

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL, NO
CONVENCIONAL Y AUTÓNOMO PARA LA PREPARACIÓN LOCAL DE
SUPERFICIES MEDIANTE CHORRO ABRASIVO (Sandblasting)**

**MANUEL DARÍO LAGUADO PLATA
JHEYSSON YOHALBER ROJAS ESPINOSA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL, NO
CONVENCIONAL Y AUTÓNOMO PARA LA PREPARACIÓN LOCAL DE
SUPERFICIES MEDIANTE CHORRO ABRASIVO (Sandblasting)**

**MANUEL DARÍO LAGUADO PLATA
JHEYSSON YOHALBER ROJAS ESPINOSA**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
JORGE ENRIQUE MENÉSES FLÓREZ
Ingeniero Mecánico, Msc.**

**Codirector
RONALD JAVIER RUEDA SARMIENTO
Economista**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A mis padres Lilia y Miguel

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, tanto académicamente, como en la vida y por todo el esfuerzo y sacrificio que han hecho siempre para darme más de lo justo, todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

A mis familiares

A mis hermanos Ludwin y Heynner que siempre estarán cuando los necesite, los mejores amigos que tendré hoy y siempre.

Mis tíos Gloria y Rodrigo y mi abuela Excelina que a pesar de la distancia siempre se preocupan por mi bienestar y me brindan su cariño y apoyo incondicional.

¡Gracias a ustedes!

Jheysson Yohalber Rojas Espinosa

DEDICATORIA

Dios

Por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres y familiares

José Luis Laguado y Yolanda Plata, por ser los pilares fundamentales en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mis amigos

A todas y cada una de las personas que de alguna u otra manera, contribuyeron a que lograra esta meta que me propuse en la vida, y que me ha permitido crecer intelectualmente como persona y como ser humano.

Claudia Villamizar por cambiar mi forma de ver la vida.

Y principalmente a mi amigo y compañero de tesis Jheysson Rojas.

Dios los bendiga.

Manuel Darío Laguado Plata

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jorge Panqueva y a la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC), por brindarnos la oportunidad de desarrollar y poner en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de nuestro ciclo profesional mediante la ejecución de este proyecto de grado. Al equipo de trabajo del Taller de mecánica fina de la Corporación además de Alejandro Bayona y Robinson Salamanca por cada gesto de colaboración, motivación, enseñanzas y contribución que hicieron posible la finalización de este proyecto de grado.

Al Ingeniero Sergio Quintero, por toda su guía, apoyo y conocimientos brindados durante todo el tiempo que estuvimos en la Corporación. Gracias infinitas.

Al Ingeniero Jorge Enrique Meneses Flórez, Director de este proyecto, por todas las enseñanzas y aportes brindados no solo durante el desarrollo de este proyecto, sino también durante toda nuestra carrera universitaria.

Al Economista Ronald Javier Rueda, Codirector de este proyecto, por toda la gestión y apoyo brindado durante el desarrollo del proyecto.

A los Bomberos de Bucaramanga por toda la ayuda brindada.

A todo el personal docente de la Universidad Industrial de Santander y en especial a los pertenecientes a la Escuela de Ingeniería Mecánica por los conocimientos brindados a través de los años.

A todas aquellas personas que de manera directa o indirecta contribuyeron al desarrollo de este proyecto.

Los Autores.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	23
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	23
2. JUSTIFICACIÓN.....	27
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	29
3.1 OBJETIVO GENERAL	29
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
4. DISEÑO CONCEPTUAL Y PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	31
4.1 REQUERIMIENTOS DEL CONSUMIDOR.....	31
4.2 MATRIZ CALIDAD	32
4.3 ALTERNATIVAS DE DISEÑO	33
4.3.1 Rediseño de un equipo convencional de sandblasting.	33
4.3.2 Rediseño de un equipo de Hidro-Sandblasting.....	35
4.3.3 Diseño de un nuevo prototipo de sandblasting.	36
4.4 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	37
5. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO DESARROLLADO.....	39
5.1 EL PROTOTIPO DEBE SER PORTÁTIL.....	41
5.2 EL PROTOTIPO DEBE SER AUTÓNOMO	43
5.3 EL PROTOTIPO NO ES CONVENCIONAL.....	44
5.4 VENTAJAS	44
5.5 COMPLEJIDAD	44

6. DISEÑO DE DETALLE Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS	46
6.1 BOQUILLA.....	47
6.2 ABRASIVO.....	51
6.3 CÁMARA DE MEZCLA	52
6.3.1 Boquilla venturi	60
6.4 SUMINISTRO DE AIRE (Fuente potencial de energía)	61
6.4.1 Pérdidas de aire en el sistema.....	65
6.5 TANQUE DE ARENA.....	68
6.6 VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN.....	71
6.7 ACCESORIOS	73
7. SIMULACIÓN.....	75
7.1 PRIMER MODELO: Presión por gravedad.	80
7.2 SEGUNDO MODELO: Succión.....	82
7.3 TERCER MODELO: Succión con boquilla venturi.	84
8. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE.....	86
8.1 CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE MEZCLA.....	88
8.2 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE ARENA.....	89
8.3 ENSAMBLE DE ACCESORIOS.....	91
8.4 ENSAMBLE DE LA VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN AL TANQUE DE AIRE.	92
8.5 ENSAMBLE FINAL DEL PROTOTIPO	93
9. PRUEBAS.....	95
9.1 PRIMERA FASE: Pruebas Preliminares	95
9.2 SEGUNDA FASE: Ajuste y acondicionamiento del prototipo.....	97

9.2.1 Prototipo sin boquilla venturi	98
9.2.2 Prototipo con boquilla venturi	99
9.3 TERCERA FASE: Preparación superficial bajo condiciones de diseño.	101
9.3.1 Descripción de la prueba	102
9.3.2 Resultados obtenidos	104
9.3.3 Perfil de anclaje	107
10. PRESUPUESTO	114
10.1 MATERIALES Y ELEMENTOS MECÁNICOS	114
10.2 ACCESORIOS	115
10.3 ELEMENTOS DEL MERCADO.....	116
10.4 COMPARACIÓN DE PRESUPUESTOS.....	116
11. CONCLUSIONES	118
12. RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES.....	120
BIBLIOGRAFÍA.....	122
ANEXOS.....	124

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. ECOPETROL, Colombia.....	23
Figura 2. Preparación de superficies por medio de SANDBLASTING	24
Figura 3. Tubería en zona de difícil acceso	25
Figura 4. Patrón establecido para limpieza con chorro abrasivo hasta Metal Blanco	26
Figura 5. Corporación para la Investigación de la Corrosión	27
Figura 6. Inyector blasting system - SMG45, existente en la CIC.....	33
Figura 7. Máquina para sandblasting, Modelo # 10POTACKAGE3NT2.	34
Figura 8. Principio de funcionamiento de un equipo de Hidro-sandblasting.	35
Figura 9. Nuevo prototipo para sandblasting, vista frontal.	37
Figura 10. Diseño final del prototipo para preparación local de superficies	39
Figura 11. Principio de funcionamiento del prototipo desarrollado.....	40
Figura 12. Componentes del prototipo desarrollado	41
Figura 13. Vista general del prototipo desarrollado.....	42
Figura 14. Equipo convencional de Sandblasting con fuente de energía eléctrica	43
Figura 15. Elementos y subsistemas del nuevo prototipo de Sandblasting.	46
Figura 16. Tungsten Carbide Lined Metal Jacketed.....	51
Figura 17. Pistola de Sandblasting.	53
Figura 18. Primera versión del diseño de la pistola de Sandblasting.....	54
Figura 19. Cámara de mezcla diseñada	60
Figura 20. Efecto venturi en la cámara de mezcla	61
Figura 21. Tanque de paintball, Aluminio, Empire, 3.000 Psi	62
Figura 22. Tanque de buceo, Aluminio, 3000 psi.....	63
Figura 23. Tanque de arena diseñado	71
Figura 24. Regulador Víctor para aire comprimido	72
Figura 25. Racores rosca macho y hembra, cuplas, tapones en acero y bronce. .	73
Figura 26. Acoples rápidos	74

Figura 27. Cámara de mezcla primera versión simulada.....	75
Figura 28. Wizard del gestor de simulación: Creación de proyecto.	76
Figura 29. Wizard del gestor de simulación: Sistema de unidades.....	76
Figura 30. Wizard del gestor de simulación: Tipo de análisis.	77
Figura 31. Wizard del gestor de simulación: Tipo de fluido.....	77
Figura 32. Wizard del gestor de simulación: Condiciones iniciales de simulación.	78
Figura 33. Wizard del gestor de simulación: Malla y resolución.....	78
Figura 34. Condiciones de frontera de la simulación.	79
Figura 35. Simulación del sistema en proceso	79
Figura 36. Primer modelo: Presión por gravedad.	80
Figura 37. Primer modelo: Comportamiento del aire.	81
Figura 38. Primer modelo: Comportamiento del abrasivo.....	81
Figura 39. Segundo modelo: Succión sin boquilla venturi.	82
Figura 40. Segundo modelo: Comportamiento del fluido.	83
Figura 41. Segundo modelo: Comportamiento del abrasivo.	83
Figura 42. Tercer modelo: Succión con boquilla venturi.	84
Figura 43. Tercer modelo: Comportamiento del fluido.....	85
Figura 44. Taller de Mecánica Fina, C.I.C	86
Figura 45. Fresadora Hermle U 630S.....	87
Figura 46. Torno WILER E 35.....	87
Figura 47. Cámara de mezcla maquinada	88
Figura 48. Tanque de arena mecanizado	89
Figura 49. Empresa REYCOL.....	91
Figura 50. Grafado de accesorios	92
Figura 51. Roscado y ajuste de accesorios	92
Figura 52. Ensamble de la válvula reductora de presión	93
Figura 53. Acople de accesorios al conjunto de regulación de presión	94
Figura 54. Ensamble final del prototipo.....	94
Figura 55. Compresor KTC de 2HP, 100[psi].....	95
Figura 56. Fase 1: Pruebas preliminares	96

Figura 57. Llenado del tanque de suministro de aire	98
Figura 58. Segunda fase: Prototipo sin boquilla venturi.....	99
Figura 59. Diagrama del prototipo con boquilla venturi.....	100
Figura 60. Segunda fase: Regulación de abrasivo	101
Figura 61. Tercera fase: Probetas de prueba	102
Figura 62. Tercera fase: Preparación superficial por medio de chorro abrasivo ..	103
Figura 63. Tercera fase: Resultado de la preparación superficial	103
Figura 64. Tercera fase: Preparación superficial obtenida.....	104
Figura 65. Patrón visual establecido por la norma SSPC para una corrosión grado A con una preparación A Sa 3	106
Figura 66. Patrón visual establecido por la norma SSPC para una corrosión grado A con una preparación A Sa 2 ½	106
Figura 67. Resultado final de la preparación superficial	106
Figura 68. Medición del perfil de anclaje.....	108
Figura 69. Medidor tipo cinta	109
Figura 70. Medidor de anclaje tipo aguja	109
Figura 71. Medición por el método de cintas, paso 1: Pegado	110
Figura 72. Medición por el método de cintas, paso 2: Raspado	111
Figura 73. Medición por el método de cintas, paso 3: Medición	111
Figura 74. Medición por el método de aguja, paso 1: Ajuste del cero.....	112
Figura 75. Medición por el método de aguja, paso 2: Toma de medidas sobre la superficie	113

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Matriz QFD.....	32
Tabla 2. Matriz de ponderaciones para la evaluación de alternativas.....	38
Tabla 3. Requisitos de aire comprimido y abrasivo en el proceso de Sandblasting	47
Tabla 4. Duración aproximada en horas de una boquilla de sandblasting según su material y el abrasivo utilizado.....	50
Tabla 5. Características de la arena Sikadur.....	52
Tabla 6. Propiedades del Plástico ingenieril “Nylon 6”.....	58
Tabla 7. Tiempo de descarga de un tanque de paintball de 47 cu in, 3000 psi.	62
Tabla 8. Tiempo de descarga de un tanque de buceo de 50 cu ft, 3000 psi.....	63
Tabla 9. Comparación de elementos.	64
Tabla 10. Tercera fase: Resultados de presión y tiempo de descarga del prototipo	104
Tabla 11. Patrón establecido por norma para la preparación de superficies	105
Tabla 12. Datos medición por el método de aguja.....	113
Tabla 13. Presupuesto planteado inicialmente	114
Tabla 14. Presupuesto ejecutado en materiales y elementos mecánicos.....	115
Tabla 15. Presupuesto ejecutado en accesorios	115
Tabla 16. Presupuesto ejecutado en elementos del mercado	116
Tabla 17. Comparación de presupuestos	117

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Fundamento teórico.....	125
Anexo B. Elementos que conforma el proceso de Sandblasting.....	155
Anexo C. Ficha técnica Arenas SIKADUR 506.....	164
Anexo D. Ficha técnica Recubrimiento AMERCOAT 351.....	165
Anexo E. Planos generales de los elementos del prototipo.....	169
Anexo F. Manual de operación y mantenimiento del prototipo de Sandblasting..	170

GLOSARIO

ASTM	American Society for Testing Materials
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ANSI	American National Standards Institute
ISO	International Organization for Standardization
NACE	National Association of Corrosion Engineers
SSPC	Society for Protective Coatings
EEMUA	Engineering Equipment & Materials Users' Association
DNV	Det Norske Veritas

Esprea: Dispositivo en forma de tubo de pequeño diámetro, que inyecta un fluido pulverizado en una cámara, como el carburador de un motor.

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL, NO CONVENCIONAL Y AUTÓNOMO PARA LA PREPARACIÓN LOCAL DE SUPERFICIES MEDIANTE CHORRO ABRASIVO (Sandblasting).*

AUTORES: MANUEL DARÍO LAGUADO PLATA
JHEYSSON YOHALBER ROJAS ESPINOSA*

PALBRAS CLAVE: PREPARACIÓN DE SUPERFICIES, NO CONVENCIONAL, PROTOTIPO, AUTÓNOMO, CHORRO ABRASIVO, MATERIAL PARTICULADO.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado surge como respuesta a la necesidad de mejorar el proceso de preparación de superficies por medio de Sandblasting, debido a que en algunas ocasiones los equipos con los que se cuenta no son lo suficientemente adecuados para realizar tal labor ya que la topografía del terreno lo dificulta. Por lo tanto con la ayuda de la Corporación para la Investigación de la Corrosión se busca generar un nuevo desarrollo tecnológico con el fin de solventar esta necesidad.

Con el desarrollo de este proyecto se pretende mostrar un diseño no convencional de un prototipo de sandblasting que permita realizar tratamientos superficiales mediante el impacto de material particulado sobre superficies metálicas, donde su funcionamiento no requiera de una fuente de energía eléctrica y además se pueda transportar con facilidad hacia zonas de difícil acceso. Se propondrá un diseño de un prototipo, donde la fuente de energía potencial (suministro de aire) será un tanque de aire comprimido que logre cumplir con los requisitos exigidos por la empresa interesada. La selección de los elementos necesarios para el desarrollo del prototipo, será determinada por la investigación y el análisis de los rendimientos involucrados en el proceso, los cuales van de la mano con el consumo de aire y abrasivo del sistema.

Al implementar un software CAD/CAE, se logró dimensionar y ubicar los elementos seleccionados con un ensamble del conjunto total del prototipo, lo cual muestra una visión espacial aproximada del diseño final, además, por medio de una simulación básica se logró realizar un acercamiento al comportamiento del final del sistema, lo cual ayudó mucho durante el proceso de diseño del prototipo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: MSc. Ing. Jorge Enrique Meneses Flórez. Codirector: Ronald Javier Rueda Sarmiento. Economista.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A FUNCTIONAL PROTOTYPE, UNCONVENTIONAL AND AUTONOMOUS FOR THE LOCAL PREPARATION OF SURFACES BY MEANS OF ABRASIVE BLAST (Sandblasting). *

AUTHORS: MANUEL DARÍO LAGUADO PLATA
JHEYSSON YOHALBER ROJAS ESPINOSA*

KEYWORDS: SURFACE PREPARATION, UNCONVENTIONAL, PROTOTYPE, AUTONOMOUS, ABRASIVE BLAST, PARTICLE MATERIAL.

DESCRIPTION:

The present grade work is a response to the need of improve the preparation surface process by means sandblasting, because of sometimes the equipment used is not adequate enough to perform the job because topography makes it difficult. Therefore, with the help of the Corporation for the Investigation of the Corrosion (C.I.C) it wants to generate a new technological development in order to solve this need.

With the development of this project, it intended to show an unconventional design of a sandblasting equipment that allows realizing surface treatments by the impact of particulate solids on metal surfaces, where its operation does not require an electrical power source and can be transported easily to difficult access areas. Will be proposed a design of a prototype, where the potential energy source (air supply) will be a compressed air tank that can meet with the requirements of the company concerned. The selection of the necessary elements for the development of the equipment will be determinate for the analysis and investigation of the yields involved in the process, which go hand in hand with the consumption of air and abrasive of the system.

By implementing a CAD/CAE software, its achieve to size and locate the select elements with an assembly of the full set of equipment, which shows an approximate spatial vision of the final design, and, through a basic simulation it was possible to make an approach to performance of the final system, which helped a lot during the design process of the prototype.

* Thesis work.

** Faculty of Physical-Mechanics Engineering. School of Mechanical Engineering. Project Director: MSc. Ing. Jorge Enrique Meneses Flórez. Project Codirected: Ronald Javier Rueda Sarmiento. Economist.

INTRODUCCIÓN

Conscientes de las tendencias actuales de competitividad, de globalización y del avance exponencial de tecnología, las empresas colombianas deben estar cada día mejorando los servicios y productos que ofrecen al mercado, aumentando su productividad y ayudando en el sostenimiento de la misma a lo largo del tiempo. Por tal razón, la Corporación para la Investigación de la Corrosión en su búsqueda de mejorar y avanzar en el campo competitivo, propuso el desarrollo de un nuevo dispositivo tecnológico que permitiera posicionarla entre las empresas más destacadas del país.

Es por ello que el presente trabajo de grado se enfocó en el Diseño y la Construcción de un Prototipo no Convencional para la preparación local de superficies, específicamente aquellas que se encuentran en zonas de difícil acceso debido a la topografía del terreno.

Para el logro de dicha meta, y con el apoyo de la Corporación para la Investigación de la Corrosión (C.I.C), fue necesario realizar una amplia investigación acerca del transporte de material particulado, estudio de la corrosión sobre superficies metálicas y el proceso de preparación de superficies por medio de Sandblasting. En consecuencia, el elemento generado como resultado final de este proyecto siguiendo una metodología de diseño, fue un prototipo que permite la preparación local de superficies y que puede ser transportado con mayor facilidad hacia zonas de difícil acceso.

Para finalizar, el documento se encuentra organizado de la siguiente manera: seguido de la introducción se encuentran los once capítulos que comprenden el proyecto. El primero, segundo, tercero y cuarto capítulo plantean el motivo para la

realización del presente proyecto, involucrando la descripción y la justificación del problema, los objetivos planteados para solucionarlo y las alternativas de solución que se generaron para su desarrollo. En el quinto capítulo se expone una descripción general del prototipo diseñado, que permite al lector determinar el resultado final del proyecto. El sexto capítulo desarrolla la etapa de diseño de detalle y selección de elementos del sistema, iniciando con la boquilla ya que es el componente que define los requerimientos de aire y abrasivo del prototipo, luego se busca seleccionar el mejor abrasivo para el proceso, se diseña la cámara de mezcla teniendo en cuenta que es un elemento sometido a alta presión, y finalmente se busca la mejor alternativa para el suministro y regulación de aire del sistema. El séptimo capítulo plantea una simulación básica del sistema que permite un acercamiento al diseño final que se quiere lograr. El octavo capítulo muestra el proceso de construcción y ensamble del prototipo, dónde se realizó, que maquinaria se utilizó y los ajustes necesarios llevados a cabo para su culminación. El noveno capítulo muestra las pruebas operacionales realizadas para comprobar la funcionalidad del prototipo. El décimo capítulo evalúa el presupuesto del proyecto. Para finalizar, se encuentran los capítulos once y doce, donde se realizan las respectivas conclusiones y recomendaciones para que el proyecto pueda ser llevado al próximo nivel.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El capítulo presentado a continuación tiene como objetivo exponer al lector la necesidad que impulsó el desarrollo de este proyecto, los objetivos que se plantearon para la ejecución del mismo y las alternativas de diseño planteadas para solucionar el problema.

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Colombia actualmente mediante políticas gubernamentales, se encuentra abriendo campo dentro del proceso de globalización industrial, buscando afianzar en sus labores industriales los niveles de excelencia requeridos por las normativas internacionales. Estas políticas empiezan a verse reflejadas en diferentes sectores siendo el de energía uno de los más importantes, específicamente en el sector petrolero debido a la complejidad de sus procesos y a la calidad que deben ofrecer con sus productos. Por lo tanto, la fabricación y el acondicionamiento de la estructura petrolera nacional, busca un mejoramiento continuo en el uso de tratamientos superficiales para la reparación, adecuación y mantenimiento de poliductos y estructuras metálicas en general. Ver figura 1.

Figura 1. ECOPETROL, Colombia



Fuente: ECOPETROL. La resurrección de la Cira. Disponible en Internet: http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera0206/pag20.htm

Entendiendo que la corrosión es un proceso electroquímico en el cual un metal reacciona con su medio ambiente para formar óxido o algún otro compuesto, y además es un hecho inevitable en el medio ambiente, se utilizan recubrimientos que protegen las estructuras para no perder material en el proceso de oxidación. No obstante, por experiencia, se ha evidenciado que la variable de mayor sensibilidad en el éxito y en la eficiencia de los sistemas de recubrimiento está asociada a la preparación tanto del sistema de recubrimiento antes de su aplicación como la preparación de la superficie que recibirá el sistema.

En este contexto, existen distintos métodos de preparación de superficies que dependiendo del grado de limpieza que se requiera pueden ser usados. Entre estos se encuentra el uso de herramientas manuales y eléctricas, el uso de solventes, y el proceso de SANDBLASTING. Este último utiliza un abrasivo como la arena u otro material para realizar la limpieza de la superficie y a su vez genera los mejores resultados en este campo, ver figura 2.

Figura 2. Preparación de superficies por medio de SANDBLASTING



Fuente: Corporación para la investigación de la corrosión. High Performance Team for Corrosion and Integrity Management. Brochure. Disponible en Internet: <http://corrosion.uis.edu.co/webcic/index.php/es/portafolio>

Infortunadamente existen algunas zonas donde las condiciones de accesibilidad a los elementos o instalaciones que requieren preparación local de superficies son de difícil manejo o de difícil planeación logística, haciendo que los sistemas convencionales de sandblasting en algunas ocasiones **no sean adecuados** para cumplir la función para la cual han sido diseñados, debido a que los elementos que componen el equipo son demasiado grandes para su transporte y no se cuenta con una fuente de energía adecuada en el sitio donde se debe realizar el proceso, ver figura 3.

Figura 3. Tubería en zona de difícil acceso



Fuente: Diario del sur. El Trasadino cumple 40 años de operación. Disponible en Internet: <http://monopamba.blogspot.com/p/noticias.html>

Estas condiciones específicas de operación, hacen que se generen malas prácticas en el proceso de preparación que a futuro se ven reflejadas en la falla prematura de

los recubrimientos, dado que la preparación de superficie no cumple con los requerimientos mínimos de calidad del fabricante de los sistemas de recubrimiento. Entre estos requisitos se encuentra¹:

- El perfil de anclaje de la superficie.
- El aspecto final de la superficie de acuerdo con los patrones de referencia establecidos por norma², ver figura 4.

Figura 4. Patrón establecido para limpieza con chorro abrasivo hasta Metal Blanco



(a) Superficie Original



(b) Superficie con limpieza hasta Metal Blanco

Fuente: THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATINGS. Guide and Reference Photographs for Steel Surfaces Prepared by Dry Abrasive. SSPC-VIS1. Pittsburgh: NACE International, 2006.

Por lo tanto, se crea la necesidad de desarrollar un equipo que permita realizar un adecuado proceso de preparación superficial para solventar el problema planteado.

¹ THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATINGS. White Metal Blast Cleaning. SSPC-SP5. Pittsburgh: NACE International, 2006.

² THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATINGS. Guide and Reference Photographs for Steel Surfaces Prepared by Dry Abrasive. SSPC-VIS1. Pittsburgh: NACE International, 2006.

2. JUSTIFICACIÓN

La **Corporación para la Investigación de la Corrosión (C.I.C)**, ubicada en el Km 2 Vía Refugio - Guatiguará, Sede UIS Piedecuesta, Santander, es un Centro de Desarrollo Tecnológico, dedicado a la prestación de servicios especializados, ejecución de proyectos y programas y desarrollo de productos tecnológicos para la gestión de corrosión e integridad, con el fin de ofrecer al sector productivo soluciones que contribuyan al fortalecimiento tecnológico, económico y sostenible del país, ver figura 5.

Figura 5. Corporación para la Investigación de la Corrosión



Fuente: Corporación para la investigación de la corrosión. High Performance Team for Corrosion and Integrity Management. Disponible en Internet: <http://corrosion.uis.edu.co/webcic/index.php/es/sobre-la-cic/mision-vision>

Con el fin de afianzar y consolidar los servicios ofrecidos por la Corporación, en términos de desarrollo de productos tecnológicos y específicamente en el campo de preparación de superficies y tratamientos superficiales, se evidenció la necesidad de generar una alternativa que facilitara el uso del proceso de sandblasting independientemente de las condiciones de trabajo presentes en el lugar donde se requiera la preparación local de superficies, ya que no existe un equipo con estas características en el mercado. Por lo tanto, se propuso a la Corporación para la

Investigación de la Corrosión la necesidad de desarrollar por medio de la investigación y desarrollo, una nueva alternativa tecnológica versátil, autónoma, de fácil transporte, con alta eficiencia, que permitiera realizar preparación de superficies en ambientes complejos (preparaciones puntuales en zonas de difícil manejo logístico y de seguridad industrial), utilizando elementos con dimensiones no estándar que disminuyan las limitaciones logísticas para el usuario final.

3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

3.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con el compromiso misional que tiene la Universidad Industrial de Santander en formar personas con alto grado de calidad profesional, generando proyectos de investigación tecnológica, con el apoyo de la Corporación para la Investigación de la Corrosión, mediante el diseño y construcción de un prototipo no convencional y autónomo para la preparación local de superficies en ambientes de alta complejidad o de difícil acceso, mediante la transferencia de material particulado.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un prototipo funcional no convencional, y autónomo que permita realizar preparación local de superficies en zonas de difícil acceso, por medio de la transferencia de material particulado. El prototipo tendrá en cuenta las siguientes características:
 - i. Área superficial a tratar: Entre 0.1 m²/hora a 0.2 m²/hora.
 - ii. Presión máxima de operación: 150 psi
 - iii. El diseño estará enfocado en la preparación de una superficie según la norma SSPC-SP5: Limpieza con chorro abrasivo a metal blanco.
 - iv. Material abrasivo a utilizar: Arena Sílice.
- Realizar pruebas operacionales del prototipo que permitan establecer su funcionalidad en el proceso de preparación local de superficies.
 - i. Se propone realizar las pruebas en la Corporación para la Investigación de la Corrosión.

- ii. Se realizará la preparación de una superficie metálica con área superficial entre 0.1 m^2 a 0.2 m^2 .
- iii. Se utilizará arena sílice como abrasivo.
- Elaborar el manual de operación y mantenimiento del prototipo desarrollado.

4. DISEÑO CONCEPTUAL Y PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

Esta etapa del proyecto definieron las necesidades de la empresa por medio del despliegue de la matriz calidad, se identificaron los parámetros relevantes de diseño del prototipo y se plantearon las alternativas para darle solución al problema.

El diseño conceptual es un parte fundamental en el proceso de creación de una máquina, ya que se generan las posibles opciones a tomar en cuenta para el diseño final de un equipo. En primer lugar se estudiaron los requerimientos planteados para la necesidad a solucionar; en este caso, el diseño y construcción de un prototipo para la preparación de superficies por medio de chorreado de arena. Los requerimientos se presentan a continuación.

4.1 REQUERIMIENTOS DEL CONSUMIDOR

La Corporación para la Investigación de la Corrosión solicitó una propuesta de un prototipo que permitiera preparar superficies metálicas por medio de chorro abrasivo mediante el impacto de arena sílice bajo los siguientes parámetros. A continuación se presentan los requisitos de acuerdo a la importancia para el consumidor; se organizan de menor a mayor siendo el número 1 el de menor importancia:

- | | |
|-------------------------|----------------------------------|
| 1. Estético | 8. Ergonómico |
| 2. Pocas piezas | 9. Fácil mantenimiento |
| 3. Económico | 10. Fácil de operar |
| 4. Versátil | 11. Alta seguridad en el proceso |
| 5. Bajo peso | 12. Funcional |
| 6. Fácil de transportar | 13. Eficiente |
| 7. Estable | |

4.2 MATRIZ CALIDAD

Tabla 1. Matriz QFD

MATRIZ QFD PONDERACIONES 0 - NO EXISTE RELACIÓN 1 - POCA RELACIÓN 4 - RELACIÓN MEDIA 9 - ALTA RELACIÓN		SISTEMA DE TRANSPORTE DE MATERIAL PARTICULADO ADECUADO	ENSAMBLAJE SIMPLE	POCAS PIEZAS	FORMAS FÁCILMENTE MAQUINABLES	DIMENSIONES, PESO	GEOMETRÍA ROBUSTA DEL SISTEMA	ELEMENTOS QUE SE ENCUENTRAN EN EL MERCADO	AUTONOMÍA DEL EQUIPO
12	EFICIENTE	9	0	0	0	1	1	0	4
		108	0	0	0	12	12	0	48
11	FUNCIONAL	9	0	0	0	1	0	0	4
		99	0	0	0	11	0	0	44
10	SEGURO	4	4	0	4	4	4	0	1
		40	40	0	40	40	40	0	10
9	FÁCIL DE OPERAR	0	1	1	0	4	0	0	1
		0	9	9	0	36	0	0	9
8	FÁCIL MANTENIMIENTO	1	9	4	4	4	0	9	1
		8	72	32	32	32	0	72	8
7	ERGONÓMICO	0	4	4	4	9	4	1	1
		0	28	28	28	63	28	7	7
6	ESTABLE	1	1	0	1	1	9	0	1
		6	6	0	6	6	54	0	6
5	FÁCIL DE TRANSPORTAR	0	1	9	0	9	0	0	9
		0	5	45	0	45	0	0	45
4	LIGERO	0	0	4	0	9	1	0	9
		0	0	16	0	36	4	0	36
3	VERSÁTIL	0	9	1	4	1	0	9	4
		0	27	3	12	3	0	27	12
2	ECONÓMICO	0	0	4	9	9	1	9	1
		0	0	8	18	18	2	18	2
1	ESTÉTICO	0	0	0	4	0	0	0	0
		0	0	0	4	0	0	0	0
TOTALES		261	187	141	140	302	140	124	227

4.3 ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Para darle solución al problema identificado en la preparación local de superficies en ambientes de difícil acceso, se plantearon alternativas de solución basadas en los sistemas convencionales utilizados en este proceso. Con estas alternativas se buscó cumplir con los requisitos definidos por el usuario final y al mismo tiempo cumplir con los objetivos propuestos para este proyecto.

