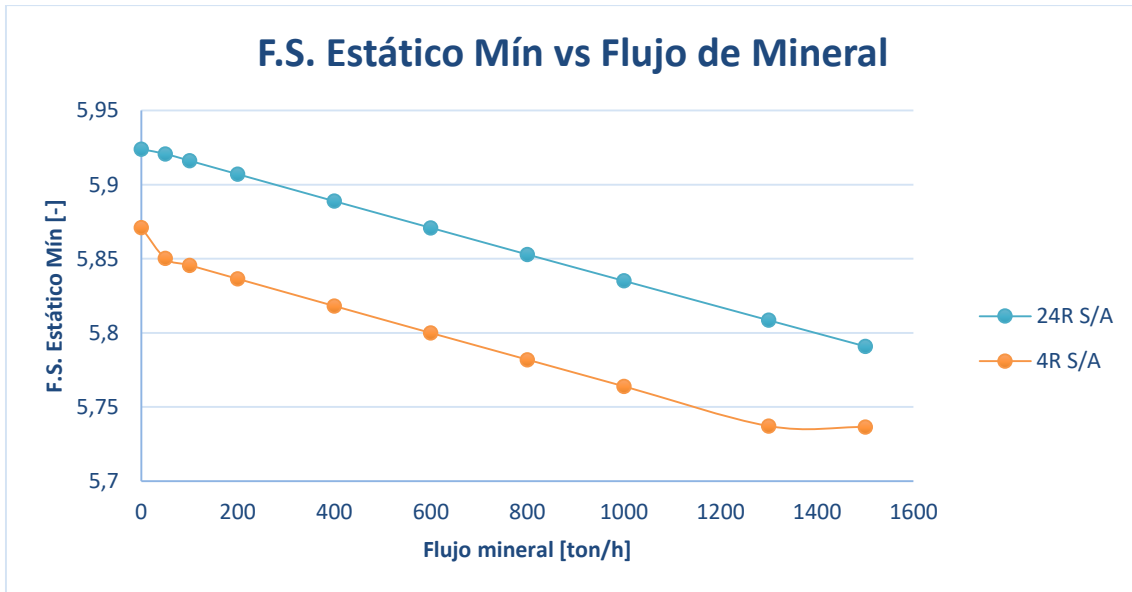


Gráfico 25: F.S. estático vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral izquierda).

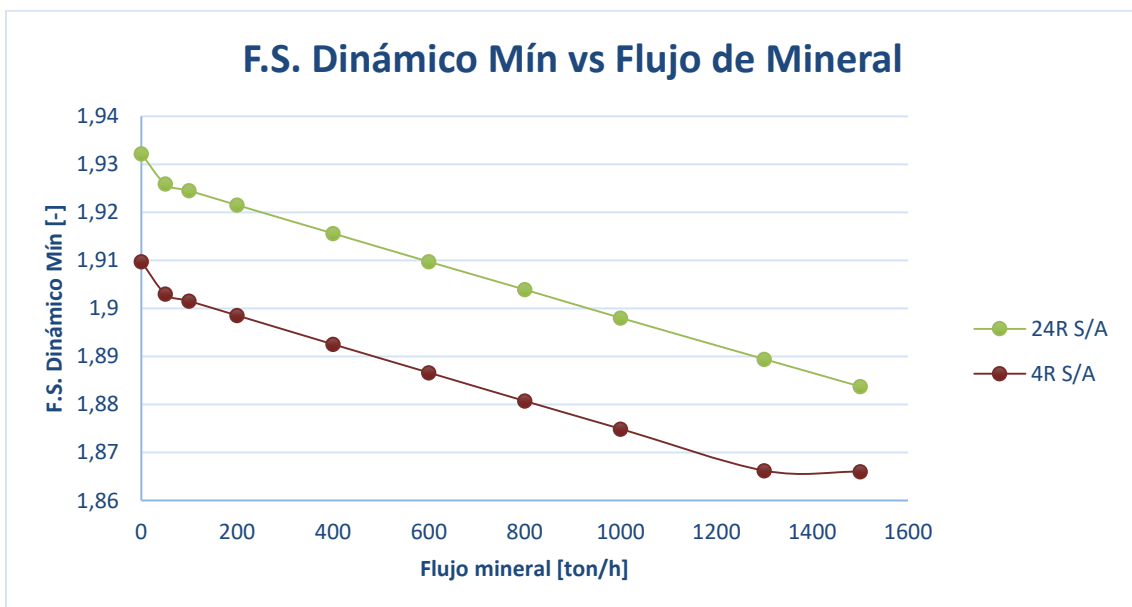


Gráfico 26: F.S. dinámico vs flujo de mineral, sin acoplamiento (placa lateral izquierda).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

8.2.8 Observaciones

Los resultados obtenidos para la simulación, en donde las cargas generadas por el mineral se incorporaron al análisis a partir de una ecuación adquirida de una investigación anterior, fueron cercanos a lo esperado, debido a que detecto poca influencia de la variación del flujo de mineral con respecto al estado tensional del equipo, es decir, dentro del rango de flujo de mineral lo que varía su estado tensional es relativamente menor, cercano al 6 %.

La manera en que se presentan los resultados para este análisis son de carácter lineal al igual que las fuerzas que se aplican al equipo para la simulación (ver Gráfico 2). Esta tendencia genera que al aplicar más cargas al equipo los resultados seguirán aumentando de forma lineal con la misma pendiente que observa en los gráficos anteriores.

La Figura 76 muestra las deformaciones máximas que se producen en la estructura del harnero, donde las solicitaciones máximas se originan en las vigas transversales en las cuales cae el mineral y en la viga madre que sostiene los excitadores. La deformación total máxima es baja, para todos los resultados obtenidos en el rango de flujo de mineral (0 a 1500 ton/h), en comparación a la deformación límite en vigas ($\delta_{m\acute{a}x}$) sugerida por el reglamento de construcción (25), lo que hace pensar que no tendría problemas la estructura.

$$\delta_{m\acute{a}x} < \delta_{adm} = \frac{L}{360} = \frac{3678}{360} = 10,22 [mm]$$

Donde,

- $\delta_{m\acute{a}x}$: Deformación máxima.
- δ_{adm} : Deformación admisible.
- L: Largo de eje o viga.

De acuerdo a lo que se observa en la Figura 78, la Figura 80, la Figura 82, la Figura 84 y por último en la Figura 86, los esfuerzos más altas entre todos los componentes analizados se encuentran en las placas laterales que sostienen el cuerpo del harnero. En estas placas los esfuerzos, obtenidos por la teoría de falla de Von Mises, varían entre 45 y 49 [Mpa], siendo

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

principalmente los más altos los relacionados a los cálculos con 4 resortes y para la placa lateral derecha. Los esfuerzos máximos se concentran en la zona que rodea a la unión entre las placas laterales y la viga madre, ver Figura 84, debido a que la viga madre transmite a las laterales las fuerzas producidas por los excitadores.

Si bien los valores obtenidos para deformación y esfuerzo máx. están por debajo de los límites esperados, deformación admisible y esfuerzo de fluencia respectivamente, éstos resultados nos entregan las zonas donde se debe poner atención para posibles fallas.

Los factores de seguridad estáticos calculados mediante la teoría de falla de Von Mises para los componentes críticos fluctúa entre 5 y 15, donde los valores más bajos están relacionados a la placa lateral derecha y los más altos a la viga de descanso delantera. El valor mínimo del factor de seguridad está bastante bien según el criterio de Shigley para factores de seguridad (Tabla 9).

Los factores de seguridad dinámicos calculado mediante un análisis de fatiga, usando el criterio de Soderberg, tienen valores que van desde 7,3 a 1,7. Los valores más pequeños los alcanzan las mediciones de la placa lateral derecha para el cálculo con 4 resortes, donde su valor es 1,7683 que es bajo, pero para los criterios de diseño es aceptable para soportar una falla inminente por fatiga.

El comportamiento de los resultados para los dos casos marcó una diferencia entre los valores que entrega el análisis con 4 resortes y el con 24 resortes. La tendencia muestra en todos los componentes valores más elevados para los resultados de los análisis con 4 resortes, demostrando que no es conveniente obviar la cantidad de resortes que utilizan estos equipos para las simulaciones.

8.3 Resultados (Modal)

El análisis modal permite encontrar las características dinámicas inherentes del sistema, esta es la frecuencia natural y los modos de vibración asociados. Teóricamente está basado en la resolución al problema de valores propios y vectores propios de la ecuación dinámica para el caso de vibración libre (26).

La razón para estudiar el comportamiento modal de este equipo vibrador se debe a la necesidad de evitar los modos de resonancia y las vibraciones que pudiesen ser de carácter nocivo para el funcionamiento del equipo. Al manejar estos datos se pueden estudiar modificaciones en el diseño para evitar que durante la operación este equipo tienda a la resonancia.

Los criterios indican que la frecuencia natural debe estar entre un rango mínimo de trabajo para no entrar en resonancia, que es aproximadamente una diferencia del 10% entre la cota superior y la cota inferior. Este rango según la frecuencia de trabajo del harnero, 13 [Hz], establece que el equipo no debe operar con una frecuencia natural entre 12,087 [Hz] y 14,773 [Hz].

De acuerdo a los resultados para ambos casos, 24 resortes (Tabla 10) y 4 resortes (Tabla 11) las frecuencias naturales más cercanas a la frecuencia de trabajo es la de orden 2, que tiene unos valores para cada caso de 17,345 [Hz] y 17,326 [Hz] respectivamente. En relación al criterio estos valores están por sobre el 20% de la frecuencia de trabajo, muy superior al mínimo que se establece de 10%.

Con lo mencionado en el párrafo anterior se puede inferir que el equipo vibrador se encuentra fuera de la región de resonancia, para estos dos casos de análisis, y de acuerdo a las condiciones de operación no debería tener problemas estructurales.

8.3.1 Caso A: 24 resortes.

Tabla 10: Parámetros modales para equipo con 24 resortes.

Orden	Frecuencia Natural f [Hz]	Deformación [mm]	Modo de Vibración
1	6,5721	0,33063	Desplazamiento en el eje x, viga madre
2	17,345	0,81789	Desplazamiento en el eje x, viga de descanso posterior
3	23,114	1,3012	Desplazamiento en el eje x, flexión en y, viga de descanso posterior
4	23,903	6,3871	Desplazamiento eje x, posterior placa lateral derecha
5	24,339	6,4842	Desplazamiento eje x, posterior placa lateral izquierda
6	29,219	0,89086	Torsión en eje y, desplazamiento x, viga transversal
7	30,388	3,0116	Flexión en z, desplazamiento en x zona de descarga
8	31,697	2,9749	Flexión placas laterales, eje x
9	34,383	1,1627	Torsión en el eje z
10	35,691	2,2956	Torsión en z, zona de la alimentación

Nota: Ver las figuras de las formas modales en el anexo (Análisis Modal).

8.3.2 Caso B: 4 resortes

Tabla 11: Parámetros modales para equipo con 4 resortes.

Orden	Frecuencia Natural f [Hz]	Deformación [mm]	Modo de Vibración
1	6,5679	0,33054	Desplazamiento en el eje x, viga madre
2	17,326	0,81362	Desplazamiento en el eje x, viga de descanso posterior
3	23,116	1,301	Desplazamiento en el eje x, flexión en y, viga de descanso posterior
4	23,897	6,3766	Desplazamiento eje x, posterior placa lateral derecha
5	24,336	6,4755	Desplazamiento eje x, posterior placa lateral izquierda
6	29,193	0,88841	Torsión en eje y, desplazamiento x, viga transversal
7	30,43	3,0073	Flexión en z, desplazamiento en x zona de descarga
8	31,733	2,9544	Flexión placas laterales, eje x
9	34,359	1,2035	Torsión en el eje z
10	35,583	1,9153	Torsión en z, zona de la alimentación

CAPÍTULO IX

DESARROLLO DE LA MODELACIÓN DEM EN GENERAL

9.3 Generalidades del método de elementos discretos

El método de los elementos discretos simula el comportamiento mecánico de un medio formado por un conjunto de partículas, las cuales interactúan entre sí a través de sus puntos de contacto. La disposición de las partículas dentro del conjunto global del sistema o medio es de forma aleatoria, por lo que se puede formar medios con diferentes tamaños de partículas distribuidos a lo largo del conjunto, idealizando de este modo la naturaleza granular de los medios que usualmente se analiza y se simula mediante esta técnica numérica. Principalmente se pueden distinguir las siguientes propiedades básicas que definen de forma global y a grandes rasgos a este método de análisis numérico:

- Las partículas como elementos discretos, que en su conjunto conforman el sistema complejo de partículas.
- Estos elementos distintos como también se le conoce se desplazan independientemente uno de otros e interactúan entre sí en las zonas de contacto.
- En este método a nivel de cada partícula se hace uso de la mecánica del cuerpo rígido y los elementos discretos se consideran elementos rígidos en sí.

El modelo constitutivo que define el comportamiento global del material es establecido en las zonas de contactos entre partículas. La caracterización de los contactos en el modelo se describe por los siguientes elementos mecánicos:

- Muelles: Los elementos muelles describen la fase de comportamiento elástico del medio en la zona de contacto entre cada partícula. Este comportamiento elástico queda caracterizado por dos muelles uno en la dirección de contacto normal y otro en la dirección tangencial, los cuales corresponden con las descomposiciones de fuerzas de contacto que se utilizan en la formulación del método.
- Pistones: Por su parte los pistones son elementos que toman en cuenta la viscosidad del medio que se simula. En la formulación establecida indistintamente puede emplearse

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

varios modelos de contacto que pueden ser delimitados en modelos de contacto viscoso y no viscoso, lo que permite aplicar el modelo a un gran número de problemas mecánicos, tanto elásticos como visco-elásticos.

- Elementos de fricción: Los elementos de fricción describen la descohesión y el fallo del material en la zona de contacto entre cada partícula. Cuando en el contacto, se produce la rotura, esta partícula se desprende del medio (27).

Como el medio es descrito por un sistema de partículas es necesario emplear la ecuación de balance de la cantidad de movimiento. Supóngase para ello de un sistema discreto formado por n elementos distintos tal que cada partícula i tiene una masa m_i , que se mueve con una aceleración a_i y está sometida a una fuerza f_i . En este caso la segunda ley de Newton establece que la fuerza que actúa sobre las partículas es igual a la masa de cada elemento distinto o discreto por su aceleración. Utilizando la definición de aceleración como la derivada de la velocidad material de la velocidad y teniendo en cuenta el principio de conservación de la masa (variación de la masa de la partícula es igual a cero) se tiene:

$$f_1 = m_1 a_1 = m_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{d}{dt}(m_1 v_1)$$

Definiendo la cantidad de movimiento de la partícula como el producto de su masa por su velocidad (m_i, v_i), expresa que la fuerza que actúa sobre el elemento distinto es igual a la variación de la cantidad de movimiento de la misma. Aplicando este concepto y la segunda Ley de Newton al sistema de n partículas o elementos discretos se tiene:

$$R(t) = \sum f_1 = \sum m_1 a_1 = \sum m_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sum m_1 v_1 \right)$$

partiendo del principio que se cumple el principio de conservación de la masa $\left(\frac{dm_1}{dt} = 0 \right)$

La ecuación anterior expresa que la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el sistema discreto de partículas es igual a la variación por unidad de tiempo de la cantidad de movimiento del mismo.

La ley de Newton proporciona la relación fundamental entre el movimiento del sistema de partículas y las fuerzas que causan dicho movimiento. El sistema de fuerzas puede estar en equilibrio estático cuando éstas no están en movimiento o no actúan fuerzas sobre los diferentes elementos distintos o el medio en cuestión.

Las fuerzas, los desplazamientos, esfuerzos y deformaciones son determinados a nivel de cada contacto entre los elementos distintos. En correspondencia con el modelo constitutivo empleado estos elementos mecánicos son descompuestos en sus componentes normal y desviadoras.

La formulación establecida para el desarrollo del modelo mediante elementos discretos, adopta una serie de hipótesis que permiten simplificar el problema real desechando los aspectos menos significativos y permitiendo establecer un modelo físico y matemático del problema en estudio. Las hipótesis que se establecen son las siguientes:

1. Las partículas o elementos son consideradas como cuerpos rígidos.
2. El contacto ocurre en el punto o área muy pequeña de contacto entre cada partícula.
3. En las uniones entre partículas se considera que existe contactos entre los elementos discretos.
4. Todas las partículas son circulares. En 2D se empelan cilindros y en 3D esferas. Sin embargo, la formulación puede considerar o emplear otros tipos de partículas con formas diversas y arbitrarias.
5. La generación del medio empleando elementos discretos debe ser aleatoria y los diámetros de los mismos deben ser tratados de forma similar (posición y diámetro de los elementos distintos aleatorio).
6. Se trabaja en el campo de las pequeñas deformaciones.
7. El comportamiento constitutivo en la zona de contacto emplea una tolerancia (separación / penetración) donde las partículas o elementos distintos se le permite cierto solape (gap o penetración) o separación en el punto de contacto lo que implica desde el punto de vista numérico un contacto aproximado.
8. La magnitud del solape (penetración o gap) y la separación está relacionada con la fuerza de contacto, la ley fuerza-desplazamiento (modelo constitutivo de contacto), y la magnitud de éstos es pequeña con relación al tamaño de los elementos distintos o partícula.

Asumir que las partículas son elementos rígidos es bueno más cuando la deformación en un sistema físico es considerada a partir de los movimientos a lo largo de las interfaces o zona de contacto entre las partículas.

En la formulación del modelo se han incluido elementos rígidos o paredes a los cuales se le pueden imponer condiciones de contorno como velocidades impuestas, desplazamientos, fuerzas o el caso totalmente opuesto como restricciones de movimiento (27).

9.4 Descripción del programa de análisis de elementos discretos

El programa utilizado para este estudio es un software que distribuye la marca internacional ESSS, y que lleva el nombre de “Rocky 3.0”. La versión de este programa es la última y funciona para los sistemas operativos de Windows.

Rocky es un paquete de software DEM avanzado que se utiliza para la simulación y el análisis de las operaciones de manipulación, y procesamiento de sólidos en partículas. Tiene varias ventajas sobre los códigos de la competencia que lo convierten en una herramienta de simulación de ingeniería, que permite a los problemas del mundo real ser modelados, y da confianza a los ingenieros que las soluciones computacionales tienen un valor real (28).

Beneficios de ROCKY:

- rápida y precisa: con cálculos de aerodinámicos y procesamiento de precisión doble, ROCKY le proporciona resultados rápidos y precisos. Muy buen desempeño paralelo.
- Realista: ROCKY simula partículas discretas en una gran variedad de formas y distribuciones de tamaño. Junto con la variable húmedo, seco y polvo-como propiedades.
- Flexible: CAD importación de geometrías como XGL, STL y DXF para simular cualquier tipo de sistema. Capacidad de mover fronteras y vibrar las superficies.
- Fácil: Una interfaz de usuario compacta, temas de ayuda integrados y personalizables parámetros hacen simulaciones ROCOSOS simple establecer arriba
- Asequible: Con un precio significativamente menor que otros códigos DEM significa mejor valor para el dinero y un más rápido retorno de la inversión.
- Personalizable: Si fuera de la caja ROCKY no cumple sus requisitos, los desarrolladores pueden adaptar el código para adaptarse a sus requisitos exactos.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

CAPÍTULO X

MODELACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE ACOPLAMIENTO ENTRE ANSYS WORKBENCH Y ROCKY DEM

Para esta última simulación se consideró un software de elementos discretos, Rocky, que modelara el comportamiento de las cargas que ejerce el mineral al salir del molino SAG y pasar a través del harnero de descarga. A diferencia de los cálculos realizados anteriormente en los que las cargas se representaban a través de cargas distribuidas, éste va a considerar una distribución más cercana a la realidad. Cabe destacar que para efectos prácticos de estas simulaciones se debió considerar el mineral como un sólido a granel y no como una pulpa que es lo que se ve en la realidad.

10.1 Desarrollo de los cálculos mediante Rocky

Los cálculos de elementos discretos en el software de modelación Rocky se pueden realizar de forma directa en la plataforma de ANSYS Workbench, esto debido a que la versión 16.1 de ANSYS incluye a ROCKY entre sus programas como se puede observar en la Figura 87. La nueva versión de ANSYS al incluir dentro de su plataforma de trabajo al programa ROCKY permite facilitar el acoplamiento entre los softwares de análisis de elementos finitos, como el Static Structural, con el programa Rocky.

10.1.1 Iniciando Rocky en ANSYS Workbench

Para comenzar a trabajar en ROCKY se debe abrir el software ANSYS Workbench y desde su toolbox en la sección “ESSS Systems”, que queda ubicada a la izquierda de la ventana de trabajo, tomar el programa ROCKY y arrastrarlo hacia la ventana de trabajo hasta dejarlo dentro la plataforma de “Project Schematic”, como se puede observar en la Figura 87. Al terminar este paso se debe guardar el proyecto con su respectivo nombre para no perder ningún paso que se haya realizado. Cabe destacar que se debe realizar el proceso de guardado en cada paso que se realice en adelante para no tener problemas si se cae el programa.

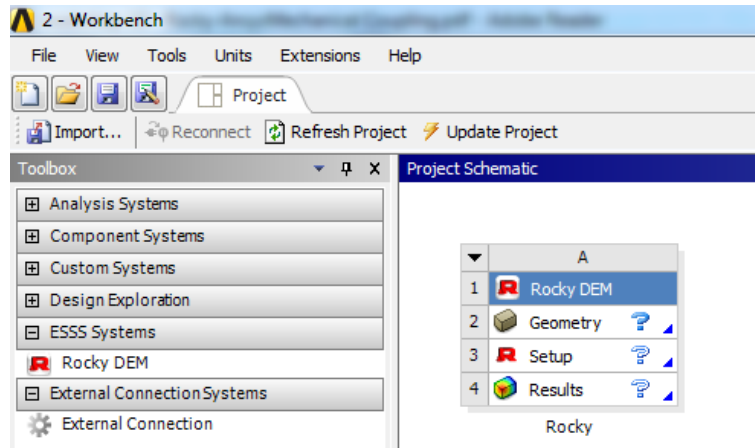


Figura 87: Menú de inicio de Rocky dentro de ANSYS Workbench.

10.1.2 Diseñar o importar geometría

La plataforma del software ANSYS Workbench 16.1 incluye dos softwares de diseño, Design Modeler y SpaceClaim, para poder realizar las geometrías necesarias y también permite que se puedan importar éstas. Para este caso se importó una geometría diseñada en INVENTOR, que fue guardada en la extensión STL (Stereo Lithography), la cual es apta para el uso de este programa. Antes de correr el Rocky se edita la geometría con el software de diseño SpaceClaim para simplificar la geometría. Ver a continuación Figura 88 y Figura 89.

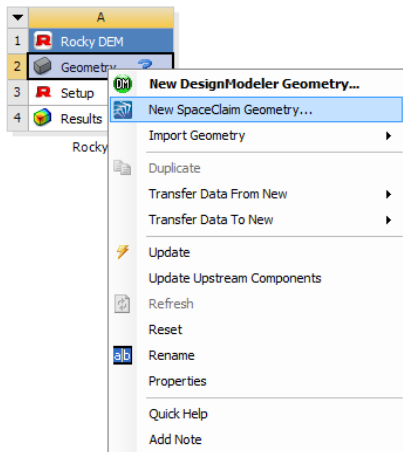


Figura 88: Menú Rocky con geometría cargada.

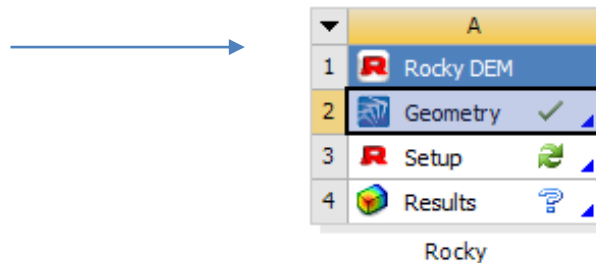


Figura 89: Menú de incorporación de geometría.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

10.1.3 Simulación en Rocky

Al momento que se incorpora la geometría en Rocky, ver Figura 89, se puede abrir el programa para comenzar con la modelación numérica. Al entrar en el software se puede observar en la esquina superior izquierda la geometría del harnero cargada en la sección “Geometries” (Figura 90).

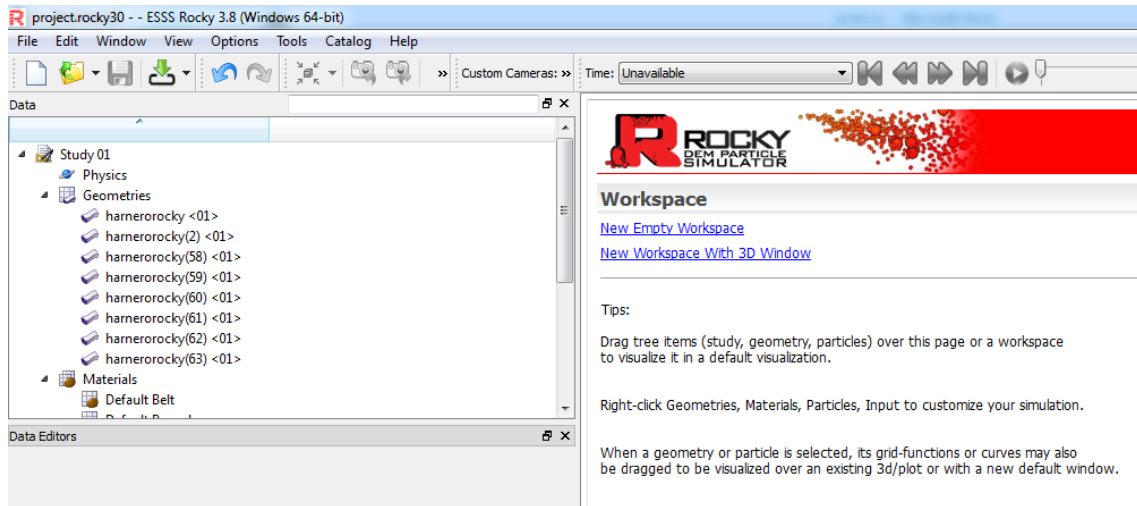


Figura 90: Plataforma principal Rocky.

10.1.3.1 Selección de modelo de resistencia a la rodadura y tipo de componentes de gravedad.

De acuerdo a la orientación que se trabajó en el modelo CAD se deben ajustar los ejes principales del software, es decir se debe ajustar la aceleración de gravedad de acuerdo al modelo CAD diseñado o importado. También se debe seleccionar el modelo de resistencia a la rodadura, el que para este caso es “type 3”, debido a que se trata de un flujo de mineral. (Ver Figura 91)

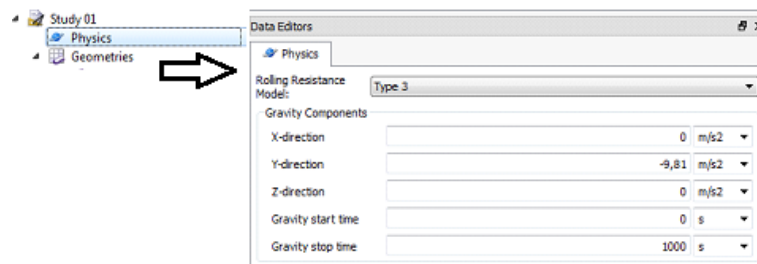


Figura 91: Selección de resistencia a la rodadura y gravedad.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

10.1.3.2 Descubrir modelo en 3D

Para poder observar el modelo del harnero en la pantalla principal del software se debe realizar la operación de “3D View”, y con ésta generar para cada componente su versión en 3 dimensiones. La forma de realizar este paso es seleccionar cualquier componente de la geometría del harnero, en la sección “Geometries”, y con el botón derecho seleccionar la opción “Show in new” y después “3D View” [ver Figura 92]. Repetir este paso con todos los componentes del harnero.

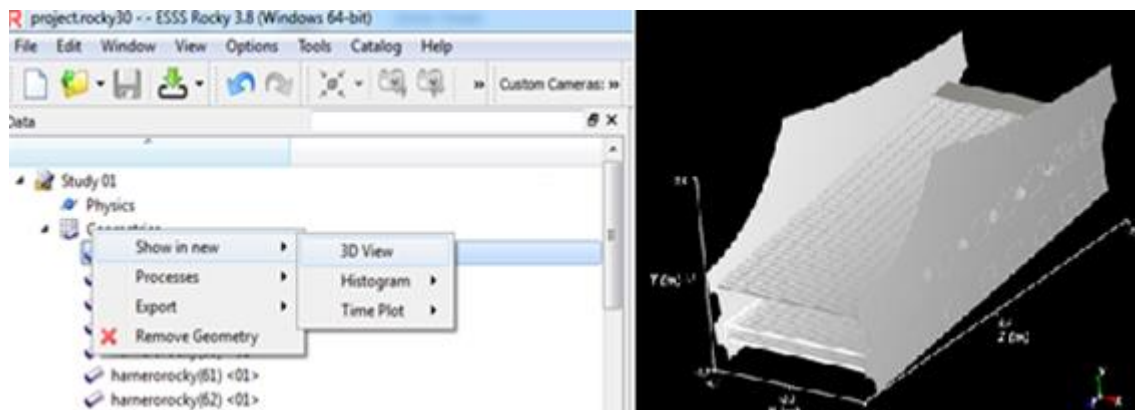


Figura 92: Mostrar estructura en 3D.

10.1.3.3 Seleccionar y mostrar malla del harnero

El tamaño de la malla que se utilizará para el cálculo DEM se tiene que ingresar en el programa Rocky para cada componente del harnero, es decir, para cada elemento que compone la estructura se debe ingresar el tamaño de triángulos que más convenga. Obviamente se debe ingresar el mismo tamaño de triángulos en Rocky que en ANSYS para poder facilitar el acoplamiento de ambos softwares. Para el caso del harnero de descarga SAG R-MD se utilizó un tamaño de elementos de 100 [mm].

Para realizar este paso se debe seleccionar en el toolbox “Geometries” el componente del harnero al cual se definirá su tamaño de triángulos, luego en la parte “Data Editors” en la sección “Geometries” se debe ingresar el tamaño y la unidad de los elementos en la sección “Triangle Size” como se observa en la Figura 93.

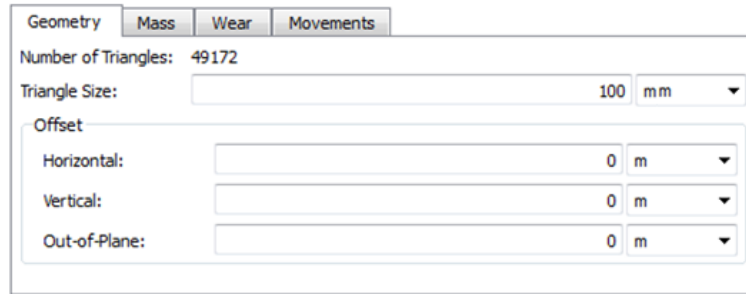


Figura 93: Selección tamaño de triángulos.

La manera de mostrar la malla del harnero en la ventana de trabajo es a través de la función “Grids” que aparece al aplicar “click” derecho sobre la figura 3D. Luego se selecciona “Edges” y por último “Visible”. Ver Figura 94.

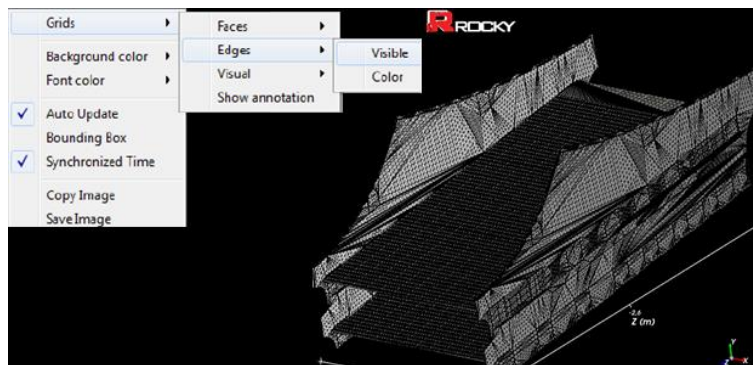


Figura 94: Mostrar malla en Rocky.

10.1.3.4 Definir entrada de las partículas

En la industria minera por lo general las partículas ingresan a estos equipos seleccionadores por la zona posterior sobre la malla de harneado superior, esto se debe a que la descarga proveniente del Trommel está ubicada a una altura mayor a la del harnero. Para poder reproducir este proceso de descarga de partículas en el software Rocky se debe crear una entrada que emule a la que se desarrolla en la industria. La opción más similar a lo cotidiano es crear un “Inlet” (entrada) y a partir de éste definir el ingreso de las partículas.

