



CIATEC

DESARROLLO Y EVALUACIÓN BIOMECANICA
DE PLANTILLAS DE POLIURETANO USADAS
EN CALZADO DE SEGURIDAD

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

Maestro en Ciencia y
Tecnología
en la Especialidad de
Ingeniería Industrial y de
Manufactura

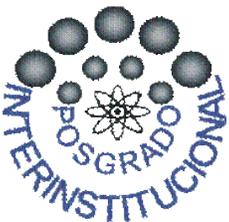
PRESENTA

José Luis Adrián Perales Alcacio

Tutor Académico

Dr. Sergio Alonso Romero

León, Guanajuato, México,



INDICE

1 INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Aspectos generales de la biomecánica del pie	4
1.2.1 Estudio antropométrico	8
1.2.2 Análisis de la presión plantar	11
1.3 El calzado de seguridad en México	13
1.3.1 Clasificación del calzado de seguridad	14
1.4 Plantillas para calzado	15
1.4.1 Materiales para fabricación de plantillas	17
1.4.2 El Poliuretano	18
1.4.3 Química del Poliuretano	19
1.4.4 Aditivos	20
2 JUSTIFICACION	24
2.1 Objetivo General	25
2.2 Objetivos particulares	25
2.3 Hipótesis	25
3 PRUEBAS DE ATENUACION DE IMPACTOS	27
3.1 Parámetros biomecánicos	28
3.2 Procedimiento de evaluación	30
3.3 El equipo de medición	31
4 PARTE EXPERIMENTAL	35
4.1 Metodología	35
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
5.1 Determinación de la densidad de las plantillas	40
5.2 Análisis de calzado con suela de poliuretano	42
5.3 Análisis de calzado con suela de hule vulcanizado	44
5.4 Análisis de calzado con suela microporosa	47
5.5 Aportación general para futuros trabajos	53
6 CONCLUSIONES	59
7 REFERENCIAS	60

1 INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

En años recientes el confort ha estado compitiendo con la moda como factor influyente en la compra de calzado. Además, existe una mayor conciencia en el consumidor sobre la importancia que tiene la elección de un calzado adecuado para la salud de los pies. En la actualidad muchos son los factores que determinan el confort como medida de calidad en el calzado de nueva generación; algunos de ellos pueden observarse en la figura 1. La aplicación de la Biomecánica en el calzado para satisfacer las necesidades funcionales de los usuarios supone una interesante vía para la innovación, ya que proporciona un claro valor agregado al producto y aumenta la probabilidad de éxito de éste en el mercado ⁽¹⁾.



Figura 1. El confort y su interacción con factores mecánicos y fisiológicos. ⁽¹⁾

La aplicación de criterios funcionales al diseño de calzado fue iniciada a finales de los años 60 por importantes empresas de calzado deportivo que emprendieron campañas publicitarias agresivas basadas en la investigación en biomecánica. Los sistemas para la amortiguación de impactos con burbujas de aire o los sistemas de torsión basados en estudios biomecánicos fueron muy bien recibidos por los usuarios. ⁽¹⁾

La extensión de las actividades de estas compañías tradicionalmente centradas en el calzado deportivo en mercados como el calzado casual, unido al incremento de las demandas de los usuarios, fueron circunstancias que favorecieron la aplicación de criterios biomecánicos a todo tipo de calzado⁽¹⁾. A partir del conocimiento generado hasta ahora en el ámbito de calzado, nuestro trabajo se enfoca específicamente a la evaluación de plantillas de poliuretano en calzado de seguridad con la intención de generar las bases en cuanto a la calidad y el confort que las empresas del ramo demandan actualmente.