- **Alternativa 1:** Rediseño de un equipo convencional de sandblasting.
- **Alternativa 2:** Rediseño de un equipo de Hidro-sandblasting.
- **Alternativa 3:** Diseño de un nuevo prototipo de sandblasting.

4.3.1 Rediseño de un equipo convencional de sandblasting. La Corporación para la Investigación de la Corrosión cuenta con dos equipos convencionales para preparar superficies que les permite realizar el proceso de preparación bajo condiciones normales de operación, es decir, en ambientes donde se puede llevar el equipo (zonas de fácil acceso), se garantiza la seguridad del personal y el costo generado por el proceso se justifica con la labor realizada.

Figura 6. Inyector blasting system - SMG45, existente en la CIC.



También cabe resaltar que en el mercado existen diferentes alternativas que permiten preparar superficies por medio de chorro abrasivo (sandblasting) que generan buenos resultados, ver figura 7, pero el uso de estos equipos (convencionales) requiere de una alta planeación logística, puesto que se deben transportar cada uno de los elementos que componen el sistema, ver Anexo B, hasta el sitio donde se desea realizar el trabajo, en especial si estos lugares son de difícil acceso, es decir, el lugar donde se desea realizar la preparación se encuentra en zonas rurales donde el terreno es inestable y no es posible obtener una fuente de energía eléctrica para el funcionamiento del sistema.

Figura 7. Máquina para sandblasting, Modelo # 10POTACKAGE3NT2.



Fuente: NORTHERN. Portable Abrasive Blaster. Disponible en Internet: http://www.northerntool.com/shop/tools/product_200229924_200229924

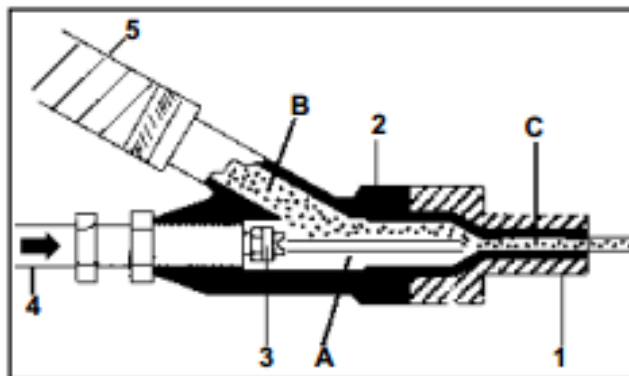
Debido a las restricciones mencionadas, estos equipos presentan múltiples problemas en cuanto al cumplimiento de los requerimientos de diseño planteados en el numeral anterior; no son autónomos, las dimensiones y el peso de los elementos que componen el sistema no son adecuadas para transportarlos con

facilidad, haciendo a estos equipos poco adecuados en la preparación local de superficies en terrenos de difícil acceso.

La primera alternativa planteada para desarrollar este proyecto, fue hacer un rediseño de un equipo convencional utilizado en la preparación de superficies por medio de sandblasting, realizando las respectivas correcciones de tamaño de los elementos que componen el sistema para que pueda ser transportado con facilidad.

4.3.2 Rediseño de un equipo de Hidro-Sandblasting. Otra forma de preparar superficies por medio de chorro abrasivo, es utilizando la técnica del Hidro-sandblasting. Esta técnica utiliza agua como fluido y tiene el mismo principio de funcionamiento de los equipos convencionales de sandblasting. El chorro de agua a alta presión (A) crea un vacío en el interior de la cámara que permite aspirar arena por la manguera del conducto de succión (B) mezclándola con el agua y expulsándola por el conducto (C) a alta velocidad hacia la superficie a tratar³.

Figura 8. Principio de funcionamiento de un equipo de Hidro-sandblasting.



AzkoNobel. Hydroblasting Standards [online]. (s.l): 2012 [citado 11 Oct. 2014]. Disponible en Internet: <http://www.hidropresion.com.ve/wp-content/catalogo_general.pdf>

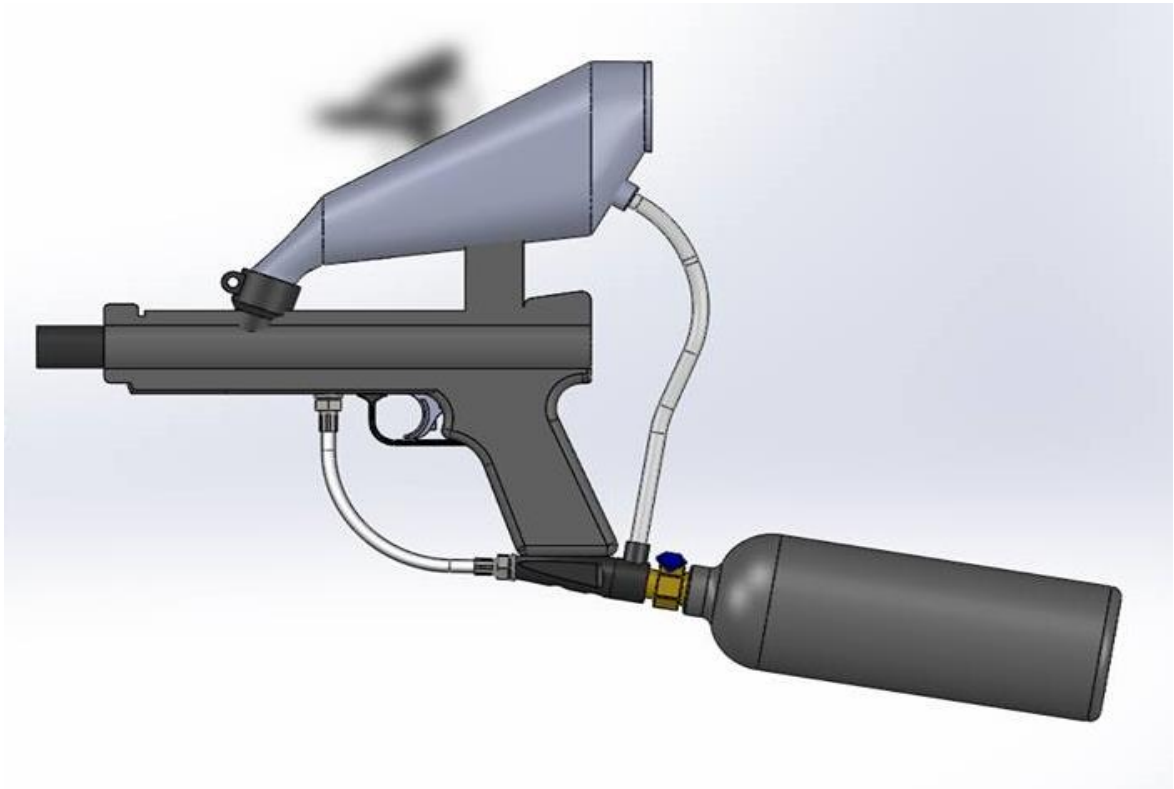
³ AzkoNobel. Hydroblasting Standards [online]. (s.l): 2012 [citado 11 Oct. 2014]. Disponible en Internet: <http://www.hidropresion.com.ve/wp-content/catalogo_general.pdf>

Las ventajas de estos equipos son: menor consumo de arena, no produce polvo de silicio en el ambiente, el cual puede producir enfermedades respiratorias, además, impide que se produzcan chispas lo cual permite realizar este proceso en ambientes con peligro de combustión o explosión.

Esta solución al igual que la anterior, consiste en rediseñar los elementos que componen el sistema de Hidro-sandblasting para permitir el fácil transporte de estos equipos hacia lugares de difícil acceso. La desventaja principal de estos equipos es que necesitan de una fuente de agua cercana para poder realizar el proceso, lo cual no siempre es posible encontrar en los sitios dónde se desea llevar a cabo la preparación de superficies.

4.3.3 Diseño de un nuevo prototipo de sandblasting. Como tercera alternativa para dar solución a la necesidad planteada y cumplir los objetivos del proyecto, se propuso generar un nuevo diseño de un prototipo de sandblasting. La visión general de este dispositivo se muestra a continuación, ver figura 9.

Figura 9. Nuevo prototipo para sandblasting, vista frontal.



El dispositivo cuenta con una fuente de energía potencial suministrada por medio de un tanque de aire comprimido. Se planteó un dispositivo de sandblasting que trabaje a presión, donde la recámara que contiene el abrasivo se encuentre a la misma presión del sistema; de igual forma se planteó seleccionar o diseñar la boquilla que compone el prototipo, ver Anexo B.

4.4 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Teniendo en cuenta los datos analizados en cada una de las alternativas planteadas y en la matriz QFD, se realizó una tabla para determinar la alternativa más adecuada para solucionar el problema según los parámetros de diseño más representativos planteados por los autores de este proyecto, en conjunto con el usuario final. Se

evaluó cada una de las especificaciones en un rango de [0-5], siendo el cero el valor más bajo que se le puede asignar y cinco el más alto.

Tabla 2. Matriz de ponderaciones para la evaluación de alternativas

CRITERIO DE EVALUACIÓN		ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2		ALTERNATIVA 3	
		Nota	Ponderado	Nota	Ponderado	Nota	Ponderado
Dimensiones, peso	30,91%	1	0,3091	0	0	4	1,2364
Sistema de transporte de material particulado adecuado	26,71%	5	1,3355	5	1,3355	5	1,3355
Autonomía del prototipo	23,23%	0	0	0	0	4	0,9292
Ensamblaje simple	19,14%	4	0,7656	3	0,5742	4	0,7656
TOTAL:		2,4102		1,9097		<u>4,2667</u>	

Después de realizar la respectiva evaluación de las tres alternativas por medio de la ponderación de los requerimientos de diseño planteados y la matriz QFD, se evidenció que la mejor alternativa para dar solución al problema es la tercera. Esta solución propone el diseño de un nuevo prototipo de sandblasting que permita su fácil transporte hacia lugares de difícil acceso.

5. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO DESARROLLADO

En el presente capítulo se muestra una descripción general del prototipo realizado en este proyecto, haciendo una comparación con los diferentes equipos que existen en la industria, principalmente basados en las condiciones de operación y funcionalidad de los mismos.

Ya que los equipos utilizados actualmente para realizar el proceso de preparación de superficies son demasiado grandes, requieren de una planeación logística muy detallada para poder llevar a cabo una preparación superficial. Debido a esto, en algunas ocasiones estos equipos no son adecuados ya que el trabajo que van a realizar no justifica el gasto en el que se incurrirá con su transporte al sitio donde se desea llevar a cabo el proceso, incidiendo en malas prácticas con el uso de otros dispositivos que no realizan esta labor eficientemente. Por lo tanto con el desarrollo de este proyecto, se buscó solventar esta limitante a la hora de preparar superficies en áreas que son puntuales, y que con los equipos convencionales no se pueden tratar debido a su alto costo de ejecución logística.

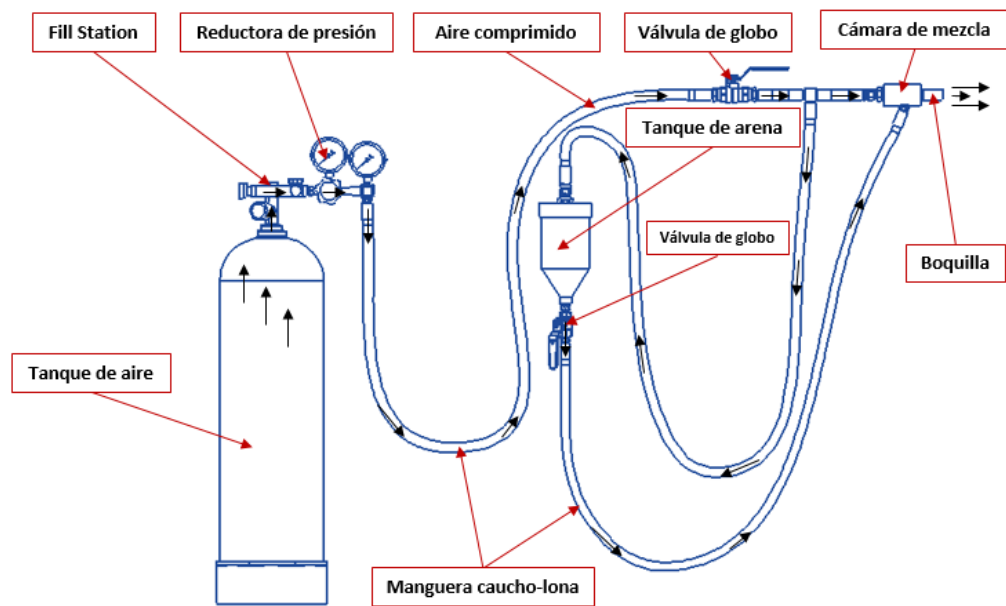
Figura 10. Diseño final del prototipo para preparación local de superficies



El prototipo de Sandblasting desarrollado, consta de 5 componentes principales: el tanque de almacenamiento de aire, la válvula reductora de presión, el tanque de almacenamiento de arena, la cámara de mezcla y la boquilla. Todos estos componentes están conectados directamente entre sí o por mangueras resistentes a la abrasión y a la presión de operación. El prototipo fue diseñado para trabajar a presión y succión. Su principio de funcionamiento se describe a continuación:

Desde el tanque de almacenamiento de aire se suministra la cantidad de fluido necesaria; una válvula reductora de presión conectada a la salida de este tanque, controla la presión a la cual va estar sometido el proceso de Sandblasteo, desde allí, el aire se dirige en dos direcciones, una hacia el tanque de arena para empujar el abrasivo y la otra hacia la cámara de mezcla que impulsa la arena a través de la boquilla. Para poder generar este efecto se requirió de cálculos experimentales de arrastre de material particulado. El siguiente esquema muestra el flujo del proceso:

Figura 11. Principio de funcionamiento del prototipo desarrollado



5.1 EL PROTOTIPO DEBE SER PORTÁTIL

Ya que los equipos convencionales tienen grandes dimensiones, se dificulta el transporte de los mismos; por lo tanto para el prototipo desarrollado, se debió realizar una selección y un diseño de todos sus componentes, con el fin de reducir su peso para poder facilitar su traslado al lugar de trabajo, además, se buscó que fuera de fácil ensamble y no requiriera de muchas herramientas para su acople, ya que se quiere transportar a zonas de difícil acceso donde la topografía del terreno dificulta el llevar muchos elementos.

Figura 12. Componentes del prototipo desarrollado



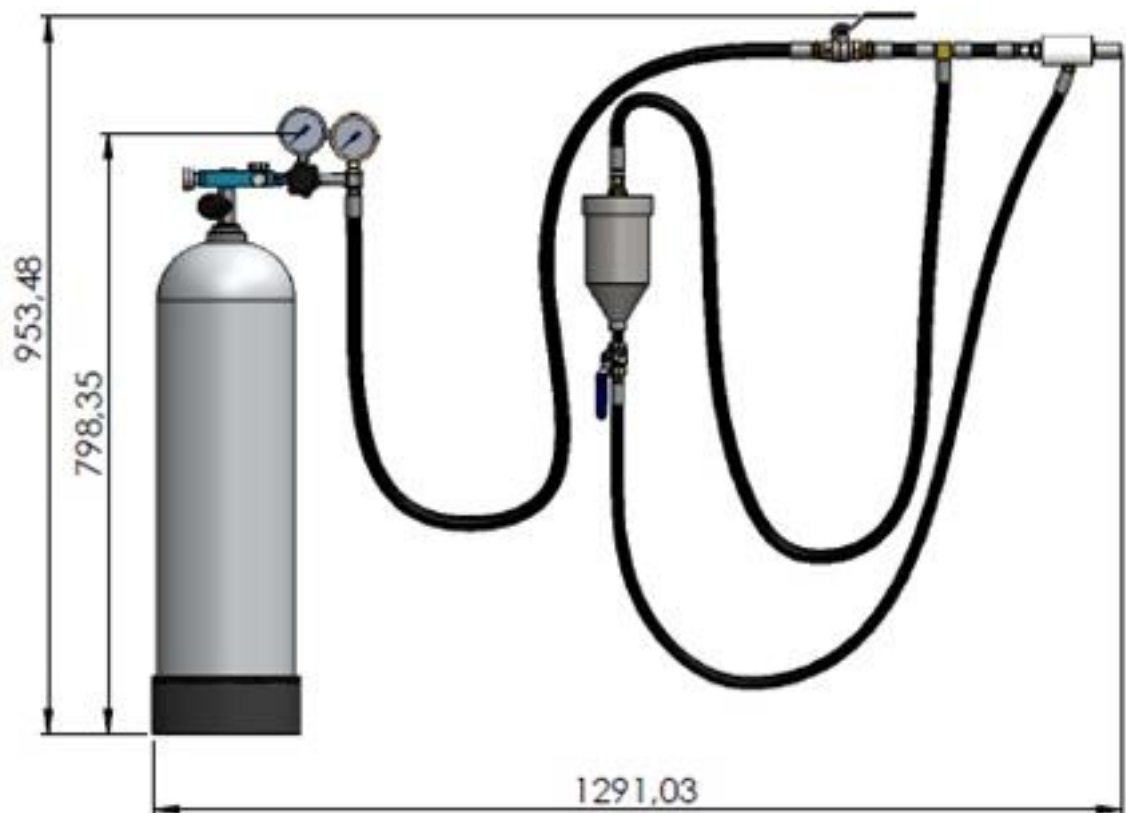
Los materiales para su fabricación fueron seleccionados para que fueran resistentes

a la abrasión y a la presión a la cual iba a ser sometido el sistema, buscando un bajo peso en sus elementos y una alta resistencia al ambiente al cual iba a ser expuesto durante el proceso.

Ya que el prototipo debe ser transportado con facilidad, se buscó que fuera lo más pequeño posible, por lo tanto la selección y el diseño de los elementos necesarios para su desarrollo se realizó teniendo en cuenta parámetros de dimensión y peso.

A continuación se muestra una vista general donde se detalla el dimensionamiento general del prototipo; el peso logrado en su desarrollo es de aproximadamente 25 [Kg].

Figura 13. Vista general del prototipo desarrollado



5.2 EL PROTOTIPO DEBE SER AUTÓNOMO

A diferencia los equipos convencionales, el prototipo desarrollado no requiere de una fuente de energía eléctrica para poder operar, el termina siendo uno de los mayores beneficios a la hora de realizar trabajos de campo, donde no es posible adquirir una fuente de energía o se encuentre ubicada lejos del lugar donde se debe realizar la preparación superficial.

Figura 14. Equipo convencional de Sandblasting con fuente de energía eléctrica



Fuente: Blasting Experts Ltda. Tolvas de granallado y paquetes. Disponible en Internet: http://blastingexperts.com/Web_final/axxiom_serie_m_menu.html

Los equipos modulares existentes en la industria requieren de un compresor y un generador eléctrico que proporciona energía al compresor. Además, para poder realizar un trabajo de preparación superficial con estos equipos en campo, se requiere de varios operarios para poder transportar todos sus elementos.

5.3 EL PROTOTIPO NO ES CONVENCIONAL

Actualmente no se conoce ningún equipo en la industria que pueda trabajar de forma autónoma y pueda llegar a un grado de preparación superficial SSPC-SP5 o metal blanco según norma; existen otros equipos como cepillos de cerdas metálicas, o incluso de remoción manual, pero requieren igualmente una fuente de energía eléctrica o mucho esfuerzo físico y en la mayoría de ocasiones el resultado final del proceso no es el adecuado.

5.4 VENTAJAS

El diseño del prototipo se enfocó para hacer una preparación local de superficies de entre 0,1 m² a 0,2 m², como por ejemplo el mantenimiento de la superficie de una tubería que se encuentre en un ambiente rural, por lo tanto, el prototipo desarrollado posee las siguientes ventajas:

- No requiere mucha mano de obra para transportar los elementos.
- Es mas eficiente al momento de preparar una superficie que un equipo de remoción mecánica o por medio de limpieza manual.
- Es fácil de transportar, ensamblar y operar.

5.5 COMPLEJIDAD

Para el desarrollo del proyecto se tuvo en cuenta que actualmente para el comportamiento del material particulado existen ecuaciones empíricas que predicen su comportamiento. Por lo tanto, se realizaron simulaciones básicas por medio de herramientas CAE como SolidWorks para predecir el comportamiento del fluido en el sistema.

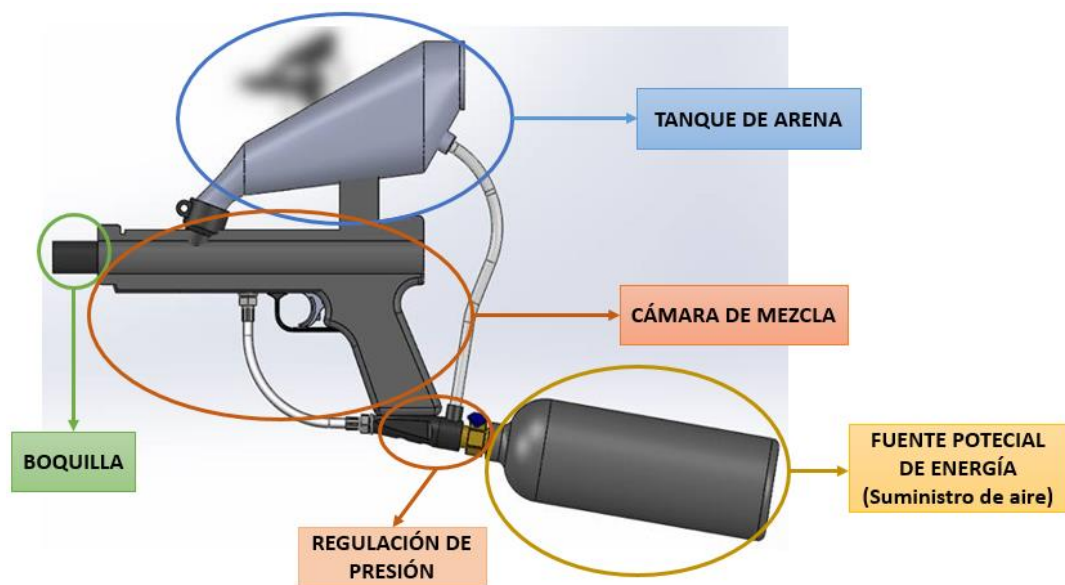
El diseño del conjunto del prototipo se realizó combinando los dos sistemas existentes de sandblasting, el sistema a compresión y el sistema a succión, generando un híbrido que permitiera realizar una preparación superficial bajo los parámetros de diseño planteados para el proyecto. Se tuvieron en cuenta para este desarrollo los cálculos de pérdidas de aire por cada descarga de arena, el tiempo máximo de operación y el área superficial a tratar.

6. DISEÑO DE DETALLE Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS

El dispositivo que se realizó es una herramienta de chorreado de arena diseñada para la limpieza abrasiva, donde el suministro de aire es limitado y el área superficial a tratar es relativamente pequeña (0.1 m^2 a 0.2 m^2). La herramienta debe ser ligera, compacta e ideal donde una máquina de chorreado de arena convencional sería difícil o inconveniente de usar, específicamente para este caso, en zonas en las que la superficie a tratar son de difícil acceso tanto para el operario como para el prototipo.

Con la opción seleccionada, “diseñar un nuevo prototipo de sandblasting”, se analizó cada uno de los subsistemas y elementos que lo componen para adecuarlos a nuestra necesidad. Inicialmente se pensó en un diseño para el prototipo como el mostrado en la figura 15, ya que sería fácil de transportar y podría realizar el trabajo en zonas de difícil acceso.

Figura 15. Elementos y subsistemas del nuevo prototipo de Sandblasting.



A continuación se describe el proceso de diseño y selección de cada uno de los subsistemas que componen el prototipo, dando solución al problema planteado para el proyecto.

6.1 BOQUILLA

Debido a que el elemento que define los requisitos de aire y abrasivo del sistema es la boquilla del prototipo, se tuvieron en cuenta las especificaciones generadas por los fabricantes con experiencia en este tipo de dispositivos. Los valores predeterminados para este tipo de sistema se muestran a continuación:

Tabla 3. Requisitos de aire comprimido y abrasivo en el proceso de Sandblasting

DIÁMETRO DE LA BOQUILLA	PRESIÓN EN LA BOQUILLA (psi)								REQUISITOS DE AIRE Y POTENCIA DEL COMPRESOR
	50	60	70	80	90	100	125	140	
No. 2 1/8"	11	13	15	17	18,5	20	25	28	Aire (cfm)
	67	77	88	101	112	123	152	170	Abrasivo (lb/h)
	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6,2	Compresor (HP)
No. 3 3/16"	26	30	33	38	41	45	55	62	Aire (cfm)
	150	171	196	216	238	264	319	357	Abrasivo (lb/h)
	6	7	8	9	10	11	12	13	Compresor (HP)
No. 4 1/4"	47	54	61	68	74	81	98	110	Aire (cfm)
	268	312	354	408	448	494	608	681	Abrasivo (lb/h)
	11	12	14	16	17	18	22	25	Compresor (HP)
No. 5 5/16"	77	89	101	113	126	137	168	188	Aire (cfm)
	468	534	604	672	740	812	982	1100	Abrasivo (lb/h)
	18	20	23	26	28	31	37	41	Compresor (HP)
No. 6 3/8"	108	123	143	161	173	196	237	265	Aire (cfm)
	668	764	864	960	1052	1152	1393	1560	Abrasivo (lb/h)
	24	28	32	36	39	44	52	58	Compresor (HP)
No. 7 7/16"	147	170	194	217	240	254	314	352	Aire (cfm)
	896	1032	1176	1312	1448	1584	1931	2163	Abrasivo (lb/h)
	33	38	44	49	54	57	69	77	Compresor (HP)
No. 8 1/2"	195	224	252	280	309	338	409	458	Aire (cfm)
	1160	1336	1512	1680	1856	2024	2459	2754	Abrasivo (lb/h)
	44	50	56	63	69	75	90	101	Compresor (HP)

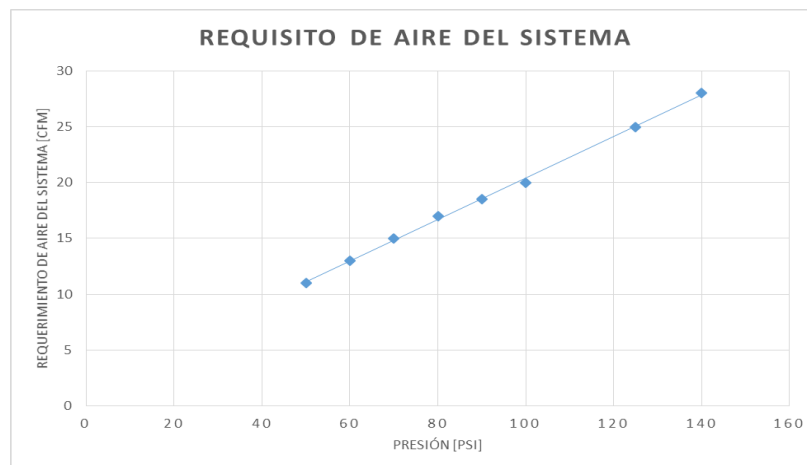
Fuente: CLEMCO INDUSTRIES CORP. PRODUCT LITERATURE. Disponible en Internet: http://www.clemcoindustries.com/pro_lit.php?cat_id=3#3

Si se utiliza una boquilla demasiado larga, se producirá una presión de chorreado bajo y un desgaste rápido en la manguera de chorreado. Si se utiliza una boquilla demasiado pequeña, el flujo del sistema será difícil de lograr⁴.

Durante el proceso de diseño y selección de los elementos que conforman el prototipo, se determinó que la mejor opción para el desarrollo de este dispositivo es el trabajar con una boquilla de una dimensión aproximada de 1/8” debido a la cantidad de aire requerido en el proceso y a las especificaciones de diseño planteadas inicialmente. Por otro lado, cabe resaltar que el material de este elemento debe tener una alta resistencia a la abrasión, por lo cual, los distintos fabricantes mencionan la duración o el ciclo de vida que tienen sus productos.

Debido a que la boquilla a utilizar debe tener una dimensión de 1/8”, se hallaron los valores o requerimientos de aire y de abrasivo adecuados para este sistema. La presión de operación es de 150 psi.

Grafica 1. Requisitos de aire



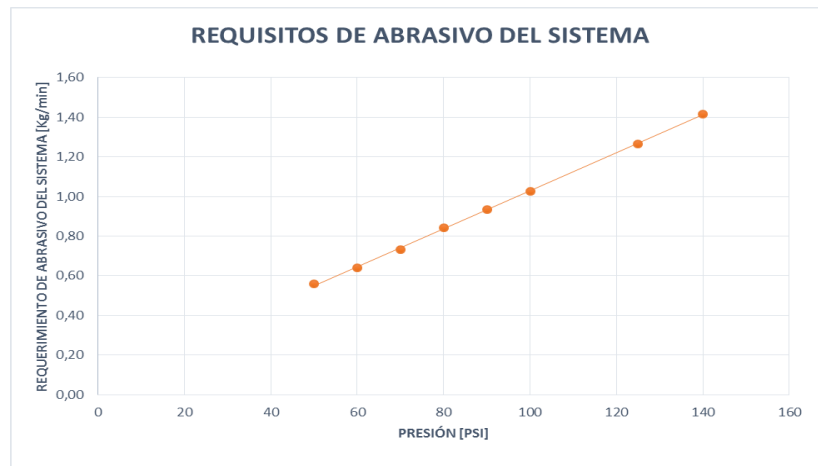
⁴ CLEMCO. Catálogo de productos [online]. Clemco International. [Madrid: España]. [citado 12 Ene. 2015]. Disponible de internet: <<http://www.clemcoindustries.com/images/pdfs/21986.pdf>>

A partir de la gráfica se encontró que la ecuación que rige el comportamiento del aire en el sistema es la siguiente:

$$\text{Aire [cfm]} = 0,1858 * P[\text{psi}] + 1,8358$$

Por lo tanto para una presión de 150 psi, se tiene que el requerimiento de aire es de **29.7 [cfm]** aproximadamente. Para el abrasivo se tiene:

Gráfica 2. Requisitos de abrasivo



A partir de la gráfica se encontró que la ecuación que rige el comportamiento del abrasivo en el sistema es la siguiente:

$$\text{Abrasivo} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{min}} \right] = 0,0096 * P[\text{psi}] + 0,0705$$

Por lo tanto para una presión de 150 psi, se tiene que el requerimiento de abrasivo es de **1.51 [Kg/min]** aproximadamente.