Lo primero que se debe hacer para crear una entrada de partículas es seleccionar en toolbox “geometries”, con el botón derecho seleccionar “Create” y a continuación marcar Inlet. Ver Figura 95.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

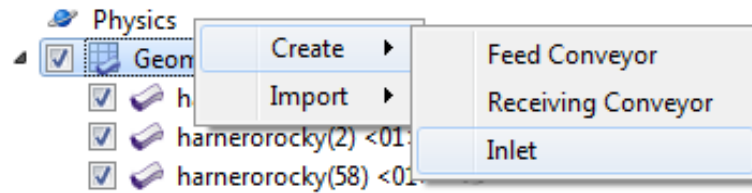


Figura 95: Crear entrada de mineral.

A continuación, se debe ubicar la entrada en la zona posterior del harnero en base a las coordenadas generadas para la estructura al importarla. Al marcar el “Inlet” aparece en el “Data Editors” la configuración de su geometría en donde se deben ingresar para este caso los siguientes datos mostrados en la Figura 96. Al momento de ingresar la ubicación (Center Coordinate) y los grados de orientación (Alignment Angle y Incline Angle) de la entrada además de su longitud y ancho (length y width) se puede proyectar en la ventana de trabajo el “inlet” como se observa en la Figura 97.

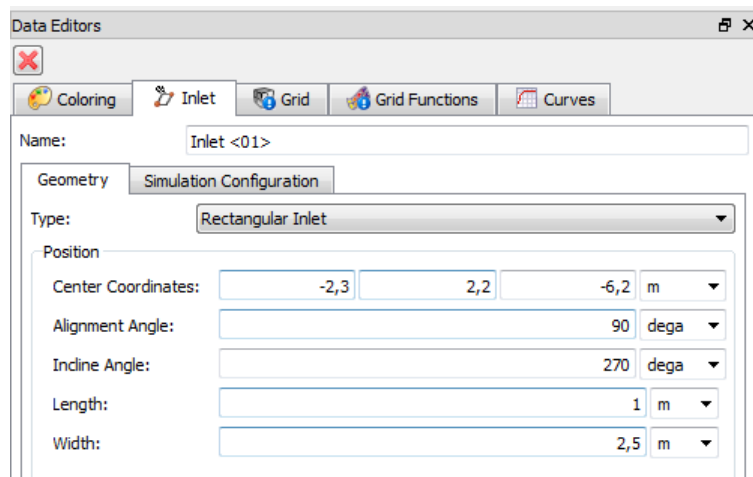


Figura 96: Seleccionar ubicación para la entrada de las partículas.

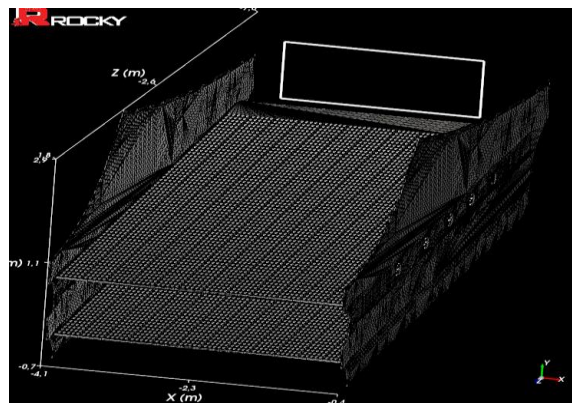


Figura 97: Harnero con la entrada de las partículas en la zona posterior.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

10.1.3.5 Selección e ingreso de material

El software Rocky permite seleccionar 3 materiales por defecto, dos para aceros y uno para partículas, lo que permite realizar los cálculos con materiales predeterminados, pero para este caso se ingresarán los materiales para las placas laterales y para la malla.

La manera de ingresar nuevos materiales al software consta de seleccionar en el “toolbox” “Materials” y en el “Data Editors” presionar la cruz verde (ver Figura 98). Al momento de presionar esta cruz se creará un nuevo material con valores predeterminados para densidad y Modulo de Young. Debido que la estructura que se está trabajando del harnero en Rocky está reducida a las placas laterales y la malla se necesita ingresar dos tipos de materiales el acero P265GH (placas laterales) y Poliuretano (malla).

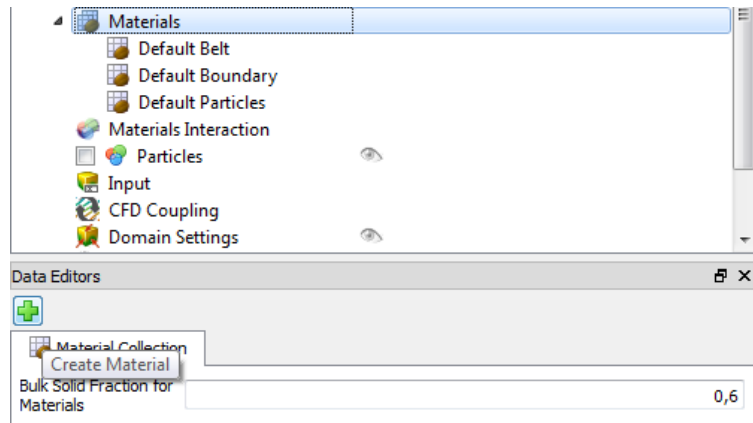


Figura 98: Ingresar material a Rocky.

A continuación, se muestra el ingreso de los materiales necesarios para los cálculos de paso de mineral a través del harnero de descarga R-MD. Para las placas laterales los valores de los datos a ingresar para su material se pueden observar en la Figura 99, para el material de la malla de harneado se puede ver en la Figura 100 y por último para el ingreso del material de las partículas se debe utilizar el valor predeterminado que trae el programa.



Figura 99: Ingresar material P265GH a Rocky.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos



Figura 100: Ingresar material Poliuretano a Rocky.

Ya con los materiales ingresados al software se puede seleccionar para cada componente de la estructura el material que corresponda. Esto se hace de forma muy simple ya que se debe seleccionar el componente desde el toolbox “geometries”, y de forma similar al paso de selección de tamaño de elementos de malla aparecerá en la sección “Data Editors” la opción material y con solo hacer click sobre éste aparecerán las opciones de los materiales a ingresar como se puede ver en la Figura 101.

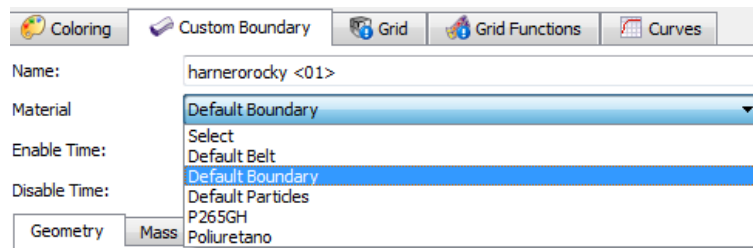


Figura 101: Selección de material en Rocky.

10.1.3.6 Definir interacción entre partículas

Durante las simulaciones en Rocky existen diferentes clases y cantidades de contactos entre los componentes de las estructuras que se trabajan y además entre los componentes y las partículas estudiadas, es debido a esto que el programa para poder realizar sus cálculos pide que se ingresen las características para las interacciones entre componentes entre sí y con las partículas. Los datos que pide el software para estas interacciones son los siguientes:

- Fricción Estática
- Fricción Dinámica
- Coeficiente de Restitución
- Distancia Adhesiva
- Fracción de Fuerza

Para este caso se debe seleccionar el modelo de adhesión “Constant” y seleccionar dos materiales e ir llenando cuadro a cuadro los datos de la interacción como se observa en la Figura 102. Los valores de todas las interacciones de pueden ver en la Tabla 12.

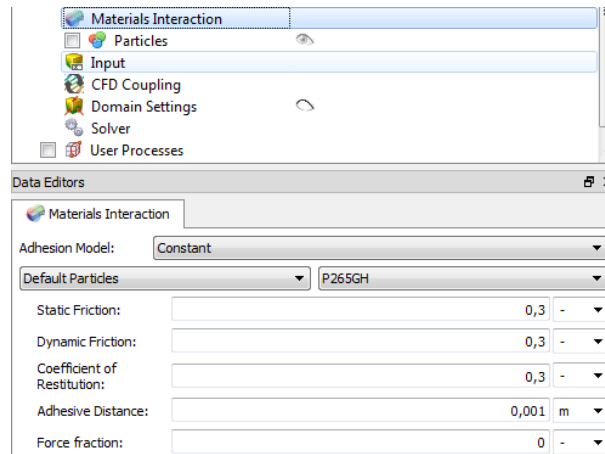


Figura 102: Ingresar interacción de los materiales.

Para los valores de los coeficientes se extrajeron de estudios similares realizados por el proveedor del software en sus tutoriales de presentación (29).

Tabla 12: Coeficientes de interacción entre los materiales.

Material 1	Material 2	Coeficientes	Valor	Unidades
Partículas	Poliuretano	Static friction	0,3	[-]
		Dynamic Friction	0,3	[-]
		Coefficient of Restitution	0,3	[-]
		Adhesive Distance	0,0001	Metros
		Force fraction	0	[-]
Partículas	P265GH	Static friction	0,5	[-]
		Dynamic Friction	0,5	[-]
		Coefficient of Restitution	0,3	[-]
		Adhesive Distance	0,0001	Metros
		Force fraction	0	[-]
Partículas	Partículas	Static friction	0,7	[-]
		Dynamic Friction	0,5	[-]
		Coefficient of Restitution	0,3	[-]
		Adhesive Distance	0,0001	Metros
		Force fraction	0	[-]

10.1.3.7 Aplicar movimiento para desplazamiento del mineral

La forma en que se desliza en la realidad el mineral a través del harnero es proporcionada por el movimiento que inducen los excitadores a éste mismo y que hace que las partículas se trasladen desde la descarga del trommel, zona trasera del harnero, hasta la correa transportadora que lleva a los chancadores de pebbles, zona delantera del harnero.

En el software Rocky se puede reproducir el movimiento que sufren las partículas al desplazarse en el harnero con la función “Movements” que aparece en la sección “Data Editors” al marcar cualquiera de los elementos de las estructuras (ver Figura 103). Más tarde al presionar “Edit Movements List” aparecerá una ventana, Figura 104, en donde se puede ingresar el tipo de movimiento en la sección “Movement Type”.

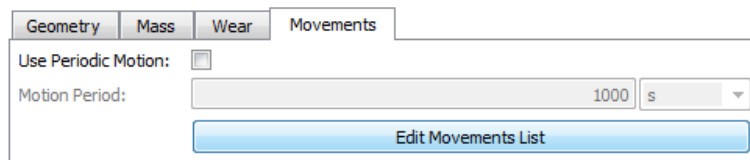


Figura 103: Ingresar movimiento a la estructura.

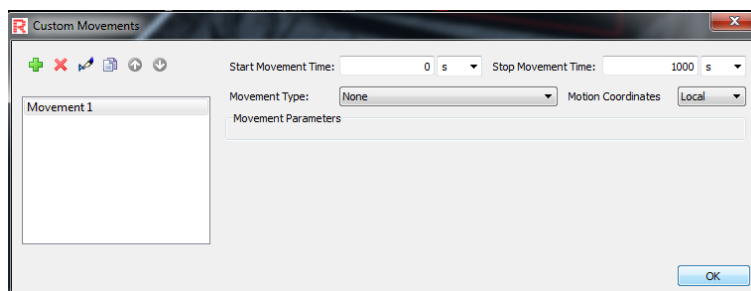


Figura 104: Ingresar el tipo de movimiento.

Las partículas en su mayoría se deslizan por sobre la malla de la estructura lo que permite identificar como principal movimiento de desplazamiento a esta parte de la estructura, es decir, la malla de la estructura del harnero proporcionará el desplazamiento de las partículas en la simulación para emular el comportamiento ideal del mineral.

Para el caso del harnero de descarga R-MD se seleccionó las partes de la malla, de una a la vez, para introducir el movimiento, como se especifica en los párrafos anteriores, y con ello se seleccionó el tipo de movimiento que para este caso el más adecuado es “Rotation and Translation Without Displacer” (Figura 105). La elección de este tipo de movimiento para la malla de harneado se debe a que al no ser en la vida real objetos móviles, éstos no deben desplazarse y solo crear un movimiento superficial que permita que el mineral no se acumule sobre ellos, sino que se desplace. Este tipo de movimiento que se encuentra en el software se asemeja al de las correas transportadoras que al observarlas pareciese que no están en movimiento y solo se puede identificar su movimiento al verlas trasladar objetos.

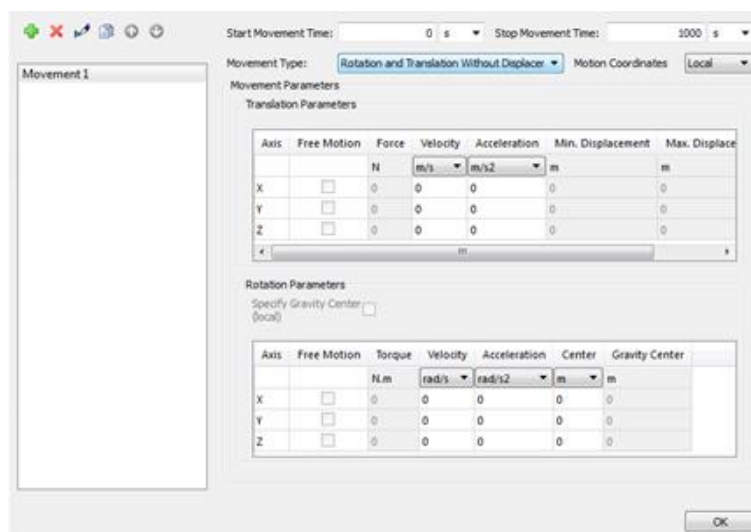


Figura 105: Coordenadas de desplazamiento y movimiento.

Al seleccionar el tipo de movimiento “Rotation and Translation Without Displacer” se generan dos cuadros donde se deben ingresar los valores de las coordenadas de movimiento para translación y para rotación (Figura 105). Como las mallas de harneado no tienen rotación solo movimiento de translación unidireccional se debe ingresar los valores en la dirección de un solo eje, el z. Esta dirección quedó determinada anteriormente en el proceso Diseñar o importar geometría y que al quedar referenciado así restringe para la simulación el movimiento de las partículas a través del eje z. de acuerdo a la orientación del harnero las partículas se desplazan en dirección Z+, por lo que los valores de velocidad ingresada deben ser para el eje z positivo.

De la Figura 105 se debe rescatar que el único valor que se debe ingresar es la velocidad en el eje z para el movimiento de las mallas de harneado, sin aceleración ya que se consideró un movimiento continuo para las partículas. Los valores de las velocidades se pueden ver en la

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Tabla 13: Velocidades de translación.

Componente	Velocidad [m/s]	Eje
Harnerorocky (58)	0,32	Z
Harnerorocky (59)	0,32	Z
Harnerorocky (60)	0,32	Z
Harnerorocky (61)	0,32	Z
Harnerorocky (62)	0,32	Z
Harnerorocky (63)	0,32	Z

10.1.3.8 Ingresar partículas

El proceso para ingresar las partículas es un paso bastante simple ya que el software trae predeterminada todas las configuraciones para poder ingresar cualquier tipo de mineral. Lo primero es seleccionar en el “toolbox” la opción “Particle” y seleccionar la cruz verde en el “Data Editors” para que se cree un nuevo grupo de partículas “Particle <1>” como se ve en la Figura 106.

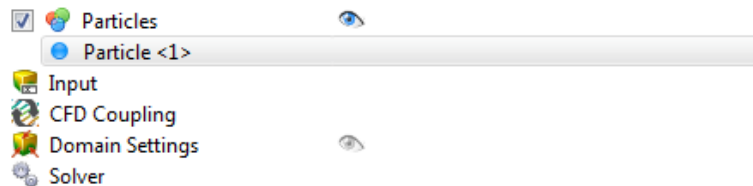


Figura 106: Ingresar partículas a Rocky.

Lo siguiente luego de crear el nuevo grupo de partículas (Particle <1>) es ingresar los tamaños de granulometría que se espera pasen por el harnero en la simulación. Para esto se debe ingresar presionando la cruz verde e ingresando su tamaño (Size) y porcentaje de acumulación (Cumulative %). Ver Figura 107.

NOTA: es importante que los tamaños de distribución se ingresen al software en orden decreciente, es decir, de mayor a menor tamaño, sino el programa arrojará un error.

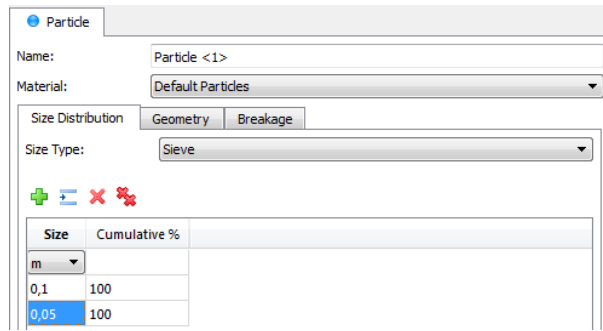


Figura 107: Ingresar tamaño de distribución de partículas.

Las siguientes distribuciones fueron usadas para este trabajo:

Tabla 14: Tamaño de distribución.

Tamaño (Size) [m]	Porcentaje de acumulación (Cumulative%)
0,1016	90
0,08	30
0,05	40

La forma de la partícula también se encuentra predeterminada dentro del proceso de ingreso de partícula en la sección “Geometry”, en donde se pueden ingresar el tipo de forma (Shape Type), de la cual existen x (Spherical, Receted), además de su coeficiente de resistencia a la rodadura (Rolling Resistance). Ver Figura 108.

El tipo de forma elegido para este trabajo es Receted y su coeficiente de resistencia a la rodadura es 0,28 (30).

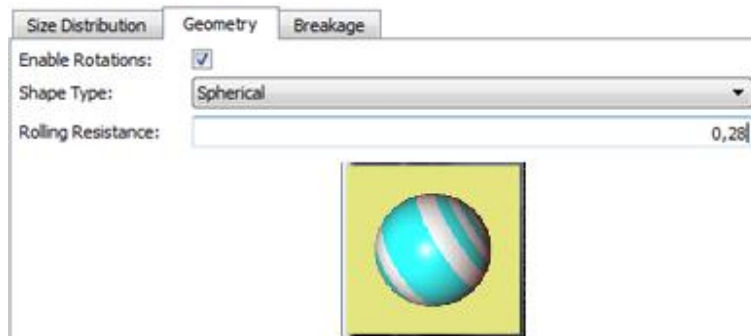


Figura 108: Ingresar tipo de forma de la partícula.

10.1.3.9 Seleccionar ingreso de partículas

La manera en que ingresan las partículas al harnero se hará a través del “Inlet” creado en “Definir entrada de las partículas”. Para esto se debe seleccionar en el “toolbox” la sección “Input” y presionando la cruz verde se creará una salida de partículas llamada “Particle Input <1>”. Luego se debe elegir la salida para éstas, para este caso llamada “Inlet <1>”, en la sección “Entry Point”. Ver Figura 109.

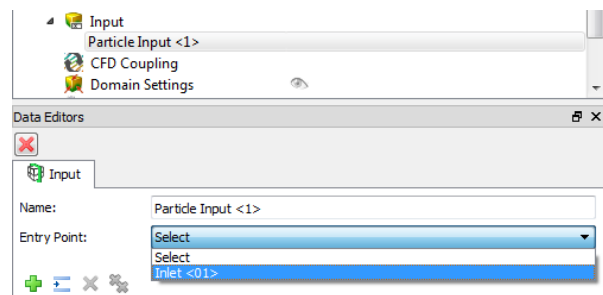


Figura 109: Seleccionar salida de partículas (Input).

Con la salida de las partículas fijada, se debe ingresar la cantidad de éstas que atravesaran la entrada, es decir, se debe ingresar la cantidad de flujo por unidad de tiempo para las partículas. La manera de ingresar este flujo se debe hacer presionando la cruz verde que se muestra en la Figura 109. Luego de esto se debe ingresar el flujo de partículas que se pretende estudiar.

Para el caso del harnero de descarga R-MD se analizará la mayor capacidad de producción de la planta, es decir, se tomará en cuenta el caso en que el molino SAG procese a su mayor capacidad. Si se considera que del total del mineral procesado por el molino SAG solo el 30% pasa a ser seleccionado por el harnero, y el molino SAG a su mayor capacidad procesa 5000 toneladas por hora, se puede estimar que a su mayor capacidad el harnero recibe desde el trommel un flujo de 1500 toneladas por cada hora.

Importante de señalar es que, en el ingreso del flujo de partícula a parte de la cantidad de toneladas, en “Tonnage”, se debe seleccionar el grupo de partícula, “Particle <1>”, en la sección “Particle” como se observa en la Figura 110.

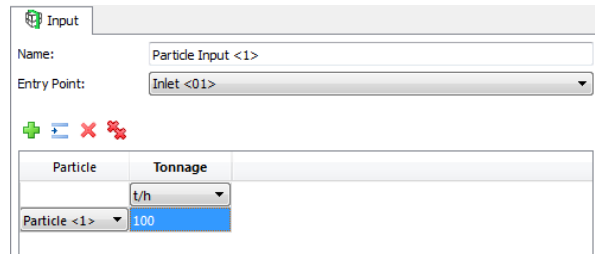


Figura 110: Ingresar flujo de partículas.

10.1.3.10 Comenzar la simulación

La simulación luego de ingresar todas las condiciones de contorno y además de marcar las opciones “Collect Forces to FEM Analysis” (recoger fuerzas para Análisis FEM) y “Release Particles without Overlap Check” (liberan partículas sin verificación de superposición) para recoger datos para próximos análisis y para alivianar los cálculos dentro de la simulación. Ver Figura 111.

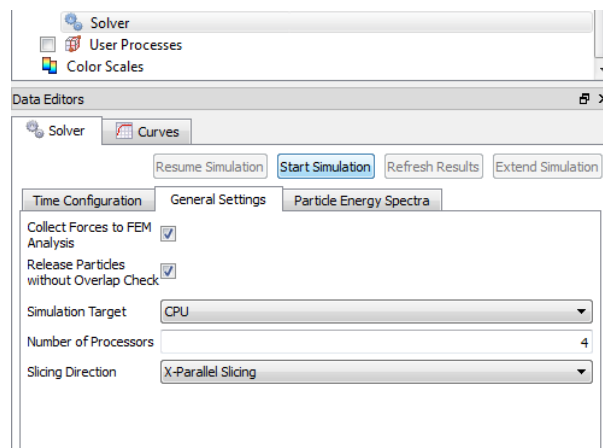


Figura 111: Iniciar simulación Rocky.

10.1.3.11 Ingresar las cargas en los gráficos de Rocky

Al finalizar los cálculos en el programa Rocky se deben realizar los ingresos de las fuerzas obtenidas para los componentes de interés, es decir, se deben seleccionar los componentes de interés, para este caso las mallas de selección, y extraer mediante gráficos el comportamiento de las fuerzas en éstos.

La forma en la que se obtienen las fuerzas que se proyectan en los componentes es a través de estos pasos:

1. Crear una nueva pestaña de trabajo: al terminar el programa Rocky el proceso de cálculos se debe crear una nueva ventana de trabajo seleccionando la opción “Start Page”.
2. Ingresar diagrama de tiempo: Luego de crear la nueva venta de trabajo se debe incorporar el diagrama de tiempo en donde se ingresarán las fuerzas. Para ingresar este cuadro de diagramas se selecciona la opción “Windows” y con la opción “New time plot” como se puede observar en la Figura 112.

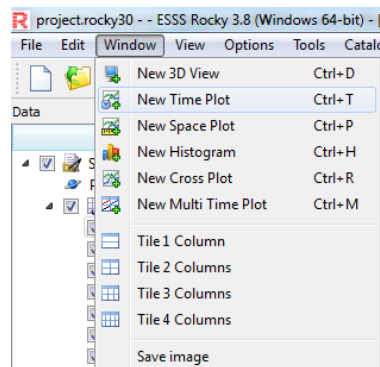


Figura 112: Seleccionar nueva ventana de diagramas en Rocky.

3. Ingresar cuadro de variables: al tener la ventana de diagramas lista, se puede ingresar un cuadro en donde ir agrupando las variables con los valores máximos. Para esto se selecciona la opción “Tools” y se escoge “Expressions/Variables” (Figura 113).

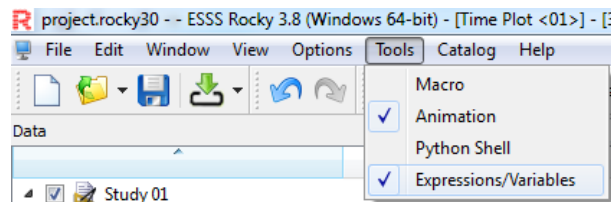


Figura 113: Seleccionar cuadro de expresiones en Rocky.

4. Seleccionar el componente: al tener la nueva ventana de tiempo y la de variables se debe seleccionar el componente a analizar, para luego escoger en la ventana inferior “Data Editors” la opción “Grid Functions”. Lo siguientes es seleccionar

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

la fuerza en el eje que impacta al equipo. El eje de impacto y debido a esto se selecciona la fuerza nodal instantánea (Instantaneous Nodal Forces Y) como se ve en la Figura 114

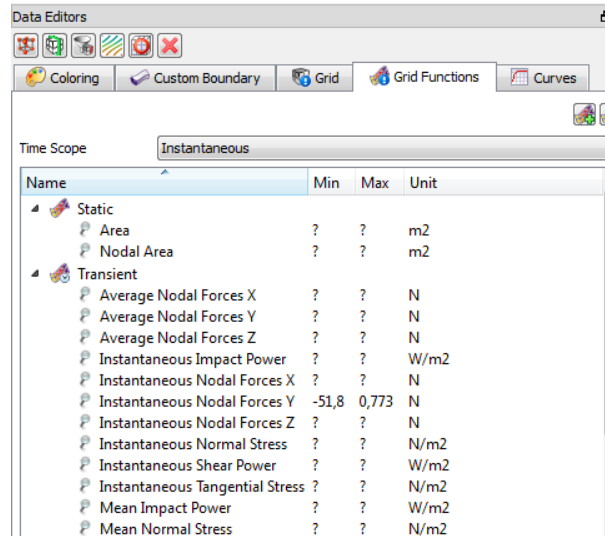


Figura 114: Fuerzas nodales instantáneas proyectadas en el equipo.

5. Graficar las fuerzas nodales instantáneas: después de seleccionar la fuerza nodal instantánea en “Grid Functions” se tiene que arrastrar esta fuerza a la nueva ventana de trabajo en función del tiempo y con ello seleccionar que proyección se haga con una curva tipo “sum”. También se deben arrastrar hacia la ventana de las variables en la opción “Output”, y además agregar datos similares a los que se observan en la Figura 115.

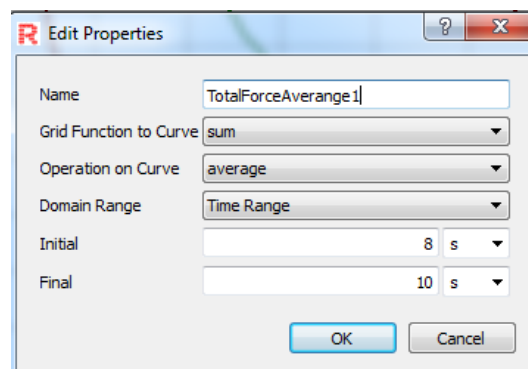


Figura 115: Ingreso de fuerzas a la tabla de variables.

El rango de tiempo se debe fijar en función de la proyección de las fuerzas, ver el gráfico de la Figura 116.

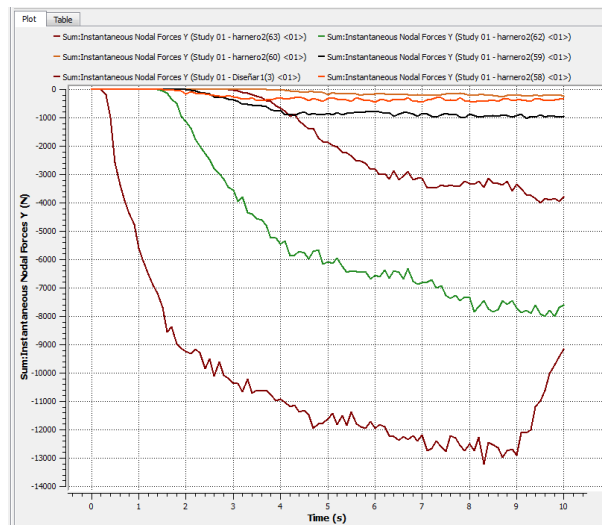


Figura 116: Proyecciones de las fuerzas nodales instantáneas en el tiempo.

6. Termino de proyección de fuerzas: al repetir 6 veces estos pasos, uno para cada componente de la malla de harneado del equipo, se puede cerrar el programa Rocky y comenzar el análisis con ANSYS. Al terminar las fuerzas quedaran graficadas como en la Figura 116 y ordenadas en la tabla de variables como la Figura 117.

Expressions/Variables		
Output Variables		
Drag & drop curve or grid function to create new output variable		
Name	Value	
TotalForceAverange 3	-3558,83 [N]	8 [s] to 10
TotalForceAverange2	-7711,59 [N]	8 [s] to 10
TotalForceAverange6	-214,788 [N]	8 [s] to 10
TotalForceAverange5	-937,209 [N]	8 [s] to 10
TotalForceAverange4	-379,313 [N]	8 [s] to 10
TotalForceAverange1	-11760 [N]	8 [s] to 10

Figura 117: Tabla con valores de fuerzas nodales variables.

10.1.4 Cargar los datos obtenidos en Rocky

El final de la simulación en “Rocky DEM” se realiza al momento que el Software ANSYS Workbench carga los resultados obtenidos en el cálculo computacional previo (10.1.3). Esto se realiza dos veces, debido a que el programa Rocky al terminar la simulación no actualiza sus resultados en la ventana del programa “ANSYS Workbench” (ver Figura 118). Para esto es importante cerrar el programa Rocky y después presionar con el botón derecho la opción “Results”, que está en el cuadro de Rocky en la ventana de trabajo de ANSYS Workbench, y seleccionar “Upgrade” (ver Figura 118).

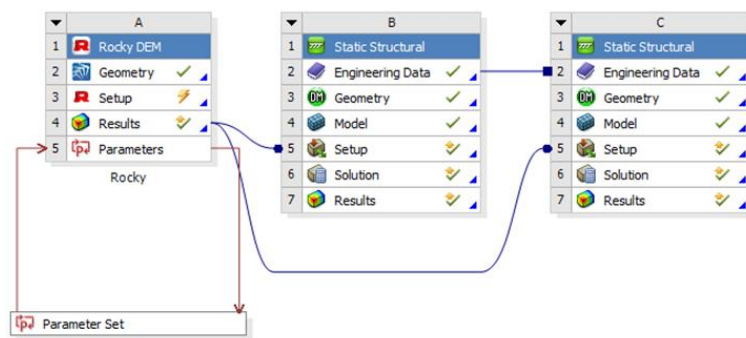


Figura 118: Menú ANSYS Workbench al terminar la simulación en Rocky.

Es importante saber que al momento de seleccionar la opción “Upgrade” el programa Rocky se volverá a iniciar y se deben aceptar las ventanas de dialogo que aparecerán, para que inicie su actualización de forma normal. El programa recalculará de nuevo todo y al finalizar el proceso de cálculo se debe cerrar Rocky y presionar con el botón derecho de nuevo sobre “Results” y ahora en vez de seleccionar “Upgrade” se debe seleccionar “Refresh”. Al momento que los rayos amarillos desaparezcan de al lado de “Results” y aparezca un ticket verde se puede continuar con los cálculos de elementos finitos en base a lo obtenido en Rocky (Figura 119). En el caso que no se proporcione la actualización de los datos se debe repetir el paso de “Upgrade” hasta que se consiga que se suban los datos al software ANSYS.

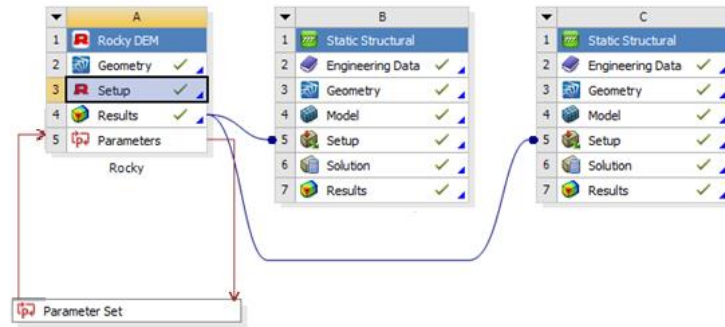


Figura 119: Menú ANSYS Workbench al terminar y actualizar la simulación en Rocky.