Hasta la fecha existe literatura alusiva al tema pero insuficiente. Pocos son estudios científicos controlados y no suficientes investigadores se han enfocado al estudio de los beneficios que conlleva el uso de plantillas. De las investigaciones más importantes ha sido la que tiene como objetivo disminuir el esfuerzo no deseado en estructuras corporales que involucran el caminar o el estar de pie ⁽²⁾⁽³⁾. Sin embargo, ninguno de los trabajos realizados hasta la fecha se ha avocado al estudio de plantillas en calzado de seguridad a través de las variables que se estudian en el presente trabajo.

En la actualidad, la manufactura de plantillas representa una industria de muchos millones de dólares ⁽³⁾ lo cuál ha hecho atractivo para algunas empresas el avocarse a la innovación de materiales para funciones especiales. Tal es el caso de la empresa ANALCO de España, que desarrolló un material viscoelástico destinado a la construcción de inserciones que mejora la capacidad de amortiguación de impactos de las plantillas, y un material también viscoelástico destinado a toda la plantilla, que se caracteriza por contribuir de forma significativa al aumento de la comodidad del calzado, debido a la óptima relación entre la baja rigidez y la moderada capacidad de disipación de energía que presenta. ⁽¹⁾

Recientemente se han realizado trabajos de investigación acerca de plantillas para calzado en los cuales el objetivo es únicamente el realizar un análisis comparativo de diferentes plantillas, todas ellas disponibles comercialmente. Se

ha hecho investigación acerca del efecto que aportan diferentes tipos de plantillas a la distribución de la presión plantar, específicamente en los pacientes diabéticos durante la marcha ⁽⁴⁾. Otros trabajos se han enfocado exclusivamente al análisis comparativo de plantillas como dispositivos que mejoran la absorción de impacto y reducen los síntomas de algunas afecciones del sistema óseo ⁽⁵⁾. Algunos autores limitaron su estudio a plantillas fabricadas con diferentes materiales algunos base polietileno espumado y en otro recubierto con materiales de la firma PPT ® con el mismo espesor. En este caso el análisis de las plantillas se llevo a cabo empleando zapatos deportivos ⁽⁶⁾. Otro estudio arroja resultados interesantes en cuanto al uso de plantillas para absorción de impacto en botas de uso militar. Este análisis se lleva a cabo cuando se realizan actividades físicas como correr y marchar a determinada velocidad y cargando determinado peso en indumentaria y equipo. El estudio se basa en comparar plantillas elaboradas con materiales como Sorbotane ® (poliuretano viscoelástico) y Poron ® (poliuretano de celda abierta) ^{(7) (8)}, determinando que el primer material es el más efectivo.

Paralelamente a los estudios que comparan el efecto de la plantilla en el confort del calzado, se han monitoreado clínicamente a personas diabéticas que sufren de úlceras en los pies las cuales se mantienen en observación a lo largo de unos meses identificándolas por el uso de determinado tipo de plantilla, comparándolas con aquellas personas que usaron su calzado sin aditamentos especiales. ⁽⁹⁾ Para esta investigación se emplearon plantillas de hule microporoso y de poliuretano, mostrando resultados positivos en cuanto a la distribución de la presión plantar que se genera. En los casos donde no se utilizaron plantillas la presión plantar aumento considerablemente en las consideradas zonas críticas del pie, el talón y la parte de los metatarsos.

Respecto a otras investigaciones donde se evalúan plantillas de poliuretano, se concluye que el uso de estos dispositivos disminuyen notablemente el dolor de espalda, piernas y pies cuando la persona permanece de pié la mayor parte de la

jornada laboral ⁽¹⁰⁾. Esta es una de los trabajos que determinan en buena parte el estudio que realizamos, ya que evalúa el poliuretano como material para plantilla en las condiciones a las que los pies del trabajador son sometidos en una jornada laboral cotidiana. Gran parte de la actividad que se desarrolla en el sector industrial requiere una exigencia física constante por parte de sus trabajadores: desplazamientos, agacharse, levantarse o bien permanecer largas horas de pie con poco movimiento. ⁽¹¹⁾

En este contexto nuestro trabajo implica la evaluación de parámetros biomecánicos a plantillas de poliuretano dirigidas específicamente al calzado de seguridad y para el pie característico de los trabajadores de diversas industrias de la Republica Mexicana. El estudio se llevo a cabo tomando en cuenta que la mayoría de las actividades que desempeña el trabajador las realiza en forma semi estática. La evaluación se refuerza con la valoración de la plantilla de poliuretano a partir de la medición de la absorción de energía y de su rigidez de acuerdo a estudios biomecánicos que se aplican a diversos materiales empleados en la fabricación de plantillas.