Para la elección del material se tuvieron en cuenta las recomendaciones planteadas por los fabricantes:

Tabla 4. Duración aproximada en horas de una boquilla de sandblasting según su material y el abrasivo utilizado⁵.

MATERIAL DE LA BOQUILLA	GRANALLA DE ACERO	ARENA	ÓXIDO DE ALUMINIO
Cerámica	20-40	10-30	1-4
Carburo de tungsteno	500-800	300-400	20-40
Carburo de silicio	600-1000	400-600	50-100
Carburo de boro	1500-2500	750-1500	200-1000

El material seleccionado para este elemento es el carburo de tungsteno debido a su alta resistencia a la abrasión y el tiempo de vida útil es elevado. El dispositivo va a trabajar en intervalos de tiempo corto, por lo que el desgaste de la boquilla no va a ser muy significativo. A partir de esto, se seleccionó una boquilla CLEMCO de 1/8" con las siguientes especificaciones, ver figura 16:

- Modelo de boquilla: Serie CT
- Diámetro de orificio: 1/8"
- Diámetro de entrada: 1/2"
- Longitud: 1 3/4"
- Peso: 0.30 [lb]
- Rosca: 3/4"

⁵ CHIPAXA [online]. [México]. [citado 24 Ene. 2015]. Disponible de internet: <[http://www.chipaxa.com/paginas/TablaRendimientoBoquilla.htm#Tabla comparativa del desempeño de la boquilla](http://www.chipaxa.com/paginas/TablaRendimientoBoquilla.htm#Tabla%20comparativa%20del%20desempe%C3%B1o%20de%20la%20boquilla)>

- Material: Carburo de Tungsteno
- Tipo de boquilla: Boquilla corta tipo recto

Figura 16. Tungsten Carbide Lined Metal Jacketed.



Fuente: CLEMCO INDUSTRIES. Catálogo de boquillas. Disponible en Internet: <http://www.clemcoindustries.com/images/pdfs/24185.pdf>

6.2 ABRASIVO

La Corporación para la Investigación de la Corrosión en su experiencia con el trabajo de preparación de superficies, cuenta en sus instalaciones con producto abrasivo ideal para ser utilizado en el dispositivo que se diseñó. El abrasivo disponible es arena, específicamente, arena Sikadur 506; sus características se muestran a continuación, ver tabla 5.

Tabla 5. Características de la arena Sikadur

Denominación	Usos	Granulometría	Densidad Aparente	Presentación
Sikadur®-501	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de morteros autonivelantes, utilizando como ligante el Sikafloor® -261. • Arena de espolvorear para mejorar la adherencia de capas de acabado fino. 	0.08 – 0.3 mm	~ 1.5 kg/l	Sacos de 20 kg y de 22 kg
Sikadur®-502	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de capas de lisaje y de fondo, utilizando el Sikafloor® -161 E como ligante. • Espolvoreo de las capas de lisaje y de fondo. 	0.4 – 0.9 mm	~ 1.69 kg/l	Sacos de 18 kg
Sikadur®-506	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de morteros gruesos, utilizando como ligante el Sikafloor® -261. • Arena para sistemas antideslizantes de tipo grueso. 	0.1 – 2.0 mm	~ 1.6 kg/l	Sacos de 28 kg
Sikadur®-510	<ul style="list-style-type: none"> • Arena para sistemas antideslizantes de tipo semigrueso. 	0.4 – 1.0 mm	~ 1.5 kg/l	Sacos de 26 kg
Sikadur®-591	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de morteros gruesos, utilizando como ligante el Sikafloor® -261. 	0.08 – 0.8 mm	~ 1.5 kg/l	Sacos de 27 kg

Fuente: SIKA [online]. Arena Sikadur: Serie 500. [Visto 24 Ene. 2015]. Disponible de internet: <<http://www.acae.es/isapi/prestowebisapi.dll?FunctionGo&id=882&cod=ACAE/EM/EM20/SIKA/PRODUCSIK/PSIK118763&path=aca2.cfg>>

La información de este abrasivo se complementa en el anexo C.

6.3 CÁMARA DE MEZCLA

La cámara de mezcla es el elemento donde se lleva a cabo la mezcla de aire con el abrasivo seleccionado para el sistema; debe tener una alta resistencia a la abrasión y una alta resistencia mecánica debido a que sus componentes van a estar sometidos a presiones de operación elevadas.

Como visión preliminar se revisaron los productos que se pueden encontrar en el mercado para determinar su posible uso en el desarrollo del proyecto.

Figura 17. Pistola de Sandblasting.

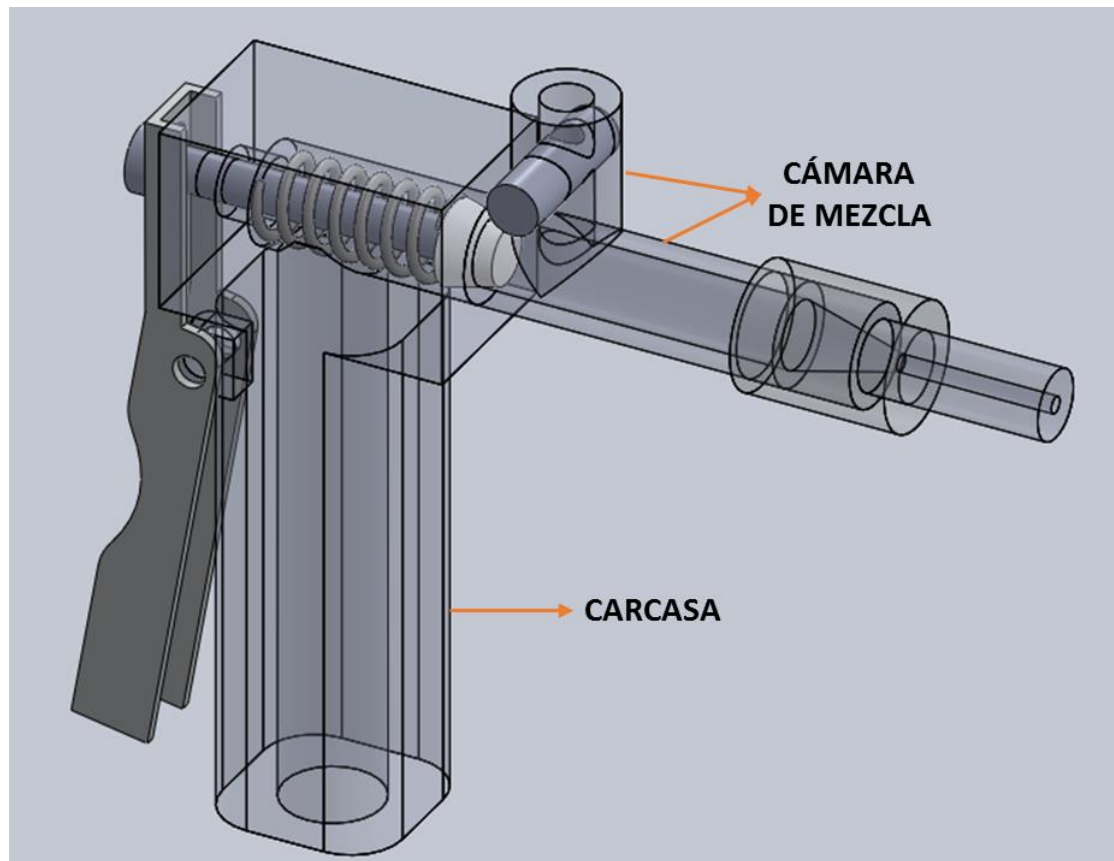


Fuente: CLEMCO INDUSTRIES. Catálogo de pistolas de Sandblasting. Disponible en Internet: <http://www.clemcoindustries.com/images/pdfs/24182.pdf>

Infortunadamente estos elementos están diseñados para trabajar a presiones que no superan los 120 [psi], por lo tanto se diseñó este elemento para que cumpla las especificaciones y requerimientos planteados en el proyecto.

a) Como primera medida hizo un diseño de una pistola a presión que pueda soportar la carga de trabajo escogiendo materiales metálicos:

Figura 18. Primera versión del diseño de la pistola de Sandblasting



Ya que el sistema debe soportar presión, especialmente la carcasa y la cámara de mezcla, se diseñaron estos elementos bajo el Código ASME sección VIII, División 1 (RULES FOR CONSTRUCTION OF PRESSURE VESSELS).

Los cálculos realizados se muestran a continuación, se buscó encontrar el espesor mínimo de estos elementos para que el sistema no falle⁶.

⁶ ASME BOILER & PRESSURE VESSEL CODE. Rules for Construction of Pressure Vessels. ASME Section VIII, Division 1. New York: ASME International, 2004.

- Material de la carcasa: Duraluminio Alumond 500 T6-51 cuyo costo es de \$23000 COP el Kg.
- Material de la cámara de mezcla: Acero inoxidable AISI 304, costo de \$37000 COP el metro con diámetro de 1”.
- El diámetro interno de la cámara de mezclado es de 1/2” debido a que el diámetro de entrada de la boquilla tiene esta dimensión. Por lo tanto, por recomendaciones de diseño se toma el mismo diámetro de entrada de la boquilla para que no hayan pérdidas de presión⁷.

Variables de diseño

$$D_{acero} = \frac{1}{2} [in]$$

$$P_{operación} = 150 [psi]$$

$$P_{tanque} = 3000 [psi]$$

$$P_{diseño} = P_{tanque} + (30 [psi])$$

$$E = 0,7$$

$$S_{acero_f} = 90 [MPa]$$

$$S_{acero_{f_1}} = 45 [MPa]$$

$$S_{duraluminio_f} = 82 [MPa]$$

$$S_{duraluminio_{f_1}} = 73 [MPa]$$

Donde:

D_{acero} : Diámetro interno del acero
 $P_{operación}$: Presión de operación del sistema
 P_{tanque} : Presión interna del tanque de aire
 $P_{diseño}$: Presión de diseño

E : Eficiencia de junta

S_{acero_f} : Esfuerzo a la tracción del acero

$S_{acero_{f_1}}$: Esfuerzo a la fluencia del acero

$S_{duraluminio_f}$: Esfuerzo a la tracción del Duraluminio

$S_{duraluminio_{f_1}}$: Esfuerzo de fluencia del Duraluminio

$$t_{acero} = \frac{P_{diseño_f} * R_{acero_f}}{(S_{acero_f} * E) - (0,6 * P_{diseño_f})} \quad (1)$$

Donde:

t_{acero} : Espesor del acero

Teniendo el espesor del acero se determinó el diámetro interno del Duraluminio.

⁷ CLEMCO. Catálogo de productos [online]. Clemco International [Madrid: España]. [citado 12 Ene. 2015] Disponible de internet: <<http://www.clemcoindustries.com/images/pdfs/24185.pdf>>

$$D_{Al} = D_{acero_f} + (2 * t_{acero_f}) \quad (2)$$

$$t_{realacero} = \frac{D_{Al_f} - D_{Al}}{2} \quad (3)$$

Donde:

D_{Al} : Diámetro interior del Aluminio

$t_{realacero}$: Espesor real del acero

Operaciones básicas

$$R_{acero_f} = \frac{D_{acero_f}}{2} \quad (4)$$

$$R_{Al_f} = \frac{D_{Al_f}}{2} \quad (5)$$

Donde:

R_{acero_f} : Radio interno del acero

R_{Al_f} : Radio interno del Duraluminio

Finalmente, se calculó el espesor que debe tener el Duraluminio para que sea capaz de soportar la presión de operación.

$$t_{cAl} = \frac{P_{diseño_f} * R_{Al_f}}{(S_{duraluminio_f} * E) - (0,6 * P_{diseño_f})} \quad (6)$$

Donde:

t_{cAl} : Espesor del Duraluminio

Para verificar que el sistema soporta la presión de operación se calculó también el espesor longitudinal mostrado en la norma.

$$t_{lacero} = \frac{P_{diseño_f} * R_{acero_f}}{(2 * (S_{acero_f} * E)) - (0,4 * P_{diseño_f})} \quad (7)$$

$$t_{lAl} = \frac{P_{diseño_f} * R_{Al_f}}{(2 * (S_{duraluminio_f} * E)) - (0,4 * P_{diseño_f})} \quad (8)$$

$$D_{acero_{externo}} = D_{acero_f} + (2 * t_{c_{acero}}) \quad (9)$$

$$D_{Al_{externo}} = D_{Al_f} + (2 * t_{c_{Al}}) \quad (10)$$

Donde:

t_{lacero} : Espesor longitudinal del acero

t_{lAl} : Espesor Longitudinal del Duraluminio

$D_{acero_{externo}}$: Diámetro externo del acero

$D_{Al_{externo}}$: Diámetro externo del Duraluminio

Los resultados fueron obtenidos por medio del software EES y se muestran a continuación:

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]		
$D_{\text{acero}} = 0,5$ [in]	$D_{\text{acero,externo}} = 17,96$	$D_{\text{acero,f}} = 12,7$ [mm]
$D_{\text{Al}} = 12,91$ [mm]	$D_{\text{Al,externo}} = 27,92$	$D_{\text{Al,f}} = 19,05$ [mm]
$E = 0,7$	$P_{\text{diseño}} = 3030$ [psi]	$P_{\text{diseño,f}} = 20,89$ [MPa]
$P_{\text{operación}} = 150$ [psi]	$P_{\text{operación,f}} = 1,034$ [MPa]	$P_{\text{tanque}} = 3000$ [psi]
$P_{\text{tanque,f}} = 20,69$ [MPa]	$\text{regla}_{1,\text{acero}} = 3,175$	$\text{regla}_{1,\text{Al}} = 4,763$
$\text{regla}_{2,\text{acero}} = 24,26$ [MPa]	$\text{regla}_{2,\text{Al}} = 22,1$ [MPa]	$R_{\text{acero,f}} = 6,35$ [mm]
$R_{\text{Al,f}} = 9,525$ [mm]	$S_{\text{acero}} = 13053$ [psi]	$S_{\text{acero,f}} = 90$ [MPa]
$S_{\text{acero,f,1}} = 45$ [MPa]	$S_{\text{duraluminio,f}} = 82$ [MPa]	$S_{\text{duraluminio,f,1}} = 73$ [MPa]
$t_{\text{acero,1}} = 2,948$ [mm]	$t_{\text{acero,f}} = 0,1035$ [in]	$t_{\text{Al,1}} = 2,726$ [mm]
$t_{\text{c,acero}} = 2,629$ [mm]	$t_{\text{c,Al}} = 4,435$ [mm]	$t_{\text{l,acero}} = 1,128$ [mm]
$t_{\text{l,Al}} = 1,869$ [mm]	$t_{\text{real,acero}} = 3,072$ [mm]	

Por lo tanto para un diámetro interno de ½” el espesor mínimo que debe tener esta pieza es de 2.629 mm para el acero y 4.435 mm para el Aluminio.

Teniendo en cuenta las especificaciones de diseño, se evaluó esta alternativa y se determinó que es funcional pero la ergonomía del dispositivo no cumple con las expectativas para el proyecto, esto debido al que el material utilizado es muy pesado y la arena también juega un papel importante en este aspecto.

A la hora de realizar un mantenimiento de este elemento se tendrán complicaciones debido a la gran cantidad de partes que contiene. Este aspecto es clave debido a que las superficies a tratar se encuentran en zonas donde no es posible contar con las herramientas adecuadas para solucionar un potencial problema dentro del sistema.

b) Ya que la alternativa planteada anteriormente no cumplió satisfactoriamente con

los requisitos de diseño planteados para el proyecto, se desarrolló otra propuesta que busca solventar los problemas encontrados, además debe ser funcional para el prototipo.

Se optó por reemplazar el material de la pistola por plástico ingenieril, donde el material resista presiones elevadas y tenga una buena resistencia a la abrasión, debido a que este tipo de materiales son más económicos y además facilitan el trabajo de maquinado que se debe realizar. La revisión bibliográfica y el estudio en el mercado local de estos productos mostraron que el plástico ingenieril que se adapta a las necesidades planteadas es el Nylon 6, ya que su resistencia mecánica se puede comparar con la del acero y su resistencia a la abrasión es aceptable.

Tabla 6. Propiedades del Plástico ingenieril “Nylon 6”

Propiedades Mecánicas	
Coefficiente de Fricción	0,2-0,3
Módulo de Tracción (GPa)	3,3
Relación de Poisson	0,41
Resistencia a la Abrasión - ASTM D1044 (mg/1000 ciclos)	3-5
Resistencia a la Tracción (MPa)	82
Resistencia al Impacto Izod (J m-1)	40-110

Fuente: MANUFACTURAS TÉCNICAS INDUSTRIALES DE CALI. Nylon 6. Disponible en Internet: <http://mticali.com/nylon66.html>

Se realizaron los cálculos necesarios para determinar el espesor mínimo que debe tener este elemento.

Variables de diseño

$$D_{nylon} = \frac{1}{2} [in]$$

$$P_{operación} = 150 [psi]$$

$$P_{tanque} = 3000 [psi]$$

$$P_{diseño} = P_{tanque} + (30 [psi])$$

$$E = 0,7$$

$$S_{Nylon_f} = 75 [Mpa]$$

Donde:

$$t_{c_{nylon}} = \frac{P_{diseño_f} * R_{nylon_f}}{(S_{nylon_f} * E) - (0,6 * P_{diseño_f})} \quad (12)$$

D_{nylon} : Diámetro interno del Nylon 6

$P_{operación}$: Presión de operación del sistema

P_{tanque} : Presión interna del tanque de aire

$P_{diseño}$: Presión de diseño

S_{Nylon_f} : Esfuerzo a la tracción del Nylon 6

$$t_{l_{nylon}} = \frac{P_{diseño_f} * R_{nylon_f}}{(2 * (S_{nylon_f} * E)) - (0,4 * P_{diseño_f})} \quad (13)$$

$$D_{nylon_{externo}} = D_{nylon_f} + (2 * t_{c_{nylon}}) \quad (14)$$

Operaciones básicas

$$R_{nylon_f} = \frac{D_{nylon_f}}{2} \quad (11)$$

Procedimos entonces a calcular el espesor circunferencial y longitudinal del Nylon según norma para que el material no falle bajo las condiciones de operación del sistema:

Donde:

$t_{c_{nylon}}$: Espesor circunferencial del Nylon 6

$t_{l_{nylon}}$: Espesor longitudinal del Nylon 6

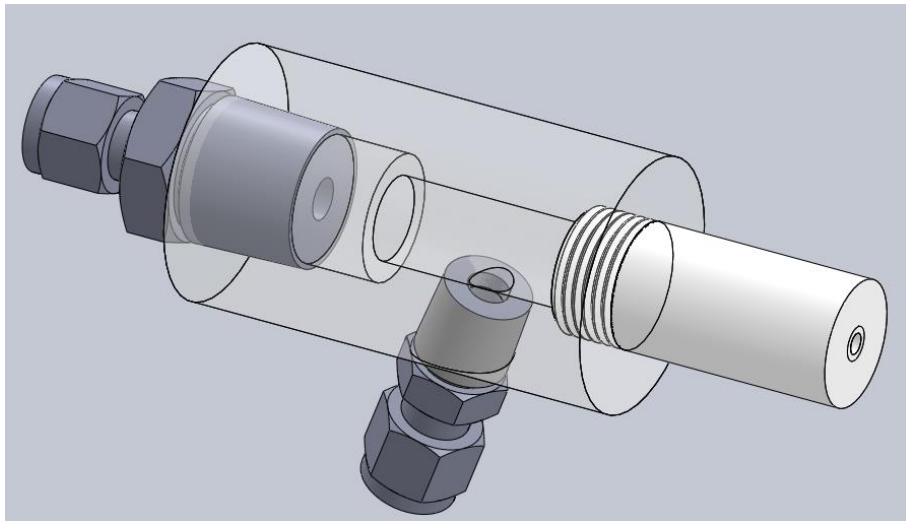
$D_{nylon_{externo}}$: Diámetro externo final del Nylon

Los resultados fueron obtenidos por medio del software EES y se muestran a continuación:

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]		
Convertir = 19,05	$D_{nylon} = 0,5$	$D_{nylon,externo} = 19,34$
$D_{nylon,f} = 12,7$ [mm]	$E = 0,7$	$P_{diseño} = 3030$ [psi]
$P_{diseño,f} = 20,89$ [MPa]	$P_{operación} = 150$ [psi]	$P_{operación,f} = 1,034$ [MPa]
$P_{tanque} = 3000$ [psi]	$P_{tanque,f} = 20,69$ [MPa]	$regla_{1,nylon} = 3,175$
$regla_{2,nylon} = 20,21$	$R_{nylon,f} = 6,35$	$S_{nylon} = 10878$ [psi]
$S_{Nylon,f} = 75$ [MPa]	$t_{c,nylon} = 3,319$ [mm]	$t_{l,nylon} = 1,373$
$t_{nylon,f} = 0,1307$ [in]		

Por lo tanto para un diámetro interno de $\frac{1}{2}$ " el espesor mínimo que debe tener esta pieza es de 3.319 [mm]. Se procedió a continuación a simplificar el diseño de la cámara de mezcla que permitiera cumplir con los objetivos del proyecto; el diseño de este elemento se muestra a continuación, ver figura 19.

Figura 19. Cámara de mezcla diseñada

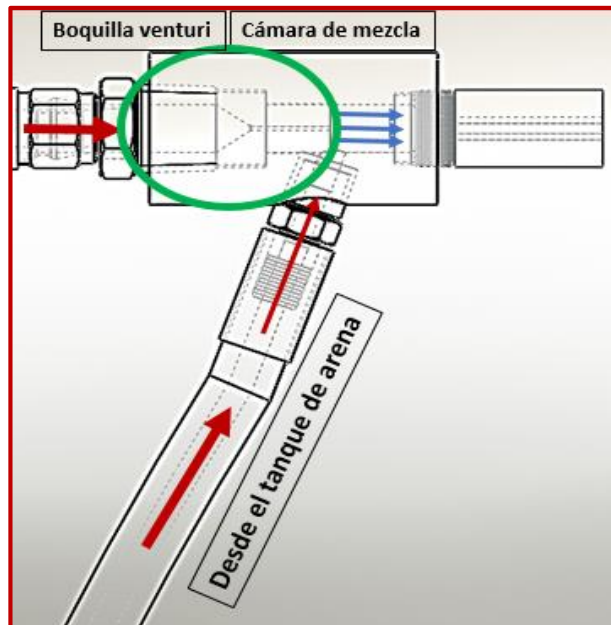


6.3.1 Boquilla venturi: Ya que el dispositivo diseñado es un híbrido entre succión y presión, se debió detallar el proceso de diseño de la boquilla venturi que genera la succión del abrasivo dentro de la cámara de mezcla. Este comportamiento se origina debido al gran cambio de sección que existe entre la entra y la salida del fluido, para este caso, se realiza una reducción de diámetro desde $\frac{1}{2}$ " hasta $\frac{1}{16}$ ". Ver figura 20.

Por lo tanto, gracias a la investigación realizada y a los fabricantes expertos, en este caso CLEMCO se determinó que para una boquilla de chorreado de arena con

diámetro de 1/8" se requiere una boquilla venturi de 1/16" para que permitiera realizar la succión en el sistema⁸.

Figura 20. Efecto venturi en la cámara de mezcla



Se escogió plástico ingenieril para su fabricación ya que tiene un alto grado de resistencia a la tracción y una alta resistencia a la abrasión, lo cual fue ideal para la realización del proyecto.

6.4 SUMINISTRO DE AIRE (Fuente potencial de energía)

Según la teoría presentada y la investigación realizada, ver anexo A y B, todos los equipos de Sandblasting utilizan un compresor como fuente de suministro de aire a presión. El reto planteado para este caso fue encontrar o diseñar un dispositivo que

⁸ CLEMCO. Catálogo de productos [online]. [Madrid: España] Clemco International. [citado 12 Ene. 2015]. Disponible de internet: <<http://www.clemcoindustries.com/images/pdfs/22787.pdf>>

permitiera suplir el trabajo que hace el compresor y que sea de fácil transporte hacia los sitios donde se desea llevar a cabo la preparación superficial.

- El primer acercamiento se hizo con tanques de paintball, ver figura 21. Se realizaron algunas pruebas para determinar la viabilidad del uso de este tanque en el prototipo, estas pruebas se hicieron bajo condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente y se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 21. Tanque de paintball, Aluminio, Empire, 3.000 Psi



Fuente: GLOBAL XTREME SPORTS. Tanque para paintball. Disponible en internet: <http://tienda.globalxtremesports.com/es/home/401-tanque-de-aire-para-paintball-483000-aluminio-empire.html>

Para un tanque de 47 cu in y 3000 psi, se realizaron varias pruebas para determinar el tiempo de descarga del tanque, debido a que es un factor importante para el desarrollo del sistema.

Tabla 7. Tiempo de descarga de un tanque de paintball de 47 cu in, 3000 psi.

Díámetro de salida	t1 [s]	t2 [s]	t3 [s]	t4 [s]	t promedio [s]
1/8"	20	18	21	19	19.5

Se determinó que para preparar el área superficial propuesta para el proyecto (0.1-0.2 m²) este tanque no será suficiente. Aproximadamente solo el 40% del tiempo de descarga es funcional para el proceso, es decir, unos 7 segundos, debido a que la presión en el tanque disminuye con el tiempo al igual que el volumen de aire a la salida.

- En el sitio donde se realizó esta prueba (ESTRATEGIA PAINTBALL) se encontraba un tanque con una capacidad de 50 cu ft a 3000 psi (tanque de buceo) con el que se realizaron también algunos experimentos, ver figura 22.

Figura 22. Tanque de buceo, Aluminio, 3000 psi



Fuente: JUPITER SCUBA DIVING. Tank Rental. Disponible en internet: <http://www.jupiterscubadiving.com/book-a-dive/tank-rental/>

Tabla 8. Tiempo de descarga de un tanque de buceo de 50 cu ft, 3000 psi.

Diámetro de salida	t1 [s]	t2 [s]	t3 [s]	t4 [s]	t promedio [s]
3/16"	122	117	125	123	121.7

El factor a tener en cuenta para este tanque son las dimensiones, ya que el tamaño aumenta significativamente (longitud: 60 cm, diámetro: 20 cm aproximadamente). El peso es relevante pero aun así es manejable para una persona (10 kg aproximadamente). Con este tanque se estimó que si se puede llegar a preparar el área superficial planteada para el proyecto (0.1-0.2 m²).

COMPARACIÓN DE ELEMENTOS:

Tabla 9. Comparación de elementos.

TANQUE DE PAINTBALL	TANQUE DE BUCEO
	
Costo: \$140'000 COP	Costo: \$650'000 COP
Volumen de aire: 47 cu in	Volumen de aire: 80 cu ft
Presión: 3000 psi	Presión: 3000 psi
Longitud: 25 cm	Longitud: 66 cm
Diámetro: 10 cm	Diámetro: 18.1 cm
Peso: 4 Kg	Peso: 14.2 Kg
Tiempo de descarga: 19.5 s	Tiempo de descarga: 150.7 s

Durante el proceso de diseño tuvieron varios inconvenientes a la hora de definir el sistema de potencia ya que el peso fue un factor determinante a la hora de pensar en el producto final. Se quiere utilizar un tanque de aire comprimido que pueda suplir la presión y la cantidad de aire que genera un compresor, por lo que se planteó el uso de tanques de buceo con gran capacidad de almacenamiento de aire.

6.4.1 Pérdidas de aire en el sistema: Ya que uno de los objetivos del diseño de este prototipo es que sea autónomo, se requirió hacer un cálculo de las pérdidas de aire que se van a tener debido a los accesorios y elementos del sistema, esto para estimar el tiempo que puede durar el dispositivo en funcionamiento con los componentes seleccionados para su construcción (tanque de buceo de 80 cu ft a 3000 psi).