10.2 Desarrollo de los cálculos en ANSYS acoplado con Rocky

Los cálculos en ANSYS para el caso con acoplamiento con Rocky se deben realizar de forma similar a la que se realizó en el modelo con las cargas ingresadas de forma manual en el capítulo VIII. Los pasos son iguales que en el capítulo VIII, pero cambia la forma en que se ingresan las fuerzas, debido a que ahora se deben importar de un software y no ingresar de forma manual (8.1.3.5).

10.2.1 Importar fuerzas desde Rocky a ANSYS

Las fuerzas importadas desde el software Rocky se deben ingresar a través de la carpeta que se genera dentro del software, que tiene el nombre de “Imported Load (A4)” como se puede observar en la Figura 120.

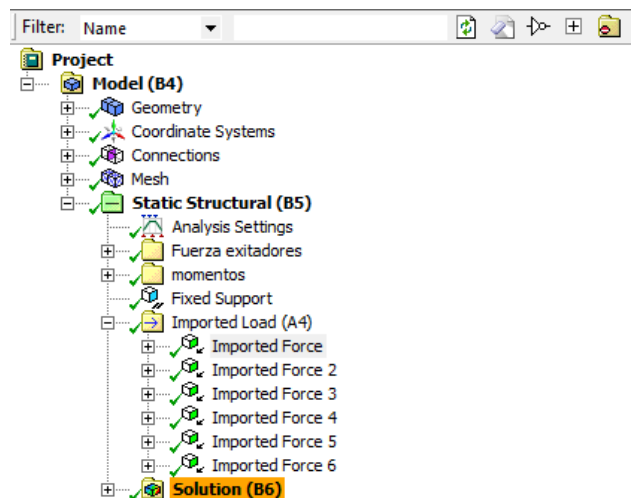


Figura 120: Importar fuerzas desde Rocky hacia ANSYS.

En la carpeta “Imported Load (A4)” al seleccionarla y presionar el botón derecho del mouse se abrirán una gama de opciones de las cuales se debe seleccionar “Importar Force”. Esta opción permite importar las fuerzas que se generan en la superficie de la malla y aplicarlas en la misma geometría en ANSYS. Para hacer esto se tiene que seleccionar la superficie de la geometría como se ve en la Figura 121.

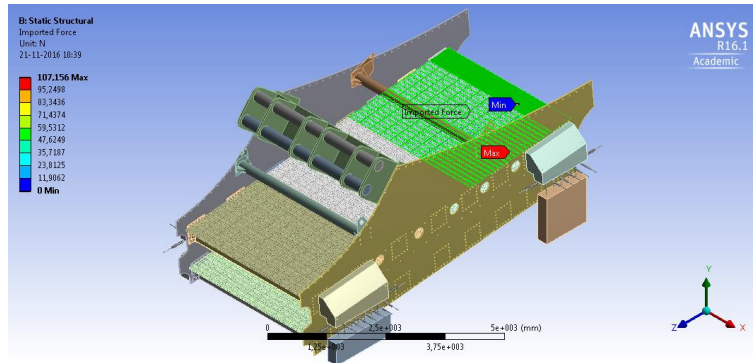


Figura 121: Harnero con una parte de la superficie de la malla seleccionada.

Luego de seleccionar la superficie para importar las cargas se debe ingresar en ANSYS los siguientes datos:

Tabla 15: Datos ingresar fuerzas importadas desde Rocky.

Details of “Imported Force”			
Scope		Settings	
Scoping Method	Geometry Selection	Mapping Control	Program Controlled
Geometry	1 Face	Mapping	Conservative
Definition		Weighting	Shape Function
Type	Imported Force	Transfer Type	Surface
Tabular loading	Program Controlled	Legend Controls	
Suppressed	No	Legend Range	Program Controlled
Define By	Components	Minimum Source	0, N
Coordinate System	Source Coordinate System	Maximum Source	49,594 N
Graphics Controls			
Component	All		
Display Source Points	Off		
Display Source Points Ids	Off		

Luego de ajustar estos datos se debe acoplar la superficie con los resultados de Rocky con la superficie a estudiar de ANSYS. Para poder acoplar estas superficies se debe seleccionar abajo en el cuadro que se muestra en la Figura 122 los componentes con el nombre que tienen en Rocky para cada componente de ANSYS, es decir, la pieza que se ve seleccionada en la Figura 121 corresponde a una de los 6 componentes que forman la malla de harneado y en Rocky recibe el nombre de “Disear301”, por lo que se debe acoplar a ésta para cada eje como se ve a continuación.

	X Component (N)	Y Component (N)	Z Component (N)	Analysis Time (s)	Scale
1	Disear1301:fx	Disear1301:fy	Disear1301:fz	1	1
*					

Figura 122: Cuadro de acoplamiento de fuerzas de Rocky a ANSYS.

A continuación, se debe repetir este proceso para los 6 componentes de la malla de harneado, para comenzar a ingresar las soluciones. Las soluciones se ingresan de la misma manera que en el estudio del capítulo 8 (8.1.4), pero con la diferencia que para este caso no existe el estudio de comportamiento modal, debido a que las cargas y fuerzas no afectan en este tipo de análisis.

10.3 Casos a analizar

Las cargas que generan el mineral sobre el harnero no siempre son uniformes, por lo que es importante también estudiar el comportamiento de éstas cuando su aplicación no es la esperada. Es por esto que se harán diferentes estudios para las cargas aplicadas a este equipo vibrador, uno será con la descarga de mineral uniforme y el segundo estudio será al realizar la descarga del mineral con inclinación hacia el costado derecho del harnero.

10.3.1 Acoplamiento con descarga uniforme de mineral

La descarga de mineral en la zona trasera del harnero se hace de forma uniforme saliendo por una ventana de 2,5x1 metros. Esta descarga está centrada lo que hace que el flujo de mineral se deposite de manera uniforme en el harnero como se observa en la Figura 123.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

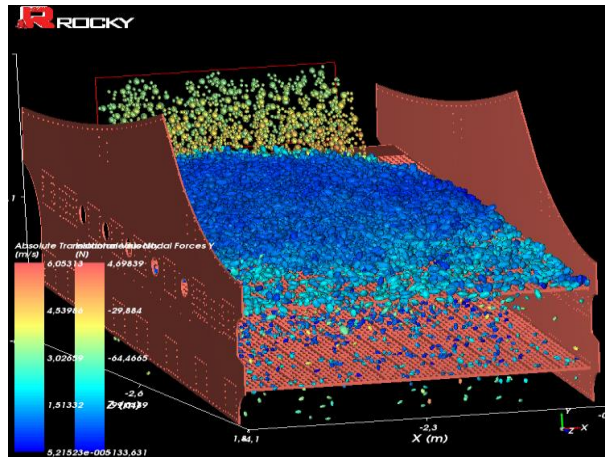


Figura 123: Flujo de mineral uniforme pasando por el harnero en Rocky.

El flujo del mineral se hizo variar en un rango entre 0 y 5000 toneladas para estudiar el comportamiento de las cargas en el harnero. Para esto se realizaron 21 mediciones dentro de las cuales las primeras 11 están entre 0 y 1500 toneladas, que es el rango que opera en realidad este equipo, las siguientes 10 son para sobre-exigir el equipo.

El mineral al impactar la malla de selección genera cargas diferentes entre las 6 partes que conforman estos dos niveles de harneado, como se observó en la Figura 116. Las fuerzas que se recopilaron al variar el flujo entre 0 y las 5000 toneladas para cada componente se proyectan en el Gráfico 27.

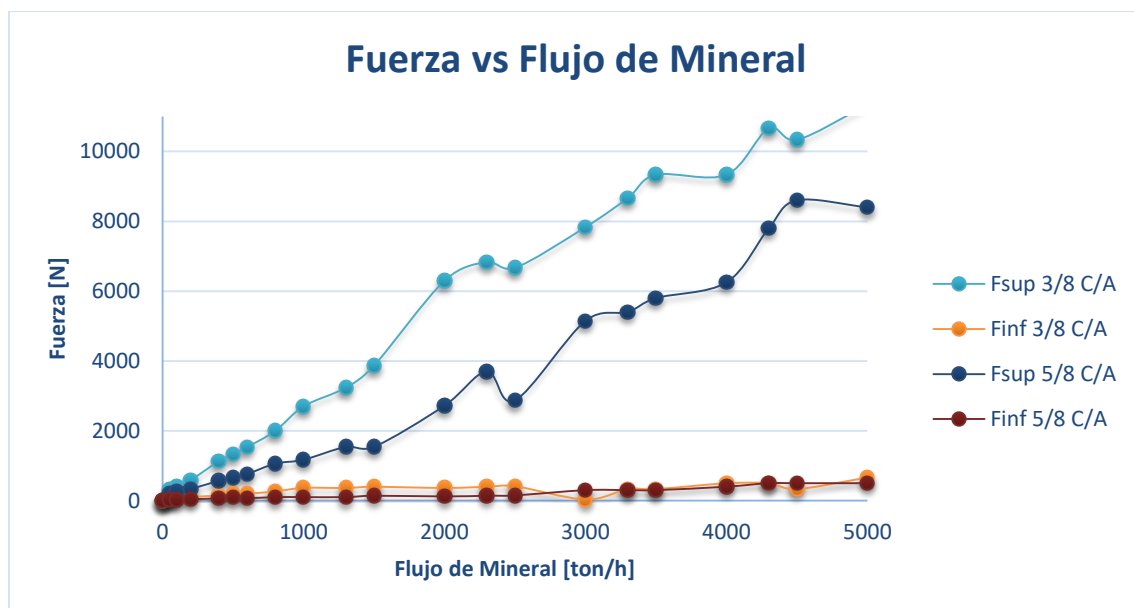


Gráfico 27: Fuerzas proyectadas carga uniforme Rocky.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Al comparar las fuerzas obtenidas en los cálculos del ítem 5.1.3.2 y que se muestran en el Gráfico 2, cargas calculadas a partir de una ecuación, con las fuerzas proyectadas en el Gráfico 27 se puede observar que el impacto del mineral sobre el harnero es mucho menor para los resultados de la simulación en comparación a lo teórico, debido a que las ecuaciones no consideran el impacto del mineral sobre sí mismo y la disminución en las cargas que éste provoca al acumularse en el harnero vibratorio.

10.3.2 Acoplamiento con descarga no uniforme de mineral

El otro caso a analizar es con una descarga de mineral no uniforme, es decir, que el mineral no se deposite de manera simétrica en el harnero, más hacia alguno de los costados del éste. Para esto se edita la salida del mineral y de inclina hacia el lado derecho del equipo como se puede ver en la Figura 124.

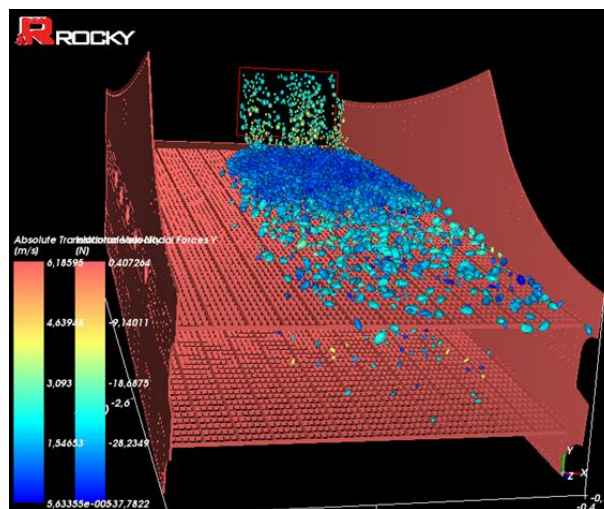


Figura 124: Flujo de mineral no uniforme pasando por el harnero en Rocky.

De manera similar al cálculo realizado con la descarga de mineral uniforme, se hizo variar el flujo de mineral entre 0 y 5000 toneladas por hora, pero con la diferencia que en vez de las 21 mediciones se realizaron 10 con intervalos de 500 toneladas (0,500,1000...).

Las fuerzas generadas por el impacto del mineral sobre el harnero vibratorio se pueden ver proyectadas en el Gráfico 28, en donde se puede observar el cambio que se genera al momento que empieza el mineral a acumularse y amortiguar la caída del mismo. Las cargas máximas producto de este cambio se trasladan del primer tercio de la malla del harnero a la zona central de

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

éste, debido a que el mineral se acumula en el primer tercio y amortigua la caída del mismo en esta zona, mientras que en la zona central impacta de manera más libre sobre el equipo.

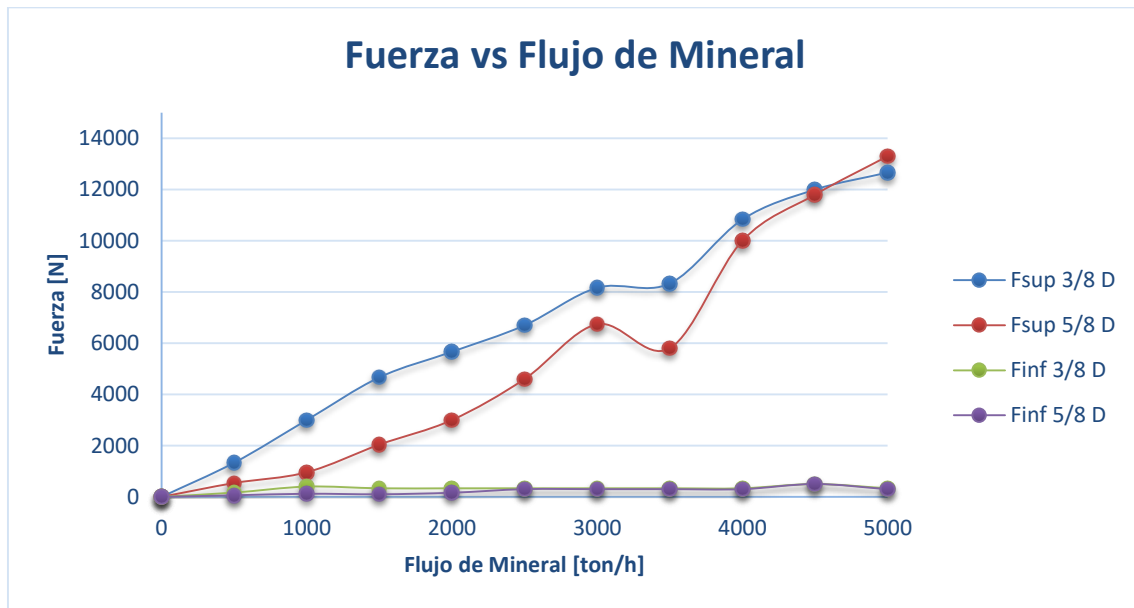


Gráfico 28: Fuerzas proyectadas carga no uniforme Rocky.

10.4 Resultados

Los análisis que se mostraran en los siguientes ítems contienen las comparaciones entre los resultados obtenidos en el CAPÍTULO VIII, específicamente en el punto 8.2 y los obtenidos en los casos presentados en el punto 10.3.

Para identificar en los gráficos cada caso se utilizarán las siguientes siglas:

- 24R S/A: 24 resortes sin acoplamiento.
- 4R S/A: 4 resortes sin acoplamiento.
- 24R C/A: 24 resortes con acoplamiento con Rocky.
- 4R C/A: 4 resortes con acoplamiento con Rocky.
- 24R C/A D: 24 resortes con acoplamiento desplazado con Rocky.
- 4R C/A D: 24 resortes con acoplamiento desplazado con Rocky.

10.4.1 Análisis I: Harnero completo

Los resultados para el estudio del harnero completo al igual que en el punto 8.2 se centran principalmente en la deformación total máxima, debido a que es de interés estudiar la deformación en su conjunto completo por sobre los esfuerzos que para este caso se concentran en zonas que se analizarán más adelante.

Al observar el Gráfico 29 de deformación total máxima se puede descubrir que los resultados con acoplamiento, para ambos casos, están por debajo de los resultados obtenidos en el estudio sin acoplamiento, debido a que las cargas que se generan por la modelación del mineral en Rocky son menores a las que se obtienen a través de la ecuación planteada en el ítem 5.1.3.2.

10.4.1.1 Deformación total

La deformación total máxima para los casos con acoplamiento difiere a las sin acoplamiento, debido a que éstas no se proyectan de forma lineal en función del flujo mineral como se observa en el Gráfico 29. La razón por la que se da esto tiene que ver principalmente con el hecho de que las fuerzas que se obtienen al realizar la simulación en Rocky no presentan una conducta lineal, y esto se puede ver en los gráficos que modelan las fuerzas (Gráfico 27 y Gráfico 28).

Tabla 16: Variación porcentual de la deformación para el harnero completo.

		Deformación [%]	
		0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]
Sin acoplamiento	24R	14,10	-
	4R	14,53	-
Con acoplamiento uniforme	24R	4,91	6,08
	4R	4,41	5,48
Con acoplamiento no uniforme	24R	8,27	12,28
	4R	7,60	11,50

Los valores que aparecen en la Tabla 16 muestran la variación porcentual que sufre la deformación para cada uno de sus casos, de donde se puede ver que el cambio de la deformación total máxima es mayor para los casos sin acoplamiento en comparación a los con acoplamientos en el rango de trabajo (0-1500 toneladas por hora). Para los casos con acoplamiento del software Rocky si bien los valores de la deformación son mayores para los análisis con 4 resortes por sobre los con 24 resortes (Gráfico 29), en cambio el porcentaje de variación que hay entre los análisis de 4 resortes es menor para la descarga uniforme entre el rango de trabajo, y mayor para la descarga no uniforme, esto significa que el cambio que existe para la descarga no uniforme es mayor en valores y porcentajes para el caso con 4 resortes comparado con el caso para 24 resortes y a diferencia la descarga uniforme sus valores de deformación son menores para 24R, pero mayores en porcentaje de cambio en comparación al análisis con 4R.

Los resultados que se pueden observar en el Gráfico 29 son muy dispersos, debido a que éste muestra los valores máximos de la deformación, que para este caso se concentran en la malla de harneado, la cual no presenta un comportamiento muy regular, ya que el material que la compone no se comporta de forma lineal.

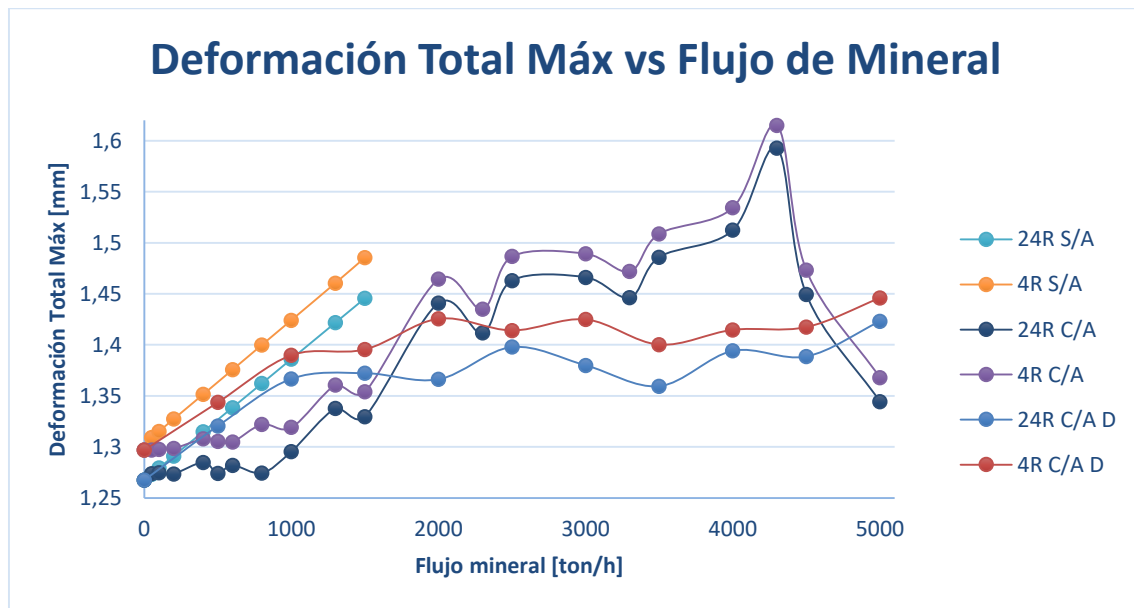


Gráfico 29: Deformación total máx. vs flujo de mineral (harnero completo).

10.4.2 Análisis II: Harnero sin Malla

El estudio del harnero sin la malla tiene como principal objetivo observar el comportamiento estructural del equipo, descartando como dice en el título la malla harneado que concentra los índices más altos de deformación.

De esta manera se puede observar la deformación total máxima que se produce en el cuerpo del harnero y con esto identificar las zonas críticas de este equipo. Estas zonas al igual que en el ítem 8.2.2 se generan en la parte posterior de la estructura, más bien donde ocurre la descarga del mineral, y también donde se apoyan los excitadores, afectando las vigas transversales posteriores y la viga madre.

10.4.2.1 Deformación total

La deformación total máxima como se puede observar en el Gráfico 30 tiende a ser menor para los dos casos, descarga uniforme y no uniforme, en comparación a la modelación del mineral a través de una ecuación. El comportamiento de las curvas que se generan de las simulaciones con acoplamiento con Rocky a diferencia de las sin acoplamiento no son de carácter lineal, debido a que la deformación total máxima va variando de tal manera con el aumento del flujo de mineral que no presenta una tendencia lineal.

Tabla 17: Variación porcentual de la deformación para el harnero sin malla.

		Deformación [%]	
		0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]
Sin acoplamiento	24R	17,70	-
	4R	17,44	-
Con acoplamiento uniforme	24R	3,81	11,03
	4R	3,25	10,21
Con acoplamiento no uniforme	24R	4,64	13,37
	4R	3,94	12,46

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Los casos con acoplamiento con Rocky presentan bajos índices de variación en el rango de trabajo normal, 0 a 1500 toneladas por hora, debido a que el flujo de mineral no afecta en demasía a la deformación total máxima del cuerpo del harnero, y para el rango agregado al estudio (hasta las 5000 toneladas por hora) es bastante superior el cambio de porcentaje.

La forma en que se proyectan las curvas de deformación total máxima para los casos con acoplamiento del software Rocky están muy por debajo de las que se generan sin este acoplamiento, debido a que en la zona posterior donde se produce la mayor deformación (Figura 76) es donde el mineral impacta de manera directa con el harnero y sobre sí mismo al acumularse.

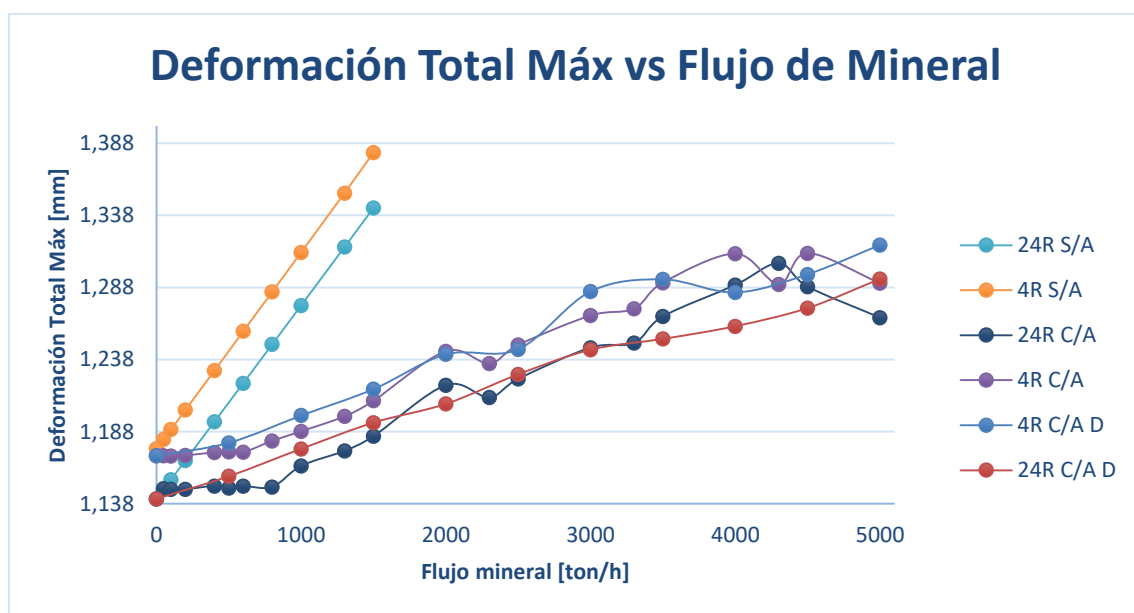


Gráfico 30: Deformación total máx. vs flujo de mineral (harnero sin malla).

10.4.3 Análisis III: Viga Madre

La viga madre como se mencionó en el punto 8.2.3 a pesar de que no tiene directa relación con el flujo de mineral también se ve afectada por el paso de éste por el equipo. Esto se puede observar en los gráficos de deformación, esfuerzo máx. y factores de seguridad a continuación (Gráfico 31, Gráfico 32, Gráfico 33 y Gráfico 34). De acuerdo a los resultados las variables de interés se compararon para todos los casos, casos con acoplamiento y sin acoplamiento, destacando las siguientes apreciaciones para cada una de éstas.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Tabla 18: Variación porcentual de la deformación y el esfuerzo para la viga madre.

		Deformación [%]		Esfuerzo máx. [%]	
		0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]	0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]
Sin acoplamiento	24R	5,51		3,52	-
	4R	5,98		3,27	-
Con acoplamiento uniforme	24R	1,44	4,42	0,30	1,81
	4R	1,10	1,10	0,33	1,85
Con acoplamiento no uniforme	24R	1,76	5,74	0,72	2,09
	4R	1,37	5,32	0,73	2,17

Los valores de deformación y esfuerzo que tiene este componente son altos, pero la variación que experimentan éstos es baja como se observa en la Tabla 17, debido a que la fuerza que recibe desde los excitadores es mayor a la que le transmite el flujo de mineral.

10.4.3.1 Deformación total

La deformación total máxima al comparar todos los resultados se puede observar que al igual que en todos los casos anteriores los valores para los análisis con acoplamiento tienden a ser menores que los sin acoplamiento, debido a que la deformación total máxima para los análisis con acoplamiento tiene una pendiente de crecimiento menor a la sin acoplamiento.

Al comparar los resultados entre los análisis con acoplamiento se puede ver una similitud entre los valores obtenidos en el rango de trabajo (0-5000 toneladas por hora), lo que permite asegurar que el tipo de descarga, uniforme o no uniforme, no afecta la deformación total máxima para este componente.

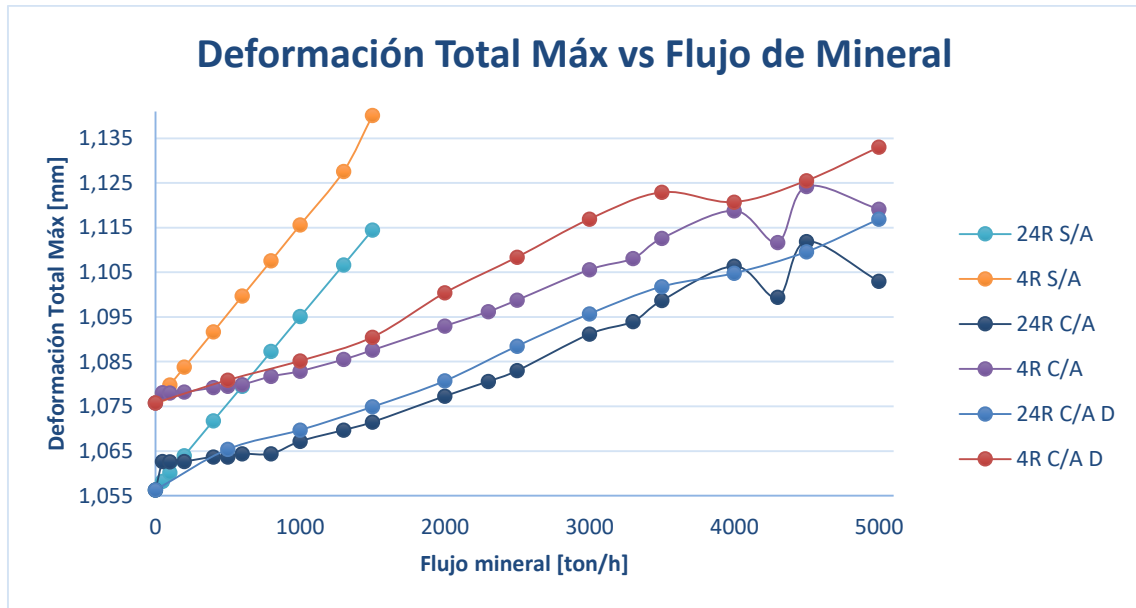


Gráfico 31: Deformación total máx. vs flujo de mineral (viga madre).

10.4.3.2 Esfuerzo equivalente

El esfuerzo equivalente muestra en el Gráfico 32 la superioridad de los valores para el análisis sin acoplamiento de Rocky, y una leve diferencia entre los valores entre los casos con acoplamiento. Para el caso de descarga no uniforme los valores de los esfuerzos están por sobre los que se obtienen para la descarga uniforme, entre el rango de 0 a 3500 toneladas, después se acercan los valores, debido a que la descarga no uniforme al ser más acotada provoca que se acumule mineral más rápido, y con ello empieza a impactar el mineral sobre sí mismo amortiguando el impacto sobre el equipo vibrado.

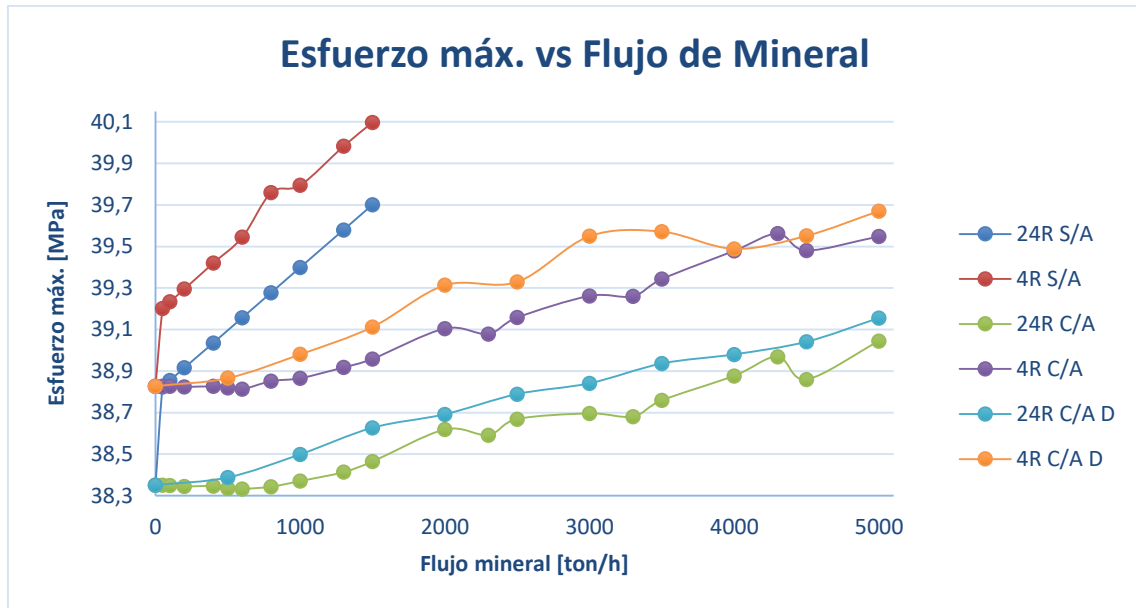


Gráfico 32: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral (viga madre).

10.4.3.3 Factor de seguridad estático y dinámico

Los valores para los factores de seguridad, estático y dinámico, que se muestran en el Gráfico 33 y Gráfico 34 son altos para los criterios de diseño, por lo que este componente es confiable. Los gráficos también muestran el decrecimiento que va teniendo los factores de seguridad al aumentar el flujo de mineral, siendo el análisis sin acoplamiento el que presenta valores menores.