1.2 ASPECTOS GENERALES DE LA BIOMECANICA DEL PIE

Un estudio biomecánico del pie incluye fundamentalmente un análisis de presiones plantares, cuyos resultados se asocian con el impacto y la absorción de energía que se producen entre la planta del pie y la superficie interna del calzado al efectuar cualquier movimiento o al permanecer de pie la mayor parte del tiempo al realizar alguna actividad. Una forma de ayudar al pie a desempeñar su función de manera adecuada es mediante el uso de ortesis plantares (plantillas) diseñadas bajo los parámetros determinados por la biomecánica.

El pie es la estructura corporal que soporta todo el peso del cuerpo, dotada de 26 articulaciones y una biomecánica compleja que lo convierten en la estructura más susceptible del cuerpo para padecer lesiones debido a los múltiples

movimientos a los que tiene que adaptarse cotidianamente⁽¹²⁾. La biomecánica, dentro de este contexto, es una disciplina que tiene por objeto el estudio de las estructuras de carácter mecánico que existen en los seres vivos. Su objetivo principal es el estudio del cuerpo humano con el fin de obtener un rendimiento máximo, resolver algún tipo de discapacidad, o diseñar tareas y actividades para que la mayoría de las personas puedan realizarlas sin riesgo de sufrir daños o lesiones ⁽¹²⁾⁽¹³⁾.

Como se muestra en la Figura 2, esta área del conocimiento se apoya en diversas ciencias biomédicas, utilizando los conocimientos de la mecánica, la ingeniería, la anatomía, la fisiología y otras disciplinas para estudiar el comportamiento del cuerpo humano y resolver los problemas derivados de las diversas condiciones a las que puede verse sometido. A continuación se describen algunas de estas disciplinas:

Antropometría. Tratado de las proporciones y medidas del cuerpo humano. La antropometría es la ciencia que estudia las dimensiones del cuerpo humano. Para llegar a conocer estas dimensiones se recurre a la estadística determinando aquellos valores que son considerados como promedio en el hombre. ⁽¹⁴⁾

Fisiología. Ciencia que tiene por objeto el estudio de las funciones de las actividades tan básicas de los seres vivos como la reproducción, el crecimiento, el metabolismo, la respiración, la excitación y la contracción, en cuanto que se llevan a cabo dentro de las estructuras de las células, los tejidos, los órganos y los sistemas orgánicos del cuerpo. ⁽¹⁴⁾

Quinesiología. Conjunto de los procedimientos terapéuticos encaminados a restablecer la normalidad de los movimientos del cuerpo humano. ⁽¹⁴⁾

Ergonomía. Estudio de datos biológicos y tecnológicos aplicados a problemas de mutua adaptación entre el hombre y la máquina. La Ergonomía busca el equilibrio entre el individuo y el medio que le rodea, considerando al hombre

como parte central, hace necesario la presencia de medidas con carácter estadístico que determinen al individuo. ⁽¹⁴⁾

Cinesiología. Estudia los movimientos del cuerpo humano, de sus partes y sus componentes. ⁽¹⁴⁾

Barometría. Analiza los efectos de la presión sobre el cuerpo humano basados en la gravedad. ⁽¹⁴⁾

