

**DISEÑO DE UN CUARTO DE GRANALLADO Y SANDBLASTING PARA LA
EMPRESA INDUSTRIAL TK ASME API INGENIERÍA EU.**

DANIEL EDUARDO FORERO FLORIAN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

**DISEÑO DE UN CUARTO DE GRANALLADO Y SANDBLASTING PARA LA
EMPRESA INDUSTRIAL TK ASME API INGENIERÍA EU.**

DANIEL EDUARDO FORERO FLORIAN

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

Director

M.Sc. Javier Rúgeles Pérez

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A mi Dios, y único Dios de todos, porque sé que nunca me has dejado solo.

A mis padres Gloria Florián y Oscar Forero, a mis hermanos, Felipe, Santiago y Mariana por su confianza y apoyo incondicional.

A mis abuelos, Emilia Rodríguez, Salvador Forero, Filomena García y Paulino Florián, su sabiduría y ejemplo de unión son mi gran tesoro.

A mis tíos, en especial a Javier Florián y German Forero, sus apoyo ha sido incondicional.

A mis primos sin distinción alguna, todos han creído en mí.

A mi Hermosa compañera de la vida, mi novia y futura esposa Angiee Lorena Sánchez, por tus valiosos consejos, amor, respeto, confianza y lealtad.

A mis compañeros y amigos en especial a Ingrid Delgado, Sandra Córdoba, Juan David Carvajal, Manuel García, Jonathan Blanquiceth, Oscar Zapata, Javier Gonzales y Sergio Vargas, por su perseverancia y trabajo de equipo.

Daniel Forero.

AGRADECIMIENTOS

A todos los docentes de la escuela y que con su mar de conocimiento han formado en mi un hombre de ética y valores en el área de la ingeniería mecánica, en especial a Javier rúgeles, por su apoyo, asesoría y compromiso en la elaboración de este trabajo de grado.

Daniel Forero.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	20
1. DESCRIPCION DEL PROYECTO	22
1.1 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA	22
1.2 JUSTIFICACION DEL PROYECTO	24
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	26
1.3.1 Objetivo general	26
1.3.2 Objetivos específicos	26
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	29
2. MARCO TEORICO	30
2.1 ESTUDIO DE LA CORROSIÓN.....	30
2.1.1 Concepto de corrosión	30
2.1.2 Pasividad	32
2.1.3 Efecto del flujo del medio corrosivo.....	33
2.1.4 Efecto de la temperatura.....	33
2.2 ESTUDIO DE EROSION GENERADO POR EL IMPACTO DE CHORRO ABRASIVO EN UNA SUPERFICIE.....	35
2.2.1 Desgaste erosivo.	35
2.2.2 Erosión.....	36
2.2.3 Desgaste erosivo por partículas solidas.....	37
2.2.4 Propiedades de la partícula	38
2.2.5 Angulo de impacto.	44
2.3 EROSIÓN EN MATERIALES DÚCTILES.....	47
2.3.1 Velocidad de impacto.....	48
2.4 METODO DE LIMPIEZA DE SUPERFICIES.....	50
2.4.1 Clasificación de los grados de corrosión de superficies metálicas.....	50
2.4.2 Grados de preparación	52
3. PROCESO DE DISEÑO CONCEPTUAL.....	54

3.1 NECESIDADES DE LA EMPRESA	54
3.2 IDENTIFICACIÓN DE SUBSISTEMAS PRINCIPALES.....	56
3.3 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS.....	57
3.3.1 Cabina.....	57
3.3.2 Construcción modular con o sin revestimiento de goma interior.....	58
3.3.3 Construcción tipo galpón con revestimiento de goma interior.....	59
3.3.4 Construcción en mampostería con o sin revestimiento de goma interior.....	59
3.4 PISO	60
3.4.1 Piso sección en M.....	61
3.4.2 Piso ciego para sistema de tolva.....	61
3.4.3 Piso ciego con sistema de tornillo sinfín.....	62
3.4.4 Piso en rejilla.....	63
3.5 RECUPERACIÓN DEL ABRASIVO.....	64
3.5.1 Recuperación manual con tolva lateral.....	64
3.5.2 Recuperación manual con conducto central de tornillo sinfín.....	66
3.5.3 Recuperación automática continua.....	66
3.5.4 Recuperación continua con sistema de banda transportadora.....	68
3.5.5 Recuperación por aspirador de vacío.....	69
3.6 SISTEMA DE PRESIÓN Y PROYECCIÓN DEL ABRASIVO.....	70
3.6.1 Presurización y aceleración de las partículas.....	71
3.6.2 Chorreado seco a succión.....	72
3.6.3 Chorreado seco a compresión.....	73
3.7 COMPRESOR.....	74
3.8 SISTEMA COLECTOR DE POLVO.....	74
3.8.1 Separador ciclónico.....	75
3.8.2 Filtro de mangas.....	76
3.9 ALTERNATIVA SELECCIONADA, QFD.....	77
3.9.1 Descripción de la alternativa de diseño más óptima.....	80
4. DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS.....	81
4.1 SELECCIÓN DEL ELEVADOR DE CANGILONES.....	81

4.1.1 Partes del elevador de cangilones.	81
4.1.2 Tipos de elevadores de cangilones.....	83
4.1.3 Proceso de selección.....	86
4.1.4 Análisis cuantitativo de la descarga.	99
4.1.5 Calculo del número de cangilones.	102
4.1.6 Calculo de la potencia.....	106
4.2 SELECCIÓN DE LA BANDA TRANSPORTADORA.....	110
4.2.1 Tipos de bandas transportadoras.....	110
4.2.2 Partes de la banda transportadora.....	113
4.2.3 Proceso de diseño de la banda transportadora.	114
4.3 DISEÑO DEL SISTEMA COLECTOR DE POLVO	145
4.3.1 Plano de la ubicación de los equipos.	145
4.3.2 Filtro de mangas o colector de polvo	146
4.3.3 Diseño del sistema de captación de aire contaminado.	154
4.3.4 Diseño de los ductos de extracción.....	158
4.3.5 Selección del ventilador centrífugo.....	162
5. FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO FINAL DEL CUARTO DE GRANALLADO Y SANDBLASTING.	170
6. ANÁLISIS DE INVERSIÓN.....	177
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	181
BIBLIOGRAFIA.....	187
ANEXOS.....	189

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Planta TK ASME API INGENIERÍA EU.....	22
Figura 2. Principales subsistemas cabina de granallado.	28
Figura 3. Poder oxidante del medio corrosivo.....	32
Figura 4. Velocidad de corrosión.	33
Figura 5. Velocidad de corrosión como función de la temperatura.	34
Figura 6. Diferentes efectos producidos por las partículas erosivas.	37
Figura 7. Interacción de la partícula incidente y el material de trabajo	38
Figura 8. Relación de dureza para causar indentación plástica.....	39
Figura 9. Desgaste como función de la relación de dureza entre partícula y superficie.	41
Figura 10. Comparación de tamaños.....	42
Figura 11. Comparación entre partículas angulares.	43
Figura 12. Tamaño de la partícula en el efecto del mecanismo erosivo.	44
Figura 13. Erosión como función del ángulo de impacto general.....	45
Figura 14. Tasa de erosión en función del ángulo de impacto.....	46
Figura 15. Dependencia del ángulo de incidencia en materiales dúctiles.....	47
Figura 16. Erosión generada como función de la velocidad y el tamaño de las partículas	49
Figura 17. Fabricación de un tanque para transporte de combustible. Acero con signos de corrosión.....	50
Figura 18. Superficie corroída expuesta a la intemperie.....	51
Figura 19. Limpieza de un tanque para transporte de combustible.	52
Figura 20. Principales subsistemas de la cabina de granallado.	56
Figura 21. Diseño modular.....	58
Figura 22. Diseño Tipo Galpón.	59
Figura 23. Diseño de piso sección M.	61
Figura 24. Piso ciego con tolva lateral.	62

Figura 25. Diseño de piso con tornillo sinfín.	62
Figura 26. Diseño del piso en rejilla.	63
Figura 27. Piso con sistema recuperador de transporte central.	64
Figura 28. Sistema de cangilón.	65
Figura 29. Piso con sistema recuperador de transporte central.	66
Figura 30. Recuperación automática.	67
Figura 31. Barrido automático.	67
Figura 32. Sistema de recolección por transportador de banda.	68
Figura 33. Transportador aspirador por vacío.	69
Figura 34. Partes del Transportador aspirador por vacío.	70
Figura 35. Equipo ráfaga, Blast Machine.	71
Figura 36. Chorreado seco a succión.	72
Figura 37. Chorreado seco a presión.	73
Figura 38. Compresor SULLAIR.	74
Figura 39. Separador ciclónico, esquema de funcionamiento.	75
Figura 40. Filtro de mangas.	76
Figura 41. Alternativa conceptual de diseño.	80
Figura 42. Partes principales del elevador de cangilones.	82
Figura 43. Tipo de alimentación del elevador.	84
Figura 44. Unión de cangilón a correa o banda flexible.	85
Figura 45. Unión de cangilón a cadena.	85
Figura 46. Fluidez como función del ángulo de reposo.	87
Figura 47. Angulo de sobrecarga dinámico.	88
Figura 48. Dimensiones características del elevador.	93
Figura 49. Modelado del elevador en Solidworks, basado en las dimensiones del catálogo. Renderizado e importado de Solidworks.	94
Figura 50. Modelado del elevador en Solidworks, Vista en corte Cabeza del elevador.	95
Figura 51. Modelado del elevador en Solidworks, Cabeza del elevador.	95
Figura 52. Cangilón Tipo A-A.	96

Figura 53. Fijación de los pernos al cangilón	98
Figura 54. Modelado del cangilón, Renderizado e importado desde Solidworks. ...	98
Figura 55. Análisis de descarga del elevador.	99
Figura 56. Banda transportadora.	113
Figura 57. Partes de la banda transportadora.	113
Figura 58. Tensiones en el tambor motriz.....	132
Figura 59. Factor de fricción μ	133
Figura 60. Sistema de tensado de la banda.	136
Figura 61. Sistema limpieza de la banda.	136
Figura 62. Rodillos superiores.	137
Figura 63. Renderizado banda transportadora, importado desde Solidworks.	143
Figura 64. Renderizado Tambor Motriz, banda transportadora, importado desde Solidworks.....	143
Figura 65. Renderizado, Base polines y polín. Banda transportadora, importado desde Solidworks.....	144
Figura 66. Renderizado, Base polines y polín. Banda transportadora, importado desde Solidworks.....	144
Figura 67. Esquema inicial de distribución del ducto principal y equipos.....	145
Figura 68. Partes principales del filtro de mangas.	147
Figura 69. Volumen de control del recinto.	148
Figura 70. Factor de temperatura.	152
Figura 71. Factor de contenido de polvo.....	153
Figura 72. Esquema del diseño final de los ductos de captación.	161
Figura 73. Perdida de carga en tubería de lámina galvanizada.....	163
Figura 74. Selección del ventilador.....	167
Figura 75. Ventilador centrifugo. Renderizado e importado desde Solidworks. ...	168
Figura 76. Campanas de extracción. Renderizado e importado desde Solidworks.	169
Figura 77. Sistema colector de polvo. Renderizado e importado desde Solidworks.	169

Figura 78. Mesas de soporte. Renderizado e importado desde Solidworks.	170
Figura 79. Mesa de soporte. Renderizado e importado desde Solidworks.	170
Figura 80. Equipos ráfaga.....	171
Figura 81. Campanas de extracción y ducto hacia el filtro de mangas.	172
Figura 82. Ventiladores axiales.....	173
Figura 83. Banda trasportadora.	174
Figura 84. Elevador de cangilones. Renderizado e importado desde Solidworks.	175
Figura 85. Cuarto de Sandblasting, Vista perspectiva. Importado y Renderizado desde Solidworks.....	176
Figura 86. Cuarto de Sandblasting, Superior. Importado y Renderizado desde Solidworks.....	176
Figura 87. Perfil de anclaje.	182

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Emisiones atmosféricas y/o ruido.	25
Tabla 2. Dureza de algunos materiales abrasivos.	40
Tabla 3. Calificación de la alternativa.	77
Tabla 4. Alternativa del diseño de la cabina.	78
Tabla 5. Alternativa del diseño del piso.	78
Tabla 6. Alternativa del diseño del sistema de recuperación del abrasivo.	79
Tabla 7. Alternativa de diseño del sistema de presión, limpieza y filtrado	79
Tabla 8. Parámetros de diseño.	86
Tabla 9. Angulo de reposo.	87
Tabla 10. Propiedades de la arena y la granalla.	87
Tabla 11. Códigos de selección catalogo Martin.	88
Tabla 12. Clasificación de materiales para elevadores de cangilón y códigos recomendados de elevador.	90
Tabla 13. Selección del modelo de cangilón,	91
Tabla 14. Resumen de Características del elevador seleccionado.	92
Tabla 15. Resumen de Características del elevador seleccionado.	92
Tabla 16. Consumo de potencia sugerido.	92
Tabla 17. Dimensiones del elevador.	94
Tabla 18. Dimensiones del cangilón	97
Tabla 19. Numero de pernos y tamaño del perno de fijación a la banda.	97
Tabla 20. Calculo de la velocidad mínima para descarga centrifuga.	101
Tabla 21. Relación entre el número de lonas y el diámetro del tambor.	105
Tabla 22. Numero de lonas como función del ancho de banda	106
Tabla 23. Valores admisibles por lona, para la banda de transporte.	109
Tabla 24. Factor de fricción.	118
Tabla 25. Capacidad de transporte.	120
Tabla 26. Velocidades estándar recomendadas.	122

Tabla 27. Valores guía para la masa de los componentes del polín giratorio.	123
Tabla 28. Área relativa de la correa con cubierta tipo $mGGKgm^2$	127
Tabla 29. Factor de corrección por longitud.....	128
Tabla 30. Resultados obtenidos.....	131
Tabla 31. Factor de fricción μ	133
Tabla 32. Valores admisibles de esfuerzo a la tracción para bandas.	135
Tabla 33. Capacidades máximas para los rodillos en bina.	137
Tabla 34. Tipo de banda.	138
Tabla 35. Espesor de la carcasa de la banda.....	139
Tabla 36. Diámetros estandarizados.	139
Tabla 37. Factor de corrección de longitud.....	140
Tabla 38. Selección del motor estandarizado en [KW].	142
Tabla 39. Tabla de selección del separador de mangas.....	149
Tabla 40. Materiales para construcción de los filtros de mangas.....	150
Tabla 41. Factor de material.	151
Tabla 42. Factor de uso.	152
Tabla 43. Factor de tamaño de partículas.	153
Tabla 44. Rango de velocidades admisibles de captación.	155
Tabla 45. Dimensiones recomendadas para la campana de extracción.....	156
Tabla 46. Velocidad recomendada para el diseño de conductos.....	159
Tabla 47. Lista de coeficientes de pérdida y pérdidas por accesorio.....	164
Tabla 48. Características del trayecto crítico y pérdida de carga.....	165
Tabla 49. Curva tabulada del sistema.....	168
Tabla 50. Costo estimado de inversión.....	179
Tabla 51. Periodo de recuperación del dinero bajo suposiciones óptimas.	179
Tabla 52. Perfiles de anclaje recomendados.	182
Tabla 53. Selección de la boquilla.	184

LISTA DE DIAGRAMAS

	Pág.
Diagrama 1. Requerimientos y parámetros de la empresa.....	55
Diagrama 2. Alternativas del cuarto de trabajo.....	57
Diagrama 3. Alternativas de diseño del piso.....	60
Diagrama 4. Tipos de elevadores de cangilón.....	83
Diagrama 5. Disposición de los rodillos.....	111
Diagrama 6. Clasificación de las bandas transportadoras.....	112

LISTA DE ANEXOS.

ANEXO A. DETERMINACIÓN DE LA ARENA REQUERIDA	190
ANEXO B. DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE BANDA TRANSPORTADORA	192
ANEXO C. PLANOS GENERALES	196
ANEXO D.MODELO	201

RESUMEN

TITULO:

DISEÑO DE UN CUARTO DE GRANALLADO Y SANDBLASTING PARA LA EMPRESA INDUSTRIAL TK ASME API INGENIERÍA EU*.

AUTOR:

DANIEL EDUARDO FORERO FLORIAN**

PALABRAS CLAVE:

Sandblasting, Granallado, Abrasivo, Rugosidad. Recubrimiento.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo de grado se diseña un cuarto de granallado y Sandblasting, para realizar tratamientos superficiales mediante el impacto de partículas abrasivas a una superficie metálica, que presente leves y hasta altos signos de corrosión, desde el grado A hasta el grado D, según la norma ISO 8501-1: 2007, y que requiera una rugosidad o perfil de anclaje adecuado, como paso preparatorio al recubrimiento por pintura.

Con el desarrollo de este trabajo de grado se pretende mostrar un diseño que evite la contaminación producida por los métodos convencionales de Sandblasting realizados en áreas abiertas. Se postulara el diseño de un cuarto, donde se controlara la recuperación y eliminación del abrasivo, mediante un conjunto de equipos diseñados y seleccionados para cumplir los requisitos exigidos por la empresa interesada, la selección de equipos se realizara mediante la determinación de la carga máxima o capacidad de transporte de abrasivo, haciendo una investigación y análisis de los rendimientos involucrados en el proceso, los cuales son: el consumo de abrasivo por metro cuadrado y la cantidad de superficie que se limpia en una jornada de trabajo.

Mediante la implementación de un software de soporte CAD, se dimensionaron y ubicaron los equipos seleccionados y se logró realizar un ensamble del conjunto total, para lograr una aproximación espacial del diseño final.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director: M.Sc. Javier Rúgeles Pérez.

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN A ROOM OF SHOTBLASTING AND SADBASTING FOR THE COMPANY TK ASME API INGENIERIA EU*.

AUTHOR:

DANIEL EDUARDO FORERO FLORIAN**

KEYWORDS:

Sandblasting, Shot blasting, Abrasive, Roughness, Coating, CAD, Solidworks.

DESCRIPTION:

In this paper grade is designed a fourth Shot blasting and Sandblasting for the surface treatment, by impact of abrasive particles to a metal surface that shows high degree of corrosion in the surface from grade A to grade D, according to standard ISO 8501-1:2007, that require a suitable roughness or the appropriate anchor profile, as a preparatory step to the painting coating.

With the development of this grade work, it'll show a design to prevent pollution from the conventional sandblasting methods conducted in open areas. It will postulate the design of a room, where they'll controlled the abrasive recovery and disposal of the material, through of a set of equipment designed and selected to meet the requirements of the undertaking concerned, the equipment selection will be made by determining the maximum load carrying or transport capacity of abrasive, through a research and analysis of the yields involved in the process, which are: the consumption of abrasive per square meter and the amount of surface cleaned in a day's work.

By implementing CAD software of support, in the following project it used Solidworks; it has dimensioned the selected equipment, making the set assembly to achieve a final design space approach.

* Thesis work.

** Physical-Mechanical Sciences. School of Mechanical Engineering. Director: M.Sc. Javier Rúgeles Pérez.

INTRODUCCION

Los procesos industriales requieren de técnicas y diseño de sistemas que eviten la contaminación ambiental, el tratamiento de superficies por chorro abrasivo requiere en especial atención un buen manejo y control de los flujos de aire que serán expulsados al ambiente evitando que la arena sílice fragmentada sea expulsada o contamine a los operarios que realizan esta actividad.

El objetivo del presente proyecto es diseñar un cuarto de granallado y Sandblasting basado en los requerimientos y necesidades de la empresa interesada minimizando el impacto ambiental del proceso.

En el primer capítulo se describen los aspectos generales de la empresa, las características principales de producción y servicios ofrecidos por la misma, se describe la necesidad planteada y la justificación de la solución, además se establece el alcance del proyecto mediante los objetivos propuestos del proyecto.

En el segundo capítulo se expone el marco teórico del proyecto mediante la investigación realizada sobre corrosión y el estudio del desgaste erosivo generado por el impacto de partículas abrasivas sobre superficies metálicas, esta etapa introductoria conceptual se realiza para identificar los mecanismos de desgaste erosivo y comprender el proceso de Sandblasting, como técnica de adecuación de superficies, una vez comprendidos los parámetros teóricos se habla del método de limpieza estándar de superficies.

En el tercer capítulo se inicia la etapa de diseño conceptual, se establecen los requerimientos y parámetros de la empresa para iniciar la selección de quipos, se identifican los principales subsistemas, se plantean las alternativas por subsistema y mediante un análisis cualitativo se selecciona la mejor alternativa para cada subconjunto, finalmente se unen las alternativas y se forma en conjunto la alternativa de diseño del cuarto de Sandblasting.

En el cuarto capítulo se inicia la etapa de diseño y selección de equipos, iniciando con la selección del elevador de cangilones, corroborando los datos del catálogo con un análisis teórico, luego se diseña la banda transportadora, finalmente se diseña el sistema colector de polvo, diseñando los ductos y seleccionando el ventilador centrifugo.

En el quinto capítulo se explica el funcionamiento del cuarto diseñado usando como representación gráfica los renderizados importados desde Solidworks, haciendo una descripción básica del proceso.

En el sexto capítulo se hace el análisis de inversión, mediante el estimativo de los costos totales de inversión para la empresa interesada.

Por ultimo en el capítulo séptimo se hacen algunas conclusiones del diseño final, esto para aclarar cualquier incertidumbre y lección aprendida respecto de las decisiones asumidas por el diseñador.

1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

La empresa industrial **TK ASME API INGENIERÍA EU.** Ubicada Zona Industrial Km 2 Vía Chimita Cr 0 # 3-57, Santander. Es una empresa del sector metalmeccánico especializada en la Fabricación de tanques de transporte de GLP (Gas licuado de petróleo), depósitos de agua y recipientes de metal excepto los utilizados para embalaje. Líder en la solución de problemas ingenieriles para los sectores petrolero, agroindustrial y transporte pesado, ver figura 1.

Los servicios que ofrece son:

- Fabricación de tanques de transporte de gas licuado de petróleo, depósitos y recipientes de presión.
- Fabricación e instalación de estructuras metálicas en general.
- Ensamble y soldadura.
- Sandblasting.

Figura 1 Planta TK ASME API INGENIERÍA EU.



Fuente: Autor. Tomada en las instalaciones de la empresa.

Colombia, abriéndose campo dentro del periodo de globalización industrial que se vive actualmente, busca consolidar en sus labores industriales los niveles de excelencia requeridos por las normativas internacionales. Las directrices de esta política empiezan a verse reflejadas en los procesos de manufactura y adecuación de la infraestructura petrolera nacional, como búsquedas de un mejoramiento continuo en el manejo de tratamientos superficiales para recuperación y adecuación de poliductos, gasoductos y estructuras metálicas.

En este contexto, la introducción del proceso de GRANALLADO y la optimización del método de limpieza por SANDBLASTING en el sector productivo nacional y liderado bajo las políticas misionales de la empresa TK ASME API INGENIERÍA EU. Será sinónimo de los avances tecnológicos y el mejoramiento de las técnicas industriales en los métodos de limpieza por chorro abrasivo bajo consideraciones amigables con el medio ambiente, ya que este medio de limpieza de superficies genera bajos niveles de polución a diferencia de los métodos usados actualmente como la limpieza por chorro de arena sin sistema recuperador.

Dada la demanda de trabajos de SANDBLASTING, limpieza por arenado de tuberías y estructuras metálicas en general, y debido a su alto impacto ambiental, la empresa TK ASME API INGENIERÍA EU. Busca consolidarse en el ámbito industrial como una de las primeras empresas que optimizara el saneamiento de superficies con chorro de arena, mediante el diseño de un sistema de limpieza con granalla de acero o arena sílice con un sistema recuperador, en exploración de autonomía para ofrecer este servicio como complemento adicional de las labores ya mencionadas, se prevé el potencial económico que acarrea la postulación del equipo, como nueva técnica de limpieza por chorro de micro esferas de abrasivo, ya que se aumentarían significativamente los ingresos económicos y servicios ofrecidos de la empresa y se bonificaría que se podrá realizar un trabajo de mínimo impacto ambiental.

TK ASME API INGENIERIA nace legalmente constituida el 18 de Mayo de 1998, el objeto social de la empresa es: “Fabricación, mantenimiento, reparación e inspección de tanques atmosféricos, tanques y recipientes a presión, estructuras metálicas y todo lo relacionado con la industria metalmeccánica”

En la actualidad se fabrican tanques de diferentes capacidades para almacenamiento y transporte de diferentes elementos como gas, combustible, gasolina, ACPM, etc., se prestan los servicios de Sandblasting, prueba hidrostática, medición de espesores, reparación y mantenimiento de tanques, y líneas de tubería.

En el año 2007 la empresa implementó un sistema de gestión de la calidad basado en la norma ISO 9001:2000 y obtuvo su certificado, así asegurándose que todo se encaminaba hacia la mejora continua. Este sistema de gestión de la calidad fue actualizado en el año 2009 a su versión ISO 9001:2008 continuando así ofreciendo a sus clientes productos de excelente calidad.

1.2 JUSTIFICACION DEL PROYECTO

Con el fin de consolidar los servicios ofrecidos por la empresa, en términos de limpieza por chorro abrasivo de sistemas estructurales, tanques de transporte de GLP, depósitos y estructuras metálicas en general, se replanteara el método actual de limpieza por chorro de arena mediante la postulación de un modelo de limpieza de bajo impacto ambiental con el uso de micro esferas de arena sílice con un sistema recuperador, o en su defecto un sistema que pueda trabajar con micro esferas de acero como segunda opción de partícula abrasiva, introduciendo en el diseño un sistema de recolección del abrasivo que deba desecharse, y purificación del aire expulsado al medio ambiente .

Debido a que en nuestro país se han venido promulgando diversos decretos y normas en miras del cuidado y protección ambiental y sanitaria; para la realización

de este proyecto se tendrá como base la legislación ambiental vigente expuesta en la tabla 1.

Tabla 1. Emisiones atmosféricas y/o ruido.

Instrumento legal	Cuerpos/ ministerios responsables	Categorías de uso	Objetivos de la legislación
Decreto 948/95	Ministerio del medio ambiente, vivienda y desarrollo territorial.	Prevención y control de la contaminación atmosférica protección de la calidad del aire.	Se prohíbe la incineración o quemas de sustancias residuos o desechos tóxicos peligrosos. Incineración de los residuos patológicos e industriales control a emisiones de ruido.
Decreto 2811/74	Ministerio del medio ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Código nacional de recursos naturales renovables y protección al medio ambiente.	Se prohibirá, restringirá o condicionara la descarga a la atmósfera de polvo, vapores, gases humos, emanaciones de sustancias, que puedan hacer daño a la salud humana.

Fuente: Plan de gestión integral de residuos sólidos industriales.TK ASME API.

Por las razones expuestas, surge la necesidad de diseñar un cuarto de GRANALLADO y SANDBLASTING con sistema recuperador, como propuesta para la solución de los conflictos ambientales generados por la arena sílice al fragmentarse en el momento de impacto con la superficie de trabajo, además de los posibles problemas de salud que se generan en el operario, como la silicosis, que es una enfermedad que afecta directamente las vías respiratorias. Es por esta razón que el diseño de un CUARTO DE GRANALLADO y SANDBLSATING adecuado principalmente para ductos de Tubería de aproximadamente 66 pulgadas de diámetro y longitudes de hasta 40 pies, vigas metálicas, tanques, depósitos y piezas en general que requieran este tratamiento será un salto en el margen de soluciones ingenieriles de industrias TK ASME API INGENIERÍA EU bajo un marco de procesos amigables con el medio ambiente.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivo general

Consolidar las relaciones Teórico-Prácticas entre el sector industrial colombiano con la empresa TK ASME API INGENIERÍA EU. y la Universidad Industrial de Santander mediante el diseño de una cuarto de granallado, ratificando el objetivo misional de la universidad de formar personas de alta calidad ética y profesional capaces de enfrentar y solucionar problemas del ámbito ingenieril enfocado al sector Industrial.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar un cuarto de Granallado y Sandblasting para implementar tratamientos por chorro abrasivo mediante el impacto de micro esferas abrasivas en la limpieza de tubería de acero de aproximadamente 66 [in] de diámetro nominal y longitudes mayores o iguales a *Double Random Lengths* (longitudes mayores o iguales a los 38-40 pies) según la nomenclatura de las

ANSI/ASME, pulido de vigas, cerchas, piezas de acero estructural en general depósitos y tanques de hasta 26000 [Gal] especialmente para almacenamiento de agua o gas licuado de petróleo, cabinas o contenedores de 40 [ft] de longitud, que se acomoden a un espacio de trabajo interior, inferior a 175 [m²] y que requieran eliminación de corrosión, limpieza superficial, rugosidad y perfil de anclaje adecuado precedido del acabado final de pintura o recubrimiento¹ especial.

El diseño se enfocará principalmente a la selección adecuada de equipos mediante la identificación de los principales subsistemas, bajo la perspectiva de la alternativa más óptima y que se acomode a las especificaciones de producción y a los parámetros citados por la empresa TK ASME API INGENIERÍA EU. Los cuales se indican a continuación:

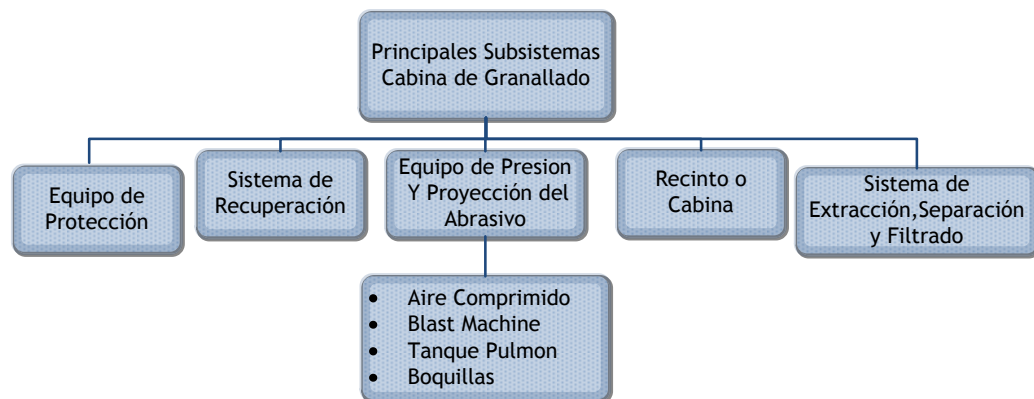
- volumen interno de aproximadamente 700 [m³].
 - Área total del piso 175 [m²].
 - Rendimiento de limpieza mínimo de 50 [m²/h]
 - Se tienen cuatro compresores diésel de 260 [CFM] y presión máxima de 120[Psi].
- Realizar un estudio basado en la información recopilada de la erosión en superficies dúctiles y frágiles de tal forma que se pueda obtener un punto de partida en el que se establezcan velocidades, presiones, ángulos de incidencia y distancias óptimas para obtener los perfiles de anclaje necesarios como paso preparativo al acabado por pintura o recubrimiento anticorrosivo.

¹Recubrimiento: Tratamiento realizados para mejorar algunas propiedades o cualidades de la superficie de la pieza de trabajo, tales como aspecto, adhesión, características de mojado, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste.

➤ Diseñar o seleccionar los principales subsistemas que componen la cabina de Granallado, ver figura 2. los cuales pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Sistemas de recuperación del abrasivo.
- Recinto o Cabina.
- Sistema de proyección del abrasivo.
- Extracción, Separación y Filtrado del polvo abrasivo.
- Equipo de protección.

Figura 2. Principales subsistemas cabina de granallado.



➤ Realizar los planos de la cabina de granallado resultado de la alternativa seleccionada como la mejor opción de diseño, mediante un sistema CAD que por sugerencia de la empresa TK ASME API INGENIERÍA EU. deberá ser SolidWorks 2010.

➤ Realizar un análisis de inversión mediante Microsoft Excel para la alternativa propuesta en la que se establezcan criterios de comparación según la relación beneficio/costo.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Mediante el diseño de un cuarto de Granallado Y Sandblasting para la industria TK ASME API INGENIERÍA EU, se pretende ofrecer un servicio más óptimo y de menor impacto ambiental en la limpieza de tuberías, vigas, cerchas, tanques, depósitos, y piezas metálicas en general, mediante el impacto de chorro abrasivo de micro esferas. Se busca, por tanto, un aumento de servicios ofrecidos bajo políticas de calidad, conservación del medio ambiente y un entorno de trabajo amigable para el operario. El enfoque será tal que el sistema en su conjunto sea altamente eficiente, de bajo consumo energético y que cumpla con las expectativas de producción de la empresa interesada.

Los cuartos de Granallado y Sandblasting son la mejor opción en la aplicación del proceso para elementos de gran tamaño y altos niveles de producción. Con la implementación de la cabina se ambiciona lograr una producción de alto rendimiento, que supla las necesidades de demanda de la empresa, se disminuyan los costos de mantenimiento y se alcancen los horizontes de competitividad y flexibilidad de TK ASME API INGENIERÍA EU, en un entorno altamente cambiante en cuanto a tecnología y servicios ofrecidos se refiere.

2. MARCO TEORICO

2.1. ESTUDIO DE LA CORROSIÓN

Termodinámicamente la corrosión es un proceso inevitable, por esta razón prevenir y controlar los daños generados por este proceso será un plan seguro en términos de costos de mantenimiento correctivo de superficies vulnerables, o costos de adecuación de superficies metálicas.

Comprender los conceptos básicos de la corrosión en las superficies metálicas permite esclarecer los procedimientos requeridos para la preparación adecuada de la pieza de trabajo, la cual puede consistir en erradicar la cascarilla de óxido generada por las condiciones de almacenamiento y/u operación en condiciones de alto riesgo de corrosión debidos a factores inherentes al medio ambiente o parámetros de operación.

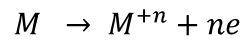
2.1.1 Concepto de corrosión

Se puede definir como la destrucción o deterioración de un material por su reacción con su medio ambiente, tales reacciones pueden tener diferente naturaleza, la degradación de los metales por acción química o electroquímica en el cual se retiran átomos del metal como resultado de un flujo eléctrico producido recibe el nombre de corrosión. La principal causa de la corrosión es la inestabilidad de los metales en sus formas refinadas ya que tienden a volver a sus estados naturales a través del proceso corrosivo. La mayoría de los metales se corroen cuando se exponen al aire o al agua.

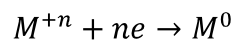
En términos electroquímicos la corrosión es la pérdida de electrones en la última capa de valencia, un ejemplo de esto es la corrosión del acero cuando tiene dos fases: ferrita y cementita, la ferrita actúa como ánodo y pierde electrones, oxidación, y en la cementita se consumen estos electrones, reducción.

La oxidación produce electrones, los cuales se consumen en la reducción, durante la corrosión metálica, la velocidad de oxidación (corrosión) es siempre igual a la velocidad de reducción.

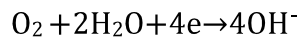
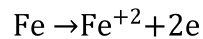
En términos generales se tiene que la reacción anódica tiene la forma:



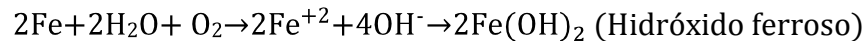
La reducción catódica tiene la forma:



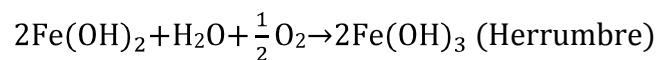
La reacción del hierro en una atmosfera húmeda será:



La reacción total será:



En una zona húmeda y con grandes corrientes de aire el óxido ferroso se precipita y se oxida hasta generar la herrumbre según la reacción:



Si bien la termodinámica no proporciona información de la cinética de la reacción se debe tener en cuenta que existen ciertos efectos del medio corrosivo que influyen en la velocidad de la reacción como:

- Efecto del oxígeno y de los oxidantes.
- Efecto del flujo del medio corrosivo.
- Efecto de la temperatura.
- Efecto de la concentración del medio corrosivo.

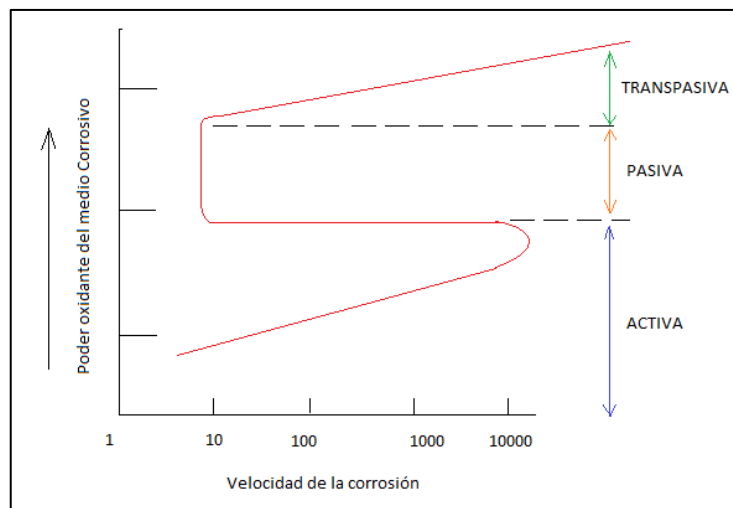
Por tanto la velocidad de una reacción electroquímica, está limitada por factores químicos y físicos, el retraso de una reacción se denomina polarización.

2.1.2 Pasividad

La pasividad es la pérdida de reactividad química que experimentan algunos metales en ciertos medios específicos. La figura 3, muestra el comportamiento característico de un metal pasivo-activo, en la zona activa, la corrosión aumenta exponencialmente con el aumento del poder oxidante cuando se llega a un nivel característico de poder oxidante del medio, la velocidad de corrosión se reduce bruscamente, en esta zona el metal se vuelve pasivo, un aumento excesivo del poder oxidante del medio reactiva la corrosión, en esta zona el metal es transpasivo.

Ejemplos de este comportamiento son los metales como el Ni, Si, Cr, Ti, Fe y sus aleaciones.

Figura 3. Poder oxidante del medio corrosivo.

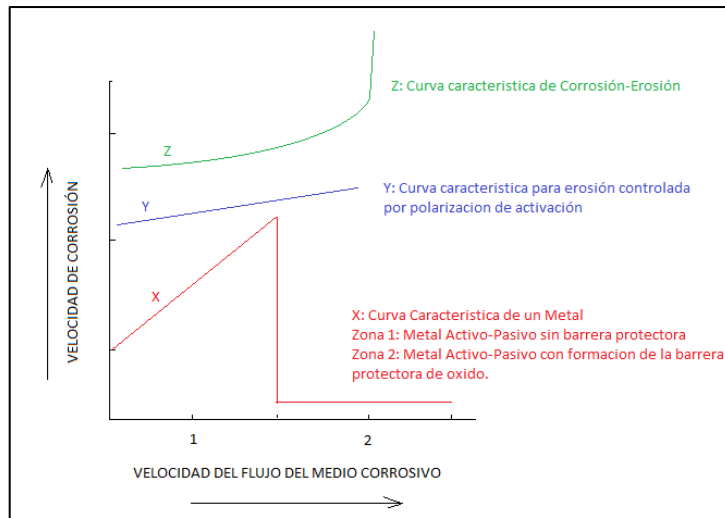


Fuente: BOTIA, José Salomón. Ingeniería de corrosión. En: Principios de corrosión.

2.1.3 Efecto del flujo del medio corrosivo

Cuando la velocidad del flujo del medio corrosivo aumentan y la polarización esta comandada por la difusión catódica (Polarización catódica de concentración), aumentara la velocidad de la corrosión, esto ocurre cuando un oxidante está presente en baja concentración, ver figura 4.

Figura 4. Velocidad de corrosión.

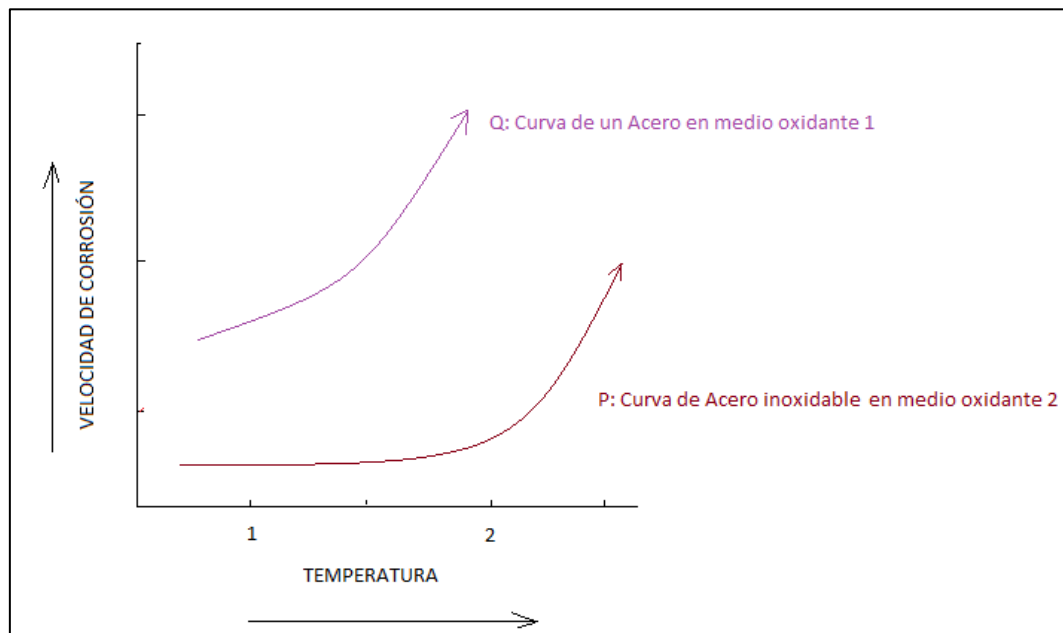


Fuente: BOTIA, José Salomón. Ingeniería de corrosión. En: Principios de corrosión.

2.1.4 Efecto de la temperatura

En términos prácticos, la temperatura aumentara la velocidad de todas las reacciones químicas, en la figura 5, se observa el crecimiento exponencial de la velocidad de la corrosión con el aumento de la temperatura.

Figura 5. Velocidad de corrosión como función de la temperatura.



Fuente: BOTIA, José Salomón. Ingeniería de corrosión. En: Principios de corrosión.

Una vez comprendidas las reacciones anódicas y catódicas que ocurren durante el fenómeno de corrosión y que estas dependen la una de la otra se concluye que será posible disminuir la corrosión reduciendo una de las dos reacciones, en el caso objeto de estudio se pretende adecuar la superficie metálica para asegurar la adherencia de la pintura que actuara como un inhibidor, dando el perfil de anclaje y rugosidad específica de la superficie para luego recubrir la superficie, el objetivo de pintar la superficie es el de disminuir la velocidad de reacción tanto anódica como catódica, los inhibidores de corrosión interfieren con una de las reacciones parciales y reduce la corrosión.

2.2 ESTUDIO DE EROSION GENERADO POR EL IMPACTO DE CHORRO ABRASIVO EN UNA SUPERFICIE

Para comprender los efectos y parámetros involucrados en el proceso de limpieza y adecuación de las superficies de trabajo se hablara de los conceptos relacionados a la dependencia del impacto de la partícula erosiva en el material de trabajo, su forma, tamaño, velocidad de impacto, presión y flujo de aire.

2.2.1 Desgaste erosivo.

El estudio del desgaste erosivo se puede plantear desde dos puntos de vista, uno en el que se desea controlar y evitar los fenómenos de desgaste que puedan afectar elementos de máquinas de la industria minera, alimenticia, turbinas hidráulicas, sistemas de bombeo, industria petrolera, entre otros, y el favorable para nuestro caso, la forma en que se puede estudiar y aplicar los conceptos del desgaste erosivo para la limpieza de superficies, por tanto, se deben reconocer los mecanismos de remoción del material durante el desgaste erosivo identificando las variables involucradas y parámetros específicos.

Debe tenerse principal cuidado cuando el medio de trabajo presenta altos grados de humedad, ya que puede generarse un proceso sinérgico entre el proceso de erosión y la corrosión. En el estudio previo de corrosión la definimos como uno de los fenómenos que deteriora un material, en nuestro caso una superficie metálica, por la acción electroquímica asociada al medio ambiente, la acción combinada de estos dos procesos, resulta en una degradación acelerada e irreparable del material de trabajo.