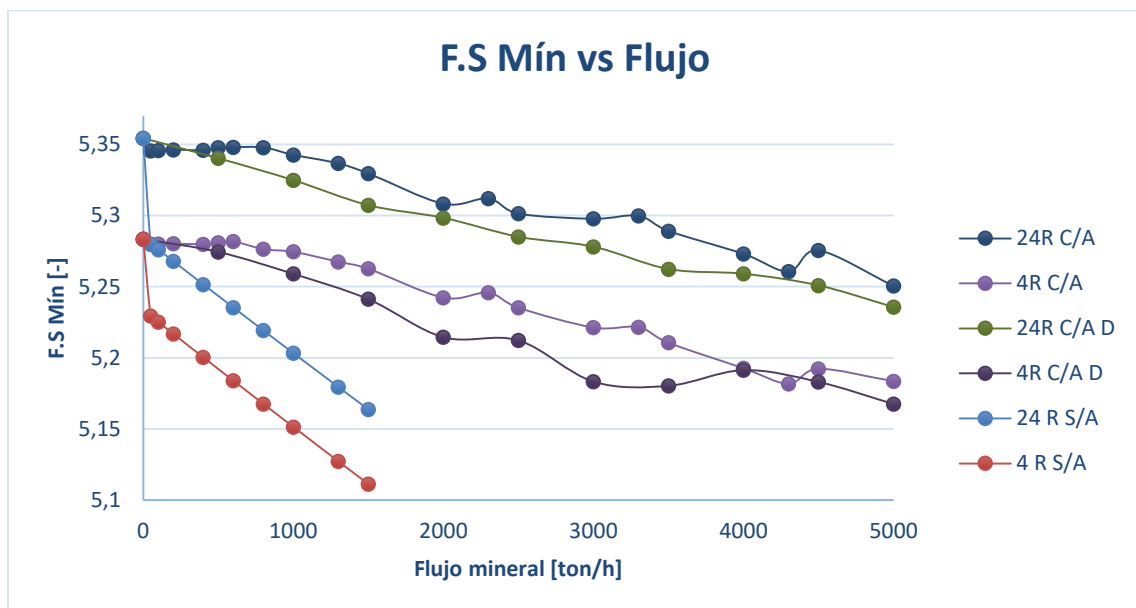


Gráfico 33: F.S. estático mín. vs flujo de mineral (viga madre).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

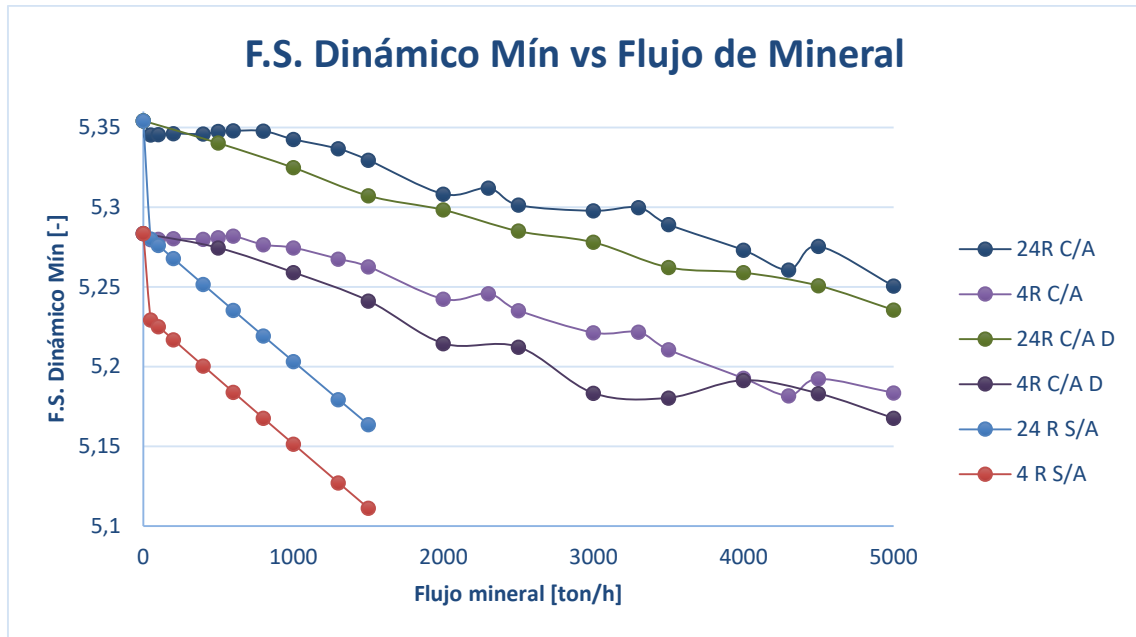


Gráfico 34: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral (viga madre).

10.4.4 Análisis IV: Viga descanso delantera

La viga de descanso delantera presenta un comportamiento similar entre los casos con acoplamiento, pero con inferioridad con respecto a los valores al ser compararlo con el análisis sin acoplamiento del software Rocky. Estos resultados se pueden observar en las siguientes variables de estudio.

Tabla 19: Variación porcentual deformación y el esfuerzo máx. (viga descanso delantera).

		Deformación [%]		Esfuerzo máx. [%]	
		0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]	0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]
Sin acoplamiento	24R	5,87	-	7,01	-
	4R	6,25	-	11,33	-
Con acoplamiento uniforme	24R	1,21	4,31	1,13	6,53
	4R	0,94	4,01	1,69	8,69
Con acoplamiento no uniforme	24R	1,89	7,03	0,75	7,94
	4R	1,58	6,61	1,61	10,37

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

La Tabla 19 muestra la variación porcentual de la deformación total máxima y el esfuerzo que se genera al pasar flujo de mineral a través del equipo vibrador. Estas variaciones muestran unos bajos índices de cambio para las variables de interés, deformación y tensión, dentro del rango de operación que va desde 0 a 1500 toneladas por hora.

10.4.4.1 Deformación total

La deformación total máxima que se produce en la viga de descanso delantera se concentra en la zona central de ésta, y mantiene los resultados menores para los análisis con acoplamiento con Rocky en comparación a los sin acoplamiento.

La descarga no uniforme muestra resultados superiores en deformación en comparación a la descarga uniforme para el rango entre 0 y 5000 toneladas (Gráfico 35). Esto demuestra que la caída del mineral afecta el comportamiento del estado estructural del equipo.

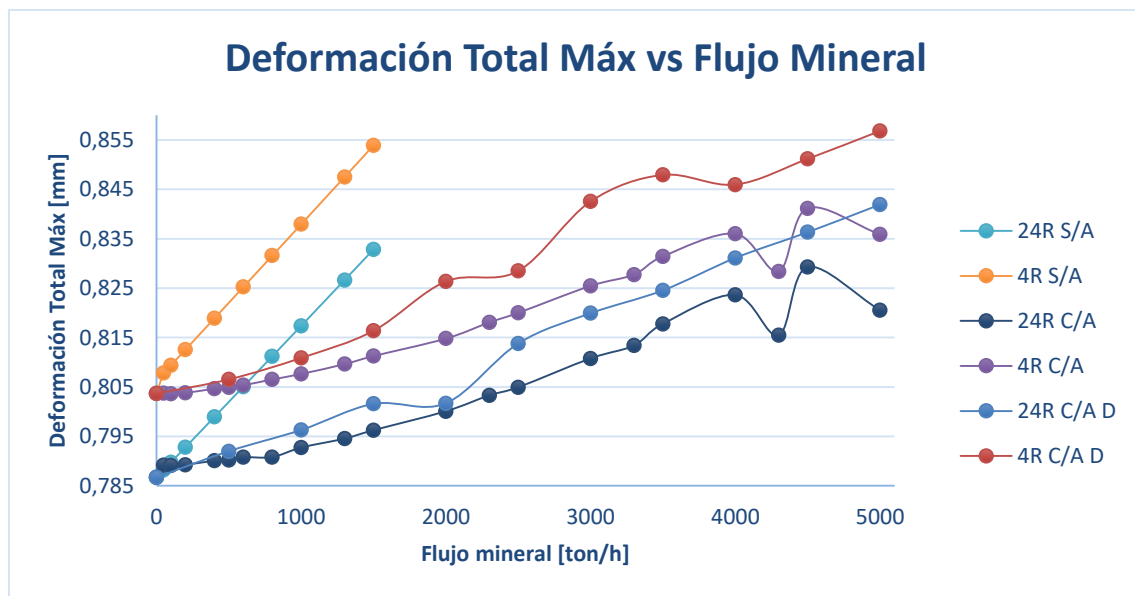


Gráfico 35: Deformación total máx. vs flujo de mineral (viga descanso delantera).

10.4.4.2 Esfuerzo equivalente

El esfuerzo equivalente muestra valores bajos para este componente, pero muestra las potenciales zonas donde se producen las fallas. Los resultados con acoplamiento muestran valores menores en comparación a los que se obtienen en los análisis sin acoplamiento.

El Gráfico 36 muestra una similitud en el comportamiento de los esfuerzos para los casos con acoplamiento con Rocky entre el rango de 0 a 5100 toneladas por hora, los que están por debajo de los resultados sin acoplamiento. Después de las 1500 toneladas comienzan a ser mayores los resultados de la descarga no uniforme a la uniforme, debido a que la cantidad de flujo comienza a acumularse a un costado del harnero y su funcionamiento deja de ser el adecuado.

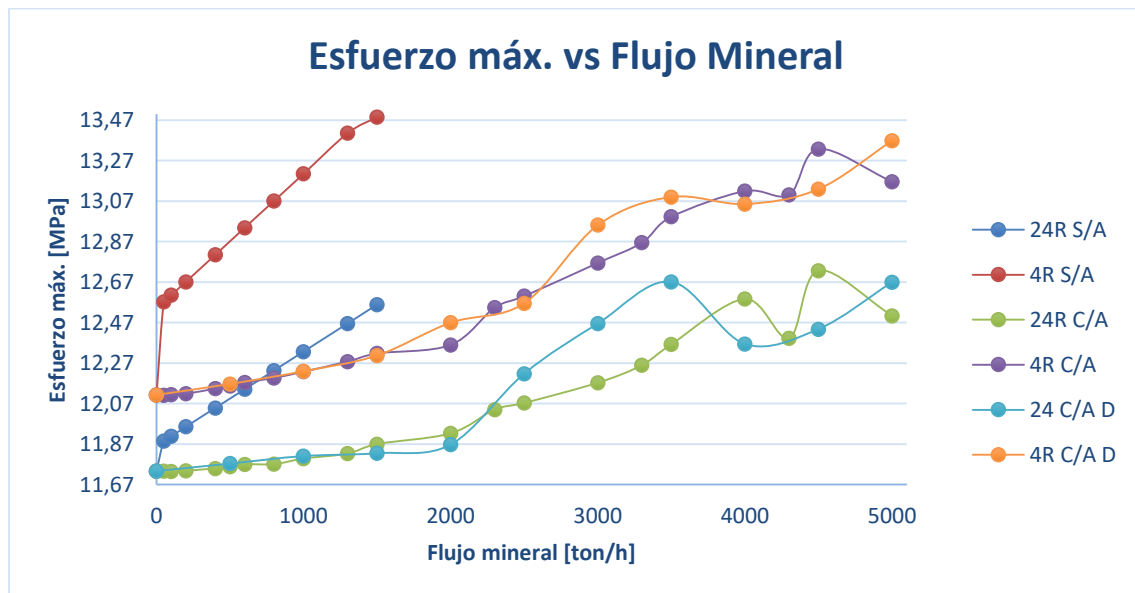


Gráfico 36: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral (placa lateral derecha).

10.4.4.3 Factor de seguridad estático y dinámico

Los factores de seguridad, al no estar sometido este componente a grandes esfuerzos, presentan valores altos como el factor de seguridad estático que se observa en el Gráfico 37, lo que representa buenos parámetros para el diseño de éstos.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

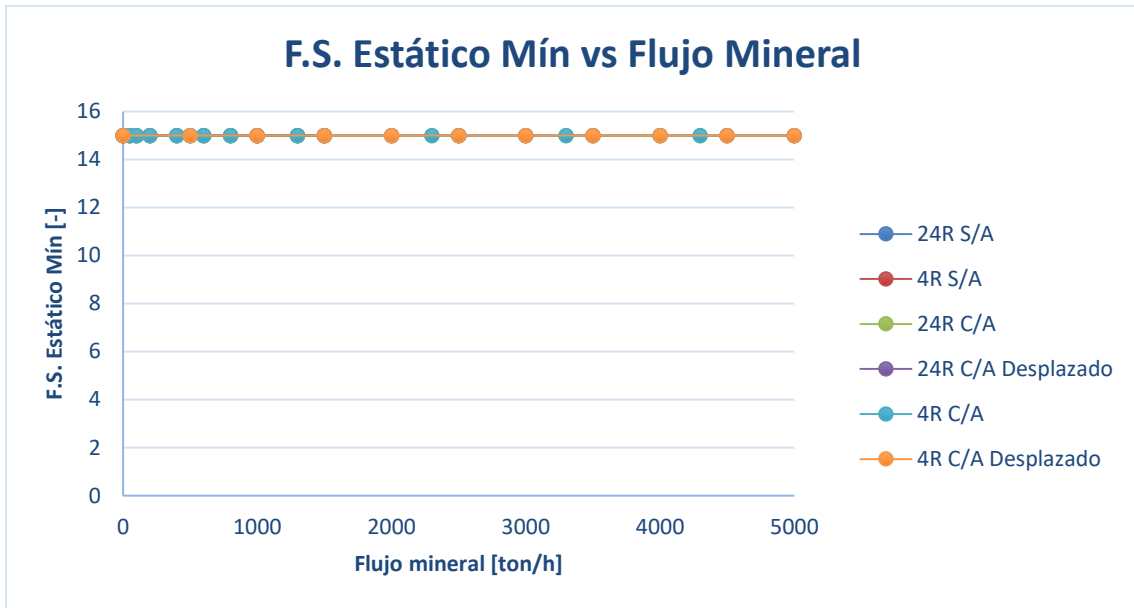


Gráfico 37: F.S. estático mín. vs flujo de mineral (viga descanso delantera).

Al igual que en el gráfico de esfuerzo máx, los valores de los factores de seguridad dinámicos para los casos con acoplamiento de Rocky tienen valores similares en el rango de operación real, de 0 a 1500 toneladas por hora.

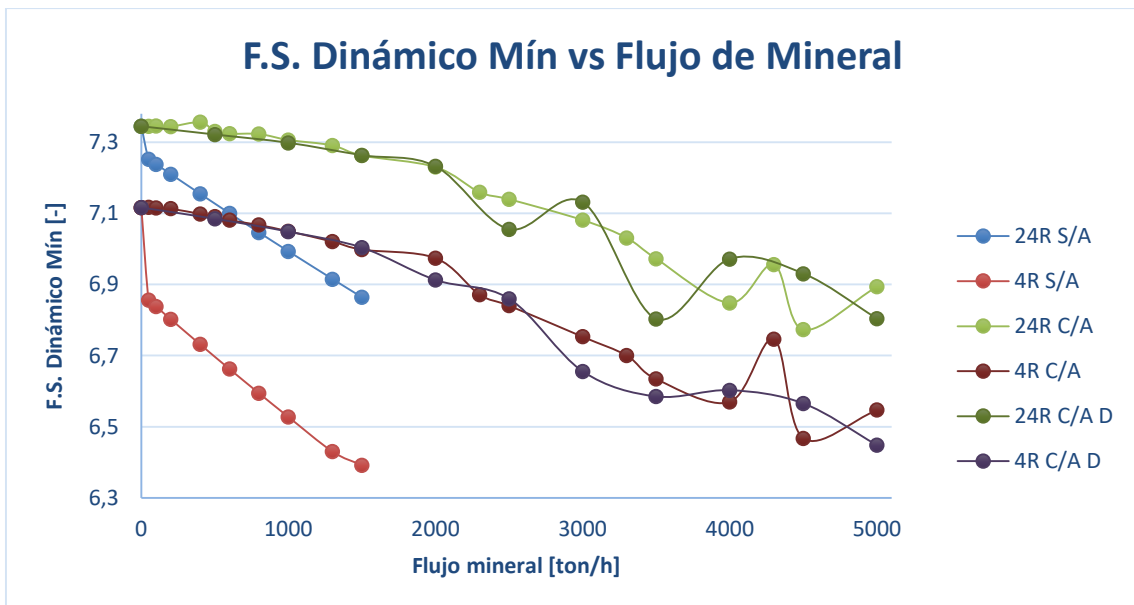


Gráfico 38: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral (viga descanso delantera).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

10.4.5 Análisis V: Viga descanso posterior

La viga de descanso posterior presenta entre sus resultados mayores valores en comparación a la viga de descanso delantera, debido a que ésta se encuentra en la misma línea de aplicación de la fuerza de los excitadores y, además sobre la aplicación de la descarga del mineral.

Los valores para las variables al igual que en todos los componentes tienden a ser menores para los casos con acoplamiento de Rocky en comparación a los casos sin acoplamiento, esto debido a que las cargas que entrega el software de elementos discretos son menores a las que se modelaron a través de una ecuación (ítem 5.1.3.2).

La Tabla 20 muestra el cambio que sufren las variables de interés, deformación y tensión, con respecto al flujo de mineral que pasa a través del harnero vibratorio. Estos valores son bajos dentro del rango de operación (0 a 1500 ton/h).

Tabla 20: Variación porcentual deformación y esfuerzo máx. (viga descanso posterior).

		Deformación [%]		Esfuerzo máx. [%]	
		0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]	0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]
Sin acoplamiento	24R	6,62		7,32	
	4R	7,08		7,29	
Con acoplamiento uniforme	24R	1,16	4,24	1,26	7,44
	4R	0,71	3,86	1,29	7,40
Con acoplamiento no uniforme	24R	1,71	7,92	1,03	6,44
	4R	1,12	7,26	1,03	6,39

10.4.5.1 Deformación total máxima

La deformación total máxima que se observa en el Gráfico 39 muestra que los valores para los casos con acoplamiento están por debajo de los obtenidos en los análisis sin acoplamiento (todo esto dentro del rango de operación de 0 a 1500 ton/h).

Los cambios que sufren las variables a partir de las 1500 toneladas por hora se debe a la acumulación de mineral, que reduce las cargas sobre la estructura del harnero. A partir de las 1500 toneladas la deformación de los análisis con acoplamiento comienza a cambiar, debido a que el impacto en la descarga no uniforme comienzan a descender por la acumulación en el primer tercio y las cargas en la descarga uniforme siguen aumentando, ya que al estar inclinado el flujo en la primera descarga no uniforme, se acumula más rápido lo que produce amortiguamiento a través del mismo mineral.

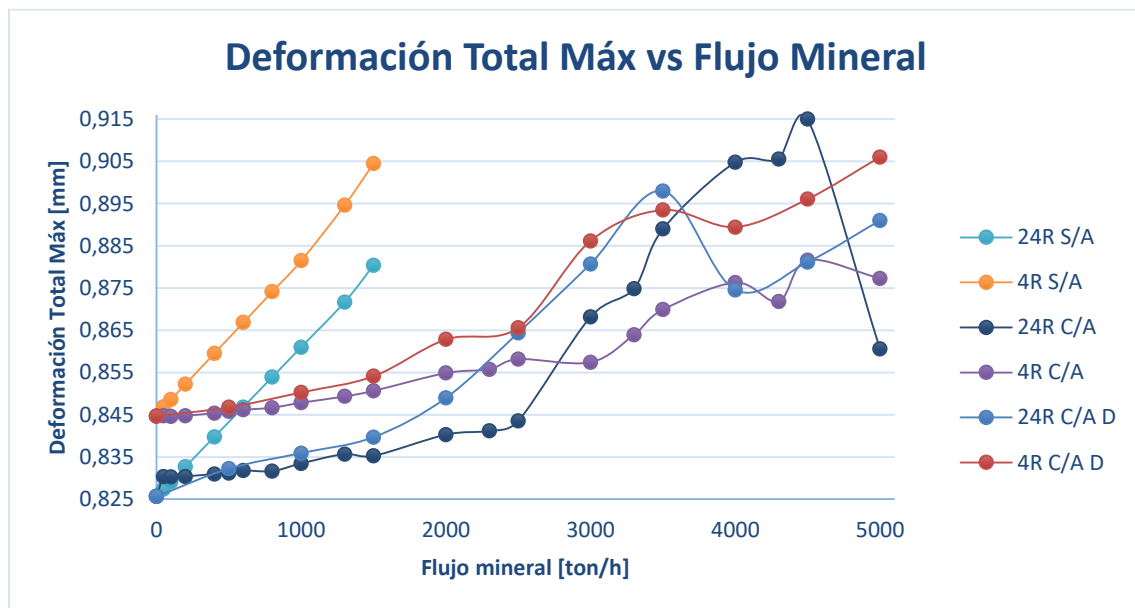


Gráfico 39: Deformación total máx. vs flujo de mineral (viga descanso posterior).

10.4.5.2 Esfuerzo equivalente

El esfuerzo equivalente para la viga de descanso posterior, que se puede observar en el Gráfico 40 muestra la diferencia que existe entre los cálculos con acoplamiento y los sin acoplamiento, donde éstos últimos análisis muestran valores superiores. Dentro de las primeras 1500 toneladas por hora de mineral que pasan por el equipo, los esfuerzos correspondientes al análisis con acoplamiento con Rocky y de descarga no uniforme supera a los valores que se producen por el análisis con acoplamiento con carga uniforme.

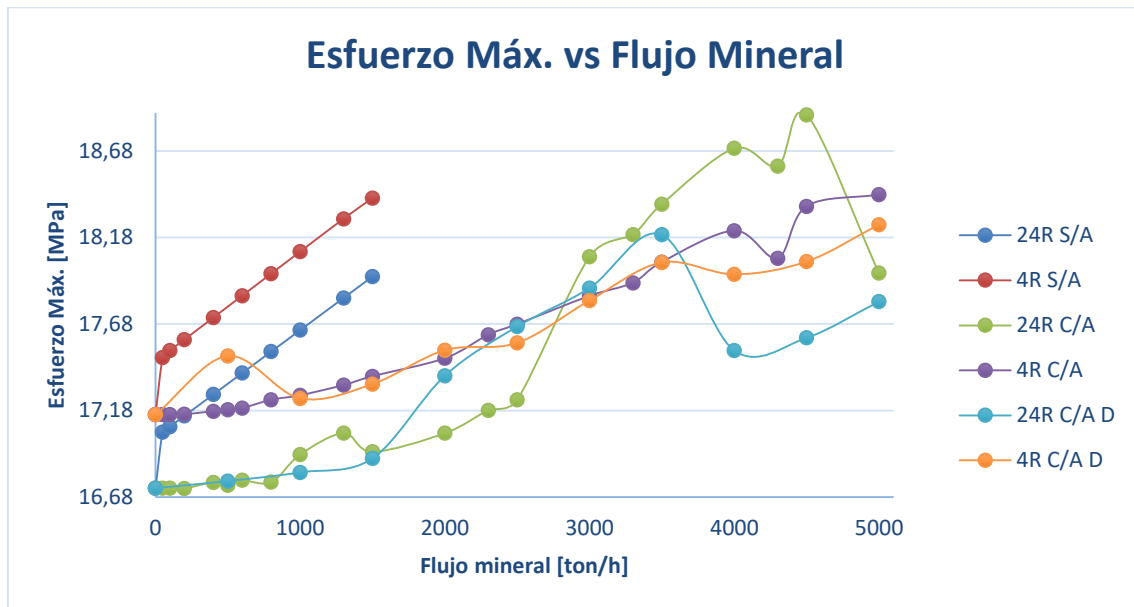


Gráfico 40: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral (viga descanso posterior).

10.4.5.3 Factor de seguridad estático y dinámico

Los factores de seguridad estático y dinámicos decrecen de menor manera para los análisis con acoplamiento en comparación a los sin acoplamiento, debido a que sus esfuerzos son más bajos como se observa en el Gráfico 40.

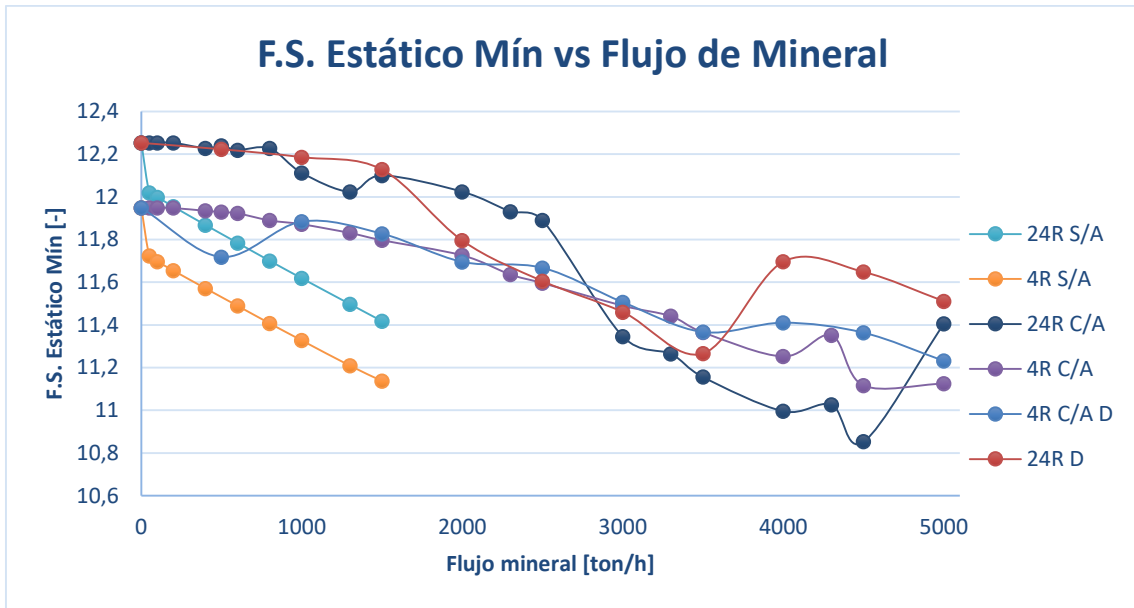


Gráfico 41: F.S. estático mín. vs flujo de mineral (viga descanso posterior).

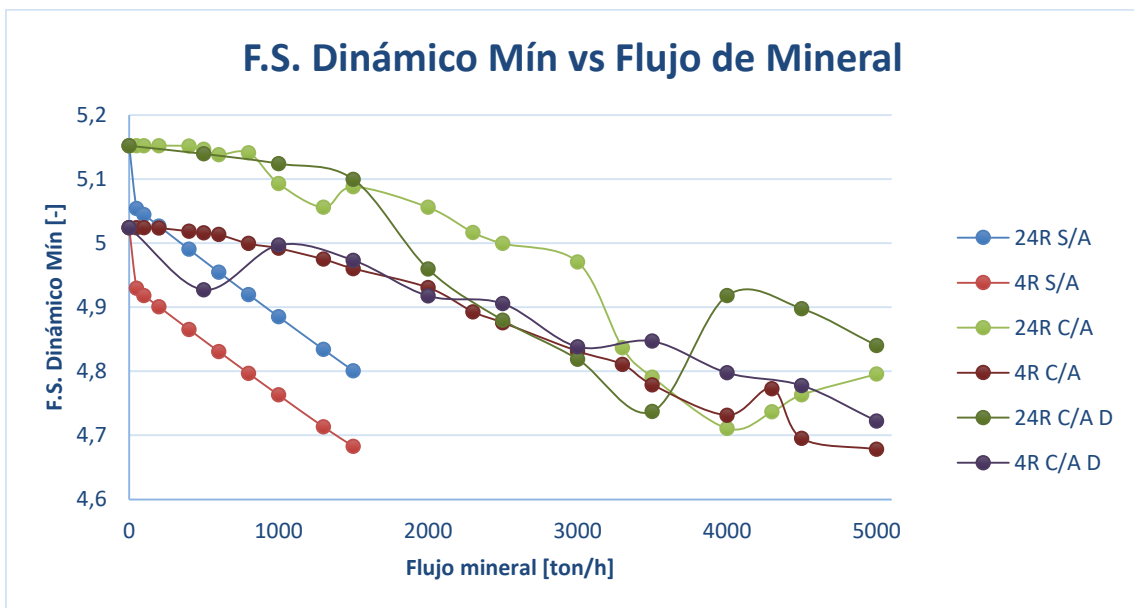


Gráfico 42: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral (viga descanso posterior).

10.4.6 Análisis VI: Placa lateral derecha

La placa lateral derecha junto con la placa lateral izquierda son las piezas que sostienen la mayoría de los componentes, debido a esto es de importancia realizar los análisis correspondientes.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

La Tabla 21 que se muestra a continuación destaca la variación porcentual que experimenta la placa lateral derecha al variar el volumen de mineral. Se puede distinguir dentro de los valores de la tabla, que el cambio que sufre la deformación y el esfuerzo máx. de este componente es menor, en porcentaje para el flujo de mineral que pasa por el harnero vibratorio.

Tabla 21: Variación porcentual deformación y esfuerzo máx. (placa lateral derecha).

		Deformación [%]		Esfuerzo máx. [%]	
		0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]	0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]
Sin acoplamiento	24R	6,37		2,69	
	4R	6,80		2,52	
Con acoplamiento uniforme	24R	1,40	4,79	0,29	1,92
	4R	1,01	4,36	0,32	1,95
Con acoplamiento no uniforme	24R	2,22	7,82	0,79	2,01
	4R	1,76	7,32	0,81	2,08

10.4.6.1 Deformación total máxima

En el gráfico de deformación total máxima (Gráfico 43) se puede observar las diferentes pendientes de crecimiento que existen para los tres casos (caso con acoplamiento y sin acoplamiento), donde los resultados obtenidos para los casos sin acoplamiento superan en valor a los casos con acoplamiento de Rocky entre el rango de 0 a 5000 toneladas.

Al observar las curvas para el caso con acoplamiento y descarga no uniforme se puede distinguir la diferencia que se establece entre sus valores con los de la curva con acoplamiento y descarga uniforme, esto debido a que el desplazamiento de la descarga de mineral se inclina hacia el costado de la placa lateral derecha y con ello se aumentan las sollicitaciones en este componente.

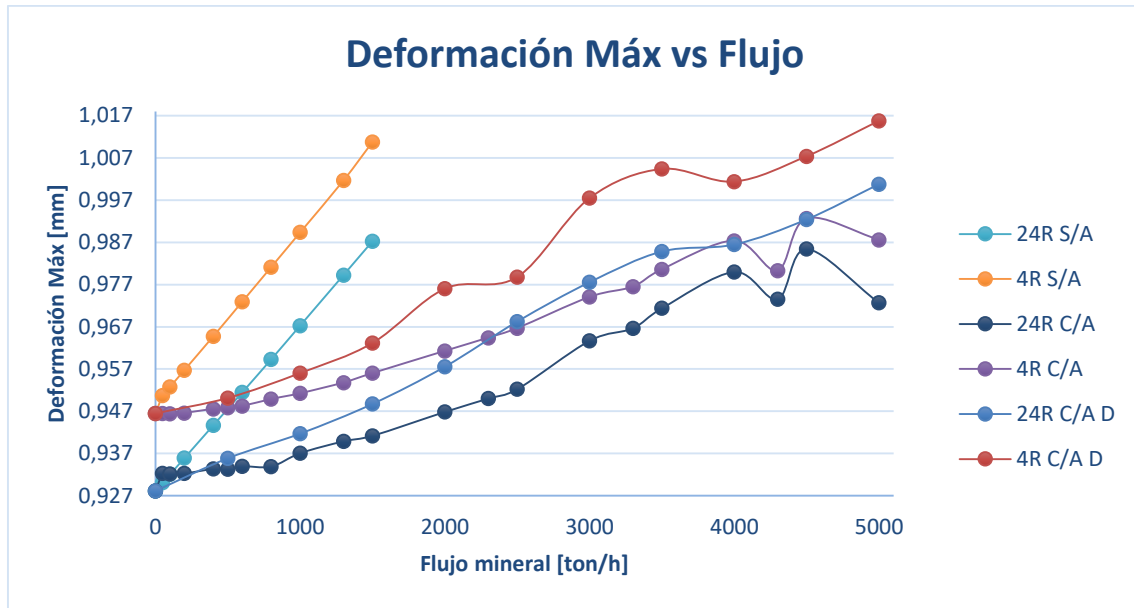


Gráfico 43: Deformación total máx. vs flujo de mineral (placa lateral derecha).

10.4.6.2 Esfuerzo equivalente

El esfuerzo al igual que la deformación total máxima diferencia los valores obtenidos entre un análisis sin acoplamiento y los análisis con acoplamiento de Rocky, debido a que los esfuerzos que se producen en los análisis sin acoplamiento son mayores.

Los esfuerzos, como se observa en el Gráfico 44, marcan diferencia para el caso con acoplamiento y descarga no uniforme con el caso con acoplamiento y descarga uniforme, debido a que la placa lateral derecha en el caso con descarga no uniforme se expone a mayores esfuerzos debido a que el flujo de mineral impacta de mayor manera cerca de este componente.