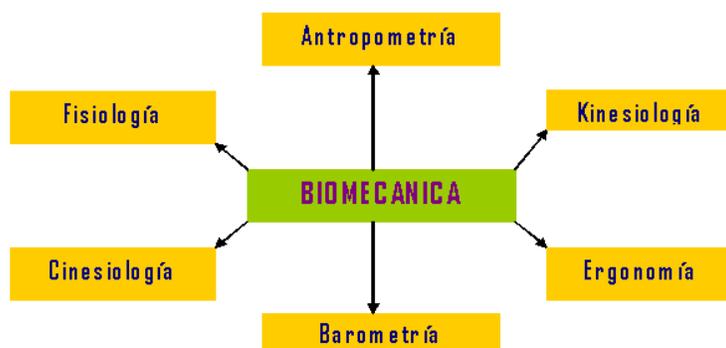


Figura 2.- Relación de la Biomecánica con otras ciencias. ⁽¹⁴⁾

La biomecánica está presente en diversos ámbitos, aunque tres de ellos son los más destacados en la actualidad:

- La **biomecánica médica**, evalúa las patologías que aquejan al cuerpo humano para generar soluciones capaces de evaluarlas, repararlas o paliarlas.
- La **biomecánica deportiva**, analiza la práctica deportiva para mejorar su rendimiento, desarrollar técnicas de entrenamiento y diseñar complementos, materiales y equipamiento de altas prestaciones.

- La **biomecánica ocupacional**, estudia la interacción del cuerpo humano con los elementos con que se relaciona en diversos ámbitos (en el trabajo, en casa, en la conducción de automóviles, en el manejo de herramientas, etc.) para adaptarlos a sus necesidades y capacidades. En este ámbito se relaciona con otra disciplina como es la ergonomía⁽¹⁴⁾.

Anatomía Biomecánica.

El pie, con fines didácticos, está dividido en tres unidades funcionales: la parte trasera, la parte media y la parte delantera. La parte de atrás del pie, constituido por el astrágalo que se articula con el calcáneo, forma la articulación de punto de apoyo posterior. La parte media del pie está formado por el escafoides, que se articula con la cabeza del astrágalo, el cuboides que se articula el escafoides y las bases de los metatarsianos. La parte delantera del pie, formado por los 5 metatarsianos y las falanges proximales, medias y distales (estas últimas del 2º al 5º dedos), articuladas forman los diferentes rayos del antepié.⁽¹⁵⁾

1. Tuberosidad posterior del calcáneo
2. Calcáneo
3. Astrágalo
4. Cabeza de astrágalo
5. Navicular
6. Cuneiformes
7. Cuboides
8. Metatarsianos
9. Dedos del pie

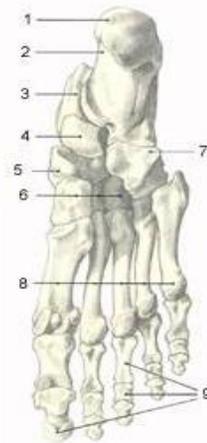


Figura 4.- Estructura Ósea del Pie

La disposición de todos sus huesos entre sí forma una bóveda en la parte media del pie, que le da una gran resistencia para la carga de peso y el esfuerzo, y que está apoyada en tres puntos que se conocen como trípode podálico. El único arco visible clínicamente es el longitudinal interno.

Los ligamentos articulares son los elementos estáticos del pie que mantienen unidos los distintos huesos entre sí para darle soporte a los arcos. La estabilidad estática la dan los ligamentos. El elemento dinámico son los músculos, que le dan resistencia y movimiento. ⁽¹⁵⁾

Para estudiar el pie desde el punto de vista biomecánico se ha formado una relación de materias como son la Antropometría, Baropodometría y el análisis de la marcha. En general se ha establecido el estudio de la antropometría del pie en la parte de la estática dentro del estudio de la mecánica. ⁽¹⁴⁾