El principal objetivo de todos los estudios realizados hasta la fecha se centran más en el mecanismo de remoción de material, que en el estudio del flujo de fluidos, resulta la forma más práctica de llegar a una solución básica y que modele el comportamiento de remoción.

Estudios sobresalientes de Finnie² en 1962, proporcionaron un modelo en el que se analizaban variables como la velocidad de la partícula en el impacto, dureza y forma de la partícula, resistencia mecánica de la superficie y el ángulo incidente de impacto, los principales mecanismos de desgaste encontrados fueron la deformación plástica y el microcorte del material de prueba. Con el transcurso del tiempo modelos mejorados involucraban variables como la capacidad de deformación del material, rugosidad superficial, rotación de las partículas en el impacto, endurecimiento por deformación del material de trabajo como también los procesos secundarios de corte debido a la posible fragmentación de las partículas erosivas.

Otro investigador conocido como Bitter, y basado en los estudios anteriores explico como el endurecimiento por deformación de la superficie disminuye la capacidad de deformación plástica, para dar paso a la fractura frágil, también explico como la fractura del abrasivo y movimiento tangencial de los fragmentos generan microcorte en la superficie del material.

2.2.2 Erosión

Erosión, es el mecanismo de desgaste gradual de una superficie, esta depende fuertemente de las propiedades de la estructura de los materiales erosionados, las condiciones del medio, las propiedades físicas y químicas de la partícula erosiva.

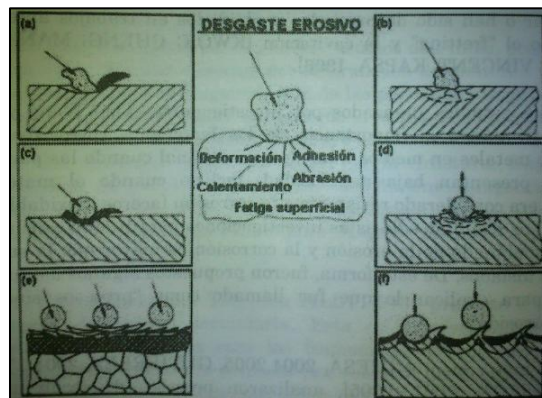
La erosión por partículas sólidas es un fenómeno de gran utilidad en algunas aplicaciones para la limpieza de superficies, maquinados, decoración, y en los últimos años se usa para micro-maquinado.

²Fuente: MESA, Darío Hernán. Principios de tribología con énfasis en desgaste. En: Tribología de la erosión. pág. 177.

2.2.3 Desgaste erosivo por partículas sólidas

EL desgaste es debido al impacto de partículas sólidas sobre una superficie la figura 6 muestra los efectos de la erosión. Las partículas pueden ser conducidas por un gas o un líquido, este tipo de desgaste se conoce como erosión. La naturaleza del impacto permite involucrar diferentes fuerzas en el contacto de la partícula con la superficie como se ve en la figura 7, es necesario aclarar que las partículas vecinas generan fuerzas de contacto y el flujo de fluido genera un efecto conocido como arrastre.

Figura 6. Diferentes efectos producidos por las partículas erosivas.

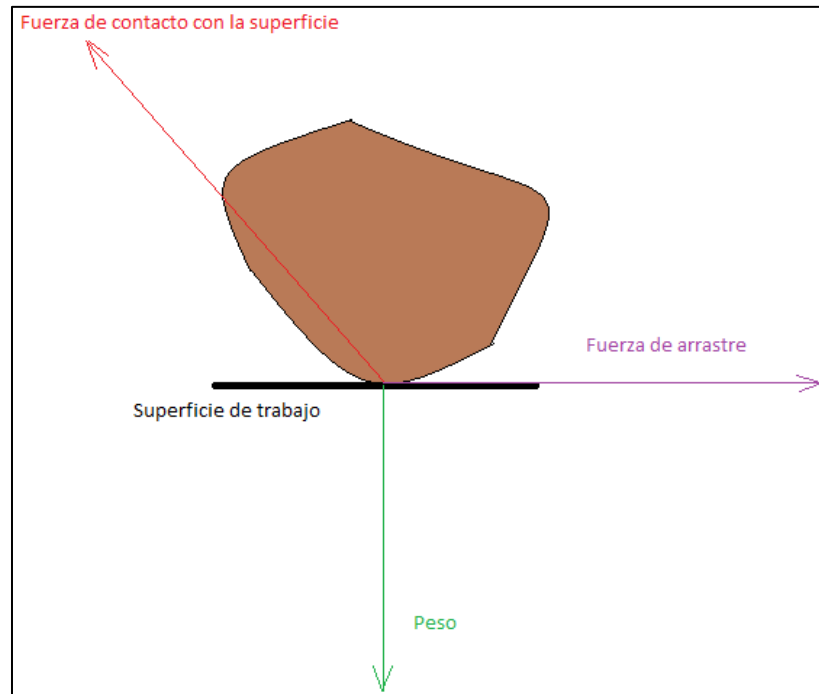


Fuente: MESA, Darío Hernán. Principios de tribología con énfasis en desgaste.
Tribología de la erosión. pág. 180.

En la figura 6 podemos apreciar:

- a) *Microcorte y micro – arado*
- b) *Agrietado superficial*
- c) *Desplazamiento del material al borde de los cráteres de impacto*
- d) *Grietas por fatiga superficial, causadas por múltiples impactos*
- e) *Formación de hojuelas debido a la extrusión y el forjado de los impactos*
- f) *Formación de hojuelas por procesos de extrusión inversos.*

Figura 7. Interacción de la partícula incidente y el material de trabajo



Fuente: TREVIÑO, Álvaro Manuel. Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión.

2.2.4 Propiedades de la partícula

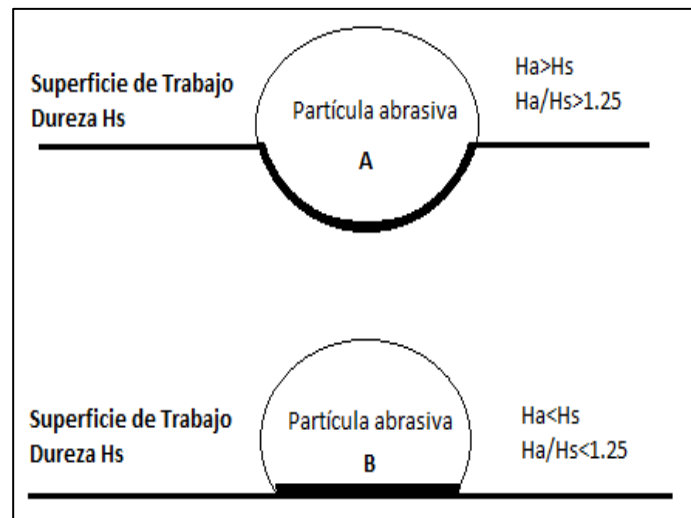
2.2.4.1 Dureza del abrasivo

La dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes; También puede definirse como la cantidad de energía que absorbe un material ante un esfuerzo antes de romperse o deformarse, es una de las propiedades más importantes a la hora de seleccionar el abrasivo, ya que está relacionado directamente con la cantidad de desgaste obtenido. Intuitivamente partículas con mayor dureza que la superficie de trabajo causara mayor desgaste.

Este comportamiento se puede comprender si se analiza la mecánica de contacto entre la partícula y la superficie, cuando la superficie del material fluye plásticamente, es debido a que la partícula de impacto puede mantener la presión de contacto sin llegar a deformarse o fracturarse.

La figura 8 muestra la relación de dureza entre la superficie de trabajo H_s y la partícula de impacto H_a , para partículas esféricas se espera que ocurra la indentación plástica cuando la dureza de la partícula sea 1.25 veces la de la superficie de trabajo.

Figura 8. Relación de dureza para causar indentación plástica.



Fuente: TREVIÑO, Álvaro Manuel. Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión.

La tabla 2 muestra la dureza de algunos materiales, los aceros martensíticos llegan a tener durezas menores a 1.25 veces la dureza de una partícula de arena sílice, por tal motivo los aceros y metales no ferrosos serán vulnerables al desgaste erosivo por partículas de arena silíceas.

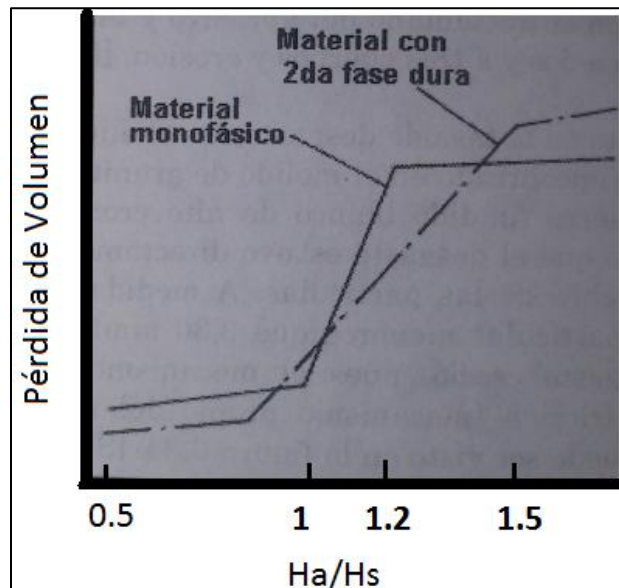
Tabla 2. Dureza de algunos materiales abrasivos.

Materiales abrasivos	Dureza Hv (Vickers)
Diamante	6000-10000
Alúmina	1800-2000
Arena sílice	750-1200
Magnetita Fe ₃ O ₄	370-600
Fluorita CaF ₂	180-90
Fases o constituyentes del acero y fundiciones	Dureza Hv
Ferrita, α -Fe	70-200
Perlita	250-320
Perlita aleada	300-460
Austenita al 12% Mn	170-230
Austenita Baja aleación Austenita Alto % cromo	300-600
Martensita	500-1000
Cementita Fe ₃ C	840-1100

Fuente: Adaptada de TREVIÑO, Álvaro Manuel. Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión.

Existe una relación entre la tasa de desgaste y la razón entre la dureza del abrasivo y la superficie de trabajo, la figura 9, permite observar una transición debido a la variación del mecanismo de desgaste, para el caso de los metales se considera que el micro mecanismo de dominante en la región de desgaste moderado es el de desgaste por micro-fatiga pasando a micro-corte en la región de desgaste severo.

Figura 9. Desgaste como función de la relación de dureza entre partícula y superficie.



Fuente: MESA, Darío Hernán. Principios de tribología con énfasis en desgaste. Pág. 158.

2.2.4.2 Forma y tamaño de la partícula erosiva

Se pueden identificar dos formas características de la granalla el tipo *Shot* o esférico y el tipo *Grit* o angular, el desgaste depende fuertemente de la forma de la partícula, las angulares causaran mayor desgaste. La nomenclatura de las partículas erosivas está definida por la denominación americana SAE J444, la cual

define la letra G que antecede el al diámetro de la partícula medido en diez milésimas de pulgada.

2.2.4.3 Partículas esféricas

El impacto de esferas de acero es el proceso más ampliamente utilizado para la limpieza, decapado y la mejora de una superficie de metal. El grado o tamaño de granalla de acero determinará el acabado final producido en la superficie del metal. La forma de la bola redonda de la granalla de acero produce una superficie limpia, lisa y pulida a través de una acción de martilleo creado por la aceleración de la inyección, la figura 10 muestra los diferentes tamaños del abrasivo.

Figura 10. Comparación de tamaños.

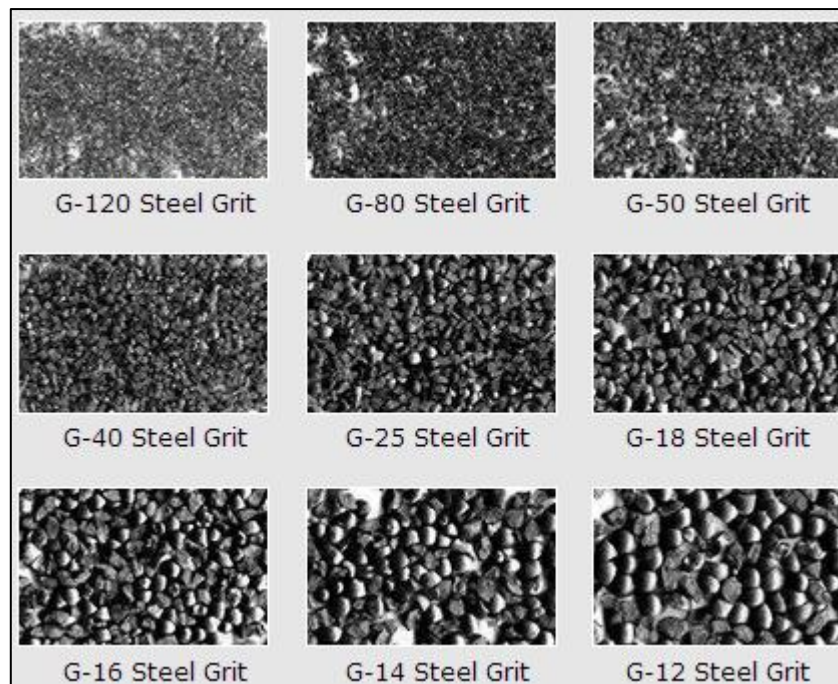


Fuente: <http://www.kramerindustriesonline.com/blasting-media/steel-shot.htm>

2.2.4.4 Partículas angulares

La granalla angular es ideal para aplicaciones de limpieza agresivas. Permite eliminar contaminantes de la superficie de acero y otros metales de fundición. Esta es más suave que el óxido de aluminio y no se fractura con la misma facilidad que lo hace ideal para aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales. La naturaleza angular de granalla de acero produce una superficie grabada sobre metal para una adhesión superior de la pintura, caucho epoxi, esmalte, y otros revestimientos la figura 11 muestra los diferentes tamaños de partícula.

Figura 11. Comparación entre partículas angulares.

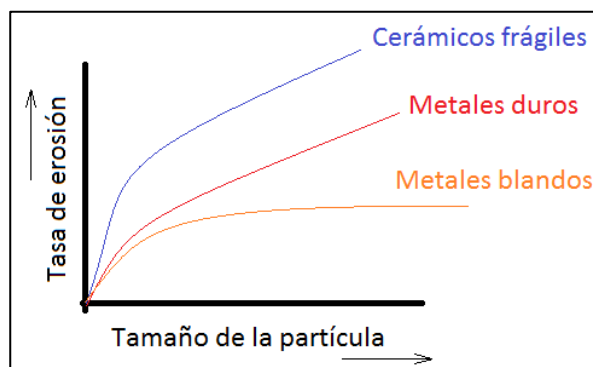


Fuente: <http://www.kramerindustriesonline.com/blasting-media/steel-shot.htm>

2.2.4.5 Tamaño de la partícula en el efecto del mecanismo erosivo.

Existe también dependencia entre el tamaño de las partículas erosivas y la cantidad de remoción de material de la superficie como se muestra en la figura 12. Estudios, han demostrado que conforme aumenta el tamaño de las partículas aumenta también el fenómeno de erosión.

Figura 12. Tamaño de la partícula en el efecto del mecanismo erosivo.

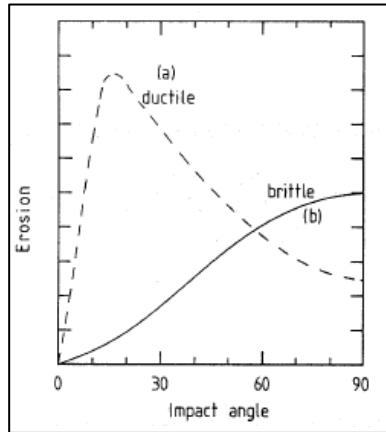


Fuente: MESA, Darío Hernán. Libro de principios de tribología. Pág. 158.

2.2.5 Ángulo de impacto.

El ángulo de impacto es un factor determinante en la cantidad de masa removida de la superficie, la eficiencia de este proceso depende fuertemente del tipo de material que este siendo erosionado, existen pues dos posibilidades inherentes a la propiedad del material, en este caso podemos tener un material frágil y otro dúctil. El ángulo de impacto determina el mecanismo de remoción de materia, la figura 13 indica la tasa de erosión como función del ángulo de impacto.

Figura 13. Erosión como función del ángulo de impacto general.



Fuente: Henk.Fabrication of Microstructures by Powder Blasting. Ph.D. Thesis. University of Twente. The Netherlands. Fig. 2-2 Wensik.

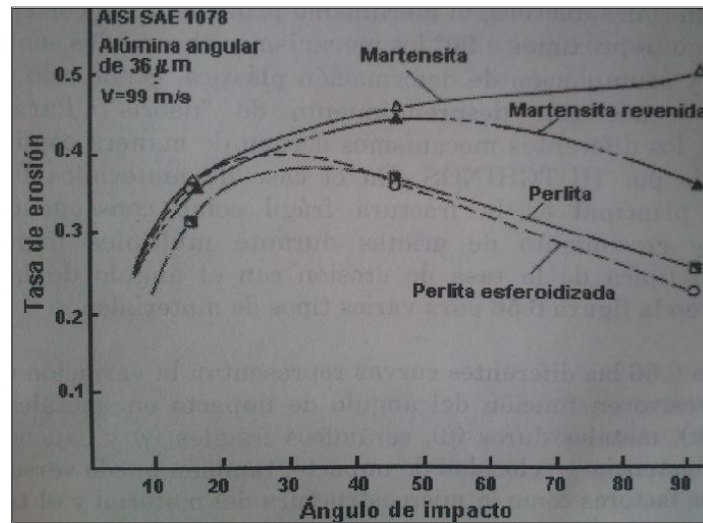
En materiales dúctiles, como los metales, curva (a), para ángulos inferiores a 30° el mecanismo de erosión es el corte mientras que para ángulos próximos a los 90° el mecanismo de remoción de material es el de fatiga de bajos ciclos y acumulación de deformación plástica³. Se generan grietas y el posterior desprendimiento de material por múltiples impactos.

Para materiales frágiles, como el vidrio, silicona y minerales, curva (b), el mecanismo de erosivo es la fractura frágil, debido a la formación de grietas durante múltiples impactos.

³MESA, Darío Hernán. Principios de tribología con énfasis en desgaste. En: Tipos de desgaste, Desgaste erosivo y erosivo-corrosivo. Pereira: Imprenta universidad tecnológica de Pereira, 2007. Pág. 187.

La figura 14 muestra el efecto erosivo para un acero AISI-SAE 1078, se puede observar el cambio del comportamiento del patrón erosivo de dúctil a frágil, cuando las microestructuras son expuestas a la acción erosiva, en este caso de partículas de alúmina de alta angulosidad.

Figura 14. Tasa de erosión en función del ángulo de impacto.



Fuente: MESA, Darío Hernán. Principios de tribología con énfasis en desgaste pág. 188.

La tasa de erosión en un material frágil es función del ángulo de impacto y puede ser modelada con la siguiente relación matemática⁴:

$$E \propto \sin \alpha^K \quad (1)$$

K: Toma valores de entre 2 y 3. ; α : Ángulo de impacto; *E*: Tasa de erosión.

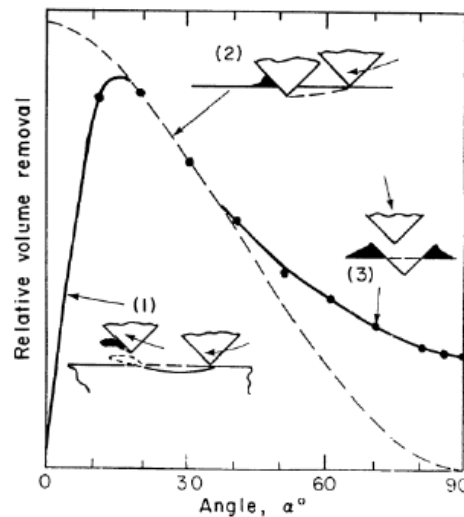
⁴Fuente: Wensik, Henk. Fabrication of Microstructures by Powder Blasting. Eq 2-2 Tesis Wensik.

2.3 EROSIÓN EN MATERIALES DÚCTILES

El mecanismo de erosión dúctil, como en el caso de los metales, es controlado por la deformación plástica. Cuando el material dúctil es impactado, se forman unos pequeños cráteres en su superficie, alrededor de los cuales se forma una proa constituida de material removido.

Después de varios impactos el material es arrancado por las partículas de desgaste. La forma y tamaño de los cráteres formados dependen fuertemente de la velocidad, tamaño y ángulo de impacto de las partículas, la figura 15 muestra el mecanismo de desgaste como función del ángulo de impacto y tamaño del elemento erosivo, la siguiente parte demostrara la influencia de la velocidad.

Figura 15. Dependencia del ángulo de incidencia en materiales dúctiles.



Fuente: Teoría de la erosión. Pág. 45.

Se puede observar que para ángulos muy bajos, menores a 16° el material es controlado por el mecanismo erosivo de microcorte (1), para ángulos entre 16° y 30°, el material es deformado plásticamente, dejando cierta cantidad de material

en su vecindad y frente de la partícula de impacto, debido al modelo de erosión secundaria estas partículas se desprenderán subsecuentemente a mas impactos.

Para ángulos próximos a los 90 ° las partículas controlan una indentación plástica en la zona de impacto, el modelo analítico indicado por la línea discontinua, predice una tasa de erosión cero a este ángulo de impacto, pero los resultados experimentales han demostrado que los primeros impactos a este ángulo de incidencia generaran una deformación plástica y un cambio de la rugosidad de la superficie, lo que generara que los impactos secundarios generen una remoción de material como lo muestra la línea continua.

2.3.1 Velocidad de impacto

Para materiales dúctiles existe una relación entre las tasas de remoción de material y la velocidad de la partícula al momento del impacto de la forma⁵:

$$E \propto v^K(2)$$

K: Toma valores de entre 2 y 3.

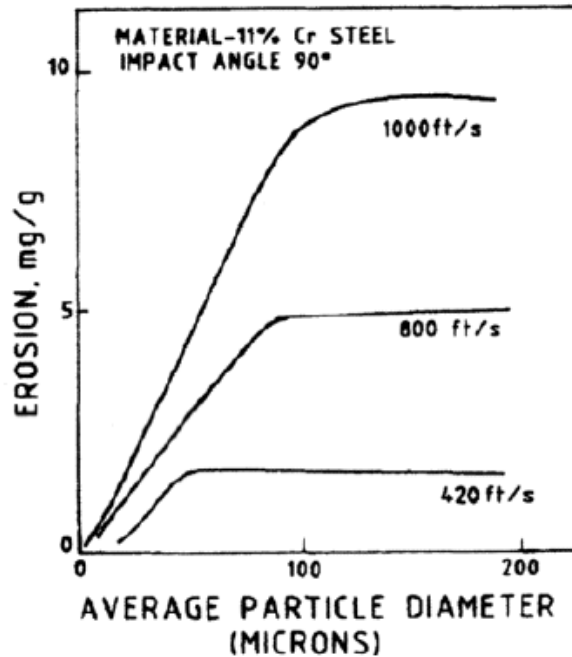
E: Tasa de erosión.

v : Velocidad de la partícula.

La figura 16 muestra la relación entre la erosión como función de la energía cinética de la partícula.

⁵Fuente: Wensik, Henk. Fabrication of Microstructures by Powder Blasting.

Figura 16. Erosión generada como función de la velocidad y el tamaño de las partículas



Fuente: Wensik, Henk. Fabrication of Microstructures by Powder Blasting.

La grafica muestra la tasa de desgaste sobre una superficie como función del tamaño promedio de las partículas, y como función de la velocidad de impacto, como era de esperarse a mayor velocidad de impacto mayor es la tasa de erosión y a mayor tamaño promedio de las partículas aumenta y luego se mantiene aproximadamente constante.

2.4 METODO DE LIMPIEZA DE SUPERFICIES

2.4.1 Clasificación de los grados de corrosión de superficies metálicas.

Los grados⁶ de limpieza de superficies metálicas, están especificadas por la norma ISO 8501-1: 2007, considerando los grados de preparación de la superficie en relación con el estado inicial del acero a pintar. Estas normas se refieren a acero envejecido, pero que nunca ha sido tratado con pintura. La figura 17 muestra un tanque con signos de corrosión, el grado de deterioro es función del tiempo a la intemperie.

Figura 17. Fabricación de un tanque para transporte de combustible. Acero con signos de corrosión.



Fuente: Fotografía tomada en la empresa TK ASME API.

⁶ <http://www.invertaresa.com/invertaresa/espanol/inicio.htm>

Los Estados del metal desde su fabricación hasta la completa corrosión, de mejor a peor, vienen definidos de acuerdo a esta norma por las letras A, B, C y D.

- **CLASIFICACIÓN A.**

Superficie de acero completamente recubierta con cascarilla de laminación o calamina y con trazas de óxido. (El grado A lo presenta el acero poco tiempo después de su laminación en caliente).

- **CLASIFICACIÓN B.**

Superficie de acero que ha iniciado su corrosión y de la que ha empezado a desprenderse la cascarilla de laminación (El grado B lo presenta la superficie de acero laminado en caliente después de haber permanecido expuesta a la intemperie, sin protección, en una atmósfera medianamente corrosiva, durante 2 o 3 meses). Ver figura 18.

Figura 18. Superficie corroída expuesta a la intemperie.



Fuente: http://www.freepik.es/foto-gratis/tubos-de-acero-oxidado_529473.htm

- **CLASIFICACIÓN C.**

Superficie de acero de la que la corrosión ha hecho saltar la totalidad de la cascarilla de laminación, pero que todavía no presenta picaduras detectables a simple vista. (El grado C lo presenta la superficie de acero expuesta a la intemperie, sin protección durante 1 año, aproximadamente).

- **CLASIFICACIÓN D.**

Superficie de acero de la que se ha desprendido la totalidad de la cascarilla de laminación y en la que se observan picaduras a simple vista. (El grado D lo presenta la superficie de acero expuesta, sin protección, unos 3 años).

2.4.2 Grados de preparación

A partir de cada uno de los estados iniciales se definen varios tipos de preparación, denominados así:

- **St:** Rascado, cepillado, picado, por medios manuales o mecánicos.
- **Sa:** Chorreado abrasivo.

El estado inicial **A** sólo admite preparación por chorreado abrasivo (Sa), único método que permite eliminar la calamina, la figura 19 muestra la limpieza de un tanque por Sandblasting.

Los diferentes grados utilizados según la norma **ISO 8501-1: 2007**

Figura 19. Limpieza de un tanque para transporte de combustible.



Fuente: Fotografía tomada en la empresa TK ASME API.

Sa 3. Eliminar la totalidad del óxido visible, cascarilla de laminación, pintura vieja y cualquier materia extraña. Limpieza por chorreado hasta metal blanco. El chorro se pasa sobre la superficie durante el tiempo necesario para eliminar la totalidad de la cascarilla de laminación, herrumbre y materias extrañas. Finalmente, la superficie se limpia con un aspirador, aire comprimido limpio y seco o con un cepillo limpio, para eliminar los residuos de polvo de abrasivo. Color superficial uniforme.

Sa 2 ½. Chorreado abrasivo hasta metal casi blanco, a fin de conseguir que por lo menos el 95% de cada porción de la superficie total quede libre de cualquier residuo visible. Chorreado muy cuidadoso. El chorro se mantiene sobre la superficie el tiempo necesario para asegurar que la cascarilla de laminación, herrumbre y materias extrañas son eliminados de tal forma que cualquier residuo aparezca sólo como ligeras sombras o manchas en la superficie. Finalmente, se elimina el polvo de abrasivo con un aspirador, con aire comprimido limpio y seco o con cepillo limpio.

Sa 2. Chorreado hasta que al menos los 2/3 de cualquier porción de la superficie total estén libres de todo residuo visible. Chorreado cuidadoso. El chorro se pasa sobre la superficie durante el tiempo suficiente para eliminar la casi totalidad de cascarilla de laminación, herrumbre y materias extrañas. Finalmente se elimina el polvo abrasivo con un aspirador, con aire comprimido limpio y seco o con un cepillo limpio.

Sa 1. Chorreado ligero o soplado con abrasivo.

3. PROCESO DE DISEÑO CONCEPTUAL

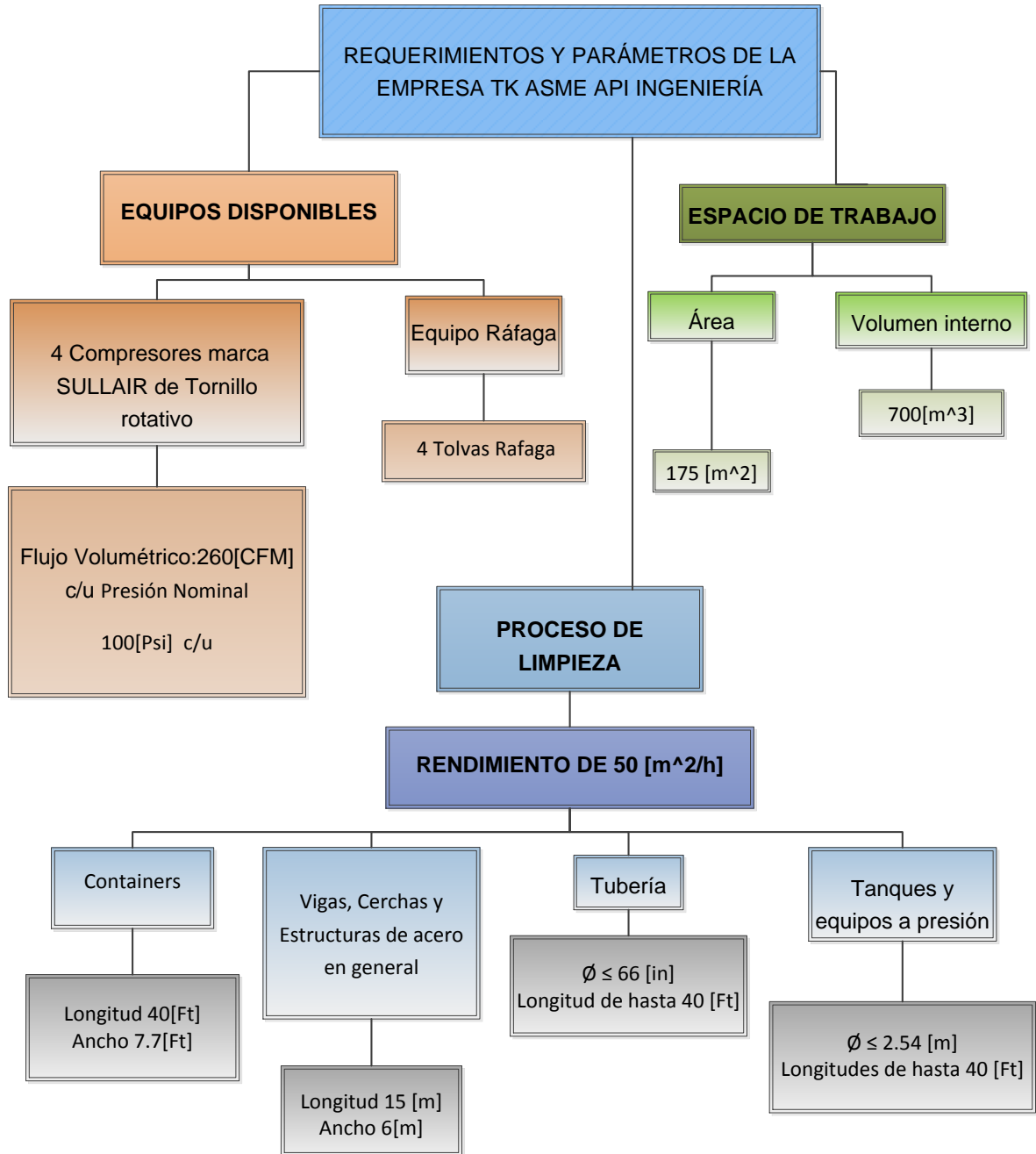
La etapa de diseño conceptual es muy importante en cualquier proceso de diseño, ya que con el despliegue de la función calidad se definen las necesidades de la empresa y se identifican los parámetros relevantes de diseño.

El análisis conceptual de un diseño hace referencia al estudio de parámetros y características reales de los cuales se emite un concepto o es posible hacer una idea de básica de diseño. Para poder realizar un concepto inicial del sistema y conjunto de subsistemas del cuarto de granallado y Sandblasting es necesario conocer los requerimientos formulados por la empresa, los requerimientos contienen el conjunto de parámetros especificaciones de los rendimientos de limpieza de las superficies, como también los espacios disponibles de trabajo y equipos, estas especificaciones darán la pauta para la creación del esquema conceptual de diseño.

3.1 NECESIDADES DE LA EMPRESA

La empresa requiere una propuesta de diseño de un cuarto de Granallado y Sandblasting para implementar tratamientos por chorro abrasivo mediante el impacto de micro esferas de acero o partículas erosivas de sílice, en la limpieza de superficies metálicas bajo los parámetros citados en el siguiente diagrama:

Diagrama 1. Requerimientos y parámetros de la empresa.

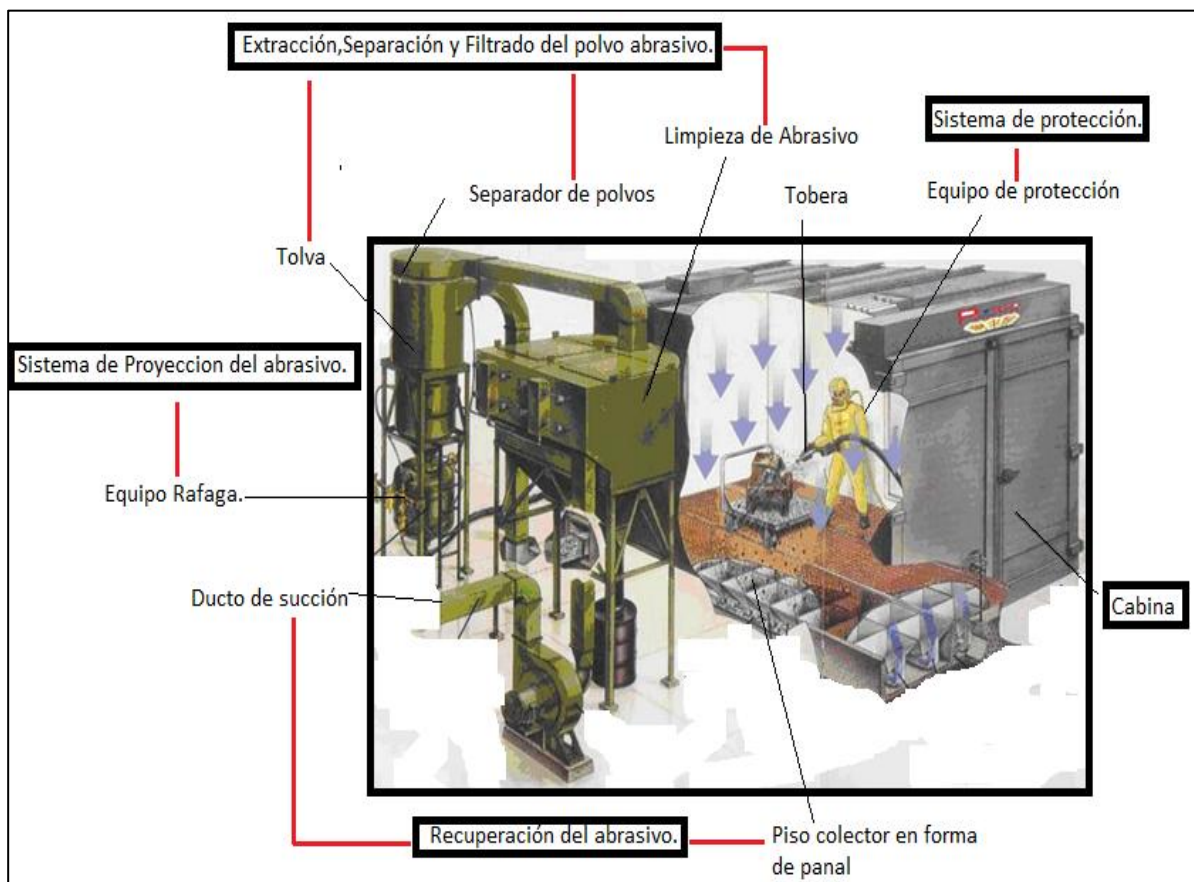


Fuente: Autor

3.2 IDENTIFICACIÓN DE SUBSISTEMAS PRINCIPALES

La identificación de los subsistemas principales que conformaran el cuarto de granallado, ver figura 20, permitirá postular las alternativas de diseño correspondientes, una vez el interesado, en este caso la empresa TK ASME API escoja la alternativa se procederá a diseñar el conjunto total, mediante la unificación de los subsistemas seleccionados.

Figura 20. Principales subsistemas de la cabina de granallado.



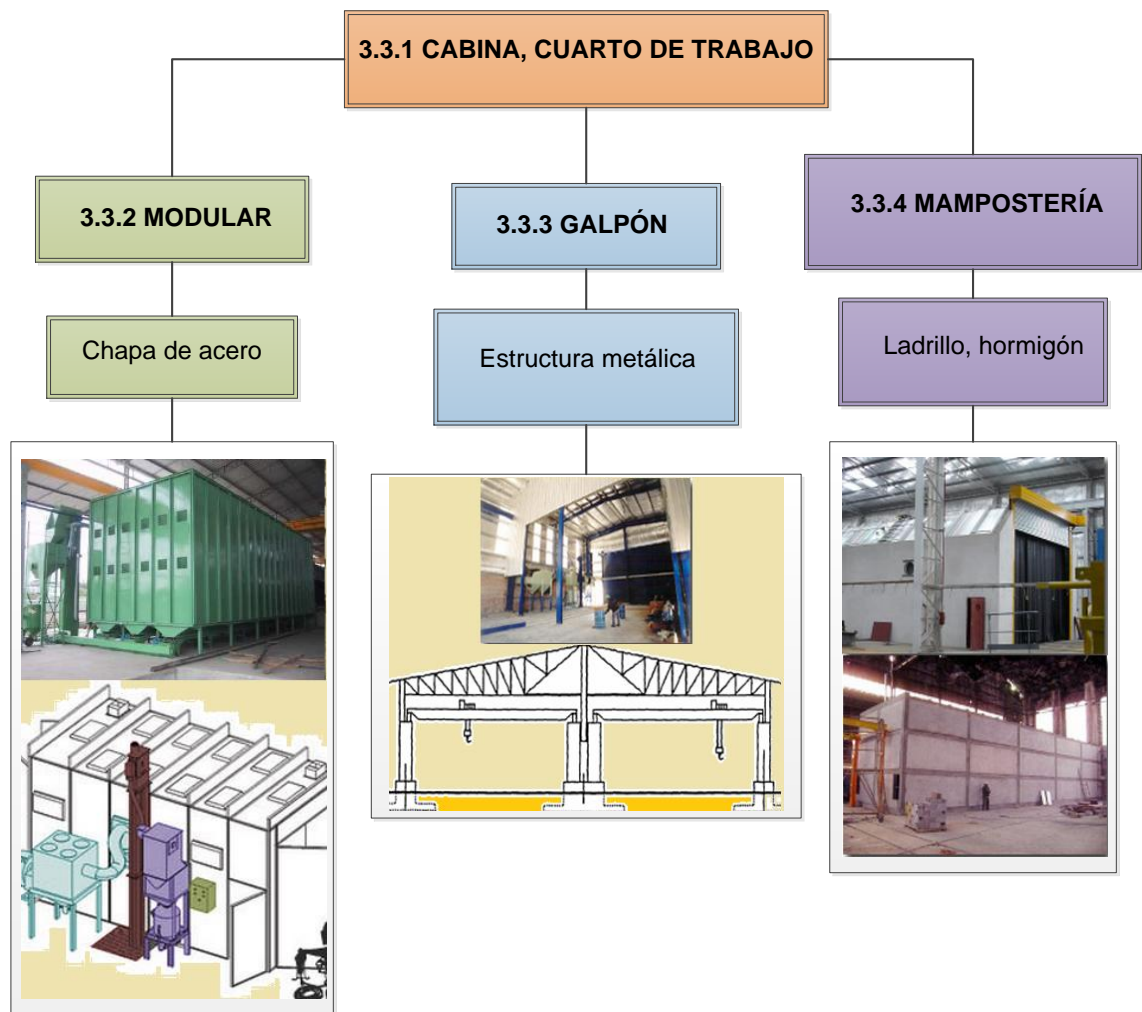
Fuente: http://www.autev-project.de/sapi/en/sandblasting_container_en.html,
Modificada.

3.3 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

Se plantea a continuación posibles alternativas iniciales de diseño para cada uno de los subsistemas ya identificados:

3.3.1 Cabina

Diagrama 2. Alternativas del cuarto de trabajo.



Fuente: Autor.

Las dimensiones del cuarto de granallado y su elección son relevantes pues están íntimamente ligados a los restantes componentes de la instalación y dimensiones de las piezas de trabajo.

El diseño de la cabina admite distintas formas constructivas, las cuales deberán ser seleccionadas en base a la disposición de recursos de inversión y a la infraestructura actual del área de granallado disponible.

3.3.2 Construcción modular con o sin revestimiento de goma interior.

Este sistema de construcción se basa en paneles modulares de chapa de acero donde el armado y desarmado se realiza sin soldaduras en base a uniones con pernos, las paredes pueden ser revestidas en goma y el piso debe ser de chapa de acero, como lo muestra la figura 21, el diseño debe tener o contar con puntos de ingreso y extracción de aire adecuadas para la circulación necesaria dentro del cuarto.

Figura 21. Diseño modular.

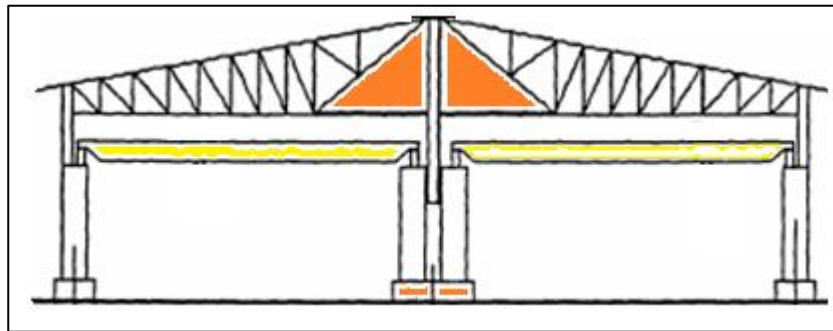


Fuente: Catalogo Industrial Blast Facilities By CLEMCO.

3.3.3 Construcción tipo galpón con revestimiento de goma interior.

Diseño de la cabina mediante construcción de una estructura, que puede usar hormigón, bloques o ladrillos, entre otros, para trabajar en zonas con áreas de trabajo de grandes proporciones, ver figura 22, se deben revestir las paredes en goma, el diseño del piso puede ser la combinación de chapa de acero y plancha de hormigón.

Figura 22. Diseño Tipo Galpón.



Fuente: Autor.