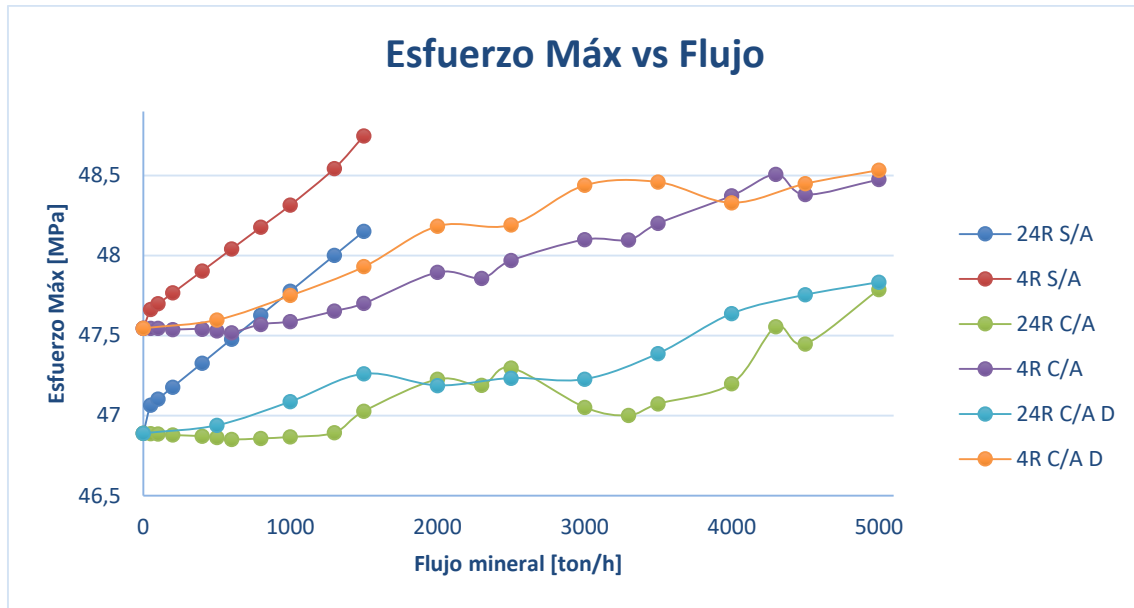


Gráfico 44: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral (placa lateral derecha).

10.4.6.3 Factor de seguridad estático y dinámico

Los factores de seguridad estático y dinámico presentan para esta pieza los valores más bajos en comparación a todos los componentes estudiados hasta el momento, esto debido a que la placa lateral derecha al soportar la mayoría de las partes de la estructura se somete a solicitaciones mayores que el resto.

Usando las teorías de fallas de Von Mises y Soderberg, para el coeficiente estático y el coeficiente dinámico respectivamente, se obtuvieron valores bajos para estos factores que dentro de los criterios de diseño son aceptables. El valor del factor de seguridad estático mínimo obtenido es 5,308 y el factor de seguridad dinámico mínimo es 1,77 (ver Gráfico 45 y Gráfico 46), donde el primero según los criterios de Shigley (Tabla 9) está dentro de los parámetros para un buen diseño y el segundo responde bien a los límites para soportar la falla inminente por fatiga de material.

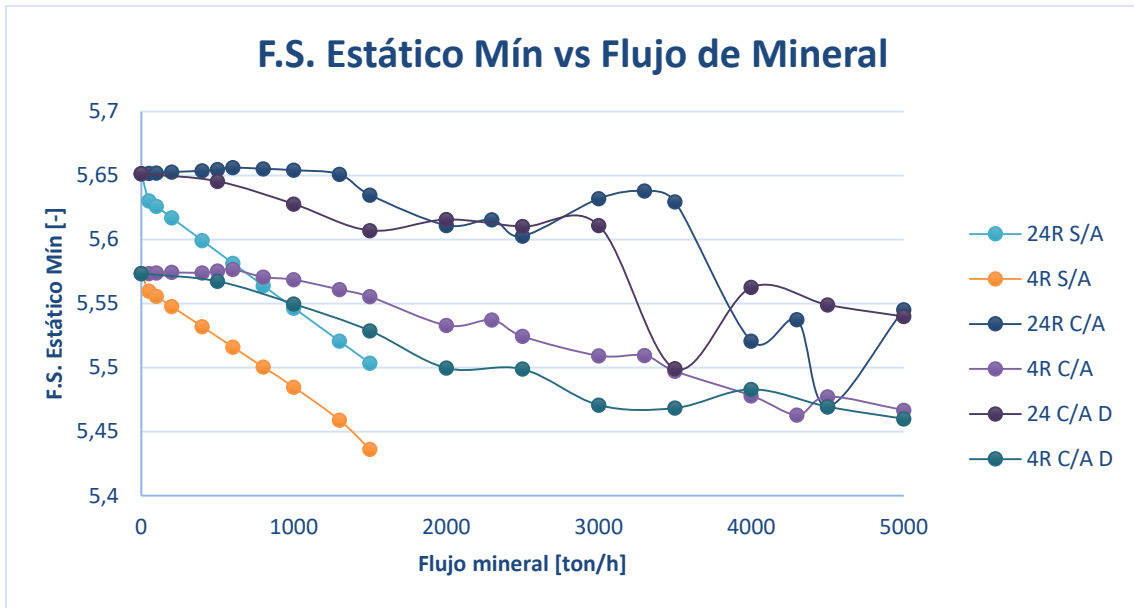


Gráfico 45: F.S. estático mín. vs flujo de mineral (placa lateral derecha).

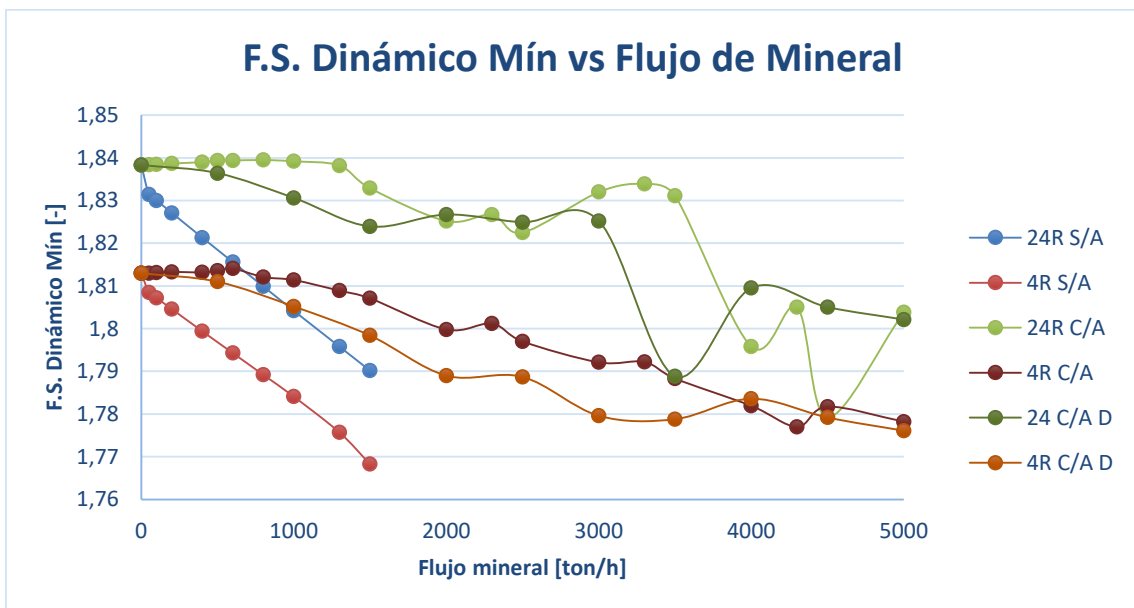


Gráfico 46: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral (placa lateral derecha).

10.4.7 Análisis VII: Placa lateral izquierda

La placa lateral izquierda al igual que la placa lateral derecha soporta la mayoría de los componentes que conforman la estructura principal del harnero, debido a esto las solicitaciones que presenta son altas en comparación al resto de las partes analizadas.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Al comparar los porcentajes de variación mostrados en la Tabla 22 con los que aparecen en la Tabla 21 se puede distinguir que el crecimiento para los casos con acoplamiento y descarga no uniforme es mucho menor el crecimiento para la placa lateral izquierda en comparación a la placa lateral derecha, debido a que la descarga del mineral se inclina hacia el costado derecho estresando y deformando más el componente de ese lado.

Tabla 22: Variación porcentual deformación y esfuerzo máx. (placa lateral izquierda).

		Deformación [%]		Esfuerzo máx. [%]	
		0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]	0-1500 [ton/h]	0-5000 [ton/h]
Sin acoplamiento	24R	6,37		2,58	
	4R	6,42		2,34	
Con acoplamiento uniforme	24R	1,18	4,66	0,29	2,13
	4R	1,05	1,05	0,32	2,14
Con acoplamiento no uniforme	24R	1,09	4,67	0,21	1,46
	4R	0,91	3,30	0,21	1,04

10.4.7.1 Deformación total

La deformación total máxima para los casos con acoplamiento, al ser comparada con los casos sin acoplamiento muestra que los resultados de éste último son mayores, y, además que el comportamiento entre los casos con acoplamiento con Rocky, descarga uniforme y descarga no uniforme, tienen una similitud en sus resultados entre 0 y 2000 ton/h (ver Gráfico 47).

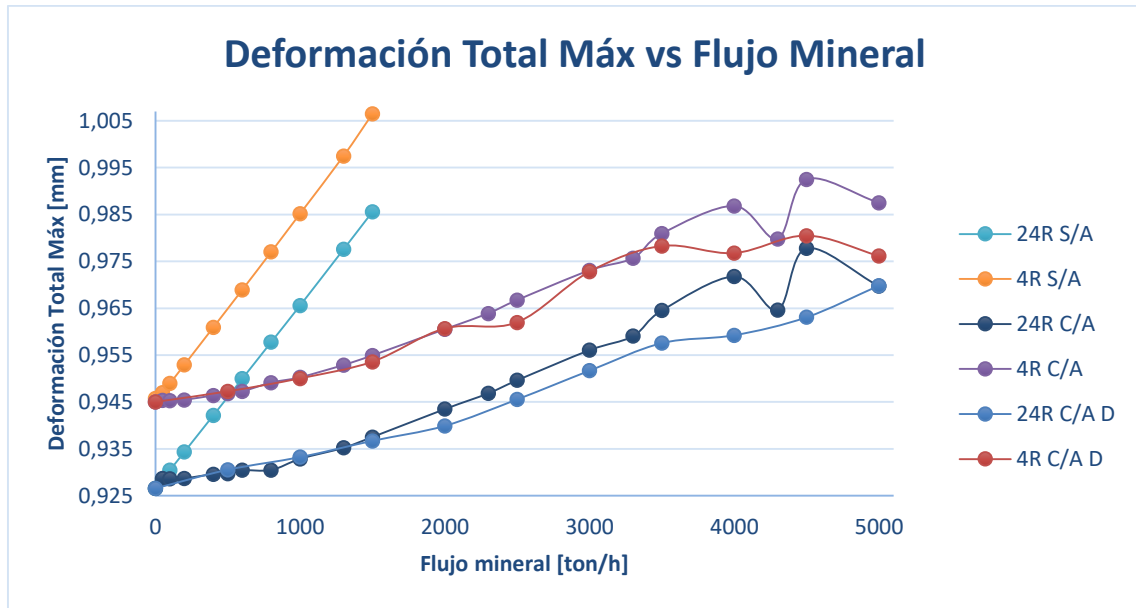


Gráfico 47: Deformación total máx. vs flujo de mineral (placa lateral izquierda).

10.4.7.2 Esfuerzo equivalente

El Gráfico 48 muestra como los esfuerzos obtenidos mediante la teoría de falla de Von Mises, donde los resultados obtenidos por los análisis sin acoplamiento son mayores a los obtenidos por los análisis con acoplamiento. Los esfuerzos relacionados al caso con acoplamiento con Rocky y descarga uniforme presentan solo para este componente valores superiores al con descarga no uniforme, debido a que el hecho que el mineral caiga en el lado opuesto hace que en este lado el estrés sea menor.

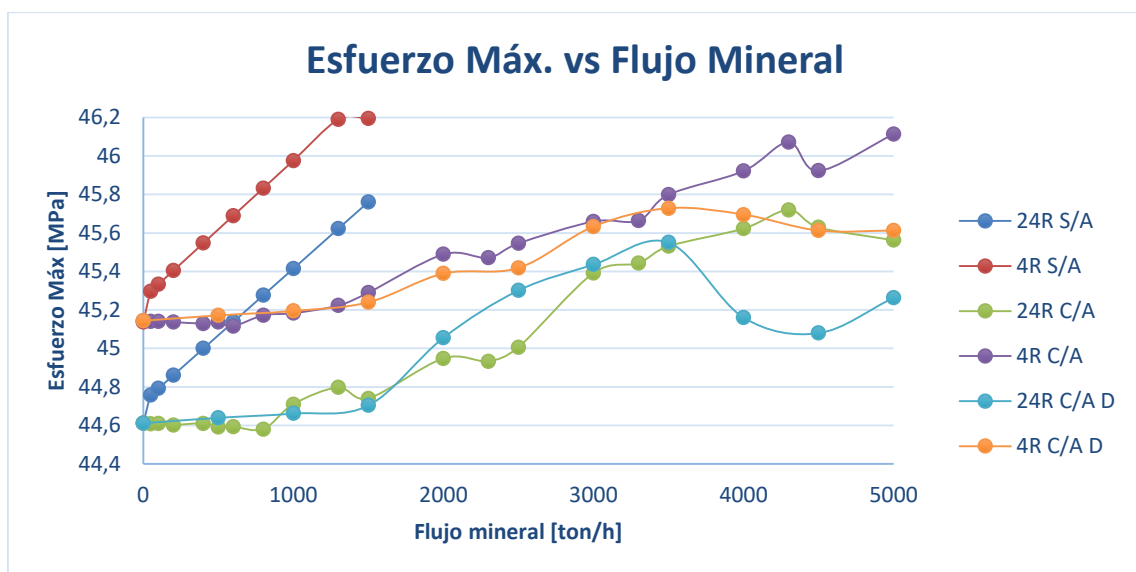


Gráfico 48: Esfuerzo máx. vs flujo de mineral (placa lateral izquierda).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

10.4.7.3 Factor de seguridad estático

Los resultados obtenidos para los factores de seguridad estático y dinámico son bajos (Gráfico 49 y Gráfico 50), pero de acuerdo a los criterios de diseño presentan valores aptos para el trabajo. Según los valores de Shigley para el diseño (Tabla 9) el factor de seguridad estático mínimo (5,73) está dentro de un buen parámetro, y el factor de seguridad dinámico mínimo (1,86) puede trabajar soportando la falla por fatiga de material.

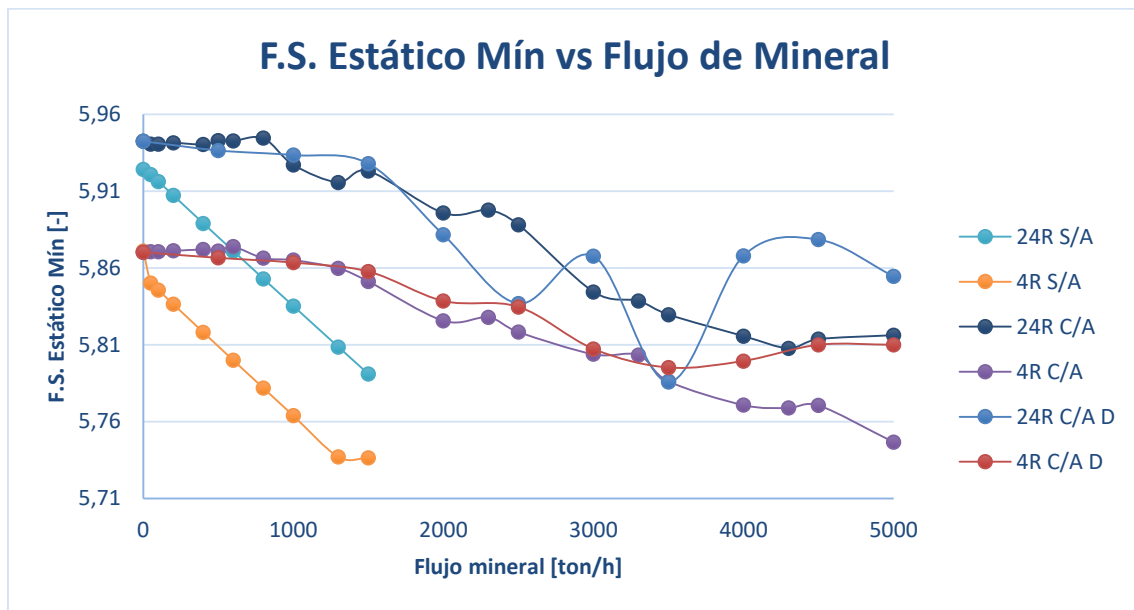


Gráfico 49: F.S. estático mín. vs flujo de mineral (placa lateral izquierda).

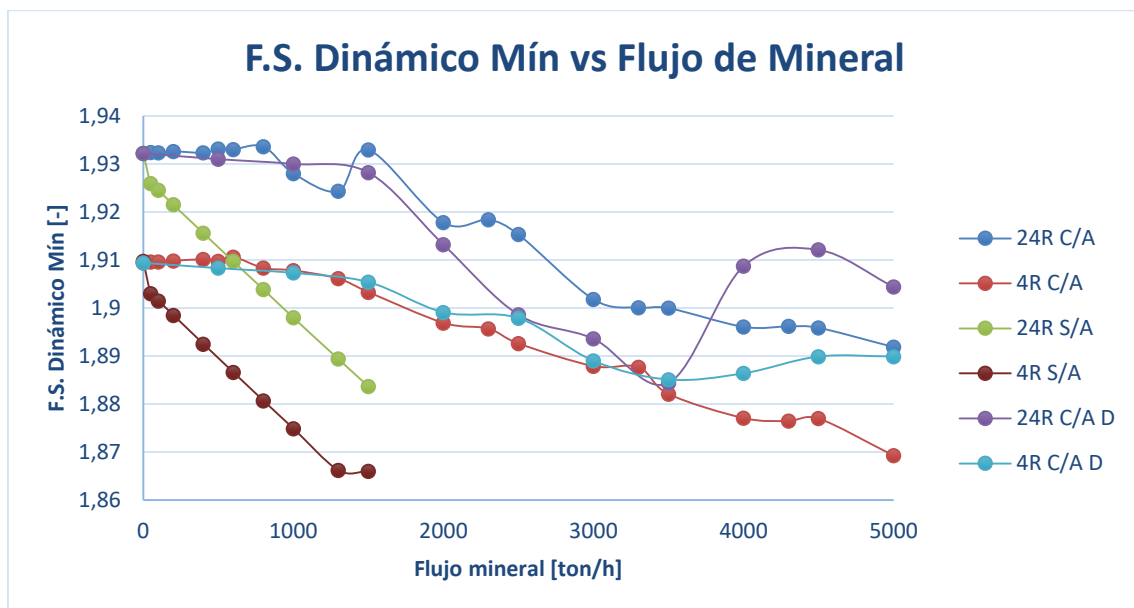


Gráfico 50: F.S. dinámico mín. vs flujo de mineral (placa lateral izquierda).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

10.4.8 Observaciones

Luego de realizar las simulaciones usando el acoplamiento del software Rocky y ANSYS para dos diferentes casos, con descarga uniforme y no uniforme, se realizó una comparación con el estudio realizado para el caso sin acoplamiento. Esta comparación se hizo entre dos rangos importantes, el primero que tiene que ver netamente con las condiciones de trabajo del equipo vibrador en las que el flujo de mineral va entre 0 y 1500 toneladas por hora y el segundo rango que llega a las 5000 toneladas por hora para solo probar como responde el equipo.

Los resultados obtenidos muestran una superioridad en los valores que genera la simulación sin acoplamiento, cargas inducidas por una ecuación, en comparación a los resultados con acoplamiento, esto debido a que la ecuación propuesta en el ítem 5.1.3.2 no considera el amortiguamiento que existe al momento que el mineral comienza a impactar sobre sí mismo.

La diferencia que se observó entre los casos usando el acoplamiento entre ANSYS y Rocky, descarga uniforme y descarga no uniforme, fue mayoritariamente a partir de las 1500 toneladas por hora para todos los componentes a excepción de las placas laterales, debido a que bajo las 1500 toneladas la deformación total máxima y el esfuerzo se comportan de manera muy similar para la mayoría de los componentes en los dos casos.

Las placas laterales son los componentes más solicitados dentro de los casos con acoplamiento, debido a que éstas soportan la mayoría de las partes de la estructura y además las fuerzas que genera el mineral y los excitadores, las que son transmitidas por las vigas a éstas. Dentro de las placas laterales la que se ubica al costado derecho presenta mayores valores para ambos casos, pero es más evidente para el caso con descarga no uniforme, debido a que la caída del mineral se inclina hacia este costado. Si bien la deformación no es la más alta dentro de todos los componentes, los esfuerzos que se forman en éstas son las más grandes en comparación al resto.

De forma similar a los resultados obtenidos en el apartado 8.2 la deformación total máxima se concentra en las vigas transversales en donde se deposita el mineral y en la viga madre que sostiene los excitadores (ver Figura 76). Estas deformaciones son bajas dentro del rango de trabajo (0 a 1500 ton/h) en comparación a la deformación límite en viga sugerida por el reglamento de construcción ($\delta_{m\acute{a}x} < \delta_{adm} = 10,22 [mm]$).

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Los esfuerzos más altos calculadas mediante el criterio de falla de Von Mises, para los casos con acoplamiento, se concentran en las placas laterales, y oscilan entre 45 y 48 [Mpa], estando los valores más elevados en los cálculos con la descarga no uniforme y con 4 resortes. Estos esfuerzos se centran principalmente en la zona que rodea la unión de la viga madre con las placas laterales como se puede observar en la Figura 84.

De manera similar a lo observado en el apartado 8.2, los factores de seguridad estáticos calculados mediante la teoría de falla de Von Mises, para todos los componentes, varía entre 5,79 y 15 en el rango de trabajo (0 a 1500 ton/h), donde los valores más bajos están relacionados a la placa lateral derecha y los más altos a la viga de descanso delantera. El valor mínimo del factor de seguridad está bastante bien según el criterio de Shigley para factores de seguridad (Tabla 11).

Los factores de seguridad dinámicos calculado mediante un análisis de fatiga, usando el criterio de Soderberg, tienen valores que van desde 7,3 a 1,79. Los valores más pequeños los alcanzan las mediciones de la placa lateral derecha para el cálculo con acoplamiento y descarga no uniforme y, además con 4 resortes, donde su valor más bajo es 1,7966, pero para los criterios de diseño es aceptable para soportar una falla inminente por fatiga.

Los valores obtenidos para las simulaciones con 4 resortes siguen siendo más altos en todos los casos en comparación para las simulaciones con 24 resortes, lo que se observa en todos gráficos vistos en este análisis. Al ver esto se puede tomar como precedente no obviar la cantidad de resortes para las simulaciones y no usar un número equivalente de éstos.

Las tablas comparativas expuestas anteriormente, en cada análisis de los componentes, muestran el poco porcentaje de variación que existe para la deformación total máxima y los esfuerzos equivalentes en función del flujo de mineral que atraviesa al harnero vibratorio, lo que hace suponer que la mayor parte de la deformación y el esfuerzo máx. que sufre este equipo es causada por las fuerzas que se producen en los equipos excitadores, sin embargo, es de carácter importante tener en cuenta que al desplazar el flujo del mineral, a cualquiera de los costados, el harnero sufre el alza de las solicitaciones.

De acuerdo a lo mencionado en el párrafo anterior es importante tener en cuenta la descarga del mineral, más que el movimiento de los excitadores, ya que este último no varía en el tiempo. El tipo de descarga que tendrá el harnero implicará las solicitaciones a las cuales éste se expondrá, por ejemplo, como se estudió en el caso con acoplamiento y con descarga no

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

uniforme al inclinar la descarga a la derecha, los componentes de este lado sufrieron mayores deformaciones y esfuerzos.

Nota: en el anexo (Análisis estático con acoplamiento) se pueden observar las figuras correspondientes a los resultados en ANSYS para un acoplamiento con carga no uniforme y un flujo de mineral de 1500 toneladas por hora.

10.5 Mejoras propuestas para el diseño

Al establecer en los análisis anteriores la importancia de la descarga del mineral y con ello lo que afecta al comportamiento estructural de los harneros vibradores, se definió como propuesta modificar de alguna manera la descarga del mineral en el equipo vibrador.

Una de las primeras ideas es la uniformidad que debe tener la descarga en este equipo, pero como ésta no depende del harnero en sí, no se puede abordar un posible cambio del diseño para esto. Otra cosa importante es la zona de impacto del mineral, debido a que las fuerzas que transmiten los excitadores al equipo son grandes y generan un movimiento armónico, la caída de éste no puede distorsionar el movimiento.

El equipo vibrador al estar asentado sobre una cama de 24 resortes permite que cualquier fuerza pueda inducir movimiento, lo que genera un problema importante, debido a que en operación se está aplicando un movimiento a través de los excitadores y el impacto del mineral.

De acuerdo a lo mencionado se propuso modificar el mallado del harnero para que exista una retención leve del mineral en la zona de descarga y así el mineral pueda impactar sobre sí mismo. Esto genera que se disminuyan las fuerzas de impacto en la zona posterior del equipo y con ello no se interrumpa el movimiento armónico del harnero. La estructura no cambió en nada, solo se modificó el punto ciego que tiene la malla de harneado en la zona posterior como se observa en Figura 125, lo que genera menor porcentaje de mineral seleccionado, pero mayor zona de amortiguamiento del mineral.

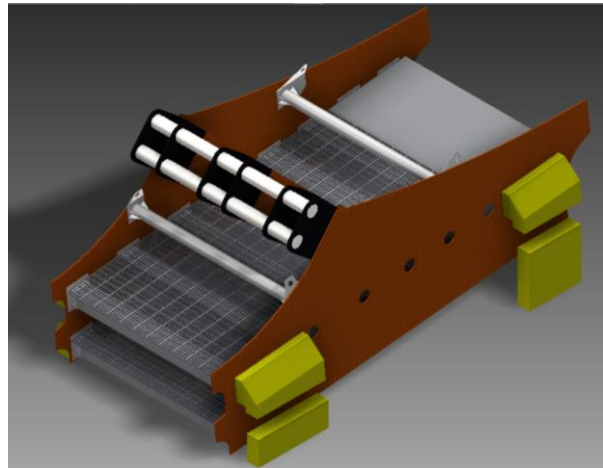


Figura 125: Vista isométrica diseño CAD harnero modificado.

Los resultados obtenidos para este diseño modificado se pueden observar en la Tabla 23, la cual compara los 4 casos, los tres casos con acoplamiento y el caso sin acoplamiento, para el componente más crítico observado en los cálculos anteriores (placa lateral derecha).

Tabla 23: Comparación de los valores para todos los casos.

Casos		Deformación [mm]	Esfuerzo [Mpa]	F.S. estático [-]	F.S. Dinámico [-]	
Sin acoplamiento	24R	0,98728	48,151	5,5035	1,7902	
	4R	1,0108	48,747	5,4362	1,7683	
Con acoplamiento	Uniforme	24R	0,94121	47,029	5,6348	1,8329
		4R	0,95602	47,701	5,5554	1,8071
	No uniforme	24R	0,95048	47,119	5,6241	1,8294
		4R	0,96785	48,030	5,5174	1,7947
	Uniforme modificado	24R	0,92109	42,092	6,2948	2,0476
		4R	0,93708	41,757	6,3462	2,0646

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 23, la modificación del diseño de la malla de harneado ha reducido en promedio casi un 3% la deformación total máxima y en un 13 % el esfuerzo máx. para la placa lateral derecha, dejando de ser a el componente el más solicitado (ver Figura 126). En general todos los componentes reducen sus solicitaciones quedando como el componente mayor expuesto la viga madre, debido a que el mineral afecta de manera indirecta su comportamiento.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Si bien se estudió que la mayor parte de las cargas que sufre la estructura de este equipo, viene proveniente de los excitadores, debido a los bajos porcentajes de crecimiento de la deformación total máxima y los esfuerzos mostrados en las tablas 18 a la tabla 24.

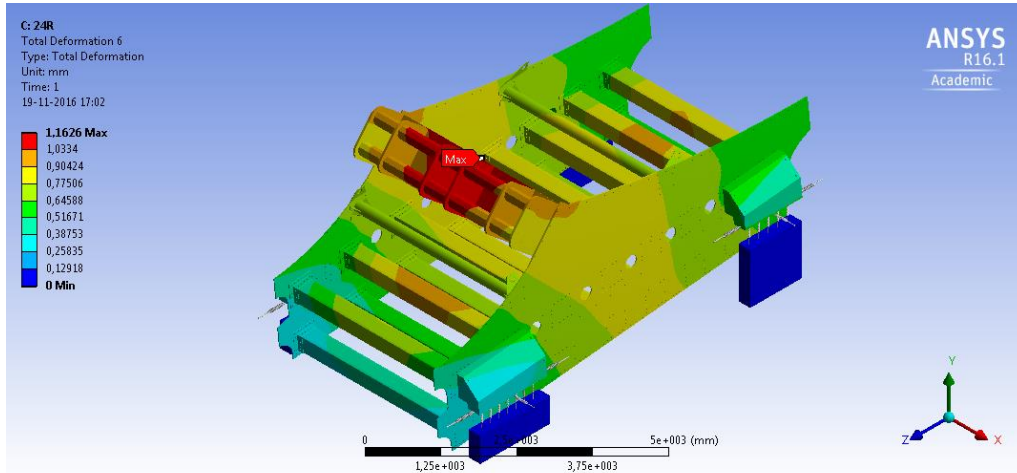


Figura 126: Deformación total máxima harnero completo modificado.

Al aumentar el punto ciego en la malla de harneado en el equipo, ver Figura 125, hace que el mineral deslice en la zona posterior y el impacto de las cargas se desplace hacia adelante quedando dentro de los límites de la cama de resortes, lo que provoca que el harnero se mueva de la forma oscilante para la cual está diseñado.

De acuerdo a esto, se puede observar que lo más importante es cómo impacta el mineral, por sobre cuanta cantidad, debido a esto se deben hacer planificaciones para mejorar la caída y la zona de impacto de la caída, para así ir disminuyendo los esfuerzos y deformaciones, como se observó en este modelo.

Nota: en el anexo (Análisis estático con acoplamiento, descarga uniforme y mejoras) se pueden observar las figuras correspondientes a los resultados en ANSYS para un diseño mejorado usando un acoplamiento con carga no uniforme, y un flujo de mineral de 1500 toneladas por hora.

CONCLUSIONES

Al concluir el estudio del comportamiento estructural del harnero vibratorio R-MD, mediante el acoplamiento entre el método de elementos finitos y el método de elementos discretos, se podrán identificar las variables de diseño más relevantes (deformación total máxima, esfuerzo máx. y factores de seguridad estático y dinámico) para los componentes de esta estructura, y así poder analizarlos de acuerdo a sus solicitaciones. Los componentes que presentaron mayores índices de fallas en el historial de trabajo de la planta de molienda fueron los expuestos a estos estudios, en donde se sometieron a condiciones de operación idealizadas, pero con un grado alto de cercanía a la realidad.

De acuerdo a los resultados presentados en el estudio, se puede comprender el comportamiento mecánico estructural del harnero vibratorio para diferentes condiciones de operación, identificando en éstas las más críticas, y con ello poder crear una base analítica para así estudiar las posibles mejoras que requiera el diseño de este equipo.

En relación a las observaciones que se hicieron para este trabajo, se puede concluir,

- ✓ Para este prototipo de equipos de clasificación, es posible identificar sus condiciones de operación de tal manera que se pueden idealizar para así utilizarlas en estudios de este tipo. La manera más eficiente de obtener estas condiciones de operación es a través de los análisis en terreno, en donde se pueden obtener estas medidas.
- ✓ El acoplamiento de los métodos de análisis de elementos finitos y elementos discretos permite realizar estudios más acabados con respecto a las simulaciones de fenómenos físicos que se pueden encontrar en cualquier tipo de procesos de producción, en donde particularmente existan equipos que estén sometidos a grandes cargas y éstas provengan de materiales a granel.
- ✓ Para las condiciones normales de operación, el harnero responde de manera satisfactoria en términos de sus variables de estudio, debido a que las solicitaciones que se presentan en las simulaciones no superan los límites de diseño, es decir, los factores de seguridad estático y dinámico están dentro de los parámetros sugeridos para el diseño al igual que los esfuerzos que no superan los límites de fluencia del material que los compone, pero es importante considerar que estas simulaciones se realizan en condiciones de contorno idealizadas y no considera muchos factores externos que podrían afectar los resultados, por

ejemplo, la abrasión que genera el roce del mineral y la corrosión que se produce por la humedad que operan estos equipos, humedad que no fue considerada en el estudio.