Variables globales

$$\begin{aligned}
 P1 &= P0\# \\
 T1 &= 25 [C] \\
 R &= 0,08205746 \left[\frac{L * atm}{K * mol} \right] \\
 rho &= DENSITY(Air; T = T1; P = P1) \\
 M &= MOLARMASS(Air) \\
 T &= 298 [K]
 \end{aligned}$$

Donde:

P1: Presión ambiente
T1: Temperatura ambiente
R: Constante universal de los gases
rho: Densidad del aire
M: Masa molar del aire

Para el tanque de aire

$$\begin{aligned}
 P_{tanque} &= 3000 * convert(psi; atm) \\
 V_{tanque} &= 11 [L] \\
 n_{tanque} &= \frac{P_{tanque} * V_{tanque}}{R * T} \quad (15) \\
 masa_{tanque} &= n_{tanque} * M \quad (16) \\
 V_{air_{tanque}} &= \frac{masa_{tanque}}{rho} \quad (17) \\
 masa_{tanque} &= n_{tanque} * M \quad (18) \\
 V_{air_{tanque}} &= \frac{masa_{tanque}}{rho} \quad (19)
 \end{aligned}$$

Donde:

P_{tanque}: Presión interna del tanque de aire
V_{tanque}: Volumen del tanque
n_{tanque}: Número de moles en el tanque
masa_{tanque}: Masa de aire tanque

$V_{air_{tanque}}$: Volumen de aire del tanque

Pérdidas en tanque de aire

$$P_{tanque_p} = 150 * convert(psi; atm)$$

$$V_{tanque_p} = 11 [L]$$

$$n_{tanque_p} = \frac{P_{tanque_p} * V_{tanque_p}}{R * T} \quad (20)$$

$$masa_{tanque_p} = n_{tanque_p} * M \quad (21)$$

$$V_{air_{tanque_p}} = \frac{masa_{tanque_p}}{\rho} \quad (22)$$

Donde:

P_{tanque_p} : Presión final del tanque de aire cuando se descarga

n_{tanque_p} : Número de moles del tanque de aire cuando se descarga

$masa_{tanque_p}$: Masa de aire cuando el tanque se descarga

$V_{air_{tanque_p}}$: Volumen del tanque cuando se descarga

Pérdidas en el tanque arena

$$P_{tanque_a} = 150 * convert(psi; atm)$$

$$V_{tanque_a} = 0,5 [L]$$

$$n_{tanque_a} = \frac{P_{tanque_a} * V_{tanque_a}}{R * T} \quad (23)$$

$$masa_{tanque_a} = n_{tanque_a} * M \quad (24)$$

$$V_{air_{tanque_a}} = \frac{masa_{tanque_a}}{\rho} \quad (25)$$

Donde:

P_{tanque_a} : Presión del tanque de arena

V_{tanque_a} : Volumen del tanque de arena

n_{tanque_a} : Número de moles del tanque de arena

$masa_{tanque_a}$: Masa de aire del tanque de arena

$V_{air_{tanque_a}}$: Volumen de aire del tanque de arena

Pérdidas en las mangueras

$$D_{manguera} = 0,5 * convert(in; cm)$$

$$L_{manguera} = 3,6 * convert(m; cm)$$

$$V_{manguera} = pi * \left(\left(\frac{D_{manguera}}{2} \right)^2 \right) * L_{manguera} \quad (27)$$

$$V_{f_{manguera}} = V_{manguera} * convert(cm^3; L)$$

$$P_{manguera} = 150 * convert(psi; atm)$$

$$n_{manguera} = \frac{P_{manguera} * V_{f_{manguera}}}{R * T} \quad (28)$$

$$masa_{manguera} = n_{manguera} * M \quad (29)$$

$$V_{air_{manguera}} = \frac{masa_{manguera}}{\rho} \quad (30)$$

Donde:

$D_{manguera}$: Diámetro de la manguera

$L_{manguera}$: Longitud de la manguera

$V_{manguera}$: Volumen de la manguera

$P_{manguera}$: Presión de la manguera

$n_{manguera}$: Número de moles de aire en la manguera

$masa_{manguera}$: Masa de aire en la manguera

$V_{air_{manguera}}$: Volumen de aire en manguera

Pérdidas en los accesorios

$$D_{accesorios} = 0,75 * convert(in; cm)$$

$$L_{\text{accesorios}} = 20$$

$$V_{\text{accesorios}} = \pi i * \left(\left(\frac{D_{\text{accesorios}}}{2} \right)^2 \right) * L_{\text{accesorios}} \quad (31)$$

$$Vf_{\text{accesorios}} = V_{\text{accesorios}} * \text{convert}(cm^3; L)$$

$$P_{\text{accesorios}} = 150 * \text{convert}(psi; atm)$$

$$n_{\text{accesorios}} = \frac{P_{\text{accesorios}} * Vf_{\text{accesorios}}}{R * T} \quad (32)$$

$$\text{masa}_{\text{accesorios}} = n_{\text{accesorios}} * M \quad (33)$$

$$V_{\text{air}_{\text{accesorios}}} = \frac{\text{masa}_{\text{accesorios}}}{\rho} \quad (34)$$

Donde:

$D_{\text{accesorios}}$: Diámetro de accesorios

$L_{\text{accesorios}}$: Longitud de accesorios

$V_{\text{accesorios}}$: Volumen de accesorios

$P_{\text{accesorios}}$: Presión en accesorios

$n_{\text{accesorios}}$: Número de moles de aire en accesorios

$\text{masa}_{\text{accesorios}}$: Masa de aire en accesorios

$V_{\text{air}_{\text{accesorios}}}$: Volumen de aire en accesorios

Por lo tanto el volumen de aire disponible en el proceso desde los 3000 [psi] hasta llegar a 150 [psi].

$$V_{\text{total}_{\text{disponible}}} = V_{\text{air}_{\text{tanque}}} - V_{\text{air}_{\text{tanque}_p}} \quad (35)$$

Donde:

$V_{\text{total}_{\text{disponible}}}$: Volumen de aire disponible

Volumen total de aire perdido por cada descarga

$$V_{\text{total}_{\text{perdido}_{\text{descarga}}}} = V_{\text{air}_{\text{accesorios}}} + V_{\text{air}_{\text{manguera}}} + V_{\text{air}_{\text{tanque}_a}} \quad (36)$$

Los resultados fueron obtenidos por medio del software EES y se muestran a continuación:

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]		
$D_{\text{accesorios}} = 1,905 \text{ [cm]}$	$D_{\text{manguera}} = 1,27 \text{ [cm]}$	$L_{\text{accesorios}} = 20$
$L_{\text{manguera}} = 360 \text{ [cm]}$	$M = 28,97 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{masa}_{\text{accesorios}} = 0,6892$
$\text{masa}_{\text{manguera}} = 5,514$	$\text{masa}_{\text{tanque}} = 2660$	$\text{masa}_{\text{tanque}_a} = 6,045$
$\text{masa}_{\text{tanque}_p} = 133$	$n_{\text{accesorios}} = 0,02379$	$n_{\text{manguera}} = 0,1904$
$n_{\text{tanque}} = 91,83$	$n_{\text{tanque}_a} = 0,2087$	$n_{\text{tanque}_p} = 4,591$
$P1 = 101,3 \text{ [kPa]}$	$P_{\text{accesorios}} = 10,21 \text{ [atm]}$	$P_{\text{manguera}} = 10,21 \text{ [atm]}$
$P_{\text{tanque}} = 204,1 \text{ [atm]}$	$P_{\text{tanque}_a} = 10,21 \text{ [atm]}$	$P_{\text{tanque}_p} = 10,21 \text{ [atm]}$
$R = 0,08206 \text{ [(L*atm)/(K*mol)]}$	$\rho = 1,184 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$T = 298 \text{ [K]}$
$T1 = 25 \text{ [C]}$	$V_{\text{air}_{\text{accesorios}}} = 0,5821 \text{ [L]}$	$V_{\text{air}_{\text{manguera}}} = 4,657 \text{ [L]}$
$V_{\text{air}_{\text{tanque}}} = 2247 \text{ [L]}$	$V_{\text{air}_{\text{tanque}_a}} = 5,106 \text{ [L]}$	$V_{\text{air}_{\text{tanque}_p}} = 112,3 \text{ [L]}$
$Vf_{\text{accesorios}} = 0,057 \text{ [L]}$	$Vf_{\text{manguera}} = 0,456 \text{ [L]}$	$V_{\text{accesorios}} = 57 \text{ [L]}$
$V_{\text{manguera}} = 456 \text{ [L]}$	$V_{\text{tanque}} = 11 \text{ [L]}$	$V_{\text{tanque}_a} = 0,5 \text{ [L]}$
$V_{\text{tanque}_p} = 11 \text{ [L]}$	$V_{\text{total}_{\text{disponible}}} = 2134 \text{ [L]}$	$V_{\text{total}_{\text{perdido}_{\text{descarga}}}} = 10,35 \text{ [L]}$

Por lo tanto, se evidencia que las pérdidas de aire en el sistema son de 10,35 [L] por cada descarga realizada, un valor aceptable para el dispositivo.

6.5 TANQUE DE ARENA

Para el almacenamiento de abrasivo se diseñó un tanque que pueda cumplir con las especificaciones preliminares del proyecto. Se elige un material fácil de maquinar que pueda soportar una gran resistencia a la tensión, ya que este va a estar sometido a la presión del sistema (150 psi). El tanque debió ser diseñado buscando que fuera lo más pequeño posible para que sea de fácil transporte y se eviten pérdidas de aire en el sistema.

Como se vio anteriormente, la boquilla define los requisitos de aire y de arena del prototipo:

- 29,7 [cfm] de aire y 1,51 [Kg/min] de abrasivo.

A partir de estos datos y de las especificaciones que presenta el abrasivo a utilizar, se pudo realizar un estimado de las dimensiones para el tanque de arena, esto teniendo en cuenta las pérdidas que al final se tendrán debido al tamaño de este elemento. Ya que el estimado de arena necesario es de 1.51 [Kg/min], se optó como primera visión hacer el tanque de 1,5 [L] de capacidad, pero debido a que el trabajo no es continuo, las pérdidas serían muy grandes. Por lo tanto se decidió diseñar un tanque de 0.5 [L] de capacidad para que las pérdidas sean mínimas y el peso de este elemento no afecte el sistema.

$$R = 40$$

$$h_c = 100$$

$$h_{cono} = 50$$

$$y = \left(\frac{\pi R^2 h_{cono}}{3} \right) * convert(mm^3; L) \quad (37)$$

$$x = (\pi * R^2 * h_c) * convert(mm^3; L) \quad (38)$$

$$v = x + y \quad (39)$$

Donde:

R : Radio interno del tanque de arena

h_c : Altura de la sección cilíndrica del tanque de arena

h_{cono} : Altura de la sección cónica del tanque de arena

y : Volumen de la sección cónica del tanque de arena

x : Volumen de la sección cilíndrica del tanque de arena

v : Volumen total del tanque

Los resultados fueron obtenidos por medio del software EES y se muestran a continuación:

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]		
$h_c = 100$ [mm]	$h_{cono} = 50$ [mm]	$R = 40$ [mm]
$v = 0,5864$ [L]	$x = 0,5027$	$y = 0,08378$

Por lo tanto, el radio del tanque diseñado fue de 40 [mm] con una altura total de 150 [mm], ver figura 23.

El material seleccionado para su construcción es un acero al carbono 1020 debido

a su fácil maquinabilidad y a su economía en el mercado. Se requirió utilizar nuevamente las fórmulas para diseño de sistemas a presión para determinar el espesor mínimo que debe tener el tanque para que el prototipo no falle.

Variables de diseño

$$D_{tanque_f} = 76 [mm]$$

$$P_{operación} = 150 [psi]$$

$$P_{tanque} = 3000 [psi]$$

$$P_{diseño} = P_{tanque} + (30 [psi])$$

$$E = 0,7$$

$$S_{acero_f} = 380 [Mpa]$$

$$S_{acero_{f_1}} = 205 [Mpa]$$

Donde:

D_{tanque_f} : Diámetro del tanque de arena

S_{acero_f} : Esfuerzo a la tracción del acero

$S_{acero_{f_1}}$: Esfuerzo de fluencia del acero

Operaciones básicas

$$R_{tanque_f} = \frac{D_{tanque_f}}{2} \quad (40)$$

Se calculó el espesor que debe tener el tanque de arena para que no falle bajo las condiciones de diseño planteadas para el proyecto.

$$t_{c_{tanque}} = \frac{P_{diseño_f} * R_{tanque_f}}{(S_{acero_f} * E) - (0,6 * P_{diseño_f})} \quad (41)$$

$$t_{l_{tanque}} = \frac{P_{diseño_f} * R_{tanque_f}}{(2 * (S_{acero_f} * E)) - (0,4 * P_{diseño_f})} \quad (42)$$

Donde:

$t_{c_{tanque}}$: Espesor circunferencial del tanque de arena

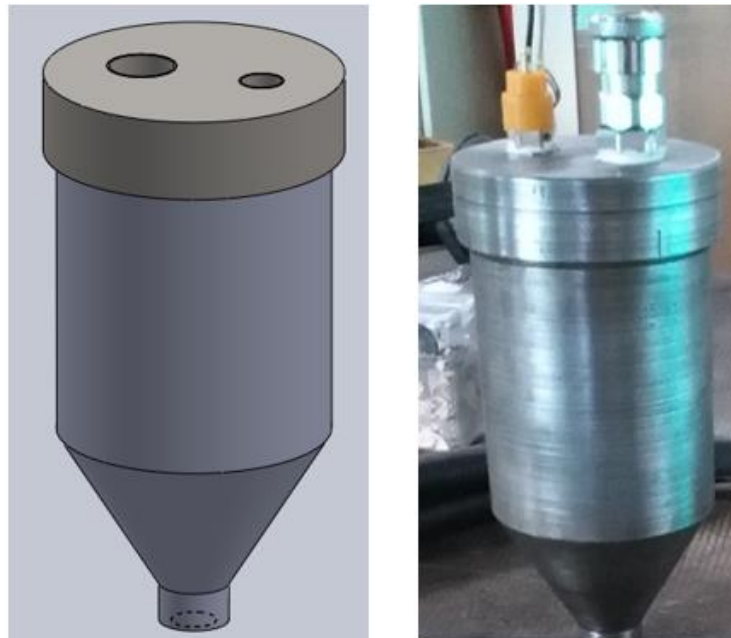
$t_{l_{tanque}}$: Espesor longitudinal del tanque de arena

Los resultados fueron obtenidos por medio del software EES y se muestran a continuación:

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]		
$D_{\text{tanque},f} = 76$ [mm]	$E = 0,7$	$P_{\text{diseño}} = 3030$ [psi]
$P_{\text{diseño},f} = 20,89$ [MPa]	$P_{\text{operación}} = 150$ [psi]	$P_{\text{operación},f} = 1,034$ [MPa]
$P_{\text{tanque}} = 3000$ [psi]	$P_{\text{tanque},f} = 20,69$ [MPa]	$\text{regla}_{1,\text{tanque}} = 19$
$\text{regla}_{2,\text{tanque}} = 102,4$	$R_{\text{tanque},f} = 38$	$S_{\text{acero}} = 55114$ [psi]
$S_{\text{acero},f} = 380$ [MPa]	$S_{\text{acero},f,1} = 205$ [MPa]	$t_{c,\text{tanque}} = 3,132$ [mm]
$t_{l,\text{tanque}} = 1,516$	$t_{\text{tanque},f} = 0,1233$ [in]	

Por lo tanto para un diámetro interno de 76 [mm] a una presión de al menos 150 [psi] el espesor mínimo que debe tener esta pieza es de 3.132 [mm], ver figura 23.

Figura 23. Tanque de arena diseñado



6.6 VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN

Los equipos convencionales de sandblasting utilizan un compresor que trabajan a presión constante y generalmente no superan los 120 [psi]. Ya que se plantea el

desarrollo de este proyecto con un tanque que se presuriza a 3000 [psi] se escogió una válvula que permitiera regular esta presión para que el sistema pudiera trabajar con las especificaciones de operación planteadas para el proyecto.

Se seleccionó una válvula de regulación de aire de alta presión que permitió solventar este problema.

Figura 24. Regulador Víctor para aire comprimido.



Fuente: EXTINSOL, catálogos

Características:

- Regula presión desde los 4500 [psi]
- Rango de salida de 0 – 200 [psi]
- Dos manómetros que permiten ver la presión de entrada y de salida del sistema.

6.7 ACCESORIOS

Los elementos restantes que necesita el prototipo se mencionan a continuación:

- Manguera de aire caucho-lona que soporta 200 [psi]. Se seleccionó este tipo de manguera para el transporte de aire del sistema por su gran resistencia a la presión y por su flexibilidad en el trabajo.

RECOMENDACIONES:

Diámetro interno de la manguera debe ser de tres a cuatro veces el tamaño del orificio de la boquilla⁹.

- Racores convencionales: Utilizados para realizar el ensamblado entre el tanque de arena y la cámara de mezcla al acoplarlos con la manguera que transporta el abrasivo. Se usaron racores de 1/4" NPT convencionales de bronce.

Figura 25. Racores rosca macho y hembra, cuplas, tapones en acero y bronce.



Fuente: BEMAR. Disponible de Internet: <http://www.bemar.com.ar>

⁹ CLEMCO. Catálogo de productos [online]. [Madrid: España]. Clemco International. [citado 12 Ene. 2015]. Disponible de internet: <<http://www.clemcoindustries.com/images/pdfs/21986.pdf>>

- Racores de acople fácil: Utilizados en el ensamble de la cámara de mezcla con el tanque de arena y el tanque de suministro de aire. Se decidió escoger este tipo de racor ya que se puede desmontar fácilmente, lo cual permite al usuario transportarlo de una manera más cómoda y sin el riesgo de daños para estos elementos, además, facilita el mantenimiento del prototipo. Se usan racores de 1/2" con pitorra.

Figura 26. Acoples rápidos



Fuente: BEMAR. Disponible de Internet: <http://www.bemar.com.ar>

7. SIMULACIÓN

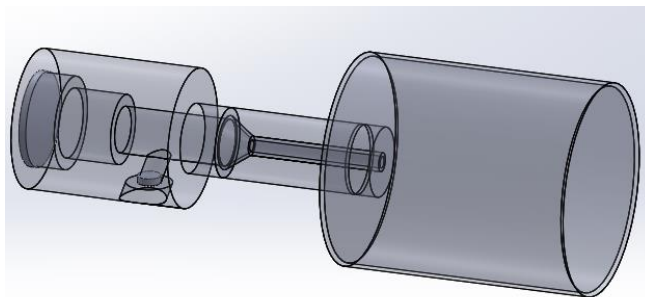
En este capítulo se introduce al lector a la etapa de simulación básica realizada para el desarrollo del proyecto. Esta etapa se centró especialmente en el estudio del comportamiento de aire y abrasivo en la cámara de mezclado, ya que es allí donde el dispositivo va a realizar la impulsión de las partículas por medio de la boquilla de tungsteno. La simulación se llevó a cabo en el software SolidWorks, el cual posee la librería para trabajar con fluidos gaseosos y material particulado.

Durante el proceso de diseño se decidió realizar diferentes simulaciones para determinar el comportamiento del sistema que creó, con el fin de lograr un acercamiento a un diseño final que permitiera realizar las pruebas operacionales del prototipo.

A continuación se detalla el cómo se realizó la simulación por medio de SolidWorks:

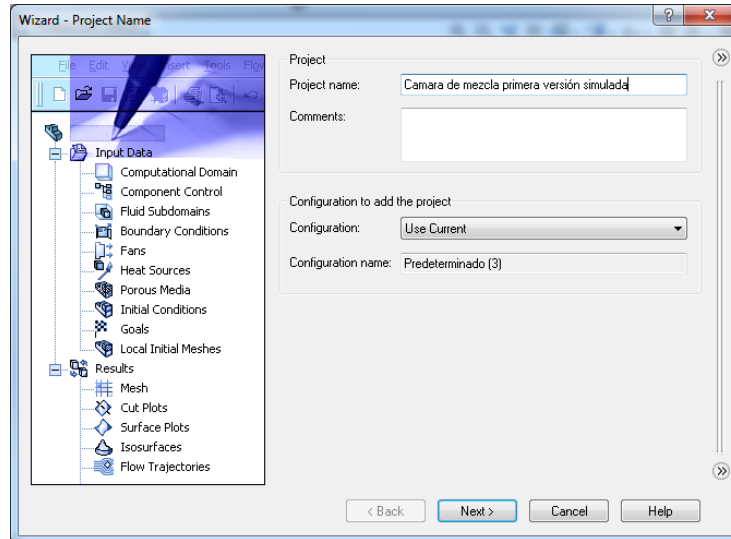
- Después de definir los elementos a los cuales se hizo la simulación, para este caso la cámara de mezcla, se procedió a sellar las salidas del sistema. Esto se puede hacer manualmente o por medio del gestor de simulación.

Figura 27. Cámara de mezcla primera versión simulada



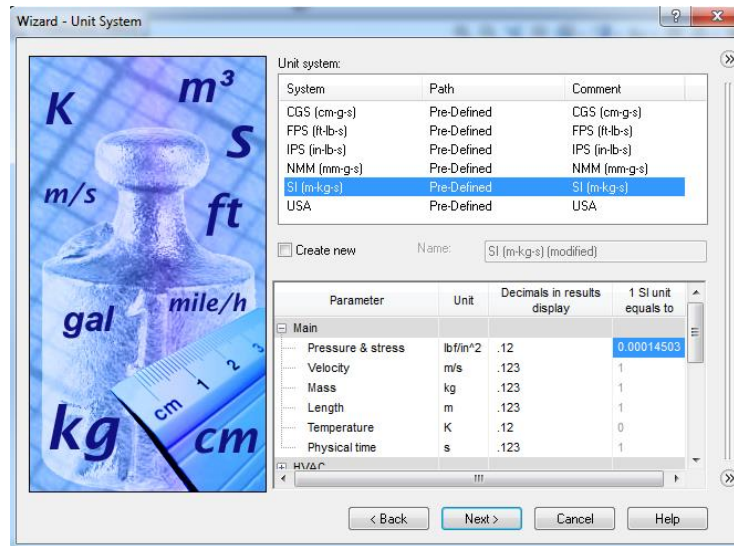
- Se procedió a continuación al gestor de simulación y por medio del wizard se controlaron las variables de entrada y salida del sistema.

Figura 28. Wizard del gestor de simulación: Creación de proyecto.



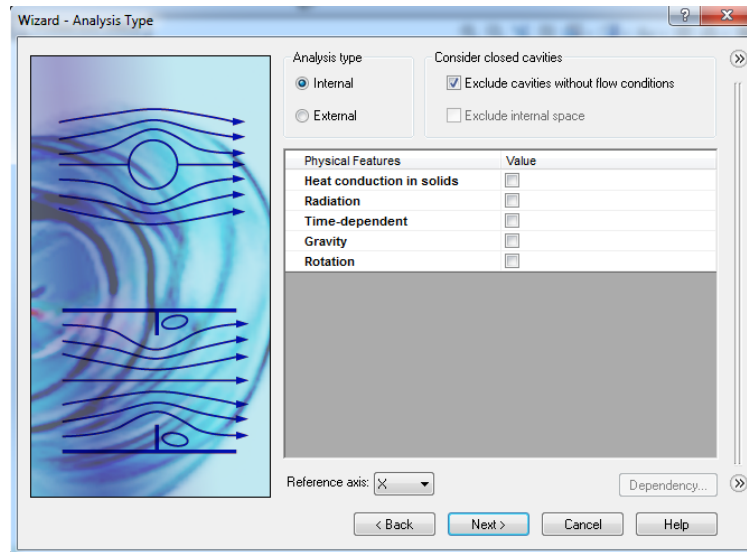
- A continuación se definieron las unidades con las que el sistema va a simular.

Figura 29. Wizard del gestor de simulación: Sistema de unidades.



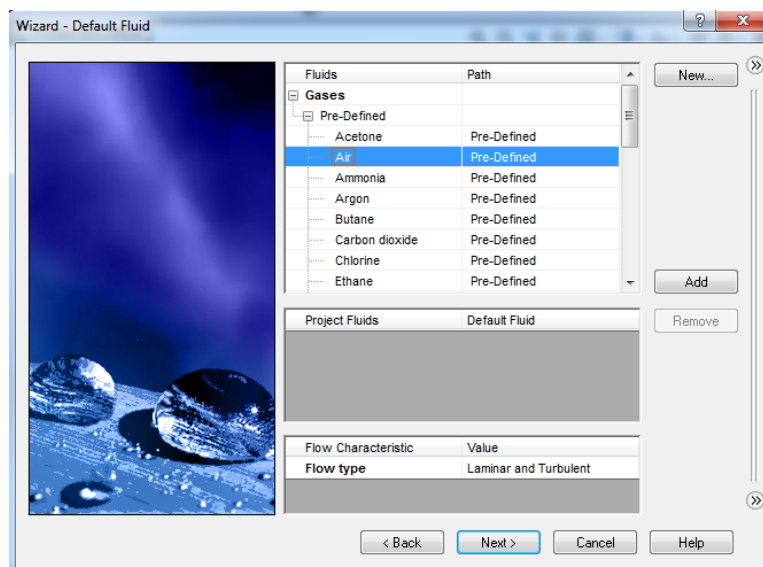
- Se definió el tipo de análisis que se requiere hacer, para este caso, interno.

Figura 30. Wizard del gestor de simulación: Tipo de análisis.



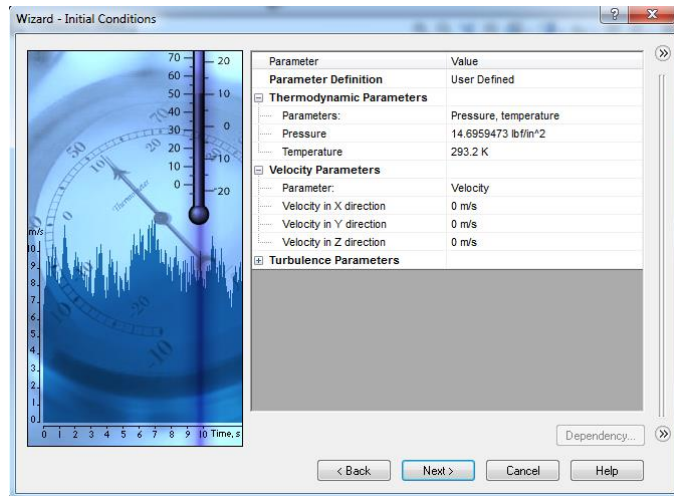
- Ahora, se escogió el fluido con el cual se va a simular el dispositivo, en esta ocasión, aire.

Figura 31. Wizard del gestor de simulación: Tipo de fluido.



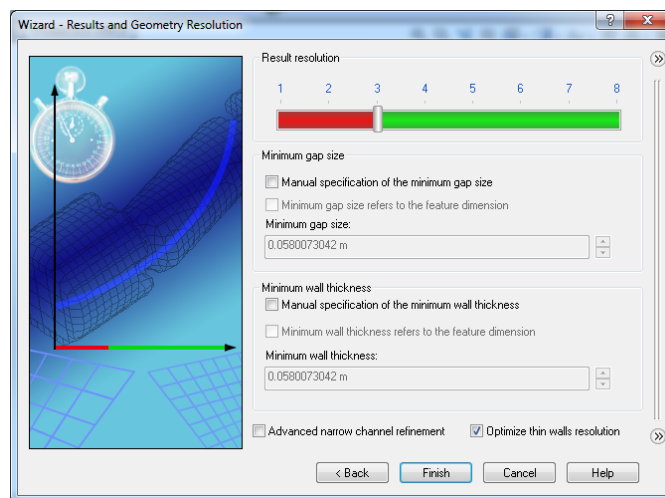
- Se insertaron las condiciones iniciales de la simulación, definiendo parámetros de presión y velocidad.

Figura 32. Wizard del gestor de simulación: Condiciones iniciales de simulación.



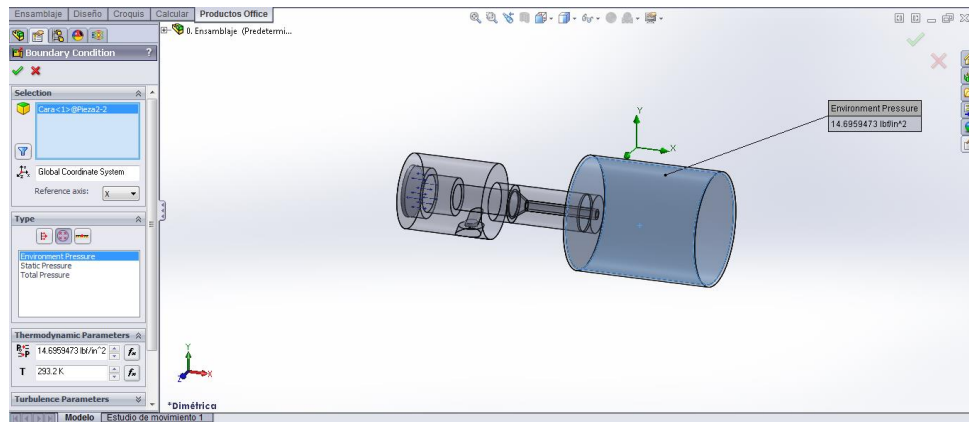
- Finalmente, se escogió la malla y la resolución de la simulación, la cual puede ser definida manual o automáticamente.

Figura 33. Wizard del gestor de simulación: Malla y resolución



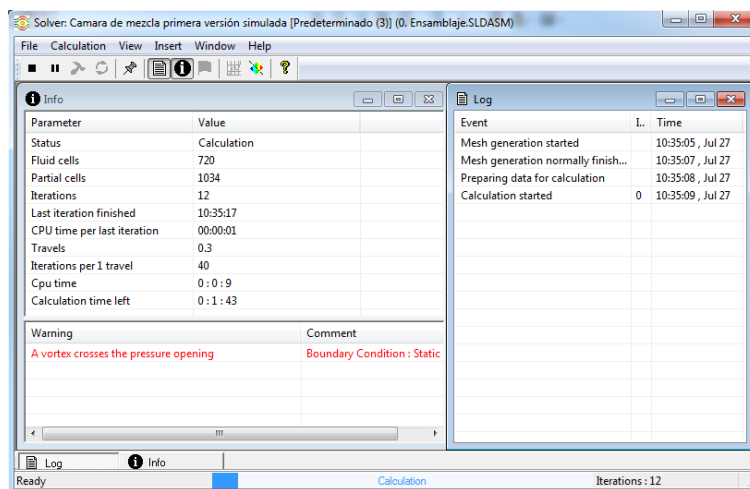
- El resultado obtenido a partir de este gestor se muestra en la siguiente imagen, donde se definieron las condiciones de frontera sobre las tapas o sellos de la recámara.

Figura 34. Condiciones de frontera de la simulación.



Para finalizar el proceso, se activó la simulación del sistema, donde dependiendo de la complejidad de la configuración de la pieza, el software va a demorar o agilizar el proceso.

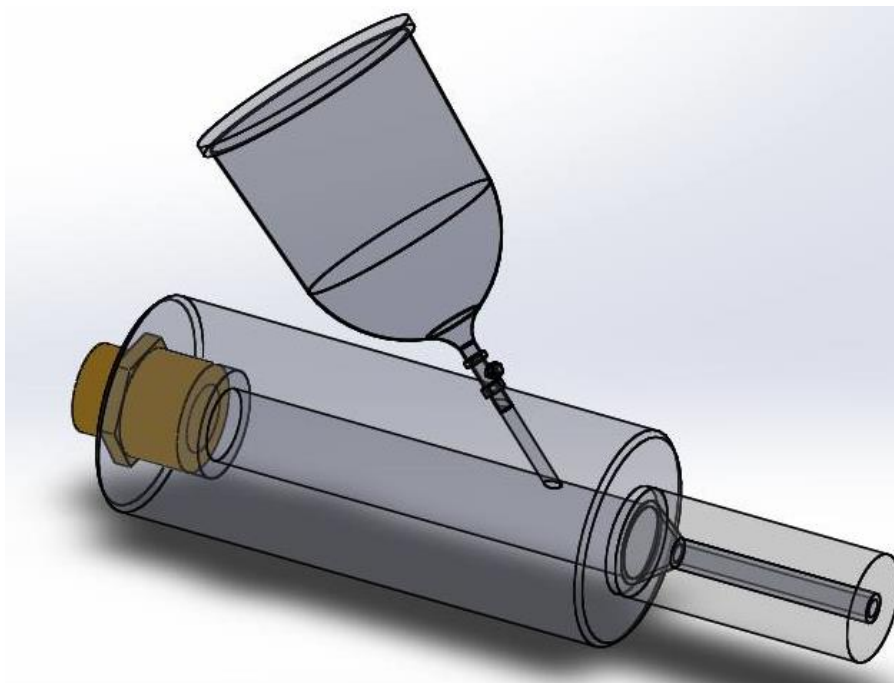
Figura 35. Simulación del sistema en proceso



Se diseñaron diferentes modelos de cámara de mezcla que involucran presión y succión de abrasivo, se simularon siguiendo los pasos anteriormente mencionados y los resultados fueron los siguientes:

7.1 PRIMER MODELO: Presión por gravedad.

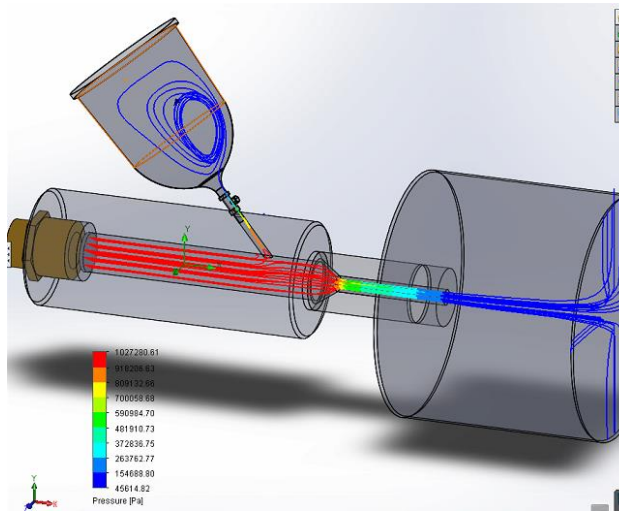
Figura 36. Primer modelo: Presión por gravedad.