3.3.4 Construcción en mampostería con o sin revestimiento de goma interior.

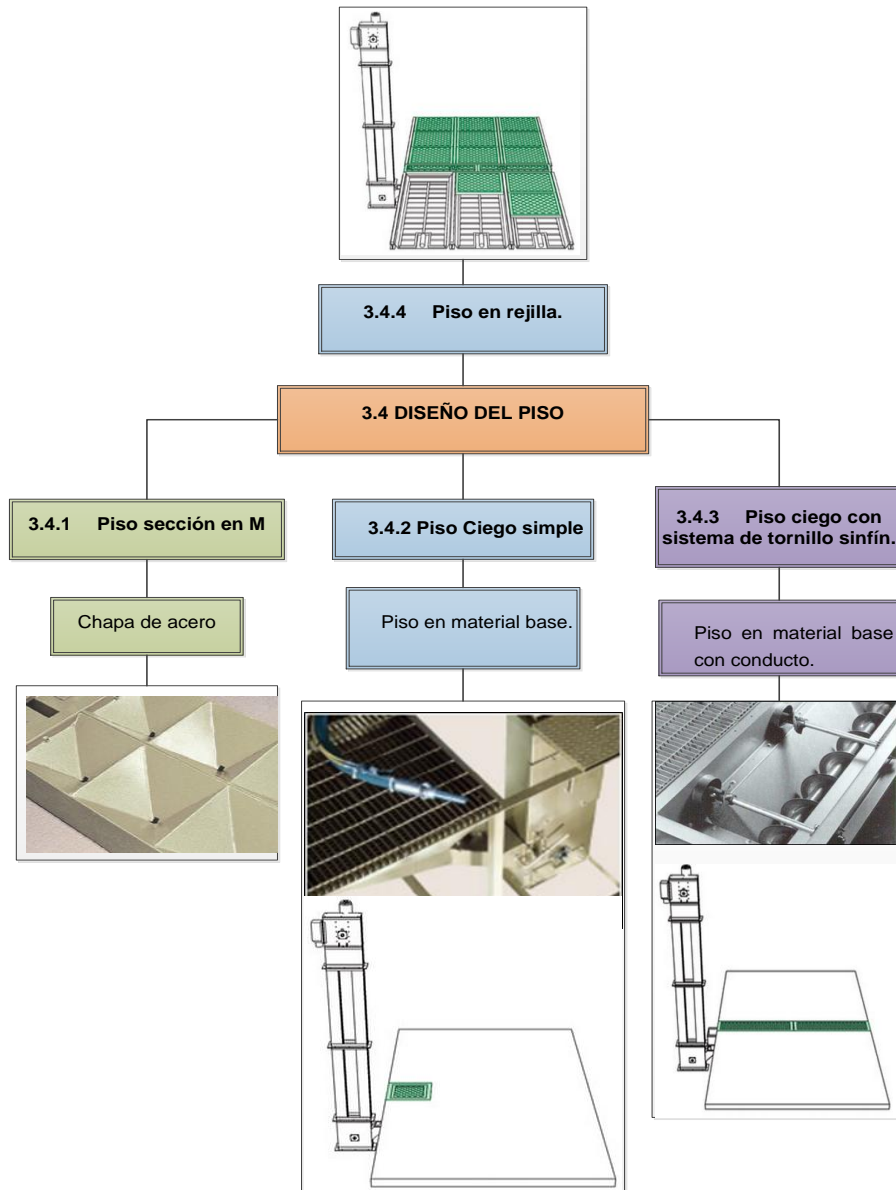
Diseño del cuarto de trabajo mediante mampostería, puede usarse ladrillo hueco, hormigón etc. Se debe revestir paredes en goma para prevenir los efectos erosivos en las paredes. Además debe contar con bocas de ingreso y extracción de aire adecuadas a la circulación necesaria dentro del cuarto.

Las dimensiones útiles dependen del tamaño máximo de las piezas a granallar y de sus movimientos en el volumen interno de la cabina.

3.4 PISO

Cubre la totalidad del área interna de la cabina y es donde se esparcirá el abrasivo proyectado. El diagrama 3, muestra las alternativas de diseño:

Diagrama 3. Alternativas de diseño del piso.



Fuente: Autor.

3.4.1 Piso sección en M

Diseño que requiere un sistema neumático para arrastrar el abrasivo, una vez este pasa por el piso en sección M como el mostrado en la figura 23, el cual tiene el ángulo de arrastre adecuado para que el abrasivo caiga libremente sin necesidad de un sistema mecánico de arrastre adicional, debido a que no tiene partes móviles este diseño es adecuado para mantenimiento, hay que aclarar que este diseño es muy conveniente para abrasivos de peso medio tales como, esferas de plástico, vidrio u oxido de aluminio.

Figura 23. Diseño de piso sección M.



Fuente: Catalogo Industrial Blast Facilities by CLEMCO.

3.4.2 Piso ciego para sistema de tolva.

El diseño del piso es simple, caracterizado por tener una tolva lateral hacia donde se debe barrer el abrasivo en forma manual como lo indica la figura 24. Una vez en la tolva, el equipo lo tamiza, limpia y recarga automáticamente. Es la de menor costo inicial, de equipamiento y obra civil.

Este diseño es para uso con granalla y munición de acero, el abrasivo puede moverse manual o mecánicamente hasta una tolva a ras de suelo donde un elevador por cangilón lo transporta hasta el limpiador de partículas.

Figura 24. Piso ciego con tolva lateral.

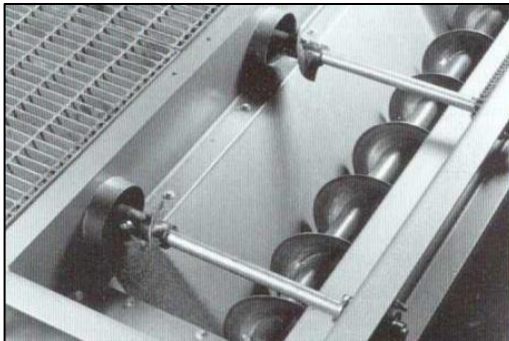


Fuente: Catalogo Industrial Blast Facilities by CLEMCO.

3.4.3 Piso ciego con sistema de tornillo sinfín.

La figura 25 muestra el diseño del piso para trabajar principalmente con abrasivo metálico, donde la rigidez, robustez y forma helicoidal permiten un diseño eficiente relacionado al módulo de transporte del abrasivo por elevador de cangilones.

Figura 25. Diseño de piso con tornillo sinfín.



Fuente: Catalogo Industrial Blast Facilities by CLEMCO.

3.4.4 Piso en rejilla.

En esta alternativa de diseño, la totalidad del piso es de rejilla, ver figura 26, el sistema de recolección se instala, luego vendrán el tamizado, limpieza y recarga mediante barredoras neumáticas. En la unión de bateas de barrido se colocan perfiles para montar rieles. Elimina los tiempos muertos por recolección, bajando considerablemente los costos del proceso, pero el sistema aumentara los costos iniciales de montaje y fabricación del sistema automático. Posee un bajo consumo energético, y bajo mantenimiento.

Figura 26. Diseño del piso en rejilla.



Fuente: Catalogo Industrial Blast Facilities by CLEMCO.

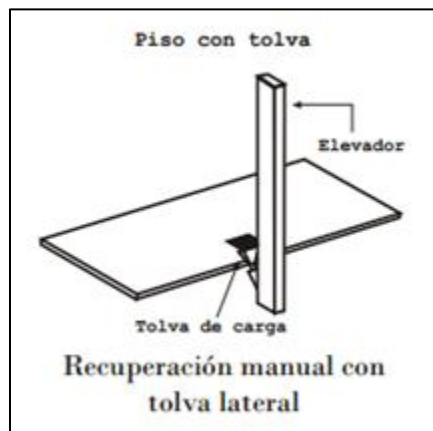
3.5 RECUPERACIÓN DEL ABRASIVO

Resulta claro en este punto que la selección del diseño del piso esta intrínsecamente relacionada con el sistema de recuperación, se debe haber seleccionado el diseño del piso para buscar la solución más óptima del sistema de recuperación. Este es uno de los subsistemas más importantes ya que permitirá la recolección del abrasivo, luego vendrá el proceso de limpieza, las alternativas propuestas son las siguientes:

3.5.1 Recuperación manual con tolva lateral.

Tolva de recuperación: el abrasivo utilizado es barrido por el operador u operadores hasta la tolva de recuperación, como lo indica la figura 27, la cual canaliza el abrasivo hasta la boca de entrada del elevador a cangilones.

Figura 27. Piso con sistema recuperador de transporte central.



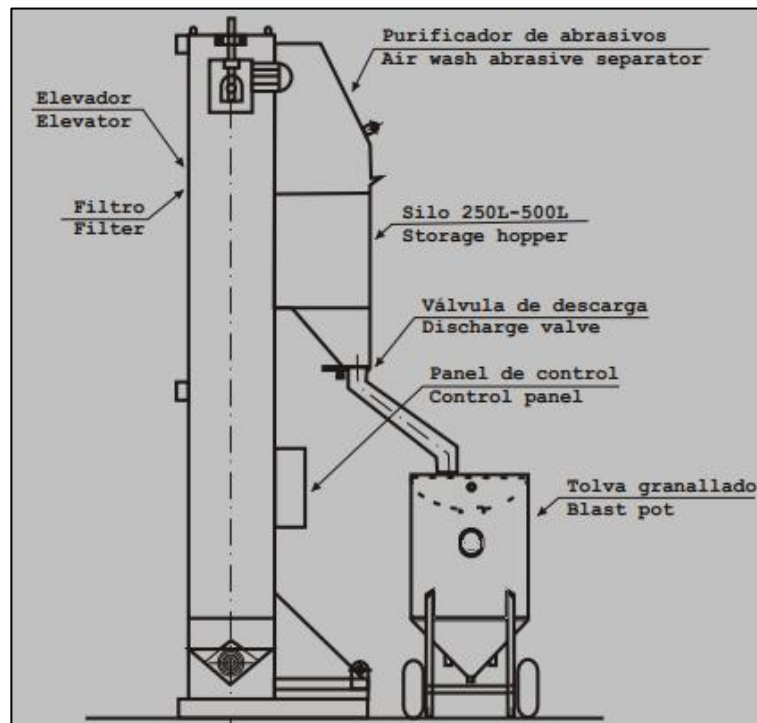
Fuente: http://www.blasting.com.ar/cuartos-de-granallado/abrasivos_pesados/cuartos-de-granallado-abrasivos-pesados.php

La figura 28 indica el funcionamiento del equipo; el abrasivo puede cargarse de forma manual en una tolva en la base del elevador de cangilones, luego se descarga en el limpiador del abrasivo con dos etapas de limpieza: Una de las etapas consiste en la limpieza mecánica por tamizado y la segunda se realiza por flujo de aire.

Los desechos gruesos se extraen del sistema hacia un recipiente y los finos son captados por el filtro de mangas montado en la unidad.

El abrasivo limpio y recuperado se deposita en un silo de almacenaje listo para la recarga del equipo.

Figura 28. Sistema de cangilón.



Fuente: Catalogo Industrial Blast Facilities by CLEMCO.

3.5.2 Recuperación manual con conducto central de tornillo sinfín.

Tornillo sinfín: La figura 29 indica como el abrasivo utilizado es barrido hasta un tornillo sinfín estratégicamente ubicado, el cual transporta el abrasivo hasta la boca de entrada del elevador a cangilones. Reduce el área de barrido, ahorrando así tiempo en la tarea de recolección.

Figura 29. Piso con sistema recuperador de transporte central.

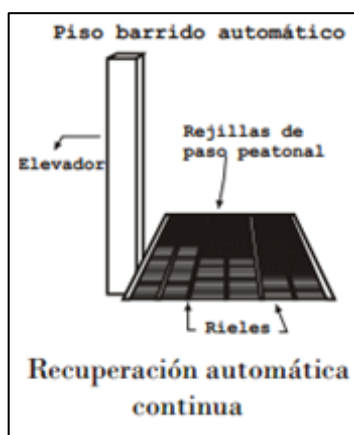


Fuente: http://www.blasting.com.ar/cuartos-de-granallado/abrasivos_pesados/cuartos-de-granallado-abrasivos-pesados.php

3.5.3 Recuperación automática continúa.

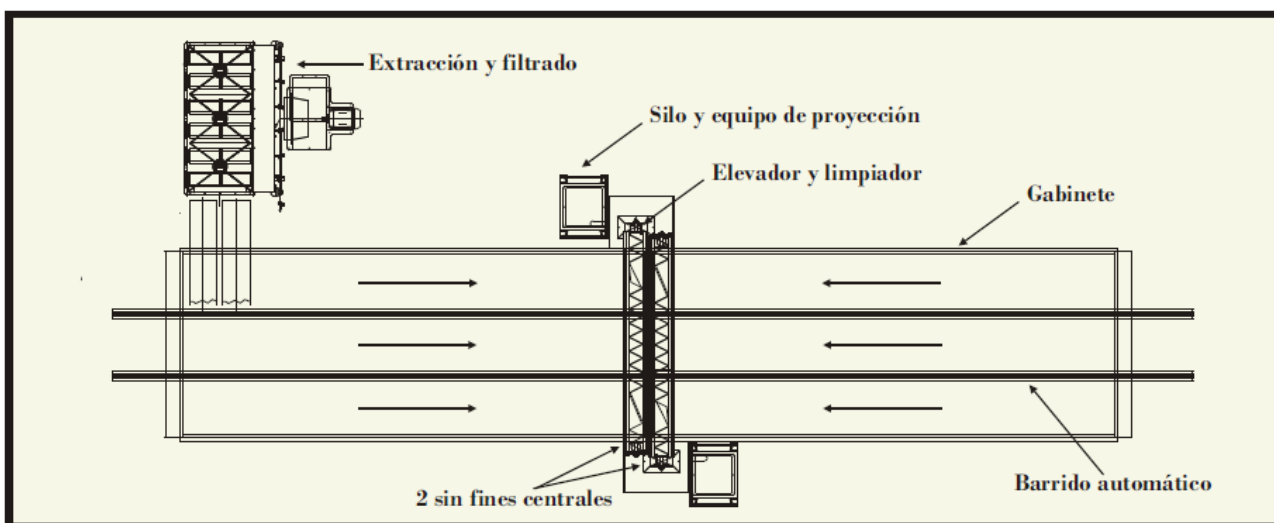
Automatización completa del sistema. Las barredoras arrastran el abrasivo hasta el tornillo sinfín conectado a la boca de entrada del elevador a cangilones. No requiere la intervención del operador, como lo muestra la figura 30 y 31:

Figura 30. Recuperación automática.



Fuente: http://www.blasting.com.ar/cuartos-de-granallado/abrasivos_pesados/cuartos-de-granallado-abrasivos-pesados.php

Figura 31. Barrido automático.



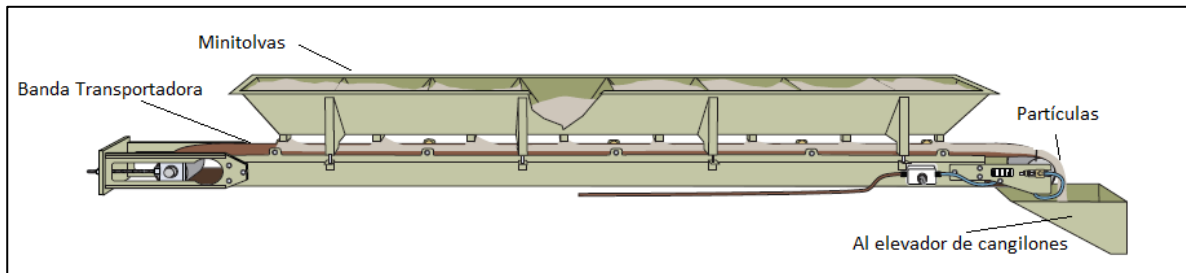
Fuente: Cuarto de granallado para estructuras metálicas, Catálogo CYM.

3.5.4 Recuperacion continua con sistema de banda transportadora.

El diseño de recolección en banda transportadora es uno de los más convenientes sistemas, debido a su bajo costo de operación, su mecanismo sencillo y ubicación parcial dentro de todo el espacio de trabajo lo hacen una de las alternativas recomendadas por la mayoría de las empresas especializadas en el ámbito de la limpieza de superficies por impacto de microesferas erosivas.

La disposición espacial de las bandas transportadoras es función del área de trabajo, la búsqueda de optimización y eficiencia del sistema de recolección en su conjunto, las minitolvas de canalización en diseño en V, construidas en acero calibre 10, permiten el flujo continuo y controlado de el abrasivo hacia la banda transportadora, enviándolo directamente al elevador de cangilones, la figura 32 muestra un ejemplo típico de la banda transportadora, esta será diseñada en un material resistente a los efectos erosivos causados por las partículas transportadas.

Figura 32. Sistema de recolección por transportador de banda.



Fuente: Industrial blast facilities by CLEMCO, Catalogo.

3.5.5 Recuperación por aspirador de vacío.

El transportador aspirador por vacío es un equipo que se utiliza para transporte y retiro del abrasivo proyectado durante el trabajo de preparación de superficies en toda el área de operación, ya sea arena o granalla de acero, este sistema es uno de los más costosos, pero uno de los más eficientes.

Su secuencia de funcionamiento es la siguiente:

- Carga del abrasivo en los equipos de proyección.
- Reutilización de abrasivos con separación de finos y gruesos.
- Limpieza final por aspiración en las superficies a ser pintadas.

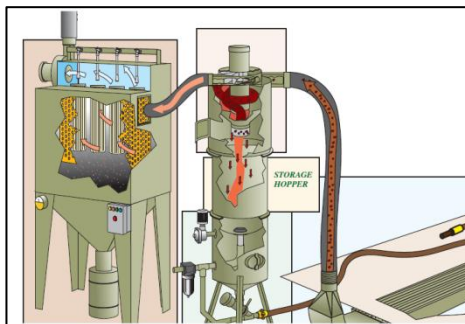
Componentes:

El equipo se compone de tres módulos:

- Módulo de aspiración y filtrado
- Silo de retención de abrasivos
- Conductos y bocas de aspiración.

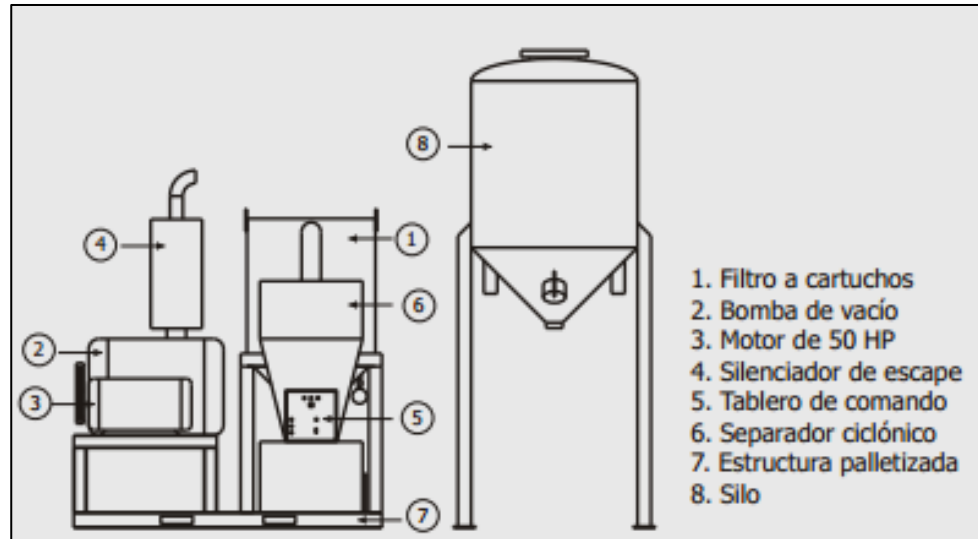
La figura 33, muestra un equipo transportador por vacío, y la figura 34 indica las partes principales.

Figura 33. Transportador aspirador por vacío.



Fuente: Catalogo Industrial Blast Facilities by CLEMCO.

Figura 34. Partes del Transportador aspirador por vacío.



Fuente: Catalogo Industrial Blast Facilities by CLEMCO.

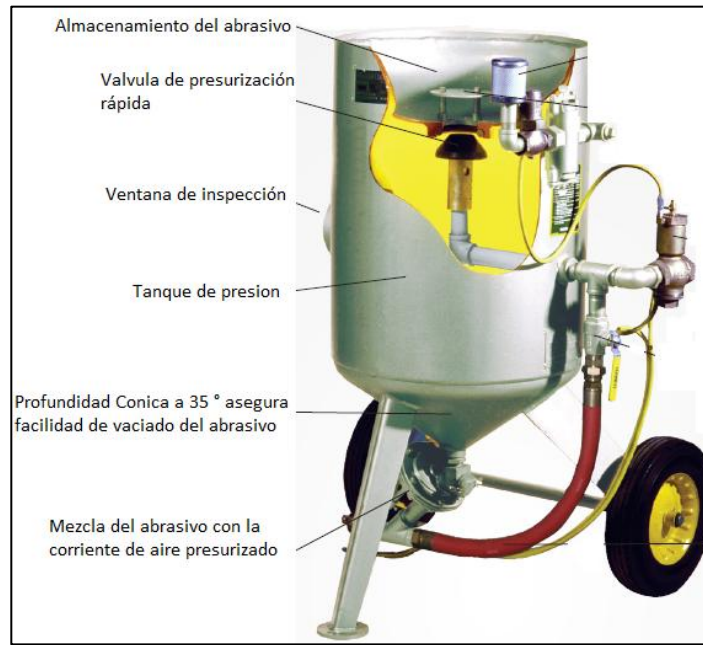
3.6 SISTEMA DE PRESIÓN Y PROYECCIÓN DEL ABRASIVO.

El compresor de aire deberá suplir las necesidades de presión y caudal del sistema, suministrara el aire requerido para los cartuchos del colector de polvo, suministrara aire para el tanque pulmón requerido por los operarios y en algunos sistemas suplirá las necesidades del sistema de recolección del abrasivo.

La selección adecuada de las boquillas en el sistema de proyección del abrasivo, el sistema recuperador utilizado, la selección del tanque pulmón, y niveles de limpieza requeridos m^2/h , afectaran directamente el consumo de aire comprimido.

La figura 35 muestra las partes principales del equipo ráfaga, este es en esencia el tanque con abrasivo presurizado.

Figura 35. Equipo ráfaga, Blast Machine.



Fuente: Catalogo Industrial Blast Facilities by CLEMCO.

3.6.1 Presurización y aceleración de las partículas.

La forma en que las partículas son aceleradas hacia la superficie se puede realizar por dos métodos en seco y de forma húmeda:

1) Chorreado Seco

- Chorreado Seco a Succión
- Chorreado Seco a Presión

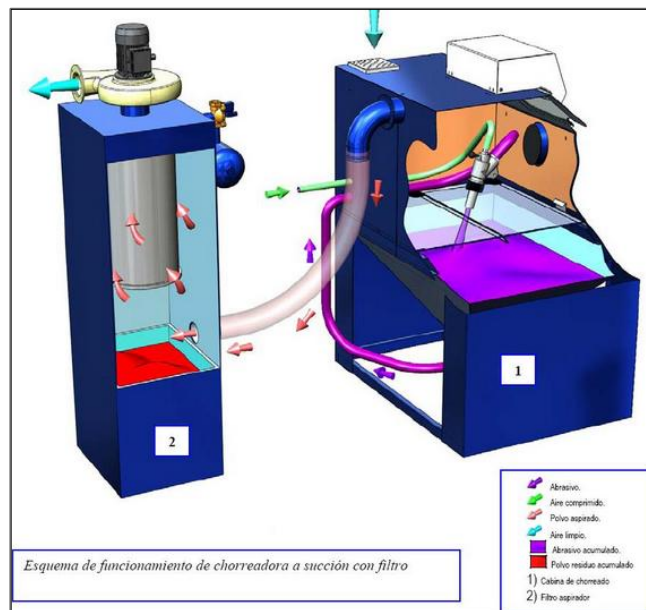
2) Chorreado Húmedo

3.6.2 Chorreado seco a succión

Los equipos que trabajan a succión reciben este nombre gracias a la pistola de proyección, su funcionamiento se basa en el efecto Venturi. El aire al atravesar la pistola a gran velocidad genera una “succión” en la abertura inclinada donde va conectada una manguera de la pistola a la tolva. El abrasivo de la tolva se ve succionado y una vez llega a la pistola, se mezcla y es proyectado junto con el aire a gran velocidad.

La figura 36⁷ muestra como una pistola de succión se distingue por tener dos mangueras, una para el paso del aire del compresor y otra para comunicar la pistola con la tolva que acumula el abrasivo. El diámetro del inyector es el que define la cantidad de aire que sale de la pistola y la boquilla establece la superficie que se cubre al chorrear.

Figura 36. Chorreado seco a succión.



Fuente: <http://blog-abrasivosymaquinaria.blogspot.com/>

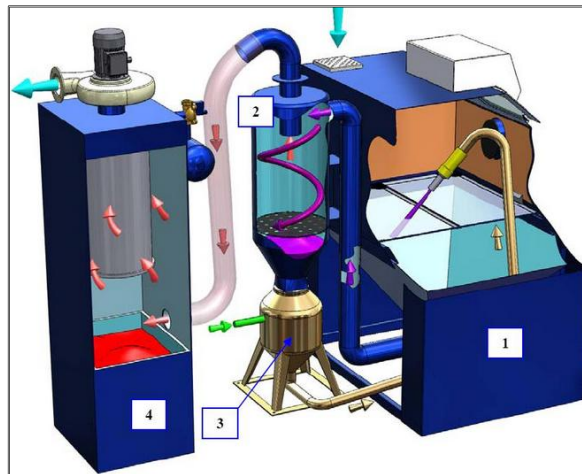
⁷<http://blog-abrasivosymaquinaria.blogspot.com/>

3.6.3 Chorreado seco a compresión

Un equipo de chorreado a presión viene compuesto por los mismos elementos que una máquina de chorreado seco a succión. La diferencia más importante radica en la pistola, ver figura 37. Ahora la pistola tiene una sola manguera que porta la mezcla de abrasivo y el aire a presión. Un equipo presurizado se encarga de proyectar el aire a presión y a la vez hace de depósito de abrasivo, la tolva deja de hacer esa función.

Al chorrear es el equipo presurizado el que hace y dirige la mezcla de aire y abrasivo hacia la pistola, el abrasivo cae a la tolva que conduce el abrasivo al equipo presurizado cerrando el ciclo. Cabe la posibilidad de intercalar un ciclón separador de partículas con la función de eliminar del circuito de abrasivo cascarillas y restos de residuos eliminados durante el chorreado.

Figura 37. Chorreado seco a presión.



Fuente: <http://blog-abrasivosymaquinaria.blogspot.com/>

3.7 COMPRESOR

Los grandes consumos de aire relacionados al equipo de ráfaga y posiblemente al sistema de limpieza y transporte del abrasivo hacen necesario que se requiera un compresor con una capacidad de unos 260 [Cfm] y una presión de aproximadamente 100 [Psi]. La empresa cuenta cuatro compresores SULLAIR, como el de la figura 38.

Figura 38. Compresor SULLAIR.



Fuente: Fotografía tomada en la empresa TK ASME API.

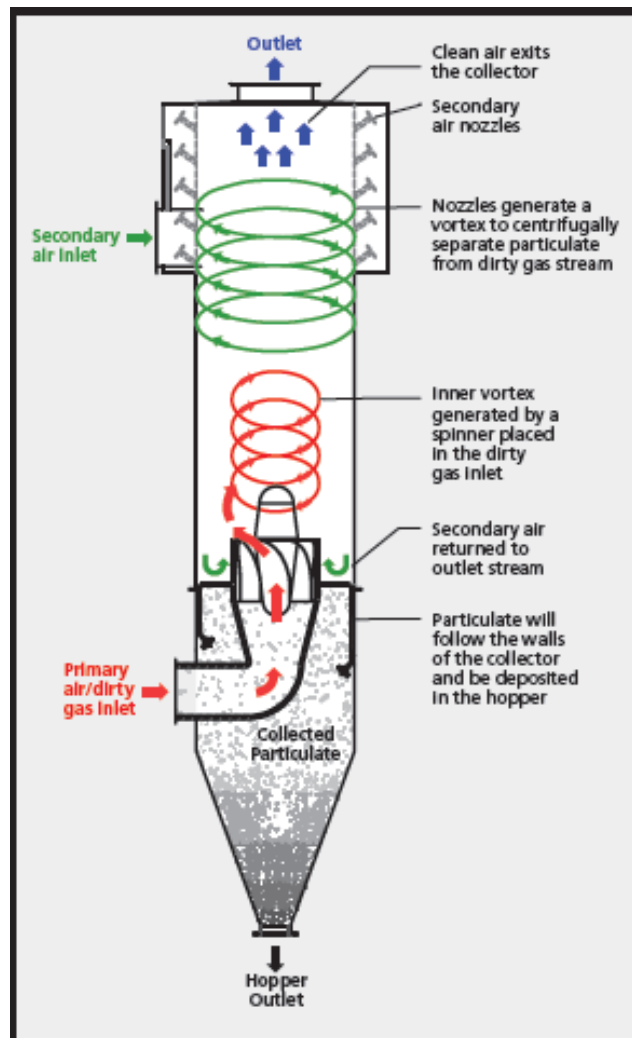
3.8 SISTEMA COLECTOR DE POLVO.

Este es uno de los subsistemas más importante ya que su función es la de filtrar las partículas que son un potencial foco de contaminación del aire expulsado, se pueden presentar dos métodos de separación de las partículas de la corriente de aire mediante un separador ciclónico o un filtro de mangas.

3.8.1 Separador ciclónico

Es separador ciclónico es uno de los equipos más importantes para la limpieza y purificación del aire, permite separar las partículas erosivas, limpiarlas y recolectarlas, la figura 39, muestra el principio básico de funcionamiento.

Figura 39. Separador ciclónico, esquema de funcionamiento.

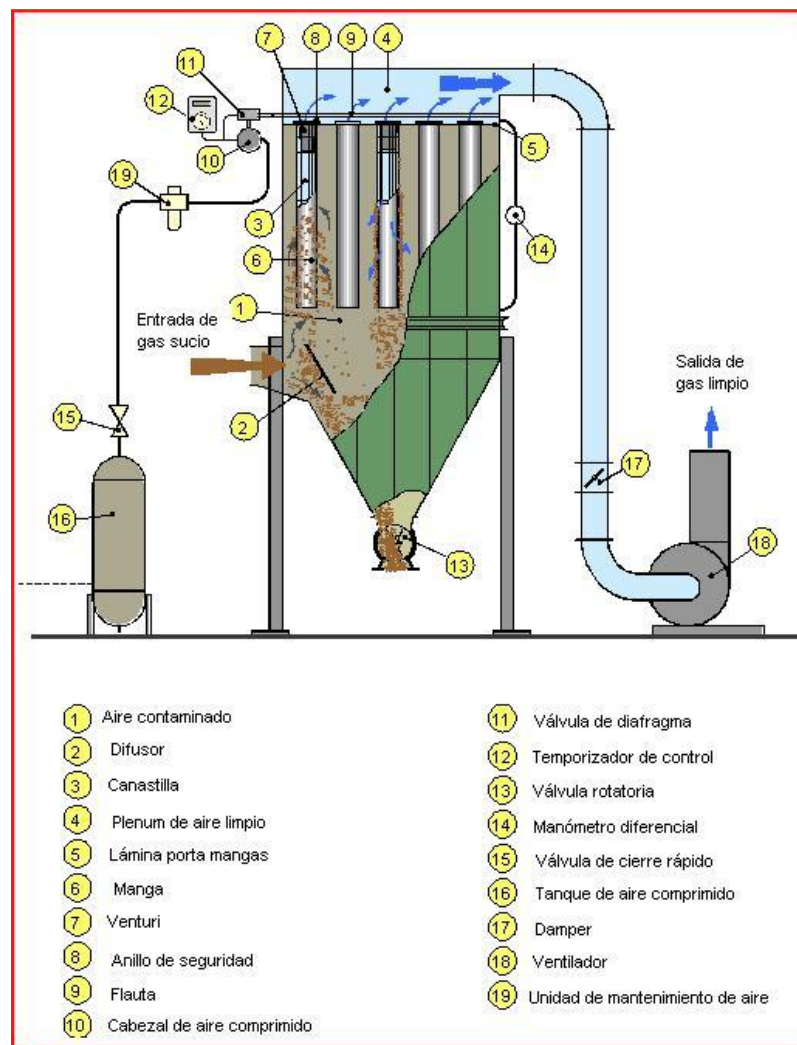


Fuente: Catalogo de AERODYNE.

3.8.2 Filtro de mangas.

La función principal del filtro de mangas es la de separar las partículas en suspensión de la corriente de aire antes de ser expulsadas al medio ambiente, las partes principales se pueden ver en la figura 40.

Figura 40. Filtro de mangas.



Fuente: Consideraciones para el diseño de sistemas colectores de mangas.

3.9 ALTERNATIVA SELECCIONADA, QFD.

El proceso de elección de cada una de las alternativas para cada subsistema planteado se hará basado en un modelo cualitativo en el que se organizaron por prioridad algunas de las necesidades del cliente, en este caso la empresa, y en reunión con el ingeniero de la empresa TK ASME API INGENIERIA, se discutieron las principales alternativas, el modelo propuesto está basado en el hecho de que se dará una prioridad de 6 al nivel de importancia más alto, bajo los parámetros de la empresa, es decir de 6 a 1. Se establece la relación entre las necesidades del cliente y las alternativas de diseño de cada subsistema y se evaluará la alternativa con una calificación según la tabla 3:

Tabla 3. Calificación de la alternativa.

Nula	0
Baja	2
Media	4
Alta	8

Fuente: Autor.

Luego se sumará la columna de cada alternativa y aquella que obtenga la puntuación más alta se seleccionará como la alternativa básica para el proceso de diseño detallado del sistema total. Los resultados del método se pueden ver en las tablas 4, 5, 6 y 7.

Tabla 4. Alternativa del diseño de la cabina.

Necesidades del consumidor	Importancia	Diseño de la cabina		
		Modular	Galpón	Mampostería
Acomodarse al espacio de trabajo	6	0	4	8
Integrar los equipos disponibles en el diseño	5	0	2	4
Bajos niveles de polución	4	2	2	2
Protección del operario	3	0	0	0
Rendimiento de limpieza	2	0	0	0
Bajo costo de mantenimiento	1	2	4	4
Total/Alternativa		10	46	80

Tabla 5. Alternativa del diseño del piso.

Necesidades del consumidor	Importancia	Diseño del piso			
		Rejilla	Sección en M	Piso ciego simple	Piso ciego con sistema de tornillo sinfin
Acomodarse al espacio de trabajo	6	4	2	2	0
Integrar los equipos disponibles en el diseño	5	0	0	0	0
Bajos niveles de polución	4	0	0	0	0
Protección del operario	3	0	0	0	0
Rendimiento de limpieza	2	0	0	0	0
Bajo costo de mantenimiento	1	8	4	2	0
Total/Alternativa		32	16	14	0

Fuente: Autor.

Tabla 6. Alternativa del diseño del sistema de recuperación del abrasivo.

Necesidades del consumidor	Importancia	Recuperación del abrasivo				
		Manual con tolva lateral	Manual con tornillo sinfín	Automática continua con barredoras	Automática continua con banda transportadora	Aspirador por vacío
Acomodarse al espacio de trabajo	6	0	0	0	8	0
Integrar los equipos disponibles en el diseño	5	0	0	0	0	0
Bajos niveles de polución	4	0	0	0	8	8
Protección del operario	3	0	0	0	0	0
Rendimiento de limpieza	2	0	0	2	8	4
Bajo costo de mantenimiento	1	4	0	0	8	0
Total/Alternativa		4	0	4	104	40

Fuente: Autor.

Tabla 7. Alternativa de diseño del sistema de presión, limpieza y filtrado

Necesidades del consumidor	Importancia	Sistema de presión y proyección		Limpieza y filtrado	
		Succión	Compresión	Separador ciclónico	Filtro de mangas
Acomodarse al espacio de trabajo	6	0	0	2	4
Integrar los equipos disponibles en el diseño	5	1	8	4	4
Bajos niveles de polución	4	0	0	8	8
Protección del operario	3	0	8	0	0
Rendimiento de limpieza	2	0	8	0	0
Bajo costo de mantenimiento	1	2	8	8	4
Total/Alternativa		7	88	72	80

Fuente: Autor.

3.9.1 Descripción de la alternativa de diseño mas optima.

La figura 41. Muestra la alternativa conceptual de diseño, el recinto sera hecho en mamposteria, puede usarse ladrillo o bloques de hormigón, el sistema de recuperacion consistira en una banda transportadora ubicada de forma parcial, el diseño del piso es ciego con rejilla sectorizada, la banda descargara al elevador de cangilones el cual a su vez transportara el abrasivo hacia la tolva de alimentacion del equipo rafaga. El colector de polvo sera el encargado de filtrar y separar las particulas finas suspendidas en la corriente de aire, mientras que el tamiz ubicado despues del elevador de cangilones se encargara de separar los gruesos y expulsarlos como desecho.

Figura 41. Alternativa conceptual de diseño.



Fuente: Tomada y modificada de; <http://www.blasting.com.ar>.

4. DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

4.1 SELECCIÓN DEL ELEVADOR DE CANGILONES

El elevador de cangilones es un componente básico requerido en el sistema total del cuarto de granallado, ya que este será el encargado de elevar y transportar de forma continua el material abrasivo, bien sea la granalla de acero o la arena sílice.

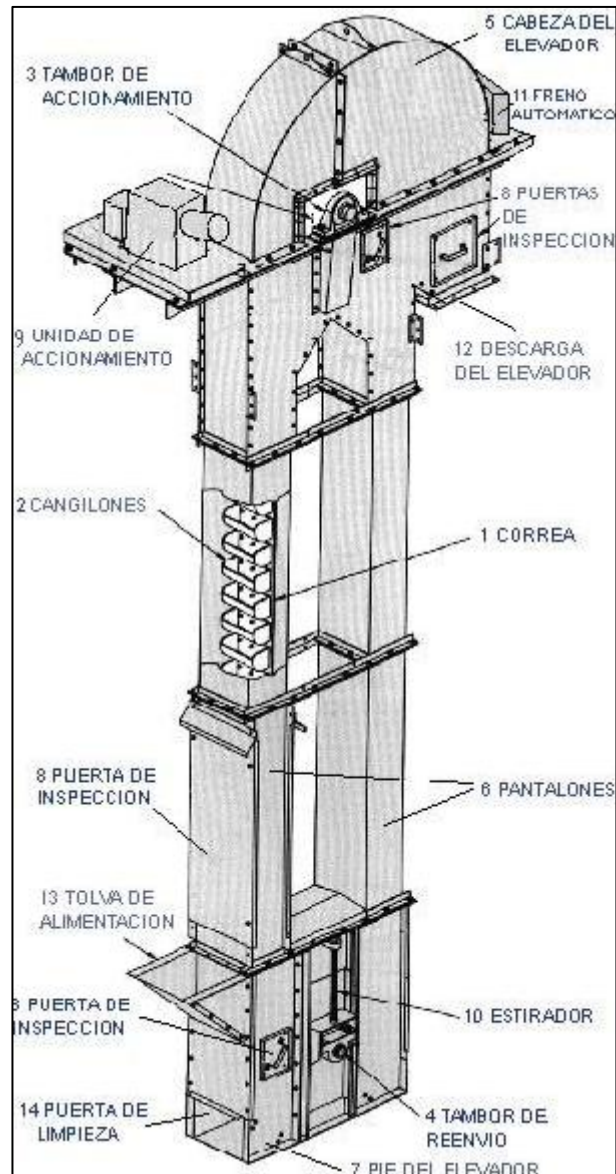
Algunas consideraciones de los elevadores son que debe especificarse la altura de transporte, la cual para el diseño es función del equipo ráfaga, la mayoría de los elevadores pueden elevar material desde alturas de los 7 metros hasta los 50 metros.

Los cangilones suben generalmente con una carga parcial, y a una velocidad determinada. Por regla general las velocidades de operación están entre los 0.5 m/s hasta los 4 m/s, para determinar la velocidad óptima del elevador se hará un análisis del tipo de descarga de material, esta es función del tipo de material, ya que diferentes materiales requieren velocidades que correspondan a las características inherentes a sus propiedades de fluidez y abrasión.

4.1.1 Partes del elevador de cangilones.

Identificar las partes del elevador de cangilones permitirá un mejor entendimiento de su propósito en el diseño del cuarto. La figura 42 indica las partes principales del elevador.

Figura 42. Partes principales del elevador de cangilones.

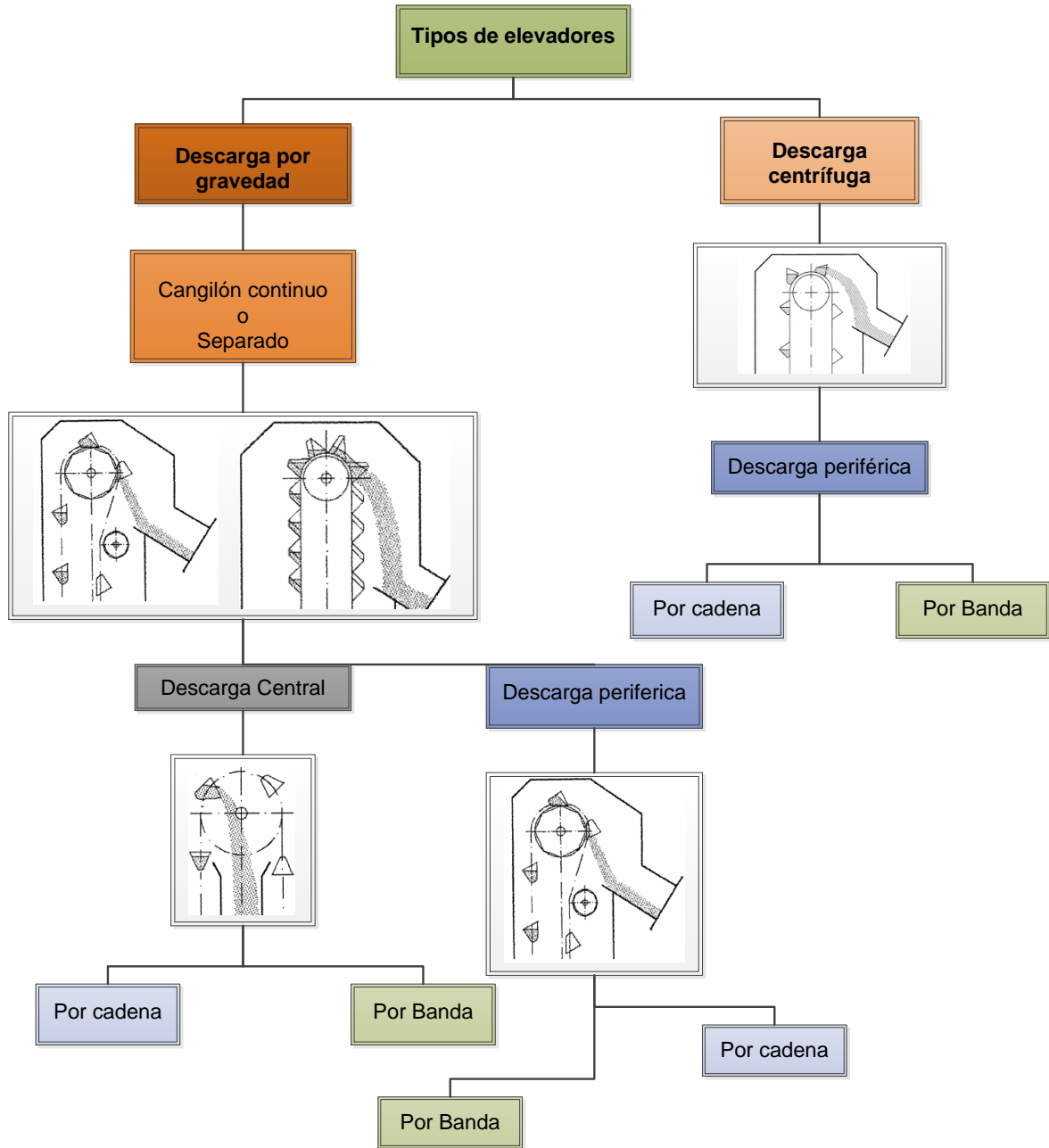


Fuente:

<http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20I/PAGINA%20CANGILONES.HTM>

4.1.2 Tipos de elevadores de cangilones.

Diagrama 4. Tipos de elevadores de cangilón.



Fuente: Autor.

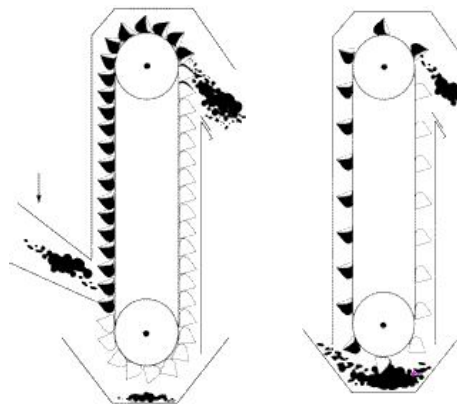
- **Elevadores de cangilón de descarga centrifuga.**

A nivel industrial este es el tipo de elevador que se utiliza con mayor frecuencia, el material de los cangilones es función del abrasivo a transportar, es por esto que para nuestro diseño requerimos de un material resistente a la abrasión, podría emplearse un acero aleado al manganeso, ya que este es un acero austenítico, que al someterse a un ambiente agresivo de abrasión se endurece y adquiere las propiedades mecánicas requeridas para el proceso. Para montar el cangilón se puede hacer sobre una banda resistente a la abrasión o en una fijación sobre cadenas. Bajo la información de los catálogos consultados el tipo de elevador más conveniente es el de tipo de descarga centrifuga, es por este motivo que centraremos las bases del diseño a este tipo en especial.