- ✓ En relación a los estudios con acoplamiento y los estudios sin acoplamiento se puede identificar una gran diferencia entre los resultados, debido a que los valores que se obtienen para el análisis utilizando acoplamiento de Rocky son menores a los que no se utiliza este tipo de acoplamiento, ya que las cargas que se ingresan de forma manual, a través de una ecuación, son mucho mayores a las que modela el software de elementos discretos. La razón por la cual los valores de las cargas entregadas por Rocky son menores es debido a que la ecuación propuesta en el ítem 5.1.3.2 no considera el impacto que se genera al caer el mineral sobre sí mismo, no considera las velocidades del flujo, y tampoco considera la altura de la caída del mineral.
- ✓ La manera en que se deposita el mineral en el equipo seleccionador provoca cambios en las variables de estudio, debido a que el hecho de que este equipo se soporte en una cama de resortes hace que al interrumpir su movimiento natural provoque que las cargas se concentren en zonas específicas, por ejemplo, en el estudio se modificó la ubicación de la descarga del mineral hacia el costado derecho y por ende los componentes que estaban en este lado, placa lateral derecha, sufrió aumento en sus variables de estudio (deformación total máxima y esfuerzo equivalente).
- ✓ El programa Rocky en su versión 3.8 es un software de elementos discretos que permite modelar de manera computacional las partículas y cómo éstas interactúan con los modelos sólidos. Esta herramienta entrega como resultados las fuerzas nodales que se pueden utilizar para estudiar las cargas en diferentes modelos. Su interfaz de trabajo es muy amigable para el usuario, lo que permite el fácil uso de éste.
- ✓ El programa ANSYS es una herramienta poderosa de análisis de elementos finitos que permite al usuario simular diferentes modelos de equipos o componentes, en donde se deben ingresar las condiciones de operación a las que se exponen éstos. La versión número 16.1 de ANSYS incluye dentro de sus sub-programas al software de modelación de elementos discretos Rocky, lo que permite realizar simulaciones utilizando DEM y luego acoplarlas a análisis de elementos finitos. Este tipo de acoplamiento no requiere una gran experticia para poder aplicarlo, pero presenta problemas al momento de exportar los resultados desde Rocky a ANSYS, debido a que se requiere simular 2 veces para que estos datos se exporten de forma completa.
- ✓ La cantidad de resortes que se utilicen en ANSYS para simular es importante, debido a que no es recomendable realizar reducciones del número de éstos por un equivalente, ya que en el análisis se observó que los resultados varían siempre hasta en un 2%, lo que quita precisión a la simulación.

REFERENCIA

1. Montalván CA. Antecedentes. In Rediseño del control del proceso productivo de la división Los Bronces para implementarlo en un centro integrado de operaciones. Santiago; 2010. p. 8-13.
2. Soldinger M. Interrelation of stratification and passage in the screening process. In Minerals Engineering 12.5.; 1999.
3. Rivet IML. Rivet, Industrial Metalmecanica LTDA. [Online].; 2016 [cited 2016 Junio 24. Available from: <http://rivet.cl/wp-content/uploads/2015/07/Rivet-Catalogo-Mallas.pdf>.
4. Novoa C. Harneros vibratorios. In Análisis estructural de harnero vibratorio Tyler 10' x 20' usando el método de elementos finitos. Santiago; 2013. p. 12.
5. Andina H&B. Haver & Boecker Andina. [Online].; 2016 [cited 2016 Julio 12. Available from: <http://www.haverandina.cl/esp/equipamentos/index.php?sec=mineral>.
6. THE HAVER SCREENING GROUP. Tecnología en clasificación de materiales Brasil; 2013.
7. Novoa C. Determinación de la distribución de cargas, tiempo de residencia. In Análisis estructural de harnero vibratorio Tyler 10' x 20' usando el método de elementos finitos. Santiago; 2013. p. 60.
8. VIMEC. OSCILADORES MECÁNICOS DE MOVIMIENTO LINEAL. In Manual de instrucción de funcionamiento y mantenimiento.; 2006. p. 18.
9. Iizuka Ek. Finite Element Analisis. In. Santiago; 2008. p. 24.

- 10 Nisbett R, ByK. Resortes Mecánicos. In Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Mexico: McGRAW-Hill/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.; 2011. p. 496-537.
- 11 Rao S. Vibraciones Mecánicas. In.; 2012.
- 12 Inman DJ, & SRC. In Engineering vibration (Vol. 3): Upper Saddle River: Prentice Hall; 2001.
- 13 Inventor A. Enseñanzas Técnicas. In Capítulo 1.
- 14 Grades ESaA. European Steel and Alloy Grades. [Online].; 2011 [cited 2016 Julio 12]. Available from: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=438.
- 15 Substech S&T. Material Engineering. [Online].; 2012 [cited 2016 Julio 20]. Available from: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=carbon_steel_sae_1020.
- 16 Matweb. Material Property data. [Online].; 1996-2016 [cited 2016 Julio 17]. Available from: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d1844977c5c8440cb9a3a967f8909c3a&ckck=1>.
- 17 Suc de J. Morell S.A. Industria de la Goma. [Online]. Available from: http://www.industriadelagoma.com/images_gest/1378110827.pdf.
- 18 Jiménez C. PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS Y DESCRIPCIÓN DE ALGOR FEA. [Online]. [cited 2016 Junio 8]. Available from: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/jimenez_p_a/capitulo2.pdf.

- 19 Carnicero A. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS. [Online]. [cited . 2016 Agosto 3. Available from: http://www.iit.comillas.edu/~carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf.
- 20 Lee HH. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 14. In. Taiwan: SDC . Publications; 2012.
- 21 Lee HH. Contac Types. In Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 16. National . Cheng kung University, Taiwan: SCD Publications; 2015. p. 473.
- 22 ANSYS. Types of contacts in ANSYS. [Online].; 2013. Available from: <https://sites.google.com/site/mechanicalengineeringforlife/FEA/typesofcontactsinansys>.
- 23 Nisbett GByJK. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. In.; 2011.
- 24 Novoa C. Análisis estructural de harnero vibratorio Tyler 10' x 20' usando el método de . elementos finitos. Santiago; 2013.
- 25 318 CACI. Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-05) y comentario . (ACI 318SR-05). [Online].; 2008 [cited 2016 10 20. Available from: http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_318-05_Espanhol.pdf.
- 26 Lawrence KL. Lesson 05: Modal. In ANSYS 14.0 tutorials.
- 27 Cruz JM. Aplicación del método de los elementos discretos a problemas de desgaste. In . Mellado Cruz J.. Barcelona; 2005. p. 15-48.

28 Australia 1. leap Australia. [Online]. [cited 2016 Octubre 3. Available from: . <http://www.leapaust.com.au/rocky/>.

29 ESSS. Rocky DEM Particle Simulator. In WorkShop 5 Wear Simulation.

30 ESSS. Rocky DEM Particle Simulator. In Workshop 10 – ROCKY-ANSYS Mechanical . Coupling. p. 34.

ANEXOS

Análisis estático con acoplamiento y descarga no uniforme

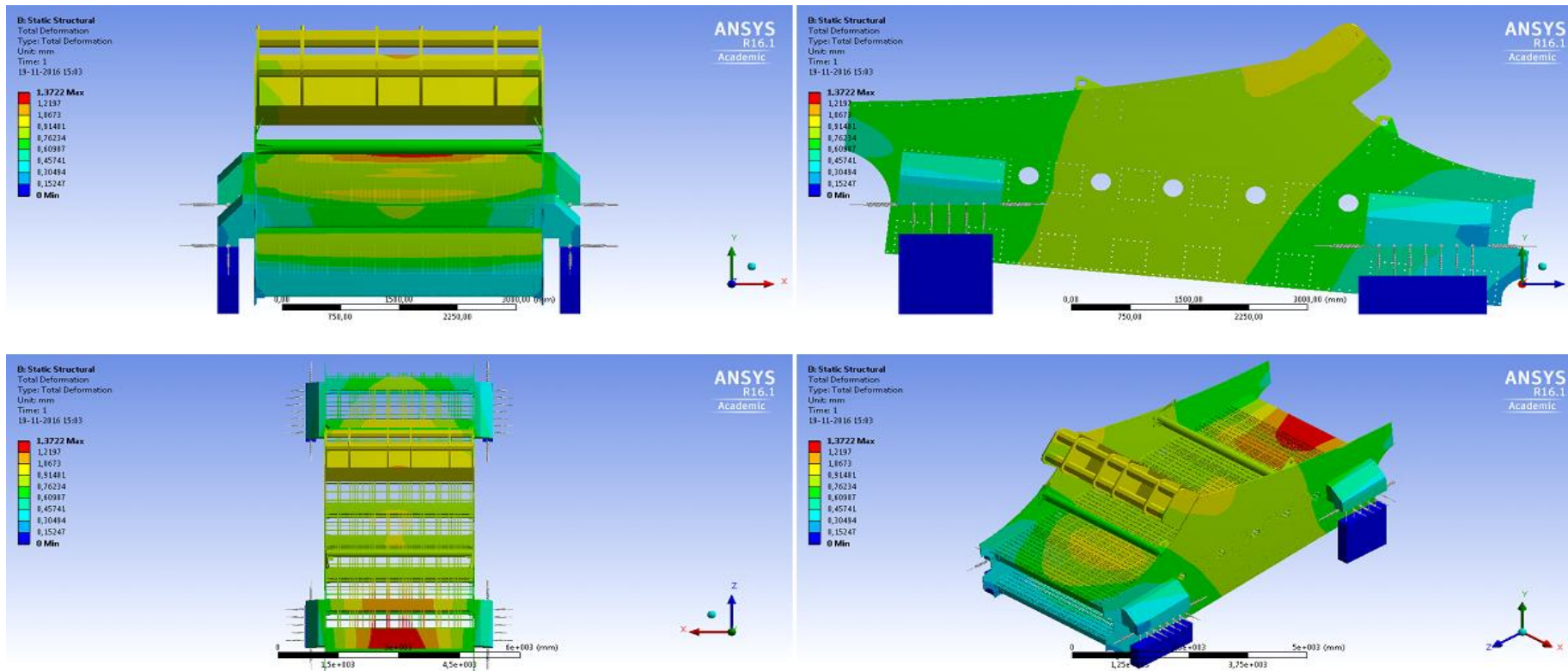


Figura 127: Deformación harnero completo C/A.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

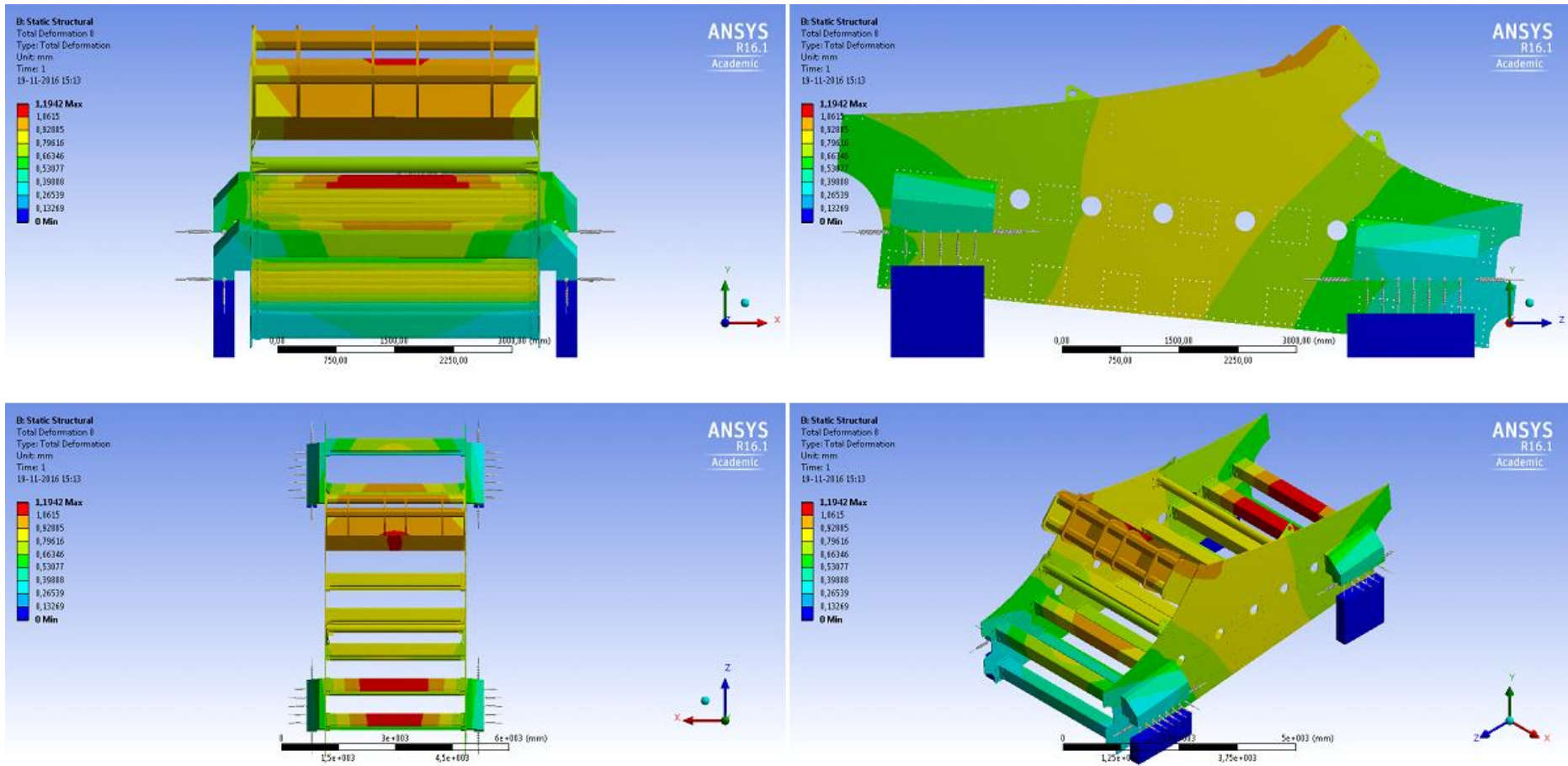


Figura 128: Deformación harnero sin malla C/A.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

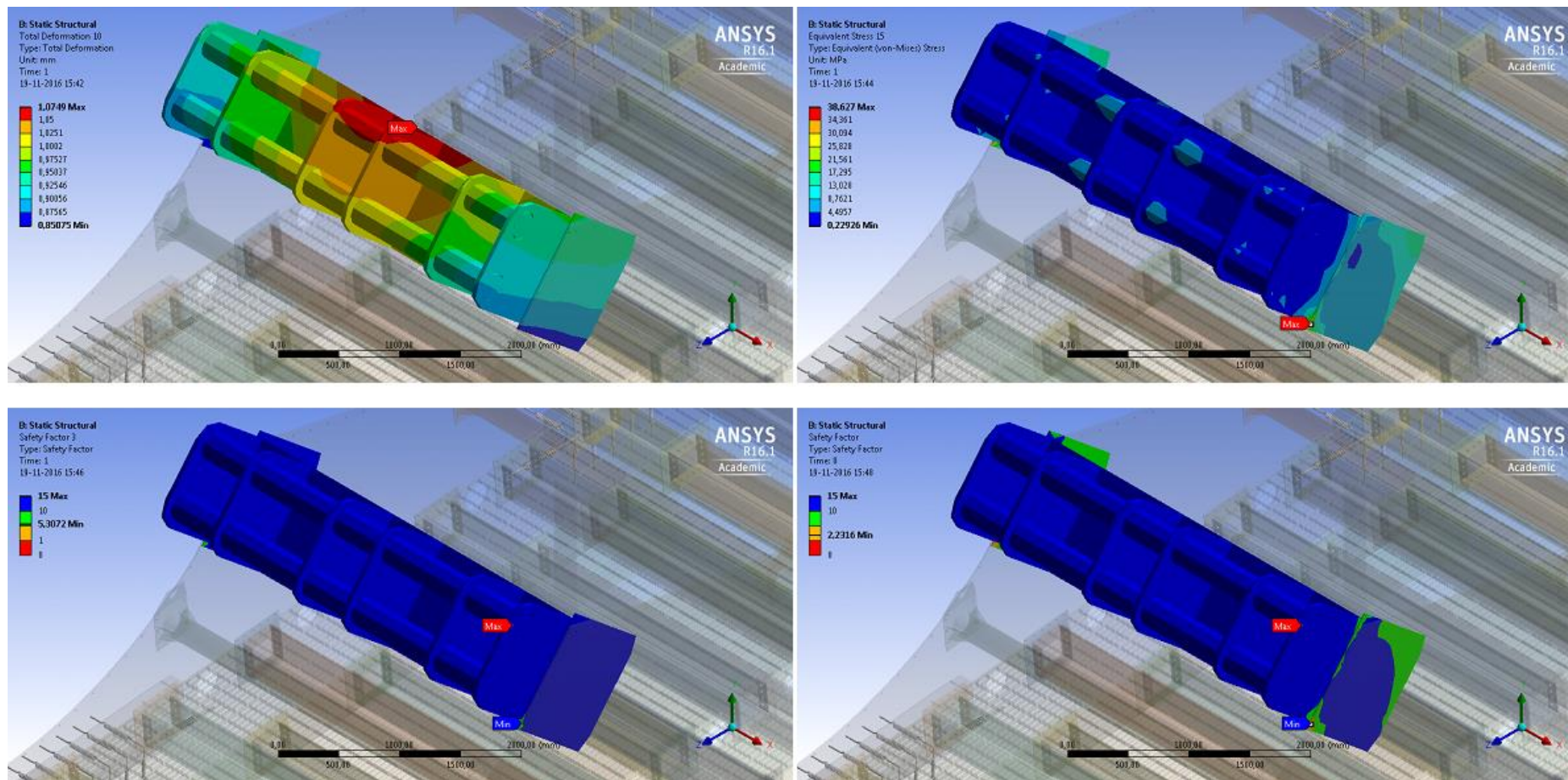


Figura 129: Viga madre C/A.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

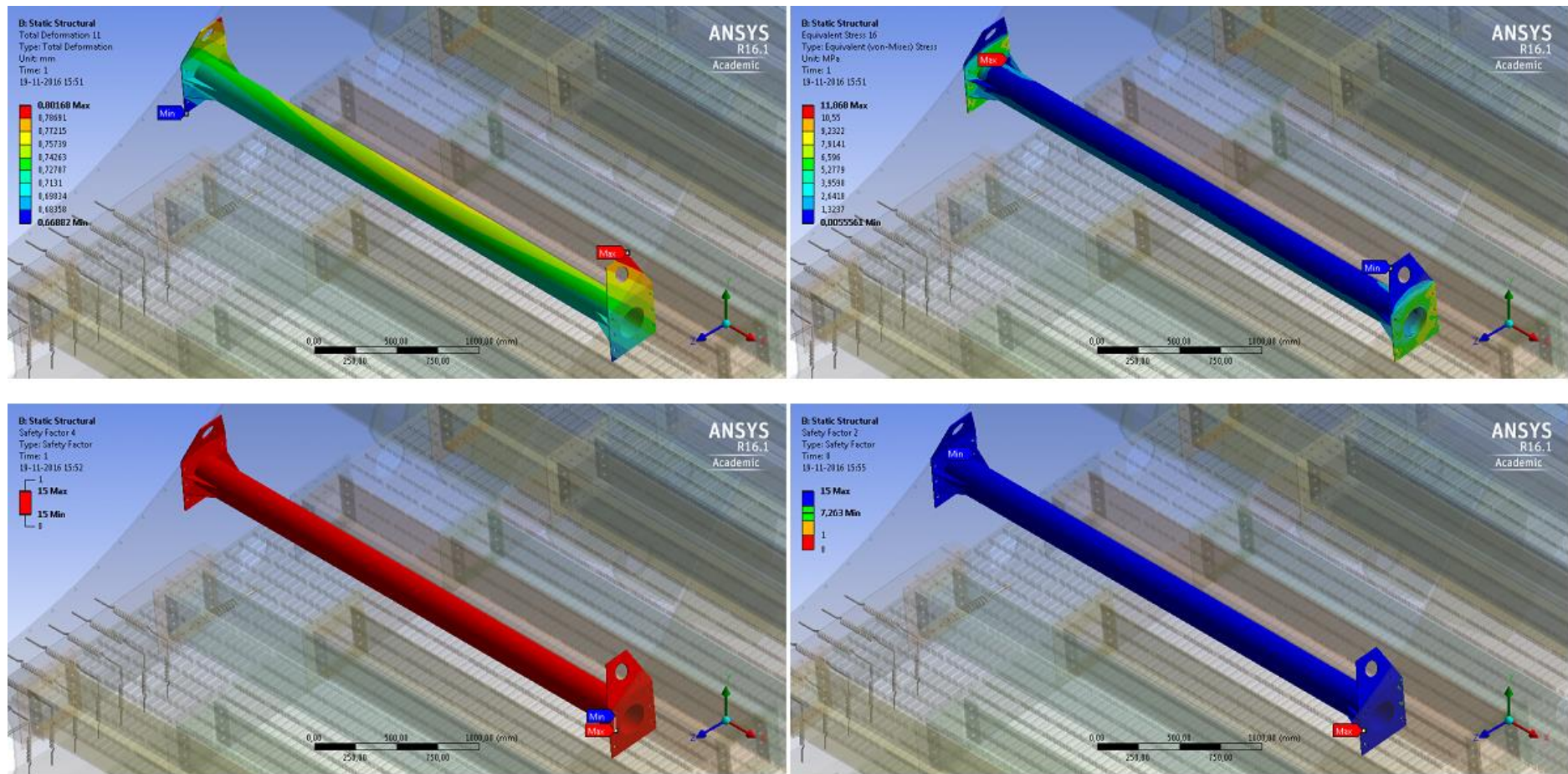


Figura 130: Viga descanso delantera C/A.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

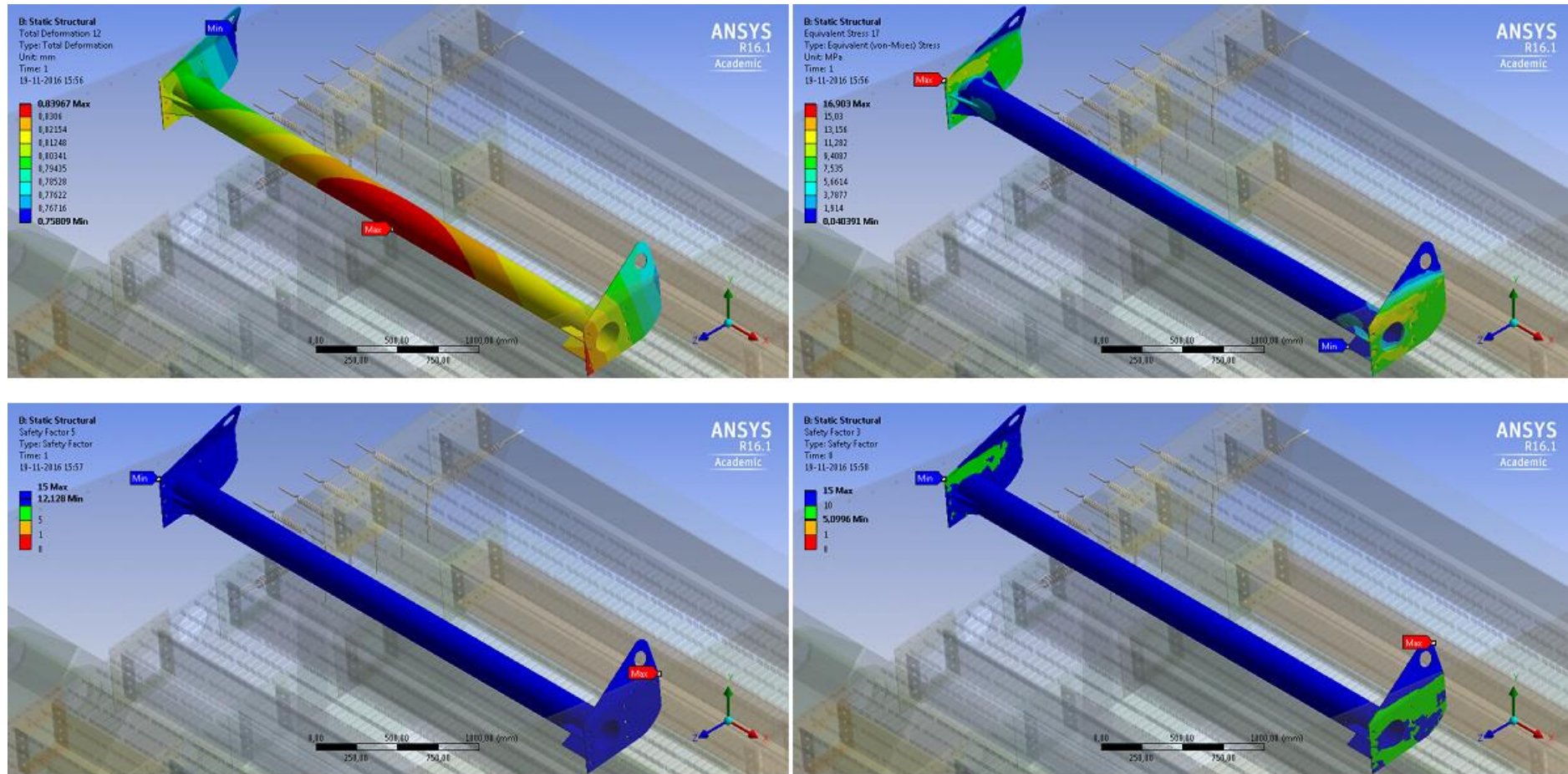


Figura 131: Viga descanso posterior C/A.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

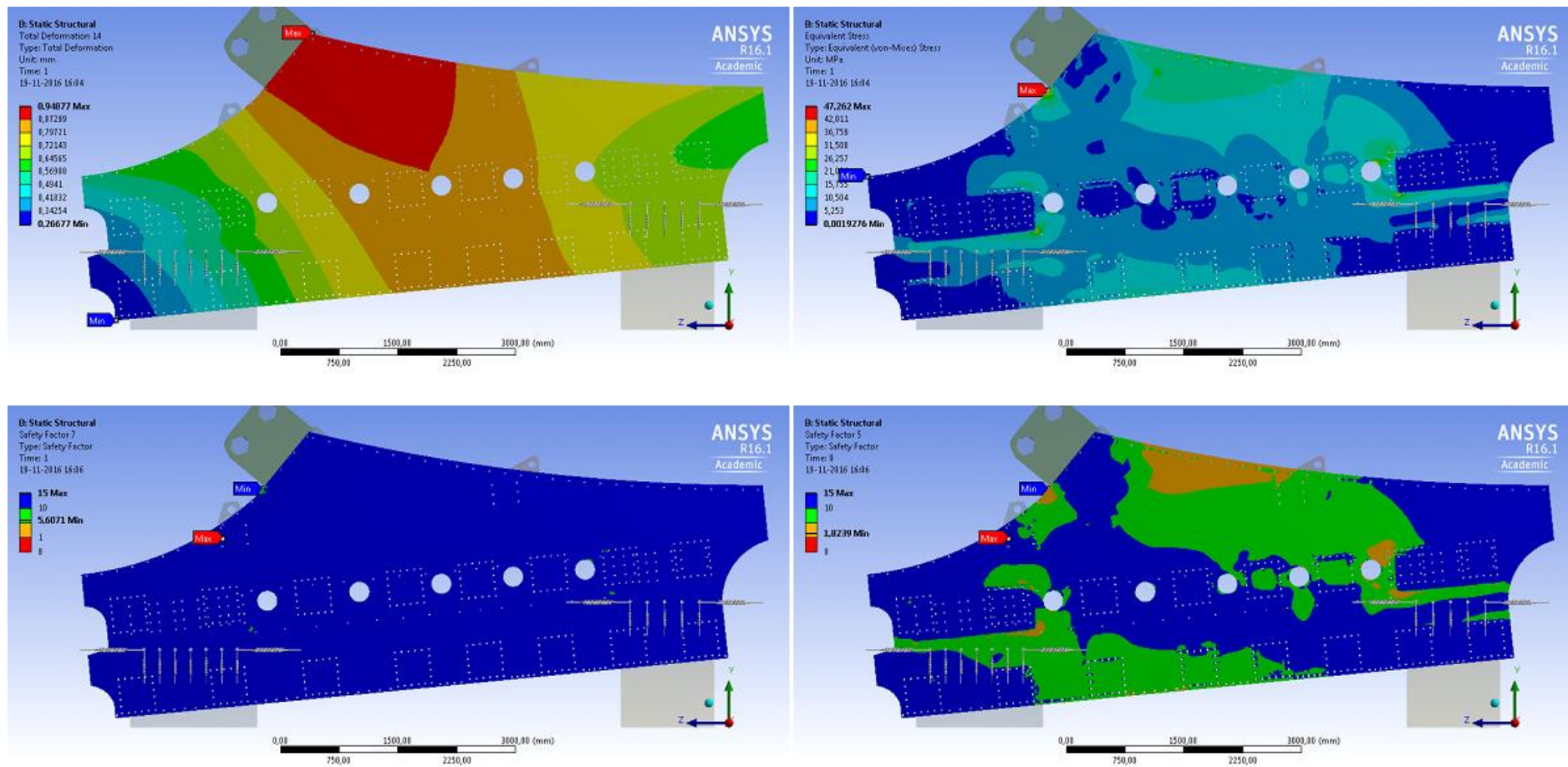


Figura 132: Placa lateral derecha C/A.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

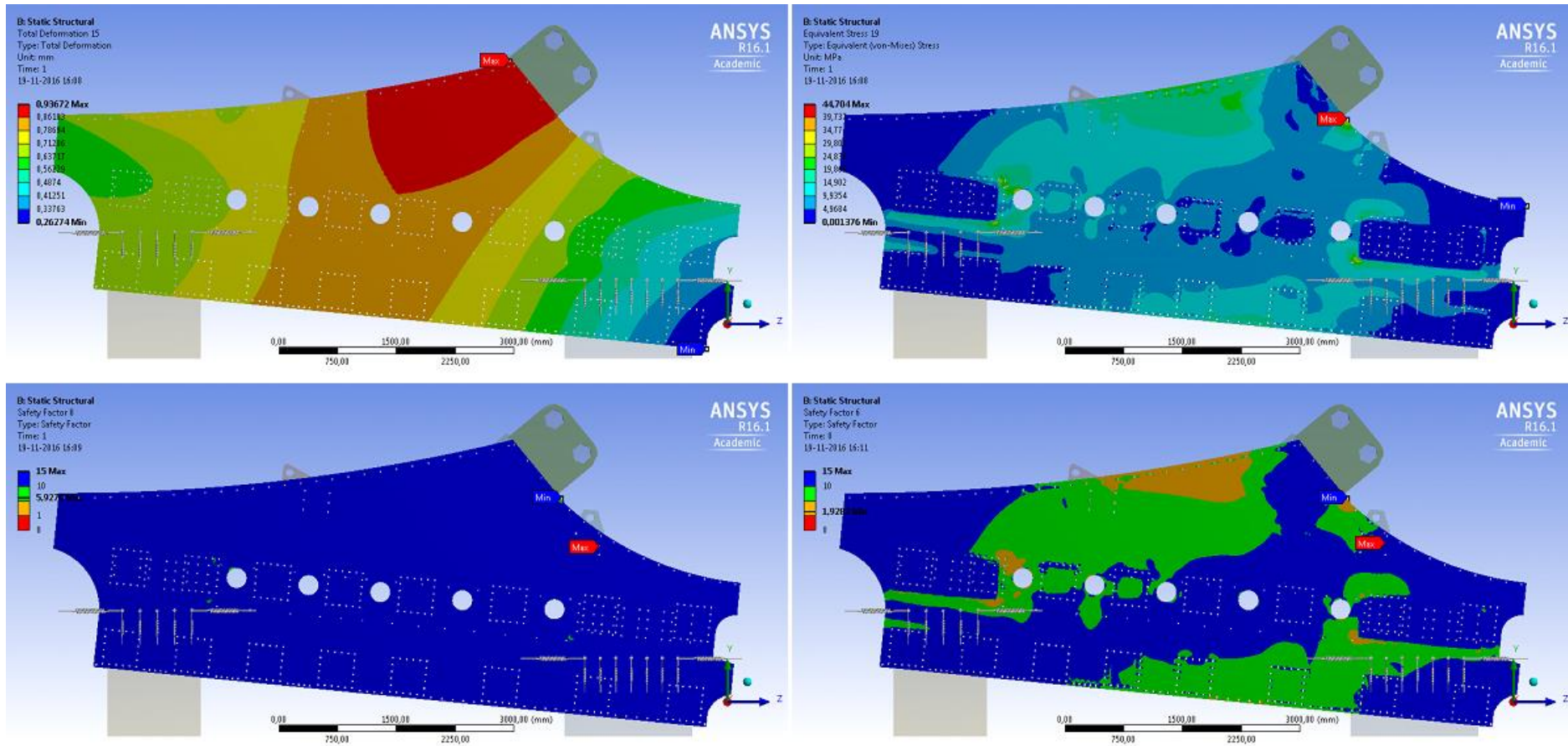


Figura 133: Placa lateral izquierda C/A.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Análisis estático con acoplamiento, descarga uniforme y mejoras en el diseño