El primer acercamiento de diseño que se realizó, fue el de ubicar el tanque de arena en la parte superior de la cámara de mezcla dejando que el abrasivo caiga por acción de gravedad. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- En la figura 37 se evidencia que el comportamiento del aire es el esperado, ingresa a la cámara de mezcla y sale a una presión muy baja debido al cambio de sección, lo cual se traduce a velocidades elevadas.

Figura 37. Primer modelo: Comportamiento del aire.



- Infortunadamente, cuando se agregó el abrasivo al sistema, la simulación arrojó un resultado desfavorable ya que no hubo arrastre de partículas, se mantuvieron en un estado de suspensión debido la presurización elevada del tanque de arena, ver figura 38.

Figura 38. Primer modelo: Comportamiento del abrasivo.

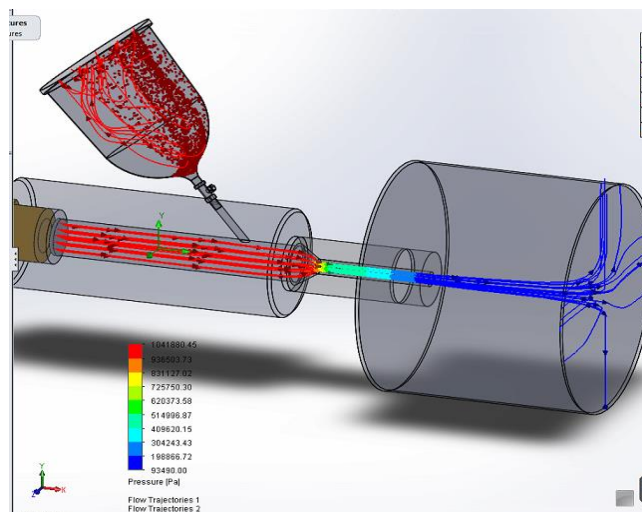
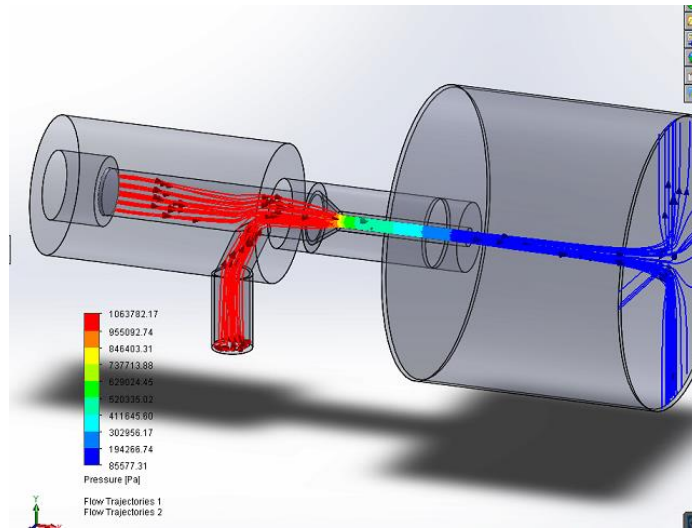
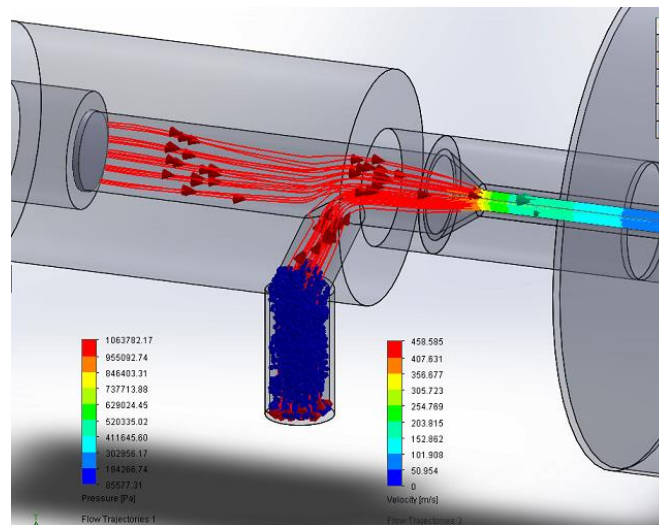


Figura 40. Segundo modelo: Comportamiento del fluido.



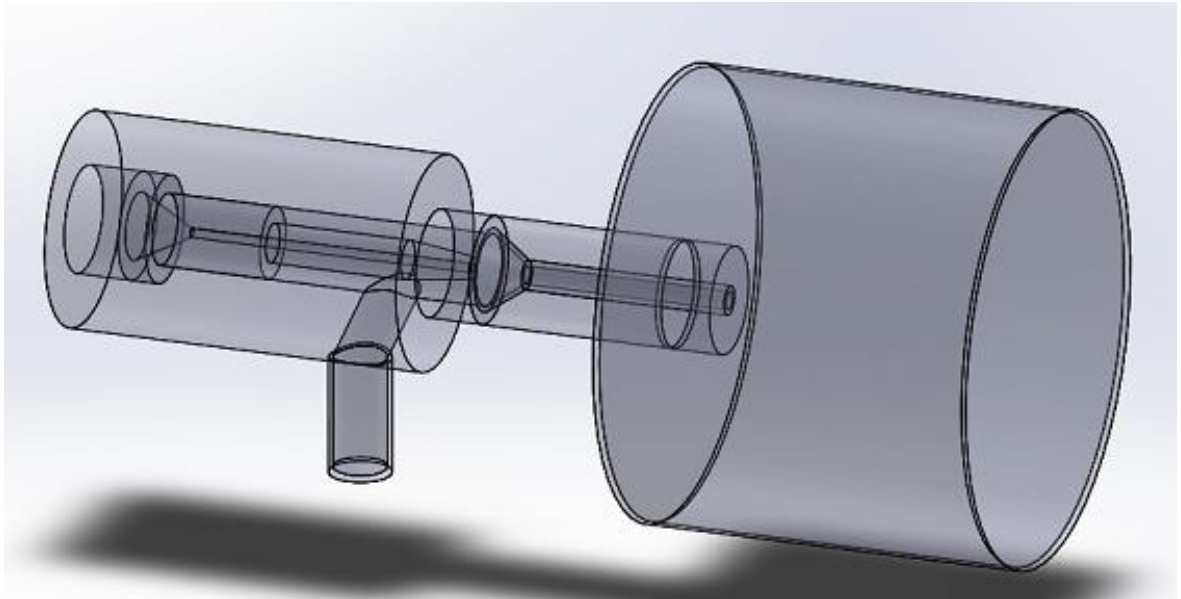
- Al anexar el estudio de partículas en la simulación, ver figura 41, se evidenció que el sistema no es capaz de realizar el transporte del abrasivo, las partículas quedaron en estado suspensión a la entrada de la cámara de mezcla debido a la alta presión que se maneja.

Figura 41. Segundo modelo: Comportamiento del abrasivo.



7.3 TERCER MODELO: Succión con boquilla venturi.

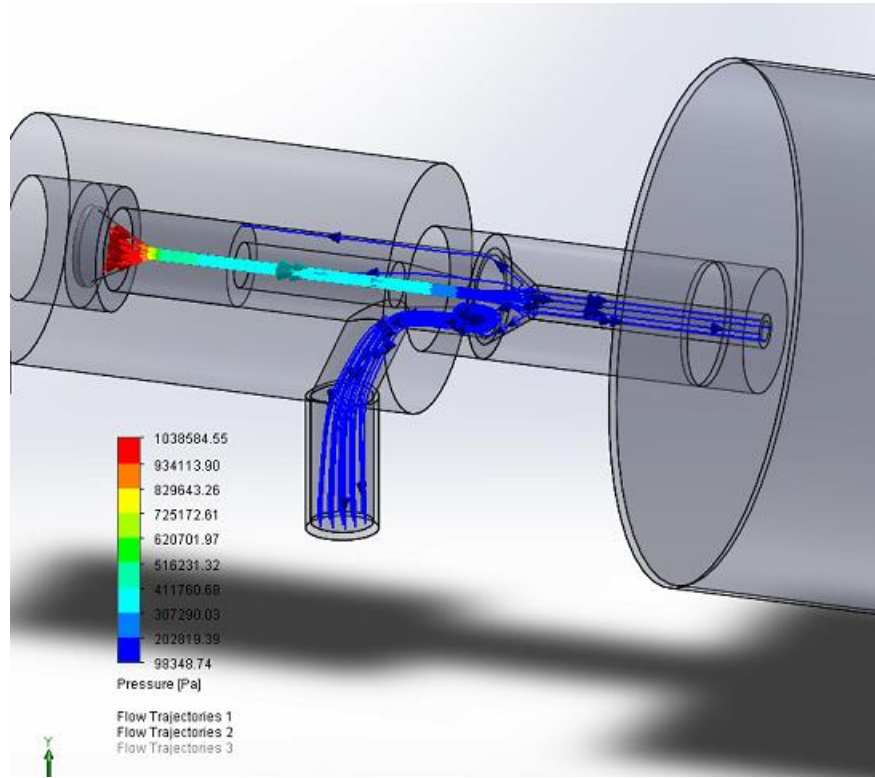
Figura 42. Tercer modelo: Succión con boquilla venturi.



El tercer modelo, mostrado en la figura 42, al igual que el modelo anterior, es una cámara de mezcla con el tanque de arena ubicado en la parte inferior de este elemento, se acopla una boquilla tipo Venturi dentro de la cámara para que la succión generada en el sistema sea más fuerte.

- Los resultados obtenidos en la simulación mostraron que no se lleva a cabo la succión debido a que el fluido viene a gran presión y choca contra las paredes convergentes a la entrada de la boquilla. Esto se debe a la rápida expansión del aire y a la alta presión manejada en el sistema. Ver figura 43.

Figura 43. Tercer modelo: Comportamiento del fluido.



Con base a los resultados obtenidos a partir de esta etapa de simulación básica, se decidió diseñar un prototipo híbrido entre succión y presión para el dispositivo, donde se presurice el tanque de arena y a la vez se genere en la cámara de mezcla un efecto de succión debido un gran cambio de sección antes de la boquilla; se planteó el uso de una boquilla tipo Venturi si la fase de succión no es lo suficientemente fuerte.

Cabe resaltar que esta etapa fue realizada como un acercamiento a un diseño final del dispositivo por medio de la simulación básica del sistema, por lo que los resultados son un aproximado del comportamiento del arrastre neumático de abrasivo en la cámara de mezcla, los cuales fueron comparados y ajustados por medio de pruebas operacionales llevadas a cabo en el proyecto.

8. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE

Una vez definido el diseño total del prototipo se procede a detallar su construcción y ensamble, teniendo como meta principal el correcto ajuste de cada uno de los elementos involucrados en el sistema, para lo que es necesario ser cuidadosos en el maquinado de cada una de las piezas. El proceso de mecanizado del prototipo involucró la cámara de mezcla y el tanque de arena en su totalidad, ya que el resto de elementos fueron seleccionados a partir de catálogo.

Se planeó realizar la construcción y el ensamble del prototipo en la Corporación para la Investigación de la Corrosión, donde el mecanizado se llevó a cabo en el taller de mecánica fina con el que cuenta la empresa.

Figura 44. Taller de Mecánica Fina, C.I.C



La Corporación cuenta con un centro de mecanizado especializado en el desarrollo de piezas de alta precisión. Para lograr este cometido, se dispone de una fresadora CNC de tres ejes con sistema retráctil y control de contorno 3D (Hermle U 630S) y un torno CNC paralelo (WILER E 35).

Figura 45. Fresadora Hermle U 630S



Figura 46. Torno WILER E 35



8.1 CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE MEZCLA

Este elemento se construyó con plástico ingenieril, específicamente Nylon 6 de 1 ½" para poder soportar la presión de trabajo del prototipo. Se buscó que este elemento fuera resistente y sea de fácil maquinado, ya que si era necesario se podría cambiar con facilidad.

La cámara de mezcla tiene una longitud de 67 [mm] y el diámetro interno es de ½". Se buscó una total precisión en el maquinado de este elemento ya que estará unido a otros elementos roscados.

Figura 47. Cámara de mezcla maquinada



A continuación se describe el proceso maquinado realizado en el centro de mecanizado con el que cuenta la C.I.C, para la fabricación de esta pieza:

- Se descentró la barra de Nylon en el torno, y se ajustó para realizar el perforado.

- Se realizó el perorado de la barra, teniendo en cuenta los diferentes diámetros planeados para este elemento.
- Se montó el material en la fresa y se realiza el roscado.

8.2 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE ARENA

El tanque de arena se elaboró con acero SAE AISI 1020. Tiene un diámetro interno de 67 [mm] y una altura total de 150 [mm].

Figura 48. Tanque de arena mecanizado



A continuación se describe el proceso de mecanizado realizado para la fabricación de cada una de las partes que componen en su totalidad el tanque de arena:

Para la base del tanque:

- Se realizó el cilindrado exterior hasta alcanzar el diámetro requerido.
- Se hizo el perforado de la pieza para a continuación seguir con el cilindrado interno.
- Se avellanó la parte cónica interna del tanque.
- Seguido del avellanado, se dio el roscado exterior del tanque.
- Se giró la pieza y se trabaja la conicidad externa.
- Finalmente se hizo el perforado de diámetro menor y se realizó el roscado.

Para la tapa del tanque:

- Se hizo el refrentado de la tapa, y luego se cilindró hasta lograr la longitud y diámetro preestablecidos en los planos.
- Se hizo un escariado de la pieza para dar la forma interna de la tapa.
- Se realizó el roscado interno que ajusta con la base del tanque.
- Se perforaron los agujeros donde se ensambla la válvula de seguridad y el acople rápido y luego se realizaron sus respectivos roscados.

OBSERVACIONES

- Para ayudar en la calibración de las longitudes y diámetros de las piezas maquinadas, se usaron elementos de medición tales como calibrador y micrómetro.
- Todo el desbaste realizado sobre las piezas, fue realizado con herramientas de corte de carburos metálicos.

8.3 ENSAMBLE DE ACCESORIOS

Para el ensamble de los accesorios se planeó realizar un grafado de todos los elementos que van unidos a las mangueras, es decir, la unión racor-manguera, T-manguera, estarán unidos por este proceso. Se escogió este tipo de unión sobre las otras (abrazaderas), debido a que se va a utilizar alta presión en el sistema; infortunadamente la Corporación no cuenta con la maquinaria necesaria para hacerlo, por lo que se contrató el servicio con los expertos en el campo, específicamente la empresa REYCOL ubicada en el centro de la ciudad de Bucaramanga, ver figura 49.

Figura 49. Empresa REYCOL



El resto de uniones son roscadas, así que se utilizó teflón y un buen ajuste en el roscado de estos elementos.

Figura 50. Grafado de accesorios



Figura 51. Roscado y ajuste de accesorios



8.4 ENSAMBLE DE LA VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN AL TANQUE DE AIRE.

Para el ensamble de este elemento en el sistema, se recurrió al uso de un fill station (accesorio utilizado para la recarga del Scuba) ya que el tanque de almacenamiento de aire no permite que se acople directamente a su salida debido a la válvula de yugo que posee. Se realizó el montaje de la válvula reguladora de presión al nuevo elemento por medio de un acople roscado y luego se hizo el ajuste del fill Station al

tanque de aire. Se aseguró que estos elementos tuvieran un buen ajuste ya que la presión con la que se trabajó fue elevada, lo cual conlleva a posibles fugas del sistema y un peligro potencial para el operador del prototipo.

Figura 52. Ensamble de la válvula reductora de presión



8.5 ENSAMBLE FINAL DEL PROTOTIPO

Para finalizar se llevó a cabo el armado total del prototipo juntando cada una de las piezas mencionadas en los ítems anteriores. Se realizó una exhaustiva revisión de cada uno de los elementos que se involucran en el sistema para determinar que no hubiera fugas o algún signo de peligro para así llevar a cabo las pruebas operacionales del prototipo. Se realizó el montaje de los accesorios al tanque de arena y a la cámara de mezcla, y se cerró el circuito con el acople del conjunto de suministro de aire.

Figura 53. Acople de accesorios al conjunto de regulación de presión



El resultado final del ensamble del prototipo se muestra en la figura 54.

Figura 54. Ensamble final del prototipo.



9. PRUEBAS

Este capítulo describe la culminación de este proyecto; la fase de pruebas, la cual permitió verificar el funcionamiento del prototipo, dando certeza y seguridad del diseño y trabajo realizado. Estas pruebas se desarrollaron en la Corporación para la Investigación de la Corrosión.

El capítulo se divide en tres fases, la primera, en la que se realizaron pruebas preliminares con algunos elementos del prototipo, la segunda, donde se acopló en su totalidad el prototipo y se ajustó el sistema para que trabaje correctamente, y la tercera, que muestra la operatividad del prototipo realizando una preparación superficial bajo las condiciones de diseño planteadas para el proyecto.

9.1 PRIMERA FASE: Pruebas Preliminares

Debido a que el prototipo trabaja a presiones elevadas, se planteó la realización de pruebas preliminares que permitieran establecer la seguridad del mismo. Se determinó si el prototipo presentaba fugas, las cuales fueron corregidas; además se revisó el comportamiento del sistema (fluido, abrasivo) utilizando un compresor que suministra una presión máxima de 100 [psi], ver figura 55.

Figura 55. Compresor KTC de 2HP, 100[psi]



Para la realización de estas pruebas se acopló cada uno de los accesorios con la cámara de mezcla, la boquilla y el tanque de arena del sistema. Seguido a esto, se ensambló la entrada de aire del prototipo con la salida del compresor para suministrar la presión. Estas pruebas preliminares se hicieron al aire libre debido a la gran cantidad de polución que se genera. Cabe resaltar que para esta fase no se utilizó la boquilla de Venturi diseñada para el sistema, ver figura 56.

Figura 56. Fase 1: Pruebas preliminares



Los resultados obtenidos en esta prueba fueron los siguientes:

- El prototipo diseñado soportó una presión de al menos 100 [psi].
- No se encontraron fugas en los elementos del prototipo.
- El comportamiento del fluido dentro del sistema fue el esperado, es decir, se evidenció el aumento de velocidad en la salida de la boquilla debido al cambio de sección.

- Se comprobó que el sistema es capaz de transportar el abrasivo y hacer la impulsión sobre una superficie metálica.

Infortunadamente el compresor utilizado para estas pruebas preliminares no mantiene una presión constante, en el instante que se abre la válvula de paso este se descarga y a su vez deja de transportar el abrasivo debido a la pérdida de presión. No obstante, esta fase de pruebas permitió demostrar la funcionalidad del sistema diseñado, ya que se logró llevar a cabo la impulsión de material particulado a una presión de 100 [psi].

9.2 SEGUNDA FASE: Ajuste y acondicionamiento del prototipo.

En esta fase se realizó el montaje total del prototipo, incluyendo el sistema de suministro y regulación de aire planteado para el desarrollo del proyecto; esto con el fin de determinar los ajustes que se debieron realizar para que el sistema funcionara correctamente.

Para el llenado del tanque de suministro de aire, se recurre a un compresor que genera hasta 10000 [psi]; esta labor se realizó en la estación de bomberos de Bucaramanga ya que la Corporación no cuenta con el equipo necesario para llevar a cabo este proceso.

Figura 57. Llenado del tanque de suministro de aire



9.2.1 Prototipo sin boquilla venturi

El primer acercamiento que se realizó en esta fase, es el de ensamblar el equipo sin utilizar la boquilla Venturi del sistema. Los resultados bajo estas condiciones fueron los siguientes:

- El sistema no presentó fugas.
- El tanque de aire suministró adecuadamente el fluido.
- La etapa de regulación de presión funcionó correctamente (de 3000 [psi] a 150 [psi]).
- El comportamiento del fluido en el sistema fue similar al mostrado en las pruebas preliminares.
- No hubo flujo de abrasivo a través de la boquilla.

Figura 58. Segunda fase: Prototipo sin boquilla venturi

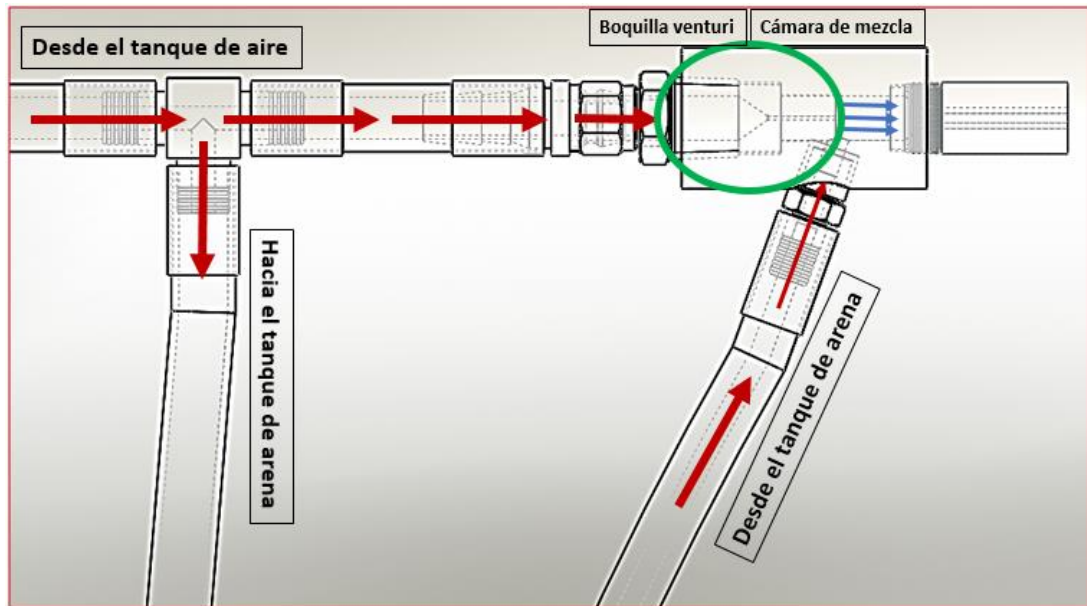


Se determinó entonces que este diseño no es funcional, y se planteó el uso de la boquilla venturi para corregir el problema.

9.2.2 Prototipo con boquilla venturi

Ya que el prototipo no fue operativo sin la boquilla venturi, se planteó el acople de esta pieza al sistema.

Figura 59. Diagrama del prototipo con boquilla venturi



Como se aprecia en la figura anterior, al introducir la boquilla venturi dentro de la cámara de mezcla el diámetro de salida de aire hacia la boquilla disminuye abruptamente, de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{1}{16}$ ", lo cual hace aumentar la presión sobre el tanque de arena y a su vez causa un efecto Venturi en la cámara de mezcla, mayor al generado cuando el dispositivo no cuenta con esta pieza. Los resultados obtenidos bajo estas condiciones fueron los siguientes:

- El sistema no presentó fugas.
- El tanque de aire suministró adecuadamente el fluido.
- La etapa de regulación de presión funcionó correctamente (de 3000 [psi] a 150 [psi]).
- El comportamiento del fluido en el sistema fue similar al mostrado en las pruebas preliminares.
- Hubo transporte de material particulado a través del sistema.

Al comprobar que el prototipo realizó la impulsión de las partículas, se planteó la realización de algunas pruebas para acondicionar la salida de abrasivo regulando su paso a través de la válvula que se encuentra en la parte inferior del tanque de arena.

Figura 60. Segunda fase: Regulación de abrasivo



9.3 TERCERA FASE: Preparación superficial bajo condiciones de diseño.

Al regular el abrasivo y comprobar que el sistema funciona, se procedió con la tercera fase de este capítulo que es la realización de una preparación superficial bajo las condiciones de diseño planteadas para el proyecto.

Condiciones de diseño:

- Área superficial a tratar: Entre 0.1 m²/hora a 0.2 m²/hora.

- Presión máxima de operación: 150 psi
- El diseño estará enfocado en la preparación de una superficie según la norma SSPC-SP5: Limpieza con chorro abrasivo a metal blanco.
- Material abrasivo a utilizar: Arena Sílice.

9.3.1 Descripción de la prueba

Para realizar la prueba de preparación superficial se siguieron los siguientes pasos:

- Se adquirieron probetas de acero AISI 1045 de 15cmX15cmX6mm las cuales fueron pintadas para que fuera posible ver con mayor facilidad el trabajo que se va a realizar.

Figura 61. Tercera fase: Probetas de prueba



- Se ajustó el prototipo para que trabajara a las condiciones de diseño planteadas, donde la presión de operación debe ser de 150 [psi] y el abrasivo es arena sílice, en este caso arena SIKADUR 506, ver anexo C.
- Se realizó el proceso de preparación superficial por medio de chorro abrasivo con el prototipo diseñado. Se apuntó la boquilla directamente sobre la superficie a una distancia aproximada de entre 4 a 8 in.

Figura 62. Tercera fase: Preparación superficial por medio de chorro abrasivo



- Se realizó la limpieza de la superficie para quitar cualquier rastro de impureza que quedara sobre ella (polvo, abrasivo, metal).

Figura 63. Tercera fase: Resultado de la preparación superficial



9.3.2 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos a partir de esta fase de pruebas fueron los siguientes:

- Para realizar la preparación superficial de cada probeta se necesitó de la descarga de 5 tanques de arena de 0.5 [L], es decir 0.5 [Kg] de arena por descarga.

Figura 64. Tercera fase: Preparación superficial obtenida



- La presión utilizada y el tiempo de descarga del prototipo por cada recarga de arena se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Tercera fase: Resultados de presión y tiempo de descarga del prototipo

ITEM	Descarga 1	Descarga 2	Descarga 3	Descarga 4	Descarga 5
TIEMPO	28 s	30 s	26 s	26 s	25 s
PRESIÓN DESCARGADA	110 [psi]	130 [psi]	100 [psi]	95 [psi]	90 [psi]

Por lo tanto el tiempo promedio de descarga de cada tanque de arena de 0.5 [L] fue de aproximadamente 27 [s] con un uso de presión de aproximadamente 105 [psi].

- Ya que se necesitan de 5 descargas de arena para realizar la preparación superficial de cada probeta, se determinó que para preparar un área superficial de 0.1 [m²] se requiere de aproximadamente **2100 [psi]** de aire en el tanque de Scuba, con un tiempo estimado de preparación de 9,33 [min]. Cabe resaltar que el tiempo de llenado del tanque de arena para realizar una nueva descarga es de aproximadamente 1 [min], por lo tanto, el tiempo de preparación superficial de 0.1 [m²] es de **30 [min]** aproximadamente.
- Cuando el tanque llega a una presión de 500 [psi] se notó un cambio drástico en el comportamiento del chorreado de abrasivo (cae la presión). A partir de este punto, el sistema no realizará el trabajo para el cual se pretende.
- Finalmente, se determinó el grado de preparación superficial al cual se logra llegar con el prototipo diseñado. Para esto se realizó la comparación visual con los patrones establecidos por la norma como se menciona en el marco teórico planteado para el proyecto, ver anexo A.

Ya que la probeta trabajada no tenía un alto grado de corrosión, se definió que es una probeta con corrosión Grado A, por lo tanto se requiere comparar el patrón establecido con los resultados obtenidos por medio del prototipo diseñado.

Tabla 11. Patrón establecido por norma para la preparación de superficies

SSPC-Vis 1	SIS 05 59 00
SSPC-SP5	A Sa 3, B Sa 3, C Sa 3 and D Sa 3
SSPC-SP10	A Sa 2½, B Sa 2½, C Sa 2½ and D Sa 2½
SSPC-SP6	B Sa2, C Sa 2 and D Sa 2
SSPC-SP7	B Sa1, C Sa 1 and D Sa 1

Fuente: HMG Paints. Pictorial Surface Preparation Standards for Painting Steel Surfaces. Manchester: 2008

La tabla 11, muestra que el patrón visual que se requiere para determinar si es una preparación superficial SSPC-SP5 o limpieza con chorro abrasivo grado metal blanco debe ser A Sa 3. También se buscó comparar con el patrón A Sa 2 ½ ya que la superficie puede haber quedado con una preparación superficial SSPC-SP10 o limpieza con chorro abrasivo grado metal casi blanco.

Figura 65. Patrón visual establecido por la norma SSPC para una corrosión grado A con una preparación A Sa 3



Figura 66. Patrón visual establecido por la norma SSPC para una corrosión grado A con una preparación A Sa 2 ½



Fuente: HMG Paints. Pictorial Surface Preparation Standards for Painting Steel Surfaces. Manchester: 2008

Figura 67. Resultado final de la preparación superficial



Por lo tanto se determinó que el grado de preparación superficial después del uso del prototipo diseñado llega a ser **SSPC-SP5 o limpieza con chorro abrasivo grado metal blanco** según la norma.

OBSERVACIONES

- Las pruebas fueron realizadas al aire libre debido a la polución generada por el chorreado de abrasivo.
- Estas pruebas fueron realizadas por los autores de este proyecto con la debida orientación de expertos en el área que muy amablemente dedicaron parte de su tiempo para colaborar en el proceso. Por lo tanto la técnica que se utilizó en la preparación superficial puede afectar los resultados, sin embargo, el trabajo fue satisfactorio.

9.3.3 Perfil de anclaje

La inspección de la preparación de superficie consiste en un análisis visual, tanto del grado de limpieza como del perfil de anclaje desarrollado en la superficie por el método utilizado. Al hacer la inspección, generalmente son utilizadas placas estandarizadas de la NACE o de la SSPC, las cuales sirven de testigos comparativos para cada grado de limpieza de superficie. Cuando se trata de limpieza con chorro de arena, resulta muy útil medir el perfil de anclaje, mediante un micrómetro especialmente diseñado para este fin. El perfil de anclaje debe estar entre 1 y 2 milésimas de pulgada de profundidad ([mils])¹⁰.

¹⁰ Inspección de los recubrimientos [online]. (s.l.): (s.f.) [citado 11 Oct. 2014]. Disponible en Internet: <http://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/inspeccion_rec.php>

Teniendo en cuenta esto, se dispuso la superficie tratada con el prototipo diseñado para medir su perfil de anclaje.

Figura 68. Medición del perfil de anclaje



Los medidores del perfil de anclaje se dividen en dos clases; Tipo Cinta y Tipo Aguja (Análogo o Digital) El Medidor Tipo Cinta es un Instrumento para Medición del Perfil de Anclaje durante la preparación de la superficie, antes de aplicar el recubrimiento, por medio de la Cinta de Replica TesTex, en unidades Métrica o Imperial.