- **Alimentación del cangilón.**

La forma en la que el cangilón recoge el abrasivo está dada por dos movimientos, ver figura 43, uno es el de la descarga en la tolva del cangilón y la otra es la de recoger el material que se encuentra en el fondo del elevador por dragado. El diseño también permite la función mixta.

Figura 43. Tipo de alimentación del elevador.



Fuente: <http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20I/PAGINA%20CANGILONES.HTM>

- **Tipo de unión del cangilón al elemento de transporte.**

La forma en la que el cangilón puede fijarse al elemento de transporte depende de las características del material a transportar, ya que existen uniones por cadena o por correa, como se observa en la figura 44 y 45.

Figura 44. Unión de cangilón a correa o banda flexible.



Figura 45. Unión de cangilón a cadena.



Fuente: <http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20I/PAGINA%20CANGILONES.HTM>

4.1.3 Proceso de selección

Para seleccionar el elevador indicado, se requieren definir los siguientes parámetros específicos:

- Definir el material.
- Tamaño de la partícula.
- Angulo de reposo, determina la fluidez.
- Abrasión, determina el grado de abrasión de las partículas.

La tabla 8, indica los parámetros de diseño, los cuales pueden definirse como:

- Capacidad: Definida como la cantidad de abrasivo en unidades volumétricas o másicas, por unidad de hora, m^3/h . ó Ton/h .
- Condiciones de operación, definir temperatura, humedad relativa y jornadas de operación.

Tabla 8. Parámetros de diseño.

Parámetros de diseño	Especificación	Unidad
Material a transportar	Granalla de acero o Arena	N/A
Capacidad	Arena: 2674 (Anexo A)	Kg/h
	Granalla: 2647	Kg/h
Peso por cangilón	Granalla: 100-150 Arena Seca: 90-110	$\frac{Lb}{ft^3}$
Jornada	8	Horas

N/A: No Aplica

Fuente: Autor.

- **Angulo de reposo**

El ángulo de reposo de la granalla es de aproximadamente 38°⁸ mientras que el de la arena esta alrededor de los 25° a 35° lo que según los catálogos y tablas de selección determina a estos dos materiales como de fluidez mediana, según la escala de la tabla 9, la figura 46 indica cual es el ángulo de reposo, a continuación se muestra la tabla 10, donde se muestran las principales propiedades de estos dos tipos de abrasivos.

Tabla 9. Angulo de reposo

<i>Tipo de Fluidez</i>	<i>Ángulo de reposo</i> (°)
Livianamente fluido	0° - 15°
Fluidamente bueno	15° - 30°
Medianamente Fluido	30° - 45°
Fluidez pesada	45° - 70°

Fuente: Tomado de <http://www.slideshare.net/NeiderDurango/ngulo-de-talud>

Figura 46. Fluidez como función del ángulo de reposo.



Fuente: Tomado de <http://www.slideshare.net/NeiderDurango/ngulo-de-talud>

Tabla 10. Propiedades de la arena y la granalla.

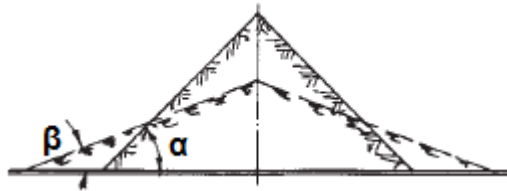
Abrasivo	Tipo	Forma	Dureza	Densidad	Silice Libre	Mallas	Factor de reutilización
Arena	Silice	Irregular redondeada	5-6 MOHS	1600 Kg/m ³	90 %	6-300	1 vez
Granalla de acero	Metálica	Angular	40 a 68 RC	4000 Kg/m ³	0	18-200	De 700 a 5000 veces

⁸Tomado de <http://www.slideshare.net/NeiderDurango/ngulo-de-talud>

- **Angulo de sobrecarga dinamico.**

Este se puede definir como el angulo que forma la pendiente del material en una seccion transversal cuando este es transportado por una banda.

Figura 47. Angulo de sobrecarga dinámico.



Fuente: Catalogo Dunlop.

Donde el angulo de descarga se puede tomar como $[0.5-0.9]*(\alpha)^9$ es decir que para la arena seca el ángulo de descarga es de aproximadamente 12.5° . La tabla 11 indica los codigos de clasificacion del material:

Tabla 11. Códigos de selección catalogo Martin.

Material Classification Code Chart		
SIZE	MATERIAL CHARACTERISTICS	CODE
	Very fine – 100 mesh and under	A
	Fine – 1/8 inch and under	B
	Granular – Under 1/2 inch	C
	Lumpy – Containing lumps over 1/2 inch	D
	Irregular – Stringy, interlocking, mats together	E
FLOW-ABILITY	Very free flowing	1
	Free flowing	2
	Average Flowing	3
	Sluggish	4
ABRASIVENESS	Non-abrasive	5
	Abrasive	6
	Very abrasive	7
MISCELLANEOUS CHARACTERISTICS (SOMETIMES MORE THAN ONE APPLY)	Becomes plastic or tends to soften	K
	Very dusty	L
	Aerates and develops fluid characteristics	M
	Contains explosive dust	N
	Contaminable, affecting use or salability	P
	Degradable, affecting use or salability	Q
	Gives off harmful fumes or dust	R
	Highly corrosive	S
	Mildly corrosive	T
	Hygroscopic	U
	Interlocks or mats	V
	Oils or chemical present – which affect rubber prod.	W
	Packs under pressure	X
Very light and fluffy – may be wind swept	Y	
Elevated temperature	Z	

Fuente: Bucket-elevator-catalog.pdf.Martin.

- **Tamaño de las partículas**

El tamaño de las partículas puede variar según el nivel de corrosión o agresividad del proceso, el tamaño máximo de partícula según investigaciones de la información recopilada es de 0.078” y el mínimo es de aproximadamente 0.007” en el caso de la granalla, la tabla 10. Muestra las propiedades de los dos abrasivos el tamaño de las partículas es similar cruzándose en un amplio rango. Lo cual permite designarlas con un código B, según catálogo, como se observa en la tabla 11.

- **Grado de Abrasión**

La arena es sumamente agresiva y su clasificación de abrasión está en el rango 7, clasificada como muy abrasiva, la granalla de acero se encuentra en el mismo rango de abrasión, grado 7.

- **Temperatura de operación y humedad relativa.**

La temperatura de operación está definida por la temperatura ambiente que según registros de clima es de 26.1° Celsius¹⁰, la humedad relativa más alta registrada ha sido del 98%.

Código del material según catálogo.


Se puede observar que la designación para un elevador de cangilón para arena arroja el código **B6-37**, lo cual indica que:

B₆: Sistema de transporte por banda, tamaño de partículas menor a 1/8”

37: Fluidez mediana con grado 3, y grado de abrasión 7.

Ver tabla 12.

Tabla 12. Clasificación de materiales para elevadores de cangilón y códigos recomendados de elevador.

				Materials Table			
Material	Density LBS/FT ³	Material Code	Recommended Elevator Series*	Material	Density LBS/FT ³	Material Code	Recommended Elevator Series*
Coffee, Roasted Bean	20-30	C½-25PQ	A, F	Sand Dry Bank (Damp)	110-130	B6-47	B, G
Coke, Breeze	25-35	C½-37	B, D	Sand Dry Bank (Dry)	90-110	B6-37	B, G
Coke, Loose	23-35	D7-37	D	Sand Foundry (Shake Out)	90-100	D3-37Z	B, G
Coke, Petrol, Calcined	35-45	D7-37	D	Shale, Crushed	85-90	C½-36	B, H
Copra, Cake, Ground	40-45	B6-45HW	A, C, F, G	Slag, Blast Furnace Crushed	130-180	D3-37Y	F
Copra, Cake, Lumpy	25-30	D3-35HW	A, C, F	Slate, Crushed — ½"	80-90	C½-36	F
Copra, Lumpy	22	E-35HW	A, C, F	Soda Ash, Heavy	55-65	B6-36	A, C
Copra, Meal	40-45	B6-35HW	A, C, F, G	Soda Ash, Light	20-35	A40-36Y	F, H
Cork, Granulated	12-15	C½-35JY	F, H	Sodium Phosphate	50-60	A-35	A, F
Corn, Cracked	40-50	B6-25P	F, H	Soybean, Cake	40-43	D3-35W	C
Corn Germ	21	B6-35PY	A, C	Soybean, Cracked	30-40	C½-36NW	A
Corn Grits	40-45	B6-35P	A, C	Soybean, Flake, Raw	18-25	C½-35Y	A, C
Commeal	32-40	B6-35P	A, C	Soybean, Flour	27-30	A40-35Mn	B, D
Corn Shelled	45	C½-25	E	Soybean Meal, Cold	40	B6-35	A, C
Corn Sugar	30-35	B6-35PU	A, C	Soybean Meal, Hot	40	B6-35T	A, C
Cottonseed, Cake, Lumpy	40-45	D7-45HW	A, C	Soybeans, Whole	45-50	C½-26NW	E
Cottonseed, Dry, Delinted	22-40	C½-25X	B, D	Sugar Beet, Pulp, Dry	12-15	C½-26	F, H
Cottonseed, Dry, Not Delinted	18-25	C½-45XY	B, D	Sugar Beet, Pulp, Wet	25-45	C½-35X	F, H
Cottonseed, Hulls	12	B6-35Y	F, G	Sugar, Raw	55-65	B6-35PX	A, C
Cottonseed, Meal, Extracted	35-40	B6-45HW	A, C	Trisodium Phosphate, Granular	60	B6-36	A, F
Cottonseed, Meats, Dry	40	B6-35HW	A, C	Wheat	45-48	C½-25N	E
Distiller's Grain, Spent Dry	30	B6-35	A, C	Wheat, Cracked	40-45	B6-25N	A, C
Dolomite, Crushed	80-100	C½-36	A, F	Wheat, Germ	18, 28	B6-25	A, C
Ebonite, Crushed	63-70	C½-35	F	Wood Chips, Screened	10-30	D3-45VY	B, D
Feldspar, Ground	65-80	A100-37	A, C, F,				

* Elevator Series Designation
A = Series 100 Chain D = Series 200 Belt G = Series 700 Belt
B = Series 100 Belt E = Series 500 Belt H = Series 800 Chain
C = Series 200 Chain F = Series 700 Chain

Fuente: Catalogo,Bucket elevators. Martin.Pdf.

⁹Catalogo Dunlop.

¹⁰ <http://clima.tiempo.com/clima-en-bucaramanga+paloneg-800940.html>

La selección del elevador se hace entrando con el valor de la capacidad en pies cúbicos por hora, para el caso tenemos 60 ft^3_h de abrasivo. La tabla de selección según la capacidad indica una capacidad máxima de 107 ft^3_h para el elevador **B43-139**, el cual se puede seleccionar debido a que el flujo de abrasivo es menor al del catálogo. Ver tabla 13.

Tabla 13. Selección del modelo de cangilón,

Capacity															
Elevator Number	Capacity In Cubic Feet per Hour \leftarrow	Buckets ¹		Belt Width	Speed In F.P.M.	Max ² Lump Size		Nominal ³ Casing Size	Head		Boot		Approx. Wt. (Lbs.)		Elevator Number
		Size	Spacing			100%	10%		Pulley Diameter ¹	Shaft RPM	Pulley Diameter	Shaft Diameter	Terminals Including Machinery	Inter-mediate ⁴ per Ft.	
B43-139	107	4 x 3	8	5	159	¾	1	8 x 18	8	76	8	1½	785	42	B43-139
B64-140	336	6 x 4	13	7	270	¾	2½	11½ x 39	24	43	16	1½	922	51	B64-140
B64-141	294	6 x 4	13	7	236			11½ x 35	20	45	16	1½	892	51	B64-141
B85-142	558	8 x 5	16	9	236	¾	3	13½ x 39	20	45	14	2	889	66	B85-142
B85-143	638	8 x 5	16	9	270			13½ x 42	24	43	16	2	1120	78	B85-143
B106-144	956	10 x 6	16	11	236	1	3½	15½ x 42	20	45	16	2	1130	76	B106-144
B106-145	1094	10 x 6	16	11	270			15½ x 48	24	43	20	2	1292	82	B106-145
B127-146S Staggered	4938	12 x 7	16	24	385	1¼	4	28 x 64S	42	35	30	2½	2345	141	B127-146S Staggered
B127-146	1540	12 x 7	18	13	270	1¼	4	17½ x 48	24	43	20	2½	1419	85	B127-146
B127-147	1791	12 x 7	18	13	314			17½ x 54	30	40	24	2½	1692	92	B127-147
B147-148	1864	14 x 7	18	15	270	1¼	4	19½ x 48	24	43	20	2½	1542	93	B147-148
B147-149	2168	14 x 7	18	15	314			19½ x 54	30	45	24	2½	1803	99	B147-149
B168-150	2409	16 x 8	18	18	236	1½	4½	22½ x 48	20	45	18	2½	1963	95	B168-150
B168-152	3204	16 x 8	18	18	314			22½ x 54	30	40	24	2½	2075	109	B168-152

¹ Based on 75% full bucket
² Includes casing, belt and buckets
³ Dimensions are in inches

Fuente: Catalogo, Bucket elevators. Martin.Pdf.

Según la tabla 13, de una vez se define el tamaño del cangilón, el espaciamiento entre estos, el ancho de la banda, la velocidad de la banda, tamaño de la carcasa nominal, diámetro del tambor, diámetro de ejes, velocidad del eje motriz y peso aproximado total, los cuales se resumen en las tablas 14, 15 y 16, las dimensiones del elevador seleccionado se pueden ver en la tabla 17 y la figura 48 permite observar dos vistas de su geometría, a continuación las figuras 49, 50 y 51 evidencian la modelación y renderizado del elevador.

Tabla 14. Resumen de Características del elevador seleccionado.

Unidades	Código elevador	Capacidad	Cangilón Tamaño Distancia	Ancho Banda	Velocidad de banda	
UK	B43-139	107	4x3	8	5	159
		[ft ³ /h]	[in]x[in]	[in]	[in]	[F.P.M]
Métricas	B43-139	3.0299	10.6x7.62	20.32	12.7	48.46
		[m ³ /h]	[cm]x[cm]	[cm]	[cm]	[m/min]

Tabla 15. Resumen de Características del elevador seleccionado.

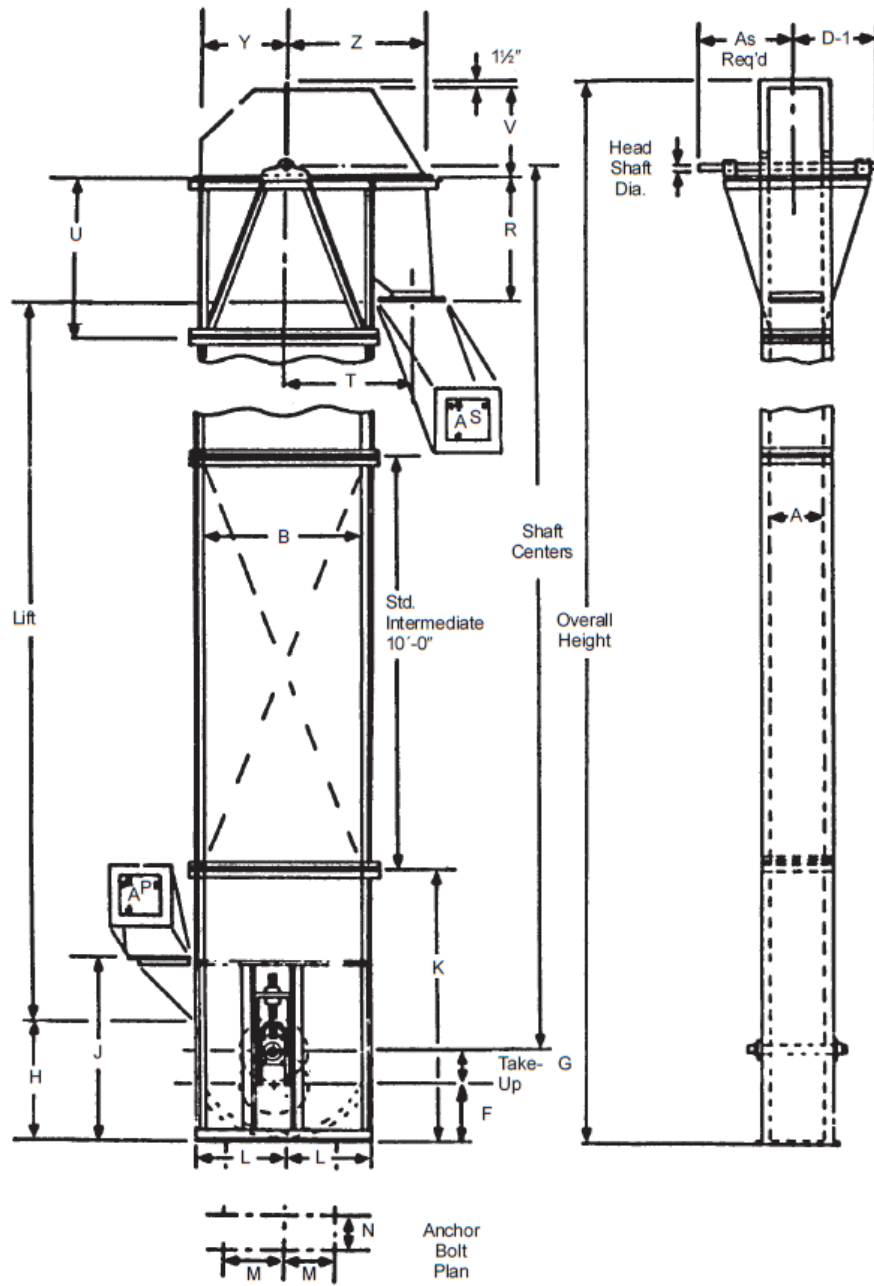
Unidades	Código elevador	Tamaño nominal carcasa	Cabeza		Inicio elevador	
			∅ Tambor	Velocidad Eje	∅ Tambor	∅ Eje
UK	B43-139	8x18	8	76	8	1 7/16
		[in]x[in]	[in]	[RPM]	[in]	[in]
Métricas	B43-139	20.32x45.72	20.32	76	20.32	3.65125
		[cm]x[cm]	[cm]	[RPM]	[cm]	[cm]

Tabla 16. Consumo de potencia sugerido.

Consumo de potencia
1 [HP]

Fuente: Catalogo, Bucket elevators. Martin.Pdf.

Figura 48. Dimensiones características del elevador.

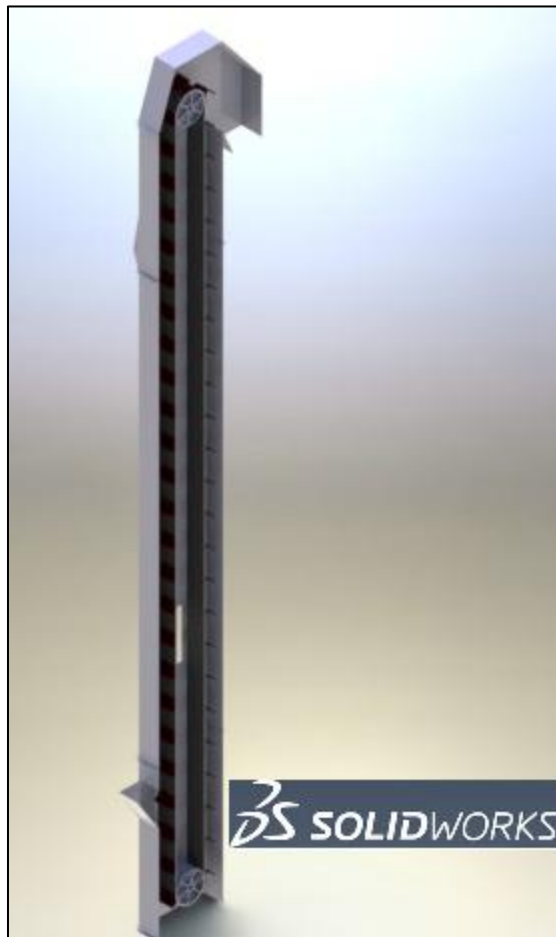


Fuente: Catalogo, Bucket elevators. Martin.Pdf.

Tabla 17. Dimensiones del elevador.

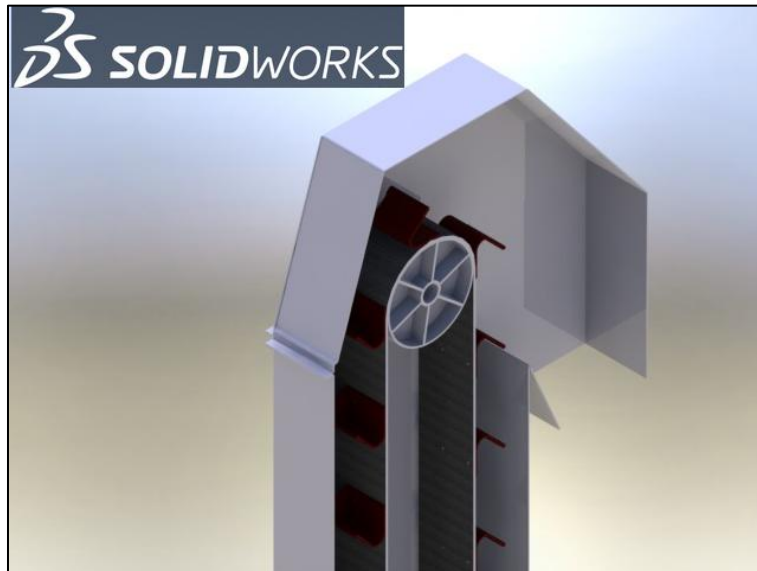
Dimensions ^① (In Inches)																		
Casing		Boot									Head							
A	B	F	G	H	J	K	L	M	N	P	R	S	T	U	V	Y	Z	D-1 ^②
8	18	9	6	27¼	36¼	42	9	6	10	6	15	8	17½	36	14	9	20¼	13

Figura 49. Modelado del elevador en Solidworks, basado en las dimensiones del catálogo. Renderizado e importado de Solidworks.



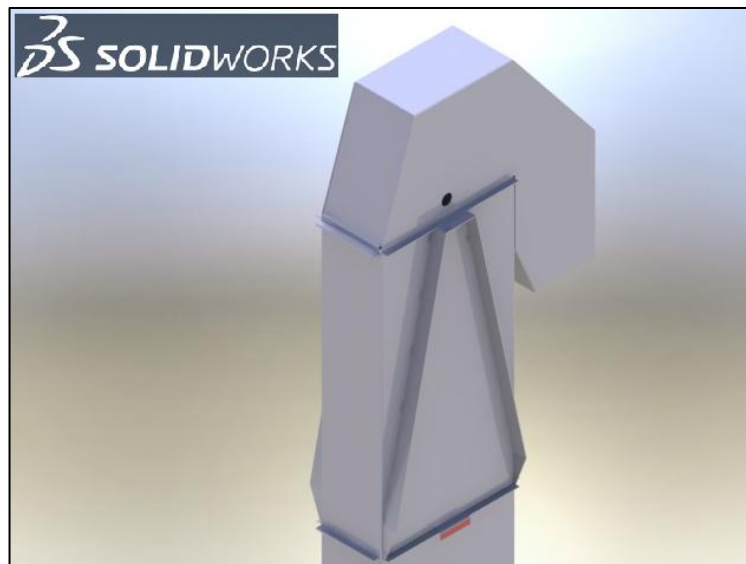
Fuente: Autor.

Figura 50. Modelado del elevador en Solidworks, Vista en corte Cabeza del elevador.



Fuente: Autor.

Figura 51. Modelado del elevador en Solidworks, Cabeza del elevador.



Fuente: Autor.

- **Cangilón**

El cangilón es el elemento que aloja la carga en su carrera ascendente. Según su construcción, pueden ser metálicos de chapa soldada, plástico, fibra, acero inoxidable o de fundición.

- **Selección del material del cangilón**

El cangilón de acero es ideal para el transporte de granos, sal, arena, granalla, ideal para materiales que puedan presentar formas irregulares con bordes afilados y para aplicaciones de trabajos en caliente, para nuestro caso se puede suponer que la temperatura de transporte es la temperatura ambiente.

- **Selección del tipo de cangilón**

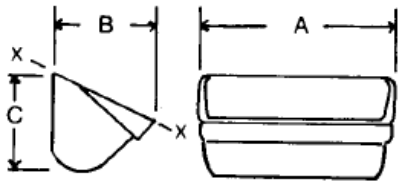
El cangilón tipo A-A, como el de la figura 52, se usa para diseños de descarga centrifuga, se puede utilizar con correa/banda o cadena, usado para elevar materiales de alta abrasión y de alta densidad como la granalla, ya que posee un diseño de borde reforzado a diferencia del simple diseño tipo A. La tabla 18 indica algunas características dimensionales del cangilón.

Figura 52. Cangilón Tipo A-A.



Fuente: Catalogo Tapco Inc.

Tabla 18. Dimensiones del cangilón

	Bucket Size			Weight Lbs.	Capacity cu. ft. X—X
	A	B	C		
	4	2¾	3	1.0	.01
	6	4	4¾	2.7	.03
	8	5	5½	4.8	.07
	10	6	6¾	7.7	.12
	12	7	7¾	12.0	.19
	14	7	7¾	13.9	.23
	16	8	8½	21.8	.34

Fuente: Catalogo Martin.

▪ **Fijación de los cangilones a la banda**

Según catalogo el número de pernos por cangilón debe ser de 2, su modo de fijación es como se ve en la figura 53. El diámetro del perno de se especifica según la tabla 19 y el renderizado del cangilón se muestra en la figura 54.

Tabla 19. Numero de pernos y tamaño del perno de fijación a la banda.

Elevator Number	Buckets Style AA Malleable		Bucket Bolts and Lock Washers (Norway Elevator Bolts)	
	Size (Inches)	Spacing (Inches)	Size (Inches)	Quantity
B43-139	4 x 3	8	¼ x 1	2 x (No. of Buckets)
B64-140	6 x 4	13	¼ x 1	2 x (No. of Buckets)
B64-141	6 x 4	13	¼ x 1	2 x (No. of Buckets)
B85-142	8 x 5	16	¼ x 1¼	5 x (No. of Buckets)
B85-143	8 x 5	16	¼ x 1¼	5 x (No. of Buckets)
B106-144	10 x 6	16	⅜ x 1¼	5 x (No. of Buckets)
B106-145	10 x 6	16	⅜ x 1¼	5 x (No. of Buckets)

Fuente: Catalogo Martin.

Figura 53. Fijación de los pernos al cangilón

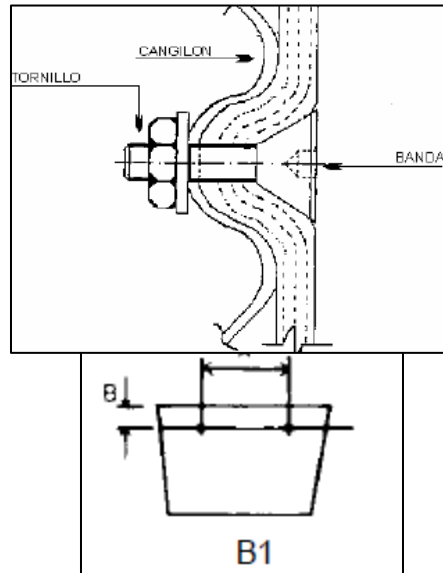


Figura 54. Modelado del cangilón, Renderizado e importado desde Solidworks.

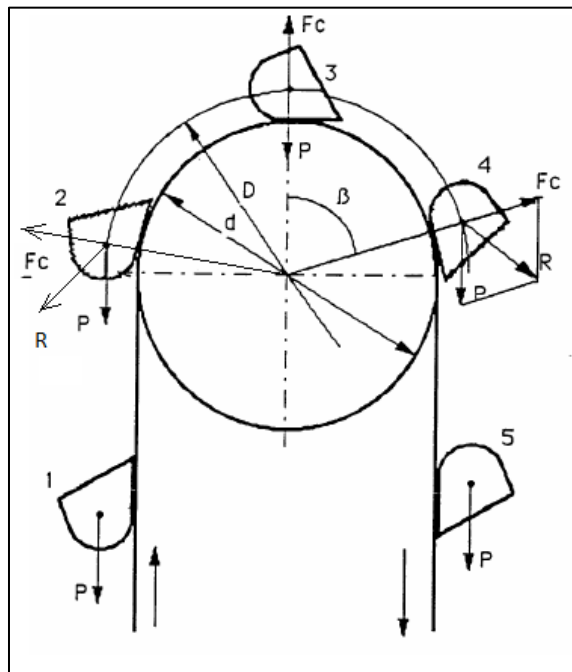


Fuente: Autor.

4.1.4 Análisis cuantitativo de la descarga.

Para corroborar que la descarga centrifuga será un hecho, deberá analizarse el cangilón 3, figura 55, ya que es desde este punto donde debe verificarse que el material se desprenderá, cuando la fuerza centrífuga iguala el peso del material en la dirección radial.

Figura 55. Análisis de descarga del elevador.



Fuente: Raúl Posso Soto, pág. 96.

Debe cumplirse la condición:

$$P * \cos \beta = F_c \quad (3)$$

$$P = m * g \quad (4)$$

Dónde:

P: Peso del material en el cangilón, N .

m: Masa del material en el cangilón, Kg .

g: Aceleración gravitacional, $\frac{m}{s^2}$

Donde la fuerza centrífuga está dada por:

$$F_c = \frac{2 * m * V_t^2}{D} \quad (5)$$

Por tanto, reemplazando (5) en (3), se obtiene:

$$P * \cos \beta = \frac{2 * m * V_t^2}{D} \quad (6)$$

Reemplazando (4) en (6) se obtiene:

$$\cos \beta = \frac{2 * V_t^2}{D * g}$$

Despejando la velocidad tangencial:

$$V_t = \sqrt{\frac{g * D * \cos(\beta)}{2}} \quad (7)$$

V_t: Velocidad tangencial, $\frac{m}{s}$.

El diámetro del tambor definido para el elevador seleccionado es de 20.32 [cm], ver tabla 15, por tanto podemos comparar la velocidad crítica, ver tabla 20, para que exista la descarga centrifuga y con la definida por el catálogo.

Tabla 20. Calculo de la velocidad mínima para descarga centrifuga.

$V_t = \frac{g * D * \cos \beta}{2} \quad (7)$ <p>D: Diámetro del tambor g: Aceleración gravitacional β:Angulo respecto a la vertical</p>	Velocidad mínima
	1 [m/s]
	0.2032[m]
	9.81[m/s]
	0°

Fuente: Autor.

Para velocidades menores a 1[m/s] la descarga centrifuga se dará para valores mayores a 0°, como la velocidad de catálogo es de 0.81 [m/s] el Angulo de descarga será de 49 °.

La velocidad teórica para descarga centrifuga a 0° del eje motriz deberá ser de:

$$n = \frac{60 * V_t}{\pi * D} \quad (8)$$

$$n = \frac{60 * 1}{\pi * 0.2032} = 94 [RPM]$$

La velocidad de catálogo, del eje es de 76 [RPM].

La velocidad definida por el catalogo se desprende de las consideraciones de abrasión del material, debido a que debe reducirse un poco la velocidad para evitar daños por erosión en los bordes del cangilón, por este motivo se concluye que los fabricantes tomen una velocidad menor a la crítica, mínima requerida para descarga centrifuga a cero grados.

4.1.5 Cálculo del número de cangilones.

El paso entre cangilones está definido por catálogo, el cual es de 8 [in] ó 20.32 [cm], aplicando la fórmula¹¹ (9) se determinará el número de cangilones y se comparará con el de catálogo:

$$Q = \frac{3.6 * C * Vt * \rho * \varphi}{Pa} \frac{Ton}{h} \quad (9)$$

Pa: Paso entre cangilones. Por calcular .

Q: Flujo volumétrico de material a transportar. $\frac{Ton}{h}$. Ver tabla 8.

C: Capacidad de cada cangilón, en litros.

La capacidad del cangilón se toma de la tabla 18, y es de 0.01 ft³ ó 0.283 Litros .

ρ : Densidad del material a transportar, $\frac{Ton}{m^3}$. Ver tabla 10. y es 1.6 $\frac{Ton}{m^3}$.

φ : Coeficiente de llenado, en porcentaje.

Definido como el 75% del volumen del cangilón

De la ecuación (9):

$$Pa = \frac{3.6 * 0.283 * 0.81 * 1.6 * 0.75}{2.67}$$

$$Pa = 0,367 \text{ m} ; Pa = 14,58 \text{ in}$$

$$Pa = \frac{3.6 * 0.283 * 0.81 * 1.6 * 0,75}{4.847}$$

$$Pa = 0,202 \text{ m} \quad Pa = 8 \text{ in} ;$$

¹¹ Raúl Posso Soto, pág. 105.

- **Longitud de la banda**

Una vez se comprobó el paso de los cangilones, y utilizando el valor definido por el catálogo, se determinara la longitud de la banda y algunas características de detalle, como el número de lonas de la banda y sus esfuerzos admisibles.

La longitud de la banda está dada por:

$$L = 2 * D_c + \pi * D \quad (10)$$

L = longitud de la banda. in .

L_e = longitud del elevador. in .

D_c : Distancia entre centros de los tambores. in .

D : Diámetro de los tambores. in .

Las dimensiones características se ven en la tabla 17.

$$L_e = 120 + K + V + U$$

$$L_e = 120 + 42 + 14 + 36 = 212 \text{ [in]}.$$

La altura aproximada del elevador es de 212 [in], esta altura resulta de sumar los valores característicos de dimensiones del elevador, y la distancia entre centros es de, ver figura 48 y tabla 17:

D_c : Distancia entre centros

$$D_c = 212 - F - V = 212 - 9 - 14$$

$$D_c = 189 \text{ [in]}$$

Por tanto se tiene que la longitud de la banda será de:

Tomando la ecuación (10)

$$L = 2 * 189 + \pi * 8$$

$$L = 403.13[in]$$

El número de cangilones se determina con la razón directa entre la longitud de la banda y el paso entre cangilones, de forma que:

$$Zc = \frac{L}{P} \quad (11)$$

$$Zc = \frac{403.13}{8}$$

$$Zc \cong 51 [Cangilones]$$

Como se aproximó a un número entero de cangilones y que sea mayor al número mínimo determinado, tendremos 51 cangilones, se recalculara entonces la longitud de la banda y la longitud entre los centros.

Tomando (11)

$$Lc = P * Zcc$$

$$Lc = 8 * 51 = 408 \text{ in}$$

$$Dcc = \frac{Lc - \pi * D}{2}$$

$$Dcc = 191.43[in]$$

Donde:

Zcc: Numero de cangilones corregido, 51.

P: paso entre cangilones, 8 [in/cangilón].

Lc = longitud de la banda corregida en pulgadas.

Dcc: distancia entre centros corregida, en pulgadas.

- **Características de la banda**

Existe una relación entre el número de lonas de la banda y las características propias del material a transportar ver tabla 22, o como ya se conoce el diámetro del tambor según la tabla 21, se puede definir tentativamente el número de lonas.

Tabla 21. Relación entre el número de lonas y el diámetro del tambor.

<u>DIÁMETRO MÍNIMO DEL TAMBOR</u>	<u># DE TELAS</u>
500	4
600	5
750	6
900	7
1100	8

Fuente: Raúl Posso Soto, pág. 85

Puede definirse mediante el ancho de la banda el cual se puede calcular con la siguiente expresión práctica sugerida por el autor Raúl Posso Soto:

$$\text{Ancho de la banda} = \text{Ancho del cangilon} + 3[in] \quad (12)$$

$$\text{Ancho de la banda} = 4 + 3 = 7[in]$$

Con el ancho de la banda también podría definirse el número de lonas de la banda según la tabla 22.

Tabla 22. Numero de lonas como función del ancho de banda

ANCHO DE BANDA mm	MATERIALES MEDIOS, TALES COMO CARBÓN 60-110 Lb/ft ³	MATERIALES PESADOS Y ABRASIVOS, TALES COMO MINERAL EN TROZOS
Hasta 300 mm	4 – 5	5
300 – 500	5 – 6	6
500 – 800	6	7
Más de 800	7	8

Fuente: Fuente: Raúl Posso Soto, pág. 85

4.1.6 Calculo de la potencia.

Para determinar la potencia partimos del concepto de energía por unidad de tiempo, la cual se puede simplificar si se determina la fuerza máxima de tensión de la banda incluyendo el peso de los cangilones y el material a transportar en el punto crítico y multiplicamos por la velocidad tangencial de la banda de la forma:

$$Pot = FT_{max} * V_t \quad (13)$$

Para cálculos prácticos, la potencia se reduce a determinar la fuerza de accionamiento del tambor motriz con la siguiente expresión¹²:

$$FT_{max} = \frac{Q * (H + H_b)}{3.6 * V_t} \quad (14)$$

¹²Catalogo Dunlop. Pág. 104 Pdf.

$$FT_{max} = \frac{4.847 * (5.38 + 7.24)}{3.6 * 0.81}$$

$$FT_{max} = 21 \text{ [Kg-f]}$$

Dónde:

H: Altura de elevación, en metros.

Ho = Altura ficticia, como factor dado por el sistema de carga.

Pot = potencia de accionamiento. En [CV] ó [Hp]

K: Coeficiente como función del ángulo de abrace., a 180° K = 2.

La potencia requerida en el eje de accionamiento será pues de:

$$Pot = \frac{FT_{max} * vt}{75 * 0.75} \quad Cv \quad (15)$$

$$Pot = \frac{21 * 0.81}{75 * 0.5} \quad [CV]$$

$$Pot = 0.45 [CV]$$

Ó

$$Pot = 0.44 \text{ Hp}$$

Con una baja eficiencia de 50% definida por recomendación del catálogo de Dunlop Pág. 104. Se establece que la potencia de consumo requerida será de 0.44 [Hp].

El valor de potencia de consumo definido por el catalogo es de 1[Hp], se presume que el consumo adicional de potencia es debido a ineficiencias del sistema, que en el análisis teórico básico no se tendrán en cuenta.

La tensión máxima de la banda será:

$$T_{max} = FT_{max} * K \quad (16)$$

Donde K es el coeficiente para el tambor motriz, dependiendo de las condiciones físicas de este y del ángulo de abrasión para la polea toma un valor de K=2.

De (16)

$$T_{max} = 21 * 2$$

$$T_{max} = 42 [Kg - f]$$

Los resultados obtenidos son aproximados, la potencia nominal del catálogo define una potencia de consumo de 1 [hp].

El esfuerzo máximo admisible de la banda es:

$$Tu = \frac{T_{max}}{AnB} \quad (17)$$

AnB: Ancho de la banda, 7[in] ó 17.78[cm].

De (17)

$$Tu = \frac{42}{17.78} = 2.36 \frac{Kg}{cm}$$

El valor admisible de tensión por lona para una banda de

Poliéster – Nylon es de $TL = 8.3 \text{ [Kg/cm]}$

Ver tabla 23.

Tabla 23. Valores admisibles por lona, para la banda de transporte.

VALORES DE TENSIÓN ADMISIBLE EN CADA LONA (TL), EN KG/CM.	
TIPO DE LONA	TL
Algodón "L" (28 oz)	5,0
Algodón "M" (32 oz)	5,8
Poliester-Nylon	8,3

Fuente: http://www.kauman.com/es/products/calc_elevadores_es.asp

El número de lonas requerido, tomando un factor de seguridad de 14^{13} , es decir:

$$\eta = \frac{T_{umax}}{T_u} = 14 \quad (17)$$

Dónde:

η : factor de seguridad.

$$T_{umax} = 14 * T_u = 33.07 \text{ [Kg/cm]}$$

Será de:

$$\frac{T_{umax}}{T_l} = \frac{33.07}{8.3} \cong 3.98 \text{ [lonas]}$$

Lo que bajo el criterio de selección de las lonas como función de la densidad del material es bastante cercano. Se dejarán las 4 lonas por banda.

¹³http://www.kauman.com/es/products/calc_elevadores_es.asp

4.2 SELECCIÓN DE LA BANDA TRANSPORTADORA.

Es indispensable seleccionar o diseñar los componentes de la banda transportadora ya que de las alternativas postuladas y bajo criterios a juicio de expertos en el tema de transporte de materiales se empleara la banda transportadora como sistema principal de recuperación del abrasivo, la banda llevara el material hacia el elevador de cangilones, es indispensable hacer un recorrido conceptual para esclarecer los parámetros relacionados al diseño o selección de este sistema de transporte y recuperación del abrasivo.

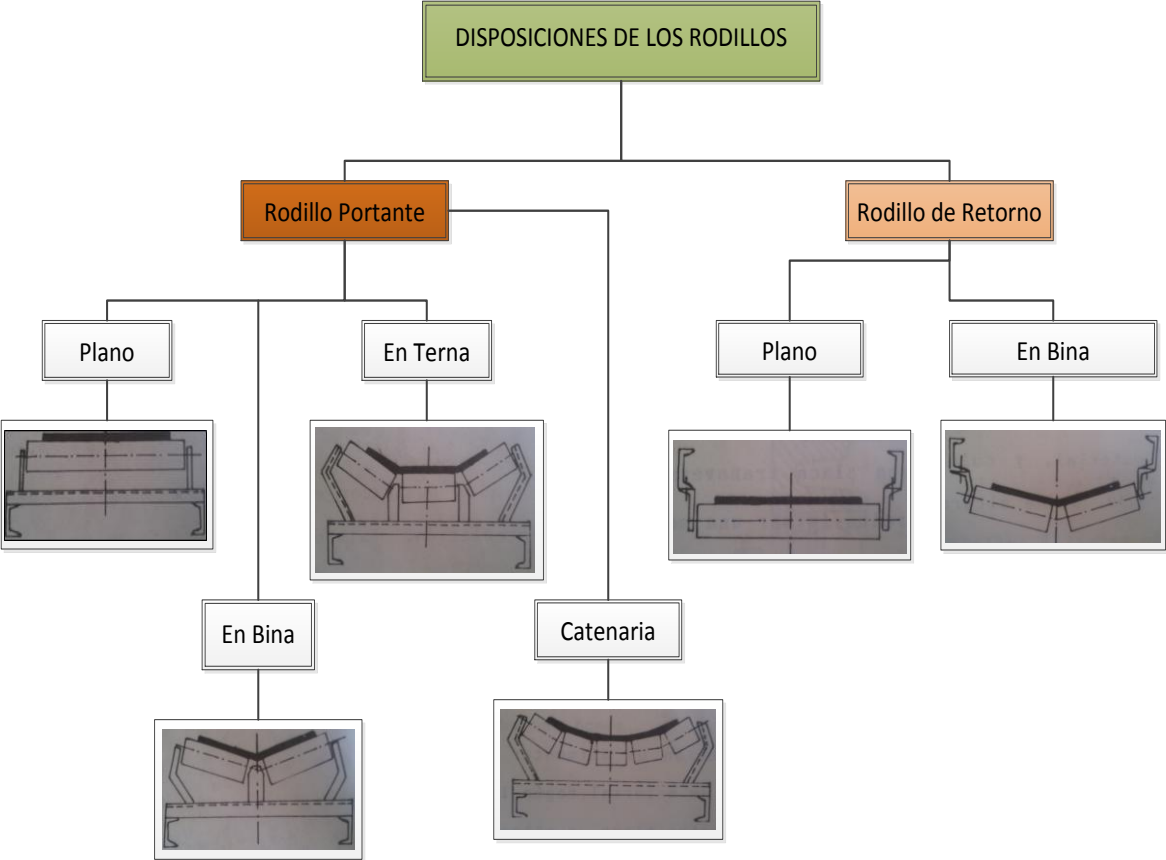
Las bandas transportadoras son sistemas de transporte continuo, que permiten trabajar en largas distancias, permiten una gran flexibilidad respecto al transporte de materiales abrasivos y pueden acomodarse fácilmente a las características del espacio de trabajo.

Se pueden citar aspectos importantes de este sistema de transporte, relacionados al fácil mantenimiento como consecuencia de su diseño robusto, operación silenciosa y gran capacidad de transporte.

4.2.1 Tipos de bandas transportadoras.

La configuración y diseño de las bandas transportadoras puede ser muy variada, a continuación se hace una clasificación simplificada en la que se hace alusión a la disposición de los rodillos portantes y de retorno, como se muestra en el diagrama 5. La siguiente clasificación está hecha haciendo referencia al tipo de tensado y la trazabilidad de las mismas, como se muestra en el diagrama 6.

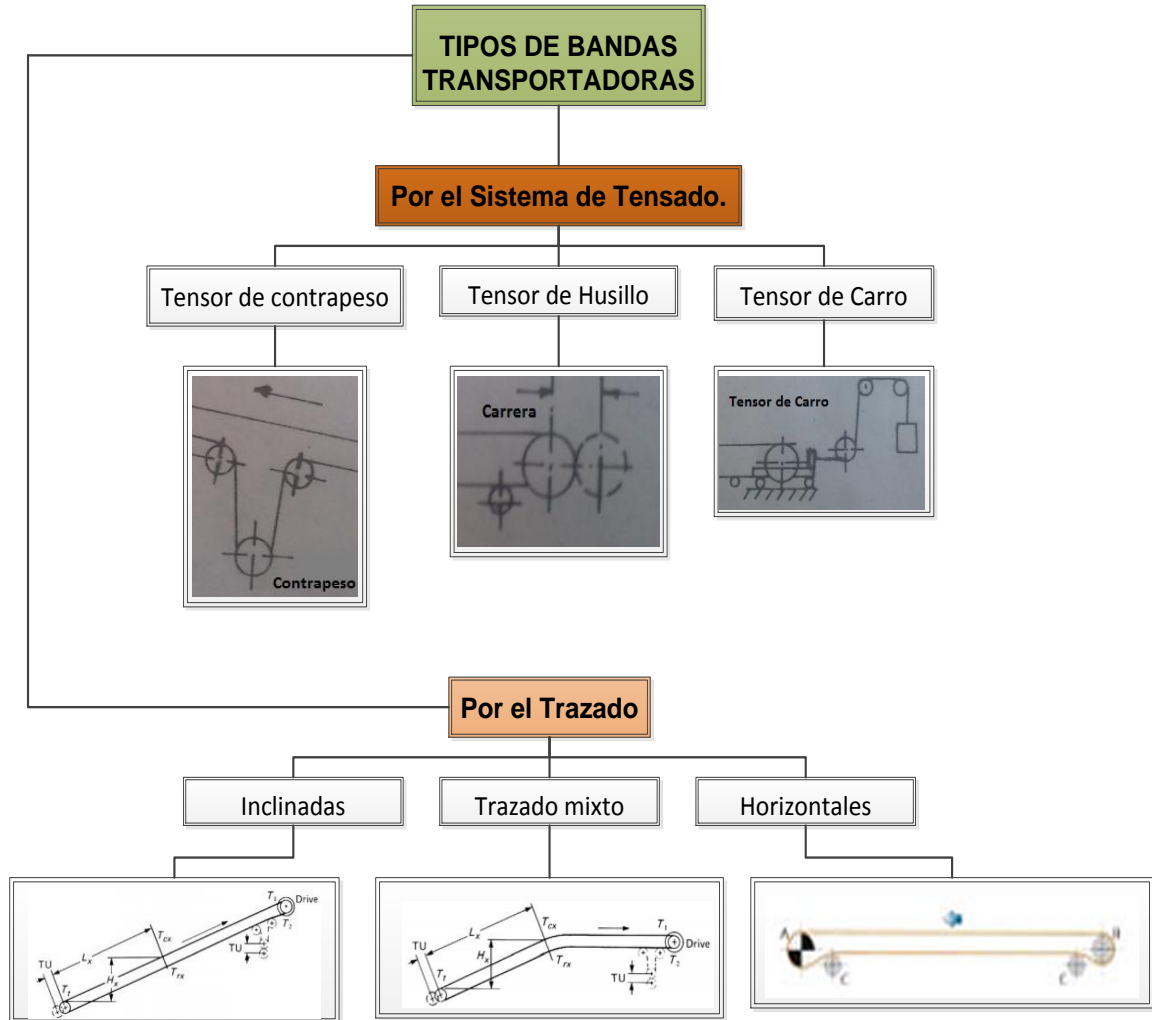
Diagrama 5. Disposición de los rodillos.



Fuente: autor

Fuente imágenes: Tomadas y adaptadas del libro de Raúl Posso Soto.

Diagrama 6. Clasificación de las bandas transportadoras.



Fuente: autor

Fuente imágenes: Tomadas y adaptadas del libro de Raúl Posso Soto.

4.2.2 Partes de la banda transportadora.

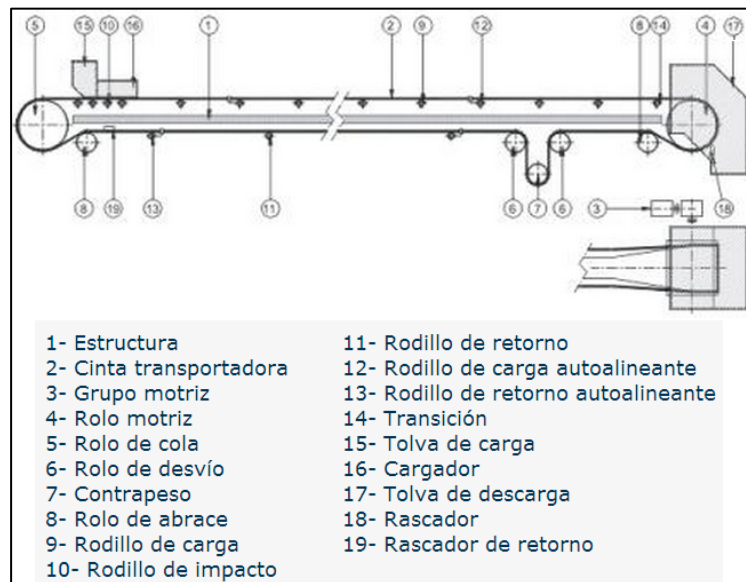
La figura 56, muestra una imagen de una banda transportadora típica, y en la figura 57 se puede ver un listado de partes.

Figura 56. Banda transportadora.



Fuente: <http://www.ar.all.biz/cintas-transportadoras-g50817>

Figura 57. Partes de la banda transportadora.



Fuente: <http://www.innova-ing.com/productos/ver/cintas-transportadoras-y-componentes>.

4.2.3 Proceso de diseño de la banda transportadora.

El proceso de diseño de la banda transportadora cubre gran cantidad de variables, es por esto que se ira hablando del cálculo secuencial parte por parte, para no dejar escapar ningún detalle. Todo el modelo de cálculo está basado en la norma DIN 22101¹⁴.

El motor primario del sistema transportador debe superar las fuerzas resistivas que impone el conjunto total de parámetros implicados; carga de material a transportar, efectos de fricción entre los polines y la banda, la fricción de la banda y los tambores, el peso de la banda, condiciones especiales de ascenso o descenso de la carga, en fin para el diseño de la banda transportadora se mostrara paso por paso el método de cálculo y se determinaran los parámetros específicos necesarios para definir el diseño en su totalidad.

4.2.3.1 Calculo de la potencia requerida.

A continuación se mostrara el proceso de cálculo de la potencia requerida en los tambores y en el motor primario.

- **Potencia requerida en funcionamiento continuo.**

La potencia requerida en el tambor primario para superar las resistencias al movimiento del sistema de transporte está definida por la siguiente expresión:

$$P_w = F_w * v_t \quad (18)$$

¹⁴ Norma para el diseño de correas transportadoras.

Dónde:

P_w : Potencia Requerida en el tambor w ó Hp .

v_t : velocidad de la banda. [m/s]

F_w : Resistencia total al movimiento en el recorrido de la cubierta superior y de retorno en N .

La potencia requerida por el motor primario será:

$$P_{Merf} = \frac{P_w}{\eta_{ges}} \quad (19)$$

P_{Merf} : Potencia total requerida por los motores en w ó Hp .

η_{ges} : Eficiencia global de la transmisión.

$\eta_{ges} = 0,65$ (Por calcular como función del sistema de transmisión)

▪ **Parámetros conocidos:**

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$\rho_{sandSI} = 1600 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{sand} = 1,6 \frac{ton}{m^3}$$

$$l = 14 \text{ m}$$

g : Aceleracion gravitacional.

l : Longitud de la correa, desde los centros de los tambores.

Valor asumido como parametro inicial de diseño, dado por la longitud disponible de 17.5 m en el área de trabajo, $17.5 \times 10 \text{ [m}^2\text{]}$.

ρ_{sandSI} : Densidad de la arena seca SI.

En este punto se asumió la distancia entre centros de 14 metros ya que la longitud disponible a lo largo del espacio de trabajo es de 17.5 [m], lo cual indica que queda un claro de 3.5 [m] para ubicación de la banda.

$$F_w = F_H + F_N + F_{ST} + F_S \quad (20)$$

F_w : Resistencia al movimiento en estado de funcionamiento continuo. [N]].

F_H : Resistencias primarias totales, toma en cuenta cubierta superior y retorno. N .

F_N : Resistencias secundarias totales. [N].

F_{ST} : Resistencias causadas por diferencias de altura entre centros de los tambores. N .

F_S : Resistencias especiales. [N].

▪ **Calculo de F_H**

Esta fuerza hace referencia a todas aquellas resistencias definidas por los efectos de rozamiento tanto en la cubierta superior como en la inferior, la denominaremos la fuerza primaria.

$$F_H = f * l * g * m_R + 2 * m_G + m_L * \cos \delta \quad (21)$$

Dónde:

l: Longitud de la correa, desde los centros de los tambores.

f: Factor de fricción para la cubierta superior y de retorno. Adimensional.

m_R: Masa relativa relacionada a la longitud de las piezas giratorias de los polines. [Kg/m].

m_C: Masa relativa de la correa transportadora. [Kg/m]

m_L: Masa relativa a la cantidad de material a transportar. [Kg/m]

δ: Inclinación de la banda transportadora. [Grados]

▪ **Angulo de inclinación. δ .**

El ángulo de inclinación máximo de la banda transportadora para este tipo de material, arena sílice seca, es de 12 grados¹⁵. Inicialmente se tomara un ángulo de 2 grados lo que evitara una mayor profundidad de perforación del piso para la instalación de la banda.

$$\delta = 2^\circ$$

¹⁵Tabla 1 Libro de Raúl Posso Soto pág. 60.

- **El factor de fricción. f .**

El factor de fricción introduce los efectos de las resistencias en el movimiento, provee información de la resistencia a la rotación de los polines, resistencia de la banda, y la resistencia de impresión del material transportado.

El valor recomendado se tomó de la tabla 24. En el que bajo criterios subjetivos se asumió un valor de 0.018.

$$f = 0.018$$

Tabla 24. Factor de fricción.

Características	Clasificación de características		
Fricción interna del material transportado	medio	menor	alto
Alineación del transportador	medio	bueno	malo
Tensión de la correa	medio	alto	bajo
Condiciones de funcionamiento (polvoriento, pegajoso)	medio	bueno	malo
Diámetro del polín	108 a 159	> 159	< 108
Espacio entre estaciones de polines en el recorrido de la cubierta superior en mt.	1.0 a 1.5	< 1.0	> 1.5
Espacio entre estaciones de polines en el recorrido de la cubierta de retorno en mt.	2.5 a 3.5	< 2.5	> 3.5
Velocidad de la correa m/s	4 a 6	< 4	> 6
Angulo del canal en °	25 a 35	< 25	> 35
Temperatura ambiente en °C	15 a 25	> 25	< 15
Valor de fricción f	Valor guía ≈ 0.020	Como resultado	
		Una disminución	Un aumento
		Del valor de fricción f	
		Menor a ≥ 0.010	Mayor a ≤ 0.040

Fuente: Catalogo Phoenix, Fundamentos para el diseño de bandas transportadoras.

- **Calculo de m_L**

$$m_L = \frac{Q}{vt} \quad (22)$$

Dónde:

m_L : masa relativa al material a transportar. [Kg/m].

Q : Flujo másico en [Kg/s].

vt : Velocidad de la banda. [m/s].

- **Flujo másico critico Q**

En este paso de diseño se había determinado un flujo másico específico, relativo a el rendimiento que la empresa quiere obtener en el proceso de limpieza de las superficies el cual es de 0.75 [Kg/s] para un rendimiento de 53 [m^2/h] aproximadamente, el flujo máximo que el elevador de cangilones puede manejar es de 1.35 [kg/s], correspondiente a un rendimiento de 90 [m^2/h], para efectos de diseño y según el catalogo el transportador de banda más pequeño tiene una capacidad de hasta 72 [m^3/h], para un ángulo máximo de los polines de 20°, es por esto que se realizó una extrapolación en la tabla 25, para determinar el flujo máximo para una banda de 400 mm, este ancho de banda corresponde al valor más pequeño encontrado en la mayoría de los catálogos estudiados¹⁶ y que coincide con un resultado lógico en un margen de flujo aceptable y positivo, se realizó un prueba de extrapolación para un ancho de banda de 300 mm, el flujo obtenido no está en un rango lógico de aplicación.

¹⁶Catalogo Dunlop, Ingeniería.Pág.36. Pdf, Pág. 113.

Tabla 25. Capacidad de transporte.

Ancho de la correa B en mm	Longitud l_M del tubo del polín transportador en mm	Ángulo del canal λ de la correa				
		0°	20°	25°	30°	35°
500	200	39	72	79	85	90
650	250	69	132	145	155	164
800	315	108	207	226	243	257
1000	380	174	337	369	396	419

Fuente: Catalogo Phoenix, Fundamentos para el diseño de bandas transportadoras.

Al extrapolar el valor tomando como referencias de cálculo los anchos de banda de 500 y 650 [mm], con sus respectivos flujos de 72 y 132 [m^3/h], para una velocidad de referencia de 1[m/s], obtenemos un flujo de 32[m^3/h], cuyo valor debe corregirse multiplicándolo por la velocidad de 1.68 [m/s], valor de velocidad que se explica en el siguiente paso de cálculo.

$$32 * 1.68 = 53.76 \frac{m^3}{h}$$

$$53.76 \frac{m^3}{h} * 1.6 \frac{ton}{m^3} = 86.016[ton/h]$$

$$Q = 23.89[Kg/s]$$

Es evidente que la capacidad de la banda transportadora sobrepasa el valor límite calculado como función del rendimiento exigido por la empresa, algunas

recomendaciones de expertos¹⁸ aseguran que este punto carece de importancia, obviamente si la banda transporta cumple con los requerimientos de transporte de material de diseño. Según las recomendaciones si se analiza el bajo costo de mantenimiento y bajo consumo energético, de la banda a lo largo de su vida útil de trabajo estos compensarían la inversión inicial, ya que si a diferencia se usara un arreglo de tornillos sinfín los costos de mantenimiento en operación no justificarían su inversión inicial de bajo costo, si a la larga el sistema sufrirá daños causados por la abrasión, y los protocolos de mantenimiento concluirían que se requiere una menor inversión pero mayores costos de mantenimiento con este tipo de arreglo.

▪ **Velocidad de la banda vt**

La velocidad de la banda ha sido definida en base a los valores estandarizados por la norma, ver tabla 26, según velocidades recomendadas para materiales finos y de peso medio como la arena varían en un rango de 1.27 a 1.52¹⁹ [m/s] para tomar el valor estándar se optara por un valor de 1.68²⁰ [m/s] para prevenir que la arena no se pegue a la banda por alguna condición no deseada de humedad.

$$vt = 1.68[m/s]$$

Por tanto de (22):

$$m_L = \frac{23.89}{1.68} = 14.2[Kg/m]$$

¹⁸Asesor en ingeniería de proyectos Axis, en la etapa de búsqueda de información.

¹⁹Tabla 2 Libro de Raúl Posso Soto.

²⁰ Fuente: Catalogo Dunlop ingeniería. Pdf.

Tabla 26. Velocidades estándar recomendadas.

Speeds V (m/s)	
0.42 - 0.52 - 0.66 - 0.84 - 1.05 - 1.31 - 1.68	
2.09 - 2.62 - 3.35 - 4.19 - 5.20 - 6.60 - 8.40	
Duty	v (m/s)
Unit Loads, Assembly Lines	≤ 1.68
Mobile Conveyors	0.52 - 1.68
Very dusty loads such as Flour, Cement	≤ 1.31
Ash and Refuse	≤ 1.68
Grain, Crushed Limestone Gravel, Sand Readymix	1.05 - 2.09
Ores, Bituminous Coal, Sinter Storage and transhipment, Power Stations	1.31 - 3.35
Long distance conveying, overburden Brown coal	2.62 - 6.60
Thrower belts	≥ 8.40
Steep gradient belts Type CHEVRON and HIGH CHEVRON	0.84 - 2.62

Fuente: Catalogo Dunlop ingeniería. Pdf.

- **Ancho de la banda B**

El ancho de la banda se define por las características del material a transportar, debido a las bajas condiciones de carga máximas requeridas se buscara el diseño más compacto posible, según recomendaciones encontradas en varios catálogos el ancho mínimo de banda oscila entre 400[mm] y 500[mm] ²¹.

$$B = 400[mm]$$

²¹Ver tabla 2 Libro Raúl Posso Soto, pág. 63

▪ **Calculo de m_R**

Masa relativa a la longitud de los componentes del polín giratorio en ambos recorridos.

$$m_R = \frac{m_{Ro}}{I_{Ro}} + \frac{m_{Ru}}{I_{Ru}} \quad (23)$$

Dónde:

m_{Ro} : Masa de los componentes giratorios de un conjunto de polines en la cubierta superior. Kg .

I_{Ro} : Espacio entre las estaciones de los polines en recorrido superior. m .

m_{Ru} : Masa de los componentes giratorios de un conjunto de polines en la cubierta inferior. Kg .

I_{Ru} : Espacio entre las estaciones de los polines en recorrido inferior. m .

Los valores guía para la masa de los componentes del polín giratorio se muestran en la tabla 27. Se ha seleccionado para un diámetro de polín estándar de 63.5 [mm], como lo indica el recuadro.

Tabla 27. Valores guía para la masa de los componentes del polín giratorio.

Ancho B de Correa en mm	Diámetro d_p de polín exterior en mm				
	63.5	89	108	133	159
400	5.0 / 4.2 / 3.2	7.5 / 6.4 / 5.2			
500	5.6 / 4.6 / 3.6	8.4 / 7.4 / 6.0			
650	6.3 / 5.2 / 4.4	9.6 / 8.5 / 7.2	12.2 / 10.7 / 8.9		
800		11.1 / 9.8 / 8.8	14.1 / 12.3 / 10.9		
1000		12.6 / 12.0 / 10.4	16.0 / 15.0 / 12.8	24.6 / 21.6 / 17.4	
1200			18.6 / 16.9 / 15.3	27.6 / 24.0 / 20.4	34.5 / 30.0 / 25.1
1400			20.4 / 18.8 / 17.2	30.0 / 26.4 / 22.8	37.5 / 32.8 / 28.0

Fuente: Catalogo Phoenix, Fundamentos para el diseño de bandas transportadoras.

Los valores se enlistan a continuación:

$$m_{Ro} = 5,0[\text{kg}] \quad (\text{Tabla 27, ancho de correa } 400\text{mm, polín } 63,5\text{mm})$$

$$m_{Ru} = 4,2 \text{ kg} \quad (\text{Tabla 27, ancho de correa } 400\text{mm, de polín } 63,5\text{mm})$$

$$I_{Ro} = 1,5[\text{m}] \quad (\text{Distancia recomendada tabla 10 } \text{posso} \text{ pág. 71})$$

$$I_{Ru} = 3,0[\text{m}] \quad (\text{Distancia recomendada tabla 10 } \text{posso} \text{ pág. 71})$$

Por tanto de (23):

$$m_R = \frac{5}{1.5} + \frac{4.2}{3}$$

$$m_R = 4.733[\text{Kg/m}]$$

- **Calculo de m_G**

Esta masa relativa a la longitud de la banda transportadora, es función del ancho de la banda y del área relativa a la masa de la correa.

$$m_G = B * m_{GG} \quad (24)$$

Para determinar el parámetro m_{GG} [Kg/m^2], se debe definir primero el número de lonas requerido, para realizar este cálculo emplearemos la siguiente relación:

$$Pt = Q * \frac{H}{270} + f * \frac{L + L_o}{270} * Q + 3,6 * vt * Pm \quad (25)$$

Dónde:

Pt: Potencia aproximada de consumo. CV .

H: Diferencia de altura entre cilindros. m . H < 0, en descenso.

L: Longitud de la banda entre centros de los tambores. m .

L_o: Longitud de corrección m entre 15 y 25 m . (Pág 37 Raul Posso Soto).

*Pm: Suma de los pesos de las partes móviles; m_R + 2 * m_G + m_L*

Donde se asume un valor de *m_G* inicialmente basado en el número de lonas recomendado en la tabla 4 del libro de Raúl Posso Soto, el cual es de 4 lonas, para el tipo de material a transportar, el valor de *m_G* es de 3.3[Kg/m].

Lo que se hará es determinar esta potencia aproximada de consumo y basado en este cálculo, se determinara la tensión máxima de la banda, con la cual se hallara y comparara el número de lonas con las siguientes expresiones:

$$F_{tt} = \frac{Pt * 75}{vt} \quad (26)$$

$$T_{tt} = F_{tt} * K \quad (27)$$

$$ZZ = \frac{S * T_{tt}}{100 * B * \delta_{lona}} \quad (28)$$

Dónde:

F_{tt}: Tension maxima de la banda. Kg - f .

T_{tt}: Carga maxima en el ramal superior de la banda. Kg - f .

K: Factor de abrazo, 1.85, Tensor de tornillo. Tomado de pág 64 Tabla 3. Raúl Posso.

S : Factor de seguridad. 11.

B : Ancho de la correa. 0.4 [m].

δ_{lona} : Esfuerzo admisible para una lona. [Kg/cm]

Q_t : Flujo masico en [ton/h]

De (25)

$$Pt = \frac{-86 * 0.5}{270} + 0.018 * \frac{(14 + 25)}{270} * 86 + 3,6 * 1.68 * 25.55$$

$$Pt = 0.88 \text{ [CV]}$$

De (26)

$$F_{tt} = \frac{0.88 * 75}{1.68} = 39.28 \text{ [Kg - f]}$$

De (27)

$$T_{tt} = 39.28 * 1.85 = 72.67 \text{ [Kg - f]}$$

De (28)

$$ZZ = \frac{11 * 72.67}{100 * 0.4 * 5} = 3.99 \text{ [lonas]}$$

Por tanto la recomendación para el número de lonas es bastante aproximada a la calculada. Entonces el valor de m_G se puede definir con la siguiente tabla para valores estandarizados de m_{GG} .

Tabla 28. Área relativa de la correa con cubierta tipo $m_{GG} \frac{Kg}{m^2}$.

Correa	Espesor d_{Dg} de cubierta en mm		Espesor d_c de correa en mm	Área relativa a la masa de la correa con cubierta tipo m'_c en kg/m^2 con tipo de cubierta	
	Parte superior	Parte inferior		X	Y
Correas de 2 telas					
EP 400/2	4	2	9.5	11.0	11.5
EP 630/2	4	2	10.5	12.0	12.5
EP 800/2	4	2	11.0	12.5	13.0
Correas de 3 telas					
EP 400/3	4	2	9.0	10.0	10.5
EP 500/3	6	3	12.0	13.5	14.0
EP 630/3	5	2	10.5	12.0	12.5
Correas de 4 telas					
EP 500/4	4	2	10.0	11.5	12.0
EP 630/4	6	3	13.0	14.5	15.0
EP 800/4	7	3	14.5	16.5	17.0
EP 1000/4	7	3	16.5	18.0	18.5

Fuente: Catalogo Phoenix, Diseño de bandas transportadoras.

Las cubiertas tipo x o y definen la calidad de cubierta, se tomara una cubierta tipo x resultando en el siguiente valor de m_G :

$$B = 0,4 \text{ m}$$

$$m_{GG} = 11.5 \frac{kg}{m^2}$$

$$m_G = 0.4 * 11.5 = 4.6 \text{ [Kg/m]}$$

- **Calculo de F_N Resistencias secundarias.**

Debido a que la banda es corta en comparación con los diseños tradicionales, debe introducirse un factor de corrección, ver tabla 29, para determinar las resistencias secundarias.

$$F_N = C_I - 1 * F_H \quad (29)$$

Tabla 29. Factor de corrección por longitud.

L (m)	3	4	5	6	8	10	13	16	20
C	9.0	7.6	6.6	5.9	5.1	4.5	4.0	3.6	3.0
L (m)	25	32	40	50	63	80	90	100	120
C	2.9	2.6	2.4	2.2	2.0	1.92	1.86	1.78	1.70
L (m)	140	160	180	200	250	300	350	400	450
C	1.63	1.56	1.50	1.45	1.38	1.31	1.27	1.25	1.20
L (m)	500	550	600	700	800	900	1000	1500	2000
C	1.20	1.18	1.17	1.14	1.12	1.10	1.09	1.06	1.00

Fuente: Catalogo Dunlop ingeniería. Pdf.

Se realiza la interpolación obteniendo un valor aproximado de corrección de

$$C_I = 3,9$$

- **Calculo de F_{ST} Resistencia del material transportado.**

$$F_{ST} = hl * g * m_G + m_L \quad (30)$$

$$hl = -0,5$$

La altura resulta de determinar el seno de los 14 metros entre la distancia entre centros con un ángulo de declinación de 2°.

Donde:

h_i : Diferencia de alturas entre tambores es negativo debido al descenso de la banda.

- **Calculo de F_S**

Para el diseño que se está realizando no existen fuerzas especiales que deban considerarse.

$$F_S = 0 \quad (29)$$

- **Calculo fuerzas de transmisión en arranque y frenado.**

$$F_{al} = a_A * l * C_{RI} * m_R + m_G + m_L \quad (30)$$

$C_{RI} = 0,9$ (Recomendación catalogo Phoenix, pág 12)

C_{RI} : Coeficiente para calcular las masas de los polines reducidas a su periferia.

a_A : Aceleracion alcanzada en el arranque. [m/s^2]

- **Puesta en marcha.**

En este paso se calculara la aceleración de arranque y el tiempo requerido para alcanzarla. Es importante determinar las fuerzas en el arranque y verificar si son o no críticas respecto a las fuerzas en estado continuo.

Dónde:

P_A : Relacion de las fuerzas perifericas de la polea y las resistencias al movimiento.

$$P_A = \frac{F_{TrA}}{F_w} \quad (31)$$

Según recomendaciones de la norma DIN 22101 para evitar tensiones altas en la banda se toma que $P_A \leq 1,7$. (Pág. 12 catalogo Phoenix).

$$P_A = 1,7$$

- Aceleración de la puesta en marcha.

Como:

$$F_{aA} = a_A * l * C_{RI} * m_R + m_G + m_L \quad (32)$$

F_{aA} : Fuerza de aceleración en la puesta en marcha. N

a_A = aceleración en la puesta en marcha. $[m/S^2]$.

Además:

$$F_{TrA} = F_W + F_{aA} \quad (33)$$

F_{TrA} : Fuerza periférica de accionamiento de la polea. $[N]$.

Por tanto de (31) y (33):

$$F_{aA} = F_W * P_A - 1 \quad (34)$$

Donde se obtiene finalmente la expresión para determinar la aceleración en el arranque:

$$a_A = P_A - 1 * \frac{F_W}{l * C_{RI} * m_R + m_G + m_L} \quad (35)$$

Los resultados obtenidos están resumidos en la tabla 30.

▪ **Tiempo de aceleración.**

$$t_{a_A} = \frac{vt}{a_A} \quad (36)$$

El tiempo de aceleración debe ser menor a 10 segundos. (Recomendación Norma.)

Tabla 30. Resultados obtenidos.

Resumen de resultados Obtenidos			
$a_A = 0,3957 \frac{m}{s^2}$	$F_S = 0 \text{ N}$	$m_G = 4,6 \frac{Kg}{m}$	$Seg_{calculado} = 429,3$
$B = 0,4 \text{ m}$	$F_{ST} = -88,62 \text{ N}$	$m_L = 14,22 \frac{Kg}{m}$	$S_{seg} = 1,7$
$C_I = 3,9 \frac{m}{m}$	$F_{TrA} = 310,6 \text{ N}$	$m_R = 4,733 \frac{Kg}{m}$	$T1 = 274 \text{ N}$
$C_{RI} = 0,9 \frac{Kg}{Kg}$	$F_w = 182,7 \text{ N}$	$m_{Ro} = 5 \text{ kg}$	$T2 = 91,34 \text{ N}$
$\delta = 2 \text{ deg}$	$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$	$m_{Ru} = 4,2 \text{ kg}$	$T_{admisible} = 200 \text{ KN}$
$D_{pulley} = 0,4 \text{ m}$	$hl = -0,48 \text{ m}$	$phi_{st} = 1 \frac{N}{N}$	$t_{a_A} = 4,245 \text{ s}$
$etha_{ges} = 0,65$	$I_{Ro} = 1,5 \text{ m}$	$P_A = 1,7 \frac{N}{N}$	$T_{max} = 465,8 \text{ N}$
$f = 0,018 \frac{N}{N}$	$I_{Ru} = 3 \text{ m}$	$P_{Merf} = 472,2 \text{ w}$	$v = 90 \frac{m}{h}$
$Fac = 72 \text{ m}^2$	$l = 14 \text{ m}$	$P_w = 306,9 \text{ w}$	$vt = 1,68 \frac{m}{s}$
$F_{al} = 127,9 \text{ N}$	$l_{vth} = 121 \frac{m^3}{h}$	$Q = 23,89 \frac{Kg}{s}$	
$F_H = 69,56 \text{ N}$	$MA = 62,11 \text{ Nm}$	$\rho_{sand} = 1,6 \frac{ton}{m^3}$	
$F_N = 201,7 \text{ N}$	$mGG = 11,5 \frac{kg}{m^2}$	$\rho_{sandSI} = 1600 \frac{kg}{m^3}$	

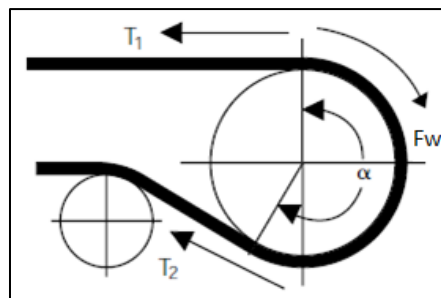
Fuente: autor.

4.2.3.2 Diseño de los componentes de la banda transportadora.

- **Calculo de las tensiones en la polea.**

La figura 58 indica la representación de las tensiones involucradas en el tambor motriz:

Figura 58. Tensiones en el tambor motriz.



Fuente: Dunlop. Catálogo. Pdf.

$$F_w = T_1 - T_2 \quad (37)$$

La tensión requerida para la transmisión de fuerza por fricción se calcula mediante las siguientes relaciones teóricas:

$$\frac{T_1}{T_2} \leq e^{\mu\alpha} \quad (38)$$

La relación de las ecuaciones (37) y (38) permite definir los factores de accionamiento:

$$T_1 = F_w * C_1 \quad (39)$$

$$T_2 = F_w * C_2 \quad (40)$$

Para definir el factor de fricción debemos considerar las condiciones de operación del sistema, la tabla 31. Permite definir el factor μ .

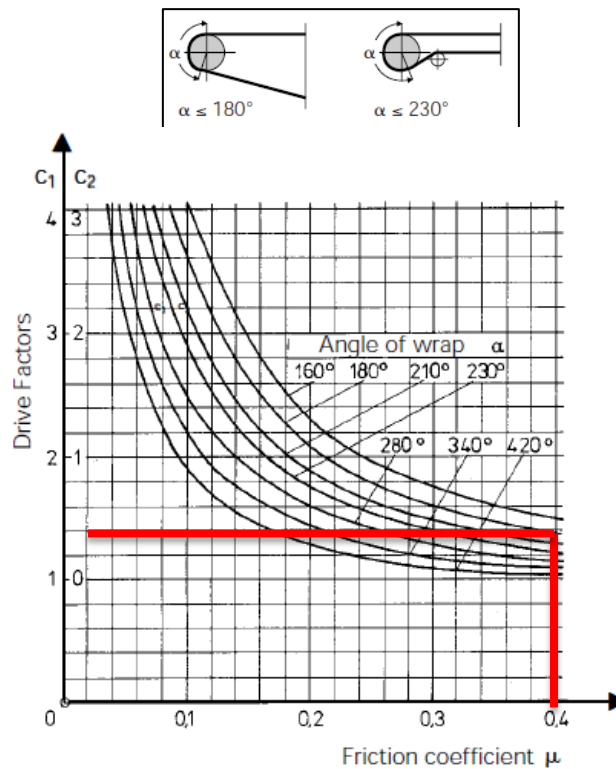
Tabla 31. Factor de fricción μ .

Condiciones de funcionamiento	Superficie de la polea			
	Polea de acero pelada (suave)	Revestimiento de poliuretano para la fricción (dibujo espina de pescado)	Revestimiento de poliuretano para la fricción (dibujo espina de pescado)	Revestimiento cerámico (poroso, dibujo espina de pescado)
Seco	0.35 a 0.4	0.35 a 0.4	0.4 a 0.45	0.4 a 0.45
Húmedo (agua pura)	0.1	0.35	0.35	0.35 a 0.4
Húmedo (contaminado con barro, greda)	0.05 a 0.1	0.2	0.25 a 0.3	0.35

Fuente: Catalogo Phoenix. Pdf.

Con un coeficiente de fricción de 0.38 y un ángulo de abrase de 180° se definen los factores de conducción, ver figura 59.

Figura 59. Factor de fricción μ .



Fuente: Catalogo Dunlop ingeniería. Pdf.

Para un diseño simplificado pero que permita tensiones admisibles en la banda se ha definido un ángulo de abrased entre 180° y 230° tomando como crítico el de 180°. Los factores son entonces:

$$C_1 = 1.5$$

$$C_2 = 0.5$$

▪ **Verificación del esfuerzo admisible.**

Tomando un factor de seguridad de 1.7, el valor del esfuerzo admisible se tomó de la tabla 32.

$$T_1 = 274[N]$$

$$S = 1.7$$

$$T_{max} = 1.7 * 274 = 466[N]$$

$$T_{Admisible} = 500 \frac{N}{mm} * B = 500 * 400 = 200 \text{ kN}$$

Se puede observar que la tensión a la que está sometida la banda está muy por debajo de los valores admisibles para las bandas de este proveedor, lo cual es favorable desde el punto de vista mecánico. Se puede pensar que este factor de seguridad en realidad disminuirá si se considera que la banda estará sometida a altos ciclos de trabajo lo cual podría reducir su esfuerzo admisible.

Tabla 32. Valores admisibles de esfuerzo a la tracción para bandas.

Correa transportadora Phoenix con carcasa textil									
Correas de 1 tela									
Uso subterráneo	800/1	1000/1	1250/1	1600/1	2000/1	2500/1	3150/1		
Correas de 2 telas									
Uso en superficie	200/2	250/2	315/2	400/2	630/2	800/2	1000/2	1250/2	1600/2
Uso subterráneo	630/2	800/2	1000/2	1250/2	1600/2				
Correas de 3 telas									
Uso en superficie	315/3	400/3	500/3	630/3	800/3	1000/3			
Correas de 4 telas									
Uso en superficie	500/4	630/4	800/4	1000/4	1250/4	1600/4	2000/4	2500/4	
Correas de 5 telas									
Uso en superficie	630/5	800/5	1000/5	1250/5	1600/5	2000/5	2500/5	3150/5	

Fuente: Fuente: Catalogo Phoenix. Pdf.

- **Tipo de tensor del tambor.**

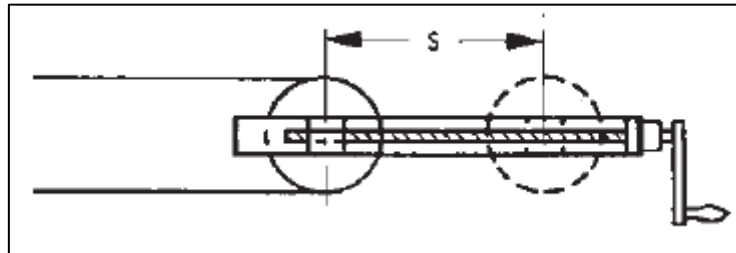
El tensor de fuerza de la banda, figura 60, permite acomodar los cambios en la longitud de la correa como función de los cambios de carga y para proporcionar un arranque suave de la instalación. La elección del sistema de recogida depende de las condiciones generales de la instalación, las características de alargamiento de la cinta, la puesta en marcha, el clima y quizás la distancia de transporte y la inclinación de la instalación.

El sistema de tensión más adecuado es el de tensor de husillo o tornillo, es el más adecuado para bandas de transporte de hasta 50[m]²², se sitúa en el tambor de pie.

El nivel de fuerza de tensión puede ser calibrada mediante el tensado de la banda con un sistema sencillo de tornillo. El cinturón está permanentemente tensado lo suficientemente alta para las condiciones de carga máxima. Este es uno de los mecanismos más sencillos de tensado.

²² Raúl Poso Soto. Pág. 8 Posso.

Figura 60. Sistema de tensado de la banda.



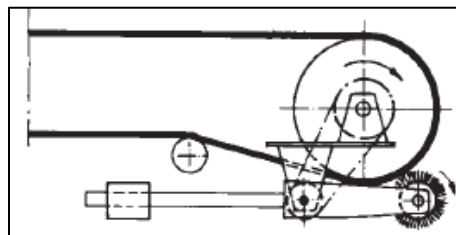
Fuente: Catalogo Dunlop ingeniería. Pdf.

Para determinar el grado de tensión requerida se debe conocer el porcentaje de alargamiento de la banda el cual está definido como porcentaje de elongación para la carga máxima de rotura, para bandas de algodón se toma como el 2%, y para los de poliéster como el 1%²³.

▪ **Sistema de limpieza de la banda en el retorno.**

Se puede usar un sistema sencillo de limpieza por cerdas de nylon en Rotación, como los de la figura 61, son cepillos impulsados donde las cerdas de caucho o de nylon, van limpiando la superficie de retorno de la banda. No es adecuado para materiales pegajosos tales como arcilla.

Figura 61. Sistema limpieza de la banda.



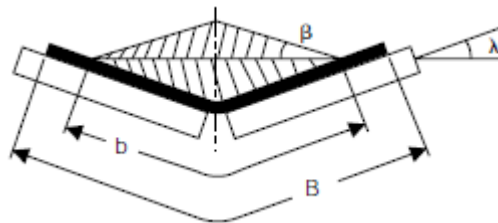
Fuente: Catalogo Dunlop ingeniería. Pdf.

²³ Raúl Posso Soto Pág.31.

- **Diseño del sistema de rodillos superior de la banda.**

Debido a las características del ángulo de sobrecarga del material se debe utilizar un diseño de los rodillos superiores que permita una pendiente suficiente para que el material no se vaya a desbordar de la banda en el momento de transporte, es decir que la arena sílice seca debe ser transportada por una banda en la que los rodillos no tengan perfil plano de la banda, por este motivo se usara de un arreglo de rodillos en bina, como se puede observar en la figura 62, la tabla 33 define la capacidad de transporte para este tipo de arreglo.

Figura 62. Rodillos superiores.



Fuente: Catalogo Dunlop ingeniería. Pdf.

Tabla 33. Capacidades máximas para los rodillos en bina.

Belt Width B (mm)	Surcharge Angle β	Troughing Angle λ				
		20°	30°	35°	40°	45°
300	0	14	18	20	21	-
	10	20	24	26	26	-
	15	24	27	28	28	-
	20	28	30	31	31	-
400	0	28	37	40	42	-
	10	41	48	51	51	-
	15	48	55	56	56	-
	20	55	61	62	61	-

Fuente: Dunlop. Catálogo. Pdf.

²⁴ Raúl Posso Soto. Pág. 26.

Donde el valor que se remarca es la interpolación de volumen teórico máximo, 44.5 [m³/h] que puede manejar la banda en con rodillos en bina.

- **Velocidad y diámetro del rodillo.**

La velocidad puede ser determinada con la siguiente expresión práctica:

$$n_R = \frac{60 \cdot Vt}{\pi \cdot D_R} \quad (41)$$

$$n_R = \frac{60 \cdot 1.68}{\pi \cdot 0.0635} = 505 \text{ [RPM]}$$

La velocidad máxima admisible no debe ser superior a 650 [RPM]²⁵.

El diámetro del rodillo esta estandarizado y se ha tomado el tamaño más pequeño del catálogo, el cual es de 63.5 [mm].

- **Diámetro de los tambores.**

Para determinar el diámetro de los tambores se hace con el espesor de la carcasa de la banda para nuestro caso se ha seleccionado una banda EP S 400/4, ver tabla 34.

Tabla 34. Tipo de banda.

C _{Tr}	Material of Carcase in Warp or Belt Type
90	Polyamide (P)
80	DUNLOFLEX 2 ply Belt
95	TRIOFLEX 3 ply Belt
108	SUPERFORT Multiply Belt (EP)
138	FERROFLEX Steel Weave Type
145	SILVERCORD Steel Cord Belt
100	DUNLOPLAST Monoply Belt

Fuente: Catalogo. Dunlop. Pág. 44.

²⁵Catalogo Dunlop. Pág. 37.

Con la siguiente expresión se determinara el diámetro de los tambores y luego se estandarizara con la ayuda de la tabla 36.

$$DTr = CTr * d \quad (42)$$

$$DTr = 108 * 4.1 = 442.8[mm]$$

Donde:

$CTr = 108 d$: espesor de la carcasa de la Banda. 4.1 mm .Tabla 34 y 35.

Tabla 35. Espesor de la carcasa de la banda.

Belt type (mm)	Carcase thickness (kg/m ²)	Carcase weight	Belt Weight m'G (kg/m ²) Sum of carrying and pulley side covers (mm)					
			3	4	5	6	8	10
S 200/3	2.7	3.1	6.6	7.7	8.9	10.0	12.3	14.6
S 250/3	2.8	3.2	6.7	7.8	9.0	10.1	12.4	14.7
S 315/3	3.0	3.4	6.9	8.0	9.2	10.3	12.6	14.9
S 315/4	3.7	4.3	7.8	8.9	10.1	11.2	13.5	15.8
S 400/3	3.2	3.7	7.2	8.3	9.5	10.6	12.9	15.2
S 400/4	4.1	4.6	8.1	9.2	10.4	11.5	13.8	16.1
S 500/3	3.6	4.0	7.5	8.6	9.8	10.9	13.2	15.5
S 500/4	4.3	5.0	8.5	9.6	10.8	11.9	14.2	16.5
S 630/3	3.9	4.3	7.8	8.9	10.1	11.2	13.5	15.8

Fuente: Dunlop. Catálogo.

Tabla 36. Diámetros estandarizados.

Belt Type	Pulley Diameter (mm)		
	A	B	C
S 200/3	250	200	160
S 250/3	250	200	160
S 315/3	315	250	200
S 315/4	400	315	250
S 400/3	315	250	200
S 400/4	400	315	250
S 500/3	400	315	250

Fuente: Dunlop, catalogo.

- **Calculo de la potencia real de consumo.**

Finalmente se calculara el consumo real de potencia teniendo en cuenta la mayor cantidad de factores referenciados por la norma DIN 22101.

- Potencia en el tambor primario.

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 \quad (43)$$

- Potencia de consumo en la banda transportadora incluyendo el sistema sin carga y con carga.

$$P_1 = \frac{C_B * vt + Q}{C_L * k_f} \quad (44)$$

$$P_1 = \frac{59 * 1.68 + 86}{349 * 1} = 0.53 [kw]$$

Donde:

P_1 : Potencia de consumo incluyendo el peso de la banda.

y el flujo de material a transportar [Kw].

Q : Flujo maximo de catalogo, 86 [Ton/h].

C_L : Factor de longitud. 349; interpolado de la tabla 37.

K_f : Factor de servicio. 1, condiciones normales de trabajo.

Tabla 37. Factor de corrección de longitud.

L (m)	3	4	5	6	8	10	12.5	16	20
C_L	667	625	555	526	454	417	370	323	286

Fuente: Dunlop, Catalogo. Pdf.

- Potencia debido a la energía potencial dado por la inclinación de la banda.

$$P2 = \frac{H * Q}{367} \quad (45)$$

$$P2 = \frac{-0.5 * 86}{367} = -0.1171 \text{ [Kw]}$$

Dónde:

H: desnivel de los tambores – 0.5 m , se aprovechara una pequeña cantidad de energía potencial.

- Potencia adicional debido a efectos secundarios de fricción.

$$P3 = 0.8 * v + 0.3 * B * v \quad (46)$$

$$P3 = 0.8 * 1.68 + 0.3 * 0.4 * 1.68 = 1.55 \text{ [Kw]}$$

Dónde:

*0.8 * v: Factor de aumento de potencia para descarga*

del material al final de la banda. (Dunlop Additional Power Values Pág. 42 Pdf.)

*0.3 * B * v: Raspador para limpiar la banda. Bandas de menos de 80 [m].*

Por tanto la potencia real requerida en el tambor primario será de (43):

$$P_T = 0.53 - 0.1171 + 1.55 = 1.96 \text{ Kw ó } 2.6 \text{ [Hp]}$$

La potencia de consumo en el motor primario será de:

$$P_{Final} = \frac{P_T}{\eta_{Trans}} \quad 47$$

Tomando la eficiencia mas baja para una transmisión de engranajes²⁵ $\eta_{Trans} = 0.8$

$$P_{Final} = \frac{2.6}{0.8} = 3.25[Hp]$$

Donde el flujo Q se ha tomado para el de catálogo nominal de 86 [Ton/h].

Por tanto el consumo de potencia para los requerimientos exigidos por la empresa serian de:

$$P_{Final} = \frac{2.32}{0.8} = 2.9 [hp]$$

Tabla 38. Selección del motor estandarizado en [KW].

Selected according to DIN 42973								
1.5	2.2	3.0	4.0	5.5	7.5	11	15	18.5
22	30	37	45	55	75	90	110	132
160	200	250	315	400	500	630		

Se seleccionara el motor de 2.2 [KW] que es igual a 2.9 [Hp].

El renderizado final se puede observar en las figuras 63, 64, 65 y 66.

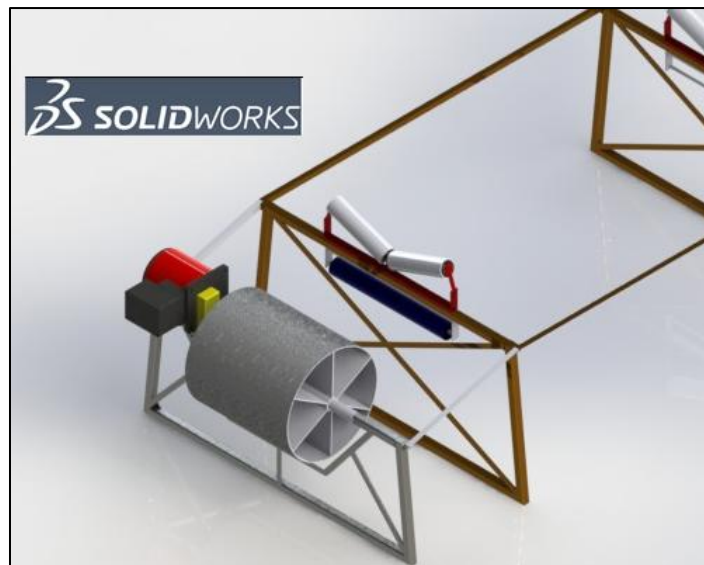
²⁵Catalogo Dunlop. Pág. 60.

Figura 63. Renderizado banda transportadora, importado desde Solidworks.



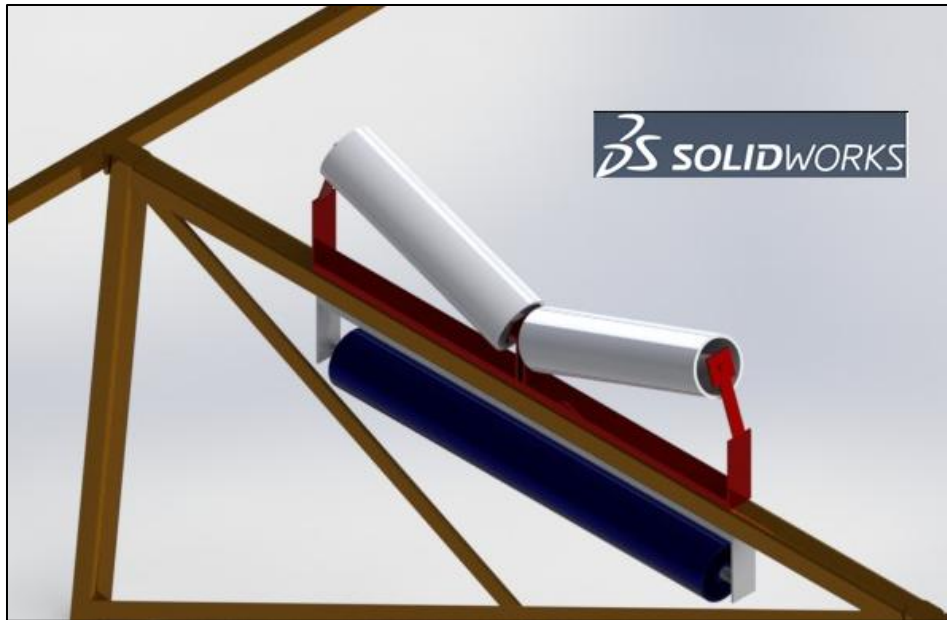
Fuente: Autor.

Figura 64. Renderizado Tambor Motriz, banda transportadora, importado desde Solidworks.



Fuente: Autor

Figura 65. Renderizado, Base polines y polín. Banda transportadora, importado desde Solidworks.



Fuente: Autor

Figura 66. Renderizado, Base polines y polín. Banda transportadora, importado desde Solidworks.



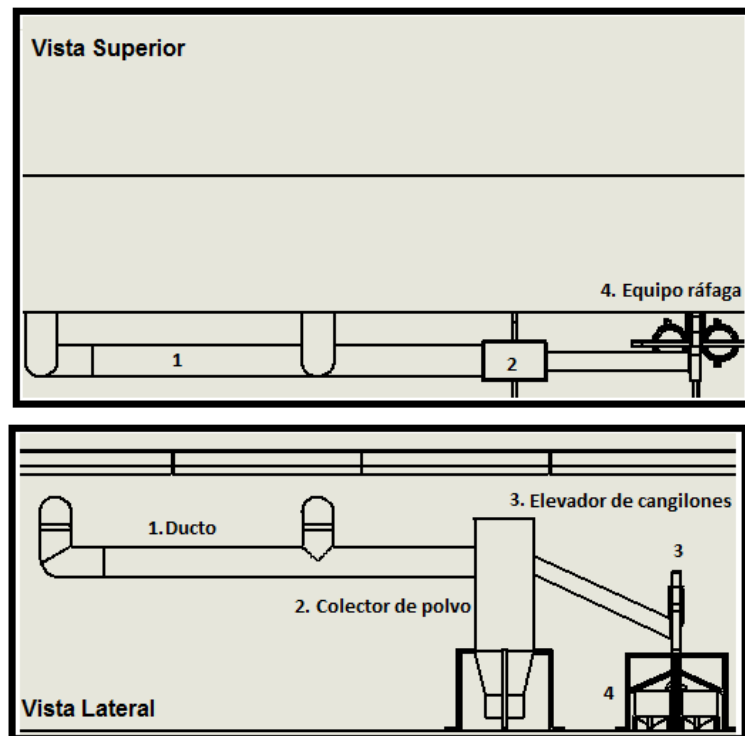
Fuente: Autor.

4.3 DISEÑO DEL SISTEMA COLECTOR DE POLVO

Para realizar el diseño del sistema recolector de polvo, que permitiera purificar el aire expulsado al ambiente, es necesario realizar un esquema que indique la disposición de los equipos y ubicación espacial inicial de los ductos ver figura 67.

4.3.1 Plano de la ubicación de los equipos.

Figura 67. Esquema inicial de distribución del ducto principal y equipos.



Fuente: Autor.

Para dimensionar de forma correcta el sistema de purificación se debe determinar la cantidad de aire o flujo volumétrico por unidad de tiempo que se captara por el ducto principal y que llegara al colector de polvo, como también la presión total de vacío que el ventilador deberá desarrollar para su selección. El arreglo mostrado en la figura 67. Cumple con ciertas recomendaciones para el diseño del ducto los cuales se nombran a continuación:

- Cortas distancias del ducto pero que abarquen eficientemente la mayor área posible de captación, de esta forma habrán menores resistencias del flujo de fluido hacia el colector.
- El ducto de entrada hacia el colector debe ser en tramo recto, evitando codos o arreglos adicionales del ducto.

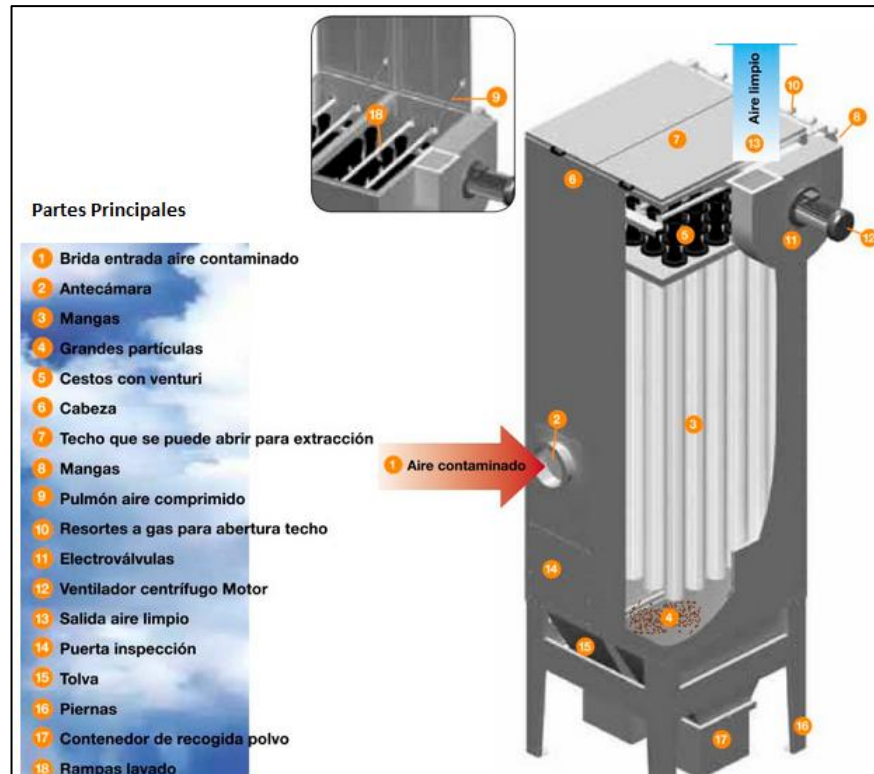
4.3.2 Filtro de mangas o colector de polvo

La principal característica de este equipo es la de captar las partículas resultantes del proceso de Sandblasting y disminuir la cantidad de aire contaminado por las partículas abrasivas, expulsado al medio ambiente, existen varios métodos de limpieza de las mangas una de las más eficientes es la de limpieza por chorro pulsante.

El principio de funcionamiento del filtro de mangas se basa en el hecho de que el aire contaminado entra a través de una antecámara en la que se separan las partículas de mayor tamaño y luego la mezcla de fluido pasa por las mangas filtrando y depositando el abrasivo no reutilizable en un recipiente, ver figura 68. El aire contaminado, entra al colector pasando por un difusor, que absorbe el impacto por velocidad de las partículas al ingresar, distribuyendo el aire, al reducir la velocidad de las partículas, provoca que las más pesadas se precipiten a la tolva de recolección para ser descargadas posteriormente fuera del filtro. El aire con las partículas más finas fluye hacia la unidad o cámara de filtrado depositando los polvos finos en la parte exterior de las mangas. El aire limpio continúa hacia la zona de aire limpio y finalmente llega a la atmósfera. Para seleccionar el equipo adecuado se debe determinar la carga de partículas o *grain loading*, esto es la cantidad de material sólido que se puede encontrar en el flujo de aire del recinto cuyas unidades son g/m^3 , para equipos de transporte como el elevador de cangilones y la banda transportadora estos niveles pueden estar entre 10-30 [g/m^3], pero atendiendo a los niveles de polución en el proceso y las concentraciones de partículas en el aire es lógico deducir que los niveles serán

mucho mayores y respecto a estos elementos de transporte el valor de carga se debe considerar para el sistema colector de polvo, el cual puede considerarse como una aplicación más fuerte, en la que los niveles de concentración pueden ser mayores a los $650^{26} [g/m^3]$,

Figura 68. Partes principales del filtro de mangas.



Fuente: http://pdf.directindustry.es/pdf/hascon/filtros-con-mangas-autolimpiadoras-de-aire-comprimido/33357-62795-_2.html

²⁶Dust Collector Design and Safety, Pdf.

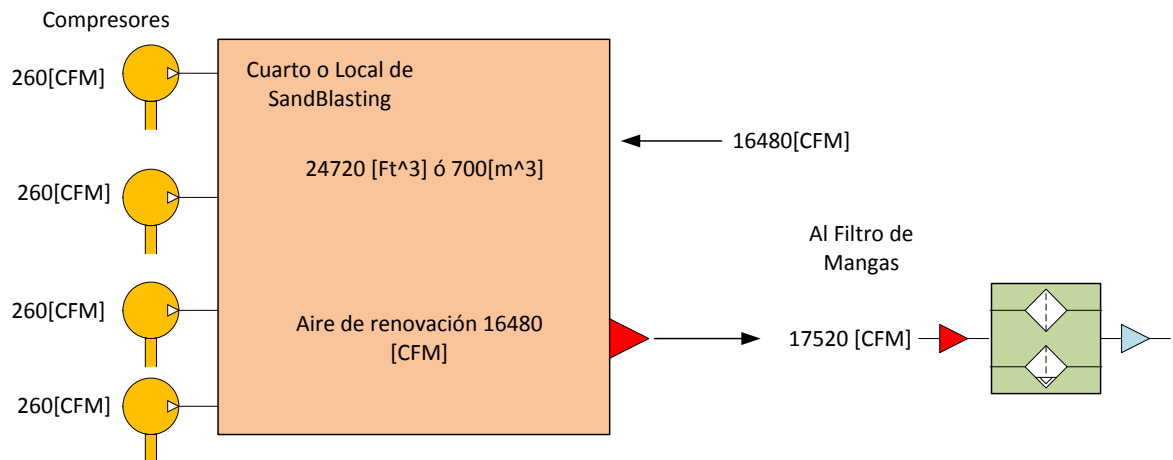
Una de las características principales para la selección del ventilador centrifugo es la de determinar la caída de presión en todo el sistema y el flujo volumétrico total del mismo, por recomendaciones de la literatura e información analizada, para una aproximación de diseño la caída de presión promedio en un filtro de mangas de tipo industrial por limpieza de manga por impulso de aire está en un rango de 75 a 150²⁷ [mm.c.a] el flujo de aire máximo se deducirá del análisis del volumen de control del sistema para el punto crítico de operación, ver figura 69.

- Caída de presión en el filtro de mangas.

La caída de presión en el filtro de mangas hace referencia al flujo que ingresa y sale por los ductos correspondientes, esta caída de presión es debida a la obstrucción generada por las mangas.

- Flujo volumétrico.

Figura 69. Volumen de control del recinto.



Fuente: Autor.

²⁷Tesis PUCP, Pág. 48.

Del análisis del volumen de control, Figura 69, se observa que el flujo de aire de entrada máximo cuando se usan los 4 compresores que posee la planta es de 1040 [CFM], para un total de 260[CFM] por compresor, el volumen del recinto es de 24720 [Ft³], 32.8 Ft ancho x 57.41 Ft largo x 13.12 Ft alto., se asumirá que las fugas de aire del cuarto son mínimas, por tanto bajo criterio justificado por catálogos de ventilación, es lógico que se requieran N cantidad de renovaciones de aire por hora, se asumirá un valor de N= 40 [Renovaciones/Hora], es decir que se renovara el 67,7% de aire cada minuto, esta renovación se realizara con ventiladores axiales, ya que básicamente estos servirán para cumplir la condición de renovación de aire a baja carga estática, las renovaciones de aire son comparables con los valores de renovación para talleres industriales de pintura²⁸.

Por tanto el flujo volumétrico máximo que pasara por el filtro separador de mangas será de 17520 [CFM], se tomara como aproximación para el dimensionamiento del equipo, según catálogo de CLEMCO, un equipo con un máximo de 18000 [CFM], las especificaciones del equipo se muestran en la tabla 39.

Tabla 39. Tabla de selección del separador de mangas.

Model Number	Max CFM	No. of Cartridges	Filter Media Area (sq Ft)	No. of Drums	Approx. Exhauster HP*	Exhauster Mount & Type	No. of Inlets	Dimensions/ w x d x h (Inches)	Weight in lbs
4	4,000	8	2,016	1	10	Top, direct drive	1	40 x 88 x 141	2,000
6	6,000	12	3,024	1	15	Top, direct drive	1	40 x 88 x 161	2,400
8	8,000	16	4,032	1	20	Top, direct drive	1	40 x 88 x 181	2,800
12	12,000	24	6,048	2	20	Floor, belt drive	2	80 x 88 x 161	4,400
16	16,000	32	8,064	2	30	Floor, belt drive	2	80 x 88x 181	5,100
18	18,000	36	9,072	3	30	Floor, belt drive	3	120 x 88 x 161	6,400
24	24,000	48	12,096	3	50	Floor, belt drive	3	120 x 88 x 181	7,400
32	32,000	64	16,128	4	75	Floor, belt drive	4	160 x 88 x 181	9,700
40	40,000	80	20,160	5	75	Floor, belt drive	5	200 x 88 x 181	12,000
48	48,000	96	24,192	6	100	Floor, belt drive	6	240 x 88 x 181	14,300
56	56,000	112	28,224	7	100	Floor, belt drive	7	280 x 88 x 181	16,600
64	64,000	128	32,256	8	125	Floor, belt drive	8	320 x 88 x 181	18,900
72	72,000	144	36,288	9	125	Floor, belt drive	9	360 x 88 x 181	21,200
80	80,000	160	40,320	10	150	Floor, belt drive	10	400 x 88 x 181	23,500

²⁸Catálogo Técnico, Salvador escoda. Pág. 32.

- **Filtro**

Fabricado en celulosa/poliéster, ver tabla 40. Con un flujo máximo por filtro de 500 [CFM]. lo que le da una adecuada resistencia a la abrasión por efectos del abrasivo suspendido en el flujo aire.

Tabla 40. Materiales para construcción de los filtros de mangas.

Fibra	Temperatura máxima de operación	Resistencia Ácida	Resistencia Alcalina	Resistencia a la abrasión
Algodón	180°F	Baja	Muy buena	Muy buena
Lana	200°F	Muy buena	Baja	Buena
Nylon	200°F	Bueno	Excelente	Excelente
Nomex	425°F	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Acrílico	260°F	Excelente	Bueno	Bueno
Polipropileno	200°F	Excelente	Excelente	Excelente
Polietileno	150°F	Excelente	Excelente	Muy bueno
Teflón	500°F	Excelente	Excelente	Bueno
Fibra de vidrio	550°F	Bueno	Bueno	Regular
Filtron	270°F	Buena a excelente	Buena	Buena a muy buena
Poliéster	275°F	Buena	Buena	Buena
Dynel	160°F	Excelente	Excelente	Muy bueno

Fuente: Tesis PUCP, Pág. 39.

- **Área filtrante Total**

Se realizara un cálculo de área filtrante promedio aproximado y se comparara con el ofrecido por el del catálogo, este cálculo es indispensable para determinar el grado de eficiencia en la separación del polvo del flujo de aire, y para verificar que los valores ofrecidos por el catalogo se aproximan a los requeridos por el proceso.

$$A_n = \frac{Q_m}{K_A} \quad (48)$$

Dónde:

Q_m : caudal de gas o aire [Ft^3/min]

K_A : carga específica [$Ft^3/min/Ft^2$]

A_n : Area neta

Donde:

$$K_A = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 \quad 49$$

El área neta es la superficie activa en operación y hace referencia a la cantidad de tela total filtrante, esta se determina hallando la carga específica la cual está relacionada a diferentes factores como:

Carga específica K_A

La carga específica hace referencia al caudal de gas o aire que fluye a través de la unidad de área de material para una caída de presión específica.

Factor de material K_1

Este factor considera las propiedades y características del material abrasivo suspendido en la corriente de aire, ver tabla 41.

Tabla 41. Factor de material.

		Factor, k_1		
15	12	10	9	6
Mezcla de queque	Asbesto	Alumina	Tintes	Carbón activado
Polvo de cartón	Materiales fibrosos	Carbón fino	Polvo de metal	Carbón negro
Cocoa	Yeso	Cemento	Óxidos de metal	Detergentes
Alimentos	Cal	Pigmento cerámico	Pigmentos	Humos
Harina	Sal	Polvo de ladrillo	Plásticos	Leche en polvo
Granos	Arena	Polvo de arcilla	Resinas	Jabones
Polvo de cuero	Talco	Carbón	Silicatos	
Tabaco		Caolín	almidón	
		Caliza		
		Polvo de minerales		
		Sílice		
		Azúcar		

Fuente: Tesis PUCP, Pág. 39.

Factor de uso K_2

El factor de uso, tabla 42, tiene bajo consideración el tipo de proceso de suministro de polvo al filtro de mangas como también los problemas relacionados a las variaciones de la carga de polvo.

Tabla 42. Factor de uso.

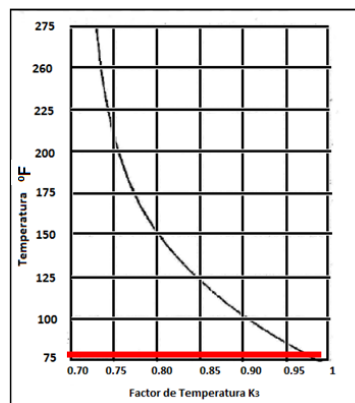
Proceso	Factor k_2
Alivio de puntos de transferencia, Transportadores, Estaciones de empaque, etc.	1.0
Recolección de productos	0.9
Sistemas de ventilación en molienda, secadores, clasificadores, etc.	0.8
Procesos de filtración de gas Secadores de rocío, hornos, reactores, etc.	0.8

Fuente: Tesis PUCP. Pág. 40.

Factor de temperatura K_3

El factor de temperatura tiene en cuenta las variaciones de viscosidad del aire a altas temperaturas figura 70.

Figura 70. Factor de temperatura.



Fuente: Tesis PUCP. Pág. 40.

Factor de tamaño de partículas K_4

El factor de tamaño, tabla 43, considera la inclinación de las partículas finas a obstruir las telas filtrantes de forma más rápida que las partículas gruesas.

Tabla 43. Factor de tamaño de partículas.

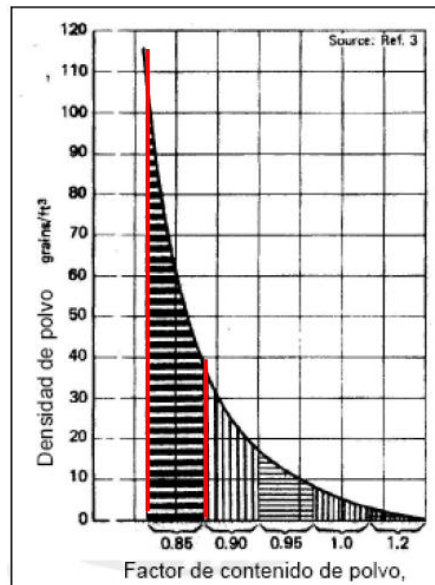
Tamaño	Factor k_4
Mayor a 100 micrones	1.2
Entre 50 y 100 micrones	1.1
Entre 10 y 50 micrones	1.0
Entre 3 y 10 micrones	0.9
Menor a 3 micrones	0.8

Fuente: Tesis PUCP. Pág. 41.

Factor de contenido de polvo K_5

El factor de contenido de polvo, figura 70, tiene en cuenta la cantidad de partículas suspendidas en el flujo de aire, esta razón está definida por la cantidad en gramos de partículas por metro cubico o pie cubico.

Figura 71. Factor de contenido de polvo.



Fuente: Tesis PUCP. Pág. 41.

Calculo del área neta:

De la ecuación (49)

$$K_A = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5$$

$$K_A = 12 \times 0.8 \times 1 \times 0.8 \times 0.85 = 6.528$$

De la ecuación (48)

$$A_n = \frac{Q_m}{K_A}$$

$$A_n = \frac{17520}{6.528} = 2683.82 [Ft^2]$$

El área total de filtración se calcula mediante un factor por el área neta, tomando un factor de 2, el área será de aproximadamente 5400 [Ft²]. Al comparar este valor aproximado y compararlo con el ofrecido por el catálogo, 9000[Ft²] se concluye que los requerimientos ofrecidos por el fabricante, respecto al área total de filtración están por encima de los requeridos, este cálculo solamente permite confrontar los argumentos teóricos de cálculo con los diseños prácticos de los catálogos, y en este diseño se usara como aproximación para el dimensionamiento y del equipo, diseño de los ductos y selección del ventilador.

4.3.3 Diseño del sistema de captación de aire contaminado.

En el diseño básico del cuarto de granallado y Sandblasting podemos identificar dos focos principales de aire contaminado, sin despreciar una de las suposiciones iniciales de que todo el recinto estará propenso a contener una mezcla de aire y arenas fina suspendida, estos dos focos serán los correspondientes al punto de captación de material de la banda transportadora y el elevador de cangilones, por tal motivo se hará el diseño de campanas de extracción sectorizadas próximas a estos puntos y distribuida a lo largo del recinto.

- **Captación**

Se define como captación al proceso mediante el cual se atrae el aire contaminado hasta el lugar de descarga.

Para definir las dimensiones de la campana de captación se deben definir parámetros como la velocidad de captación, tabla 44, y el caudal que fluirá por cada campana de extracción.

Para procesos de granallado y Sandblasting se recomiendan las siguientes velocidades de captura:

Tabla 44. Rango de velocidades admisibles de captación.

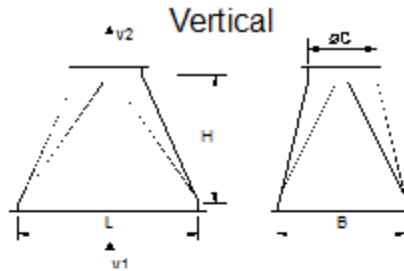
RANGO DE VELOCIDADES DE CAPTURA		
CONDICION DE LA DISPERSION DEL CONTAMINANTE	APLICACIÓN	VELOCIDAD DE CAPTURA (m/s)
Sueltas sin velocidad en el aire	Evaporación de tanques	0.25 a 0.5
Sueltas con velocidad baja del aire	Transportadores de baja velocidad	0.5 a 1.0
Generación activa dentro de la zona de generación	Chutes de carga/descarga de transportadores, trituradoras	1.0 a 2.5
Alta velocidad dentro de la zona	Molienda, Sandblasting	2.5 a 10

Fuente: Consideraciones para el diseño de sistemas colectores de mangas.

Por: *Holcim Design Criteria*.

Como el caudal requerido ya se ha determinado se calcularan las dimensiones requeridas para este flujo específico, ver especificación de flujo en la tabla 45.

Tabla 45. Dimensiones recomendadas para la campana de extracción.



Air Quantity		v1	v2	L	B	H	Ø C
m ³ /h	m ³ /min	ms ⁻¹	ms ⁻¹	mm	mm	mm	mm
250	4.2	1.40	18.0	260	190	165	70.0 *
500	8.3	1.40	17.5	370	270	235	100.5 *
750	12.5	1.40	17.0	450	330	280	125.0 *
1000	16.6	1.40	17.2	520	380	325	143.5 *
1250	20.8	1.40	17.7	580	425	365	158.0
1500	25.0	1.44	17.9	630	460	400	172.0
1750	29.2	1.43	17.9	680	500	430	186.0
2000	33.3	1.39	17.9	740	540	470	198.0
2500	41.6	1.41	18.0	820	600	520	222.0
3000	50.0	1.40	17.9	900	660	570	244.0
3500	58.3	1.44	17.8	960	700	610	262.0
4000	66.6	1.40	18.0	1040	760	660	280.0
4500	75.0	1.42	17.9	1100	800	700	298.0
5000	83.3	1.42	17.9	1150	850	740	314.0
6000	100.0	1.42	17.9	1260	930	800	344.0

Fuente: Consideraciones para el diseño de sistemas colectores de mangas. Por: *Holcim Design Criteria*.

Como el flujo total es de 17520 [Ft³/min] ó 30000 [m³/h] aproximadamente se optará por ubicar 5 campanas de extracción distribuidas a lo largo de todo el recinto. Como los datos de la tabla 45 están definidos para una velocidad de 1.4 [m/s] se deben corregir las dimensiones para una velocidad recomendada de 2.5 [m/s]. Se observa que la relación de longitudes de la campana L/B se mantiene constante para todos los valores de la tabla y es aproximadamente 1.37 y la relación B/H también se mantiene constante en 1.16, por tanto las dimensiones

corregidas para la velocidad de 2.5 [m/s] y manteniendo el mismo caudal de 6000 [m³/h] son:

$$(L * B) * 2.5[m/s] = 1.667 \frac{m^3}{s} \quad (50)$$

$$\frac{L}{B} = 1.37 \quad 51 \quad \frac{B}{H} = 1.116 \quad (52)$$

Despejando las ecuaciones (50), (51) y (52) se tiene:

$L_c = 0.955 \text{ m}$, *Longitud corregida de la campana.*

$B_c = 0.697 \text{ m}$, *Ancho corregido de la campana.*

$H_c = 0.624 \text{ m}$, *Alto corregido de la campana.*

Para corregir el diámetro de salida de la campana se recurrirá a una recomendación para la velocidad en los ductos de expulsión de la campana, la cual es de 17 a 20²⁹ [m/s], tomando una velocidad de 20 [m/s], se determinara el diámetro del ducto:

$$D = \frac{1.667 \frac{m^3}{s} * 4^{0.5}}{20 \frac{m}{s} * \pi} \quad (53)$$

$D = 0.3257[m]$, Diámetro del ducto.

Luego de que estén definidas las dimensiones de la campana se diseñaran los ductos y accesorios básicos para el equipo de extracción.

²⁹*Dust Collector Design and Safety.* Andrew F. Hollingshead, P.E. Pág. 4. Pdf.

4.3.4 Diseño de los ductos de extracción.

Una vez se determinen las dimensiones de los ductos, se procederá a calcular las pérdidas de carga y con el caudal obtenido que se debe transportar en el sistema se podrán definir elocuentemente las características del ventilador, como potencia requerida, velocidad del rotor y revoluciones por minuto del rotor.

La característica principal del buen diseño de los ductos para la ventilación localizada es la de captar el aire contaminado en cada campana y llevarlas a un punto común de descarga, en nuestro caso específico será el filtro separador de mangas, se debe asegurar que el flujo de captación en cada campana sea el adecuado, esto para establecer una velocidad recomendada de transporte en la que se evite la posible acumulación de partículas en el ducto.

- **Velocidad mínima de transporte.**

Este es uno de los parámetros de diseño más importantes, para el dimensionamiento del ducto de las campanas se tomó una velocidad crítica de transporte de 20 [m/s], la cual se usara como criterio de diseño, ver tabla 46. La selección de una velocidad dentro de un conducto depende de las características de los contaminantes captados en la campana de aspiración.

Cuando se trabaja con polvos se debe seleccionar una velocidad mínima adecuada para su transporte. Se denomina *velocidad de transporte o de diseño*³⁰ a aquella que permite que los polvos lleguen a los equipos de tratamiento y no sedimenten en los conductos, lo que provocaría su obturación.

³⁰Diseño de conductos de sistemas de Ventilación localizada por extracción, Pág. 8.

Tabla 46. Velocidad recomendada para el diseño de conductos.

Naturaleza del contaminante	Ejemplos	Velocidad de diseño (m/s)
Vapores, gases, humos de combustión	Todos los vapores, gases y humos	Indiferente (la velocidad óptima económicamente suele encontrarse entre 5 y 10 m/s)
Humos de soldadura	Soldadura	10-12,5
Polvo muy fino y ligero	Hilos de algodón, harina de madera, polvo de talco	12,5-15
Polvos secos	Polvo fino de caucho, baquelita en polvo para moldeo, hilos de yute, polvo de algodón, virutas (ligeras), polvo de detergente, raspaduras de cuero	15-20
Polvo ordinario	Polvo de desbarbado, hilos de muela de pulir (secos), polvo de lana de yute (residuos de sacudidor), polvo de granos de café, polvo de cuero, polvo de granito, harina de sílice, manejo de materiales pulverulentos en general, corte de ladrillos, polvo de arcilla, fundiciones (en general), polvo de caliza, polvo en el embalado y pesado de amianto en industrias textiles	17,5-20
Polvos pesados	Polvo de aserrado (pesado y húmedo), viruta metálica, polvo de desmoldeo en fundiciones, polvo en el chorreado con arena, pedazos de madera, polvo de barrer, virutas de latón, polvo en el taladrado de fundición, polvo de plomo	20-22,5
Polvo pesado húmedo	Polvo de plomo con pequeños pedazos, polvo de cemento húmedo, polvo del corte de tubos de amianto-cemento, hilos de muela de pulir (pegajosos)	> 22,5

Fuente: Diseño de conductos de sistemas de Ventilación localizada por extracción.

Para el dimensionamiento de los ductos se puede usar la ecuación de continuidad, como el flujo de captación en cada campana es el mismo se puede determinar el área del ducto y de ahí despejar el diámetro del ducto.

Dónde:

$$Q = V * A \frac{m^3}{s}, \text{Flujo volumetrico. (54)}$$

$$A = \frac{Q}{V} m^2, \text{Area del ducto. (55)}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}, \text{Relacion entre el diametro del ducto y el area. (56)}$$

A: área del ducto. m^2 .

D: Diámetro del ducto. m

La razón para elegir un ducto circular se puede justificar a continuación:

- Existen menores pérdidas de carga en una tubería circular que tenga un área determinada igual al área de un ducto rectangular debido a que el diámetro hidráulico de la sección circular es mayor que el de la sección rectangular.
- Presentan mayor resistencia mecánica a la deformación cuando la presión interna es menor que la presión atmosférica.
- Existe una distribución de velocidades más uniformes, lo que ayuda a transportar las partículas en suspensión hasta el equipo de filtrado y separación.
- No hay limitaciones exteriores para el dimensionamiento de los ductos.

$$D = \frac{4 * Q}{\pi * V}^{0.5} \quad (57)$$

Es importante aclarar también que la velocidad de transporte en los ductos no debe superar un límite de velocidad debido a que se incrementarían las pérdidas de carga, e incrementa la abrasión en las paredes del ducto lo que implica un mayor desgaste en accesorios y ductos, y un inevitable aumento en costos de mantenimiento, también el ruido en el conducto puede generar un sobrepaso en los decibeles permitidos y pueden generarse vibraciones que pueden requerir sistemas de fijación especial lo que aumentaría costos de instalación. Según criterios de selección de velocidad esta no debe superar los 30 [m/s]³¹.

³¹Diseño de conductos de sistemas de Ventilación localizada por extracción

4.3.5 Selección del ventilador centrífugo.

La selección del ventilador centrífugo se hará en base a los requerimientos del sistema, el flujo volumétrico ya está definido en el análisis del volumen de control que se ha realizado para el diseño del colector de polvo, el ventilador es parte fundamental para el sistema de captación, se realizará por tanto un análisis de pérdidas de carga del sistema lo que arrojará la curva característica del mismo, bajo los conceptos básicos de ventilación, el punto de intersección de la curva característica del sistema con la curva del ventilador ofrecido por el fabricante dará el punto de operación.

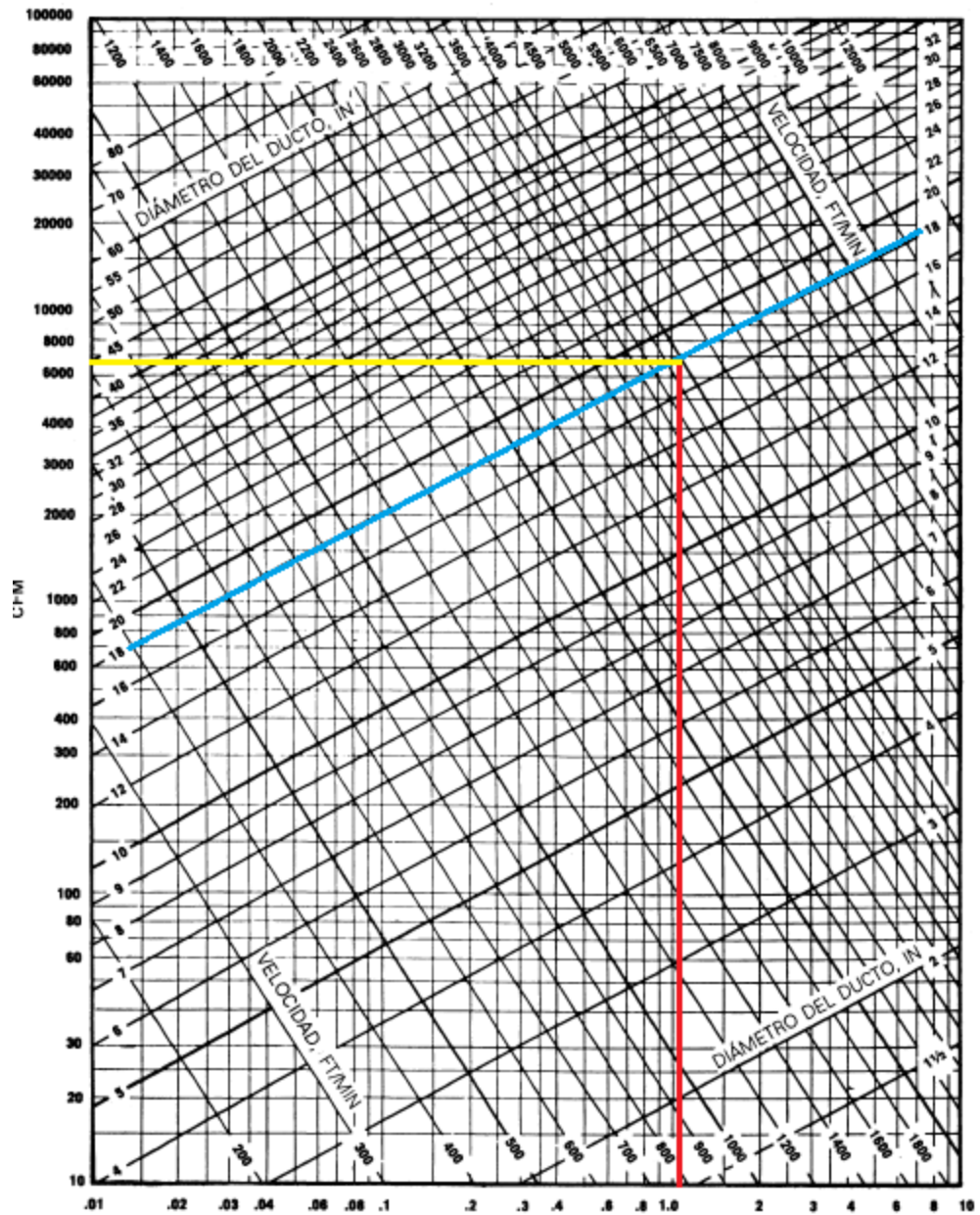
- **Calculo de las pérdidas de presión.**

Se deben calcular las pérdidas en los ductos para poder determinar la capacidad del ventilador centrífugo del colector de polvo, la pérdida de presión total será la que corresponda al trayecto del ducto más largo o el que tenga las mayores pérdidas.

Al hacer un análisis el trayecto según la figura 72, que generara las caídas de presión más grandes es el tramo **xyzabcde** se determinaran todas las perdidas correspondientes a cada uno de los accesorios del tramo y a los trayectos del mismo, la figura 72 detalla las dimensiones principales para determinar la pérdida de carga, como bien se sabe, la pérdida de carga será función del diámetro de la tubería, la velocidad correspondiente en el ducto y el material que definirá la rugosidad, para una tubería de lámina galvanizada , se realiza una tabla donde se especifican en detalle los accesorios, los tramos y las pérdidas de carga correspondientes.

A modo de ejemplo se muestra en la figura 73, el método de determinación de la pérdida de carga.

Figura 73. Pérdida de carga en tubería de lámina galvanizada.



Fuente: Flujo de fluidos en tuberías y ductos. Pág. 234.

- **Caída de presión en accesorios.**

Para determinar las pérdidas en los accesorios y conexiones de ductos resultado del cambio de dirección del flujo se usara el procedimiento de coeficiente de pérdidas. Usando la expresión 58, se determinaran los coeficientes correspondientes a cada accesorio y se determina la caída de carga respectiva.

$$H_f = C * \frac{V_d}{4000}^2 \quad (58)$$

Dónde:

V_d : velocidad en el ducto en [FPM].

C : coeficiente de pérdidas.

H_f : Perdidas de carga en el accesorio, en [in. c. a].

Tabla 47. Lista de coeficientes de perdida y perdidas por accesorio.

Tramo	Accesorio	Dimensiones	PFM	R/D	C	Hf
*-c	Codo 90°	22.125Ø	3937	1,5	0,15	0,145
c-d (Acc)	Codo 90°	18Ø	3964	1	0,22	0,216
e	Codo 90°	12.5Ø	4110	1,5	0,15	0,1583
e-j(Acc)	Codo 90°	12.5Ø	4110	1,5	0,15	0,1583
j	campana	37,6x27,4 wxd	492,12	-----	-----	0,1717

Fuente: Autor.

Tabla 48. Características del trayecto crítico y pérdida de carga.

Sección	Componente	Flujo [CFM]	Dimensiones calculadas [in]	Dimensiones estándar [in]	Velocidad real en el Ducto [FPM]	Perdidas por Fricción/100 Ft	Longitud [Ft]	Pérdida pulgada de agua
Venti.	Entrada	17520	33.07 \emptyset	33. \emptyset	2927	-----	-----	0.8
x-y	Ducto	17520	33.07 \emptyset	33 \emptyset	2927	0.33	9.84	0.032
y-z	Colector	17520	-----	-----	-----	-----	-----	5,9
z-a	Ducto	17520	28.564 \emptyset	28.5 \emptyset	3953,4	0,6	5,74	0.0344
a-b	Ducto	14016	25.548 \emptyset	25.5 \emptyset	3952	0,72	9,84	0.05904
b-*	Ducto	10512	22.125 \emptyset	22.125 \emptyset	3937	0,85	4,92	0.04182
*-c	Codo 90°	7008	22.125 \emptyset	22.125 \emptyset	3937	-----	-----	0.145
c-d (Acc)	Codo 90°	7008	18.065 \emptyset	18 \emptyset	3964	-----	-----	0,216
c-d	Ducto	7008	18.065 \emptyset	18 \emptyset	3964	1.2	24,4	0.2928
d-e	Ducto	3504	12.744 \emptyset	12.5 \emptyset	4110	1.8	16,4	0.2952
e	Codo 90°	3504	12.744 \emptyset	12.5 \emptyset	4110	-----	-----	0,1583
e-j(Acc)	Codo 90°	3504	12.774 \emptyset	12.5 \emptyset	4110	-----	-----	0,1583
j	campana	3504	37,6x27,4 wxdxi	37,6x27,4 wxdxi	492,12	0,1417	-----	0,1717
					Velocidad Teórica 3937[PFM]		Total	7.475

Fuente: Autor

La caída de carga por fricción total se asumirá como 7.6 pulgadas columna de agua, para tener en cuenta las pérdidas de carga de un codo en el tramo de succión del ventilador. Adicional a esto el ventilador debe generar la suficiente energía para que el fluido se mueva a la velocidad establecida de 20[m/s], por tanto se calcula la carga dinámica requerida y resulta en 0.96 [in.c.a], los puntos de captación y descarga se encuentran a la presión atmosférica, resulta entonces que el trabajo requerido por el ventilador será de 8.56 pulgadas columna de agua.

Se debe realizar una corrección de densidad ya que los catálogos están diseñados para condiciones atmosféricas estándar, como el lugar de operación es Bucaramanga y su altura sobre el nivel del mar es de 960 [m], la densidad del aire en esta zona disminuirá, al calcularla se obtiene una densidad de $1.07[\text{Kg}/\text{m}^3]$, la densidad estándar es de $1.2[\text{Kg}/\text{m}^3]$, por tanto se debe hacer una corrección en la pérdida de carga total antes calculada, al aplicar las leyes de los ventiladores tenemos:

$$Pr = Ps * \frac{\rho_r}{\rho_s} \quad (59)$$

$$Pr = 8.56 * \frac{1.07}{1.2} = 7.63[\text{in. c. a}]$$

Dónde:

P_r : *Perdida real de carga, en la zona de trabajo.*

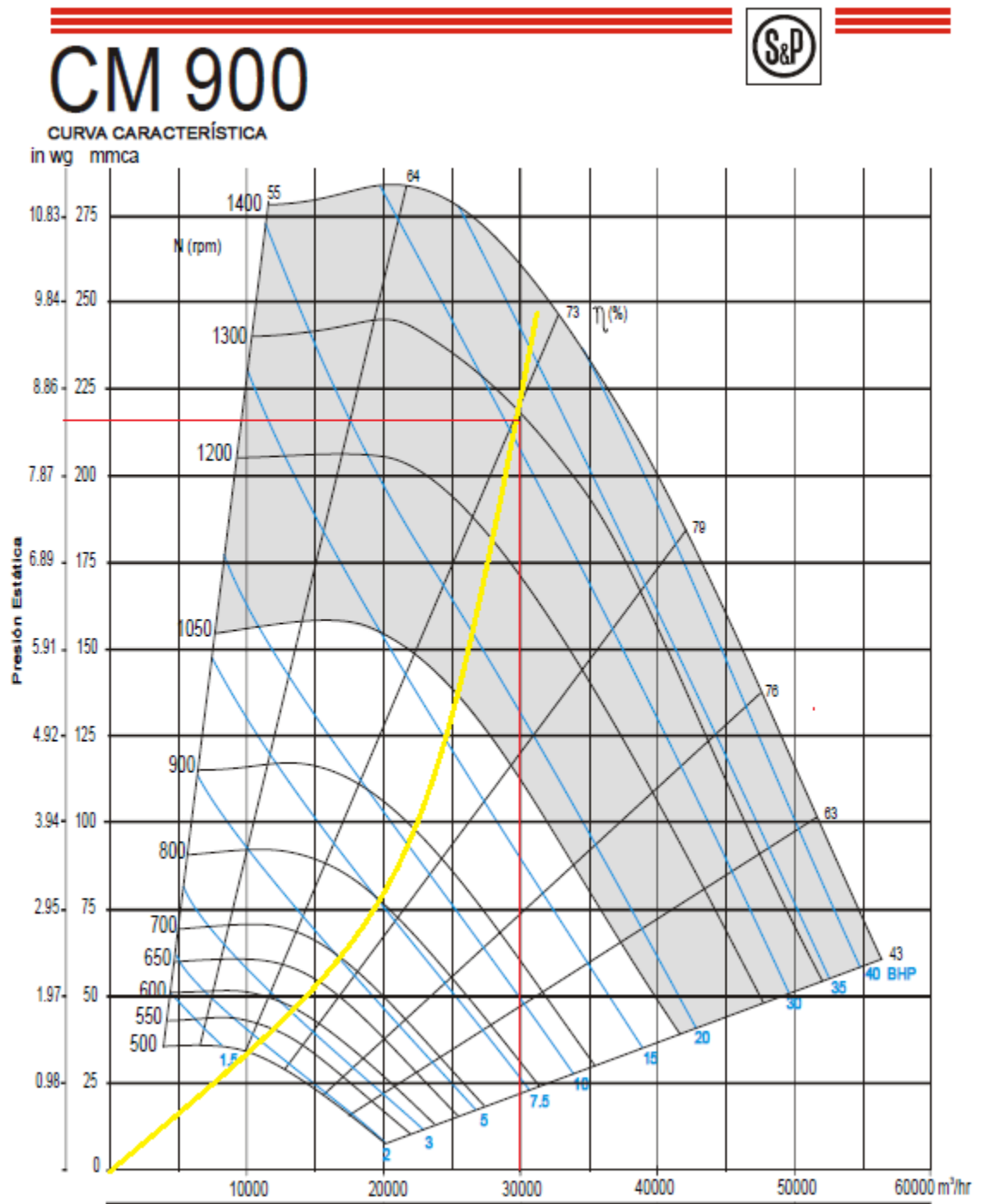
P_s : *Perdida de carga a nivel del mar.*

ρ_r : *Densidad real, $1.07 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$* , ρ_s : *Densidad Estándar, $1.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$*

La línea amarilla indica la curva característica del tramo de mayor pérdida de carga del sistema, mientras que la intersección de las líneas rojas indica el punto de operación del ventilador a condiciones estándar, es claro que el punto de intersección entre la curva característica del sistema y la curva del ventilador es la que define el punto de operación. El ventilador seleccionado está diseñado especialmente para grandes prestaciones de caudal, presión con bajo consumo de energía, ideales para la extracción de aire en aplicaciones comerciales e industriales³², la curva de rendimiento se observa en la figura 74.

³² Catalogo de selección Ventiladores centrífugos, Vent-Set S&P.

Figura 74. Selección del ventilador.



Fuente: Autor.

La curva del sistema es de la forma:

$$H = K * Q^2 \quad (60)$$

Donde se despeja la constante de la curva y se obtienen los datos de la tabla 49.

Tabla 49. Curva tabulada del sistema.

Q [m ³ /h]	H [in]
0	0
6000	0,344
12000	1,376
18000	3,096
24000	5,504
30000	8,6
36000	12,384

El renderizado final del sistema colector se muestra en las figuras 75, 76 y 77.

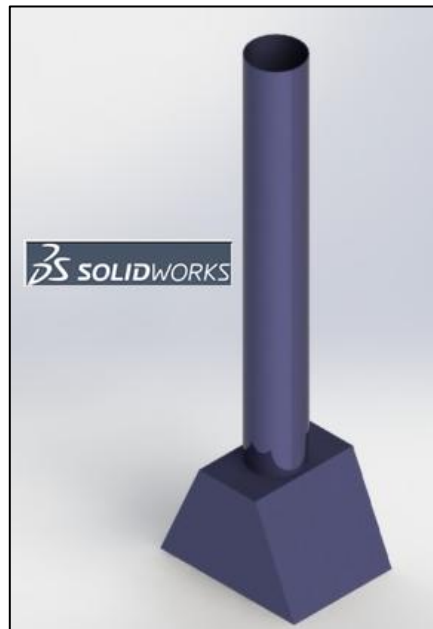
Fuente: Autor.

Figura 75. Ventilador centrífugo. Renderizado e importado desde Solidworks.



Fuente: Autor.

Figura 76. Campanas de extracción. Renderizado e importado desde Solidworks.



Fuente: Autor.

Figura 77. Sistema colector de polvo. Renderizado e importado desde Solidworks.



Fuente: Autor.

5. FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO FINAL DEL CUARTO DE GRANALLADO Y SANDBLASTING.

Se explicara a continuación el funcionamiento del cuarto de trabajo, básicamente el procedimiento es el siguiente:

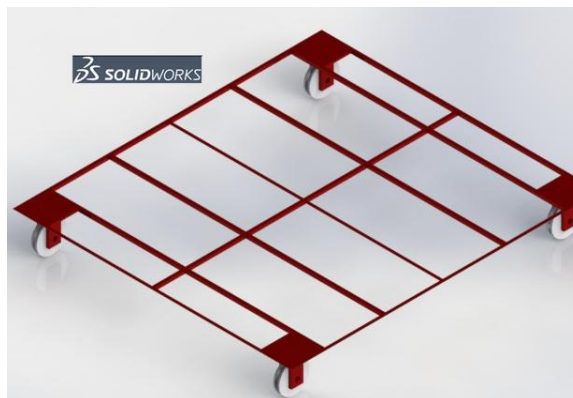
- Ubicación de las piezas de trabajo en las camillas de fijación, figura 78 y 79, estas son elementos que poseen un sistema de rieles que permitirán relacionarse entre sí para ubicar las piezas.

Figura 78. Mesas de soporte. Renderizado e importado desde Solidworks.



Fuente: Autor.

Figura 79. Mesa de soporte. Renderizado e importado desde Solidworks.



Fuente: Autor.

- Una vez las piezas estén ubicadas los operarios ingresaran al recinto y empezaran el proceso de tratamiento superficial. Los equipos ráfagas, figura 80, serán conectados a los compresores, estos a su vez permitirán el chorreado de las partículas hacia la superficie.

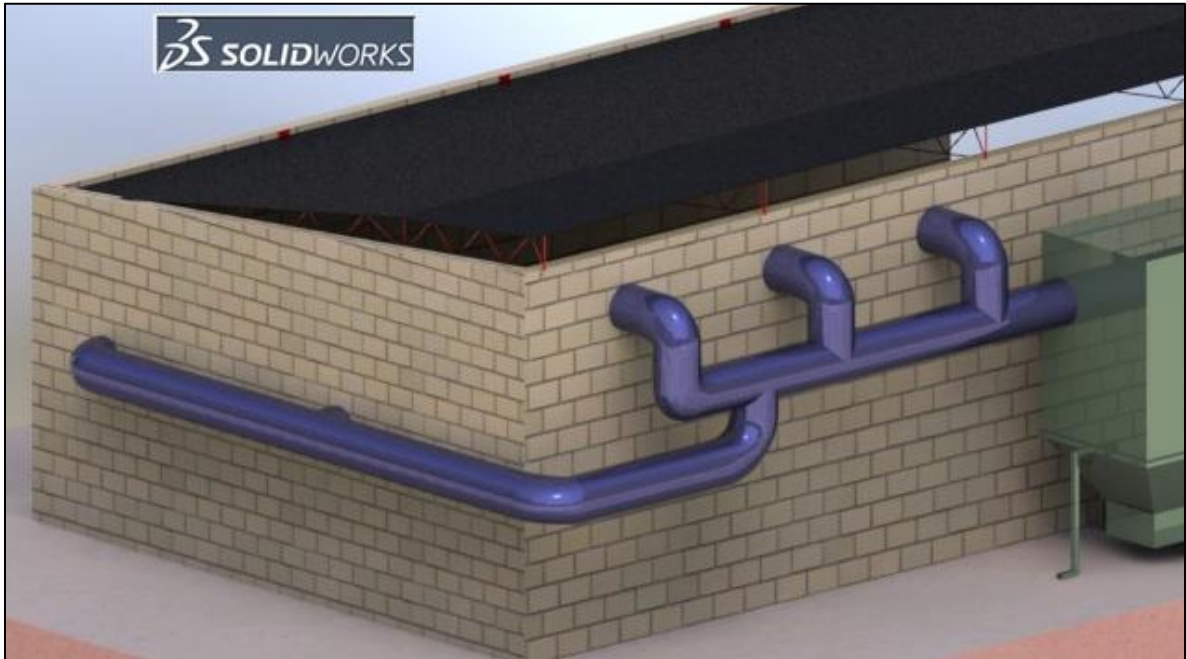
Figura 80. Equipos ráfaga.



Fuente: Autor.

- Cuando el chorro abrasivo impacta la superficie esta tiende a fragmentarse y expandirse a lo largo de todo el recinto, hay, es cuando el sistema colector de polvo mediante el diseño postulado empezara mediante las campanas de extracción a hacer su papel, las campanas trasportaran la mezcla de fluido por el ducto principal, ver figura 81, hacia el filtro de mangas, es en este punto cuando se separan los polvos finos del aire que será expulsado al ambiente, de esta forma controlando la contaminación del ambiente.

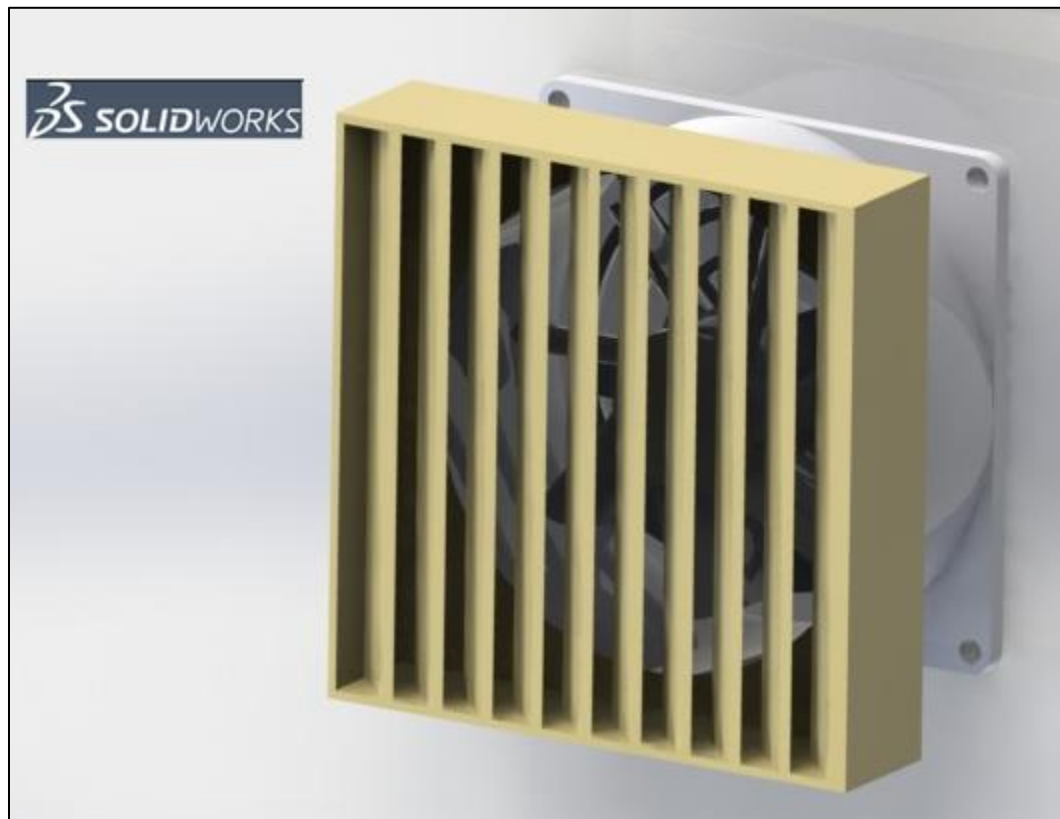
Figura 81. Campanas de extracción y ducto hacia el filtro de mangas.



Fuente: Autor.

- El 66.7 % de aire del cuarto será renovado cada minuto mediante unos ventiladores de tipo axial, figura 82, que aseguran las condiciones de caudal, y baja carga estática.

Figura 82. Ventiladores axiales.



Fuente: Autor.

Los ventiladores axiales son especiales para procesos en los que se requiere un flujo volumétrico de grandes proporciones y bajas cargas estáticas de carga por vencer. Es importante direccionar el flujo de forma adecuada, por esto se dispone de un elemento adicional para direccionar el flujo.

- Se requerirá de dos operarios encargados de barrer parte del área de trabajo y llevar el abrasivo hacia el sistema de banda transportadora sectorizado, figura 83.

Figura 83. Banda transportadora.



Fuente: Autor.

- Una vez el material sea captado por la banda esta lo transportará hacia el elevador de cangilones, ver figura 84, el cual mediante dragado del material acumulado en su base y por el material que cae directamente en los cangilones este lo elevara y transportará hacia el punto de separación de finos y gruesos, el material que sirve caerá a las tolvas de alimentación, el que no, simplemente será eliminado como desecho.

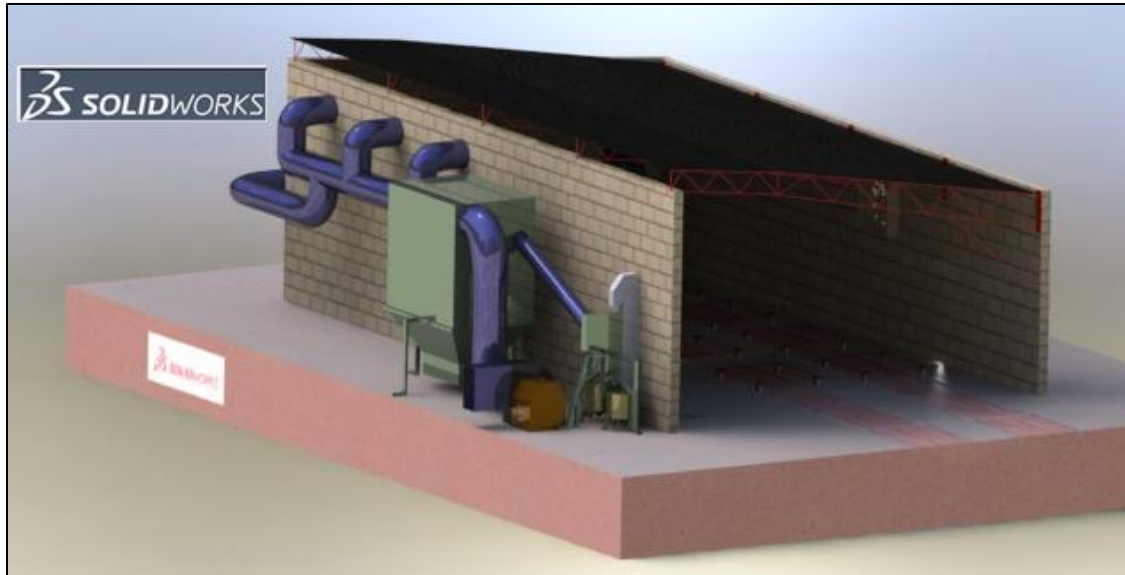
Figura 84. Elevador de cangilones. Renderizado e importado desde Solidworks.



Fuente: Autor.

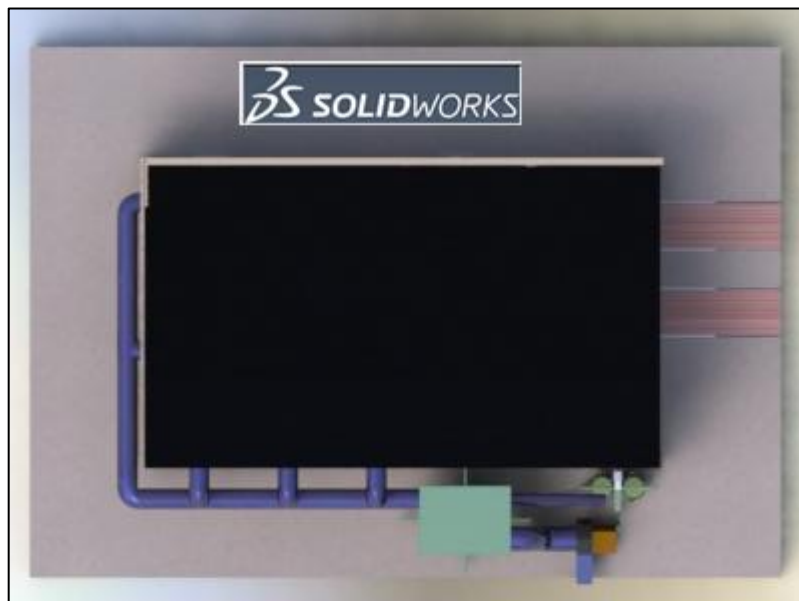
Se muestra a continuación la imagen renderizada final del diseño del cuarto de granallado y Sandblasting, figura 85 y 86.

Figura 85. Cuarto de Sandblasting, Vista perspectiva. Importado y Renderizado desde Solidworks.



Fuente: Autor.

Figura 86. Cuarto de Sandblasting, Superior. Importado y Renderizado desde Solidworks.



Fuente: Autor

6. ANÁLISIS DE INVERSIÓN

El análisis de inversión consistirá en verificar el costo aproximado de cada uno de los equipos seleccionados, mediante una revisión de los costos totales del equipo como conjunto se indicara el valor de la inversión requerida para la realización del proyecto. Información requerida:

- Costo del servicio.

Según información suministrada por el dueño de la empresa interesada el costo del proceso por metro cuadrado es de \$16.000 hasta \$ 20.000 pesos colombianos, todo depende del grado de rugosidad o perfil de anclaje requerido.

- El consumo de arena por metro cuadrado es de 50 [Kg], esta cantidad de arena tiene un costo de \$10.000³³.
- La utilidad estimada total por m^2 es de \$ 2500.

Se debe definir el concepto de Activo fijo, es decir implica la inmovilización de fondos en un periodo de tiempo, el activo fijo es una adquisición que hará la empresa. Estos activos fijos serán:

- Compra de banda transportadora.
- Compra elevador de cangilones.
- Compra de filtro de mangas.
- Construcción de los ductos y campanas de extracción.
- Compra del ventilador centrifugo.
- Compra de los ventiladores axiales.
- Obra civil requerida para adecuar el espacio a los equipos necesarios.

³³ Precio sugerido por compras al por mayor, Ingeniero encargado.TK ASME API.

Definir el tipo de proyecto de inversión es requerido en este paso del análisis, por ciertas características propias del proyecto podría decirse que este es un proyecto del tipo Expansión y conservación ambiental , con el cual se pretende mejorar el servicio de tratamiento superficial por chorro abrasivo orientado hacia la conservación del medio ambiente manteniendo bajos los niveles de contaminación del aire expulsado al ambiente, y aumentando los niveles de producción o rendimiento de limpieza de la empresa.

Se listara a continuación el costo estimado de cada uno de los equipos, basado en información recopilada de proveedores y fabricantes según corresponda, la tabla 50 resume los costos totales y la tabla 51 resume el tiempo esperado de recuperación de dinero.

- | | |
|--|--|
| • Banda trasportadora: | Costo aproximado: \$18'000.000 |
| Costo aproximado \$5'500.000. | • Ventilador ³⁴ axial: |
| • Elevador de cangilones: | Costo aproximado \$1'200.000 |
| Costo aproximado \$18'000.000 | • Ventilador ³⁴ centrifugo: |
| • Filtro de mangas, sistema de válvulas y filtros: | Costo aproximado \$3'000.000. |
| Costo aproximado \$60'000.000 | • Construcción de ductos y campanas de extracción: |
| • Obra Civil: | Costo aproximado \$8'750.000. |

³⁴http://www.salvadorescoda.com/tarifas/Catalogo_Tarifa_Ventiladores_Mundofan_Mayo2011.pdf

Tabla 50. Costo estimado de inversión.

Especificación	Detalle	Cantidad	Costo aproximado Unitario	Costo Total
Adquisición de Equipo	Elevador de cangilones	1	\$ 18.000.000,00	\$ 18.000.000,00
Adquisición de Equipo	Banda transportadora	1	\$ 5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
Adquisición de Equipo	Filtro de mangas	1	\$ 60.000.000,00	\$ 60.000.000,00
Adquisición de Equipo	Ventilador axial	2	\$ 1.200.000,00	\$ 2.400.000,00
Adquisición de Equipo	Ventilador centrifugo	1	\$ 3.000.000,00	\$ 3.000.000,00
Construcción ducto	Ducto y ramales	Según diseño	\$ 4.500.000,00	\$ 4.500.000,00
Construcción campanas	Campanas de extracción	5	\$ 4.250.000,00	\$ 21.250.000,00
Accesorios adicionales	Boquillas y elementos de protección	Según diseño	\$ 8.750.000,00	\$ 8.750.000,00
Inversión total estimada				\$ 123.400.000,00

Tabla 51. Periodo de recuperación del dinero bajo suposiciones óptimas.

Jornada de trabajo[Horas]	8
Rendimiento m ² /hora	54
m ² /Jornada	432
Precio/m ²	\$ 20.000,00
Utilidad/m ²	\$ 2.500,00
Utilidad/Jornada	\$ 1.080.000,00
Utilidad semanal	\$ 5.400.000,00
Utilidad mensual	\$ 21.600.000,00
Inflación 0,279%Ef. Mensual	
Tiempo estimado de recuperación del dinero	6 Meses

Fuente: Autor. Importado desde Excel.

La realidad es que el periodo de recuperación real deberá hacerse bajo consideraciones de inversión más exactas, teniendo en cuenta que no siempre se estará haciendo el limpiado de superficies y que normalmente la empresa acostumbra a hacer contratos, motivo por el cual el tiempo real de recuperación de la inversión será mucho mayor.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

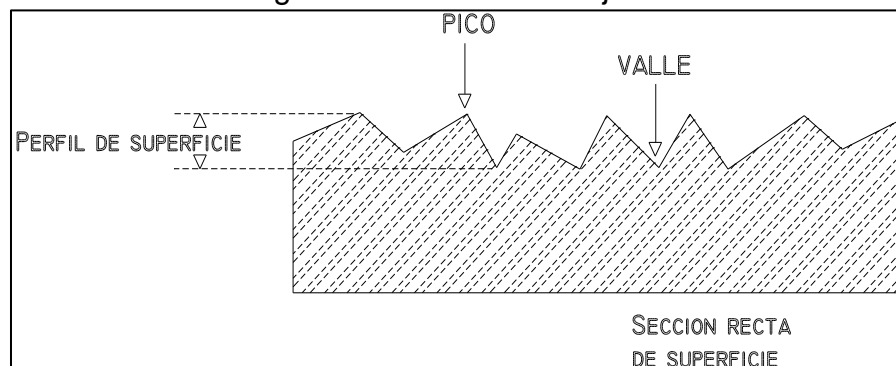
➤ **Control de la corrosión.**

- Será posible disminuir la corrosión reduciendo una de las dos reacciones presentes en el proceso la de reducción y oxidación, en el caso objeto de estudio se pretende adecuar la superficie metálica para asegurar la adherencia de la pintura, dando el perfil de anclaje y rugosidad específica de la superficie para luego pintar la superficie, el objetivo de pintar la superficie es el de disminuir la velocidad de reacción tanto anódica como catódica, los inhibidores de corrosión interfieren con una de las reacciones parciales y reduce la corrosión.

➤ **Perfil de anclaje y pintura.**

- El perfil de rugosidad es de suma importancia una vez se realice el proceso de impacto de las partículas, este concepto se define como el máximo promedio de profundidad entre picos y valles causado por el impacto de las partículas abrasivas sobre la superficie, figura 87. La importancia de este indicativo permite definir el área en la que la pintura se puede adherir, además que proporciona un soporte mecánico, resultando en una buena adhesión, se puede concluir de forma general que los recubrimientos de película gruesa requerirán una rugosidad mayor que las películas de pintura más delgadas.

Figura 87. Perfil de anclaje.



Fuente: Control de Procedimientos en Pinturas sobre Tanques de Almacenamiento de Combustible. Doc.

Perfiles de anclaje obtenidos con la arena sílice que será el abrasivo principal en los métodos de limpieza, se observa la relación del tamaño de la partícula con los grados de rugosidad requerida, el rango para los perfiles de anclaje aceptados están entre 1 milésima de pulgada y 4 milésimas de pulgada, ver tabla 52. Donde los dos son los límites extremos para la mínima adhesión de la pintura y el máximo consumo de esta haciendo el proceso de menor calidad o más costoso, la recomendación indica que se debe estar entre estos rangos.

Tabla 52. Perfiles de anclaje recomendados.

Material	Profundidad en milésimas de milímetro (milésimas de pulgada)			
	38.1 (1.5)	50.8 (2)	63.4 (2,5)	63.4-101.6 (3-4)
Arena sílica (malla)	16/35	16/35	8/35	8/20

Fuente: <http://www.pemex.com/files/content/NRF-053-PEMEX-20061.pdf>

➤ **Recomendaciones**

Si los valles son demasiados profundos es decir el perfil de anclaje es mayor, el recubrimiento puede tener dificultades para penetrar en la parte inferior de estos, lo que originara que queden espacios vacíos, lo que puede aumentar zonas de riesgo para procesos de corrosión, las montañas o picos pronunciados no serán recubiertos de forma adecuada con la capa del inhibidor o pintura, dejándolos expuestos o cerca de la superficie, lo que provocaría una oxidación prematura conocida como “pitting” o picaduras puntuales. En este caso particular, cuando los perfiles de anclaje se exceden, se debe aplicar un mayor espesor de película de pintura para asegurar la protección.

➤ **BOQUILLAS Y RENDIMIENTOS ESPERADOS.**

La base de estudio del fenómeno de erosión por impacto de partículas en una superficie permite entender los requerimientos de presión y caudal para obtener un rendimiento específico, en nuestro caso el recomendado por la empresa el cual debería ser un rendimiento como mínimo de $50[m^2/h]$.

La tabla 53, permite definir los requerimientos de consumo, caudal y presión, para un número de boquilla específico, para cumplir con las necesidades de rendimiento exigido.

Se observa de la tabla 53, que el consumo requerido por boquilla No 7 es de $1584[Lb/h]$ o $0.72 [Ton/h]$ con cuatro boquillas se obtendría un consumo de $2.88 [Ton/h]$ lo que correspondería al rendimiento aproximado de $50 [m^2/h]$ exigido por la empresa y confirma la necesidad de los cuatro compresores suministrando un flujo aproximado de $260 [CFM]$ a una presión de $100 [Psi]$ cada uno.

Tabla 53. Selección de la boquilla.

Nozzle Orifice	Pressure at the Nozzle (psi)								Air (in cfm) Abrasive & HP requirements
	50	60	70	80	90	100	125	150	
No. 2 (1/8")	11	13	15	17	18.5	20	25	30	Air (cfm)
	.67	.77	.88	1.01	1.12	1.23	1.52	1.82	Abrasive (cu.ft./hr & Lbs/hr)
	67	77	88	101	112	123	152	182	Compressor hp
No. 3 (3/16")	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6.6	
	26	30	33	38	41	45	55	66	Air (cfm)
	1.50	1.71	1.96	2.16	2.38	2.64	3.19	3.83	Abrasive (cu.ft./hr & Lbs/hr)
No. 4 (1/4")	150	171	196	216	238	264	319	383	Compressor hp
	6	7	8	9	10	10	12	14	
	47	54	61	68	74	81	98	118	Air (cfm)
No. 5 (5/16")	2.68	3.12	3.54	4.08	4.48	4.94	6.08	7.30	Abrasive (cu.ft./hr & Lbs/hr)
	268	312	354	408	448	494	608	730	Compressor hp
	11	12	14	16	17	18	22	26	
No. 6 (3/8")	77	89	101	113	126	137	168	202	Air (cfm)
	4.68	5.34	6.04	6.72	7.40	8.12	9.82	1.178	Abrasive (cu.ft./hr & Lbs/hr)
	468	534	604	672	740	812	982	1,178	Compressor hp
No. 7 (7/16")	18	20	23	26	28	31	37	44	
	108	126	143	161	173	196	237	284	Air (cfm)
	6.68	7.64	8.64	9.60	10.52	11.52	13.93	1.672	Abrasive (cu.ft./hr & Lbs/hr)
No. 7 (7/16")	668	764	864	960	1052	1152	1393	1,672	Compressor hp
	24	28	32	36	39	44	52	62	
	147	170	194	217	240	254	314	377	Air (cfm)
No. 7 (7/16")	8.96	10.32	11.76	13.12	14.48	15.84	19.31	2.317	Abrasive (cu.ft./hr & Lbs/hr)
	896	1032	1176	1312	1448	1584	1931	2,317	Compressor hp
	33	38	44	49	54	57	69	83	

Fuente: Catalogo Clemco, selección de boquillas.

➤ **SELECCIÓN DEL ELEVADOR DE CANGILONES.**

El proceso de selección del elevador requería conocer de forma clara y precisa las características del material a transportar, además del flujo másico máximo correspondiente al rendimiento exigido, se pudo seleccionar el elevador para un proveedor reconocido en este campo, con el Catalogo de Martin, y basado en el análisis de la información recopilada se logró comprobar las dimensiones básicas del elevador seleccionado, como el ancho de banda, tamaño de los tambores, tipo de descarga, número de lonas requerido para la banda del elevador, y numero de cangilones.

Se debe aclarar que el elevador seleccionado cumple con los requerimientos mínimos de carga exigidos, y que además posee la capacidad de transportar hasta el doble de material lo que correspondería a un mayor rendimiento.

➤ **SELECCIÓN DE LA BANDA TRANSPORTADORA.**

El proceso de selección de la banda exigía parámetros similares a los del elevador de cangilones, pero en esta etapa se necesitaba realizar un cálculo más exigente basado en un procedimiento estándar por la DIN 22101 para el dimensionamiento de las bandas transportadoras, el cual consistía en definir las fuerzas de fricción relacionadas a todos los elementos de la banda, como los polines, el peso de la banda, efectos de fricción generados por el sistema de limpieza en la zonas límites, tiempos razonables de arranque, todo con el fin de dimensionar de forma adecuada el sistema de transporte para cumplir con los requerimientos exigidos,

Una vez más se logró este objetivo con la pequeña aclaración de que este tipo de sistemas se utilizan para transportar flujos de diseño de hasta 86 [Ton/h], lo cual genera a primera vista que según el rendimiento exigido sobrepasa los requerimientos, es ahí cuando la ayuda y juicio de expertos han considerado es un parámetro que es indiferente siempre y cuando se cumplan con los requisitos del sistema, ya que este aparente sobredimensionamiento se verá recompensado en los bajos costos de mantenimiento y consumo energético a comparación de otros sistemas de recuperación como el de tornillos sinfín, bajo estas consideraciones se optó por realizar la selección de la banda.

➤ **SISTEMA COLECTOR DE POLVO.**

Se seleccionó el filtro de mangas y se analizó la información suministrada por el catálogo, comparando los datos ofrecidos por el fabricante con un modelo teórico del cálculo del área requerida de filtración, con el planteamiento de un volumen de control se pudo establecer el flujo requerido y bajo consideraciones que surgieron de la información recopilada se logró dimensionar de forma aproximada los ductos y campanas de extracción, luego se calcularon las pérdidas del tramo crítico y de esta forma se logró una selección aproximada del ventilador centrifugo.

BIBLIOGRAFIA

AERODYNE. Catálogo. Disponible en: < <http://www.aerodyne.com/>>.

ARIAS, Julio Miker. Diseño del sistema de extracción localizado para el banco de pruebas de combustión del proyecto carbón. Tesis ingeniería Mecánica. Lima. Universidad católica del Perú. PUCP. Facultad de ciencias e ingeniería. p. 92

BOTIA, José Salomón. Ingeniería de corrosión. En: Principios de corrosión. Primera parte. Bogotá D.C: Fénix, 1985. p 7-214.

BLASTING. Catálogo. Disponible en:< <http://www.blasting.com.ar/>>

CLEMCO. Catálogo. Industrial Blast Facilities. Disponible en <<http://www.clemcoindustries.com/>>.

DUNLOP. Catálogo. Conveyor Belt design and calculation. **s.l s.f.** p.161.

HOLLINGSHEAD. Andrew F. Dust collector Design and safety. Senior consultant. Penta Engineering Company. **s.l. s.f** .p.13.

MARTIN. Catalogo. : Bucket-elevator-catalog.pdf.Martin. Disponible en: <<http://www.martinsprocket.com/2001/SecD.pdf>>

MESA, Darío Hernán. Principios de tribología con énfasis en desgaste. En: Tipos de desgaste, Desgaste erosivo y erosivo-corrosivo. Pereira: Imprenta universidad tecnológica de Pereira, 2007. p. 176-203.

PHOENIX, Catalogo. Fundamentos para el diseño de bandas transportadoras Disponible en:< <http://www.krk.com.br/>>.

POSSO, Raúl. Manejo y Transporte de Materiales Aparatos de Transporte Continuo.3ª. Parte. Bucaramanga, Santander.1986. p. 1-114.

Salvador escoda. Catalogo Técnico, Salvador escoda. Disponible en:
<<http://www.salvadorescoda.com/>>

S&P. Soler & Palau. Manual práctico de ventilación. Disponible en:
<<http://www.solerpalau.es/>>

s.n. s.f. s.l. Consideraciones para el diseño de sistemas colectores de mangas.
[Anónimo]

s.n. s.f. s.l. Diseño de conductos de sistemas de ventilación localizada por extracción. [Anónimo]

TAPCO INC. Catálogo. Cangilones para elevadores. Guía de productos.2006.
Disponible en: <<http://www.tapcoinc.com>>

TREVIÑO, Álvaro Manuel. Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión. Tesis maestro en ciencias de la ingeniería mecánica, especialidad en materiales. México. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Capítulo 4.

WENSIK, Henk. Fabrication of Microstructures by Powder Blasting. Ph.D. thesis. University of Twente. The Netherlands. p. 11-114.

ANEXOS

ANEXO A. DETERMINACIÓN DE LA ARENA REQUERIDA

Dimensiones del Cuarto

$$L = 17,5 \text{ [m]}$$

$$An = 10 \text{ [m]}$$

$$Al = 4 \text{ [m]}$$

Volumen interno

$$Vi = L \cdot An \cdot Al$$

Area de la superficie a limpiar

$$lon = 12 \text{ [m]}$$

$$d = 2,54 \text{ [m]}$$

$$ATk = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot 2 + \pi \cdot d \cdot lon$$

Arena requerida

$$\frac{Arena_{TK}}{ATk} = 50 \text{ [Kg/m}^2\text{]}$$

Jornada continua de trabajo

$$J = 8 \text{ [h]}$$

$$Ren = 25 \text{ m}^2/\text{h}$$

$$TrCon = J \cdot Ren$$

$$Areq = \frac{Arena_{TK}}{ATk} \cdot TrCon$$

Flujo Volumetrico de arena por jornada de trabajo

$$\rho_{Arena} = 1600 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\dot{V}_{Arena} = \frac{Areq}{J \cdot \rho_{Arena}}$$

$$\dot{m}_{Arena} = \dot{V}_{Arena} \cdot \rho_{Arena}$$

Flujo en unidades inglesas

$$\dot{V}_{ArenaIngles} = \dot{V}_{Arena} \cdot \frac{1}{0,3048^3}$$

Tanques a limpiar

$$nTk = Ren \cdot \frac{J}{ATk}$$

$$nTk = 4$$

Con la ayuda de EES se tiene:

Resultados

$Al = 4 \text{ m}$
$An = 10 \text{ m}$
$Arena_{TK} = 5294 \text{ Kg}$
$Areq = 21178 \text{ Kg}$
$ATk = 105,9 \text{ m}^2$
$d = 2,54 \text{ m}$
$J = 8 \text{ h}$
$L = 17,5 \text{ m}$
$lon = 12 \text{ m}$
$\dot{m}_{dotArena} = 2647 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$
$nTk = 4$
$Ren = 52,94 \frac{\text{m}^2}{\text{h}}$
$\rho_{rhoArena} = 1600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$TrCon = 423,6 \text{ m}^2$
$Vi = 700 \text{ m}^3$
$\dot{v}_{dotArena} = 1,655 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
$\dot{v}_{dotArenaIngles} = 58,43 \frac{\text{Ft}^3}{\text{h}}$

ANEXO B. DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE BANDA TRANSPORTADORA

Con la ayuda del EES se tiene:

Diseño de la banda transportadora

Parametros conocidos

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]} \text{ Gravedad}$$

$$l = 14 \text{ [m]} \text{ Longitud de la correa, desde los centros de los tambores}$$

$$\rho_{\text{sand}} = 1,6 \text{ [ton/m}^3\text{]}$$

$$\rho_{\text{sandSI}} = 1600 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Potencia requerida y resistencia al movimiento en estado de funcionamiento continuo

Potencia Requerida en el tambor

$$P_w = F_w \cdot v_t$$

Potencia total requerida por los motores

$$P_{\text{Merf}} = \frac{P_w}{\text{etha}_{\text{ges}}}$$

$$\text{etha}_{\text{ges}} = 0,65$$

Calculo de F_w

$$F_w = F_H + F_N + F_{ST} + F_S$$

Calculo de F_H

$$F_H = f \cdot l \cdot g \cdot (m_R + (2 \cdot m_G + m_L) \cdot \cos(\delta)) \text{ Fuerza primaria}$$

$$\delta = 2 \text{ [deg]} \text{ Angulo de inclinacion de la banda}$$

$$f = 0,018 \text{ Tabla 6 catalogo phenix}$$

Calculo de m_L

$$m_L = l_m / v$$

$$l_m = l_{vth} \cdot \rho_{\text{sandSI}} \cdot \phi_{st}$$

$$m_L = \frac{Q}{v_t}$$

$$Q = 23,89 \text{ [Kg/s]}$$

suponiendo una banda de ancho 400 [mm], ya que es la recomendada para transporte de arena tabla 2 pag 63 posso

$$I_{vth} = v_t \cdot Fac \quad \text{Para un angulo lambda de 20} \quad \text{Flujo teorico de volumen}$$

$$Fac = 72$$

$$v_t = 1,68 \quad [m/s] \quad \text{Velocidad de transporte, recomendada para banda con descargador}$$

$$v = 90 \quad [m/h]$$

$$\phi_{st} = 1 \quad \text{coeficiente de flujo del transportador, para delta=2 grados}$$

Calculo de m_R

$$m_R = \frac{m_{Ro}}{l_{Ro}} + \frac{m_{Ru}}{l_{Ru}}$$

Masa relativa a la longitud de los componentes del polin giratorio en ambos recorridos

$$m_{Ro} = 5 \quad [kg] \quad \text{Tabla 4, ancho de correa 400mm, dr polin 63,5mm}$$

$$l_{Ro} = 1,5 \quad [m] \quad \text{Distancia recomendada tabla 10 posso pag 71}$$

$$l_{Ru} = 3 \quad [m] \quad \text{Distancia recomendada tabla 10 posso pag 71}$$

$$m_{Ru} = 4,2 \quad [kg]$$

Calculo de m_G

$$m_G = B \cdot m_{GG}$$

$$B = 0,4 \quad [m]$$

$$m_{GG} = 11,5 \quad [kg/m^2]$$

Calculo de F_N

Resistencias secundarias

$$F_N = (C_I - 1) \cdot F_H$$

$$C_I = 3,9 \quad \text{Factor de correccion para bandas menores a 80 metros}$$

Calculo de F_{ST}

Resistencia del material transportado

$$F_{ST} = h_l \cdot g \cdot (m_G + m_L)$$

$$h_l = -0,48$$

Calculo de F_S

$$F_S = 0$$

Calculo de fuerzas y Fuerzas de transmision en arranque y Frenado

$$F_{al} = a_A \cdot l \cdot (C_{RI} \cdot m_R + m_G + m_L)$$

$$C_{RI} = 0,9 \quad \text{Coeficiente para calcular las masas de los polines reducidas a su periferia}$$