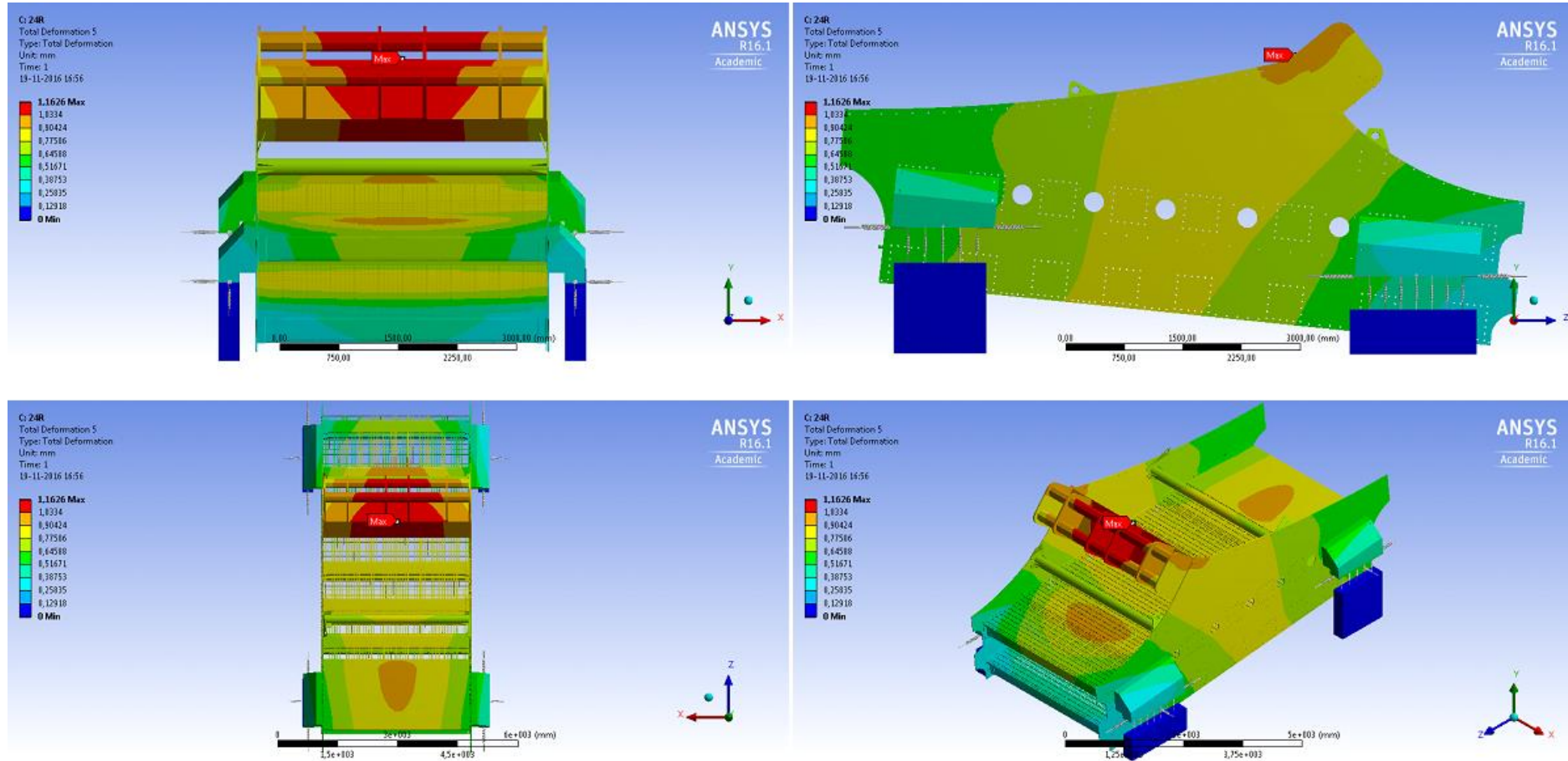


Figura 134: Deformación harnero completo C/A mejorado.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

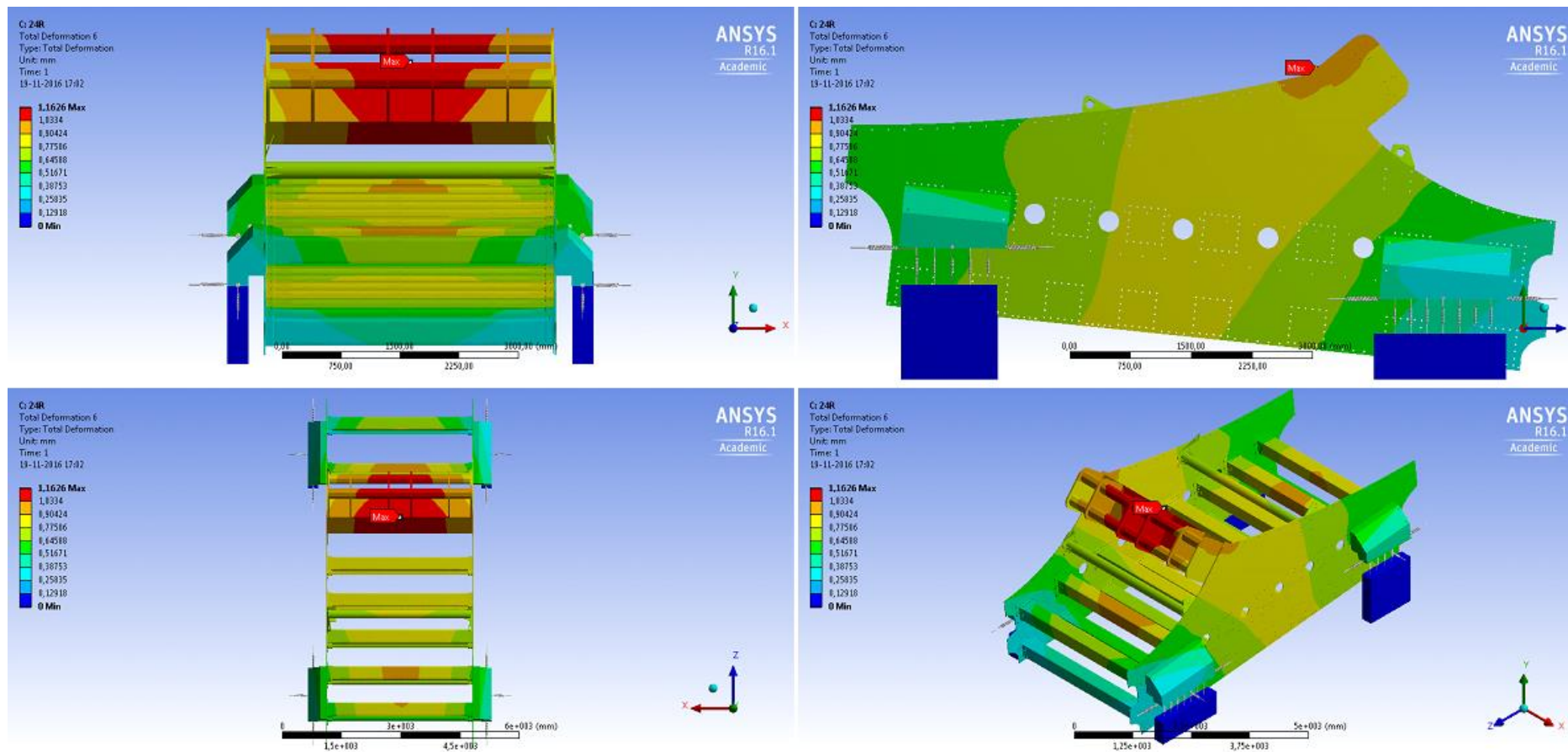


Figura 135: Harnero sin malla C/A mejorado.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

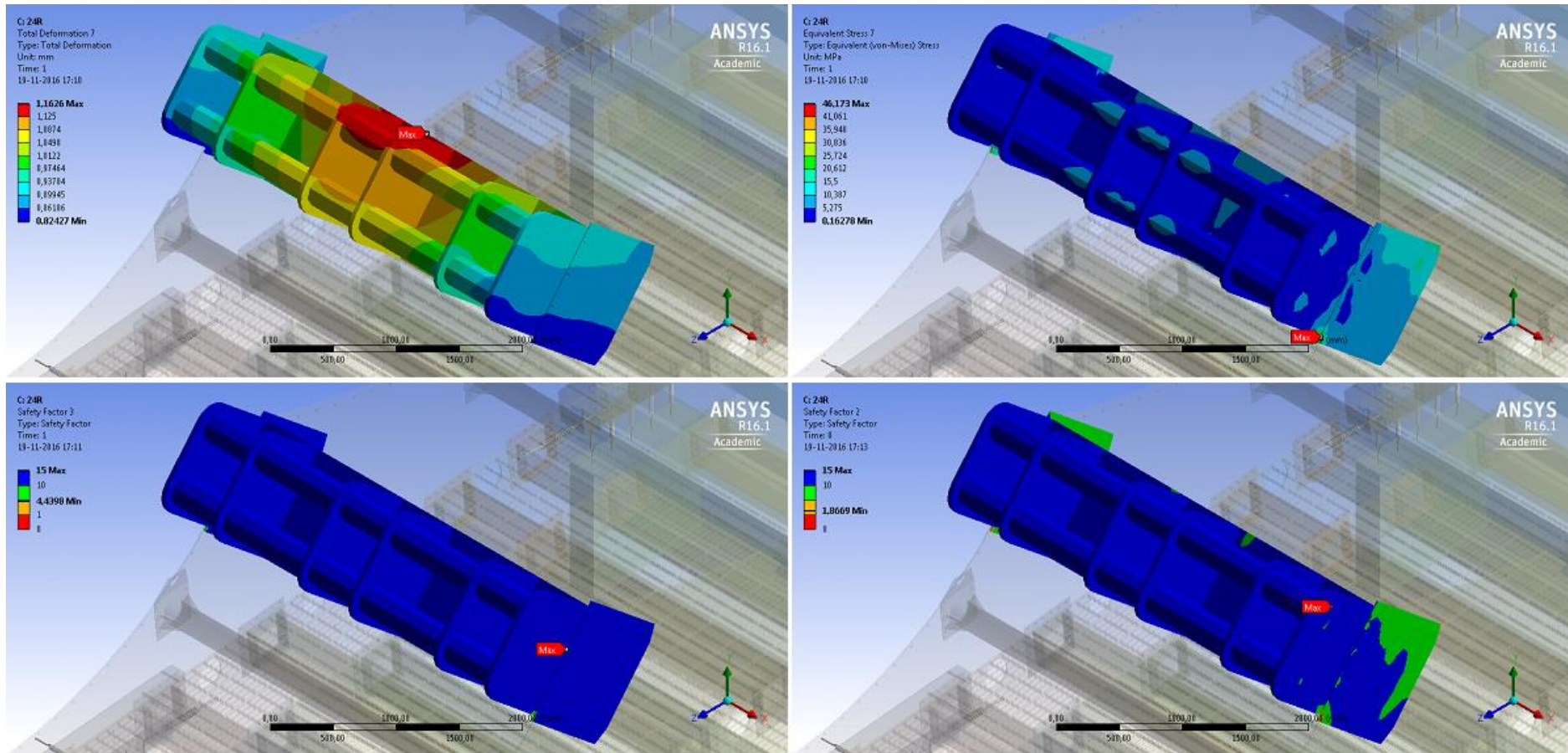


Figura 136: Viga madre C/A mejorado.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

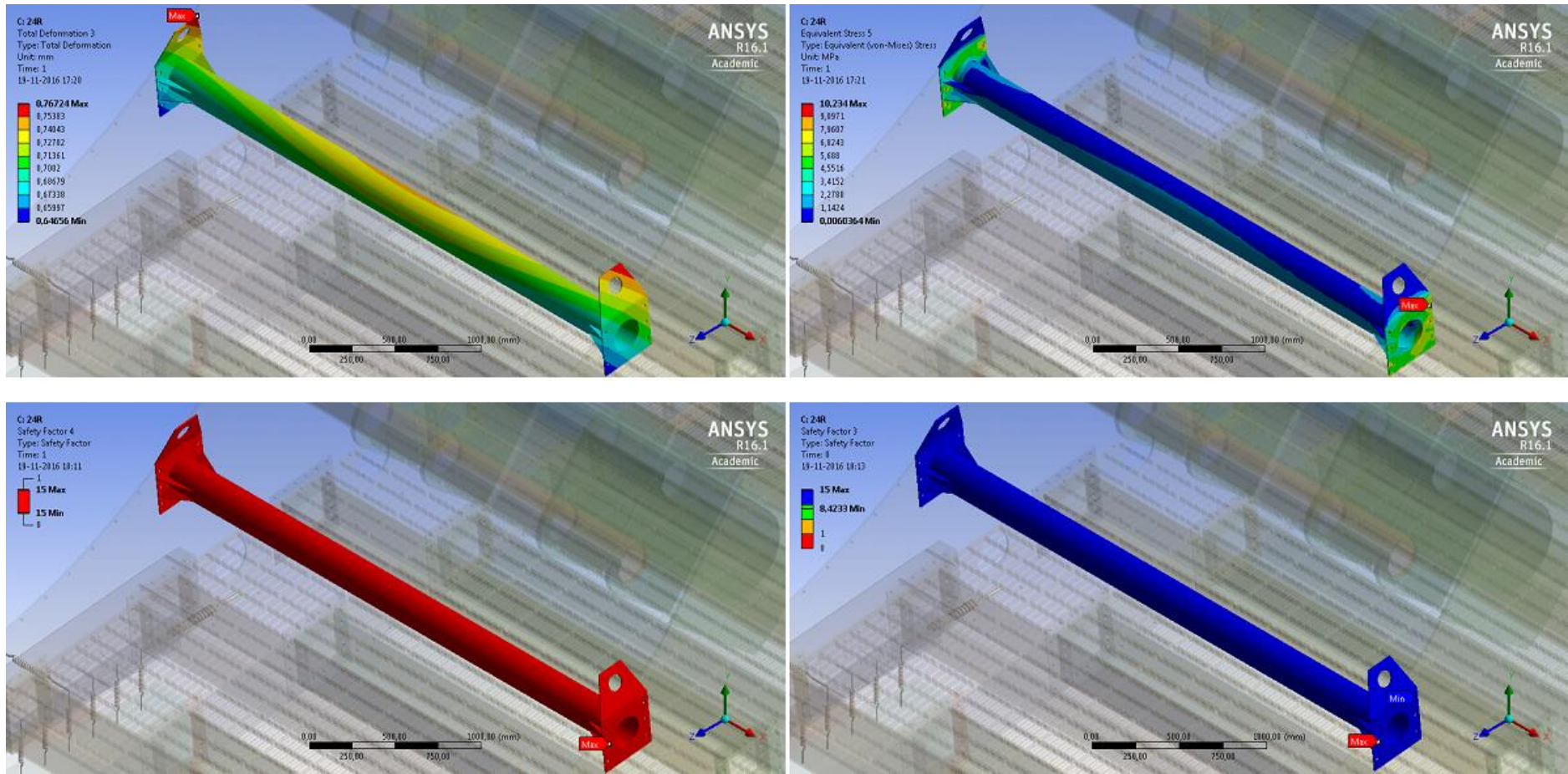


Figura 137: Viga descanso delantera C/A mejorado.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

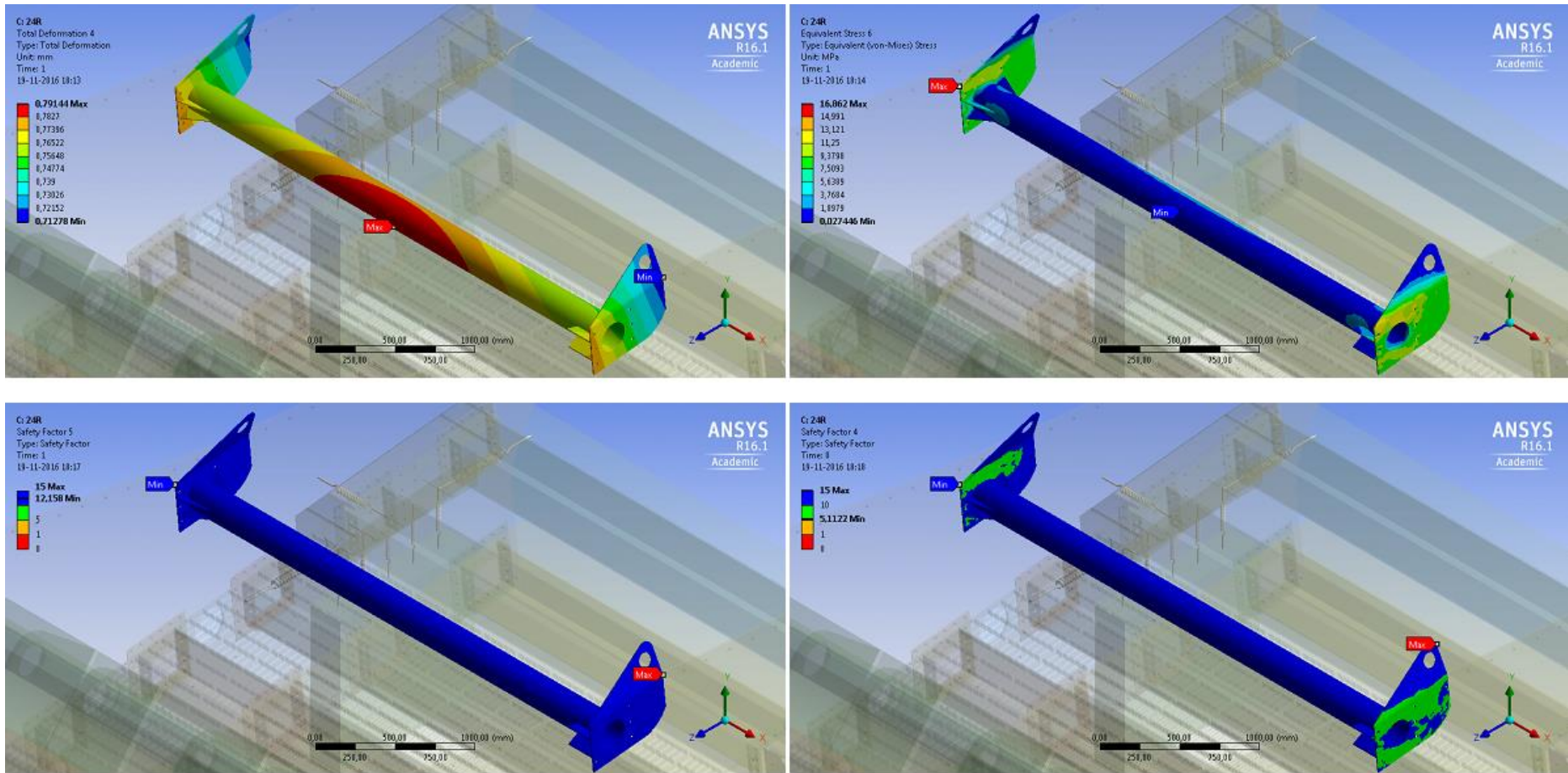


Figura 138: Viga descanso posterior C/A mejorado.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

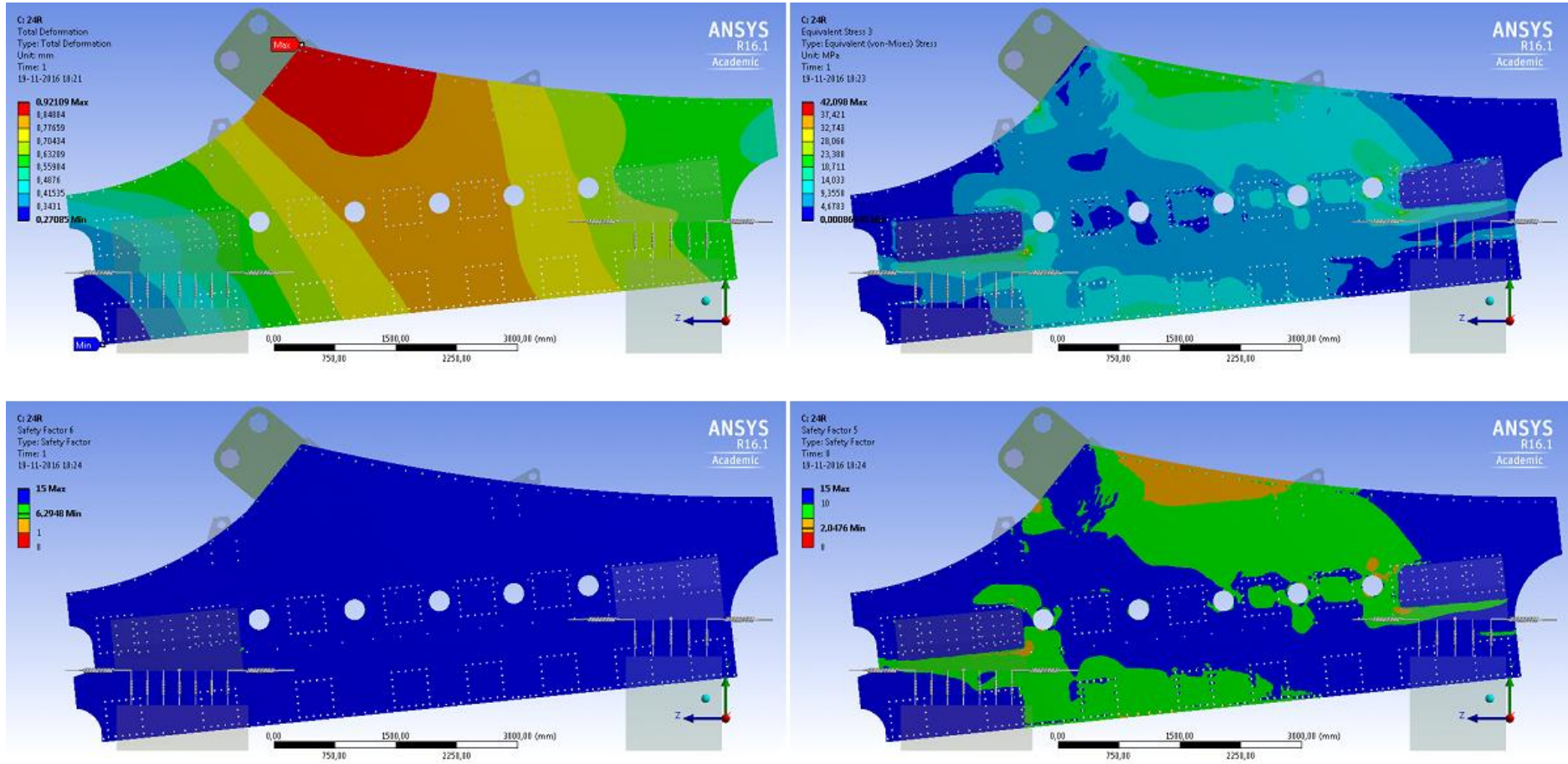


Figura 139: Placa lateral derecha C/A mejorado.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

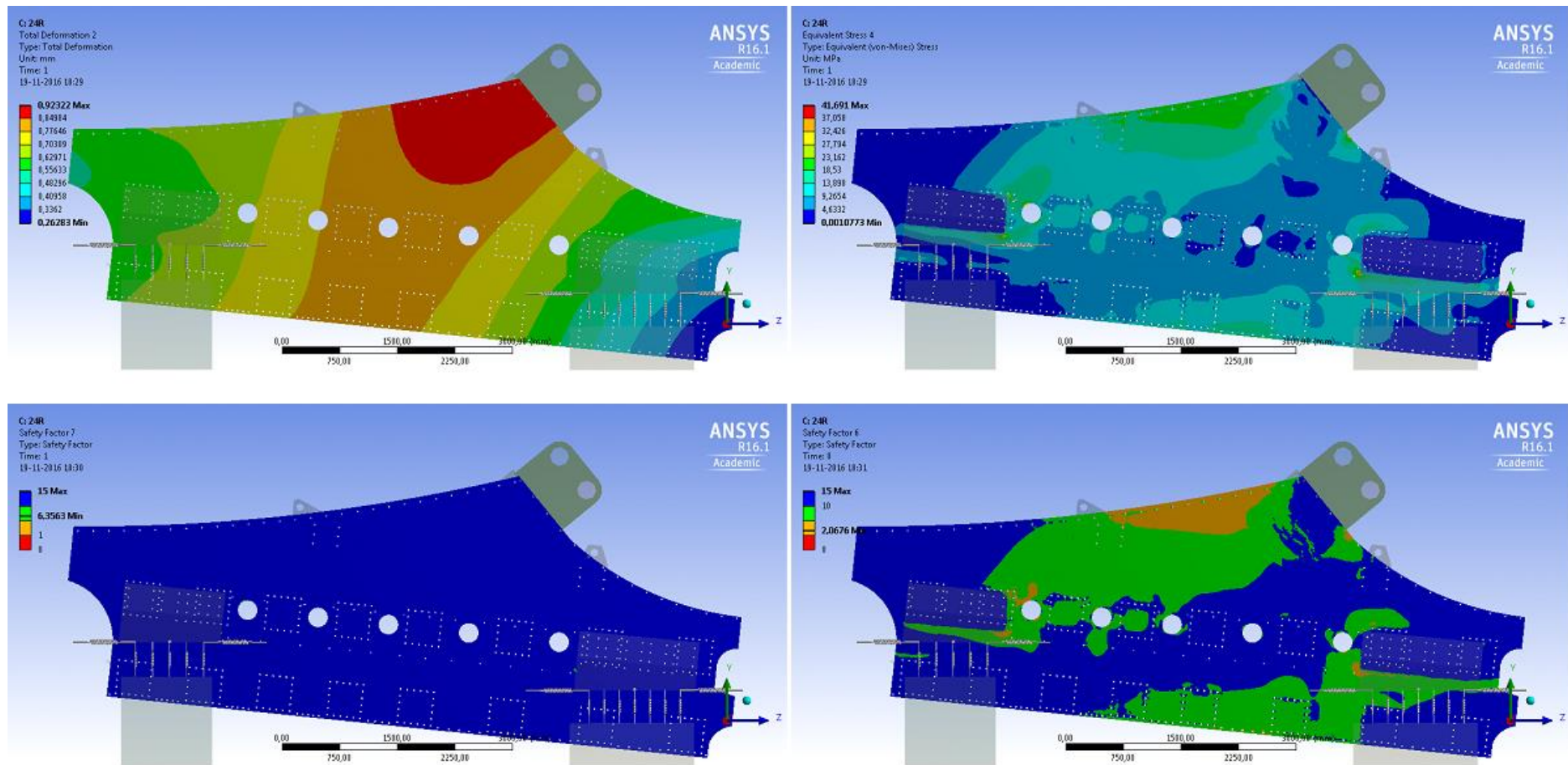


Figura 140: Placa lateral izquierda C/A mejorado.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

Análisis Modal

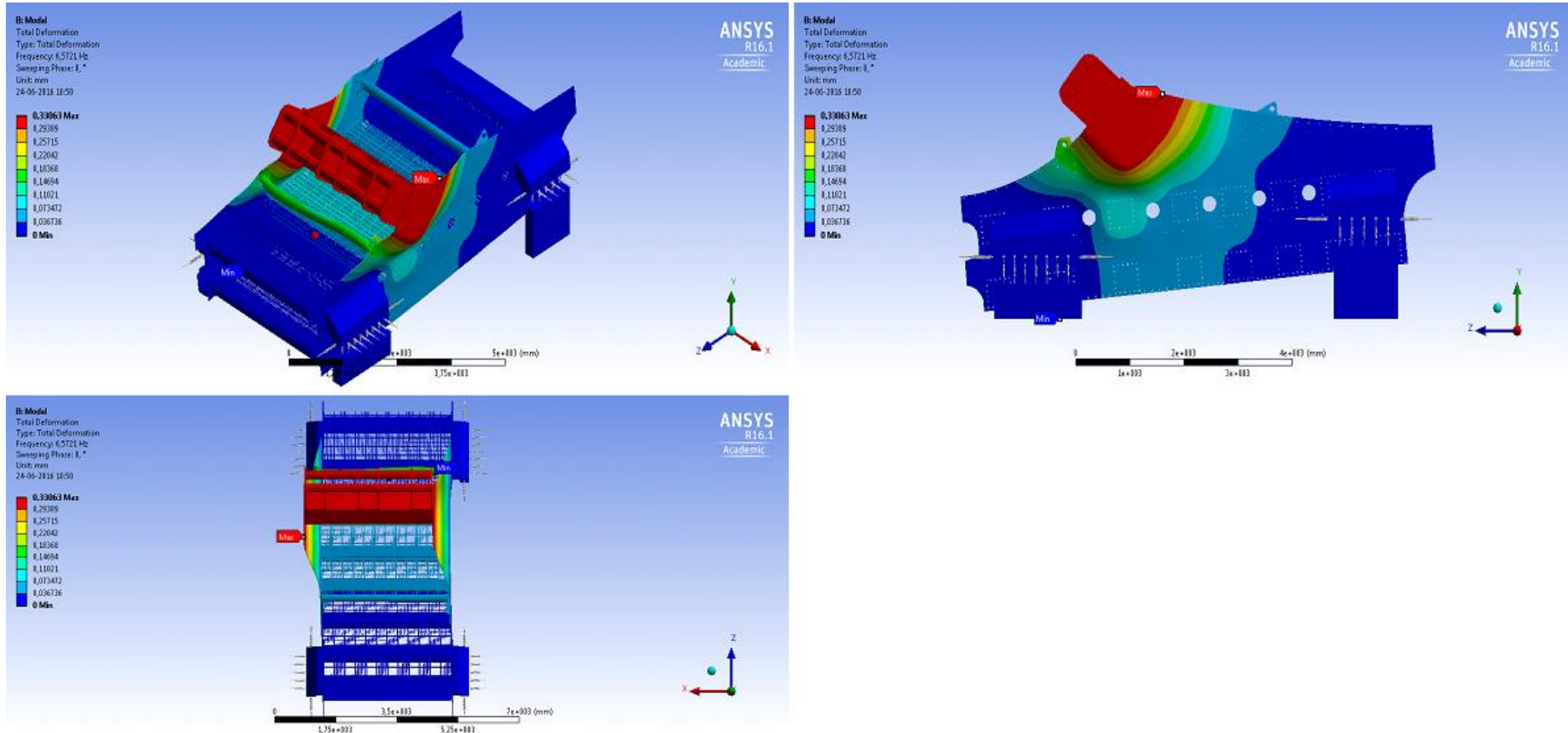


Figura 141: Forma modal de primer orden.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