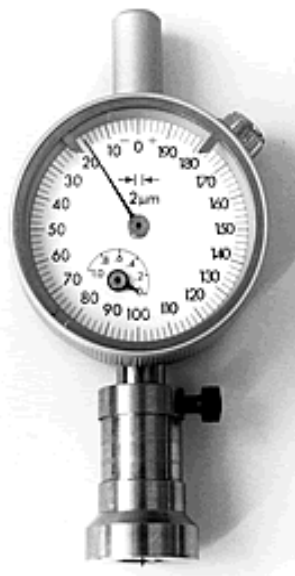
Figura 69. Medidor tipo cinta



Fuente: INDUTESCA. Medidores de perfil de anclaje. Disponible en Internet: <http://www.indutecsa.com/index.php/productos/inspeccion>

El Medidor Tipo Aguja, también se suministra en unidades Métrica o Imperial, permite medir con precisión el perfil de anclaje, también para medir pitting y profundidad de grietas, ver anexo A. El pequeño tamaño de estos equipos hace fácil su transporte y uso.

Figura 70. Medidor de anclaje tipo aguja



Fuente: INDUTESCA. Medidores de perfil de anclaje. Disponible en Internet: <http://www.indutecsa.com/index.php/productos/inspeccion>

La cinta para medición de perfil de anclaje, Cinta de Replica Press-O-Film, fabricada por Testex da a los inspectores e investigadores un método simple para obtener una impresión de la superficie, esta cinta consiste en una lámina plástica recubierta con poliéster con un espesor uniforme, cuando se comprime contra la superficie rugosa la cinta copia una réplica de la superficie y se lleva al medidor de perfil de anclaje, para así determinar este valor.

Los pasos seguidos para medir el perfil de anclaje de la superficie tratada por el método de cintas fue el siguiente:

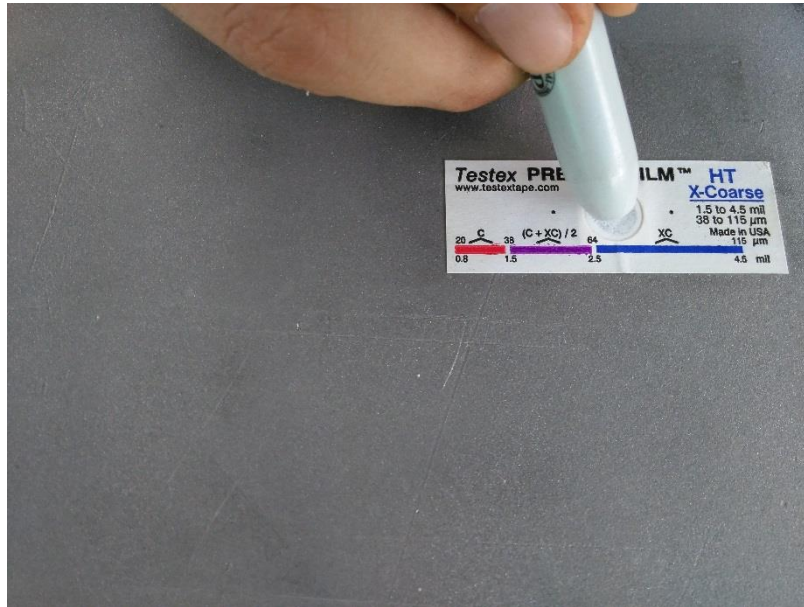
- Pegar la cinta para medición sobre la superficie tratada.

Figura 71. Medición por el método de cintas, paso 1: Pegado



- Raspar sobre la superficie enmarcada para definir el perfil y la rugosidad de la pieza sobre la cinta.

Figura 72. Medición por el método de cintas, paso 2: Raspado



- Retirar la cinta y medir el perfil de anclaje con el micrómetro especializado para este proceso.

Figura 73. Medición por el método de cintas, paso 3: Medición



Infortunadamente el dispositivo utilizado para medir este perfil no se encontraba en funcionamiento en la Corporación, por lo que se dejó la evidencia de la cinta hasta la reparación de dicho objeto.

Ya que no se logró hacer la medición del perfil de anclaje por medio de este método debido a la falla del equipo, se realizó este proceso por medio del método de aguja. Los pasos a seguir para medir el perfil de anclaje de la superficie tratada por este método fue el siguiente:

- Calibrar el micrómetro definiendo el “cero” (0), esto se realiza sobre una superficie plana con rugosidad casi nula (vidrio).

Figura 74. Medición por el método de aguja, paso 1: Ajuste del cero



- Retirar la base de calibración y poner el micrómetro sobre la superficie tratada para determinar su perfil de anclaje. Este proceso se hizo varias veces sobre diferentes secciones del área superficial.

Figura 75. Medición por el método de aguja, paso 2: Toma de medidas sobre la superficie



Los valores obtenidos en esta medición se muestran en la tabla 12:

Tabla 12. Datos medición por el método de aguja

UNIDADES	MEDIDA												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
[μ]	37	29	25	34	42	26	22	41	26	36	21	16	30
[mils]	1.45	1.14	0.98	1.33	1.65	1.02	0.85	1.61	1.02	1.41	0.82	0.62	1.18

Se pudo observar que la mayor parte de los datos se encuentran por encima de 1 [mils], lo cual es aceptable para el prototipo diseñado. Cabe resaltar que para la aplicación de recubrimientos sobre tuberías, el perfil de anclaje debe estar entre los 2 a 4 [mils] (generalmente solicitado en la industria), ver anexo D, por lo cual se debe o se plantea el estudio del comportamiento del prototipo utilizando un abrasivo con un tamaño de grano más grande.

10. PRESUPUESTO

Este capítulo muestra una comparación del presupuesto planteado inicialmente para el desarrollo del proyecto de grado y el presupuesto final ejecutado para lograr el cumplimiento de los objetivos del proyecto. El presupuesto planteado inicialmente se puede visualizar en la tabla 13.

Tabla 13. Presupuesto planteado inicialmente

PRESUPUESTO PLANTEADO INICIALMENTE		
RESPONSABLE	RECURSO NECESARIO	VALOR
ESTUDIANTES	BIBLIOGRAFÍA Y PAPELERÍA	\$ 200.000,00
	TRANSPORTE	\$ 816.000,00
CIC	MATERIALES Y ELEMENTOS MECÁNICOS	\$ 700.000,00
	MAQUINADOS Y ENSABLE	\$ 1.000.000,00
	ELEMENTOS DEL MERCADO	\$ 900.000,00
	ASESORÍA COODIRECTOR DEL PROYECTO	\$ 2.000.000,00
	HONORARIOS (SALARIOS ESTUDIANTES)	\$ 7.200.000,00
UIS	ASESORÍA ING. JORGE ENRIQUE MENÉSES	\$ 2.500.000,00
	SUBTOTAL	\$ 15.316.000,00
	IMPREVISTOS (10%)	\$ 1.531.600,00
	TOTAL	\$ 16.847.600,00

10.1 MATERIALES Y ELEMENTOS MECÁNICOS

La tabla 14 muestra el presupuesto final ejecutado en materiales y elementos mecánicos, se incluyen los materiales utilizados para el mecanizado de los elementos diseñados.

Tabla 14. Presupuesto ejecutado en materiales y elementos mecánicos.

PRESUPUESTO MATERIALES Y ELEMENTOS MECÁNICOS		
RESPONSABLE	RECURSO NECESARIO	VALOR
CIC	Acero 1020	\$ 88.000,00
	Nylon 6	\$ 7.000,00
	Acero 1045	\$ 20.742,00
	Grafado de accesorios	\$ 12.000,00
	TOTAL	\$ 127.742,00

10.2 ACCESORIOS

En la tabla 15 son detallados los costos asumidos por la Corporación para los accesorios seleccionados en el desarrollo del prototipo.

Tabla 15. Presupuesto ejecutado en accesorios

PRESUPUESTO ACCESORIOS		
RESPONSABLE	RECURSO NECESARIO	VALOR
CIC	Racores de acople rápido con pitrorra de ½"	\$ 86.072,00
	Racores de 1/4"	\$ 8.000,00
	T espina de pez ½"	\$ 9.500,00
	Racores de ½"	\$ 10.000,00
	Válvula de globo de ½"	\$ 13.000,00
	Válvula de globo de ¼"	\$ 8.000,00
	Válvula de alivio de ¼", 200 [psi]	\$ 7.000,00
	Filtro neumático	\$ 5.000,00
	Manguera caucho-lona de ½"	\$ 26.000,00

	Manguera caucho-lona de ¼”	\$ 9.000,00
	TOTAL	\$ 181.572,00

10.3 ELEMENTOS DEL MERCADO

En la tabla 16 son detallados los costos asumidos por la Corporación para los elementos seleccionados en el desarrollo del prototipo.

Tabla 16. Presupuesto ejecutado en elementos del mercado

PRESUPUESTO ELEMENTOS DEL MERCADO		
RESPONSABLE	RECURSO NECESARIO	VALOR
CIC	Boquilla de carburo de tungsteno de 1/8”	\$ 194.300,00
	Tanque Scuba de 80 cu ft, 3000 [psi]	\$ 670.000,00
	Regulador de aire comprimido Víctor Cromado	\$ 394.400,00
	Fill Station	\$ 150.000,00
	TOTAL	\$ 1'408.300,00

10.4 COMPARACIÓN DE PRESUPUESTOS

A continuación se muestra una tabla comparando los valores presupuestados inicialmente para el desarrollo del proyecto y el valor final ejecutado de este presupuesto, ver tabla 17.

Tabla 17. Comparación de presupuestos

COMPARACIÓN DE PRESUPUESTOS			
RESPONSABLE	RECURSO NECESARIO	VALOR PLANTEADO	VALOR EJECUTADO
ESTUDIANTES	BIBLIOGRAFÍA Y PAPELERÍA	\$ 200.000,00	\$ 200.000,00
	TRANSPORTE	\$ 816.000,00	\$ 1'600.000,00
CIC	MATERIALES Y ELEMENTOS MECÁNICOS	\$ 700.000,00	\$ 127.742,00
	MAQUINADOS Y ENSABLE	\$ 1.000.000,00	\$ 1'589.872,00
	ELEMENTOS DEL MERCADO	\$ 900.000,00	
	ASESORÍA COODIRECTOR DEL PROYECTO	\$ 2.000.000,00	\$ 2.000.000,00
	HONORARIOS (SALARIOS ESTUDIANTES)	\$ 7.200.000,00	\$ 7.200.000,00
	TOTAL		\$ 12'816.000,00

Como se ve en la tabla anterior, el presupuesto planteado y el ejecutado tienen valores muy cercanos, es decir se realizó una buena gestión de los recursos.

11. CONCLUSIONES

- Con la creación del prototipo funcional, autónomo y no convencional de sandblasting, se generó un nuevo desarrollo tecnológico para la preparación local de superficies. El prototipo brinda una nueva y más práctica alternativa para la preparación local de superficies en zonas donde el acceso se dificulta debido a la complejidad del terreno ya que se puede transportar con facilidad, además, ahorra tiempo y costos en el proceso, ya que la logística que debe ser realizada para su uso no es tan compleja como la de los equipos convencionales.
- Con la adición de un tanque de buceo en el diseño del sistema, se logró crear un prototipo de sandblasting con una fuente de energía potencial que no requiere electricidad para su funcionamiento, lo cual hace que el prototipo sea de fácil transporte y manipulación en zonas donde la topografía del terreno dificulta el proceso.
- Con el diseño de la cámara de mezcla para el prototipo de sandblasting, se logró combinar los principios de succión y presión utilizados en el funcionamiento de los equipos convencionales de chorreado de arena, generando un nuevo sistema híbrido que permite la impulsión de material abrasivo hacia la superficie que se requiera trabajar.
- Con el diseño versátil logrado para el prototipo, debido a la selección de accesorios de acople rápido, se consiguió un sistema fácil de manipular y con muy pocas piezas para realizar mantenimiento.
- Con el desarrollo de este nuevo prototipo para la preparación de superficies por medio de sandblasting, se logró llegar a tratar una superficie metálica hasta metal blanco según la norma SSPC-SP5, con un perfil de anclaje de 1.5 [mils] aproximadamente, aceptable para el abrasivo que se utilizó durante el proceso.

- Con la realización de pruebas de presión a los diferentes componentes y acoples del sistema que compone el prototipo, se evidenció que los requerimientos de diseño planteados para el proyecto fueron alcanzados. Los rangos de presión y movilidad finales del prototipo son los siguientes:
 - Rango de presión del tanque: 25 – 3000 psi
 - Rango de regulación de presión a la salida: 0 – 200 Psi
 - Rango de almacenamiento de abrasivo: 0 – 0.5 litros.

- Se realizó un manual de mantenimiento y operación con el instructivo de montaje, puesta a punto, esquema y cuidado de cada uno de los elementos, recomendaciones y observaciones al momento operar el prototipo.

- El desarrollo de este proyecto de grado en la Corporación para la Investigación de la Corrosión contribuyó en la formación profesional y personal de los autores, fortaleciendo las capacidades técnicas de diseño, trabajo en equipo e interdisciplinario en la construcción de un prototipo autónomo portátil de sandblasting; así como la formación en áreas como inspección de tubería, planteamiento de propuestas tipo investigativo para la detección de defectos internos en poliductos y experiencia en la construcción de estructuras mecánicas para el monitoreo del sistema de protección catódica en tuberías enterradas.

De acuerdo a lo anterior, se cumple con todos los objetivos para la realización del presente trabajo de grado, logrando con esto un aporte innovador a la industria de los recubrimientos y de la preparación superficial.

12. RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

- Se recomienda acudir al manual de operación y mantenimiento creado para el prototipo, antes de hacer uso del mismo.
- Se recomienda que el uso del prototipo sea realizado por personas expertas en el área de preparación superficial y recubrimientos con los debidos elementos de protección exigidos por la norma.
- Se recomienda aumentar la capacidad de almacenamiento de aire con un tanque Scuba de fibra de carbono de menor peso ya que por cuestiones de presupuesto no se pudo llevar a cabo en este proyecto; esto con el fin de aumentar el tiempo de duración total del proceso.
- Ya que el objetivo del proyecto fue realizar un prototipo que pudiera ser transportado con facilidad, se diseñaron los elementos que componen el sistema lo más pequeños posibles, especialmente el tanque de arena, por lo que se recomienda para una siguiente fase de desarrollo del proyecto, evaluar el comportamiento del sistema aumentando el tamaño de dicho elemento, ya que en las pruebas realizadas se evidenció que este tanque hace su descarga en un tiempo muy corto.
- Debido a los requerimientos de aire y arena que exige el sistema, se seleccionó un abrasivo que pudiera llevar a cabo el proceso de preparación superficial sin afectar el flujo del prototipo, y ya que la boquilla tiene un diámetro tan bajo, el abrasivo debe tener una granulometría baja para que esta no se tapone. No obstante se recomienda el estudio del comportamiento del sistema utilizando otro abrasivo con mayor granulometría para determinar si la superficie queda en mejor

estado, midiendo el perfil de anclaje generado y comparándolo con el ya obtenido por medio de este proyecto.

- Para finalizar, se reitera que los consejos planteados en este apartado son recomendaciones GENERALES, y que siempre que sea posible, se deben atender las recomendaciones específicas generadas por los fabricantes de cada uno de los elementos que componen el prototipo, especialmente con el tanque de buceo ya que la presión que maneja puede ser peligrosa en caso de un accidente.

BIBLIOGRAFÍA

ASME BOILER & PRESSURE VESSEL CODE. Rules for Construction of Pressure Vessels. ASME Section VIII, Division 1. New York: ASME International, 2004.

CLEMCO INTERNATIONAL. Catálogo General. [online]. Clemco International. [Madrid: España] Clemco International, 2012 [citado 20 Nov. 2014] Disponible de internet: <http://www.clemco.es/wp-content/uploads/2012/09/Catalogo-General-Clemco-2012.pdf>

CHIPAXA [online]. [México]. CHIPAXA, [citado 24 Ene. 2015]. Disponible de internet: [http://www.chipaxa.com/paginas/TablaRendimientoBoquilla.htm#Tabla comparativa del desempeño de la boquilla](http://www.chipaxa.com/paginas/TablaRendimientoBoquilla.htm#Tabla%20comparativa%20del%20desempe%C3%B1o%20de%20la%20boquilla)

FORERO FLORIAN, Daniel Eduardo. Diseño de un cuarto de granallado y sandblasting para la empresa industrial TK ASME API INGENIERÍA EU. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2013. p. 22-176.

G. E, Klinzing, R. D, Marcus and F. Rizk. Pneumatic Conveying of Solids: A theoretical and practical approach. 2 ed. England, London: Chapman & Hall, 1997. 618 p.

HMG, Paints. Pictorial Surface Preparation Standards for Painting Steel Surfaces. Manchester: 2008.

LOZADA CERNA, Jaime Armando, PRECIADO GÓMEZ, Darwin Leonardo. Construcción de una cabina para limpieza superficial de probetas de soldadura

mediante chorro de arena. Trabajo de Grado Tecnólogo en Mantenimiento Industrial. Quito: Escuela de Formación de Tecnólogos, 2008. 116 p.

SAJMOLÓ RUIZ, Jackeline Jeannette. Uso de la escoria de mata de níquel como material abrasivo en el proceso de limpieza por el método de Sandblasting, para estructuras metálicas. Trabajo de grado Ingeniera Civil. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2012. p. 1-123.

SIKA. Preparación de Superficies Metálicas. Bogotá: Sika Colombia, 2008.

THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATINGS. White Metal Blast Cleaning. SSPC-SP5. Pittsburgh: NACE International, 2006.

THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATINGS. Guide and Reference Photographs for Steel Surfaces Prepared by Dry Abrasive. SSPC-VIS1. Pittsburgh: NACE International, 2006.

UNITED STATES PATENT. Portable Sandblasting Device. Inventor: GLENSER, NORBERT P., MINN, BIRD ISLAND. Int. CL. 51-8. Fecha de solicitud: 17, Marzo, 1961. Estados Unidos, U.S Patent 3,032,929, 8, mayo, 1962.

W. MOMBBER, Andreas. Hydroblasting and coating of Steel structures [online]. [England]. Elsevier, 2003. Disponible de internet: <[http://books.google.es/books?id=NxUorxNOqzsC&printsec=frontcover&dq=Hydro blasting+and+Coating+of+Steel+Structures&hl=es&sa=X&ei=eIA1VNGZOtCONtaNguAE&ved=0CCIQ6AEwAA#v=onepage&q=Hydroblasting%20and%20Coating%20of%20Steel%20Structures&f=false](http://books.google.es/books?id=NxUorxNOqzsC&printsec=frontcover&dq=Hydro+blasting+and+Coating+of+Steel+Structures&hl=es&sa=X&ei=eIA1VNGZOtCONtaNguAE&ved=0CCIQ6AEwAA#v=onepage&q=Hydroblasting%20and%20Coating%20of%20Steel%20Structures&f=false)>.

ANEXOS

Anexo A. Fundamento teórico

En el presente anexo se exponen los diferentes aspectos teóricos en los que se ha basado esta investigación y desarrollo del proyecto. Por un lado se presentan los aspectos teóricos del problema final a tratar que es la corrosión sobre una superficie; de la misma forma se exponen las normas que rigen el tratamiento de este tipo de problemas y los equipos que se utilizan para solventarlos.

1. CORROSIÓN

Definida como el deterioro que sufre una sustancia (usualmente un metal) o sus propiedades debido a una reacción con el medio ambiente en cual se encuentra. La mayoría de los metales se encuentran en estado natural formando parte de minerales, ya sea como óxido o metales puros.

El fenómeno de corrosión puede ser definido también como el deterioro de los materiales, a causa de alguna reacción con el medio ambiente en que son usados. En la corrosión no siempre involucra un cambio de peso o deterioro visible en su geometría, ya que muchas formas de corrosión se manifiestan por un cambio de las propiedades de los materiales, disminuyendo su resistencia.

El caso de las aleaciones metálicas particularmente la del acero, la corrosión se debe detallar con más precisión basándose en la estructura atómica del material. En este caso el átomo está formado por un equilibrio de cargas positivas llamadas protones y de cargas negativas llamadas electrones, los materiales tienden a perder electrones o en otras palabras cierta energía, formando un ion positivo, lo cual implica una pérdida de masa.

Esto sucede normalmente cuando un metal está en contacto con un electrolito (medio conductor de corriente), dando lugar a reacciones electroquímicas de

oxidación y reducción. Se dice entonces, que ha comenzado un proceso de corrosión en medio húmedo con una circulación simultánea de corriente eléctrica, normalmente denominada pila galvánica.

1.1 NATURALEZA ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN.

La mayoría de los problemas de corrosión que ocurren en la industria son debidos a la presencia de agua, en grandes o pequeñas cantidades, por lo tanto la corrosión en presencia de agua es un proceso electroquímico, lo cual quiere decir que hay flujo de corriente eléctrica y para que esto fluya tiene que existir una fuerza impulsora, la cual actúa como una fuente potencial y con esto se completa el circuito eléctrico.

La magnitud de esta fuerza impulsora generada por el metal cuando está en contacto con una solución acuosa es conocida como potencial del metal. Este valor se relaciona con la energía que se libera cuando el metal se corroe.

1.1.1 Circuito eléctrico de la corrosión. En conjunto con la fuente de voltaje debe existir un circuito completo; este consiste en tres partes:

1.1.1.1 Ánodo: Es aquella porción de la superficie del metal que se está corroyendo. Es el lugar donde el metal se disuelve y pasa a la solución; esto ocurre debido a que los átomos metálicos pierden electrones y pasan a la solución como iones.

Los átomos contienen la misma cantidad de protones y electrones y al ocurrir una pérdida de electrones ocurre un exceso de carga positiva lo que resulta en un ion positivo.

1.1.1.2 Cátodo. Es la superficie metálica que no se disuelve, es el sitio de otra reacción química necesaria para que ocurra el proceso de corrosión. Los electrones

que se liberan del metal en el ánodo viajan hasta la zona catódica en donde se consumen por la reacción de un agente oxidante presente en el agua. El consumo de electrones se llama reacción de reducción.

1.1.1.3 Electrolito. Para que se complete el circuito eléctrico en la superficie metálica, tanto el cátodo como el ánodo deben estar cubiertas por una solución conductora de electricidad, es decir de electrolito. El electrolito conduce la corriente del ánodo al cátodo, completando el circuito.

La combinación de estos tres componentes es conocido como celda de corrosión.

1.1.2 PH. La velocidad de corrosión del acero aumenta a medida que disminuye el pH, entonces cuando el nivel de pH es muy bajo suele ser muy corrosivo. La velocidad de corrosión está influenciada por el nivel de pH del electrolito.

Al aumentar la concentración del ion hidrógeno es más ácida la solución y es menor el valor de pH. La magnitud de pH indica la intensidad de acidez o alcalinidad del medio. Esta magnitud se indica por medio de una escala en la cual el número siete indica que la solución con pH es neutra; los números menores de siete indican que es una solución ácida y los mayores una solución alcalina o básica.

1.1.3 Gases disueltos. El oxígeno, dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico disuelto en agua aumenta la corrosión, por lo tanto, los gases son otra de las principales causas de los problemas de corrosión.

1.2 TIPOS DE CORROSIÓN.

Los tipos de corrosión se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.2.1 General o Uniforme. Es aquella corrosión que se produce con el adelgazamiento uniforme producto de la pérdida regular del metal superficial. Esta clase de corrosión se subdivide en otras:

1.2.1.1 Atmosférica. La corrosión Atmosférica es la que produce mayor cantidad de daños en el material y en mayor proporción. Grandes cantidades de metal de automóviles, puentes o edificios están expuestas a la atmósfera, por lo cual se ven afectados por la presencia de oxígeno y agua. Este tipo de corrosión se hace más crítico cuando se encuentra en presencia de un ambiente salino, compuestos de sulfuro y otros contaminantes atmosféricos.

Para hablar de esta clase de corrosión es mejor dividirla según ambientes. Los ambientes atmosféricos son los siguientes:

- a. Ambientes industriales:** Son los que contienen compuestos sulfurosos, nitrosos y otros agentes ácidos que aceleran la corrosión de los metales. En adición, los ambientes industriales contienen una gran cantidad de partículas aerotransportadas, lo que produce un aumento en la corrosión.
- b. Ambientes marinos:** Esta clase de ambientes se caracterizan por la presencia de cloruro de sodio (sal) que favorece la corrosión de muchos sistemas metálicos.
- c. Ambientes rurales:** En estos ambientes se produce la menor clase de corrosión atmosférica, se caracterizada por bajos niveles de compuestos ácidos y otras especies agresivas.

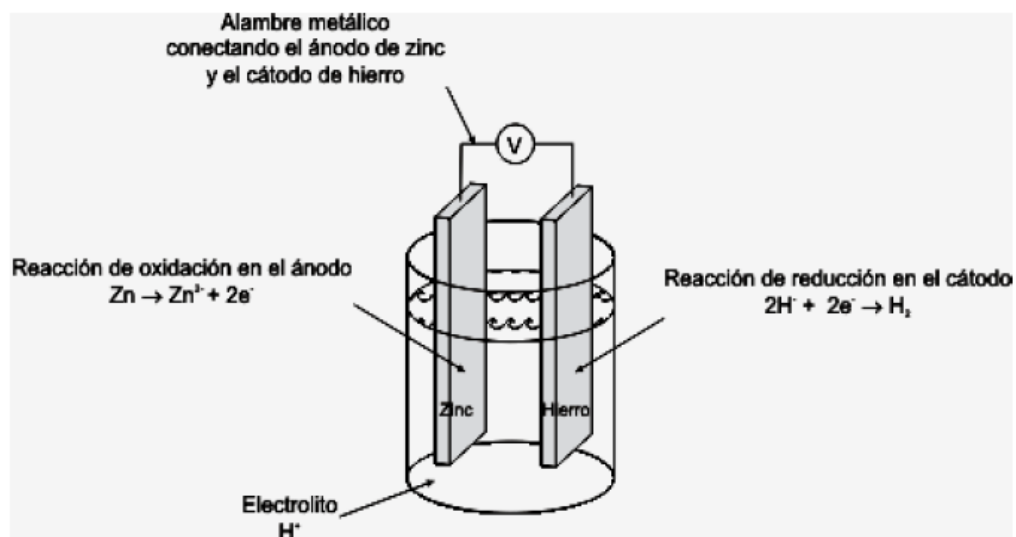
Existen factores que influyen la corrosión atmosférica. Estos son la presión, temperatura, la presencia de contaminantes en el ambiente y la humedad.

- a. Temperatura:** La velocidad de corrosión aumenta con la temperatura. Al igual que las reacciones químicas.
- b. Presión:** La presión afecta la velocidad de las reacciones químicas en la que participan gases. Un claro ejemplo de esto, es la velocidad con que se oxidan los

metales en lugares a nivel del mar en donde la presión es de 14.7 PSI. En cambio en la región sierra en donde se tiene una presión promedio de 10 PSI se corroen con una menor velocidad.

1.2.2 Corrosión galvánica. La corrosión Galvánica es una de las más comunes que se pueden encontrar. Es una forma de corrosión acelerada debido a que dos materiales de diferente potencial se unen eléctricamente en presencia de un electrolito, por ejemplo, una solución conductiva.

Figura 76. Diagrama básico de una corrosión galvánica.



Fuente: http://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/tipos_corrosion.php

El ataque galvánico puede ser uniforme o localizado, en la unión entre aleaciones, dependiendo de las condiciones.

Esta forma de corrosión es la que producen las Celdas Galvánicas. Mientras la reacción de oxidación del ánodo se va produciendo, se van desprendiendo electrones de la superficie del metal que actúa como el polo negativo de la pila (el ánodo) y así se va produciendo el desprendimiento paulatino de material desde la

superficie del metal. Este caso ilustra la corrosión en una de sus formas más simples.

1.2.3 Corrosión electroquímica. Al sumergir un metal en un electrolito ocurren dos tipos básicos de corrosión electroquímica, el primero de ellos en forma natural debido a la polarización de los metales, ejemplo entre el hierro y el cobre se corroe el hierro debido a que el cobre es más catódico (tiene mayor potencial) que el hierro, el segundo por un medio artificial que se conoce frecuentemente como electrólisis.

Electrólisis o llamada también corriente de corrosión dispersa, es el resultado de una descarga de corriente eléctrica directa en el suelo o en el agua por conductores eléctricos o por instalaciones de protección catódica. Estas corrientes son recolectadas desde el electrolito por una área de la estructura metálica que no es una parte del conductor eléctrico o del sistema eléctrico de protección catódica, y se descarga sobre otra porción de la estructura, ocurre corrosión electroquímica en el área de la descarga y un grado de protección catódica resulta en el área recolectora de la estructura.

Esta corrosión, de un metal en el suelo o en agua, de naturaleza electroquímica, es el tipo más común y una de las formas de combatirla es la protección catódica.

1.2.4 Corrosión en altas temperaturas. Algunos metales expuestos a gases oxidantes en condiciones de altas temperaturas, pueden reaccionar directamente con ellos sin la necesaria presencia de un electrolito. Este tipo de corrosión es conocida como Empañamiento, Escamamiento o Corrosión por Altas Temperaturas.

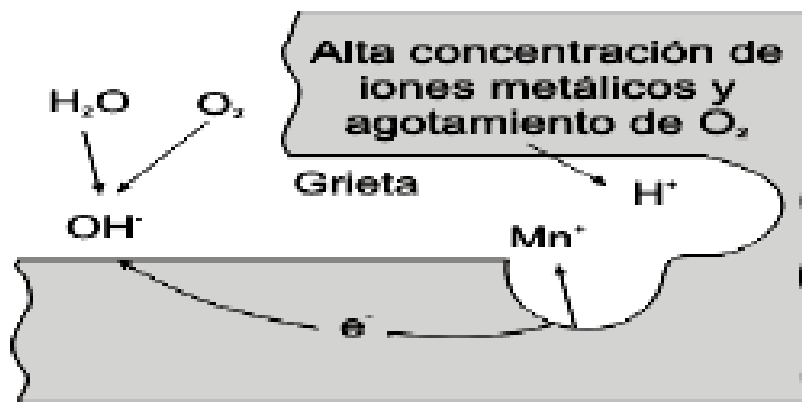
Generalmente esta clase de corrosión depende directamente de la temperatura.

Actúa de la siguiente manera: al estar expuesto el metal al gas oxidante, se forma una pequeña capa sobre el metal, producto de la combinación entre el metal y el gas en esas condiciones de temperatura. Esta capa o “empañamiento” actúa como

un electrolito “sólido”, el que permite que se produzca la corrosión de la pieza metálica mediante el movimiento iónico en la superficie.

1.2.5 Corrosión localizada. La corrosión localizada es aquella que se produce en pequeñas cavidades o huecos formados por el contacto entre una pieza de metal igual o diferente a la primera, o más comúnmente con un elemento no-metálico. En las fisuras de ambos metales, que también pueden ser espacios en la forma del objeto, se deposita la solución que facilita la corrosión de la pieza. Se dice, en estos casos, que es una corrosión con ánodo estancado, ya que esa solución, a menos que sea removida, nunca podrá salir de la fisura. Además, esta cavidad se puede generar de forma natural producto de la interacción iónica entre las partes que constituyen la pieza.

Figura 77. Diagrama básico de una Corrosión por Fisuras o “Crevice”.



Fuente: <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/tiposdecorrosion>

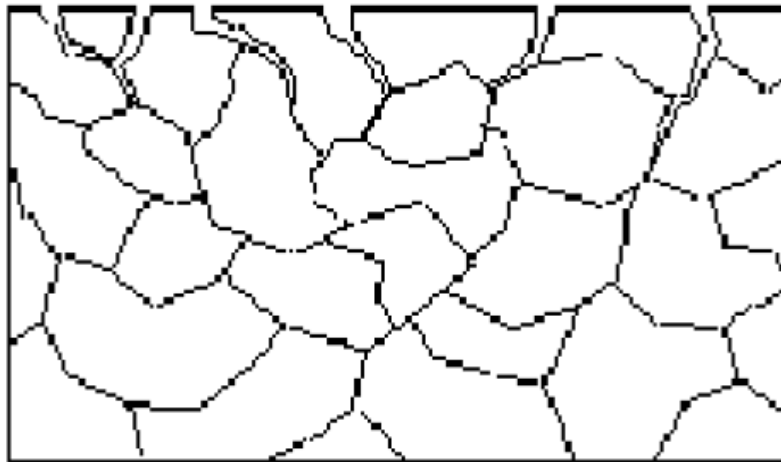
1.2.6 Corrosión puntual “Pitting”. Se produce en zonas de baja corrosión generalizada y el proceso (reacción) anódico produce unas pequeñas “picaduras” en el cuerpo. Puede observarse generalmente en superficies con poca o casi nula corrosión generalizada. Ocurre como un proceso de disolución anódica local donde

la pérdida de metal es acelerada por la presencia de un ánodo pequeño y un cátodo mucho mayor.

1.2.7 Corrosión Inter-granular. Es un ataque localizado en zonas adyacentes a los límites de grano con poco ataque de los granos¹, la naturaleza reactiva de los límites de grano de los metales poli-cristalinos es lo que origina la corrosión Inter-granular, teniendo bastante influencia las altas temperaturas.

La corrosión Inter-granular se produce debido a la concentración de impurezas en los límites de grano. Es común obtener corrosión Inter-granular en soldaduras de acero inoxidable que no se realizan adecuadamente.

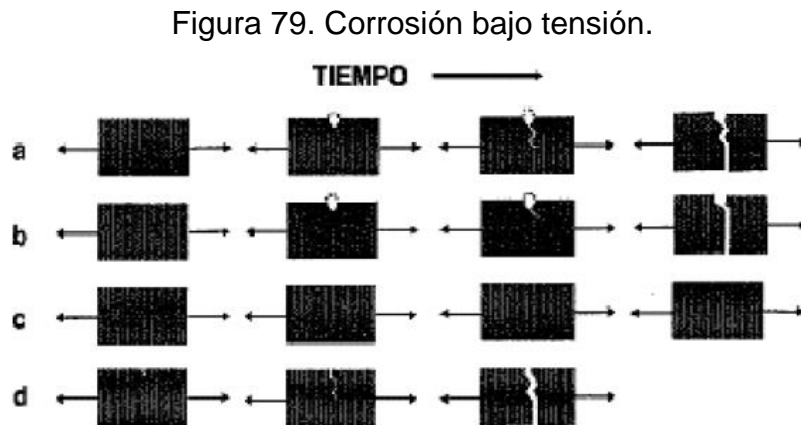
Figura 78. Corrosión Inter-granular.



Fuente: http://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/intergranular_corrosion_cracking.htm

2.1.2.8 Corrosión Bajo Tensión. La corrosión bajo tensión viene provocada por la acción combinada de esfuerzos mecánicos estáticos y de un agente químico corrosivo. Los esfuerzos pueden ser internos, superficiales o de ambos tipos

conjuntamente. La Figura 79, representa la secuencia de procesos que se presentan en el agrietamiento bajo tensiones:



Fuente: ECOPETROL. Curso de corrosión básico aplicado a refinerías.
Barrancabermeja. 109p.

Cuando se introduce una muestra sin grietas en un medio corrosivo se forma un pozo de ataque, lo cual lleva al desarrollo de una concentración de tensiones y una alteración química de la solución en la propia grieta. Ambos fenómenos favorecen la progresión de la grieta con el tiempo, alcanzándose finalmente el tamaño crítico de la misma, con lo que se produce la rotura.

El material rompe con un tamaño de grieta inferior. Corresponde a un material con una tenacidad a la fractura inferior al "a" o bien a un material sometido a tensiones de tracción superiores.

El material no sufre picaduras en el medio corrosivo y por tanto, en ausencia de grietas, no sufre los fenómenos de corrosión bajo tensiones

El material contiene grietas superficiales, por lo que puede experimentar fenómenos de corrosión bajo tensiones.

2. PROYECCIÓN DE ARENA POR AIRE A PRESIÓN SANDBLASTING

2.1 RESEÑA HISTÓRICA.

El proceso de Sand-Blast fue patentado en Inglaterra en el año de 1870, por Tilghman, quien descubrió que impulsando arena (Sand), con un chorro de aire comprimido se podía aprovechar la energía generada por el impacto (Blast), que se producía, para limpiar las superficies de las piezas salidas de fundición, a las que se les debía quitar la arena del corazón y la escoria formada en la superficie de esas piezas, descubriendo así el principio de lo que ahora se conoce como "Sandblasting".

2.2 DEFINICIÓN.

Consiste en la limpieza superficial de materiales proyectando granos abrasivos por soplo de aire comprimido con una presión adecuada del aire o por la fuerza centrífuga de un rotor.

Figura 80. Aplicación de Sand-Blasting y turbina para proyección de Granalla.



Fuente: <http://aymservices.com/sand-blasting.html>

El impacto del medio abrasivo se realiza a través de algún mecanismo o sistema, que lanza el abrasivo a velocidad y a granel para que impacte la superficie que se quiere procesar. El efecto de este choque provoca que las partículas no adheridas a la superficie sean desplazadas (polvo, óxido de corrosión, pintura, etc.) obteniendo como resultado una limpieza profunda. Se debe mantener el impacto, entonces además de limpiar (por el barrido efectuado), se inicia el proceso de preparación de la superficie áspera favorable para un proceso posterior de aplicación de pintura, este beneficio se consigue al aumentar la rugosidad de la superficie, teniendo como resultado una mayor adherencia de la pintura a la pieza, con lo que el acabado tendrá una vida útil más larga y en mejores condiciones.

2.2.3 Principios del proceso¹¹. La limpieza de superficies a través de un chorro de abrasivo puede considerarse como una verdadera operación de "bombardeo", en la que un sinnúmero de partículas abrasivas son lanzadas a alta velocidad contra el objetivo. Inmediatamente antes del choque, las partículas están dotadas de energía cinética, que varía según su cantidad y dimensiones. A continuación se muestra la expresión que se utiliza para calcular la energía cinética que lleva una partícula:

$$E_c = \frac{m * V^2}{2}$$

Dónde:

Ec: Energía cinética

m: Masa de la partícula

V: Velocidad de la partícula

¹¹ TORRES, Santiago. Diseño y construcción de un prototipo de una estación de limpieza mecánica mediante el proceso de Sandblasting utilizando granalla mineral en ciclo continuo para una unidad de mantenimiento y transporte. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. 2008.

La masa de una partícula esférica está dada por la relación:

$$m = \frac{\rho * (4 * \pi * r^3)}{3}$$

Dónde:

r: Radio de la partícula

ρ: Densidad del material

Por lo tanto, la energía cinética de una partícula esférica es dada por la relación:

$$E_c = \frac{\rho * (2 * \pi * r^3) * V^2}{3}$$

Las ecuaciones planteadas indican que pueden ocurrir variaciones significativas de la energía cinética del chorro con pequeñas variaciones en las cantidades y dimensiones de las partículas; con una velocidad constante, a menor radio, mayor es la cantidad de partículas lanzadas y es menor su energía cinética.

Las partículas sufren una violenta desaceleración en el instante del impacto, transformando parte de la energía cinética en calor, parte en energía de deformación o de fractura y parte en trabajo de limpieza, restando también una parte de energía cinética que no es transformada (partículas que rebotan).

La eficiencia de la conversión de energía cinética en trabajo efectivo de limpieza depende de factores relacionados con el ángulo de incidencia del chorro, las características del abrasivo utilizado y al tipo de impureza a retirar. Por ejemplo, cuanto más perpendicular sea el chorro con relación a la superficie de trabajo, será mayor el componente de energía disponible para el rompimiento de impurezas sueltas y así el acabado superficial será más áspero.

2.4 EQUIPOS DE SANDBLASTING.

Existen dos tipos de equipos de Sand Blasting, que a continuación se detallan.

2.4.1 Equipo de sandblasting por presión. Los equipos de presión alimentan el abrasivo, por medio de una válvula reguladora, a una corriente de aire comprimido en movimiento. El aire y el abrasivo viajan a través de una manguera a alta presión y velocidad. Se utilizan para acero estructural por su alta velocidad de producción, menor consumo de aire y porque generan acabados más uniformes que los de succión.

En los equipos de sandblasting por presión se presuriza el abrasivo conjuntamente con el aire medioambiental, en un recipiente fabricado para soportar niveles de presión, que van desde los 130 psi, con el fin de alcanzar velocidades de salida del abrasivo de aproximadamente 90 m/s.

La sección inferior del sistema es de forma cónica y termina en una salida de diámetro similar al de la entrada de abrasivo, donde se conecta un acople y una válvula que dosifica el abrasivo y el aire. A esta salida se conecta la manguera por la que se expulsa el abrasivo hacia la pieza a trabajar.

Una ventaja sustancial de este método es el hecho de poder manejar un mayor volumen de abrasivo y con una fuerza de impacto mayor al de los equipos de succión, logrando más velocidad en el proceso y mayor eficiencia en la limpieza superficial. Las capacidades que se manejan en estos equipos van desde 1 hasta 10 pies cúbicos de capacidad interna de abrasivo.

Figura 81. Equipos de sandblasting por Presión¹²



2.4.2 Equipo de sandblasting por succión. Este proceso consiste en transportar el abrasivo, como su nombre lo indica, por succión llevándolo hacia una cámara de vacío (origen de la succión), donde pasa la ráfaga de aire comprimido mezclándose para seguir su trayectoria hacia el ducto de la boquilla por donde se expulsa el chorro abrasivo y aire que impactará en la superficie de la pieza, a procesar.

Cabe mencionar que la fuerza de impacto del abrasivo por este método no es tan grande como si se utilizara el equipo de presión mencionado anteriormente, siendo de cualquier manera muy efectivo en piezas pequeñas debido a la relación tiempo-área de proceso.

¹² CLEMCO. Catálogo de productos [online]. España: [visto 20 Nov. 2014] Disponible de internet: <<http://www.clemco.es/catalogo-de-productos/>>

Figura 82. Equipo de sandblasting por succión.



Fuente: <http://www.mhg-strahlanlagen.de/>

2.5 CONSIDERACIONES DE MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE SANDBLASTING.

Tanto los equipos de Granallado y los de Sandblasting tienen una operación por naturaleza autodestructiva, por el efecto de los abrasivos en circulación, el cuidado en la operación es sumamente importante para aumentar eficiencia, disminuir costos por desgastes prematuros, ahorrar energía y salvar secciones de los equipos que no deben estar expuestos directamente a las ráfagas de abrasivos lanzadas por él, o los procesos.

Figura 83. Pistolas y Boquillas; guantes para cabinas Sandblasting.



Fuente: <http://www.blasting.com.co/cabinas-de-granallado/sistema-de-succion/cabinas-de-granallado-succion.php>

2.6 GRADOS DE CORROSIÓN UTILIZADOS EN NORMAS INTERNACIONALES¹³.

Los principales grados de corrosión que se utilizan por las normas internacionales se detallan a continuación en la siguiente tabla.

2.6.1 Grado A: Superficie de acero con la capa de laminación intacta en toda la superficie y prácticamente sin corrosión.

¹³ THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATINGS. Guide and Reference Photographs for Steel Surfaces Prepared by Dry Abrasive. SSPC-VIS1. Pittsburgh: NACE International, 2006.



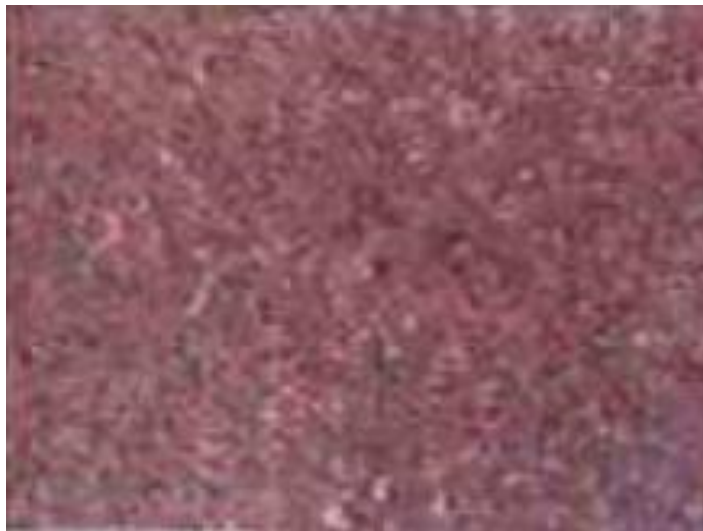
2.6.2 Grado B: Superficie de acero con principio de corrosión y en la cual la capa de laminación comienza a despegarse.



2.6.3 Grado C: Superficie de acero en donde la capa de laminación ha sido eliminada por la corrosión o la capa de laminación puede ser eliminada por raspado, pero en la cual no se han formado en gran escala cavidades visibles.



2.6.4 Grado D: Superficie de acero en donde la capa de laminación ha sido eliminada por la corrosión y se han formado en gran escala cavidades visibles.



2.7 NORMAS USADAS PARA LIMPIEZA SUPERFICIAL¹⁴.

Los trabajos de preparación de superficies están normalizados por varias asociaciones internacionales. Las normas definen la terminación deseada o sea el grado de arenado a alcanzar.

Algunas normas son de comparación visual utilizando probetas de Acero, discos comparadores o fotografías y otras normas solo son escritas. Todas las normas están sujetas a un grado de interpretación y aplicación de las especificaciones dadas por los usuarios, inspectores, aplicadores y otros.

Tabla 18. Normas del grado de arenado a alcanzar

Norma SIS Sueca	Norma Americana	Norma SSPC	Norma Francesa	Norma Inglesa	Norma NACE
SA 3	Metal Blanco	SP 5	DS 3	1 ^{ra} Calidad	NACE 1
SA 2 ^{1/2}	Metal Semi blanco	SP 10	DS 2.5	2 ^{da} Calidad	NACE 2
SA 2	Comercial	SP 6	DS 2	3 ^{ra} Calidad	NACE 3
SA 1	Cepillado	SP 7	DS 1		NACE 4

Fuente: SIKA. Preparación de Superficies Metálicas. Bogotá: Sika Colombia, 2008

Las normas de mayor utilización en toda América Latina son:

- Norma SIS
- Swedish Standards Institution
- Stockholm Suecia,
- Norma SSPC
- Steel Structures Painting Council,

¹⁴ SIKA. Preparación de Superficies Metálicas. Bogotá: Sika Colombia, 2008.

- Pittsburgh USA

La metodología utilizada se basa en la comparación de la superficie tratada con el patrón de la norma, fotografías en el caso de la norma SSPC y transparencias en el caso de la norma SIS.

Ya que el proyecto planteado busca el desarrollo de un prototipo que logre preparar superficies buscando llegar a metal blanco basados en la norma SSPC, se detalla a continuación esta norma:

2.7.1 Norma americana SSPC VIS 1. Al igual que la norma europea, la SSPC define cuatro grados de corrosión (A, B, C, D) equivalentes y partiendo de éstos se definen distintos grados de preparación:

- Grado SSPC SP7 Granallado / Arenado Rápido.
- Grado SSPC SP6 Granallado / Arenado Comercial.
- Grado SSPC SP10 Granallado / Arenado cercano a metal blanco.
- Grado SSPC SP5 Granallado / Arenado a metal blanco.

Ejemplo, si se parte de un grado de corrosión "B" y se logra un grado de preparación SP 10 el trabajo se define como B SP 10.

2.7.1.1 Grado SSPC-SP7: Arenado – granallado rápido. La superficie debe verse libre de aceite, grasa, polvo, capa suelta de laminación, óxido suelto y capas de pintura desprendidas. Conserva la capa de laminación donde está firmemente adherida. Estas partes no deben desprenderse mediante un objeto punzante. Es

utilizado sólo en los casos de condiciones muy poco severa y presentará áreas de probables fallas.

2.7.1.2 Grado SSPC-SP6: Arenado – granallado comercial. La superficie debe verse libre de aceite, grasa, polvo, óxido y los restos de capa de laminación no deben superar al 33% de la superficie en cada pulgada cuadrada de la misma. Los restos deben verse sólo como de distinta coloración. Generalmente se lo especifica en aquellas zonas muy poco solicitadas sin ambientes corrosivos.

2.7.1.3 Grado SSPC-SP10: Arenado – granallado cercano a metal blanco. La superficie debe verse libre de aceite, grasa, polvo, óxido, capa de laminación, restos de pintura y otros materiales extraños. Se admite hasta un 5% de restos que pueden aparecer sólo como distinta coloración en cada pulgada cuadrada de la superficie. Es la especificación más comúnmente utilizada. Reúne las características de buena preparación y rapidez en el trabajo. Se lo utiliza para condiciones regulares a severas.

2.7.1.4 Grado SSPC-SP5: Arenado a metal blanco. La superficie debe estar libre de aceite, grasa, polvo, óxido, capa de laminación, restos de pintura sin excepciones. Es utilizada donde las condiciones son extremadamente severas, con contaminantes ácidos, sales en solución, etc. En la siguiente figura se detalla los diferentes grados de preparación de superficies establecidos por la norma SSPC.

Figura 84. Grados de preparación de superficies¹⁵.



¹⁵ HMG, Paints. Pictorial Surface Preparation Standards for Painting Steel Surfaces. Manchester: 2008.

En la siguiente página se detalla más ampliamente los diferentes trabajos logrados con la norma SSPC.

2.8 TIPOS DE LIMPIEZA PARA METALES, PROCEDIMIENTOS Y PATRONES DE LIMPIEZA.

A cada grado de corrosión, se aplican diferentes grados de limpieza, de donde se obtienen diferentes patrones de limpieza.

2.8.1 Limpieza al metal blanco con chorro abrasivo. Este es el método de la norma SSPC–SP5–63 (el patrón visual es SSPC–VIS 1– C7–T 5 a 3). Este método se aplica a todos los grados de corrosión. Consiste en un tratamiento intenso hasta conseguir la remoción total de la capa de laminación, óxidos y partículas extrañas. Limpieza final con aspirador de polvo, aire comprimido seco y limpio, o escobilla de acero limpia. Posterior a la limpieza final, la superficie deberá quedar con una coloración ceniza claro metálica uniforme y sin manchas o rayas.

En si en la limpieza del METAL BLANCO todo el óxido visible, restos de pintura y partículas extrañas son removidos de la superficie. El acero totalmente limpio quedará de color gris claro similar al aluminio.

2.8.2 Limpieza al metal casi blanco con chorro abrasivo. Este es el método de la norma SSPC–SP10–63–T y el patrón visual es SPC–VIS 1–67–T.

Consiste en una limpieza minuciosa, toda capa de laminación, óxido y partículas extrañas, deben ser removidas, de tal modo que los residuos sólo aparezcan como leves manchas, o decoloraciones en la superficie. Limpiar con aspirador de polvo,

aire comprimido limpio y seco o escobillas de fibra. Posterior a la limpieza final, 95% de la superficie deberá estar libre de residuos y presentar un color ceniza claro o próximo al blanco, en esta condición el 95% del área (uniformemente distribuida) y tratada estará limpia, sin residuos e impurezas y presentar un color ceniza claro.

2.8.3 Limpieza comercial con chorro abrasivo. Este es el método de la norma SSPC-SPC-63 (el patrón visual es SSPC-VIS 1-67-T 5 a 2. Este patrón no se aplica al grado de corrosión "A". Consiste en una limpieza cuidadosa, removiendo prácticamente toda capa de laminación de óxidos y partículas extrañas. Limpiar la superficie con aspirador de polvo, aire comprimido limpio y seco, o escobilla de acero limpia.

Si la superficie tiene cavidades (erosión), sólo se permite pequeños residuos de óxido en el fondo de estas cavidades, con la limpieza de calidad comercial, 2/3 de la superficie tratada estará libre de restos de óxidos e impurezas. Corresponde aclarar que esta condición detalla lo que sería observado “un tono ligeramente suave de marrón” sobre un fondo gris más claro.

2.9 HERRAMIENTAS PARA SANDBLASTING.

Las herramientas necesarias para obtener un eficiente proceso Sandblasting son:

Una tolva o columna para la arena, donde por gravedad y arrastre de aspiración, la arena se desplaza hasta la tobera.

Mangueras para alta presión y adecuada longitud para facilitar la tarea.

En caso de no utilizar una cabina Sand-Blasting se debe usar un casco de protección presurizados con suministro de aire filtrado y presión siempre positiva en

su interior para evitar la inhalación por parte del operador del polvo de arena que puede dañar los pulmones.

Compresor de aire de gran capacidad o volumen de reposición y alta presión (8 o 9,15 Kg. /cm²) (113 o 130PSI).

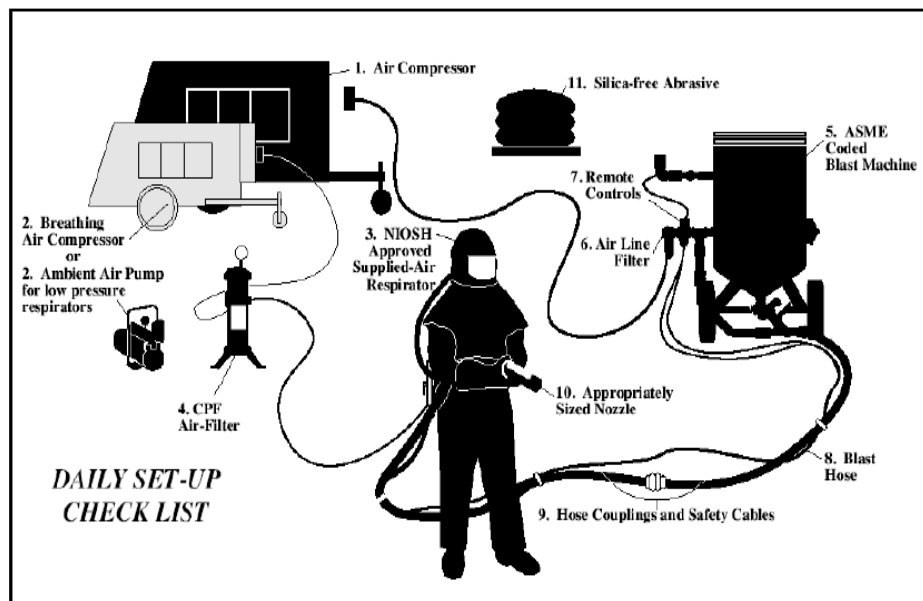
Buena iluminación del sitio, para la distinción de detalles en los materiales.

Ropa de trabajo con protección adecuada. La arena proyectada a presión puede provocar heridas en la piel fácilmente.

Normalmente la tarea debe realizarse con tres operarios: Uno arenando, otro sirviendo la arena a la tolva y un tercero para alternar su turno en el arenado y atención del compresor.

En el siguiente esquema referencial se detalla un equipo básico para Sand Blasting por presión. Este sistema es utilizado para trabajos robustos y en exteriores.

Figura 85. Esquema básico del equipo de sandblasting.



Fuente: <http://www.discount-equipment.com/category/4174-sand-blasting-rental/>

El Anexo B detalla cada uno de los componentes de un equipo de Sandblasting.

2.10 ESTUDIO COMPARATIVO DE COSTOS Y RENDIMIENTOS ENTRE GRANALLA DE ACERO Y ARENA¹⁶.

Este estudio fue realizado por la constructora de equipos de Sand Blasting CMY de Argentina:

Se hará una comparación de la utilización entre granalla de acero y arena dentro de recintos cerrados tales como cuartos de granallado, tanques o bodegas de barcos utilizando equipos de granallado por aire comprimido.

Los sistemas modernos de proyección de partículas por aire comprimido, equipos de arenado o granallado, trabajan indistintamente con cualquier tipo de abrasivos. Esto permite, utilizando un mismo equipo, seleccionar el abrasivo adecuado para cada tipo de trabajo.

No se hace referencia a equipos que utilizan turbinas mecánicas para la impulsión del abrasivo ya que estos no pueden utilizar arena

2.10.1 Características genéricas de la arena y de la granalla de acero. Debido a que los dos abrasivos más importantes son la arena y la granalla se mencionaran a continuación las principales características.

2.10.1.1 Arena. Es el abrasivo natural de más amplia disponibilidad y muy bajo costo. Constituye históricamente “el abrasivo”, y le aporta el nombre a todos los

¹⁶ LOZADA CERNA, Jaime Armando, PRECIADO GÓMEZ, Darwin Leonardo. Construcción de una cabina para limpieza superficial de probetas de soldadura mediante chorro de arena. Trabajo de Grado Tecnólogo en Mantenimiento Industrial. Quito: Escuela de Formación de Tecnólogos, 2008. p 29-36.

procesos de preparación de superficie por proyección de partículas llamados comúnmente “arenado” o “sandblasting”.

El tipo de arena que se utiliza, es la sílice y nunca la calcárea, la cual tiene la dureza necesaria para este tipo de trabajo. Al ser un abrasivo natural debe ser sometido a análisis, debido a los contaminantes que puede arrastrar desde su lugar de origen, dunas, ríos, canteras, etc.

Además para trabajar adecuadamente con la arena, ésta no debe utilizarse a granel sino debe ser tamizada, retirando los finos que no realizan un buen trabajo de arenado sobre la superficie y los gruesos que obturarían el equipo. También debe ser sometida a un proceso de secado debido a su capacidad de absorber humedad.

Es extremadamente frágil y proyectada por equipos de alta producción, sólo se puede utilizar una sola vez debido a que más del 80 % se transforma en polvo luego del primer golpe. Crea una gran polución en el ambiente de trabajo por la fragilidad de sus partículas que, luego del impacto, se convierten en un alto porcentaje en polvo con tamaños inferiores a malla 300 Mesh.

2.10.1.2 Granalla de acero. Es un abrasivo que se obtiene del acero a través de proceso de fusión con composiciones químicas controladas. Del proceso primario de fabricación se obtienen partículas redondeadas que constituyen las granallas de acero esféricas (shot). Estas partículas en el estado de mayor diámetro se parten formando así la granalla de acero angular (grit).

Para aquellos trabajos en donde reemplazan el uso de la arena se utilizan exclusivamente granallas angulares, en algunos casos con el agregado de un pequeño porcentaje de granalla esférica. Una partícula de granalla angular presenta aristas y puntas y al ser proyectada trabaja como una herramienta que clava y arrastra en la superficie a procesar.

Este abrasivo, puede ser seleccionado de acuerdo al trabajo a realizar, no solo por el tamaño de la partícula, uniforme en todas ellas, sino la dureza en determinados rangos. Es altamente reciclable, pudiendo ser proyectado desde 700 a 5000 veces conforme al diámetro, tipo y dureza de abrasivo utilizado. Al ser partículas de acero templado y revenido no provocan ningún problema de contaminación en la superficie de trabajo.

El polvo producido en la operación es solo básicamente el resultado de los materiales removidos sobre la superficie a tratar. Debido a que no absorbe humedad, la granalla de acero no requiere de un secado previo y al ser todas las partículas de similar granulometría, producen un trabajo totalmente uniforme.

Se puede reseñar en la siguiente tabla, las principales características de ambos abrasivos:

Tabla 19. Características entre arena y granalla.

	Tipo	Forma	Dureza	Densidad	Sílice libre	Factor de polución	Mallas disponibles	Factor de reutilización
Arena	Sílica	Irregular Redondeado	5-6 MOHS	1600 Kg/m ³	90%	Alto	6-300	X 1
Granalla de acero	Metálica	Angular	40-68 RC	4000 Kg/m ³	0	Muy bajo	18-200	X500

Fuente: <http://www.blasting.com.ar/granalladoras/informacion-tecnica/informes/Arena-o-granalla-de-acero.pdf>

2.10.2 Costos de operación con granalla y arena. En la siguiente tabla se detalla una comparación entre operar con granalla y arena, además el tiempo de duración de las boquillas y la generación de polvo. En los 3 ejemplos dados se utilizan un mismo equipo de granallado con similar consumo de aire comprimido.

- Equipo de granallado 14 TP 200-1SCD (200 L de capacidad)
- Boquilla: Venturi Largo 8 mm.
- Consumo de aire comprimido: $3.8 \frac{m^3}{min}$ a $7 \frac{Kg}{m^2}$
- Calidad de granallado: SA 2 ½ (SSPC10) casi blanco

Tabla 20. Costos de operación con granalla y arena.

Tipo de Abrasivo	Producción	Consumo de Abrasivo (1)		Costo del Abrasivo		Duración de las Boquillas	Generación de Polvo (4)
	m ² /hr	Kgr/hr.	Kgr/m ²	usd/Kg.(2)	usd/m ² (3)	Horas(4)	
Granalla de acero "Sablacier"	20	5	0.25	\$ 0.80	\$ 0.20	700	Muy baja formación de polvo
Granalla de acero Angular "G40E"	15	5	0.33	\$ 0.80	\$ 0.26	1200	
Arena	10	400	40	\$ 0.09	\$ 3.60	300	Muy alta formación de polvo

Fuente: http://blastingexperts.com/Web_final/images/noticias/Archivos/ARENA%20Vs%20GRANALLA.pdf

Notas: (1) El consumo de abrasivo es promediado. El mismo puede variar conforme sea la calidad, la dureza, velocidad de impacto, etc. (2) El costo promedio de los abrasivos es estimado y varía conforme los distintos proveedores.

2.10.3 Costo operativo de los abrasivos. El costo promedio de consumo de arena por m² de superficie granallada será 14 veces mayor respecto a la utilización de granalla de acero. Es importante además considerar el mayor costo de logística por

acarreo por movimiento de mayores volúmenes de arena y de polvo generado en el proceso respecto de la granalla de acero.

2.10.4 Conclusión. El uso de la granalla de acero en recintos cerrados, es extremadamente ventajoso respecto de la arena destacando los siguientes puntos:

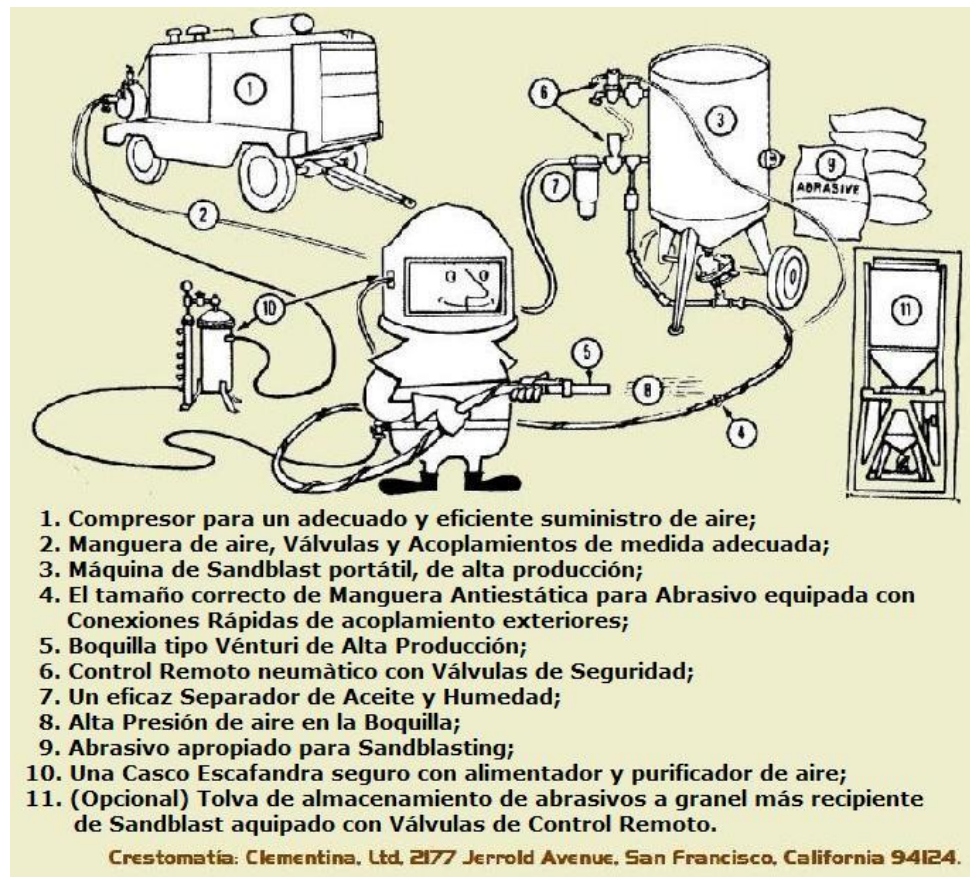
- Mayor productividad.
- Menor costo de abrasivo por m² limpio.
- Reducción en los costos de mantenimiento
- Mejor calidad en cuanto al trabajo realizado (homogeneidad, rugosidad, limpieza).
- Menor contaminación ambiental.
- Menor generación de residuos y polvos.
- Mejor visibilidad de los operarios.
- Menor riesgo para la salud de los operarios.
- Menor inversión en sistemas colectores de polvo.

Aunque el estudio realizado muestra una alta eficiencia en el uso de granalla de acero como material abrasivo, se debe tener en cuenta que el proyecto planteado busca solventar problemas no solo en espacios cerrados, donde la reutilización del material es más sencillo, al contrario, la mayoría de las aplicaciones donde se va a utilizar este proyecto es en sitios donde va a ser difícil reutilizar el abrasivo por lo cual la arena viene a ser la mejor opción en este caso.

Anexo B. Elementos que conforma el proceso de Sandblasting¹⁷

Aunque estos dos tipos de preparación de superficies se diferencien en su configuración y por lo tanto en la eficiencia que pueden generar, los elementos que los conforman básicamente son los mismos. A continuación se mencionan y explican cada uno de los elementos que conforman el sistema de sandblasting:

Figura 86. Elementos que componen un equipo de Sandblasting



Fuente: <http://sandblastmexico.blogspot.com/2009/04/el-sandblast-sopleteo-con-chorro-de.html>

¹⁷ Preparación de la superficie [online]. (s.l.): (s.f.) [Fecha de consulta: 11 Octubre 2014]. Disponible en: <<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11596/Capitulo8.pdf>>

1. COMPRESOR

Parte del equipo necesario para la limpieza con chorro abrasivo es un buen compresor de aire, usualmente son a base de gasolina o diésel y con capacidad de ser remolcados por carros de trabajo. Estos equipos se llegan a diferenciar por la capacidad de aire suministrada y la presión que sostienen. En algunas ocasiones es posible usar equipos estacionarios pero solo será en función de la capacidad de los mismos pues solo unos cuantos pueden llegar a cumplir la demanda de aire necesario. Para dar una idea del caballaje requerido para usar tanques con motores eléctricos se puede decir que cada HP (Caballos de fuerza) rinde aproximadamente 4.5 CFM (Pies cúbicos por minuto).

Figura 87. Compresor de aire CATERPILLAR



Fuente: <http://turetroexcavadora.com/portfolio/compresor-de-aire-sandblasting/>

Uno de los principales requisitos para un correcto trabajo de sandblasting es el suministro continuo de una corriente de aire. Por ejemplo, si se tiene una boquilla de 3/8", el suministro de aire debe ser de no menos de 100 psi y el flujo de aire debe estar entre los 80 y 300 CFM. Se debe tomar en cuenta que la presión de salida del

equipo es diferente en el compresor que en la boquilla. Si la presión de la boquilla llega a bajar a 60 psi generará un mayor consumo de aire y de arena por lo que no se tendrá un buen rendimiento de trabajo

2. MANGUERAS

2.1 Las que transportan aire

Es la manguera que se conecta al compresor de aire con la tolva de trabajo; por lo general su longitud no es muy grande y deberá soportar las condiciones de trabajo a que se somete el sistema. El principal punto a tener en cuenta es mantener una distancia prudente entre el compresor y el área de trabajo para evitar que los residuos del área de trabajo lleguen al compresor y éste pueda afectarse en los filtros de aire propios del motor.

Figura 88. Manguera para compresor de aire



Fuente: <http://cubillastools.com/shop/herramientas-neumaticas/228-manguera-para-compresor-aire-1-2-x-50-pies-largo.html>

Se deben chequear periódicamente para ver si no tienen fugas, ya que estas disminuyen la eficiencia del proceso lo cual demanda del compresor periodos más prolongados de tiempo para realizar el trabajo.

2.2 Las que transportan aire y abrasivo

Son mangueras reforzadas de varias capas de hule natural sin alambres o refuerzos, que por lo regular, tienen la propiedad de no generar cargas electrostáticas que puedan crear chispas en lugares peligrosos por ambientes de explosividad. También las mangueras están diseñadas para soportar la abrasión en el interior de ellas.

Figura 89. Manguera Blasting



Fuente: <http://www.blasting.com.ar/mangueras-y-boquillas.php>

El diámetro interior de la manguera, deberá ser 3 a 4 veces mayor del diámetro interior de la boquilla, esto para evitar pérdidas de presión en la línea. Las

extremidades de la manguera se usan conexiones de bronce tipo “garra” y en el extremo final de la manguera una conexión con porta-boquillas.

3. TANQUE PRESURIZADO

Todos los recipiente de arena para sandblasting tienen la misma función esencial, que es la de proporcionar una cantidad de abrasivo a una corriente de alta presión; la diferencia entre un equipo y otro es la capacidad de almacenamiento de abrasivo y el número de cámaras o depósitos que lo compongan.

Figura 90. Pressure Abrasive Blaster, Modelo # 40002



Fuente:http://www.northerntool.com/shop/tools/product_7960_7960?utm_source=Natural&utm_medium=Covario&utm_campaign=Abrasive

Consta en general, del depósito de material, válvulas neumáticas para el control de aire, una válvula para regular la salida del abrasivo y una compuerta para llenado.

4. BOQUILLAS

La función de la boquilla es reducir el área de salida para provocar un aumento de velocidad y hacer que el sistema sea más eficiente. Elegir la boquilla adecuada para cada aplicación es simplemente un asunto de entender las variables que afectan el desempeño y los costos del trabajo.

El tipo de diámetro que elija determinará el tipo de patrón de limpieza que obtendrá. Las boquillas generalmente presentan ya sea un diámetro recto o un diámetro Venturi restringido.

Con las **boquillas de diámetro recto** se obtiene un patrón de sandblasteo delgado el cual es ideal para limpiar superficies angostas o en trabajos dentro de cabinas de sandblasting. Estas boquillas son muy utilizadas para trabajos pequeños.

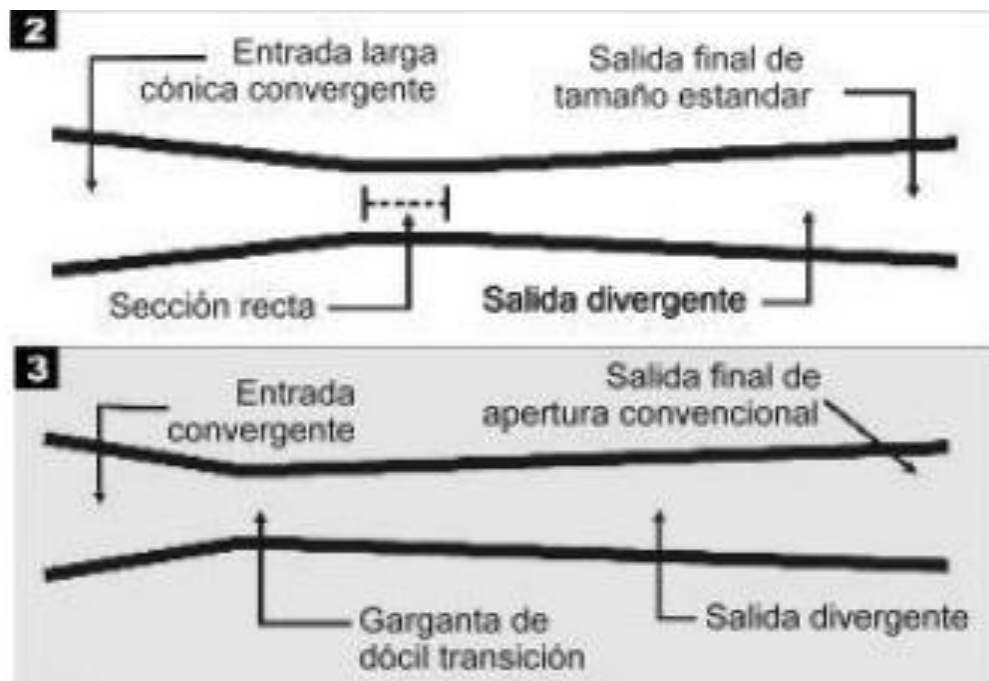
Figura 91. Boquilla de diámetro recto



Fuente: <http://www.kennametal.com/en/products/engineered-wear-solutions/engineered-components/nozzles/abrasive-blast-nozzles.html>

Las **boquillas tipo Venturi** crean un patrón de sandblasteo amplio e incrementan la velocidad del abrasivo en un 100% a la misma presión. Este tipo de boquillas son la mejor elección para grandes niveles de producción en donde se aplique el chorro abrasivo a superficies muy grandes. Las boquillas tipo Venturi largas por ejemplo, tienen un incremento de cerca del 40% en la productividad a comparación de las boquillas de inserto recto, mientras que su consumo de abrasivo puede ser reducido en aproximadamente un 40%.

Figura 92. Boquilla tipo Venturi

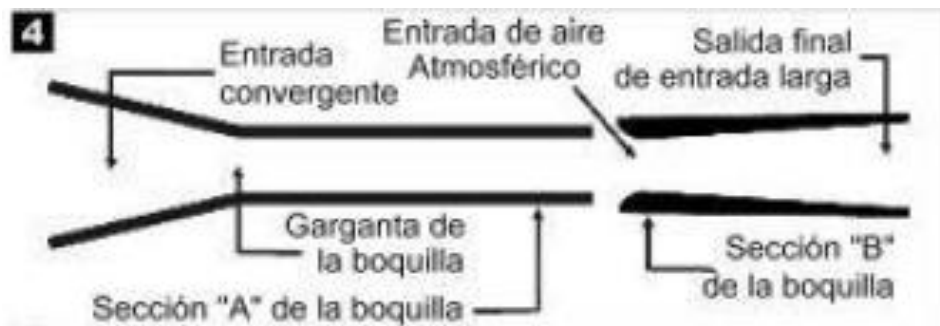


Fuente: <http://www.kennametal.com/en/products/engineered-wear-solutions/engineered-components/nozzles/abrasive-blast-nozzles.html>

Las boquillas doble Venturi y de entrada ancha son versiones mejoradas de las boquillas Venturi largas.

Las **boquillas doble Venturi** pueden ser pensadas como dos boquillas en serie que generan un vacío gracias a los huecos entre ellas. De esta forma, permiten la inserción de aire atmosférico dentro del segmento del caudal de la boquilla. El diámetro de salida es también más amplio que el de una boquilla convencional. Ambas modificaciones están hechas para incrementar el tamaño del patrón de limpieza así como para minimizar la pérdida de velocidad.

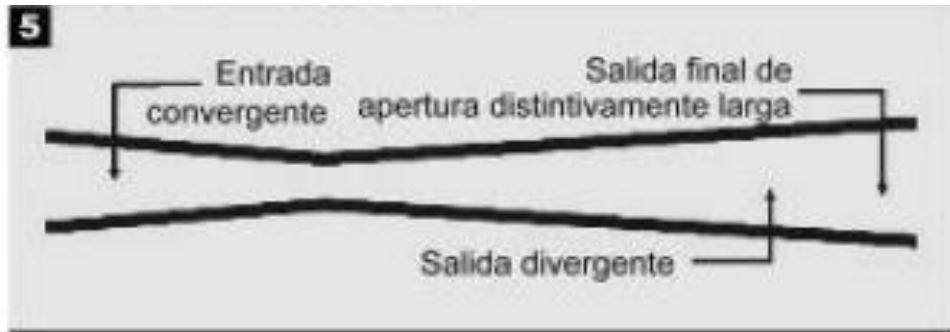
Figura 93. Boquilla doble Venturi



Fuente: <http://www.kennametal.com/en/products/engineered-wear-solutions/engineered-components/nozzles/abrasive-blast-nozzles.html>

Las boquillas de entrada ancha presentan una entrada más amplia que las boquillas Venturi normales, así como un diámetro de salida grande y divergente. Al ser combinadas con mangueras y/o tubería del mismo diámetro interior, pueden ofrecer un aumento en la producción del 15% sobre aquellas boquillas con entrada más pequeña. Cuando las boquillas de entrada ancha también presentan un diámetro de salida grande y divergente pueden ser utilizadas a presiones más altas para incrementar en un 60% el patrón de limpieza con un uso menor de abrasivo.

Figura 94. Boquilla de entrada ancha



Fuente: <http://www.kennametal.com/en/products/engineered-wear-solutions/engineered-components/nozzles/abrasive-blast-nozzles.html>

Como regla general, el sistema de suministro de aire debe ser capaz de proveer cuando menos 50% más de volumen de aire requerido por la boquilla nueva para realizar el trabajo a una presión dada. Se debe considerar siempre que el diámetro de entrada de la boquilla debe coincidir con el diámetro interior de la manguera de suministro de aire. Una combinación errónea puede provocar puntos de desgaste mayor, caídas de presión y una turbulencia interna excesiva¹⁸.

¹⁸ SERANO BENITEZ, Nelson. Rediseño de la boquilla utilizada en el proceso de sopleteo con abrasivo (Sand Blast) para la empresa SEBEMES [online]. México: Noviembre de 2008 [Fecha de consulta: 23 Octubre 2014]. Disponible en: <<http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5035/1/142%20im.pdf>>

Anexo C. Ficha técnica Arenas SIKADUR 506

CONSTRUYENDO CONFIANZA



HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO Sikadur® -500

ARENAS TÉCNICAS

Mezcla de arenas de cuarzo de gran pureza, especialmente seleccionadas y gradadas

Nombre	Sikadur-501	Sikadur-504	Sikadur-506
Usos	Para la fabricación de capas antideslizantes, mediante espolvoreo.	Como llenante para la obtención de pisos autonivelantes y capa base de pisos antideslizantes.	Para obtención de morteros de alta resistencia mecánica.
			Como llenante para la fabricación de juntas antiácidas
Granulometría	0.3 -1.18 mm	0.075 - 0.21 mm	0.075 - 2.36 mm
Presentación	32.5 kg	13.0 kg	30.0 kg



Responsabilidad Integral



Sika Colombia S.A.
Vereda Casavita, km 20.5
Autopista Norte, Tocancipá
Commutador: 878 6333
Colombia - web: www.sika.com



Hoja Técnica de Producto
Sikadur-500
Versión: 01/2015

NOTA

La información y, en particular, las recomendaciones sobre la aplicación y uso final de los productos Sika son proporcionadas de buena fe, basadas en el conocimiento y experiencia actuales de Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados y manipulados, así como aplicados en condiciones normales. En la práctica, las diferencias en los materiales, técnicas y condiciones de la obra son tan particulares que de más información, cualquier recomendación escrita o cualquier otro consejo no se puede deducir garantía alguna respecto a la comercialización adaptabilidad del producto a una finalidad en particular, así como responsabilidad alguna que surja de cualquier relación legal. Se deben respetar los derechos de propiedad de Sika. Todos los derechos de copyright, son aceptados de acuerdo con sus datos actuales condiciones de venta y disponibilidad en cualquier idioma reflejados siempre a la edición más reciente de la Hoja Técnica, excepto aquellos señalados a calidad del idioma. Reservados todos los derechos que como consecuencia de regulaciones, especificaciones locales o funcionamiento de los productos puede variar de un país a otro. Consultar la Hoja de Datos locales para la descripción exacta de los campos de aplicación.

444

Anexo D. Ficha técnica Recubrimiento AMERCOAT 351

 PPG Protective & Marine Coatings	
AMERCOAT® 351	
March 2012 Revision of November 2011	
DESCRIPTION	Solvent Free Modified Phenolic Amine Tank Lining
PRINCIPAL CHARACTERISTICS	<ul style="list-style-type: none"> - Excellent chemical, solvent, and water immersion resistance - High abrasion resistance - Suitable for severe H₂S exposure - High film builds when using 884 additive - Glass flake reinforced version available
COLOR* AND GLOSS	Gray Semi-gloss <small>* Product is not color stable. Colors will change on exposure to sunlight. Color matches are approximate.</small>
BASIC DATA	
Volume solids	98% ± 2%
VOC	0.28 lbs/gal (33 g/L)
Recommended Dry film thickness (per coat)	8 – 12 mils; (200 – 300 microns) 12 – 25 mils when adding Amercoat 880 glass flake 20 – 55 mils with 1 gallon of Amercoat 884 additive per 4 gallon kit
Number of coats	1 coat at 12 mils or greater or 2 coats at 8 – 12 mils per coat
Theoretical Spread Rate	@ 1 mils 1,600 ft ² /gallon @ 6 mils 233 ft ² /gallon
Components	2
Shelf Life	2 years from date of manufacture
SURFACE PREPARATION	
Steel	<ul style="list-style-type: none"> - Remove weld spatter, protrusions, and laminations in steel. Grind welds smooth in accordance with NACE RP-0178. Remove all surface contaminants, oil and grease in accordance with SSPC SP-1. Abrasive blast with an angular abrasive to an SSPC SP-10 cleanliness or higher. Achieve a surface profile of 2.0-4.0 mils. Amercoat 114A may be used as a pit filler for certain applications. Check with PPG Technical Service for guidance on chemical resistance. Check with PPG technical service for the maximum allowable soluble salt level for water immersion service. This will vary based on the water chemistry and service temperatures.
Concrete	<ul style="list-style-type: none"> - Remove all surface contaminants such as oil, grease, and embedded chemicals. Light abrasive blast per ASTM D 4259 to remove all chalk and surface glaze or laitance. Mechanical surface preparation should expose sub-surface voids and provide a surface profile equivalent to 60 grit sandpaper or coarser. Refer to Information Sheet # 1496ACUS for further details regarding moisture measurements.
Non-ferrous metals	<ul style="list-style-type: none"> - Lightly abrasive blast in accordance with SSPC SP-16 to achieve a uniform and dense 2.0 – 4.0 mil anchor profile.
Stainless Steel	<ul style="list-style-type: none"> - Abrasive blast with a hard angular abrasive to achieve a uniform and dense anchor profile of 2.0 – 4.0 mils.
	
page 14	

AMERCOAT 351

ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Ambient temperatures	40°F to 100°F (5°C to 37°C)
Material temperatures	50°F to 90°F (10°C to 32°C)
Relative humidity	0 – 80% (0 – 50% using dehumidification for tank linings)
Surface temperature	50°F to 100°F (10°C to 37°C) Surface temperature must remain at least 5°F above the dew point temperatures. Surface temperatures greater than 90°F may require the use of Amercoat 884 thixotropic additive.
General air quality	Area should be sheltered from airborne particulates and pollutants. Avoid combustion gases or other sources of carbon dioxide that may promote amine blush. Ensure good ventilation during application and curing. For tank lining, dehumidification equipment is highly recommended. Provide shelter to prevent wind from affecting spray patterns. Refer to Information Bulletin #1489 for further information on prevention, detection, and removal of amine blush.
Ventilation	Refer to Information Bulletin #1434 for detailed information on ventilation requirements for tank lining applications

INSTRUCTIONS FOR USE

Mixing ratio by volume 3 parts base to 1 part hardener
Pre-mix pigmented components with a pneumatic air mixing at moderate speeds to homogenize the container. Add hardener to base and agitate with a power mixer for 1-2 minutes until completely dispersed.

Pot life	50°F	70°F	90°F
	1.5 hours	1 hour	0.5 hour

Induction time	50 – 60°F	60 – 70°F	71°F +
	10 minutes	5 minutes	none

Airless spray or heated plural component spray
64:1 pump, 0.019-0.023 fluid tip, use of in-line heaters and insulated lines may be required for proper atomization in cold weather and with long fluid lines. Use 1/2" fluid lines for spray configurations requiring more than 100 feet from the pump. For plural component spray, use a 3/8", 24 element static mixer.

When using glass flake additive a spray tip size of X.035" or larger should be used. When using Amercoat 884 additive, a spray tip size of X.027 – X.035 should be used.

Brush & roll
Use a high quality natural bristle brush and / or solvent resistant, 3/8" nap roller. Ensure brush / roller is well loaded to avoid air entrainment. Multiple coats may be necessary to achieve adequate film build. Spray application is required for tank linings with the exception of stripe coating and application for small repair areas.

Thinner Do not thin
Cleaning solvent Amercoat 12 Cleaner
Safety precautions For paint and recommended thinners see safety sheet 1430, 1431 and relevant material safety data sheets

AMERCOAT 351

DRY/CURE TIMES

Amercoat 351

Temperature *F/*C	50/10	60/15	70/21	90/32	95/35	100/40
Dry through (hrs)	60	36	18	12	9	6
Dry to recoat/ topcoat (hrs)	36	24	12	8	6	4
Maximum recoat (days)	20	17	14	5	4	3
Cure to service	14 days	10 days	7 days	4 days	3.5 days	3 days

Heat Cure Procedures

1. Allow the final coat of the lining to achieve a dry hard condition prior to heating above 90°F to avoid sagging
2. Do not heat cure until after holiday detection has been accomplished (when specified).
3. Ramp heat at a rate of no greater than 2°F / minute to the target temperature.
4. Surface temperatures must be measured at various elevations from top to bottom and in each cardinal direction. The lowest surface temperature must meet the minimum time/temperature requirements of the heat cure schedule. Record all temperatures.

Temperature *F/*C	110/43	120/49	130/54	140/60	150/65	160/71
Cure to service (hrs)	60	48	36	24	18	12

* Dry times are dependent on air and surface temperatures as well as film thickness, ventilation, and relative humidity. Maximum recoating time is highly dependent upon actual surface temperatures – not simply air temperatures. Surface temperatures should be monitored, especially with sun-exposed or otherwise heated surfaces. Higher surface temperatures shorten the maximum recoat window.

Surface must be clean and dry. Any contamination must be identified and removed. Particular attention must be paid to surfaces exposed to sunlight where chalking may be present. In those situations, a further degree of cleaning may be required. PPG Technical Service can advise on suitable cleaning methods. If maximum recoat/topcoat time is exceeded, then roughen surface.

AVAILABILITY

Packaging

Available in 1-gallon and 4-gallon kits

Product codes

AT351-2 Gray base
AT351-B Hardener
AT880 Glass flake additive
AT884 Thixotropic additive

Worldwide statement

While it is always the aim of PPG Protective & Marine Coatings to supply the same product on a worldwide basis, slight modification of the product is sometimes necessary to comply with local or national rules/circumstances. Under these circumstances an alternative product data sheet is used.

WARRANTY STATEMENT

PPG warrants (i) its title to the products, (ii) that the quality of the product(s) conform to PPG's specifications for such products in effect at the time of manufacture and (iii) that the products shall be delivered free of the rightful claim of any third person for infringement of any U.S. patent covering the products. THESE ARE THE ONLY WARRANTIES PPG MAKES AND ALL OTHER EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, UNDER STATUTE OR ARISING OTHERWISE IN LAW, FROM A COURSE OF DEALING OR USAGE OF TRADE, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, ANY OTHER WARRANTY OF FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR USE, ARE DISCLAIMED BY PPG.



AMERCOAT 351

The information in this data sheet is based upon laboratory tests PPG believes to be accurate and is intended for guidance only. PPG may modify the information contained herein at any time as a result of practical experience and continuous product development. All recommendations or suggestions relating to the use of PPG products, whether in technical documentation, or in response to a specific inquiry, or otherwise, are based on data, which to the best of PPG's knowledge, are reliable. The products and information are designed for users having the requisite knowledge and industrial skills and it is the end-user's responsibility to determine the suitability of the product for its intended use.

PPG has no control over either the quality or condition of the substrate, or the many factors affecting the use and application of the product. Therefore, PPG does not accept any liability arising from loss, injury or damage resulting from such use or the contents of this data sheet (unless there are written agreements stating otherwise).

This data sheet supersedes all previous versions and it is the user's responsibility to ensure that this data sheet is current prior to using the product. The English text of this document shall prevail over any translation thereof.

LIMITATION OF LIABILITY

The information in this data sheet is based upon laboratory tests we believe to be accurate and is intended for guidance only. All recommendations or suggestions relating to the use of the products made by PPG Protective & Marine Coatings, whether in technical documentation, or in response to a specific enquiry, or otherwise, are based on data which to the best of our knowledge are reliable. The products and information are designed for users having the requisite knowledge and industrial skills and it is the end-user's responsibility to determine the suitability of the product for its intended use.

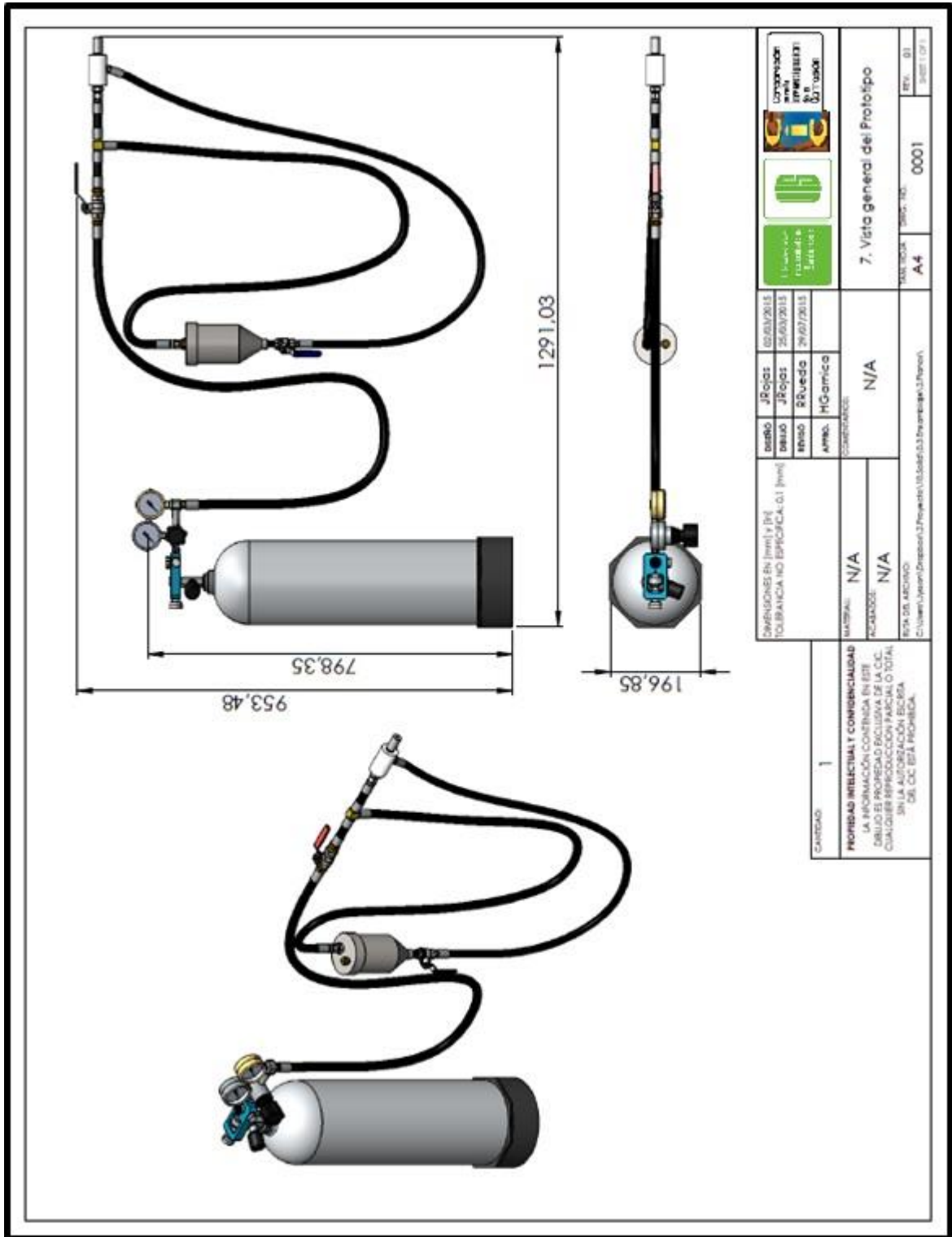
PPG Protective & Marine Coatings has no control over either the quality or condition of the substrate, or the many factors affecting the use and application of the product. PPG Protective & Marine Coatings does therefore not accept any liability arising from loss, injury or damage resulting from such use or the contents of this data sheet (unless there are written stating otherwise).

The data contained herein are liable to modification as a result of practical experience and continuous product development.

This data sheet replaces and annuls all previous issues and it is therefore the user's responsibility to ensure that this sheet is current prior to using the product. The current data sheets are maintained at www.ppgpmc.com

The English text of this document shall prevail over any translation thereof.

Anexo E. Planos generales de los elementos del prototipo



Anexo F. Manual de operación y mantenimiento del prototipo de Sandblasting

El manual de operación y mantenimiento se encuentra adjunto a los archivos del proyecto. DISPONIBLE SOLO PARA LA C.I.C.