Puesta en marcha

$$P_A = \frac{F_{TrA}}{F_w}$$

Para evitar tensiones altas en la banda se toma que $P_A \leq 1,7$

$$P_A = 1,7$$

Aceleracion de la puesta en marcha

$$a_A = (P_A - 1) \cdot \frac{F_w}{I \cdot (C_{RI} \cdot m_R + m_G + m_L)}$$

Tiempo de aceleracion

$$t_{a,A} = \frac{vt}{a_A}$$

Calculo de las tensiones en la banda

$$T1 = 1,5 \cdot F_w$$

$$T2 = 0,5 \cdot F_w$$

Torque maximo en el arranque

$$MA = F_{TrA} \cdot \frac{D_{pulley}}{2}$$

$$D_{pulley} = 0,4$$

Verificacion del esfuerzo maximo

$$S_{seg} = 1,7$$

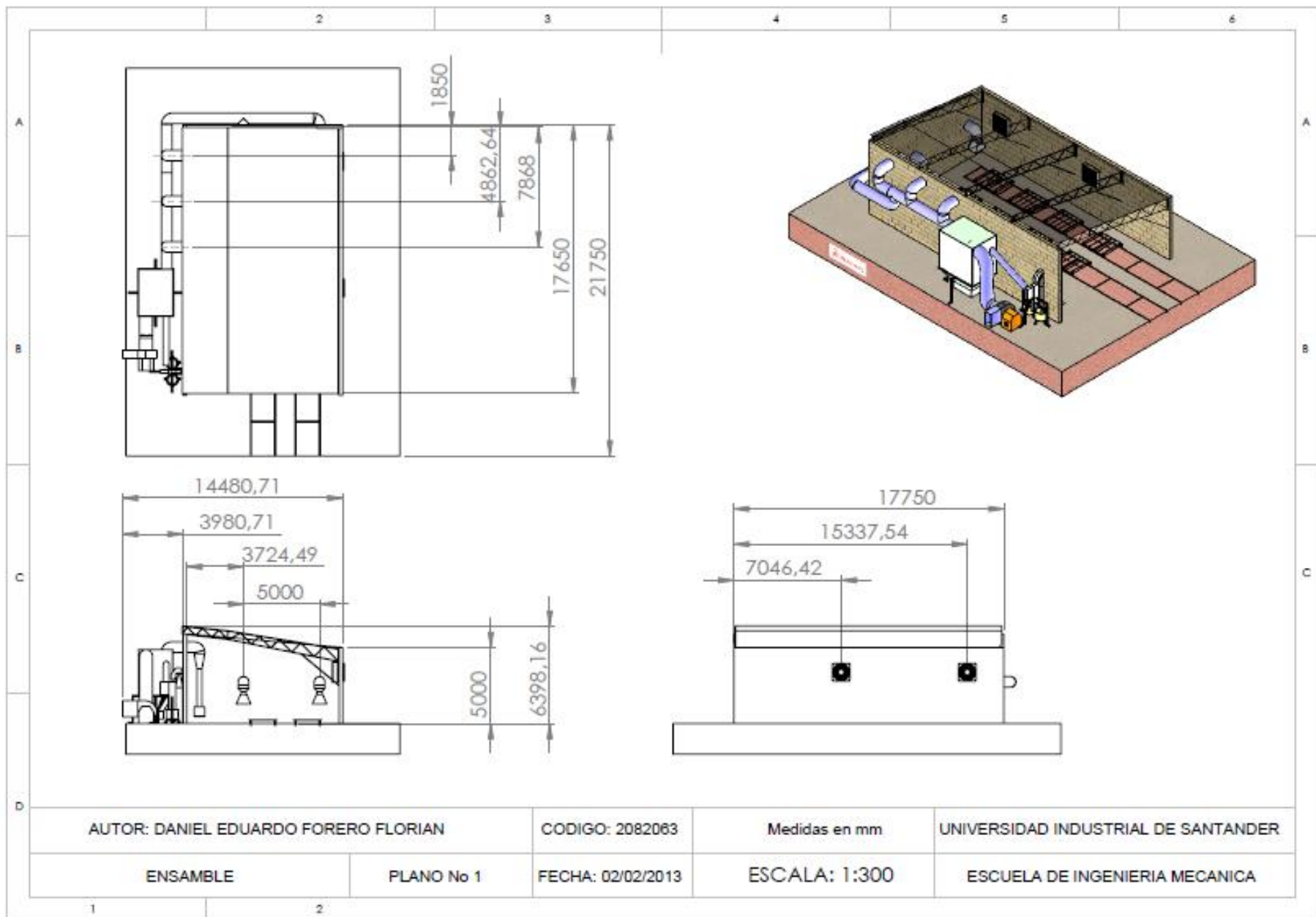
$$T_{admisible} = 200000$$

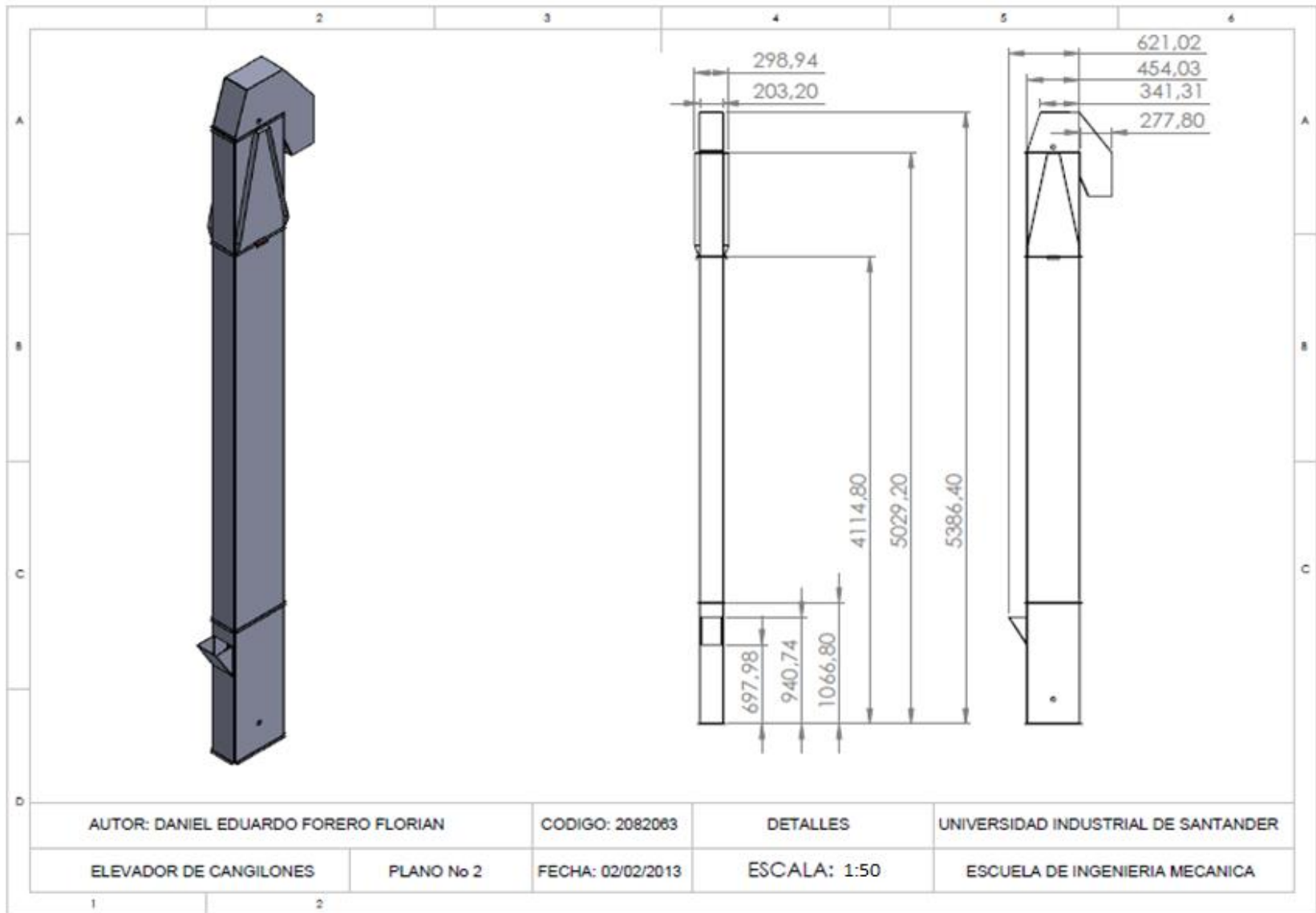
$$T1 \cdot 1,7 = T_{max}$$

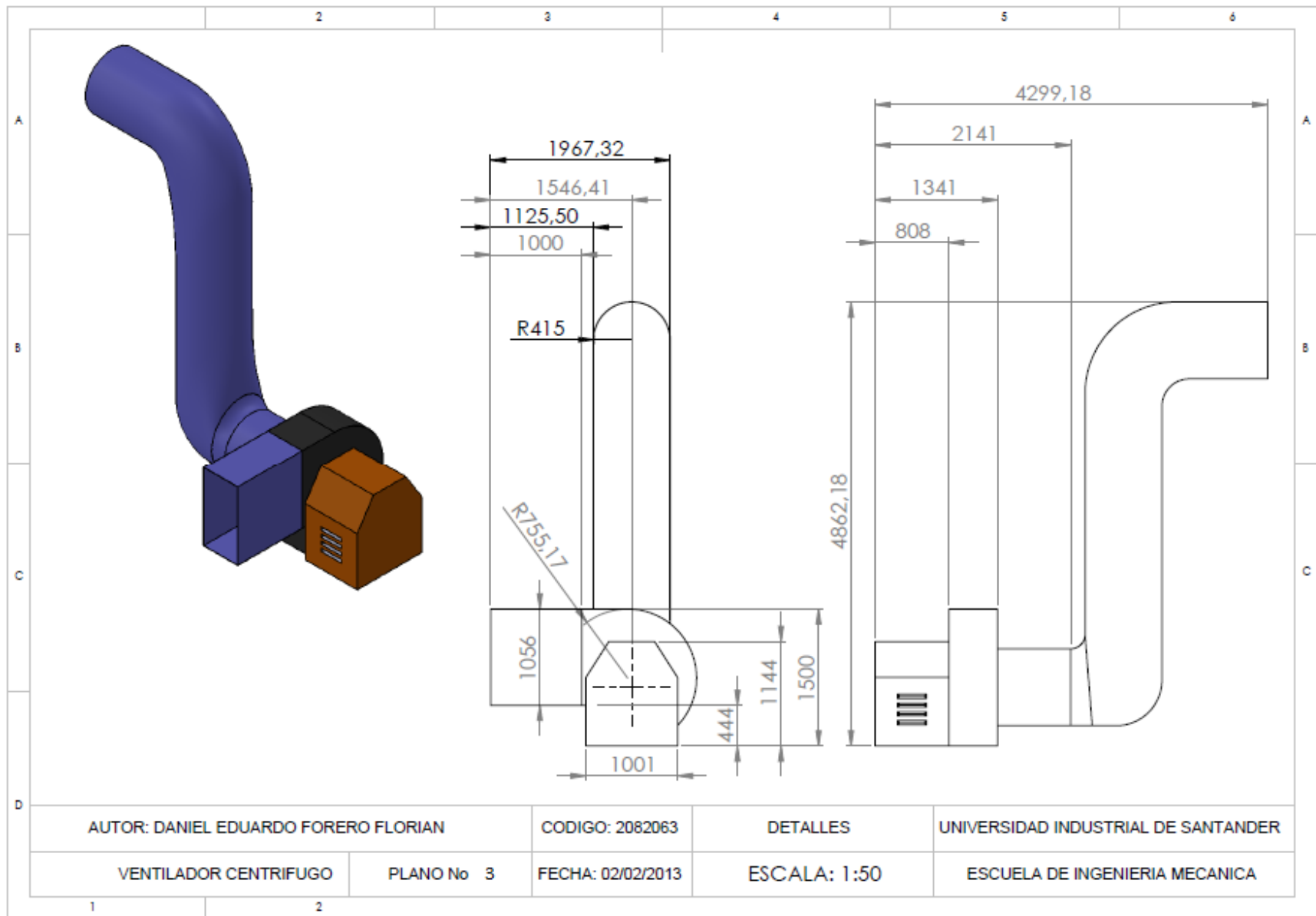
$$Seg_{Calculado} = \frac{T_{admisible}}{T_{max}}$$

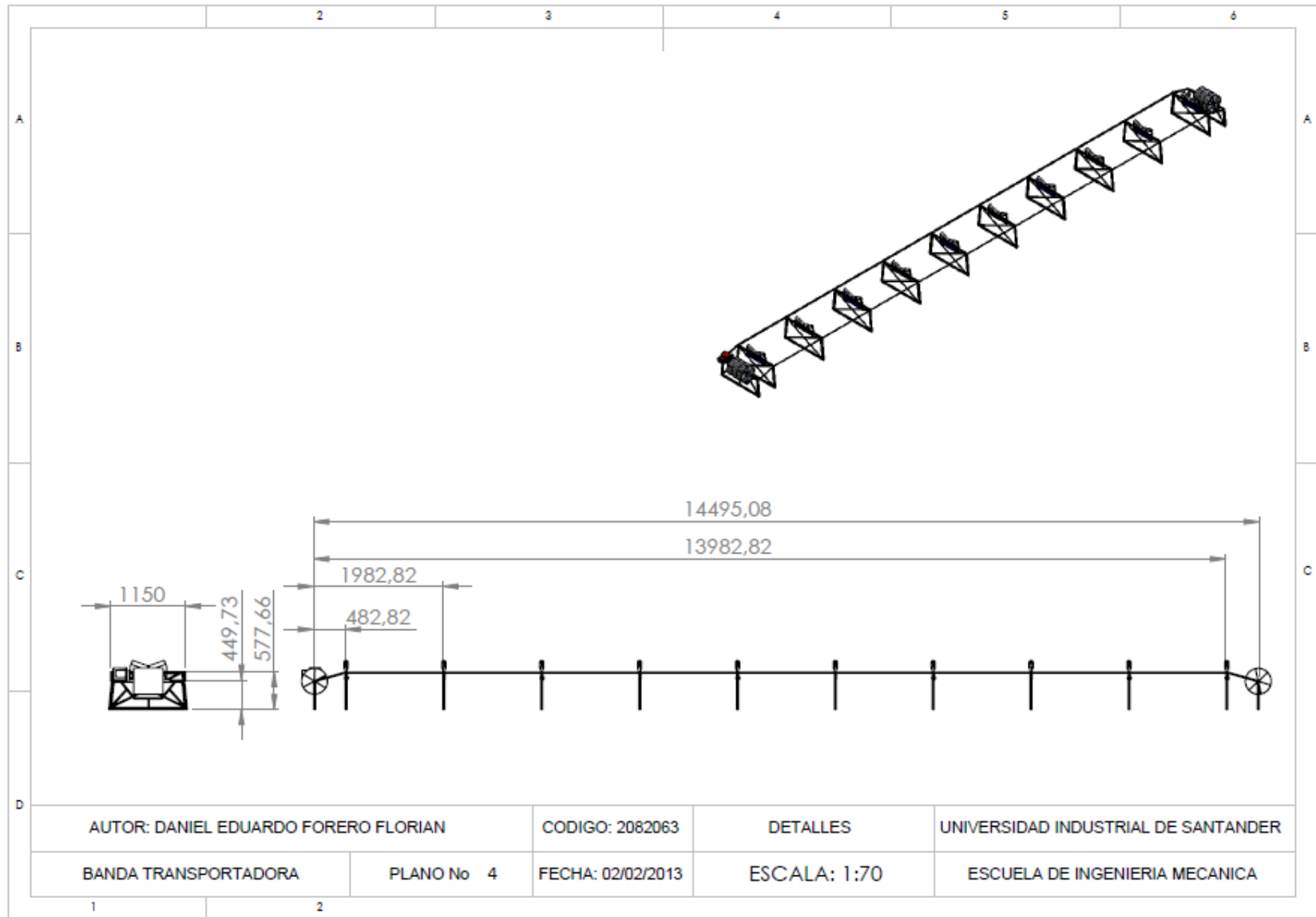
Resultados ver tabla 30.

ANEXO C. PLANOS GENERALES









**ANEXO D.MODELO
PARA DETERMINAR LA
CANTIDAD PROMEDIO DE
ARENA POR METRO
CUADRADO DE SUPERFICIE
PARA OBTENER UN PERFIL DE
ANCLAJE BAJO NORMA SSPC-
SP5.**

El análisis de la información estudiada en la sección del marco teórico, permitió un acercamiento más realista con las variables involucradas en el proceso de erosión por impacto de partículas en una superficie que requiere un perfil de anclaje específico, antes de ser recubierta con un inhibidor de corrosión, con el apoyo de esta información se logró encontrar un modelo matemático basado en experimentos de laboratorio¹, que establece una relación entre la dureza de la superficie, el módulo de elasticidad del material base, y la energía cinética de la partícula con la rugosidad o perfil de anclaje:

Dónde:

E: Modulo de elasticidad del acero, 200 Gpa .

U_k: Energía cinética de la partícula, Jouis .

Hv: Dureza de indentación de la superficie, Pa .

(1)

$$R_u = 123101 \cdot \frac{E^{(1/2)} \cdot U_k^{(1/3)}}{H_v^{(5/6)}}$$

La idea principal es poder determinar la energía cinética de una partícula que incida en la superficie y que genere el perfil de anclaje característico, una vez se determina la energía cinética de la partícula podemos relacionarla con la siguiente expresión:

(2)

$$U_k = 1/2 \cdot m \cdot V_p^2$$

¹WENSIK, Henk. Fabrication of Microstructures by Powder Blasting. Ph.D. thesis. University of Twente. The Netherlands. p. 11-114.

La expresión (2), relaciona la energía cinética de la micro esfera abrasiva con el cuadrado de la velocidad, otra expresión encontrada permite relacionar la velocidad del erosivo como función de la presión del reservorio, con lo cual se puede hacer un análisis para determinar la presión del equipo ráfaga, este es un parámetro de diseño y deberá constatar que las recomendaciones y datos suministrados por la empresa interesada estén en el rango de resultados del modelo planteado; la expresión¹ (3) relaciona la velocidad de la partícula con la presión del equipo ráfaga:

Dónde:

V_p : Velocidad de la partícula, $\frac{m}{s}$.

Pr : Presión en el reservorio. Pa .

(3)

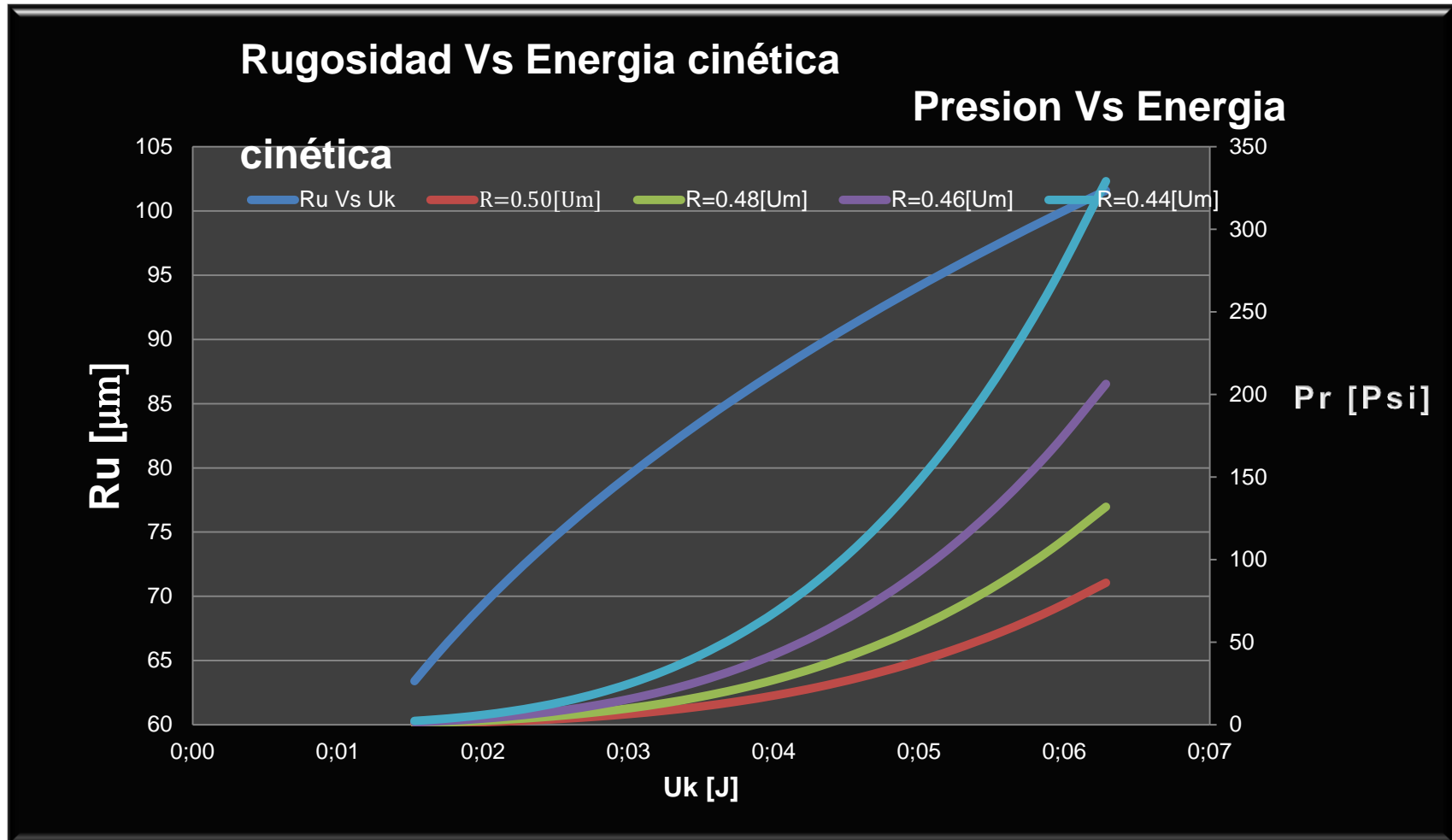
$$V_p = \sqrt{1,4 \cdot (69,8 \cdot 10^3) \left[\frac{1}{1,4} \right] \cdot (0,5283 \cdot Pr) \left[1 - \frac{1}{1,4} \right]}$$

El planteamiento a la solución de la incógnita de cuanto masa se consume por metro cuadrado de superficie es uno de los principales objetivos de este análisis, con la ayuda de una herramienta de cálculo **Engineering Equation Solver**, se hará una simulación de datos realizando la variación de algunos parámetros que por razones teóricas se sabe están involucradas en el proceso.

1. Determinación de la energía cinética variando el tamaño de la partícula.

Según la ecuación (1), se observa que una superficie con alta dureza requerirá una mayor energía cinética para producir el nivel de rugosidad, se tomara inicialmente una dureza para un acero en la fase constituyente a la mar tensita-cementita los cuales presentan la mayor dureza, ver tabla 2. Del proyecto.

Grafica 1. Rugosidad y presión como función de la energía cinética.



Fuente: Autor.

Tabla 1. Resultados obtenidos, variación del tamaño de la partícula.

Hv=10 [Gpa]				
R=0,5 [mm]-Mesh 18.				
Ru [Um]	Uk [J]	Vp [m/s]	Pr [Pa]	Pr [Psi]
63,4	0,01527	191	4193	0,6082
65,41	0,01677	200,1	5819	0,8441
67,42	0,01837	209,4	7997	1,16
69,43	0,02006	218,8	10887	1,579
71,44	0,02185	228,4	14692	2,131
73,45	0,02375	238,1	19663	2,852
75,46	0,02576	248	26109	3,787
77,47	0,02787	257,9	34410	4,991
79,48	0,0301	268	45032	6,532
81,49	0,03244	278,3	58537	8,491
83,51	0,0349	288,6	75607	10,97
85,52	0,03748	299,1	97063	14,08
87,53	0,04019	309,7	123887	17,97
89,54	0,04302	320,5	157249	22,81
91,55	0,04598	331,3	198541	28,8
93,56	0,04908	342,3	249410	36,18
95,57	0,05231	353,4	311795	45,23
97,58	0,05569	364,6	387979	56,28
99,59	0,0592	375,9	480629	69,72
101,6	0,06286	387,4	592860	86

Fuente: Autor.

La tabla 1. Es un ejemplo de la simulación de datos, variando el tamaño de la partícula, en el rango de la escala de Mesh 18. a Mesh 20. O que es lo mismo; Para: $R1 = 500 \mu m$, $R2 = 480 \mu m$, $R3 = 460 \mu m$ y $R4 = 440 \mu m$,

La grafica 1. Permite pronosticar el aumento de la energía cinética para obtener un mayor perfil de anclaje, como también mayor requerimiento de presión, ya que esta es función de la energía cinética,

Como era de esperarse la partícula de mayor tamaño, $R=500[\mu m]$, presenta los requerimientos más bajos en cuanto a presión se refiere, con un máximo de 86 [Psi].

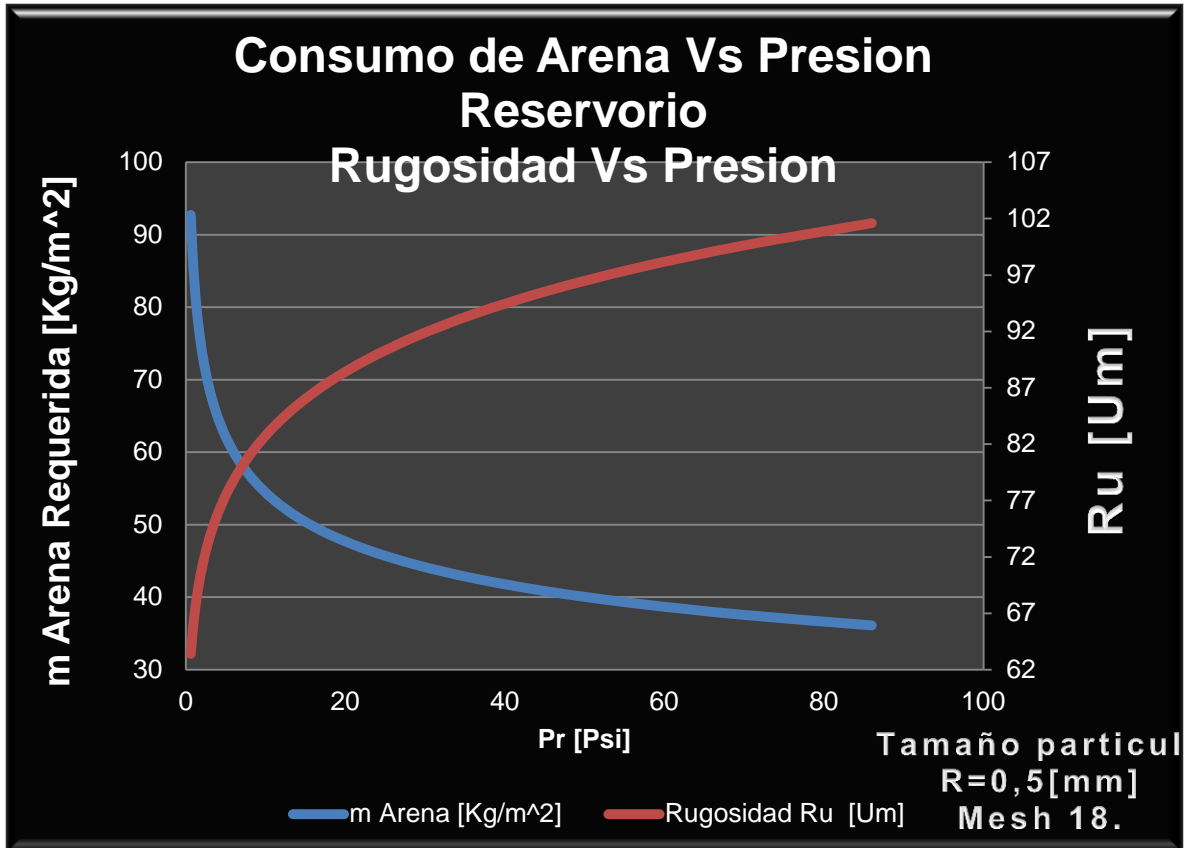
2. Determinación del consumo de arena en $[Kg/m^2]$, para una superficie con una dureza de 10 [Gpa], y un tamaño de partícula de 500 $[\mu m]$.

Tabla 2. Datos obtenidos para la determinación del consumo de arena por metro cuadrado de superficie, variación de la rugosidad superficial.

Hv=10 [Gpa]					
R=500 $[\mu m]$					
Ru $[\mu m]$	Uk[J]	Vp[m/s]	Pr[Pa]	P[psi]	M Arena Total $[Kg/m^2]$
63,4	0,01527	191	4193	0,6082	92,73
65,41	0,01677	200,1	5819	0,8441	87,12
67,42	0,01837	209,4	7997	1,16	82
69,43	0,02006	218,8	10887	1,579	77,32
71,44	0,02185	228,4	14692	2,131	73,03
73,45	0,02375	238,1	19663	2,852	69,09
75,46	0,02576	248	26109	3,787	65,46
77,47	0,02787	257,9	34410	4,991	62,1
79,48	0,0301	268	45032	6,532	59
81,49	0,03244	278,3	58537	8,491	56,13
83,51	0,0349	288,6	75607	10,97	53,46
85,52	0,03748	299,1	97063	14,08	50,97
87,53	0,04019	309,7	123887	17,97	48,66
89,54	0,04302	320,5	157249	22,81	46,5
91,55	0,04598	331,3	198541	28,8	44,48
93,56	0,04908	342,3	249410	36,18	42,58
95,57	0,05231	353,4	311795	45,23	40,81
97,58	0,05569	364,6	387979	56,28	39,15
99,59	0,0592	375,9	480629	69,72	37,58
101,6	0,06286	387,4	592860	86	36,11

Fuente: Autor.

Grafica 2. Consumo de arena y rugosidad como función de la presión del reservorio.



Fuente: Autor.

La grafica 2. Permite corroborar que existirá un menor consumo de arena, a mayor carga de presión, y se obtendrá el mayor perfil de anclaje bajo esta condición.

2.2 Consumos de arena, variando los tamaños de la partícula y la dureza de la superficie.

Como existen tantas variables involucradas, planteo una segunda simulación de datos, pero en este caso se determinarían los consumos de arena realizando una variación de los tamaños de la partícula y de la dureza del material a limpiar. El

rango de tamaños de la partícula permanece igual, ahora se involucra la variación de dureza desde los 6 [Gpa] hasta los 10 [Gpa], ver tabla 3. Y la gráfica 3.

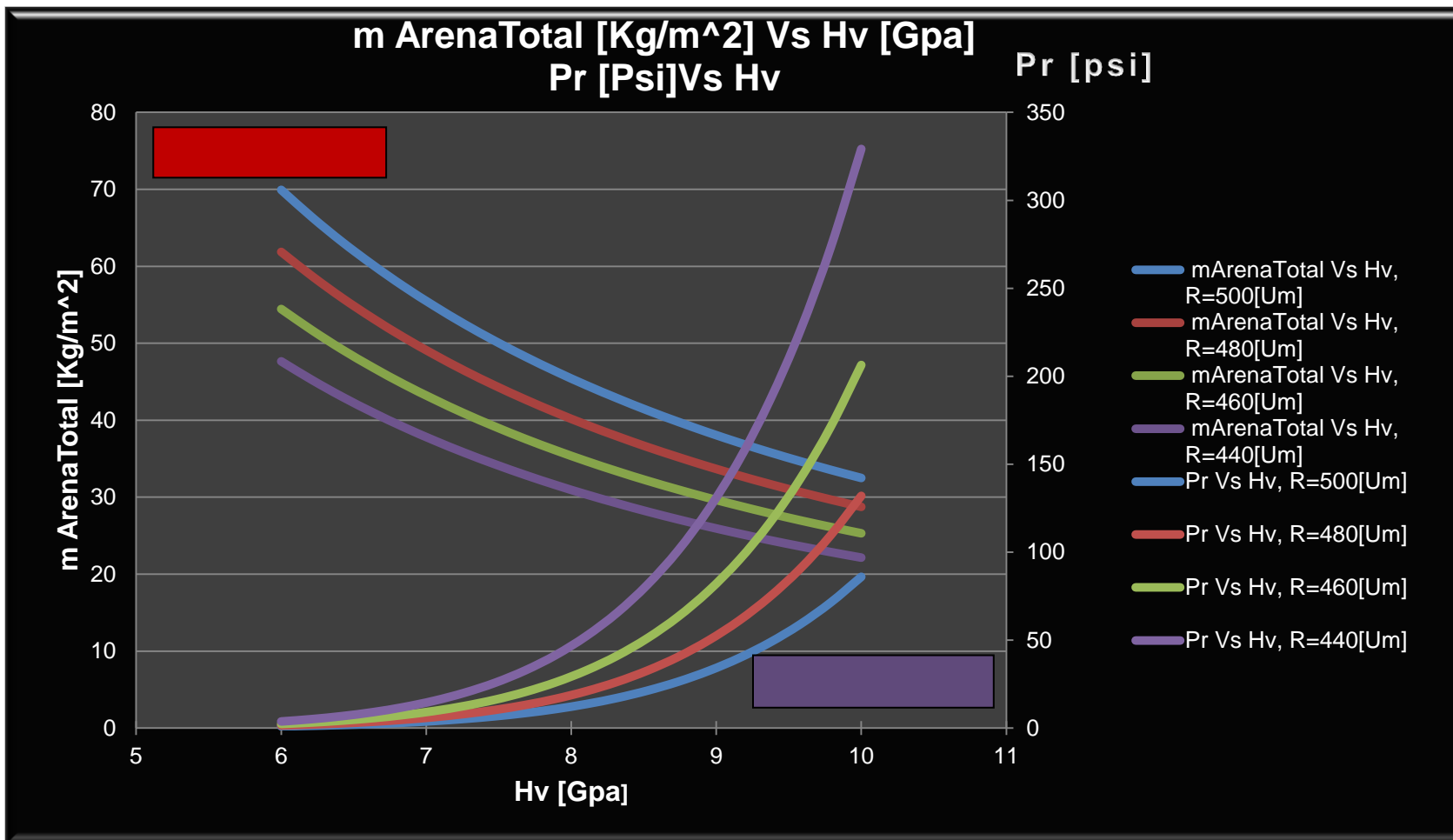
Tabla 3. Ejemplo de una simulación de datos para determinar el consumo de arena y el efecto erosivo en la superficie

R=480 [μm]		Ru=101,6[μm]			
Hv [Gpa]	Er [KgR/KgAre]	mArenaTotal [Kg/m^2]	Uk [J]	Vp [m/s]	Pr [Psi]
6,00E+09	0,03035	61,87	0,01753	217,5	1,512
6,21E+09	0,03196	58,75	0,01911	227,1	2,044
6,42E+09	0,0336	55,88	0,02077	236,7	2,736
6,63E+09	0,03526	53,24	0,02251	246,5	3,629
6,84E+09	0,03696	50,8	0,02434	256,3	4,77
7,05E+09	0,03868	48,55	0,02626	266,2	6,219
7,26E+09	0,04042	46,45	0,02826	276,1	8,044
7,47E+09	0,04219	44,5	0,03035	286,2	10,33
7,68E+09	0,04399	42,69	0,03253	296,3	13,17
7,90E+09	0,04581	40,99	0,03481	306,5	16,69
8,11E+09	0,04765	39,4	0,03718	316,7	21,01
8,32E+09	0,04952	37,92	0,03964	327	26,29
8,53E+09	0,05141	36,52	0,04219	337,4	32,72
8,74E+09	0,05333	35,21	0,04485	347,9	40,5
8,95E+09	0,05527	33,97	0,0476	358,4	49,88
9,16E+09	0,05723	32,81	0,05045	369	61,14
9,37E+09	0,05921	31,71	0,0534	379,6	74,6
9,58E+09	0,06122	30,67	0,05645	390,3	90,61
9,79E+09	0,06325	29,69	0,0596	401	109,6
1,00E+10	0,0653	28,75	0,06286	411,8	132

Fuente: Autor.

La erosión se define como la relación entre la cantidad de desprendimiento de la superficie y la masa de arena utilizada para tal fin en [Kg Removido/Kg Arena].

Grafica 3. Consumo de arena por metro cuadrado.



Fuente: Autor.

Esta quizás corresponde a la sección más importante del modelo, ya que de la gráfica 3. Se puede observar como varía el rango de consumos de arena para diferentes tamaños de partícula, el recuadro rojo indica el conjunto de curvas de consumo de arena, el cual decrece de a medida que aumenta la dureza de la superficie, debido a que los consumos de presión se van haciendo mayores, el recuadro púrpura, indica el conjunto de curvas de consumo de presión como función de la dureza de la superficie, el dato más relevante es el de consumo promedio de arena el cual se establecerá hallando el valor promedio de consumos, tabla 4.

Tabla 4. Consumos promedio de arena.

Promedios de arena [Kg/m ²]				
	69,93	61,87	54,45	47,65
	66,4	58,75	51,71	45,25
	63,16	55,88	49,18	43,04
	60,18	53,24	46,86	41,01
	57,42	50,8	44,71	39,13
	54,87	48,55	42,73	37,39
	52,5	46,45	40,88	35,78
	50,3	44,5	39,17	34,28
	48,25	42,69	37,57	32,88
	46,33	40,99	36,08	31,57
	44,54	39,4	34,68	30,35
	42,86	37,92	33,37	29,21
	41,28	36,52	32,14	28,13
	39,8	35,21	30,99	27,12
	38,4	33,97	29,9	26,17
	37,08	32,81	28,88	25,27
	35,84	31,71	27,91	24,42
	34,67	30,67	26,99	23,62
	33,55	29,69	26,13	22,87
	32,5	28,75	25,31	22,15
Promedio	47,493	42,0185	36,982	32,3645

Fuente: Autor.

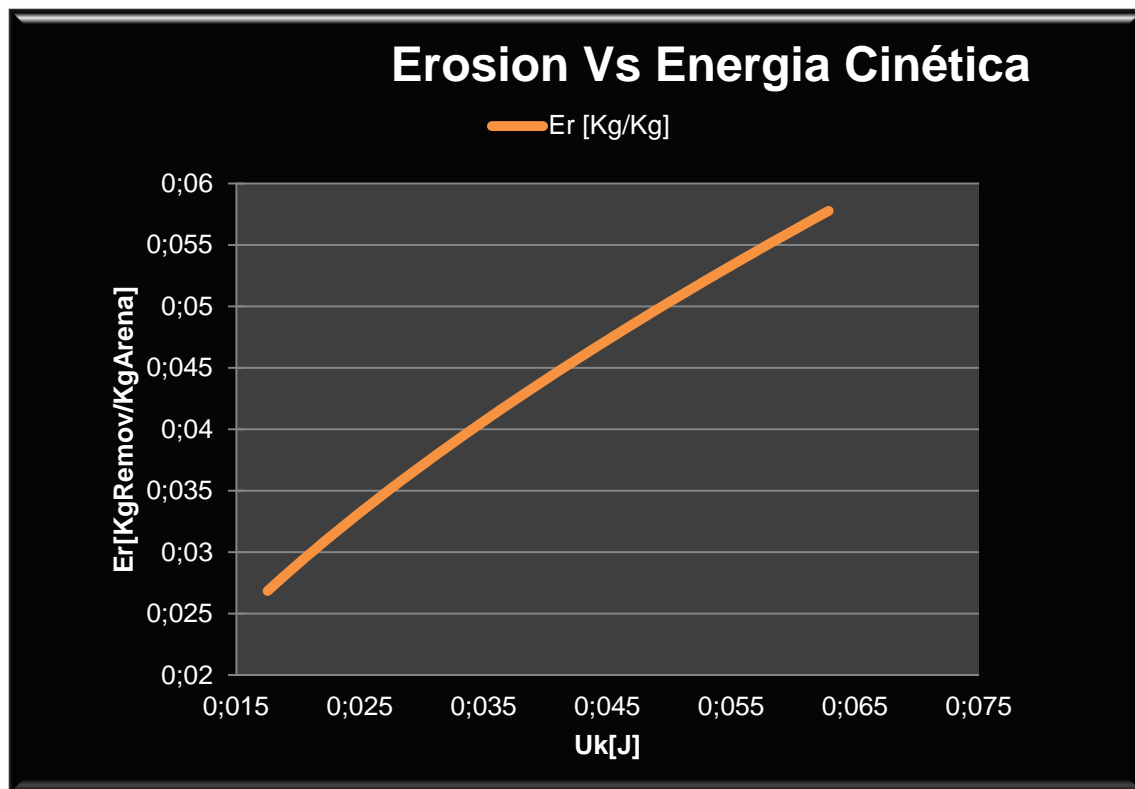
El modelo planteado permite aproximar el consumo de arena para un metro cuadrado de superficie, no sin antes recordar que los valores recomendados por la

empresa eran de $50 \text{ [Kg/m}^2\text{]}$. Los resultados obtenidos están muy próximos al valor recomendado. El valor de diseño debería ser de $47.493 \text{ [Kg/m}^2\text{]}$, basado en el modelo planteado, se fija pues el valor recomendado por la empresa como parámetro de diseño, ya que los resultados son bastante aproximados a la recomendación postulada por la empresa.

3. Determinación de la erosión como función de la energía cinética.

La grafica 4. Permite relacionar el efecto erosivo en la superficie, como función de la energía cinética, como era de esperarse, el grado de desprendimiento de masa de la superficie, aumentara si se aumenta la energía cinética de la partícula.

Grafica 4. Desgaste erosivo como función de la energía cinética.



Fuente: Autor.

El código utilizado en el **EES, Engineering Equation Solver**, se adjunta a continuación:

Código planteado en la herramienta de cálculo de ingeniería:

$$E = 200 \cdot 10^9 \quad \text{Modulo de elasticidad del acero}$$

$$Ru = 123101 \cdot \frac{E^{(1/2)} \cdot Uk^{(1/3)}}{Hv^{(5/6)}} \quad \text{Rugosidad de la superficie}$$

$$m = \rho_{\text{sand}} \cdot V \quad \text{Masa de una partícula de arena}$$

$$\rho_{\text{sand}} = 1600 \quad \text{Densidad de la arena}$$

$$V = 4/3 \cdot \pi \cdot R^3 \quad \text{Volumen de una partícula de arena}$$

$$Uk = 1/2 \cdot m \cdot Vp^2 \quad \text{Energía cinética}$$

$$Vp = \sqrt{1,4 \cdot (69,8 \cdot 10^3)^{\left[\frac{1}{1,4}\right]} \cdot (0,5283 \cdot Pr)^{\left[1 - \frac{1}{1,4}\right]}} \quad \text{Velocidad de la partícula}$$

$$P_{\psi} = \frac{Pr}{6894}$$

Calculo de Arena Requerida

$$Nh = \frac{1}{Ah} \cdot 0,9 \quad \text{Numero de huellas en 1 m}^2$$

$$Ah = \pi \cdot \frac{(Ru \cdot 10^{-6})^2}{2} \quad \text{Area de la huella}$$

$$m_{\text{ArenaTotal}} = \frac{Nh \cdot 8/3 \cdot \pi \cdot (Ru \cdot 10^{-6})^3 \cdot Hv}{Vp^2} \quad \text{Consumo de arena total por metro cuadrado}$$

$$\rho_{\text{acero}} = 7700 \quad \text{Densidad promedio del acero}$$

$$Er = \frac{Nh \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot (Ru \cdot 10^{-6})^3 \cdot \rho_{\text{acero}}}{m_{\text{ArenaTotal}}} \quad \text{Erosión en la superficie}$$

- **Modelo basado en la conservación de la energía.**

Si una partícula de arena impacta a la superficie de acero, se asume que la única fuerza que la detendrá será la dureza de la superficie por el área de indentación:

$$m * \frac{d^2y}{dt} = -H * A \quad (4)$$

Dónde:

m: Masa de la partícula de arena que impacta la superficie, Kg .

$\frac{d^2y}{dt}$: Aceleración de la partícula. [m/S²].

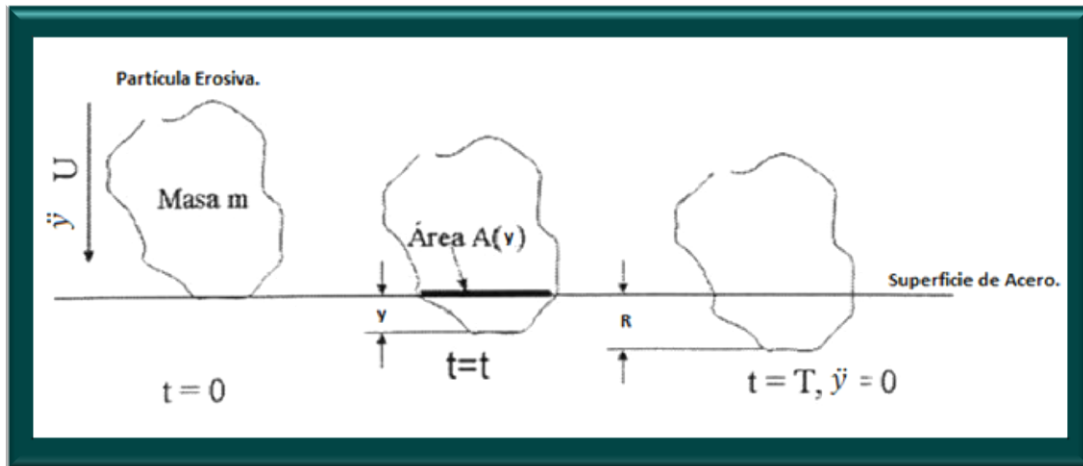
H: Dureza de la superficie acero. [Pa].

A y : Área proyectada de la huella en la superficie. m² .

Si se asume que la partícula realiza un trabajo al deformar la superficie y este trabajo o esta cantidad de energía debe ser igual a la energía cinética de la misma, ver figura 1. De tal forma que:

$$\int_0^r H * A \, dy = \frac{1}{2} m * v_p^2 \quad (5)$$

Figura 1. Modelo dinámico de la partícula.



Fuente: Modificada de TREVIÑO, Álvaro Manuel. Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión

Dónde:

$$\int_0^r A y d_y = V_r$$

V_r : Representa el volumen ideal retirado por la partícula. [m^3]

Se tiene entonces:

$$V_r = \frac{m * v^2}{2 * H} \quad (6)$$

La ecuación 6, representa la el volumen removido unitario de la superficie, como función de la masa de arena requerida para tal fin, ver código EES, ecuación de $m_{ArenaTotal}$.