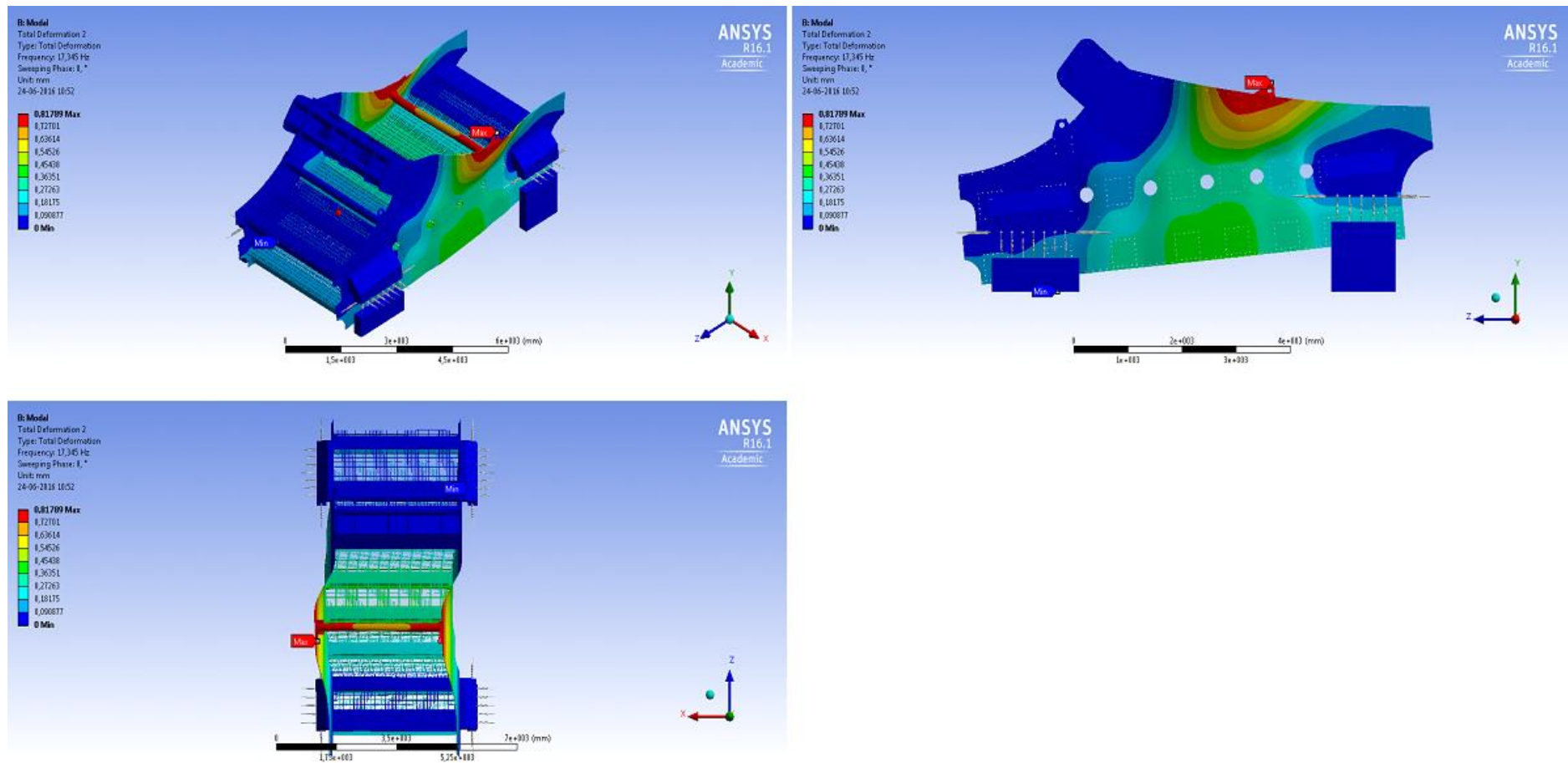


Figura 142: Forma modal de segundo orden.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

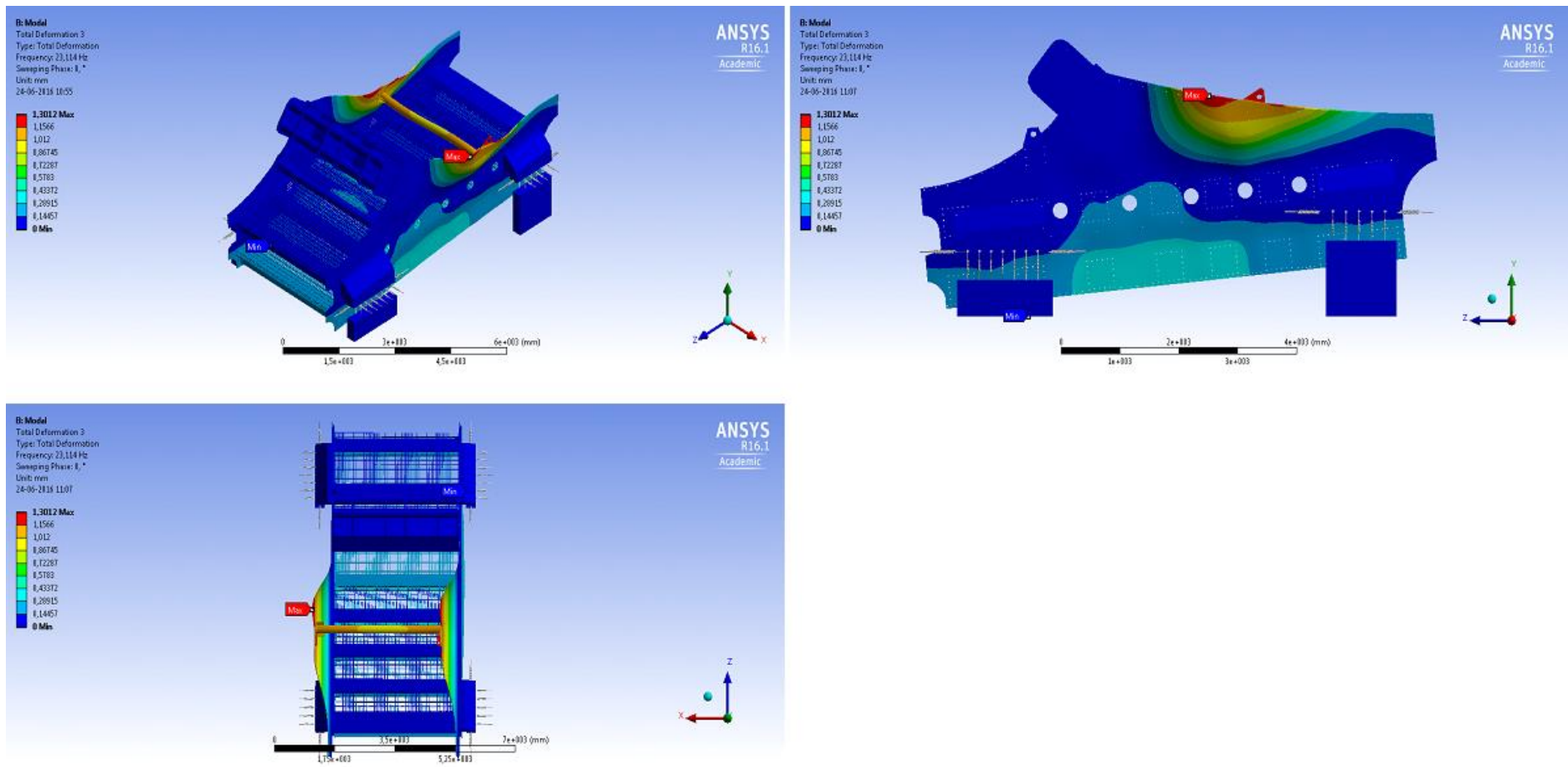


Figura 143: Forma modal de tercer orden.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

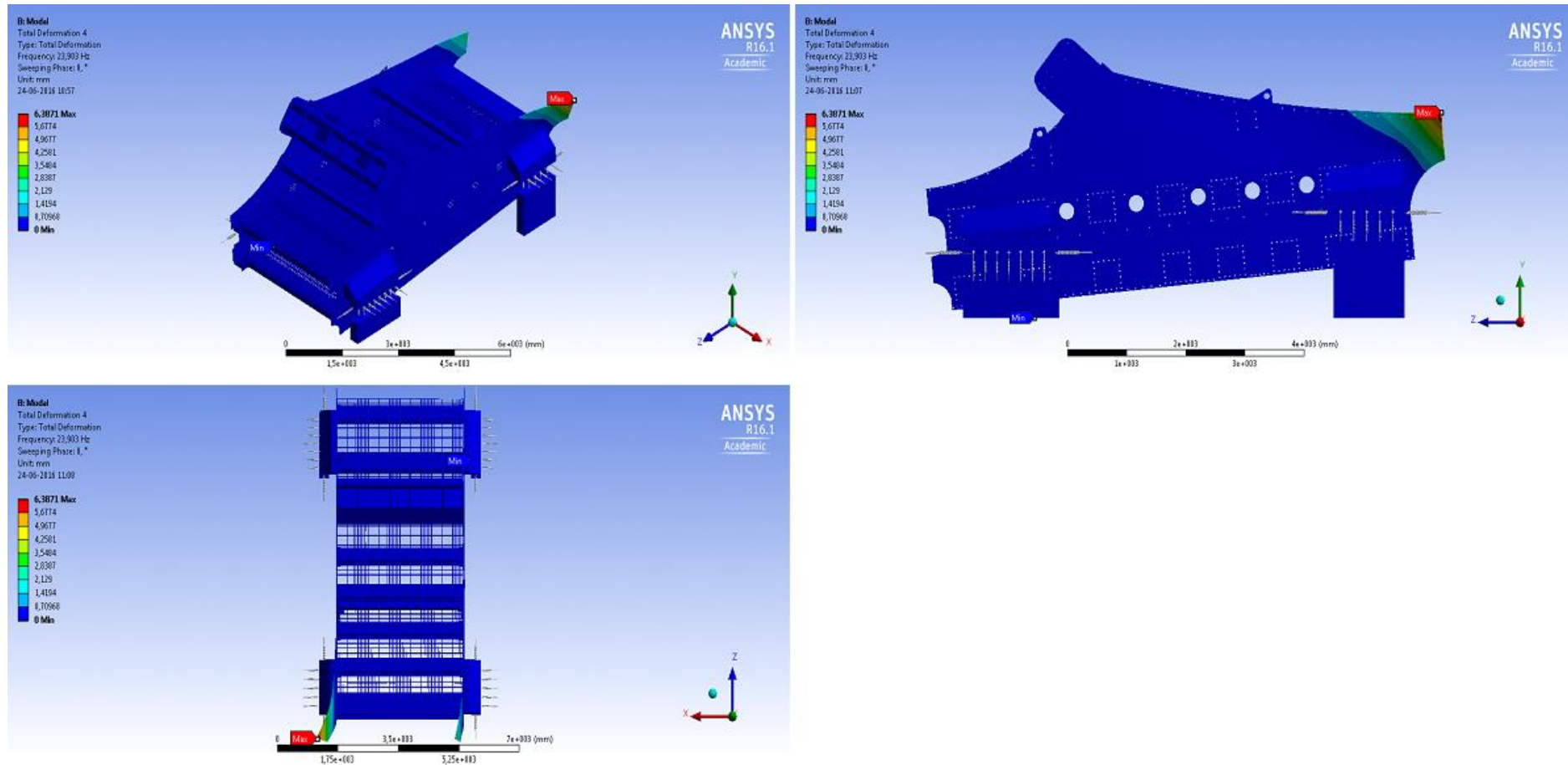


Figura 144: Forma modal de cuarto orden.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

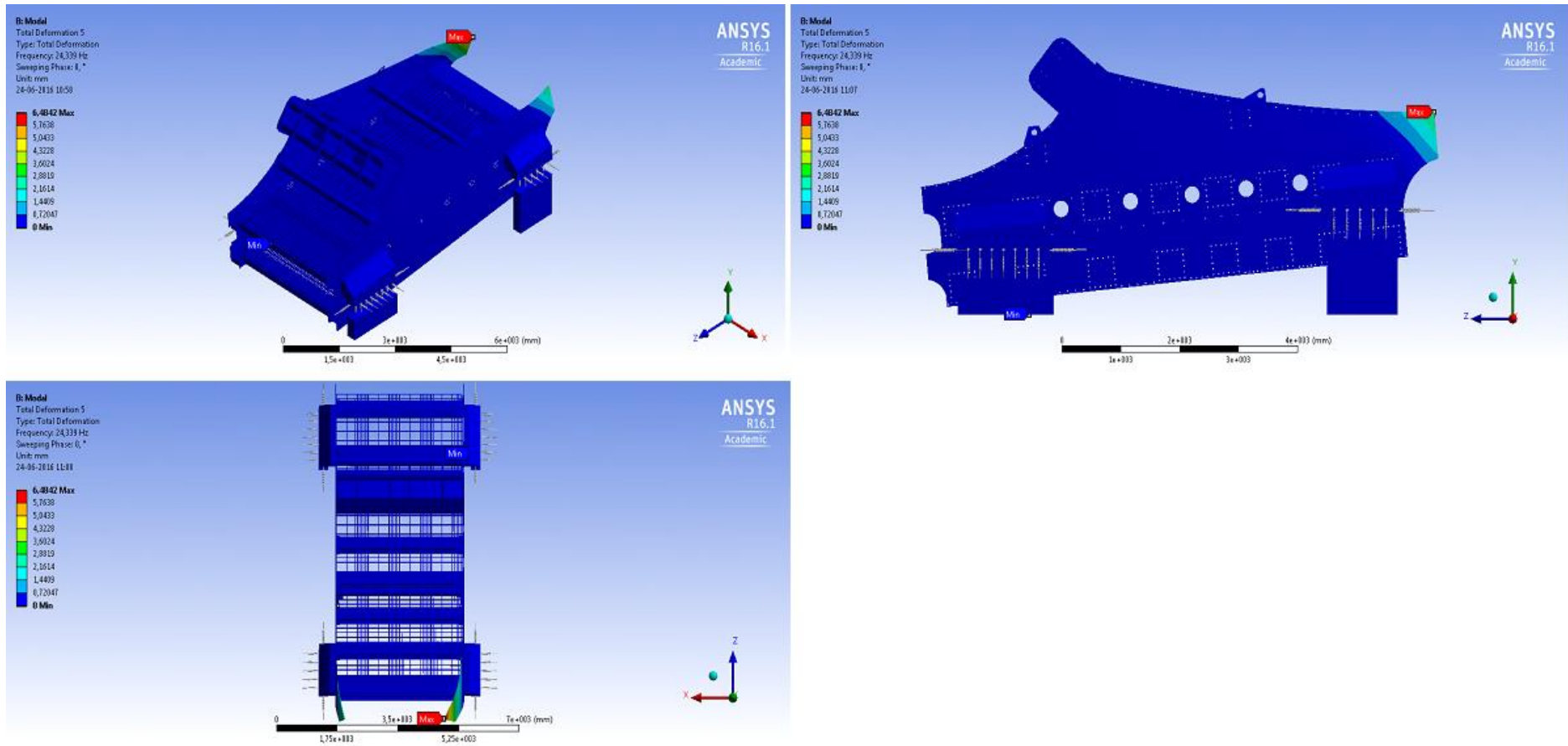


Figura 145: Forma modal de quinto orden.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

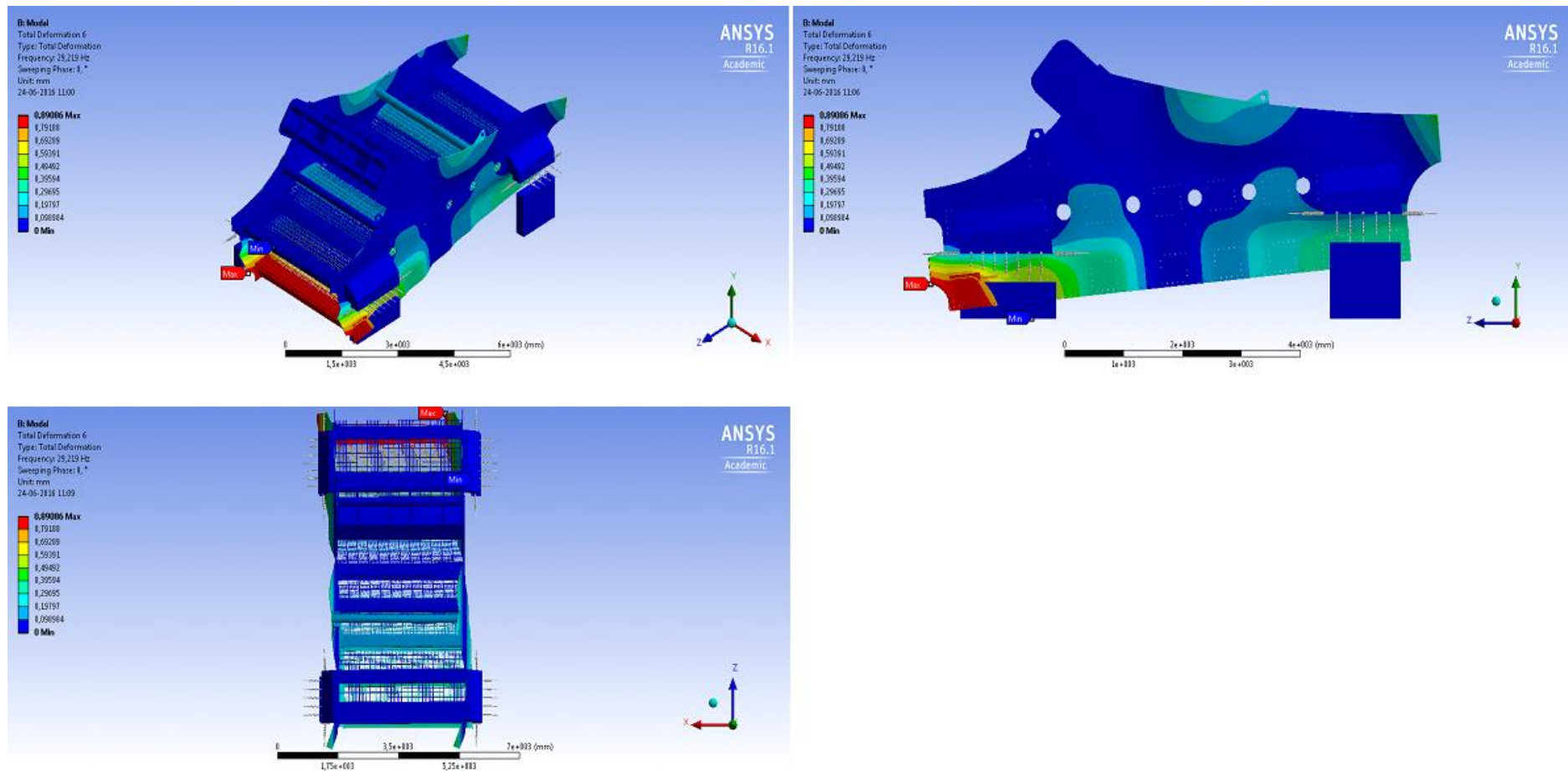


Figura 146: Forma modal de sexto orden.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

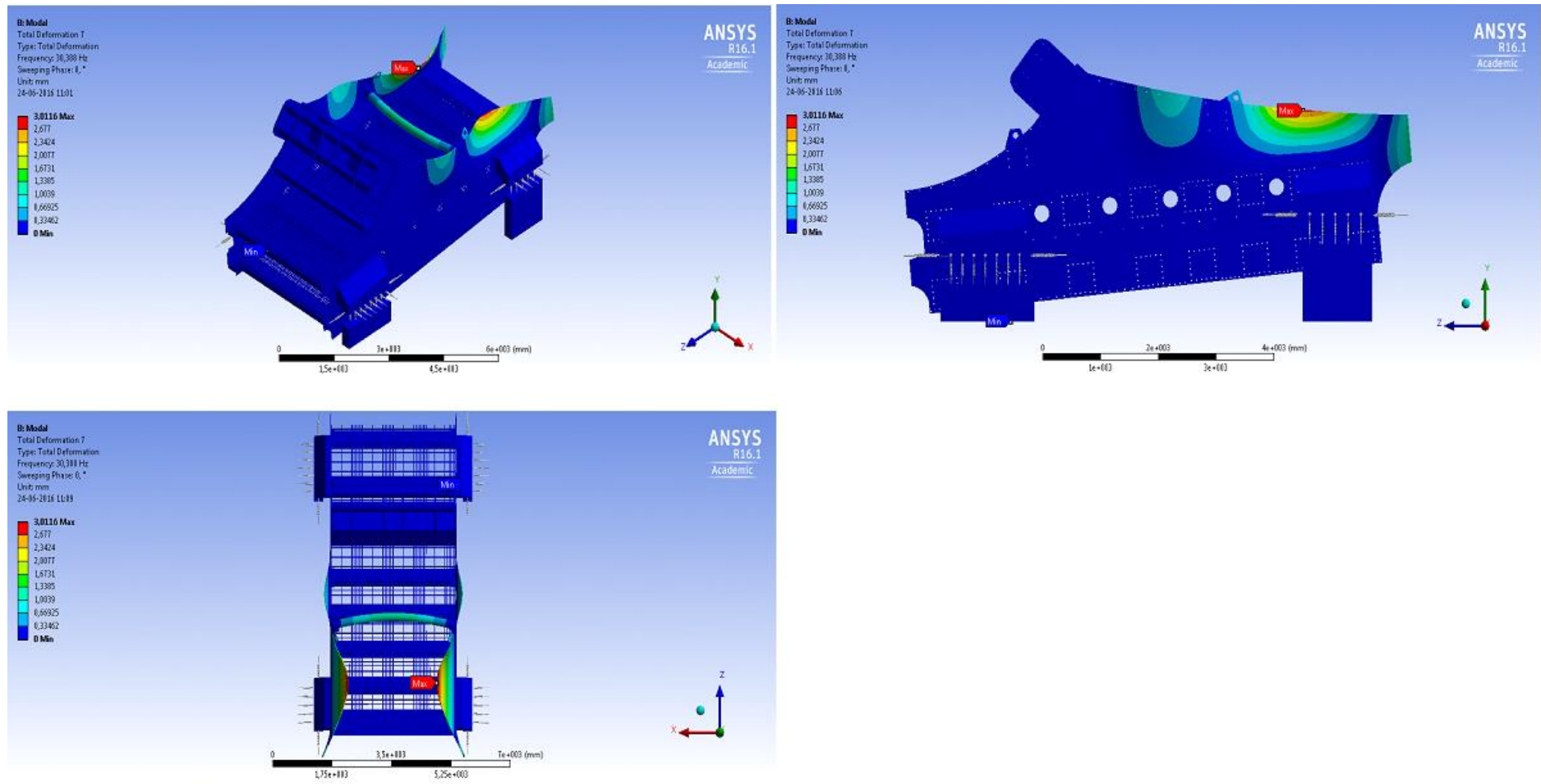


Figura 147: Forma modal de séptimo orden.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

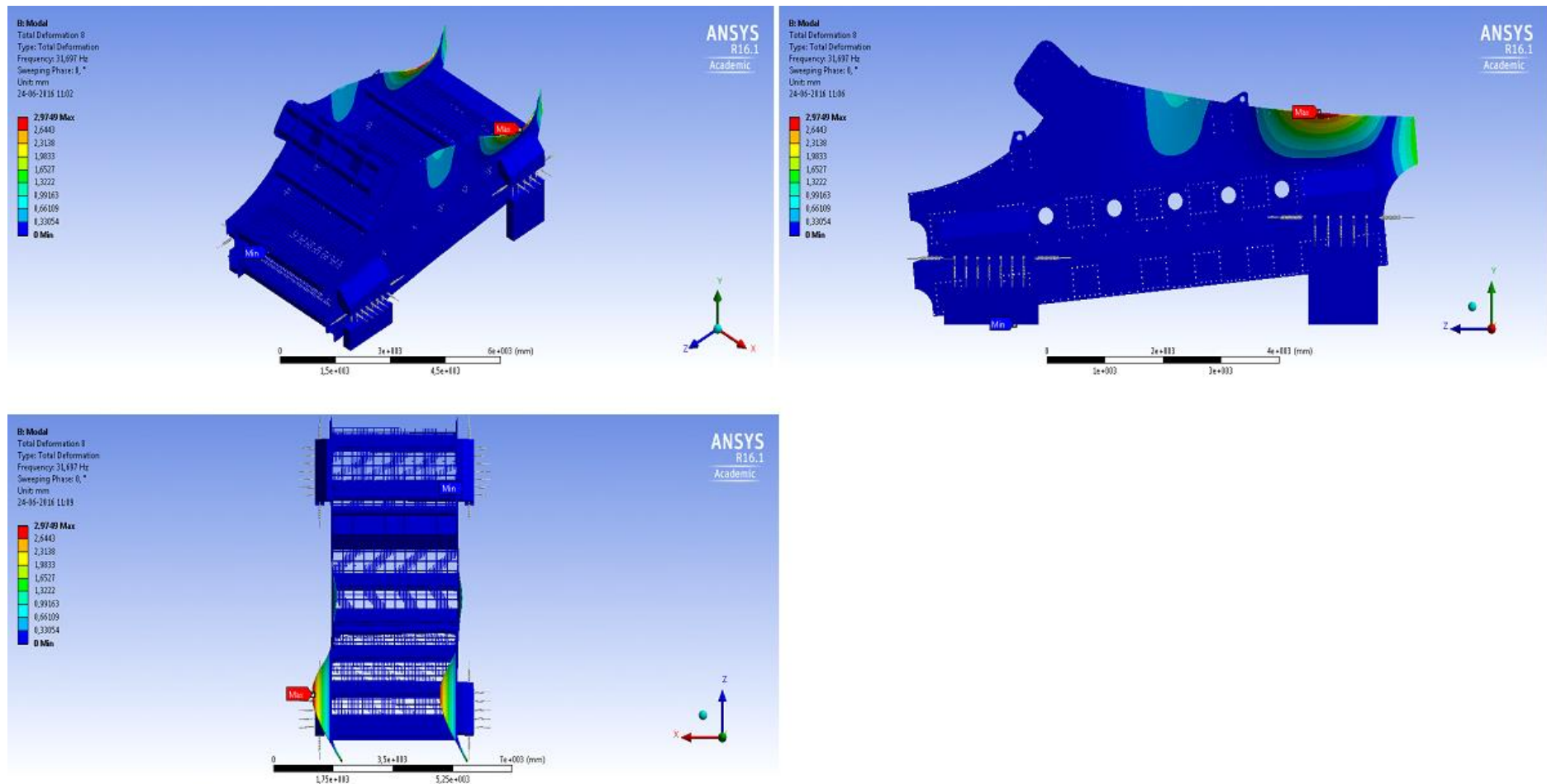


Figura 148: Forma modal de octavo orden.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

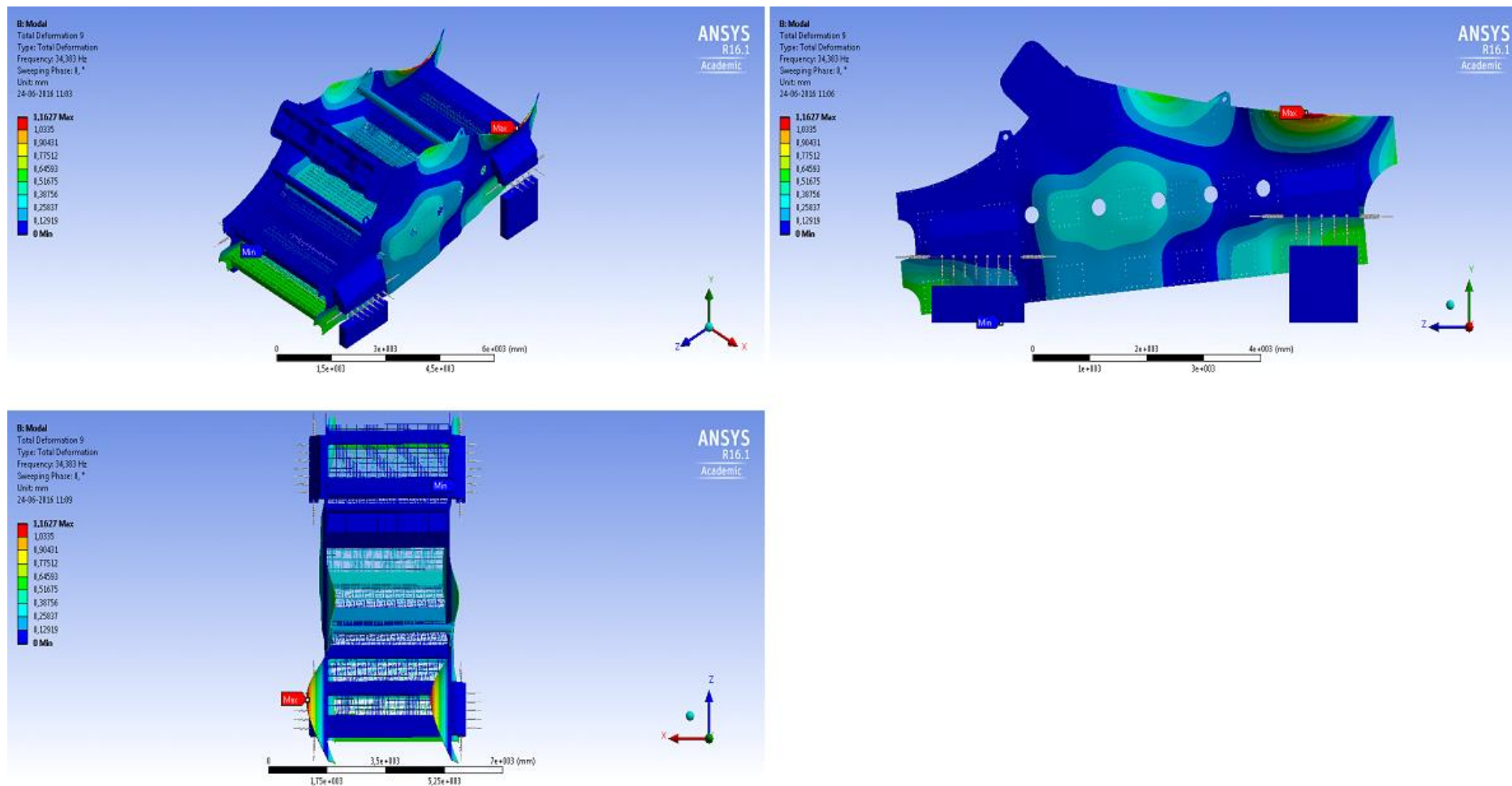


Figura 149: Forma modal de noveno orden.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos

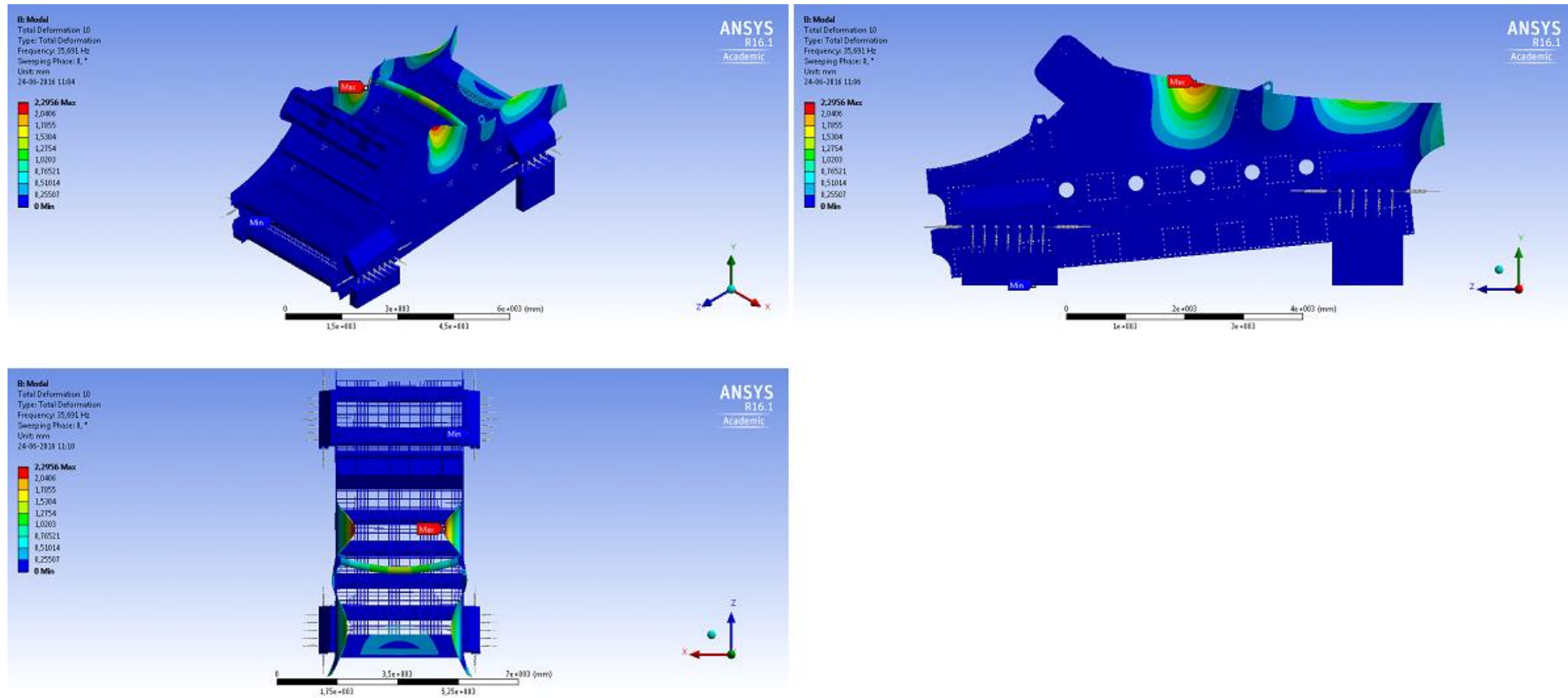


Figura 150: Forma modal de décimo orden.

Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos