

**DISEÑO ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SILLA DE RUEDAS PLEGABLE
FABRICADA EN ESPUMA DE POLIURETANO, FIBRA DE VIDRIO Y RESINA DE
POLIÉSTER**

**DIEGO RESTREPO VIEIRA
ALEJANDRO SOTO GONZALEZ**

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO
MEDELLÍN
2009**

**DISEÑO ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SILLA DE RUEDAS PLEGABLE
FABRICADA EN ESPUMA DE POLIURETANO, FIBRA DE VIDRIO Y RESINA DE
POLIÉSTER**

**DIEGO RESTREPO VIEIRA
ALEJANDRO SOTO GONZALEZ**

ASESOR

FABIO ANTONIO PINEDA BOTERO

Ingeniero Mecánico

Docente Departamento de Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD EAFIT

UNIVERSIDAD EAFIT

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO

MEDELLÍN

2009

AGRADECIMIENTOS

Una vez culminado este proyecto de grado, vemos con gran asombro todo el camino recorrido y nos damos cuenta que no podría haber sido posible sin la solidaridad, el apoyo y la motivación que nos brindaron un sin número de personas.

Especialmente queremos agradecer el apoyo incondicional de nuestros padres quienes con su energía y dedicación nos alentaron a cumplir nuestras metas.

Agradecemos el apoyo y la disponibilidad incondicional de nuestro asesor de tesis Fabio Pineda, quien de una u otra manera nos orientó y dedicó parte de su tiempo para llevar a felices términos este trabajo.

Agradecemos a todo el personal que presta sus servicios en los laboratorios de la universidad Eafit, a la Universidad como tal y a los docentes que brindaron la ayuda y el soporte necesario para la realización del presente proyecto.

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE IMAGENES

LISTA DE TABLAS

LISTA DE ANEXOS

INTRODUCCIÓN	9
RESUMEN	11
1. GENERALIDADES	13
1.1. Antecedentes.	13
1.2. Justificación.	15
1.3. Objetivo General.	16
1.4. Objetivos específicos.	17
2. METODOLOGÍA	18
2.1. Fases del proyecto.	19
2.1.1. Fase 0. Planeación.	19
2.1.2. Fase 1. Desarrollo del concepto.	19
2.1.3. Fase 2. Diseño a nivel sistemas.	19
2.1.4. Fase 3. Desarrollo de detalle.	20
2.1.5. Fase 4. Pruebas y refinamiento.	20
2.1.6. Fase 5. Producción piloto.	20
2.2. Desarrollo de la metodología	21
2.2.1. Fase 0. Planeación.	21
2.2.2. Fase 1. Desarrollo de concepto.	21
2.2.2.1. Mercadeo.	22
2.2.2.2. Diseño.	24
2.2.2.3. Manufactura.	26
2.2.2.4. Otras actividades.	26
2.2.2.5. PDS.	27
2.2.3. Fase 2. Desarrollo a nivel sistema.	34
2.2.3.1. Mercadeo.	34

2.2.3.2.	Diseño.	34
2.2.3.3.	Manufactura.	34
2.2.4.	Fase 3. Desarrollo de detalle.	35
2.2.4.1.	Diseño.	35
2.2.4.2.	Manufactura.	35
2.2.5.	Fase 4. Pruebas y refinamiento.	36
2.2.5.1.	Diseño.	36
3.	MATERIALES.	36
3.1.	Generalidades.	36
3.2.	Materiales utilizados.	37
3.3.	Propiedades.	38
3.3.1.	Fibra de vidrio MAT.	38
3.3.2.	Fibra de vidrio Woven Roving.	39
3.3.3.	Espuma poliuretano estructural.	39
3.3.4.	Resina de poliéster.	40
3.3.5.	Duraluminio.	41
3.3.6.	Polietileno (PEAD).	42
3.4.	Pruebas de material.	42
3.4.1.	Construcción de probetas.	42
3.4.2.	Realización de las pruebas.	43
3.4.2.1.	Prueba flexión.	43
3.4.2.2.	Prueba de compresión.	44
3.4.2.3.	Resultados obtenidos.	45
4.	ANÁLISIS ELEMENTOS FINITOS	46
4.1.	Análisis computacional	46
4.2.	Análisis de elementos finitos.	51
4.2.1.	Análisis de esfuerzos inherentes al peso del usuario.	53
4.2.1.1.	Análisis del chasis lateral.	53
4.2.1.2.	Análisis del espaldar.	59
4.2.1.3.	Análisis reposa pies.	62
4.2.1.4.	Esfuerzos inherentes al ambiente.	64

4.2.4.1.	Esfuerzos en la articulación Chasis Lateral/Espaldar.	64
5.	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	67
5.2.	Construcción de piezas en fibra de vidrio, resina y espuma de poliuretano.	68
5.3.	Pre acabados.	69
5.4.	Construcción de bujes y seguros.	70
5.5.	Unión de los bujes y seguros a las piezas.	71
5.6.	Acabado final.	73
5.7.	Ensamble.	74
6.	PROCESO DE INYECCION DE RESINAS	75
6.2.	Procesos de moldeo por inyección de resinas.	76
6.3.	Componentes necesarios para la inyección de LRTM y VM.	78
6.4.	Características del proceso.	79
6.5.	Pruebas realizadas.	79
6.5.4.	Pruebas con proceso LRTM:	79
6.4.1.1.	Resultados obtenidos.	80
6.4.2.	Pruebas con proceso VM.	81
6.4.2.1.	Resultados obtenidos.	82
7.	PRUEBAS DEL PRODUCTO	84
8.	ELECCIÓN DEL NOMBRE	85
	RECOMENDACIONES	86
	CONCLUSIONES	87
	BIBLIOGRAFÍA	90

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1	Metodo de diseño por Karl Ulrich y Steven D. Eppinger.	18
Imagen 2	Observación no participante.	22
Imagen 3	Guía de entrevista.	23
Imagen 4	Bocetos preliminares.	24
Imagen 5	Referente.	25
Imagen 6	Maquetas experimentales.	26
Imagen 7	Fibra de vidrio MAT.	38
Imagen 8	Fibra de vidrio tipo Woven roving.	39
Imagen 9	Componentes y espuma de poliuretano	40
Imagen 10	Construcción de probetas.	43
Imagen 11	Prueba de tensión.	44
Imagen 12	Diagrama de prueba de compresión.	45
Imagen 13	Realización de las pruebas.	45
Imagen 14	Resultados obtenidos.	46
Imagen 15	Diseño chasis inicial.	48
Imagen 16	Arquitectura final de Vone.	49
Imagen 17	Arquitectura del hueso.	52
Imagen 18	Imagen en CAD del chasis.	53
Imagen 19	Mallado de la pieza.	55
Imagen 20	Imagen de restricciones en el chasis.	56
Imagen 21	Deformación del chasis ampliada 1000 veces.	57
Imagen 22	Deformación máxima sobre la estructura ampliada 1000 veces. ..	58
Imagen 23	Estudio de esfuerzos sobre el espaldar.	59
Imagen 24	Esfuerzos máximos sobre el espaldar y sus respectivos seguros...	60
Imagen 25	Deformación máxima sobre el espaldar ampliada 1000 veces.....	61
Imagen 26	Esfuerzos máximos sobre el apoya pies y sus seguros.....	62
Imagen 27	Deformación máxima sobre el apoya pies ampliada 1000 veces..	63
Imagen 28	Esfuerzos producidos al girar.	65
Imagen 29	Esfuerzos máximos en bujes y seguros.	66
Imagen 30	Deformaciones máximas sobre reposa pies, bujes, tornillos y seguros escala x 1000.	66

Imagen 31	Piezas en espuma de Poliuretano.	68
Imagen 32	Aplicación de las capas de fibra de vidrio y resina.....	69
Imagen 33	Pre acabado.	70
Imagen 34	Elaboración de bujes.	70
Imagen 35	Realización de los agujeros e las piezas.	71
Imagen 36	Unión de los bujes.	72
Imagen 37	Acabado final y pintura.	73
Imagen 38	Prototipo Funcional.	74
Imagen 39	Máquina para proceso de LRTM.	76
Imagen 40	Sistema de proceso VM.	77
Imagen 41	Partes de la máquina RTM.	78
Imagen 42	Prueba inyección por LRTM.	80
Imagen 43	Prueba inyección por VM.....	81
Imagen 44	Fallas en las pruebas realizadas.	83
Imagen 45	Prueba de resistencia a la pieza inyectada por VM.	83
Imagen 46	Pruebas del producto.	84
Imagen 47	Nombre y logo de la silla.	86

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.	Especificaciones de diseño de producto (PDS).....	28
TABLA 2.	Resultado de pruebas.	46
TABLA 3.	Esfuerzos presentes en la estructura de la silla inherentes al peso del usuario	50
TABLA 4.	Esfuerzos presentes en la estructura de la silla inherentes al servicio en el contexto.	51
TABLA 5.	Propiedades de los materiales presentes en la estructura de la silla de ruedas.	54
TABLA 6.	Datos pruebas.	59
TABLA 7.	Datos pruebas de giro	65

LISTA DE ANEXOS

Anexo A	2
Videos	2
Anexo B	3
Estado de arte	3
Anexo C	10
Manual de consideraciones biomecánicas en la silla de ruedas.....	10
Anexo D	21
Medidas antropométricas para el diseño de una silla de ruedas	21
Anexo E	24
Clasificación de movimientos	24
Anexo F	26
Entrevistas	26
Anexo G	34
Parámetros asociados al análisis de elementos finitos	34
Anexo H	40
Planos técnicos	40
Anexo I	74
Normas técnicas colombianas	74

INTRODUCCIÓN

La idea central y aspiración de este proyecto de grado es la presentación, investigación, análisis y exposición del desarrollo del concepto de una silla de ruedas que pueda llegar a mejorar notablemente aspectos relacionados a las limitaciones de desplazamiento y/o características de uso, con las cuales se ven continuamente enfrentados todas aquellas personas poseedoras de algún tipo de discapacidad que consienta la utilización del dispositivo médico antes mencionado.

Por otro lado se busca poder determinar si las decisiones que se tomaron con respecto a los materiales y procesos de construcción que integran el desarrollo del producto, permiten satisfacer los requisitos y evaluaciones necesarias para garantizar el correcto funcionamiento de este en su contexto.

Todos estos estudios se llevarán a cabo, a partir de las nociones, conocimientos y expertises adquiridas a lo largo de la carrera académica, mediante análisis sustanciales de las condiciones que abarcan la concepción de la silla como tal, iniciando en su etapa de creación del concepto de diseño, selección de referente, entre otros y finalizando en la elaboración o materialización del mismo, todo apoyado en las metodologías y herramientas adoptadas para este proceso. Ver capítulo 2.

El hecho de saber a través de la Organización mundial de la Salud (OMS) que cerca del 25% de la población de cualquier país presenta algún tipo de discapacidad, representando para Colombia un 12%¹, genera una responsabilidad inmensa y ha sido una de las motivaciones principales para este desarrollo. No obstante se quisiera que este fuera un llamado de atención y una razón contundente y definitiva para tomar la decisión de volverse una persona más responsable con los usuarios de ese tipo de dispositivos, quienes constantemente están requiriendo de nuevas

¹ *Revista Ocupación Humana On-line (2004, Volumen 9, Numero 1)*

soluciones que les permitan adaptarse más fácilmente a las condiciones de su entorno.

Es allí, donde la ingeniería colombiana podría hacer una entrada en la nueva dinámica global, a través de la creación, implementación y estructuración de un mayor número de conceptos destinados a este sector y a atender necesidades más específicas.

Es muy grato finalmente pensar que este desarrollo ayudará a personas que necesitan mucha atención y en este aspecto es pleno poder colaborar con personas que sufren de discapacidad motora, ofreciéndoles un producto con mejores características y con un mayor grado de asequibilidad.

Resumen

El siguiente proyecto se fundamenta en la generación de una silla de ruedas enfocada en la minimización de su peso y la maximización de su resistencia estructural, a través del uso de un material compuesto como lo es la fibra de vidrio acompañada de resina de poliéster y espuma de poliuretano estructural.

Se pretende hacer uso de un proceso mucho más simple al que se utiliza hoy en día en las sillas convencionales como lo es el metalmecánico, sustituyéndolo de esta manera por medio de la inyección de resina en molde cerrado.

La realización de pruebas, ensayos o análisis se fundamenta en la resistencia de materiales, para buscar la solidez en el diseño de la estructura y pruebas de inyección de resinas, para asegurar el proceso ideal, sin pierde el enfoque en el desarrollo del producto como tal.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. Antecedentes:

En el sector de la salud sobresale con gran importancia el área de la ortopedia, destacándose en el mundo por sus últimos avances en tecnología y desarrollo de una mejor calidad de vida, así como lastimosamente también sobresale el aumento en el número de discapacitados y los usuarios de sillas de ruedas.

Para los arquitectos y para los empresarios, los parapléjicos son invisibles y de alguna manera lo son de verdad, pero por una sencilla razón: no salen de sus casas porque las ciudades en Colombia no están hechas para ellos. La discriminación es, en este sentido, un sinónimo de inexistencia, y la dialéctica, perversa aliada, hace lo demás: como los parapléjicos no existen, no salen a la calle, razón que permite a los constructores birlar las facilidades para su movilidad. Quizá no sea indiferencia, sino más bien cálculos económicos lo que hayan hecho de nuestras ciudades espacios exclusivos para personas sin limitaciones físicas. En Nueva York o en Madrid llama la atención la cantidad de ancianos, ciegos y parapléjicos que andan por calles y plazas, que se mueven solos, atraviesan avenidas, montan en bus y en metro. No necesitan, en general, ser ayudados. Un colombiano ingenuo llega a pensar que el país ha sido privilegiado por la providencia porque no hay tantos lisiados, hasta que descubre que nuestros ciegos y parapléjicos no se ven en calles y avenidas porque el miedo no les permite salir de sus casas.²

La violencia y el trauma craneoencefálico se consideran la primera causa de muerte en Colombia, y Medellín es la ciudad que ocupa el primer lugar. De cada 100.000 habitantes en Colombia, 119 personas mueren por trauma craneoencefálico. En Medellín son atendidos en promedio al mes, 450 pacientes entre los 15 y los 45 años, en plena edad productiva, que llegan a los hospitales con este tipo de trauma. De ellos, un paciente queda cuadrapléjico y seis quedan parapléjicos. En Estados

² Alfredo Molano Bravo (Artículo "Como vive un parapléjico" para la revista SOHO 2005)

Unidos se presentan 52.000 muertes al año, producidas por trauma craneoencefálico y 90.000 personas quedan con discapacidad severa.³

También los accidentes de tránsito en la gran mayoría de los casos generan traumas craneoencefálicos, siempre asociados a lesiones en el cuello y en la columna: de ahí que muchas personas mueran o queden discapacitadas.

Según la OMS los accidentes de tráfico son responsables de casi el 40% de las minusvalías de nuestro país. Cada año 500 nuevos parapléjicos se producen como consecuencia de traumatismos de tráfico.⁴

Es en estos casos en los cuales el sector salud interviene como fuente de comercio con la prestación de servicios. Hay en el medio 689 empresas locales especializadas en la prestación de dicho servicio, de las cuales el 1.25% son especializados en esta área y el 10%⁵ enfocados en el acondicionamiento físico; estos centros especializados se implementan con distintos tipos de productos, de los cuales el 50% son automatizados e importados y con alta tecnología con subsidios gubernamentales de su país de origen, con varios años de uso, lo que evidencia desactualización en el mundo de la medicina, los productos suministrados por empresas colombianas son el otro 50%, las cuales manejan talleres empíricos y es indudable la falta de control y seguimiento de calidad; estas problemáticas son aprovechadas por el estudiante como oportunidad de negocio la cual está relacionada a la generación de una nueva empresa o una ya constituida. Esta oportunidad apunta a la mejora, solución e innovación en los servicios prestados en el sector de la salud más específicamente en el área de la ortopedia.

Existen investigaciones en las cuales se arroja la tendencia creciente del conflicto, como lo indica plantación nacional con la existencia de 70000 minas antipersonales distribuidas en el 33 % del territorio, de un total de 2515 personas afectadas por las minas, encontramos que 1540 corresponden a personas cuya condición es militar y 922 corresponden a población civil. Con base en nuestros registros IMSMA se puede

³ MEDELLÍN, COLOMBIA, SURAMÉRICA AÑO 6 NO 75 DICIEMBRE DEL AÑO 2004
(Periódico para el sector de la salud El Pulso)

⁴ Diario El País, Página 3B, Escribió Ernesto Gómez, Junio 27, Año 2007,

⁵ Cifras según Catalogo de la Salud. PUBLICAR S.A. Año 2007

afirmar que el 76 % de las personas que tienen un accidente con minas quedan heridas, es decir, 1911⁶ personas, lo que trae como consecuencia el fenómeno de personas con discapacidad física, síquica y sensorial; además para el año 2020 en Colombia se aumentara en un 40% el envejecimiento de la población, principal variable de la que depende la incidencia y severidad de las discapacidades , costo de atención que estas personas han de recibir, además de la seguridad social como herramienta para prevenir enfermedades y minimizar el impacto social y económico, con el fin de mejorar la productividad de todo un país; en los países desarrollados , entre 10 y 15 millones de personas por año, sufren inhabilitaciones, como consecuencia de accidentes de tráfico. Los accidentes de tránsito no fatales representan un evento importante puesto que generan altos costos en atención en discapacidad. La incidencia en 1996 es 18.85 por 10 mil habitantes y en 1997, 17 por 10 mil habitantes, solo en Bogotá en el año 2003 sucedieron aproximadamente 115 choques en el día de los cuales el 40% quedaron heridos. Del 40% que quedaron heridos corresponde a 22.256 personas de las cuales se desconoce cuántas se encuentran con discapacidad permanente pero necesitan rehabilitación física⁷.

Estas situaciones coinciden con la necesidad de desarrollar acciones capaces de mejorar la calidad de vida de estas personas de manera que mejore su autonomía personal y reduzca el costo que exige su atención, según la investigación anterior esto puede ser un segmento significativo para un diseño exitoso de una silla de ruedas, la cual se desarrollará en el escenario del proyecto de grado de la carrera ingeniería de diseño de producto de la Universidad Eafit, durante el semestre 2008/2.

1.2. Justificación:

Se justifica llevar a cabo este proyecto de grado debido a que mediante una observación detallada de los usuarios de sillas de ruedas que se desplazan por calles, edificaciones, hospitales, parques, medios de transporte y demás espacios públicos y privados de nuestra ciudad se concluyó que las personas que requieren de una silla de ruedas para ir de un lugar a otro, se encuentran con una fuerte problemática no solo a nivel de los espacios en los que se deben desplazar sino en

⁶ Datos según www.discapacidadcolombia.com, Consulta 2007

⁷ Situación de discapacidad Bogotá. Datos proporcionados por el DANE.

la propia silla de ruedas la que, generalmente, no cumple con las características necesarias para dar al usuario independencia y oportunidad de interactuar con su entorno. Una silla de ruedas es un dispositivo de tecnología de asistencia para movilidad que brinda a la persona con imposibilidad o dificultad para caminar, la oportunidad de desplazarse de manera independiente o en algunos casos simplificar el trabajo de familiares y acompañantes.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que cerca del 25% de la población de cualquier país presenta discapacidad; se estima que el 12% de la población Colombiana (4'200.000 personas) tiene algún tipo de discapacidad o limitación, un estudio sobre discapacidad adelantado por la Universidad Javeriana en 1994 tomó una muestra de 14.160 personas encontrando que la discapacidad más común es la de movilidad con un 31,1% de incidencia⁸. A partir de lo cual se observa que un considerable número de personas presentan dificultad para el desplazamiento, requiriendo de la prescripción profesional de ayudas para movilidad, entre ellas sillas de ruedas. La situación más comúnmente encontrada en Colombia es que la prescripción del sistema de silla de ruedas no se realiza de manera formal, en cuanto los profesionales de la rehabilitación, quienes se encuentran en contacto directo con las personas con discapacidad, no cuentan con instrumentos desarrollados para ésta acción, el usuario termina, entonces, sólo en el momento de decidir qué silla de ruedas requiere y es asesorado, en la mayoría de los casos, por el fabricante —que motivado por intereses económicos y sin las bases conceptuales mínimas— acompaña al usuario y su familia en la adquisición de alguna silla.

De esta manera, se hizo evidente la necesidad de diseñar un producto que se ajuste a una de las tantas necesidades por las cuales atraviesan este tipo de personas, permitiéndoles la máxima funcionalidad, comodidad y movilidad que requieran.

⁸ *Revista Ocupación Humana On-line (2001, Volumen 9, Numero 1)*

1.3. Objetivo General.

- Diseñar, desarrollar y construir una silla de ruedas mediante la cual se pueda ofrecer una alternativa innovadora en aspectos formales, funcionales y tecnológicos, que permita la máxima funcionalidad, comodidad y movilidad para las personas que presentan discapacidad física de miembros inferiores.

1.4. Objetivos específicos.

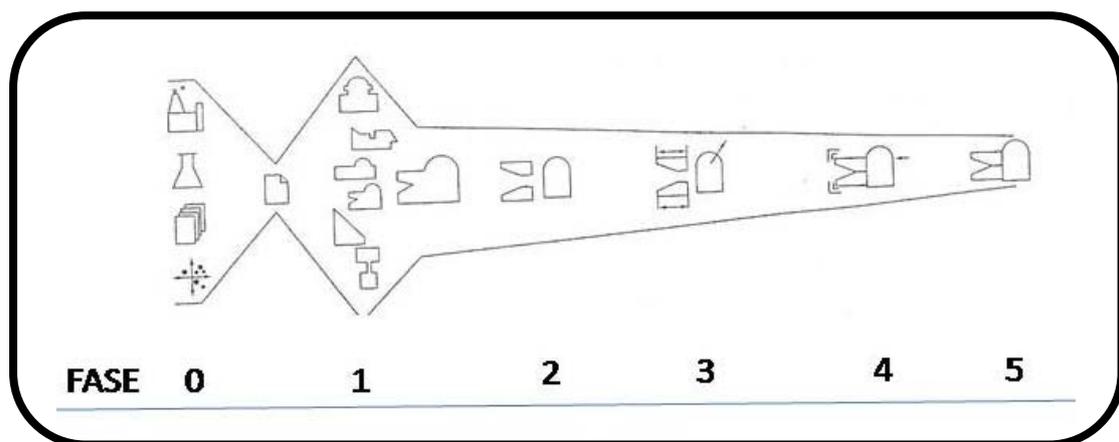
- Conocer nuevas tendencias en diseños, materiales y procesos para desarrollar un nuevo concepto de silla de ruedas utilizando técnicas aprendidas durante la carrera Ingeniería de Diseño de Producto, como Diseño CAD, CAE y CAM, construcción de prototipos y elaboración de pruebas, buscando la mejor opción para su desarrollo.
- Garantizar la resistencia estructural y el correcto funcionamiento a lo largo del ciclo de vida del producto, por medio de la especificación completa de geometría, materiales, partes estándar, procesos y ensamblajes del producto, a través de modelos CAD, planos y un informe de ingeniería.
- Evaluar por medio de pruebas de carácter ergonómico, de usuario, estético y funcional, la viabilidad que el producto tendrá en el mercado desde el punto de vista del usuario seleccionado.
- Apoyar el desarrollo del proyecto mediante la realización y el conocimiento de estudios que permitan identificar claramente los requerimientos de los usuarios, para tener un referente de sus necesidades y deseos que permitirá tomar decisiones de diseño más acertadas.
- Materializar por medio de un prototipo funcional en escala 1:1 el concepto de diseño desarrollado durante toda la etapa del proyecto de grado.
- Promover la discapacidad como una situación normal que es parte de la experiencia de vida humana, que no disminuye sus derechos personales o su participación en la sociedad.

2. METODOLOGÍA

La metodología que utiliza Ulrich y Eppinger en su libro Diseño y desarrollo de productos, enfoque multidisciplinario divide el proyecto en 6 diferentes fases: Planeación, Desarrollo de conceptos, Diseño a nivel sistema, Diseño de detalles, Pruebas y refinamiento y Producción Piloto. Cada una de ellas desarrollada desde 3 enfoques diferentes : Mercadotécnica, Diseño y Manufactura.

Esta metodología fue elegida porque contiene un completo desarrollo de actividades destinadas al buen desarrollo del producto, debido a que no solo se ve el producto a partir de un solo enfoque como lo hacen la mayoría de las metodologías, esta comprende que cada fase debe contener un desarrollo multidisciplinario.

Imagen 1: Metodo de diseño por Karl Ulrich y Steven D. Eppinger



Fuente: Diseño y desarrollo de productos. Enfoque Multidisciplinario. Tercera edición. Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger. EDITORIAL McGrawHill 2004, Pag 14.

2.1. Fases del proyecto.

2.1.1. Fase 0. Planeación:

Es la fase que antecede a la aprobación del proyecto, en donde se realiza una valorización de la capacidad de realización de un nuevo producto, se comienza a indagar qué nuevas tecnologías existen en el medio, y se procede a encontrar una

posibilidad de negocio, para la cual se definen los segmentos de mercado y se planifica la financiación del mismo⁹.

2.1.2. Fase 1. Desarrollo del concepto:

En esta etapa se empieza el desarrollo del concepto y se traducen las necesidades del mercado como deseos y especificaciones que rigen las características del producto, se realiza un estudio exploratorio del mercado como productos existentes y complementarios, mecanismos, materiales, tendencias y todo lo que pueda afectar al proyecto tanto positiva como negativamente. Aquí se realizan pruebas con maquetas experimentales con el propósito de comprobar la factibilidad y verificar que el diseño este bien concebido¹⁰.

2.1.3. Fase 2. Diseño a nivel sistema:

Es donde se desgloza el proyecto en subsistemas, componentes e interfases, se desarrollan arquitecturas del producto basadas en el desarrollo del referente, usualmente se utilizan diagramas de flujo para tomar decisiones acertadas, en esta fase el producto se conceptualiza y se desarrollan mecanismos. En cuanto al mercado se observan y establecen precios que los usuarios estarían dispuestos a pagar por el productoⁱ.

2.1.4. Fase 3. Diseño de detalle:

Se especifica una geometrización completa de la arquitectura del producto, materiales utilizados, tolerancias dimensionales, acabados superficiales y la identificación de todas las partes estándar que llevará el producto, se establece un plan de acción para la conformación del producto y se designa el herramental

⁹ Diseño y desarrollo de productos. Enfoque Multidisciplinario. Tercera edición. Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger. EDITORIAL McGrawHill 2004, pag 13

¹⁰ Diseño y desarrollo de productos. Enfoque Multidisciplinario. Tercera edición. Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger. EDITORIAL McGrawHill 2004, pag 13

necesario para su construcción, el resultado de esta fase son los planos de taller y de ensamble, herramental requerido para la producción, las especificaciones de las piezas necesarias y los planes de producción para la fabricaciónⁱⁱ.

2.1.5. Fase 4. Prueba y refinamiento:

Se construyen prototipos con materiales reales o ideales con el fin de evaluar si el producto va a funcionar como realmente está pensado y si satisfacen las necesidades claves del cliente a estos prototipos se da la denominación (Alfa) debido a que no están concebidos con los procesos reales de fabricación. Los prototipos (Beta) se realizan con procesos predeterminados y con el fin de evaluar el desempeño y fiabilidad para identificar cambios de ingeniería necesarios¹¹.

2.1.6. Fase 5. Producción piloto:

En esta fase se fabrica el producto según el proceso de producción predeterminado con el propósito de capacitar a la fuerza laboral y resolver los problemas, generalmente los productos piloto se les entregan a los clientes preferenciales y evaluados de manera cuidadosa. En cierto punto el producto es lanzado y se encuentra disponible para su distribución¹².

2.2. Desarrollo de la metodología

En las fases de este proyecto no se realizan todos los enfoques, debido a que el proyecto apunta al desarrollo de un proyecto asociado al área de ingeniería y producción¹³, por lo que solo se tomará lo necesario de los puntos de mercadeo y

¹¹ Diseño y desarrollo de productos. Enfoque Multidisciplinario. Tercera edición. Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger. EDITORIAL McGrawHill 2004, pag 15

¹² Diseño y desarrollo de productos. Enfoque Multidisciplinario. Tercera edición. Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger. EDITORIAL McGrawHill 2004, pag 15

¹³ Guía de Proyecto de grado, Ingeniería de diseño de producto, Primera edición. José F. Martínez. Fondo editorial Universidad EAFIT. 2006. Pag 14.

se hará mayor énfasis en el diseño y la manufactura. Además solo se llegará hasta la construcción del prototipo debido a que hasta ese punto está estipulado en el los objetivos incluidos en el anteproyecto.

2.2.1. Fase 0. Planeación:

En esta fase del proyecto se planea el desarrollo de una silla de ruedas cuyo valor agregado se orienta hacia la reducción del peso, la resistencia y desarrollos formales que evidencien un excelente diseño, poniendo a prueba la idea de un material, cuyas aplicaciones inicialmente son escasas en esta clase de productos y que probablemente podría ofrecer una alternativa exitosa para su desarrollo. A partir de esta etapa se genera un anteproyecto que se somete a evaluación y finalmente es aprobado, permitiendo dar inicio con la fase 1.

Se establecen las metas y el alcance que tendrá el proyecto con una programación de actividades.

2.2.2. Fase 1. Desarrollo del concepto:

Es la parte del proyecto en donde se observa la realidad del panorama, se hace un estudio de las marcas y productos sustitutos existentes, que perfiles poseen los usuarios que adquieren el producto, cualidades buscadas en el momento de la adquisición, en que se basan las compañías para sacar los productos al mercado y competir con las demás. Para encontrar las respuestas a estas preguntas existen varias herramientas que ayudan a la exploración tanto del usuario como del mercado y del producto. (Ver anexo B)

2.2.2.1. Mercadeo

- **Observación:** La observación minuciosa de las personas con discapacidad que se encuentran en lugares públicos permite identificar las actividades comunes que ellos realizan, tales como subirse a un auto, subir o bajar escalones, desplazarse por lugares como el metro, andenes, restaurantes, entre otros.

La observación complementada con las otras actividades permite concluir, especificaciones y deseos que tienen los usuarios del producto. Ver Tabla 1

Imagen 2: Observación no participante



- **Entrevista a usuario:** Según lo investigado se acuerda una guía con preguntas que intentan encontrar algunas especificaciones como posición adecuada del centro de masa, cuales llantas serían las más adecuadas en los terrenos de la ciudad, que características tienen las sillas modernas y las sillas convencionales, que desearían encontrar en una nueva silla. La realización de las entrevistas se puede escuchar en los anexos. (Ver anexo F)

Guía de entrevista

- ¿Cuántos años de Discapacidad llevas?
- ¿Qué problemas has encontrado con más frecuencia en la ciudad en cuanto al desplazamiento?
- ¿En cierto momento te sentís, como que no te tienen en cuenta?
- ¿Qué te ha molestado durante la discapacidad?
- ¿Qué piensas que se podría mejorar en el entorno?
- ¿Qué cosas buenas o atributos positivos posee o encuentras en tu silla?
- ¿Qué aspectos negativos le has encontrado a la silla?
- ¿Qué crees que debe poseer una buena silla de ruedas?
- ¿Que debería tener la silla de ruedas de los sueños?
- ¿Es importante el peso?
- ¿Qué es lo más importante que debe tener una silla de ruedas?
- ¿Bajo qué circunstancias pliega usted la silla de ruedas?
- ¿Qué dificultad de subir rampas?
- ¿Qué opinión tienes de las sillas de ruedas en el mercado?

Imagen 3: Guía de entrevista

- **Consulta en Internet:** Esta búsqueda sirvió para hallar rangos de las medidas que deben tener la mayoría de sillas, que restricciones se deberían tener a la hora del desarrollo, que empresas poseen una mayor participación en el mercado, que ventajas competitivas tienen y que es lo que más valoran a la hora de ofrecer sus productos. (Ver anexo B y C)
- **Visita a los puntos de venta:** Esta actividad se realiza con el fin de conocer precios reales e investigar qué tecnologías se venden, todo esto brinda información que conlleva a generar ideas para el proyecto.

2.2.2.2. Diseño

- **Bocetos preliminares:** Se realizan bocetos preliminares buscando entender la conformación del producto y sus sistemas, sirve como elemento de estudio del

producto porque por medio del dibujo el diseñador contempla todas las piezas del artefacto que empieza a idealizar.

Imagen 4: Bocetos preliminares

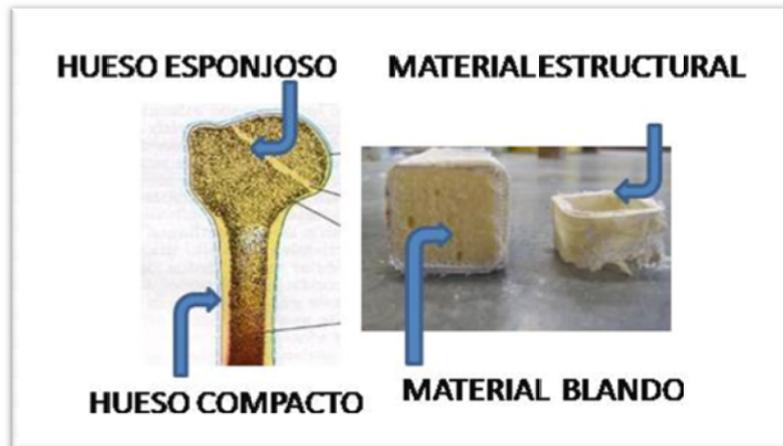


- **Referente:** Se decide optar por los huesos como referente de diseño, debido a la relación existente entre la composición del material elegido para la silla y la estructura de estos.

Se sabe que en los elementos los esfuerzos máximos tienen efecto en las extremidades o paredes de los perfiles, es por esto que el material estructural en este caso la fibra de vidrio + resina actúa como elemento base de resistencia a diferencia del material interno en este caso la espuma de poliuretano que actuaría como elemento formal y a pesar de que también genera resistencia a los esfuerzos, esta no es considerada como elemento estructural.

Los huesos poseen la misma estructura conformados la parte externa de hueso compacto y la parte interna de hueso esponjoso. Esto los hace elementos livianos y a su vez resistentes. Ver imagen 5

Imagen 5: Referente



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos26/histologia-osea/Image646.jpg>

- **Construcción de prototipos experimentales:** Se construyen maquetas de madera con posibles mecanismos, con el ánimo de validar conceptos y buscar resolver algunas inquietudes en cuanto la conformación del producto.

Imagen 6: Maquetas experimentales



2.2.2.3. Manufactura

- **Evaluación del proceso:** Debido a que el proceso Vacuum Molding y RTM son relativamente nuevos en la empresa, no se tenía conocimiento de este, pero con la asesoría del personal de la universidad de los talleres de diseño se vio que la realización era factible tanto del prototipo como de una producción industrial.
- **Pruebas de material:** Con el fin de verificar las propiedades físicas del material se realizan pruebas de torsión y compresión a probetas construidas manualmente y conocer cuan resistente resulta.

2.2.2.4. Otras actividades:

- **Verificación de patentes:** Mediante http://www.surfip.gov.sg/_patent-f.htm, que es el buscador de patentes del gobierno de Singapur y además de los países más importantes en cuanto a esto se refiere, se realiza una búsqueda de sillas de ruedas realizadas con fibra de vidrio sin encontrar ninguna patente.

2.2.2.5. PDS: Especificaciones de Diseño para el Producto

A partir de las observaciones realizadas en la etapa inicial del proyecto, el análisis del estado de arte Ver Anexo B. las entrevistas formales e informales Ver Anexo F, investigaciones de carácter biomecánico y antropométrico Ver Anexo D y otras indagaciones a través de fuentes como revistas, libros e internet, entre otras, se hallaron una serie de necesidades y deseos que finalmente a través del PDS se llevaron a términos de requerimientos técnicos y especificaciones de diseño que servirían para guiar la etapa de conceptualización, análisis y construcción final del prototipo.

En la tabla 1. Se pueden apreciar todas las especificaciones de diseño de producto correspondientes a la silla de ruedas Vone*.

Importancia.

1. Poca Importancia
2. Se podría considerar
3. Se debe considerar
4. Importante
5. Sumamente importante

- Demanda: Son requerimientos que DEBE tener el Producto.
- Deseo: Requerimientos que el cliente, usuario o Diseñador le gustaría que tuviera el producto, solo si son posibles.

* Para una mayor información sobre los productos competidores, refiérase al Anexo B. Estado de arte

Tabla 1. Especificaciones de diseño de producto.

Elemento	Necesidad	Interpretación	Requerimientos Técnicos			Imp.	D/d	
			Métrica	Unidad	Valor			
DESEMPEÑO Principales características del funcionamiento del producto.	Que la silla sea estable.	El Producto presenta un ajuste adecuado en sus partes móviles.	Tolerancias Dimensionales	mm	+0.5 - 0.5	5	D	
				(Ver Anexo H. Planos técnicos del producto)				
	Que la silla se pueda maniobrar fácilmente.	El Producto debe poder girar sobre su propio eje con facilidad.	Grados de giro	°	360	5	D	
				(Ver Anexo A. Videos: Video 4. Prueba de producto - Giro sobre su eje.wmv)				
	Que la silla sea durable.	El Producto opera con total normalidad durante todo su ciclo de vida.	Tiempo	Años	7	4	D	
	Que la silla sea fácil de plegar.	El Producto requiere de pocos mecanismos para efectuar la acción de plegado.	Cantidad de mecanismos	#	Máx. 3	4	d	
El tiempo de Plegado del producto es relativamente corto.		Tiempo	s	Máx. 60	4	d		
							(Ver Anexo A. Videos: Video 8. Prueba de producto - Plegado y almacenamiento en carro.wmv)	

Elemento	Necesidad	Interpretación	Requerimientos Técnicos			Imp.	D/d	
			Métrica	Unidad	Valor			
MATERIALES Principales características que hacen apropiado un material para la manufactura y el desempeño del producto.	Que resista al uso y al abuso normal de la función.	Los materiales del producto presentan buenas propiedades mecánicas.	Esfuerzo último de tensión	MPa	Mín. 260	5	D	
		(Ver Capítulo 3. – 3.4 Pruebas de material)						
		Los materiales del producto se adecuan a su función.	Tipo de Materiales	(Ver Capítulo 3. Materiales)	5	D		
	Los materiales del producto son resistentes a los agentes externos a los que se encuentran expuestos.	Tipo de Materiales	(Ver Capítulo 3. Materiales)	4	D			
	Que la silla sea sencilla y económica.	El diseño del producto se concibe con uso de pocos materiales, simplificando de esta manera el ensamble y minimizando costos.	Cantidad de materiales usados	#	Máx. 5	4	d	
		Los materiales del producto se distribuyen en el mercado nacional y son fáciles de conseguir	Porcentaje	%	100	3	d	

Elemento	Necesidad	Interpretación	Requerimientos Técnicos			Imp.	D/d
			Métrica	Unidad	Valor		
ERGONOMÍA Componentes de la interacción del usuario con el producto.	Que la silla sea cómoda.	Las dimensiones del producto garantizan una postura confortable y son acordes a las medidas del cuerpo humano.	(Ver Anexo C. Consideraciones biomecánicas para el diseño de las sillas de ruedas)			5	D
		El producto presenta un asiento que se adapta a la contextura física y al peso de cada usuario.	(Ver Anexo D. Medidas antropométricas para el diseño de una silla de ruedas)			5	D
	Que los movimientos sean naturales y no exijan mucho esfuerzo.	El producto involucra para su operación movimientos suaves y normales.	Tipos de movimientos	Clases	1, 2, 3 y 4	4	d
			(Ver Anexo H. Clases de movimientos)				
		El producto no genera lesiones en el usuario.	Cumplimiento de las normas	NTC	4265, 4266, 4267, 4268 y 4269	5	D
			(Ver Capítulo Normatividad)				
	Que el plegado sea fácil, cómodo y claro.	Los Mecanismos de Plegado del producto se encuentran en lugares accesibles para el usuario.	Tipos de mvts. para acceder a los seguros.	Clases	1, 2, 3 y 4	4	d
(Ver Anexo H. Clases de movimientos)							
Que la silla deje salir de ella fácilmente.	El Producto permite que el usuario se pueda retirar con total fluidez.	Cantidad de elementos obstaculizadores	#	0	4	D	

Elemento	Necesidad	Interpretación	Requerimientos Técnicos			Imp.	D/d
			Métrica	Unidad	Valor		
PROCESOS DE MANUFACTURA Especificaciones de producción.	Que sea fácil de fabricar.	Los procesos de manufactura se pueden realizar en las instalaciones disponibles en la Universidad Eafit.	Porcentaje	%	90 - 100	3	D
	Que sea rentable.	Los procesos de manufactura son simples y se pueden estandarizar.	Cantidad de equipos por pieza	#	Máx. 3	4	d
			Cantidad de de procesos por pieza	#	Máx. 5	4	d
				Porcentaje	%	70 - 100	4
USUARIO Requerimientos de la persona que va a operar el producto.	Que la silla pueda ser usada por el usuario sin presencia de personal especializado.	La interacción del usuario con el producto es simple y puede requerir de personas que no sean médicos o especialistas.	Cantidad de personas.	#	Máx. 2	4	d

Elemento	Necesidad	Interpretación	Requerimientos Técnicos			Imp.	D/d
			Métrica	Unidad	Valor		
MANTENIMIENTO Rutina que requiere el producto para asegurar la eficiencia en el uso.	Que la silla no necesite constantemente ajustes, cambios y limpieza de componentes.	El producto presenta componentes resistentes al uso continuo y a los agentes externos. (Polvo, Humedad, Entre otros)	Tiempo para cambiar componentes	Años	Mín. 2	3	D
			Tiempo de limpieza	Minutos	Máx. 60	2	d
	Que el mantenimiento preventivo lo pueda realizar un familiar o el usuario mismo.	El producto no requiere de personal especializado para su mantenimiento.	Cantidad de personas con expertise	#	0	4	d
	Que los repuestos sean fáciles de conseguir.	El producto presenta piezas estándar que se encuentran disponibles en el mercado nacional.	Porcentaje	%	Mín. 40	4	d
TAMAÑO Y PESO	Que la silla sea liviana.	El peso del producto es proporcional a la capacidad Máxima de carga por parte del usuario.	Peso.	Kg.	Máx. 12	4	d
	Que la silla plegada quepa en el carro o en el portaequipaje.	Las dimensiones del producto plegado son adecuadas para transportar y almacenar (Principalmente en vehículos)	Dimensiones	mm	400x475x624	4	d
			(Ver Anexo A. Videos: Video 8. Prueba de producto - Plegado y almacenamiento en carro.wmv)				

Elemento	Necesidad	Interpretación	Requerimientos Técnicos			Imp.	D/d
			Métrica	Unidad	Valor		
SEGURIDAD Requerimientos que debe cumplir el producto para garantizar la integridad.	Que sea segura.	El Producto está diseñado para garantizar la integridad física del usuario.	(Ver Capítulo 4. Análisis de elementos finitos)			5	D
	Que los elementos estén libres de filos o bordes cortantes.	El producto no posee bordes o elementos peligrosos.	Radio de las aristas.	mm	Mín. 3	3	D
	Que la silla pueda superar los obstáculos cotidianos (Ascensores, aceras, escaleras, entre otros).	El producto está diseñado para garantizar un desplazamiento adecuado en el entorno al cual se encuentra enfrentado el usuario y responde de manera adecuada a las condiciones del entorno al cual se somete.	(Ver Anexo A. Videos de pruebas de producto)			5	D
APARIENCIA Y ESTÉTICA	Que tenga una apariencia innovadora y que no parezca una silla de hospital.	El producto brinda armonía visual entre usuario-contexto.	El diseño de la silla presenta geometrización en su arquitectura de forma y está basado en un referente formal y un concepto definido.			4	d
			Cantidad de elementos formales (líneas, curvas, colores, entre otros)	#	> 1	4	d
COSTO Elementos que se asigna a la variable del precio del producto.	Que la silla sea económica,	El producto posee un precio asequible en el mercado y logra competir contra los productos sustitutos y de la competencia.	Dinero	\$ Col.	2'000.000	4	d

2.2.3. Fase 2. Diseño a nivel sistema:

En esta fase se concibe la silla como un sistema y se desglosa con el fin de entender cada uno de sus mecanismos por separado y para comprenderla como un conjunto de funciones que unidas generan lo deseado.

2.2.3.1. Mercadeo

- **Se establece un rango posible de precios supuestos:** Se calcula un posible precio de venta que compite con sillas de menores beneficios sin llegar a hacerlo en materia de costos, debido a que no es la estrategia que se desea reflejar en cuanto al diseño e imagen del producto.

2.2.3.2. Diseño

- **Generación de arquitecturas y/o alternativas:** Se realizan sketch de la silla de ruedas evaluando colores, formas, mecanismos e interfaces.
- **Generación de matrices:** Se evalúan los diseños mediante matrices que arrojan las mejores posibilidades y mediante una unión de las funciones se obtiene un concepto, depurado y refinado.

2.2.3.3. Manufactura

- **Identificar los proveedores:** Se buscan los mejores proveedores de los materiales requeridos para la construcción que son: la espuma de poliuretano estructural, la fibra de virio, la resina, el peróxido, tornillería y demás componentes utilizados. Ver Capítulo 3. Materiales.
- **Evaluar entre adquirir o hacer:** Cada componente de la silla se evalúa con el fin de conocer que piezas se construyen, que piezas son estándar y se conseguirían en el medio y que piezas se desarrollarían con terceros.

Se construyen: Piezas del chasis, bujes, apoya pies, moldes.

Se compran: Tornillos, arandelas, llantas, frenos.

Hacer con terceros: Silla, cojín.

2.2.4. Fase 3. Diseño de detalle

Es la fase en donde se construye y se dejan claros los procesos de producción en los cuales se evalúa si el diseño está bien concebido en todo su conjunto.

(a) Diseño

- **Definición de la geometría de las partes:** Se alcanza el desarrollo de cada pieza y mecanismo del producto.
- **Planografía:** Se obtiene planos de taller y de ensamble, sub-ensambles, tolerancias dimensionales, acabados. (Ver Anexo H)
- **Materiales:** Son asignados todos los materiales tanto para el producto como para la construcción de prototipos. (Ver Anexo H)

(b) Manufactura

- **Procesos de realización de partes:** Se fabrican las piezas del prototipo.
- **Definición del proceso de producción:** Con la colaboración del profesor de materiales de la universidad Eafit, Rodrigo Vergara¹⁴, se desarrolla un plan de actividades para realizar la inyección de las piezas.

¹⁴ Rodrigo Vergara. Profesor de materiales compuestos de la Universidad EAFIT, Departamento de Ingeniería, Año 2009-1

- **Construcción de herramientas:** Se fabrican los moldes con las especificaciones recibidas.
- **Abastecimiento de materia prima:** Se consiguen los materiales para fabricar el prototipo y partes solicitadas, los permisos necesarios para el uso de las máquinas requeridas.

2.2.5. Fase 4. Pruebas y refinamiento

Es la fase en donde se realizan todo tipo de pruebas con el fin de corregir defectos o imperfecciones y observar el desempeño del producto en condiciones reales por parte de los usuarios. Existe una retroalimentación por parte de los usuarios a los diseñadores para corregir los prototipos siguientes hasta llegar a un diseño aprobado. Debido a que el proyecto de grado solo abarca hasta la concepción del un prototipo (Alfa), en esta fase solo se realizaron pruebas de diseño, en base al alcance determinado.

(a) Diseño

- **Pruebas de diseño:** Se realizan pruebas subiendo y bajando escalones y rampas, realizando giros sobre su eje, test de estabilidad y de dirección para eventuales desarrollos. Se verifica lo establecido en las normas técnica NTC. (Ver Anexo A. Videos)

3. MATERIALES

3.1. Generalidades.

Este proyecto pretende desarrollar un producto cuyas piezas estén compuestas de la unión de dos materiales, fibra de vidrio + resina y espuma de poliuretano estructural.

3.2. Materiales utilizados

(a) Chasis

- Espuma de poliuretano estructural
- Fibra de vidrio MAT
- Fibra de vidrio Woven Roving
- Resina de poliéster

(b) Soporte de llantas delanteras

- Duraluminio

(c) Apoya pies:

- Polietileno HD

(d) Asiento y correas

- Lona

(e) Bujes

- Cobre

(f) Barras de chasis

- Tubería de acero

3.3. PROPIEDADES

3.3.1. Fibra de vidrio MAT.

Esta fibra es un refuerzo no tejido y tiene excelentes propiedades para el moldeo, es utilizada para fabricación de partes de autos, muebles y piezas para el baño.

Características: Tamaño uniforme, fácil impregnación de la resina, buena propiedad de cobertura, alta transparencia, buen acabado y alta retención de la humedad¹⁵.

Imagen 7: Fibra de vidrio MAT



Fuente: http://www.distel.com.mx/htm_espaniol/html/catalogue/fibra_de_vidrio.html

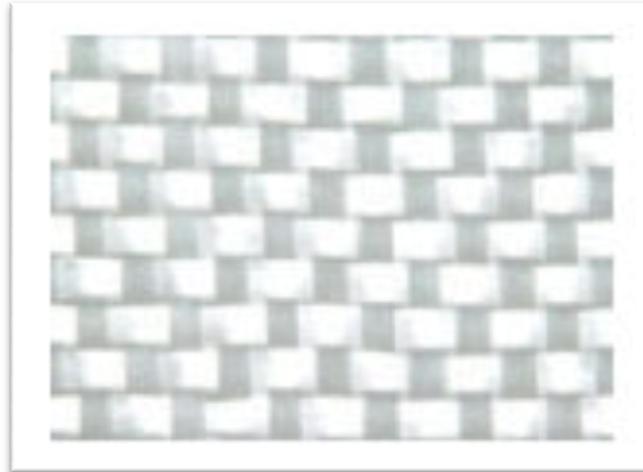
3.3.2. Fibra de vidrio Woven Roving:

Es una tela fabricada con fibras entretrejidas y es utilizada en productos que requieren alta resistencia de esfuerzos como botes, tanques de almacenamiento, contenedores y estructuras arquitectónicas.

¹⁵ http://www.distel.com.mx/htm_espaniol/html/catalogue/fibra_de_vidrio.html. Empresa Distel S.A, año de consulta 2009

Características: Bajas impurezas y decoloraciones, secado rápido, Tamaño uniforme del calibre de la tela, buenas propiedades de cobertura, alta rigidez mecánica y resistencia a la humedad¹⁶.

Imagen 8: Fibra de vidrio tipo Woven roving



Fuente: http://www.distel.com.mx/hm_espaniol/html/catalogue/fibra_de_vidrio.html

3.3.3. Espuma de poliuretano estructural:

Es un material que posee una muy buena resistencia a la corrosión, aislamiento térmico e impermeabilidad el agua. Es generalmente utilizado para aislamiento de calor, filtraciones de agua y algunas veces como refuerzo estructural. Su fabricación resulta de la unión de dos componentes (Poliol componente A estructural e Isocianato B Rig Dow)

Propiedades y ventajas: Actúa como capa distribuidora de cargas, adherencia a todo tipo de materiales, auto-extinguible, constante dieléctrica muy baja, estable dimensionalmente, excelente capacidad aislante, excelente sellado, fácil aplicación, muy buena estabilidad, muy buena resistencia a la compresión y peso ligero¹⁷

¹⁶http://www.distel.com.mx/hm_espaniol/html/catalogue/fibra_de_vidrio.html. Empresa Distel S.A, año de consulta 2008

¹⁷ http://www.quiminet.com.mx/ar3/ar_YQ%2514%2588%25D0w%25C1..htm . Consulta 2008

Imagen 9: Componentes y espuma de poliuretano



3.3.4. Resina de poliéster.

Es una resina termofija y generalmente se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente, para polimerizarlas es necesario la adición del acelerador y catalizador, o por acción del calor, pasan de su estado líquido viscoso a sólido, a temperatura ambiente y sin necesidad de aplicación de presión externa. Esta transformación de líquido a sólido es una reacción química (polimerización) y se conoce como CURADO (endurecimiento). Este endurecimiento no se presenta inmediatamente, se adicionan los promotores de curado o se inicia el calentamiento; transcurre algún tiempo en el cual la resina continúa en estado líquido y es en este lapso en que el moldeador da la forma deseada a la resina; posteriormente, el líquido pasa a un estado gelatinoso y luego presentará las características de un sólido rígido que nunca más podrá ser transformado de nuevo en líquido para cambiar de forma. La reacción de curado de las resinas termofijas es de tipo irreversible, es decir no puede volverse a su estado inicial.

La resina de poliéster tiene buena resistencia química y excelente propiedades mecánicas.

Estas son líquidos viscosos compuestos principalmente de una cadena lineal larga (polímero), un solvente que participa en la reacción de curado o

endurecimiento (monómero) y agentes inhibidores que retardan la reacción hasta cuando la resina va a ser usada¹⁸.

La resina de poliéster es muy adecuada para realizar materiales compuestos debido a su gran capacidad para permeabilizar muy bien las fibras existentes (Carbono, Vidrio, Kevlar, entre otras).

La función principal que asume para el desarrollo del producto es de proveer de rigidez y resistencia a las diferentes piezas, mediante un desplazamiento de la carga a lo largo de hilos presentes en la fibra.

Este material posee muy buena resistencia contra los agentes del ambiente externo al cual la silla será sometida como el sol, agua, polvo, entre otros, lo cual garantiza un tiempo de vida acorde a las sillas de la competencia.

3.3.5. Duraluminio.

Es una aleación de aluminio de cobre y magnesio como elementos principales, y manganeso y silicio como elementos secundarios, pertenece a la familia de aluminio-cobre (2000). Este presenta adecuadas propiedades de resistencia mecánica, aunque no posee buena resistencia a la corrosión, es difícil realizar procesos de soldadura y anodizado¹⁹.

Debido a que el proyecto apunta a la realización de un producto de bajo peso, se utiliza este material ya que es liviano y resistente a esfuerzos mecánicos, un requerimiento fundamental debido a la alta seguridad que debe presentar el producto por tratarse de la salud y seguridad humana.

¹⁸<http://74.125.47.132/search?q=cache:KeaChfUhWdQJ:www.exiplast.com/pdf/mat1.pdf+propiedades+de+la+resina+poliester&cd=4&hl=es&ct=clnk&gl=co>. Consulta 2008

¹⁹ <http://aluminioyduraluminio32.blogspot.com/> publicado por Jardin 3000 Consulta 2008

3.3.6. Polietileno (PEAD).

Es un material termoplástico de fácil moldeo debido a que es uno de los polímeros más sencillos que existen, Es un polímero muy ligero, sólido, incoloro, traslúcido y muy flexible. Atacado por los ácidos, pero resistente al agua a 100°C y a la mayoría de los disolventes ordinarios²⁰.

No es tóxico, resistente a las bajas temperaturas, altamente a la tensión, compresión, tracción, baja densidad en comparación con metales u otros materiales, es impermeable, inerte (al contenido), presenta baja reactividad, y baja estabilidad dimensional.

3.4. Pruebas de material

3.4.1. Construcción de probetas:

Las probetas se realizan de acuerdo con las medidas generales del chasis de la silla de ruedas, en donde el perfil tiene forma rectangular con un redondeo de R=5mm en las aristas y cada lado tiene una medida de 30mm. Las probetas destinadas a las pruebas de flexión se construyen con 15 cm de largo y la destinada a compresión se construye con 9 cm de largo, debido a que para esta última el largo no se considera crucial para obtener resultados precisos.

Se aplican tres capas de fibra, la primera y la tercera están cubiertas con fibra Woven Roving y la del medio se aplica con fibra MAT. Ver imagen 10.

²⁰ <http://www.construmatica.com/construpedia/PEAD> Publicado por Construmática, consulta 2008

Imagen 10: Construcción de probetas



3.4.2. Realización de las pruebas:

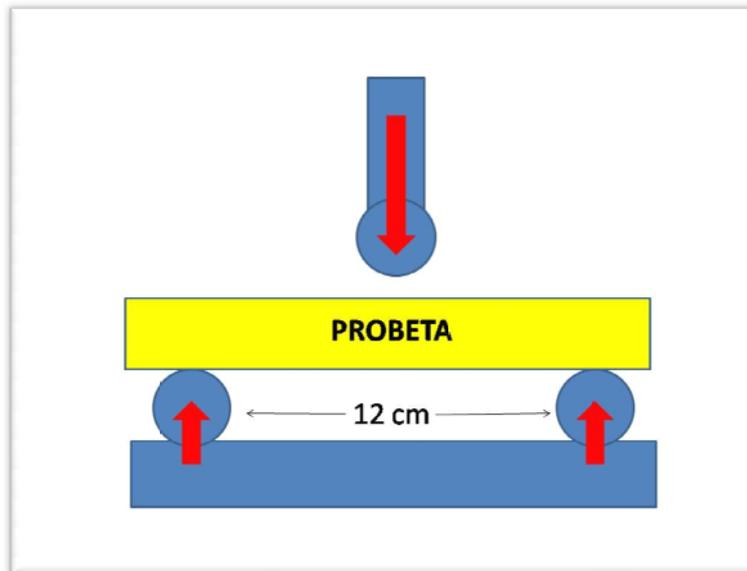
Se consigue el espacio en la máquina Universal de la Universidad Eafit, con solicitud del asesor del proyecto.

Se realizan dos pruebas de flexión y una de compresión, con la intención de conocer cuáles son a grandes rasgos las propiedades del material y observar su comportamiento durante y después de estas.

3.4.1. Prueba de Flexión:

Se ajusta la máquina poniendo las bases a una distancia de 12 cm de separación entre puntos de contacto de tal manera que la probeta quede centrada, tal cual se evidencia en imagen 11. (Ver Anexo A. Videos)

Imagen 11: Prueba de tensión.



3.4.2. Prueba de compresión:

Para esta prueba es necesario que las caras de la probeta en donde se aplican los esfuerzos sean paralelas entre si y perpendiculares a las demás.

Se ubica la probeta en una plataforma en donde literalmente es comprimida o aplastada, con el fin de obtener datos sobre la resistencia del material en situaciones de compresión, además se analizan las posibles causas de la falla. Ver imagen 12.

Imagen 12: Diagrama de prueba de compresión.

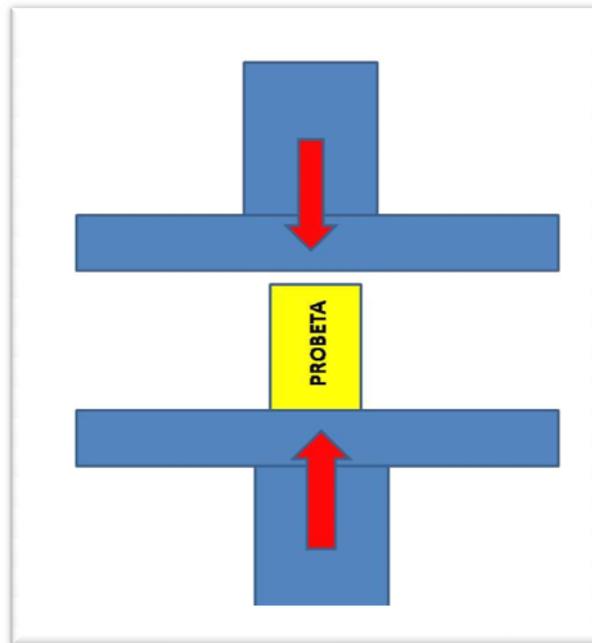


Imagen 13: Realización de las pruebas



3.4.2.1. Resultados obtenidos:

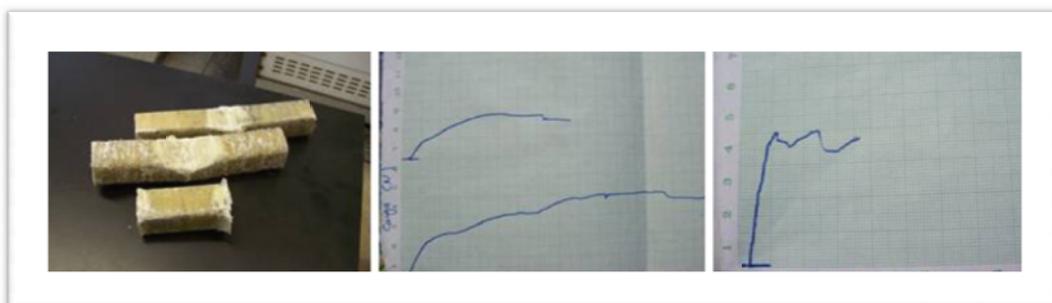
En las pruebas realizadas se obtiene los valores máximos que soportan las probetas a flexión y a compresión. Ver tabla 2.

Tabla 2: Resultado de pruebas.

Probeta	Resultado
Probeta 1 a flexión	408,163 N
Probeta 2 a flexión	345,38 N
Probeta compresión	969,387 N

Analizando las fallas en las probetas podemos afirmar que las que estuvieron sometidas a flexión fallaron por esfuerzos de compresión, debido a que el material se quiebra en la parte superior a donde se ejerce el esfuerzo, lo que confirma que el material soporta mejor los esfuerzos a tensión que a compresión. Ver imagen 14

Imagen 14: Resultados obtenidos



Para el análisis de estos resultados es importante tener en cuenta que entre mayor sea el número de capas de fibra mayores serán los esfuerzos que pueden soportar, además al aplicar la resina es posible que se generen burbujas que actúan como poros o grietas facilitando la falla del material en esos puntos.

4. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

4.1. Análisis Computacional

Con el objetivo de acortar el tiempo de desarrollo de la silla de ruedas, tener un conocimiento más amplio de su respuesta en condiciones de servicio simuladas, evitar problemas antes de su construcción y garantizar su estabilidad y calidad, se analizó la estructura de esta, por medio del método de los elementos finitos, mediante el software Ansys Workbench 10.0²¹ .

Uno de los retos más grandes fue encontrar una alternativa que permitiera un plegado sencillo, rápido y muy compacto y que además garantizara la estabilidad del producto, puesto que entre más sub-ensambles posea el diseño de la estructura de una silla de ruedas, es más factible que esta tienda a ser inestable. Según investigaciones de Sunrise Medical Co “En una silla plegable aproximadamente el 20% de la energía de propulsión se pierde en el movimiento de su estructura por los puntos de articulación”.²²

La solución para este caso fue no dejar puntas abiertas en el chasis como se observa en la figura 15. Y rediseñar toda la estructura permitiendo que fuera más integral, ver figura 16. Y de esta manera lograr que los esfuerzos se distribuyeran de mejor manera.

²¹ Ansys workbench 10.0 , Software que ofrece una eficiente e intuitiva interfaz de usuario, integración CAD, mallado automático y parametrización de modelos que posibilitan una simulación mecánica rápida y precisa.

²² Sunrise Medical Co, Tipos de componentes de una silla de ruedas. Estados Unidos, 2008.

http://marketing.sunrisemedical.com/education_es/formacion4.html

Figura 15. Arquitectura primer prototipo



En la figura anterior se puede observar como las flechas están indicando que la estructura de la silla se encuentra discontinua en esos puntos y por lo tanto no evidencia una solidez estructural que inspire seguridad en el diseño, además se ha de necesitar 2 elementos adicionales (plataforma del reposa pies/soporte espaldar)

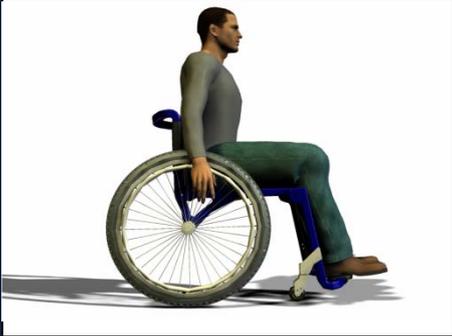
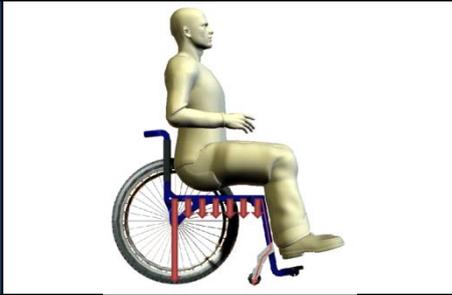
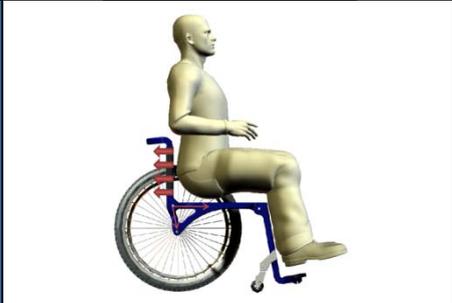
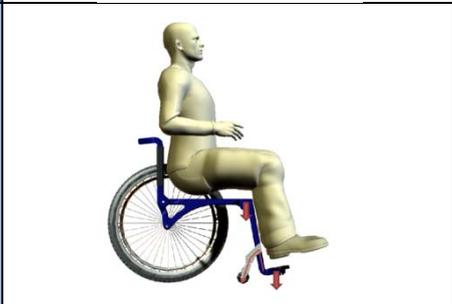
que actuarían como nuevos puntos de articulación, haciendo que se perdiera un mayor porcentaje de la energía de propulsión.

Imagen 16: Arquitectura final de Vone



La figura anterior es el resultado de rediseñar la arquitectura de forma del concepto inicial de la silla Vone, se puede observar un diseño de estructura más sólida pensada para brindar una mejor circulación de esfuerzos sobre todo el producto.

Al estudiar la estructura seleccionada de la silla de ruedas Figura anterior 15. Según las consideraciones biomecánicas propuestas por Sunrise Medical Co. Ver anexo C. se concluyó que esta, estaba sometida a 2 clases de esfuerzos que podrían incidir notablemente en el funcionamiento adecuado del dispositivo médico, estos se evidencian en las tablas 3 y 4, a continuación, y son la base para la realización del análisis computacional.

Tabla 3. Esfuerzos presentes en la estructura de la silla inherentes al peso del usuario		
Esfuerzos efectuados		<p>Estos esfuerzos están relacionados directamente con el peso del usuario y las posiciones estándar que se adoptan en el momento de la propulsión, su efecto recae fundamentalmente sobre los 3 elementos básicos que conforman el diseño de la estructura de la silla Vone, el chasis lateral, el espaldar y el reposa pies.</p>
Esfuerzos en el chasis lateral		<p>Como se puede observar en la imagen de la izquierda, la idea es que el diseño de Vone permita que los esfuerzos sobre el chasis lateral se distribuyan de manera uniforme en la mayor superficie posible, brindando una óptima zona que garantice la estabilidad del usuario.</p>
Esfuerzos en el espaldar		<p>Según EMA “En esta zona los esfuerzos están condicionados por la inclinación del espaldar, el soporte de la región lumbar y la fuerza de gravedad que recae sobre el pecho del usuario”²³</p> <p>Es necesario que todos estos esfuerzos se descompongan en vectores en dirección Y para poder aplicar la carga en el análisis, tal y como ilustra la imagen de la izquierda.</p>
Esfuerzos en el reposa pies		<p>Según investigaciones de Sunrise Medical Co para sillas que no conservan la equivalencia de 90° en el espaldar y reposa pies con respecto del chasis “El 19 % del peso del cuerpo en sedestación se distribuye en los pies”²⁴, este porcentaje se puede reducir notablemente estableciendo un ángulo de 90° en las rodillas y tobillos con el cual la mayoría de las personas se sienten cómodas.</p>

²³ EMA, Esclerosis Múltiple Argentina. Publicación de la asociación civil. En: Silla de Ruedas ¿Cómo elegir la más adecuada? Buenos Aires. Número 67 – primavera 2007; p. 30

²⁴ Sunrise Medical Co, La postura en la silla de ruedas. Estados Unidos, 2008. http://marketing.sunrisemedical.com/education_es/formacion3.html

Tabla 4. Esfuerzos presentes en la estructura de la silla inherentes al servicio en el contexto

Esfuerzos efectuados		<p>En el momento de giro y debido a la fricción inicial de las ruedas delanteras, las cuales tienden por un instante a sostenerse en su posición mientras se direccionan, se genera un esfuerzo de flexión y de corte considerable en la articulación del chasis lateral y el reposapiés.</p>
Esfuerzos efectuados debido a obstáculos (piedras, huecos, rampas, entre otros)		<p>Otro de los esfuerzos claves en condiciones de uso se refleja en la imagen de la izquierda, cuando las ruedas delanteras reciben un golpe debido a piedras, huecos o en el momento de iniciar la subida por una rampa, entre otros.</p> <p>La fuerza es en su mayoría absorbida por el sistema giratorio de las llantas delanteras (cuyos materiales y propiedades no competen a este proyecto de grado) y finalmente transmitida a través del reposapiés al eje general.</p>

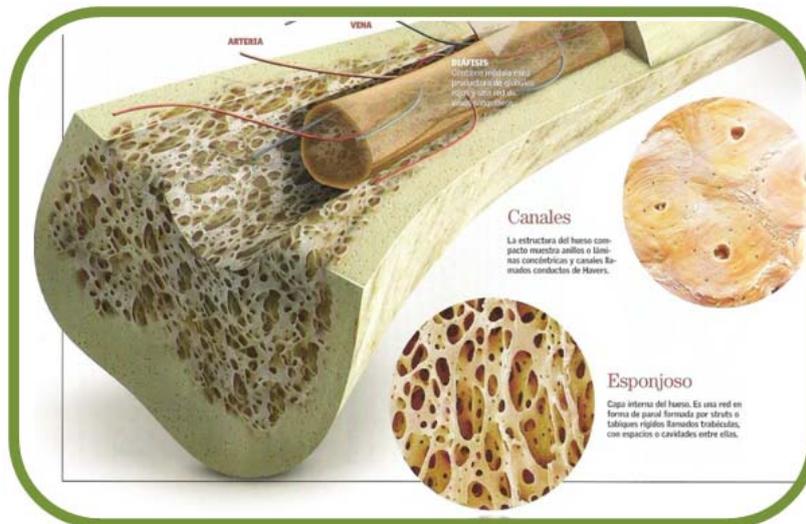
Se puede concluir que en la mayoría de las situaciones ilustradas en las tabla 3 y 4 los esfuerzos son de naturaleza cortantes y recaen principalmente sobre ejes, seguros y bujes presentes en las piezas de fibra de vidrio, Ver anexo H.

4.2. Análisis de elementos finitos

La construcción de la estructura de la silla, al igual que la elección de los respectivos materiales, ver Capítulo 3 Materiales. Está basada en la conformación del tejido óseo, “Los huesos están compuestos externamente por una parte llamada periostio e internamente por el tejido óseo esponjoso, lo cual los hace elementos sumamente livianos y resistentes”.²⁵ Ver Imagen 17.

²⁵ VIGUÉ, Jordi y TENLLADO, Muñoz A. El cuerpo humano: el aparato locomotor. ¿Cómo crecen los huesos?, tejido óseo esponjoso y tejido óseo compacto. Barcelona: PARRAMÓN EDICIONES, 1994, P48

Imagen 17: Arquitectura del hueso



Fuente: arteria.iespana.es/imagenes6/Imagen3.jpg

Debido a que en este tipo de elementos, los esfuerzos máximos se conciben en las extremidades o paredes de los perfiles, el material propuesto para la estructura de la silla Vone, la fibra de vidrio más la resina actuarían como elemento base de resistencia, a diferencia del material interno la espuma de poliuretano quien solo actúa como elemento formal y aunque genera resistencia a dichos esfuerzos no se considera para el análisis, tomándose el chasis como un elemento netamente hueco y asignándosele solamente las propiedades relativas a la fibra de vidrio.

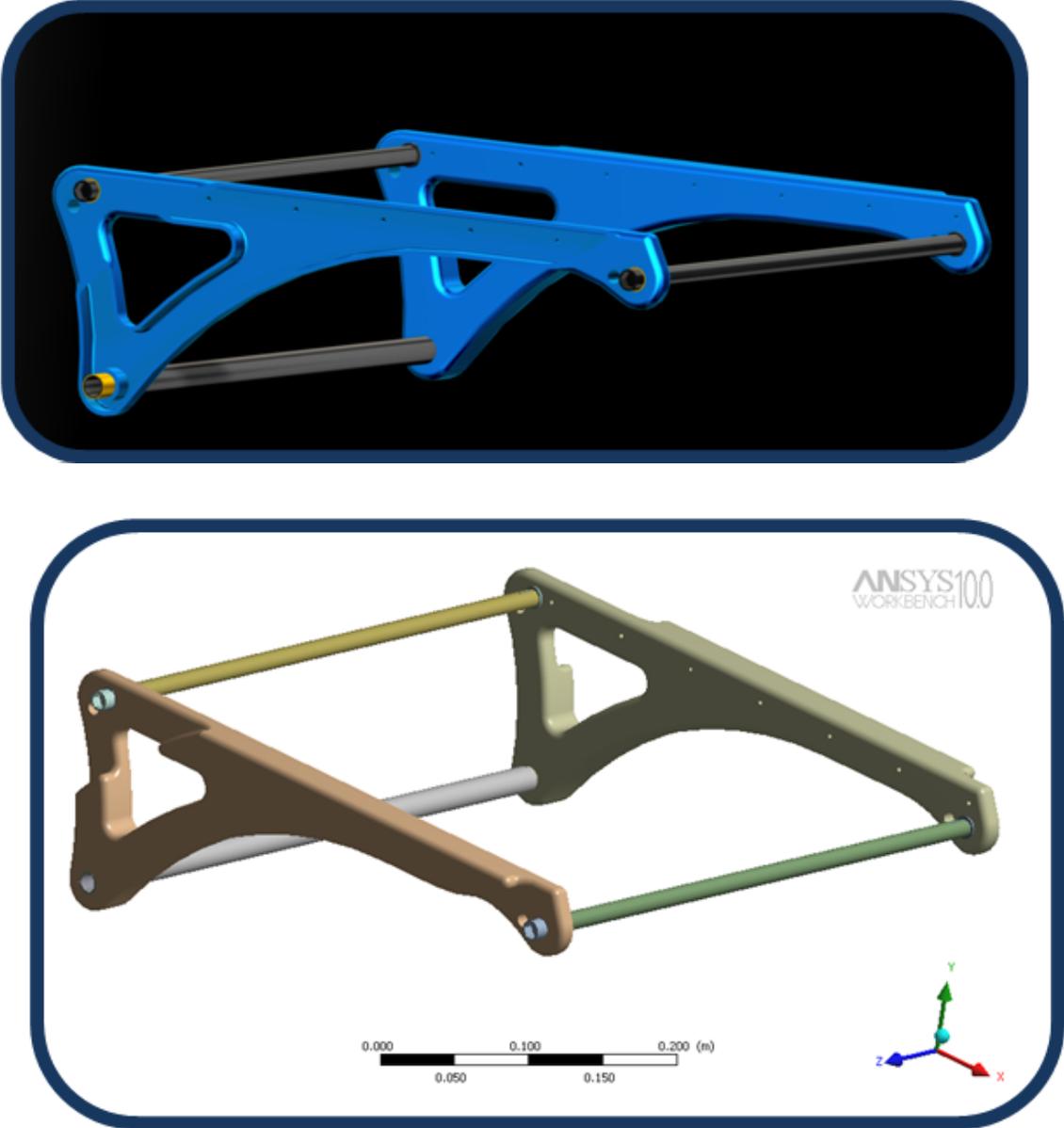
4.2.1. Análisis de esfuerzos inherentes al peso del usuario

4.2.1.1. Análisis del chasis lateral

A partir de la observación del estado de arte, ver Anexo B. se halló que las sillas de ruedas están actualmente pensadas para soportar el peso de una persona en un rango que abarca desde los 85 kg a 120 kg. Simplemente se eligió probar la estructura exigiéndola al límite con una fuerza de 120 kg correspondiente aproximadamente a 1200 N.

Una vez hallada la fuerza se procedió a realizar el análisis de elementos finitos mediante el software Ansys Workbench 10.0, para lo cual como primera medida se importa el archivo CAD, en la Imagen 18. Se puede apreciar que la pieza correspondiente a la estructura es hueca por dentro simulando las condiciones antes referidas al material.

Imagen 18: Imagen en CAD del chasis



Luego de que la pieza adquirió todas sus propiedades geométricas, se procedió a especificar las propiedades del material para cada parte, Ver Tabla 5. Dado la

naturaleza del análisis solo se especifican las que corresponden a propiedades físicas y mecánicas, obviando las electromagnéticas, térmicas, entre otras.

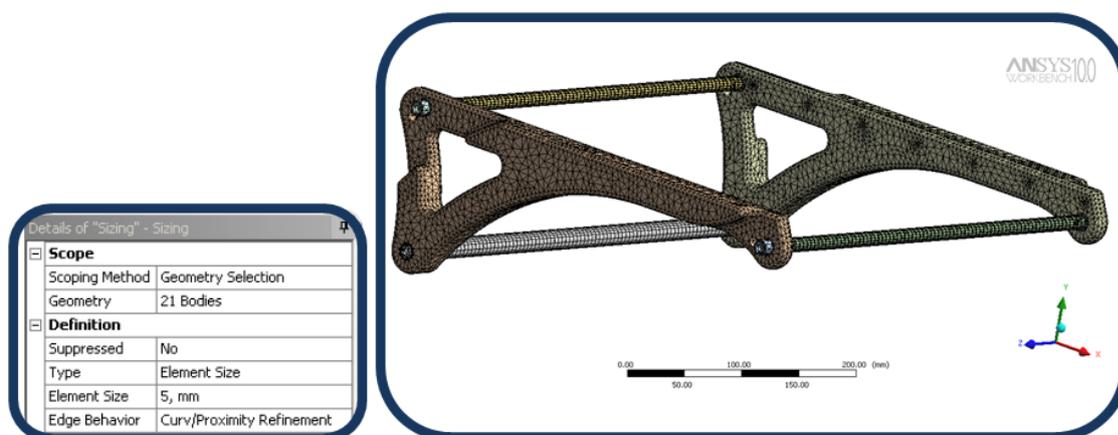
Tabla 5. Propiedades de los materiales presentes en la estructura de la silla de ruedas

Estructura *	Ejes	Bujes																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Fiber Glass</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Structural Add/Remove Properties</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Young's Modulus</td> <td>89000 MPa</td> </tr> <tr> <td>Poisson's Ratio</td> <td>0,276</td> </tr> <tr> <td>Density</td> <td>2,56e-006 kg/mm³</td> </tr> <tr> <td>Tensile Ultimate Strength</td> <td>3310, MPa</td> </tr> </tbody> </table>	Fiber Glass		Structural Add/Remove Properties		Young's Modulus	89000 MPa	Poisson's Ratio	0,276	Density	2,56e-006 kg/mm ³	Tensile Ultimate Strength	3310, MPa	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Structural Steel</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Structural Add/Remove Properties</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Young's Modulus</td> <td>2,e+005 MPa</td> </tr> <tr> <td>Poisson's Ratio</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>Density</td> <td>7,85e-006 kg/mm³</td> </tr> <tr> <td>Alternating Stress</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Strain-Life Parameters</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tensile Yield Strength</td> <td>250, MPa</td> </tr> <tr> <td>Compressive Yield Strength</td> <td>250, MPa</td> </tr> <tr> <td>Tensile Ultimate Strength</td> <td>460, MPa</td> </tr> </tbody> </table>	Structural Steel		Structural Add/Remove Properties		Young's Modulus	2,e+005 MPa	Poisson's Ratio	0,3	Density	7,85e-006 kg/mm ³	Alternating Stress		Strain-Life Parameters		Tensile Yield Strength	250, MPa	Compressive Yield Strength	250, MPa	Tensile Ultimate Strength	460, MPa	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Brass</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Structural Add/Remove Properties</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Young's Modulus</td> <td>1,5e+005 MPa</td> </tr> <tr> <td>Poisson's Ratio</td> <td>0,375</td> </tr> <tr> <td>Density</td> <td>8,73e-006 kg/mm³</td> </tr> <tr> <td>Tensile Yield Strength</td> <td>683, MPa</td> </tr> <tr> <td>Compressive Yield Strength</td> <td>150,31 MPa</td> </tr> <tr> <td>Tensile Ultimate Strength</td> <td>3200, MPa</td> </tr> </tbody> </table>	Brass		Structural Add/Remove Properties		Young's Modulus	1,5e+005 MPa	Poisson's Ratio	0,375	Density	8,73e-006 kg/mm ³	Tensile Yield Strength	683, MPa	Compressive Yield Strength	150,31 MPa	Tensile Ultimate Strength	3200, MPa
Fiber Glass																																																		
Structural Add/Remove Properties																																																		
Young's Modulus	89000 MPa																																																	
Poisson's Ratio	0,276																																																	
Density	2,56e-006 kg/mm ³																																																	
Tensile Ultimate Strength	3310, MPa																																																	
Structural Steel																																																		
Structural Add/Remove Properties																																																		
Young's Modulus	2,e+005 MPa																																																	
Poisson's Ratio	0,3																																																	
Density	7,85e-006 kg/mm ³																																																	
Alternating Stress																																																		
Strain-Life Parameters																																																		
Tensile Yield Strength	250, MPa																																																	
Compressive Yield Strength	250, MPa																																																	
Tensile Ultimate Strength	460, MPa																																																	
Brass																																																		
Structural Add/Remove Properties																																																		
Young's Modulus	1,5e+005 MPa																																																	
Poisson's Ratio	0,375																																																	
Density	8,73e-006 kg/mm ³																																																	
Tensile Yield Strength	683, MPa																																																	
Compressive Yield Strength	150,31 MPa																																																	
Tensile Ultimate Strength	3200, MPa																																																	
<p>*El Yield Strength es considerado en ingeniería y en las ciencias modernas de materiales como el esfuerzo para el cual la pieza comienza a deformarse plásticamente, debido a que el vidrio es un material quebradizo y no ductil, el yield strength y el ultimate strength son el mismo.</p>																																																		

Fuente: <http://www.matweb.com>

Una vez se ha dado a cada pieza su material respectivo se procedió a realizar el mallado del ensamble que para este caso se utilizó un elemento por defecto al cual se le asignó un tamaño de 5 mm como se puede apreciar en la Imagen 19.

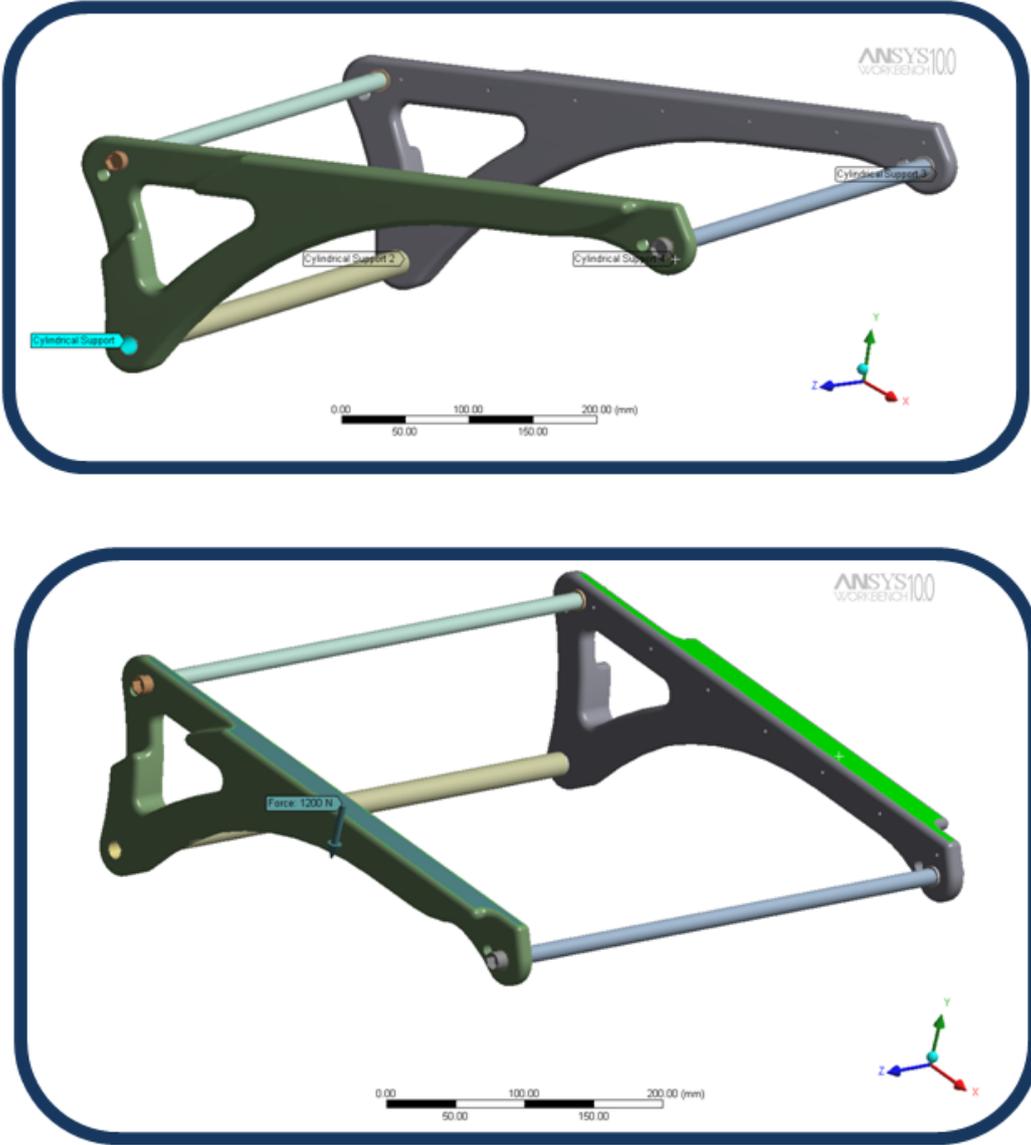
Imagen 19: Mallado de la pieza



Antes de dar solución al análisis, se le aplicaron las restricciones y las cargas a la pieza, simulando las condiciones en las cuales operaría, para esto se limitaron los

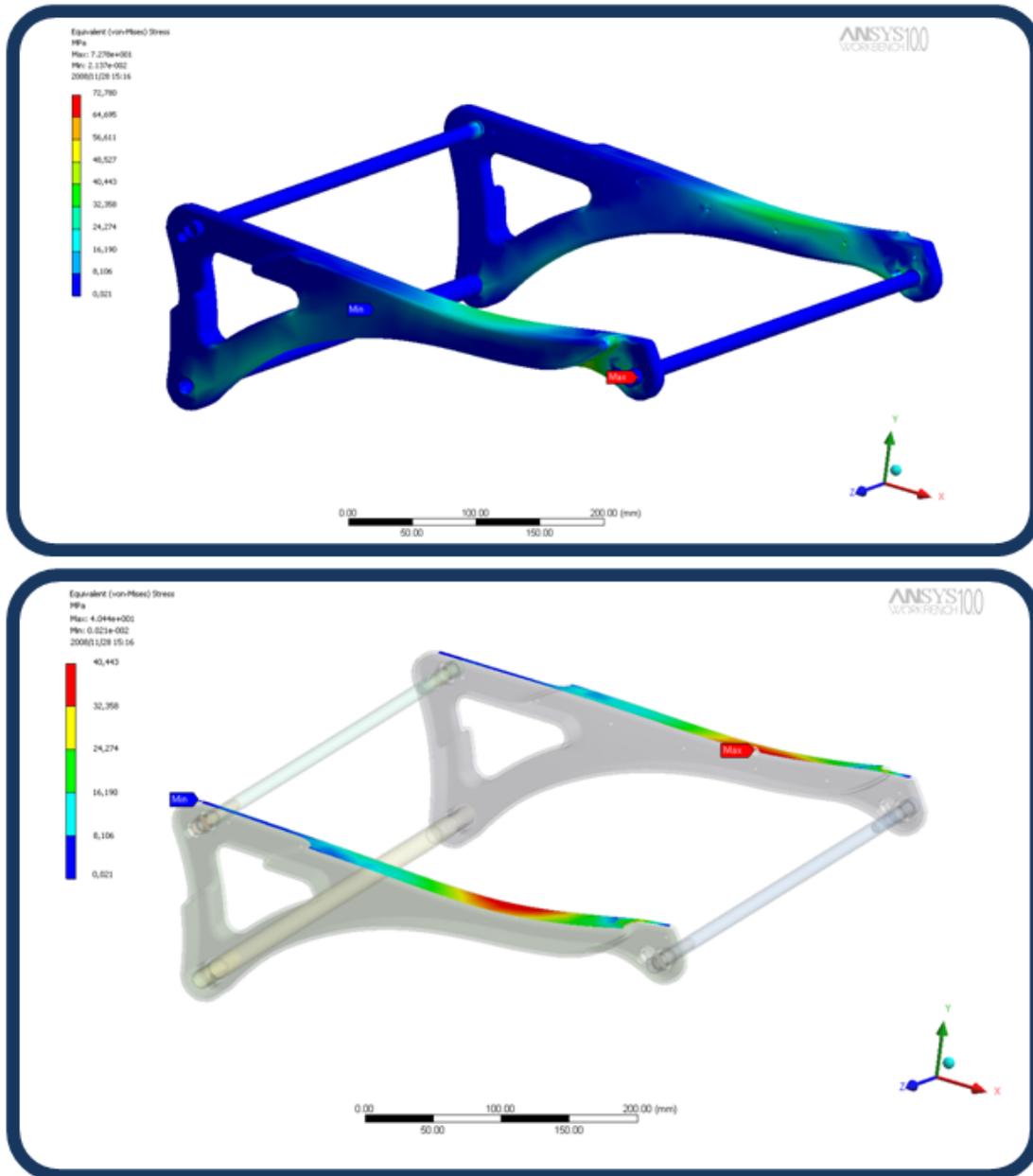
bujes de las llantas traseras y los bujes que irían en contacto con el reposa pies a través de la restricción cylindrical support y se aplicó la carga de 1200 N perpendicular al chasis como evidencia la Imagen 20.

Imagen 20. Imagen de restricciones en el chasis



Una vez se tuvieron todos los parámetros establecidos se halló la solución deseada, que para este análisis corresponde a los esfuerzos máximos sobre la piezas y la deformación total. Ver Imagen 21.

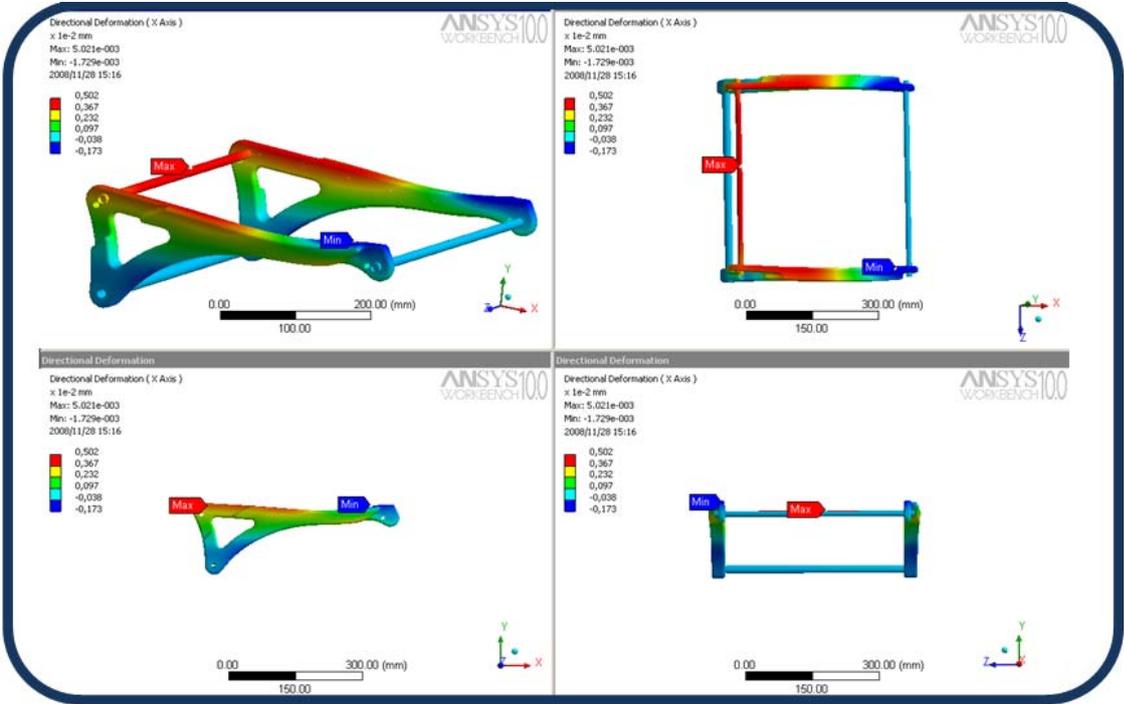
Imagen 21: Deformación del chasis ampliada 1000 veces



A partir de los resultados obtenidos se observa en la gráfica superior como el esfuerzo máximo de 72 MPa, recaería sobre la articulación que corresponde a la unión entre chasis y reposa pies, (este esfuerzo sería de naturaleza cortante y su efecto se daría principalmente en el tornillo de 3/8”).

En la parte inferior se hace un enfoque específico en la pieza que corresponde al chasis lateral y se puede visualizar que presenta un esfuerzo máximo de 40,4 MPa, teniendo en cuenta que el esfuerzo último de tensión de la fibra de vidrio es de más de 3000 MPa y que los resultados obtenidos mediante los ensayos del material reflejaron una resistencia total de más de 4000 N, ver capítulo 3.4.2. Se puede concluir que esta pieza de la silla de ruedas cumple satisfactoriamente con todos los requisitos necesarios para un óptimo funcionamiento del dispositivo médico y por ende se puede tener toda la seguridad para avalar la fabricación del equipo movilizador.

Imagen 22: Deformación máxima sobre la estructura ampliada 1000 veces



A partir de los resultados obtenidos se puede apreciar como la deformación máxima de la estructura en general se da sobre el eje del espaldar el cual no posee restricciones y junto con los otros dos absorbe todos los esfuerzos de compresión. La deformación sobre la Fibra de vidrio es nula.

4.2.1.2. Análisis del Espaldar

Para estimar una fuerza que exigiera al límite la zona alrededor del seguro del espaldar, debido al grado de inclinación que posee, el soporte de la espalda y la fuerza de gravedad que recae sobre el pecho, se decidió promediar la fuerza máxima ejercida por la región lumbar de un hombre promedio sin apoyo de las piernas, simulando condiciones similares que se presentarían en la silla de ruedas, ver figura 23, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.

Imagen 23: Estudio de esfuerzos sobre el espaldar

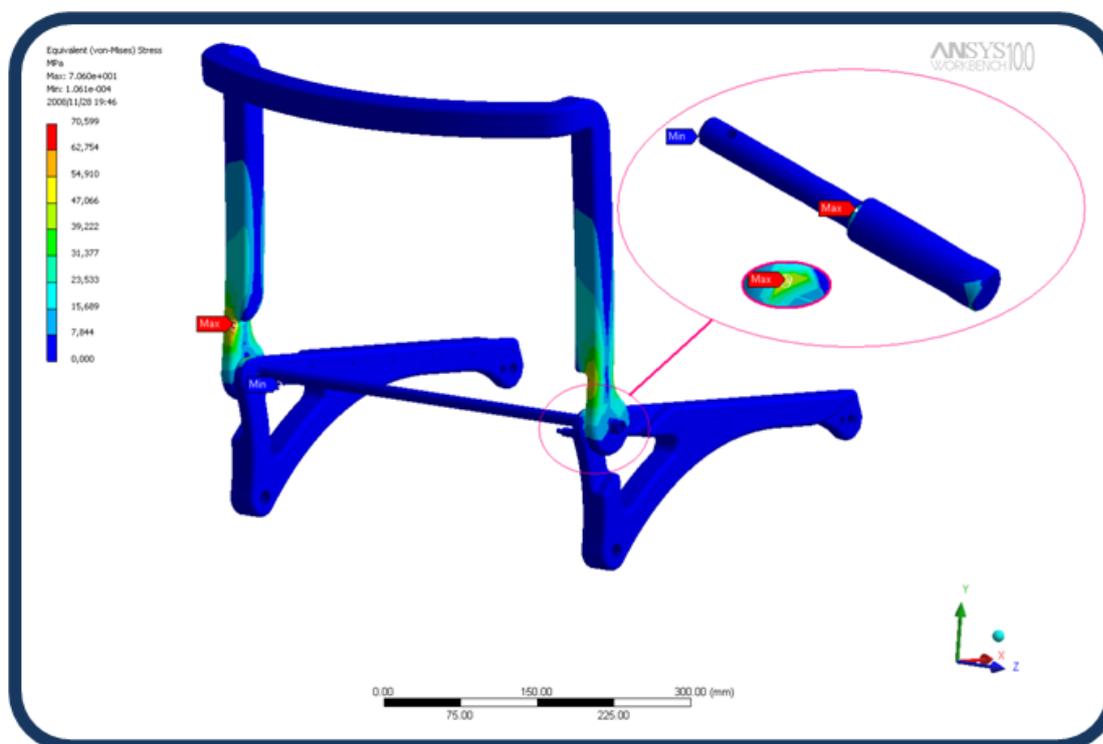


Tabla 6. Datos pruebas ²⁶			
Prueba	Peso (Kg)	Fuerza (N)	Promedio (N)
1	60	588	690
2	60	588	
3	90	882	

Una vez se tuvieron todos los parámetros establecidos para esta pieza. (Ver Anexo G) se le dio solución al sistema, enfocándose en los esfuerzos y deformaciones máximas sobre las piezas. Ver Imagen 24 y 25.

²⁶ Pruebas realizadas en el gimnasio de la universidad Eafit. Medellín, Colombia. octubre de 2008

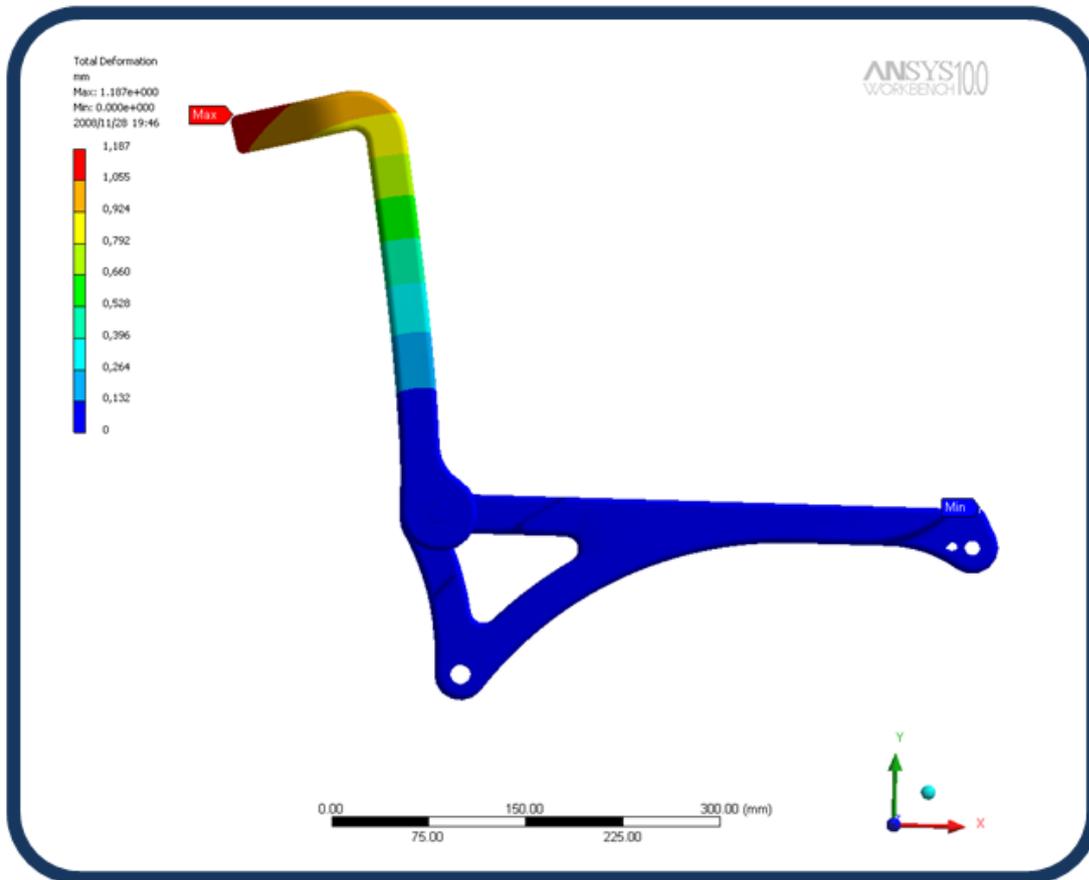
Imagen 24: Esfuerzos máximos sobre el espaldar y sus respectivos seguros



Los resultados arrojados por la simulación (observando que ningún usuario estaría en condiciones de alcanzar la fuerza aplicada de 690 N, debido a la gran magnitud de esta y al tipo de lesión que este posee), evidencian que en el espaldar el esfuerzo máximo es de 70.5 MPa, que con base en el análisis que se hizo de la estructura del chasis y las propiedades de la fibra de vidrio, no representa un riesgo para la consolidación del producto, por otra parte en el seguro bordea los 39.22 MPa que según la resistencia a la fluencia del acero, la cual está muy cercana a los 250 MPa, se podría concluir que este contaría con un factor de seguridad de aproximadamente 6.

Se podría afirmar entonces que esta pieza también cumple satisfactoriamente con todos los requisitos necesarios para el óptimo funcionamiento del dispositivo médico.

Imagen 25: Deformación máxima sobre el espaldar ampliada 1000 veces



A partir de los resultados obtenidos en la Imagen 25. Se puede apreciar como la deformación máxima de la estructura del espaldar indica una desviación de 1.2 mm, siendo esta una tolerancia normal tratándose de la zona de la silla en la cual se da, debido a que no compromete la seguridad o comodidad del usuario. La deformación sobre la Fibra de vidrio es nula.

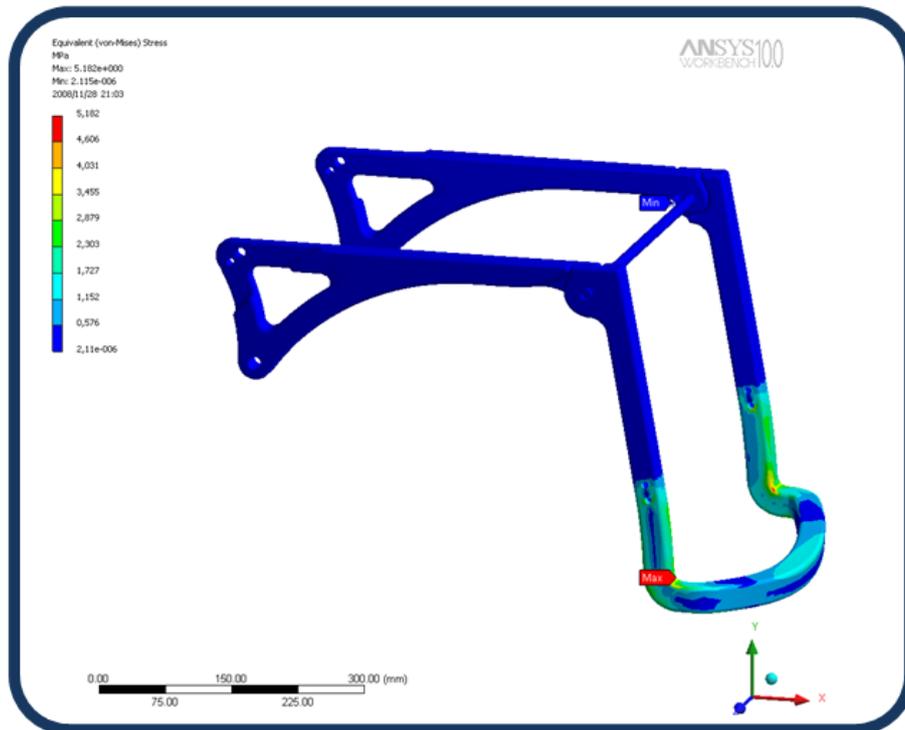
4.2.1.3. Análisis del Reposa pies

Como queda evidenciado en la Tabla 3. Esfuerzos presentes en la estructura de la silla inherentes al peso del usuario. según la investigación de Sunrise Medical Co, el peso que recaería sobre el reposapiés en una silla que no conserve ángulos válidos en la zona de la rodilla y tobillo sería de una equivalencia al 19% del peso de la persona.

Para maximizar la fuerza que se va a ejercer en la simulación y con el objetivo de nuevamente llevar el diseño de Vone al límite se trabajará con el peso antes elegido para el análisis del chasis, por lo que la fuerza aplicada será de 223 N.

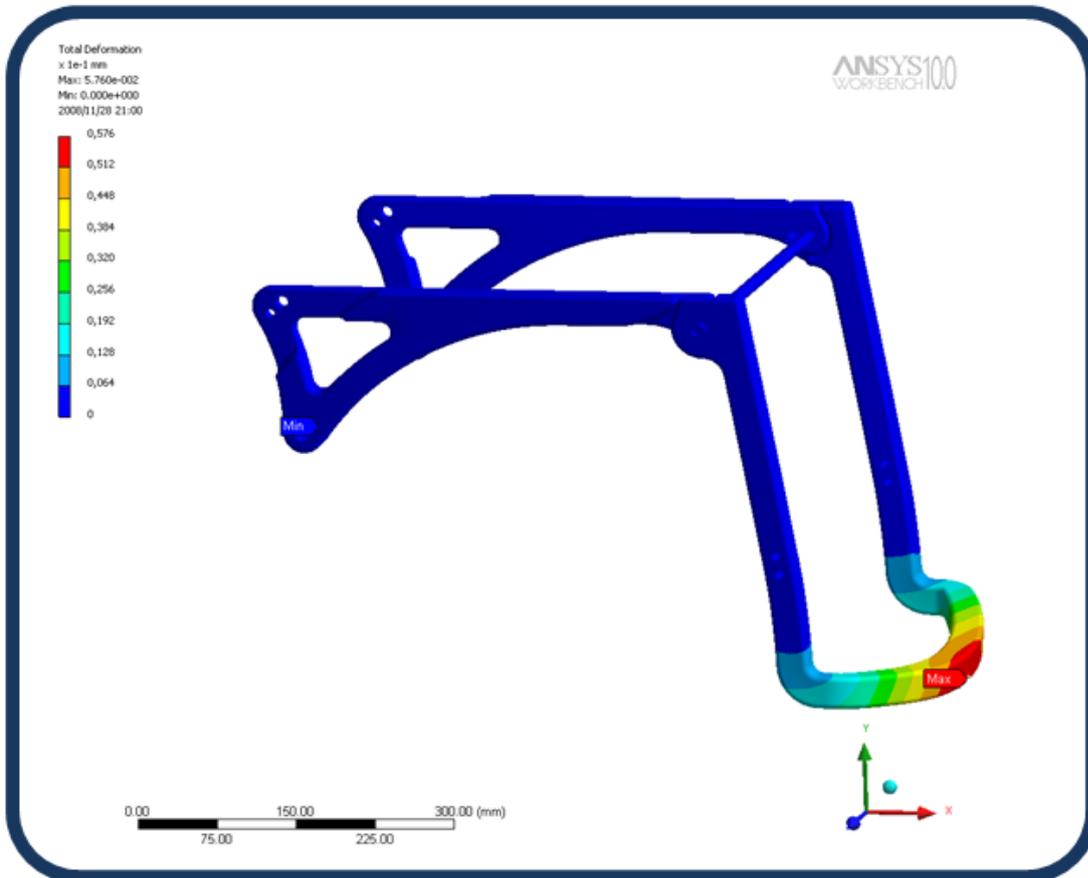
Una vez se tuvieron todos los parámetros establecidos para esta pieza. (Ver Anexo G) se le dio solución al sistema, enfocándose en los esfuerzos y deformaciones máximas sobre las piezas. Ver Imagen 26 y 27.

Imagen 26: Esfuerzos máximos sobre el apoya pies y sus seguros



Finalmente la fuerza obtenida en la pieza es de solamente 5 MPa, que no compromete en ningún momento la estructura de la silla, esto debido a que el diseño de Vone conserva un ángulo de 90° en los tobillos y de 100° en las rodillas, Ver Anexo H. “Entrando dentro de los parámetros que rigen un buen diseño y permitiendo que los esfuerzos en esa zona se aminoren”. Según las consideraciones biomecánicas investigadas por Sunrise Medical Co.

Imagen 27: Deformación máxima sobre el apoya pies ampliada 1000 veces



La gráfica de deformación denota una desviación equivalente a 0.05 mm, la cual es totalmente imperceptible al ojo humano y permite concluir que esta zona está ofreciendo un soporte seguro y confiable que no compromete el correcto funcionamiento de la silla y por ende la lesión del paciente.

4.2.1.4. Esfuerzos inherentes al ambiente

4.2.1.4.1. Esfuerzos en la articulación Chasis Lateral/Espaldar

Para estimar la fuerza que un usuario puede producir al girar, se realizó una prueba (Ver tabla 7), mediante el uso de un dinamómetro analógico PK con capacidad para 500 N, el cual fue anclado a una silla QUICKIE en la zona que correspondería a la articulación entre chasis lateral y reposa pies de la silla Vone tal como se ilustra en la Imagen 28.

Imagen 28: Esfuerzos producidos al girar

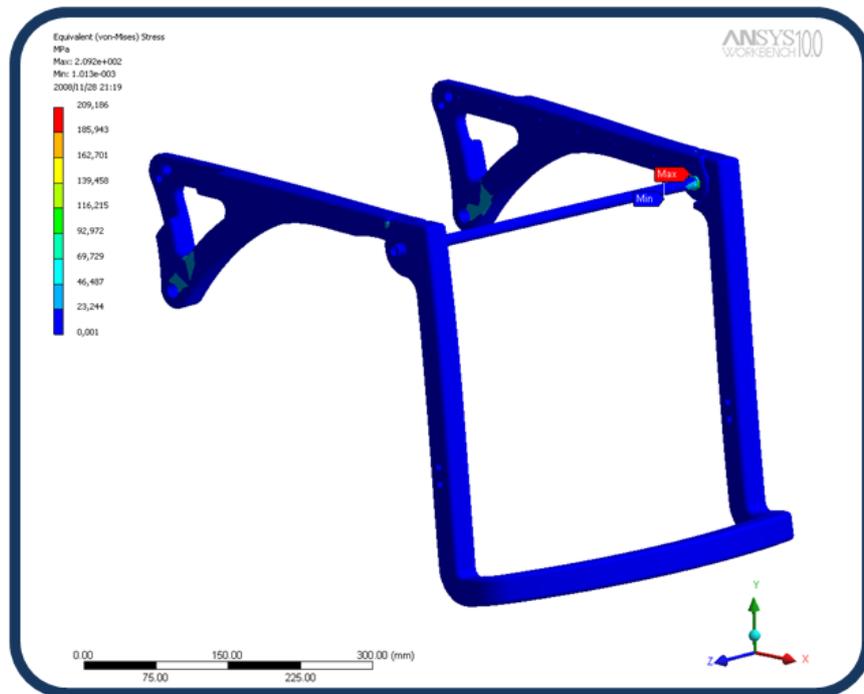


Tabla 7. Datos pruebas		
Prueba	Fuerza (N)	Promedio (N)
1	187.3	197.6
2	195.2	
3	210.5	

Debido a las características de diseño de Vone, esta fuerza se da en la zona más crítica de la silla y es fundamental que se garantice una solidez mayor a la de cualquier otra pieza, se decide que la fuerza a aplicar será de 600 N, resultado de incrementar 3 veces la obtenida en las pruebas.

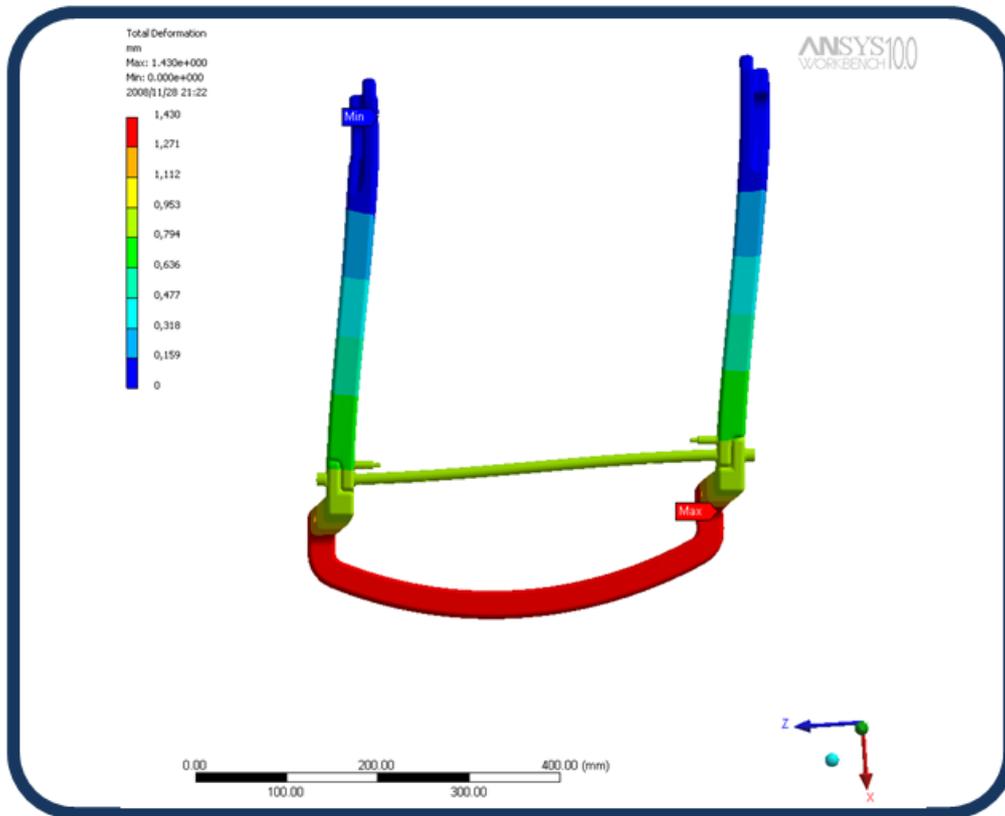
Una vez se tuvieron todos los parámetros establecidos para esta pieza. (Ver Anexo G) se le dio solución al sistema, enfocándose en los esfuerzos y deformaciones máximas sobre el ensamble. Ver Imagen 20 y 30.

Imagen 29: Esfuerzos máximos en bujes y seguros



Se puede apreciar a partir de la solución arrojada por el software, que los esfuerzos de este tipo son los que afectan en mayor medida la zona de la articulación que se está analizando, llegando a 209 MPa en los bujes, ejes y tornillo, es de recordar que se está incrementando la fuerza hallada 3 veces y que probablemente no habría circunstancias en las que se pueda llegar a ese valor, el cual podría comprometer la estabilidad del producto debido a que es muy cercano al esfuerzo de fluencia del acero, correspondiente a 250 Mpa.

Imagen 30: Deformaciones máximas sobre reposa pies, bujes, tornillos y seguros escala x 1000



La gráfica de deformación evidencia una desviación de 1.5 mm, nuevamente la mayor registrada hasta el momento, debido a las condiciones que generan este esfuerzo.

Se puede concluir a partir de estos análisis que la estructura de la silla puede resistir fácilmente las condiciones reales de uso, sean debido a fuerzas voluntarias e involuntarias de los usuarios o como bien podrían ser factores externos que implican almacenamiento, transporte, posibles golpes, entre otros. Por lo tanto se podría dar inicio con un alto grado de confianza la construcción del respectivo prototipo.

5. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Según las recomendaciones del auxiliar del taller de diseño de productos de las instalaciones de la universidad Eafit y una planeación previa del proceso que se seguirá para la construcción de cada una de las piezas del prototipo, se procede con su elaboración manualmente debido a las necesidades y facilidad en la construcción.

Se imprimen los planos escala 1:1 de todas las partes. Las piezas que serán realizadas con fibra requieren la construcción anterior de las piezas en espuma y para garantizar las dimensiones evidenciadas en la modelación, se sacan planos con la reducción de las capas de fibra y resina.

5.1. Construcción de piezas en fibra de vidrio, resina y espuma de poliuretano.

En unas camas de cartoplas se vacía la mezcla de poliuretano hasta que esta reaccione y se endurezca, para tener un material en bruto del cual se puedan cortar las piezas según lo planeado. Luego con la ayuda de herramientas como escuadra, medidores de ángulo, calibrador se proceda a unir las partes cortadas para obtener la pieza completa y proceder a envolverla con la primera capa de fibra + resina así como se muestra en la Imagen 31.

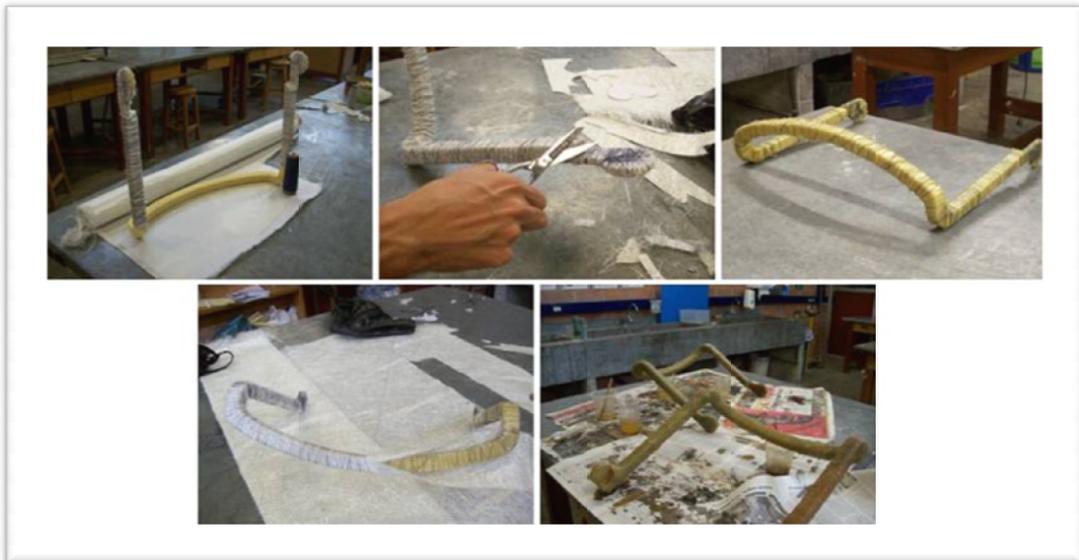
Imagen 31. Piezas en espuma de Poliuretano



La primera capa se envuelve con fibra Woven Roving y se sujeta a la pieza de espuma con hilo dejándola muy ajustada, sin que quede embobada la tela de la espuma. Una vez terminado esto se procede a echar la resina con mucha cautela, asegurando que la tela quede totalmente impregnada y permeada.

Una vez haya secado o polimerizado la resina se envuelve la pieza con la fibra MAT con las mismas características que se hizo la pieza anterior, posteriormente se aplica otra capa de Woven Roving y se finaliza con la aplicación de dos capas de Fibra MAT. Ver imagen 32

Imagen 32: Aplicación de las capas de fibra de vidrio y resina.



Con las capas se alcanza una medida en la pared de la fibra + resina de un poco más de 3 mm, que es la medida calculada para el espesor final de las partes, esto con la intención de alcanzar la medida exacta al pulir con lija. (Ver Anexo H)

5.2. Pre acabados

Las piezas pasan a una fase de pre acabado, en donde se aplica masilla de poliéster tapando las imperfecciones que deja la aplicación de la fibra, luego para garantizar las medidas de cada pieza se pasan por la fresadora con una medida exacta entre el piso de maquinado y la fresa, garantizando que no queden excedentes de material y que las medidas queden correctas para terminar con el proceso de lijado. Ver imagen 33.

Imagen 33: Pre acabado



5.3. Construcción de bujes y seguros

Las piezas metálicas como los bujes y los seguros se realizan en el torno de las instalaciones de la Universidad Eafit y se pulen con lima garantizando un ajuste sin juego entre las piezas que tengan interacción, esto con el fin de que no exista lugar a desajustes en la silla. Ver imagen 34

Imagen 34: Elaboración de bujes



5.4. Unión de los bujes y seguros a las piezas.

Una vez la pieza tenga las medida reales, se perforan los agujeros en donde se colocan los bujes y seguros de la silla, este proceso requiere demasiado cuidado debido a que dependiendo de este proceso la silla puede quedar torcida o deforme, por esto se utilizan herramientas como niveles, prensas y taladros de banco que garanticen que el agujero es perpendicular a la pieza y queda bien centrado. Ver imagen 35.

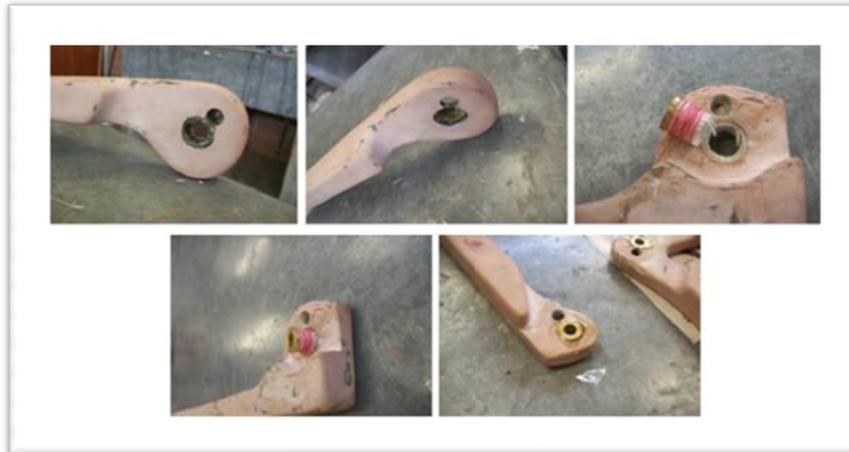
Imagen 35: Realización de los agujeros e las piezas.



Para unir las piezas metálicas a las piezas de fibra, estas se envuelven en fibra y son sostendias con hilo. Con una fresa y un motor tool se realizan unas cunas en las paredes de los agujeros de las piezas del chasis para remover la espuma y rellenar los agujeros con fibra + resina y se rectifican los agujeros. Como elemento de unión entre piezas se utiliza resina en ambas piezas y se incrusta la

pieza metálica en los agujeros, eso con el fin de garantizar solidez entre ambas piezas. Ver imagen 36

Imagen 36: Unión de los bujes



5.5. Acabado final

Se quita la rebaba de resina que sale al colocar los bujes y seguros para untarles masilla de poliéster roja, ultima capa de acabado que se aplica, posteriormente se lija manual hasta conseguir llegar en un orden lógico a lija de 600 granos por centímetro cuadrado. Luego se le aplica base para observar posibles imperfecciones, se realizan las correcciones, se pintan las piezas y se recubren con pintura de poliuretano transparente para darle mayor resistencia al acabado. Ver imagen 37

Imagen 37: Acabado final y pintura



5.6. Ensamble

Con las todas las piezas finalizadas se comienzan a realizar los sub-ensambles que forman los sistemas o partes de la silla de ruedas y estos a su vez son ensamblados para conformar el prototipo final.

Imagen 38: Prototipo Funcional



6. PROCESO DE INYECCIÓN DE RESINAS

Para la producción de las piezas se utilizará un proceso de moldeo abierto con alma insertada, este es relativamente nuevo en las empresas y consiste en inyectar resina en un molde cerrado con fibra de vidrio ubicada previamente en la cavidad, para este caso se ubicará un alma constituida de espuma de poliuretano y una mezcla de capas de fibra de vidrio MAT y Roving, se realizarán algunos experimentos con el fin de obtener datos que lleven a sacar resultados y orienten en el proceso. (Ver Anexo Videos)

En la actualidad existen algunos procesos con los que se pueden realizar las piezas requeridas, estos son RTM, LRTM y VM. Estos procesos presentan ventajas como:

- Bajos costos de producción.
- Posibilidad de crear grandes piezas estructurales.
- Excelentes acabados superficiales.
- Pocas emisiones de estireno.
- Aptos para producciones de altos volúmenes.
- Producción más fácil y limpia que otros procesos.

6.1. Procesos de moldeo por inyección de resinas.

- **RTM (Resin Transfer Molding):**

Es un proceso que utiliza una bomba de inyección para introducir resina en un molde cerrado, está llena el molde expulsando el aire que existe en la cavidad y toma la forma requerida adquiriendo un acabado excelente.

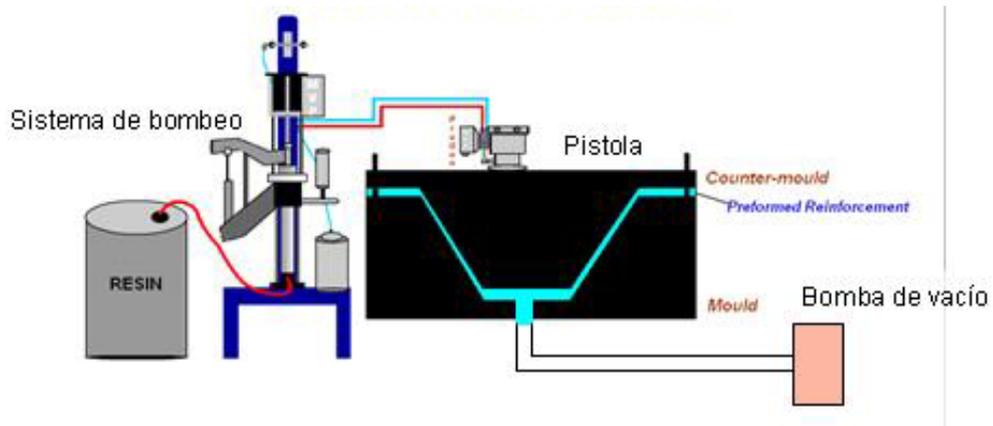
- **LRTM (Light RTM):**

Este proceso es derivado del RTM explicado anteriormente, con la diferencia que la inyección está asistida por vacío, que se encarga de ayudar a desalojar las burbujas de aire, facilitando el llenado completo de la(s) cavidad(es) del molde y la permeabilidad de la resina²⁷.

En la imagen 39 se ilustra una máquina para la realización de este proceso.

²⁷ <http://www.gfpengineering.co.uk/> ; año de consulta 2008

Imagen 39: Máquina para proceso de LRTM.

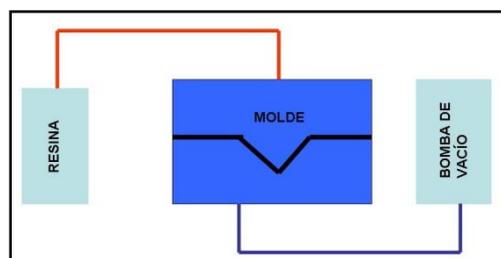


Fuente: <http://www.mvpind.com/rtm.html> consulta 2009

- **VM (Vacuum Molding):**

Este proceso es muy similar a los procesos anteriores con la diferencia que solo utiliza vacío para cerrar el molde y obligar a la resina a introducirse en la cavidad del molde. La boquilla de inyectado y la de vacío están ubicados a lados opuestos del molde haciendo que la resina cubra todo alrededor de este.

Imagen 40: Sistema de proceso VM



Cada uno de estos procesos tiene sus ventajas y desventajas, pero para este caso se harán pruebas de conformación mediante LRTM y Vacuum Molding debido a que la Universidad Eafit cuenta con las herramientas y la maquinaria necesaria para efectuarlos.

6.2. Componentes necesarios para realizar el proceso de LRTM Y VM

Imagen 41. Partes de la máquina RTM.

<p>Máquina de RTM</p> 	<p>Mandos de control</p> 	<p>Catalizador</p> 	<p>Conducto de absorción de resina</p> 
<p>Sistema de bombeo</p> 	<p>Pistola inyectora</p> 	<p>Bomba de vacío</p> 	<p>Trampa de vacío</p> 

<p>Conductos de resina</p>  <p>Cada molde debe contener sus propias mangueras debido a que en cada inyección estas se pierden</p>	<p>Molde</p>  <p>La eficiencia en este proceso depende de lo bien cerrado que quede el molde</p>	<p>Séllalón</p>  <p>El sellalón ayuda con el cierre del molde, tapando posibles fugas</p>
---	--	---

6.3. Características del proceso:

- Para realizar un buen proceso, es necesario que la presión de inyección sea la misma que la presión ejercida por el vacío. En Medellín, Colombia el valor máximo que se alcanza con vacío es de 24 pulgadas de Mercurio²⁸.
- El cierre del molde debe quedar sin aberturas por donde se pueda filtrar el aire o se derrame la resina.
- La resina utilizada debe tener una viscosidad baja y alta humectación. Unos tiempos de gelado largo y de endurecimiento muy cortos.
- Los moldes deben tener ángulos de desmolde mayores a 2°, debido al amarre que presenta el proceso.
- Los moldes debes contener muy buen desmoldante.
- Cada molde debe tener un post-proceso (mantenimiento) después de haber sido utilizado.
- Cierta segmento de manguera se pierde una vez terminada la polimerización de la resina, esto depende de las características del molde.

6.4. Pruebas Realizadas

El 2 de abril de 2009 con la ayuda del señor Rodrigo Vergara, docente del curso materiales compuestos de la universidad Eafit, en los laboratorios de materiales compuestos se procede con la concepción de las piezas laterales de la silla de ruedas, teniendo toda la asesoría del docente y organizando previamente todos los componentes necesarios para esta. Esto con el fin de entender y ver como era el proceso para tener un criterio más amplio a la hora sacar conclusiones. En un principio se realizarían dos pruebas de LRTM, pero debido a las condiciones adversas por la falla del molde y con el fin de probar otros procesos se realizaron dos pruebas, pero una con LRTM y la otra con VM.

²⁸ Fuente: Rodrigo Vergara, Docente de la materia Materiales compuestos. Universidad Eafit 2009-1

6.4.1. Prueba con proceso LRTM

La primera prueba realizada fue con LRTM por ser el proceso ideal para la conformación de la pieza. Se hizo una inyección con una presión de 25 Lb, pero se observó que el molde tenía una fuga y la resina se comenzó a salir por las paredes de este. (Ver Anexo A. Videos: Video 12. Proceso de moldeo por inyección - LRTM)

Los factores que causaron la falla fueron:

- Mal cierre del molde.
- Fugas o poros.
- Demasiada presión en la inyección.
- El catalizador estaba viejo y demoró el proceso de polimerización.

6.4.1.1. Resultados obtenidos

Al revisar la pieza notamos que como ya se había especulado, la resina no cubrió toda la cavidad del molde por lo que se pudieron observar:

- Partes de la pieza que no fueron permeadas por la resina.
- La pieza quedo mal conformada, con una parte en donde la fibra estaba expuesta y otra parte en donde el acabado superficial quedo excelente.
- El sellalón se insertó adentro de la pieza.

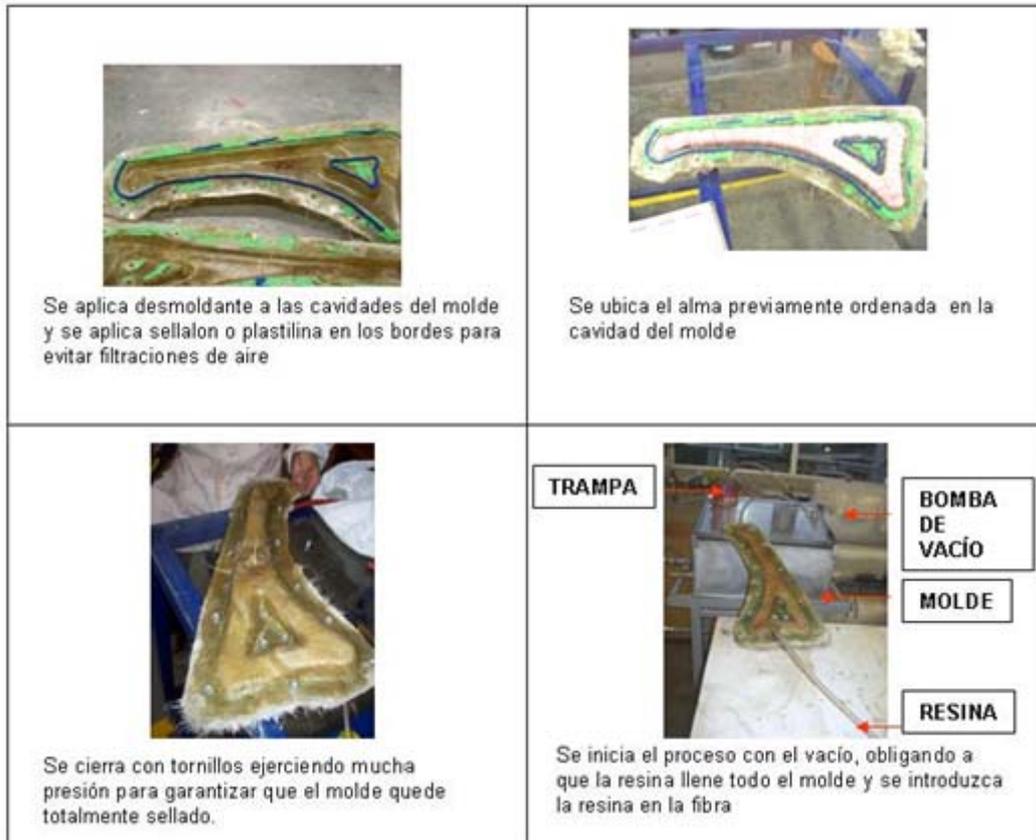
Imagen 42: Prueba inyección por LRTM



6.4.2. Prueba con proceso VM

Debido a los altercados sufridos en la primera prueba se decide conformar la otra pieza utilizando Vacuum Molding, en este proceso solo se necesita el molde, la trampa de vacío y la bomba de vacío. Y como el molde no soporta presión por la inyección sino que al contrario, el vacío ejerce succión ayudando al cierre correcto de este, se espera que este proceso sea el ideal para la conformación de la pieza.

Imagen 43: Prueba inyección por VM



En la elaboración de este proceso también ocurrieron fallas por causa del molde, este poseía algunas filtraciones de aire y dado que es menos denso que la resina la bomba de vacío prefiere succionarlo en forma de burbujas. (Ver Anexo A. Videos: Video 13. Proceso de moldeado porinyección- VM.)

6.4.2.1. Resultados obtenidos:

- La resina se salió del molde en el proceso de polimerización, esto debido a una fuga que no se pudo controlar.
- La succión no fue efectiva debido a las filtraciones de aire que posee el molde, generando burbujas y partes de la cavidad del molde sin ser llenadas.

- En las partes de la pieza donde se logro un excelente acabado, se observa que existió una buena mezcla entre la resina y la fibra de vidrio.

Imagen 44: Fallas en las pruebas realizadas.



Con el fin de realizar alguna pruebas de resistencia en la pieza, se decide hacer un someter a la parte a la carga efectuada por el peso de una persona. Ver imagen 45.

Imagen 45: Prueba de resistencia a la pieza inyectada por VM.



Los resultados fueron muy buenos, pues la pieza resistió el peso de una persona de 65 Kg, a pesar de que la pieza no está bien conformada y está muy expuesta a sufrir desgarros debido a esta clase de esfuerzos.

7. PRUEBAS DEL PRODUCTO

Con la finalización de la construcción del prototipo es necesario probar la silla de ruedas y verificar si realmente funciona como se espera en condiciones normales y adversas tales como subiendo o bajando rampas y escalones, recorriendo distancias por superficies lisas y rugosas, realizando giros de 360° con la silla detenida, maniobrando la silla al estar en movimiento, plegando y armando la silla. Todo esto se realiza con el fin de comprobar que elementos o sistemas deben someterse a un rediseño, que mecanismos funcionan adecuadamente y cuáles no, estabilidad estática y en movimiento, maniobrabilidad, seguridad de las partes, comodidad, tiempos de armado y de plegado.

En cuanto a lo que transmite la silla de ruedas es importante preguntar qué sentimientos se producen cuando el usuario interactúa con el producto.

Imagen 46: Pruebas del producto.



Estas pruebas resultan ser de gran apoyo para posteriores diseños o rediseños del producto además queda la constancia de la realización del proyecto para posible toma de decisiones futuras.

8. ELECCIÓN DEL NOMBRE

El nombre viene de la palabra Hueso que es el referente, en ingles se escribe “Bone”, al cambiar su primera letra por la V, debido a su forma en el chasis. También connota con la versión uno, del prototipo, “V” (versión) “one” (uno) y al nombrar la palabra suena similar a bueno, lo que genera cierto aspecto positivo al momento de realizar alguna publicidad o promoción del producto. Además la “V” está asociada al visto bueno 🟡 que significa aprobado, bueno. Por lo que se resalta en el logo abarcando todas las letras.

Otra curiosidad es que la definición de Von es un apellido que refiere según el estado de donde proviene a alguien que hizo algo de UTILIDAD a su país o entidad, Mayormente provenía de Alemania²⁹.

Imagen 47: Nombre y logo de la silla.



²⁹http://www.misapellidos.com/ver_datos.phtml?cod=12895. Consulta: Abril 2009

RECOMENDACIONES

- Es importante realizar un estudio de fatiga del material, de los seguros y de la unión entre ambas piezas, debido a que este punto presenta demasiado desgaste.
- Realizar todas las piezas que funcionen de mecanismo como seguros y bujes en cobre o platina.
- Realizar ensayos de inyección con moldes planteados con un mejor funcionamiento y hacer pruebas con los bujes insertados.
- Se recomienda para una futura intervención y continuación de este proyecto desarrollar más a fondo el proceso de inyección de resina, haciendo énfasis en el replanteamiento del diseño y materiales que componen los moldes, debido a que las evidencias reflejaron que es la calidad de este quien finalmente permitirá obtener un excelente resultado.
- Realizar pruebas de usuario, para visualizar que cambios pertinentes se deben realizar con respecto a las consideraciones que sugieren los usuarios reales.
- Realizar un plan de negocios que permita iniciar con la fase de empresarismo y pensar en el desarrollo de otros productos fabricados a través del mismo proceso.

CONCLUSIONES

- El Objetivo general y los objetivos específicos fueron cumplidos de manera satisfactoria, esto no solamente se evidencia por medio del trabajo escrito, en el cual se han desarrollado todas sus fases, y se ha demostrado un proceso claro y enfocado, sino que también se expresa a través de un prototipo que representa fielmente la intención de diseño que se apuntaba en resumen de este proyecto y que como se aprecian en las pruebas de producto, está en capacidad de soportar fácilmente las condiciones de uso.
- Se percibe a partir de las pruebas y análisis de los materiales y finalmente con la evaluación del producto como tal, un gran potencial en el uso de materiales compuestos como la fibra de vidrio, en aplicaciones como la desarrollada en este proyecto de grado, debido a que satisfacen notablemente los requerimientos técnicos, de procesos y mecánicos que garantizan el funcionamiento óptimo y seguro del producto.
- El resultado final del proyecto logró evidenciar mejoras con respecto a las sillas tradicionales en procesos como el tiempo de plegado, características como el peso de la silla y versatilidad a nivel de diseño, entre otros

SILLA DE RUEDAS VONE	
PESO CHASIS SIN LLANTAS TRASERAS	4, 1 Kg
PESO DE LAS LLANTAS TRASERAS	5,4 Kg
MEDIDAS DE LA SILLA PLEGADA (SIN LLANTAS TRASERAS)	470 X 450 X 350
TIEMPO DE ARMADO O PLEGADO	Entre 5 y 10 S.
MATERIALES	Resina, Fibra de vidrio, Acero, Duraluminio,

	PEAD y Lona
PRECAUCIONES	No usar con excesivo peso.

- El moldeado de piezas por RTM o VM implica conocer técnicas avanzadas de ingeniería como: modelación geométrica asistida por computador (CAD) manufactura asistida por computador (CAM), diseño por elementos finitos (FEA) y técnicas innovadoras de fabricación de moldes, de ahí que la complejidad en el diseño de una silla de ruedas para ser fabricada empleando cualquiera de los procesos antes mencionados radica fundamentalmente en el diseño del molde, el cual finalmente establece el nivel de detalle con el cual se obtendrán los resultados.
- A nivel mundial la fabricación de sillas de ruedas se realizan con procesos metalmecánicos, los cuales requieren de altas inversiones en tiempo y mano de obra, no obstante el mercado busca nuevas alternativas más accesibles y con mayores beneficios, por lo que la realización de productos a través de materiales compuestos como el desarrollado en este trabajo, el cual demostró ser totalmente confiable para ser llevado a los límites en cuanto a su resistencia estructural, se convierte en una alternativa interesante de seguir aplicando y proyectando a otros sectores de la industria, que abarquen desde lo aeroespacial hasta el sector de la construcción, entre otros.
- El peso de la silla se puede reducir más si los ejes y ruedas son fabricadas a partir de aleaciones de Titanio o Aluminio, o reduciendo las capas de fibras, puesto que las evidencias reflejan que la resistencia del material encontrada está muy por encima de los esfuerzos a los que son sometidos este tipo de productos.

- Es importante el uso de herramientas computacionales que brinden un conocimiento más amplio de las respuestas que arrojaría el producto en condiciones simuladas virtualmente , debido a que se pueden tomar decisiones cruciales que comprometan el éxito final del producto, a partir de estas herramientas se rediseño toda la estructura de la silla, haciéndola más estable, resistente e incluso con una mejor apariencia estética.
- Utilizando procesos novedosos y/o materiales diferentes se puede lograr un avance considerable en el diseño de este tipo de productos, reduciendo notablemente los costos y el tiempo de fabricación, además de optimizarlos en términos de propiedades mecánicas, resistencia a los agentes externos y otros factores que implican condiciones de servicio.
- El diseño final es completamente diferente a los conceptos con los cuales están realizadas las sillas actuales, sin necesidad de una estructura compleja y siendo elaborado con pocos procesos o pre-procesos de sub-ensamble resulta en un diseño sumamente sencillo a la vista y no sacrifica en ningún momento los requerimientos de diseño y criterios de seguridad establecidos según la normatividad.

BIBLIOGRAFÍA

- ANTEQUERA, P. MIRAVETE, A. JIMÉNEZ, L. Los materiales compuestos de fibra de vidrio. Secretariado de Publicaciones Universidad de Zaragoza. Zaragoza. España 1996. ISBN 84 7733 264 9. pp315
- Alfredo Molano Bravo (Artículo “Como vive un parapléjico” para la revista SOHO 2005)
- Diseño y desarrollo de productos. Enfoque Multidisciplinario. Tercera edición. Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger. EDITORIAL Mc GrawHill 2004. Pág. 13, 14 y 15
- CARVALHO, A. Fiberglass x Corrosao. Associacao Brasileira do Plastico Reforcado. Sao Paulo. Brasil. 1992. pp441.
- Revista Ocupación Humana On-line (2004, Volumen 9, Numero 1)
- Diario El País, Página 3B, Escribió Ernesto Gómez, Junio 27, Año 2007, Cifras según Catalogo de la Salud. PUBLICAR S.A. Año 2007
- Rodrigo Vergara. Profesor de materiales compuestos de la Universidad EAFIT, Departamento de Ingeniería, Año 2009-1
- Sunrise Medical Co, Tipos de componentes de una silla de ruedas. Estados unidos, 2008. http://marketing.sunrisemedical.com/education_es/formacion4.html
- EMA, Esclerosis Múltiple Argentina. Publicación de la asociación civil. En: Silla de Ruedas ¿Cómo elegir la más adecuada? Buenos Aires. Número 67 – primavera 2007; p. 30
- VIGUÉ, Jordi y TENLLADO, Muñoz A. El cuerpo humano: el aparato locomotor. ¿Cómo crecen los huesos?, tejido óseo esponjoso y tejido óseo compacto. Barcelona: PARRAMÓN EDICIONES, 1994, P48

- Ansys workbench 10.0 , Software que ofrece una eficiente e intuitiva interfaz de usuario, integración CAD, mallado automático y parametrización de modelos que posibilitan una simulación mecánica rápida y precisa.
- Sunrise Medical Co, La postura en la silla de ruedas. Estados unidos, 2008. http://marketing.sunrisemedical.com/education_es/formacion3.html
- SANCHEZ Aviles O y Niño Suarez A. 8º congreso iberoamericano de ingeniería mecánica. Silla de ruedas multifuncional. Cusco 2007. <http://www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/19/19-41.pdf>
- Vega A. Margarita y Meisel R. Adolfo. La estatura de los colombianos: un ensayo de antropometría histórica, 1910 – 2002. No. 45, Mayo de 2004.
- Gilberth. Taylor. Gantt Estudio de Movimientos. Diseño de producción industrial. Eficiencia en el trabajo

Frank B. Gilberth fue el fundador de la técnica moderna del estudio de movimientos, la cual se puede definir como el estudio de los movimientos del cuerpo humano que se utilizan para realizar una labor determinada, con la mira de mejorar esta, eliminando los movimientos innecesarios y simplificando los necesarios, y estableciendo luego la secuencia o sucesión de movimientos más favorables para lograr una eficiencia máxima.

- Norma técnica colombiana NTC 4265
Determinación de la estabilidad estática
- Norma técnica colombiana NTC 4266
Determinación de la eficiencia de los frenos
- Norma técnica colombiana NTC 4267
Clasificación por tipo con base en características de aspecto
- Norma técnica colombiana NTC 4268
Dimensiones totales máximas

- Norma técnica colombiana NTC 4269
Determinación de las dimensiones totales, masa y espacio de giro

http://www.distel.com.mx/htm_espaniol/html/catalogue/fibra_de_vidrio.html. Empresa Distel S.A, año de consulta 2008.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Hueso>. Enciclopedia libre Wikipedia. Consulta Abril 2008.

http://www.distel.com.mx/htm_espaniol/html/catalogue/fibra_de_vidrio.html. Empresa Distel S.A, año de consulta 2008.

http://www.quiminet.com.mx/ar3/ar_YQ%2514%2588%25D0w%25C1..htm
Consulta Abril 2008