1.2.1 Estudio antropométrico.

La palabra ‘antropometría’ significa mediciones del cuerpo humano. Esta palabra se deriva de las palabras Griegas *anthropos*, que significa ‘hombre’ y *metron* que significa ‘medida’. Los datos antropométricos se utilizan en Ergonomía para especificar las dimensiones físicas de espacios de trabajo, equipos, muebles y ropa en general con el fin de adaptar el puesto de trabajo al ser humano y no viceversa. La antropometría puede ser estática o dinámica, la primera es el estudio de las medidas estructurales del cuerpo humano en diferentes posiciones sin movimiento y la antropometría dinámica es el estudio de las posiciones resultantes del movimiento y esta ligada a la biomecánica. La antropometría y los campos de la biomecánica afines a ella tratan de medir las características físicas y funciones del cuerpo, incluidas las dimensiones lineales, peso, volumen, movimientos, etc., para optimizar el sistema hombre-máquina-entorno.

El pie se considera como una estructura compleja y dinámica la cual es responsable del soporte, absorción de impacto y locomoción. Como tal experimenta esfuerzos y cargas de diversa índole. ⁽¹⁶⁾ Parte de las dimensiones plantares del pie se indican en la figura 3.



Figura 3.- Antropometría plantar.

Desde el punto de vista antropológico, el hombre continúa su período de adaptación al bipedalismo. Es necesario tener en cuenta que el pie es una estructura en un proceso de cambio lento pero constante, y mientras nuestra adaptación al bipedalismo se perfecciona el pie sufrirá diversas patologías que deberemos conocer. ⁽¹⁶⁾

Como el resto del cuerpo, el pie también ha evolucionado alcanzando el equilibrio entre huesos y articulaciones y permitiendo la estabilidad con una mínima tensión muscular. Para llevar a cabo estas funciones el pie dispone de un mecanismo esquelético y muscular que son importantes durante las fases de la marcha. Para realizar estas funciones el pie presenta una serie de características anatómicas en su estructura ósea que puede clasificarse de acuerdo a la longitud de los metatarsianos de la siguiente manera:

- Pie cuadrado: todos los dedos (excepto el pequeño) tienen igual longitud.

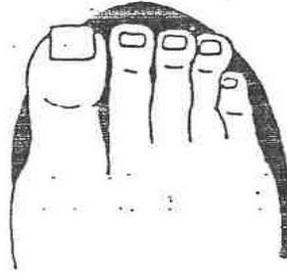


Figura 5.- Pie cuadrado

- Pie griego: el segundo dedo más largo que los demás.



Figura 6.- Pie griego

- Pie egipcio: el primer dedo más largo que el resto. Se trata del pie más frecuente.

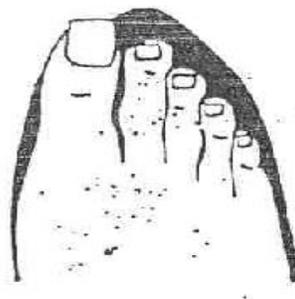


Figura 7.- Pie egipcio

- Pie Estándar: el segundo dedo es más largo que primero y tercero; el cuarto y el quinto son más cortos que el primero y segundo. Pese a su nombre tan sólo el 9.2% de la población dispone de este tipo de pies.



Figura 8.- Pie estándar

1.2.2 Baropodometría: Análisis de la presión plantar.

La evaluación de la presión plantar es fundamental para conocer la distribución de las fuerzas que se generan en la planta del pie. Estos valores son importantes para el diagnóstico y tratamiento de diferentes patologías como úlceras diabéticas en la planta del pie y presencia de deformidades en extremidades inferiores, entre otras. La distribución de presiones es un factor de influencia primordial en la comodidad del calzado. Durante la marcha todo el peso del cuerpo se apoya sobre la planta de los pies. Elevadas presiones en zonas específicas de la planta del pie pueden ocasionar molestias y discomfort e incluso lesiones si esto ocurre por tiempo prolongado. Asimismo, la evolución de las presiones en la planta del pie a lo largo del paso guarda relación con la estabilidad de la marcha y con la alineación del pie calzado con el suelo, siendo su estudio una herramienta muy potente para detectar patologías del miembro inferior. Por esta razón, hoy en día el uso de sistemas para analizar la distribución de la presión plantar, ya sea con fines académicos o clínicos, es indispensable. ⁽¹⁾

El pie representa una estructura perfecta en la que no es posible modificar cualquiera de sus partes sin influir directamente sobre el resto. Podríamos

considerarlo como un amortiguador, dotado de la resistencia suficiente para mantenernos y propulsarnos vigorosamente, pero con la elasticidad adecuada para que el movimiento resulte suave y progresivo. Consistencia que le confieren sus partes óseas, elasticidad que le proporcionan sus articulaciones y componentes fibroelásticos y vigorosidad de que le dotan sus potentes músculos y tendones. En la fase de apoyo del talón, su esquema mecánico sería de columna, en el momento estático se comportaría como una semibóveda y en el momento dinámico sería el equivalente a una palanca que, haciendo apoyo sobre la porción metatarsodigital, debe desplazar un peso que gravita sobre el astrágalo. ⁽¹⁶⁾

El pie en reposo soporta el peso del cuerpo y distribuye las fuerzas que se ejercen sobre él en tres puntos fundamentales, creando un triángulo que va desde el calcáneo hacia el primer y quinto metatarsiano. En condiciones normales, estando el calcáneo en el mismo plano que los metatarsianos, el peso del cuerpo se distribuye algo más del 50% sobre el talón. Como se muestra en la Figura 10, cuando el pie se encuentra en un calzado con tacón que eleva el plano del talón, el peso se desplaza proporcionalmente hacia delante según la altura que exista entre el talón y el plano del suelo ⁽¹⁶⁾.

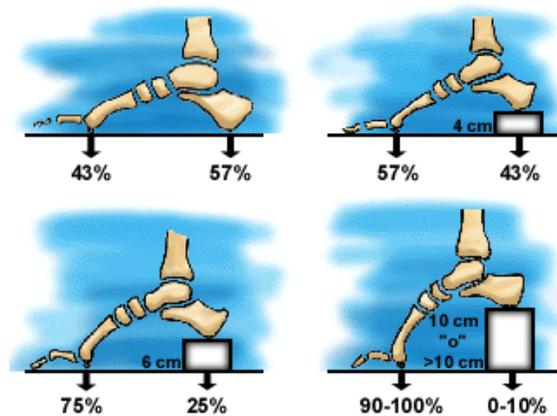


Figura 10.- Distribución de la presión corporal. ⁽¹⁷⁾

1.3 El calzado de seguridad en México.

De acuerdo al amplio historial de proyectos del CIATEC A.C. relacionados con la Manufactura de Calzado, actualmente no existe ningún referente que sustente un estudio aplicado al confort del calzado de seguridad y que además lo relacione con las condiciones antropométricas propias del pie característico de la población de México.

Dentro de condiciones de seguridad e higiene con las cuales debe contar toda empresa que se dedique a la manufactura y prestación de servicios que impliquen riesgo de accidente en extremidades inferiores, el calzado de seguridad tiene como objetivo formular criterios para la protección de los dedos y/o planta de los pies contra los riesgos debidos a caídas de objetos, golpes, aplastamientos y pinchazos.

Los criterios que servirán de base para la elección de un calzado de seguridad abarcan dos aspectos fundamentales:

- Existencia de calzados con prestaciones adecuadas a los riesgos que hayan que afrontar (proceso de apreciación).
- Elección propiamente dicha (elección de los modelos).

El calzado de seguridad, como equipo de protección individual que es, debe utilizarse cuando los riesgos presentes en el lugar de trabajo no se evitan con medios de protección colectiva técnicos o bien por medidas, métodos o procedimientos de organización del trabajo (principio de utilización).

El análisis de los riesgos no responde a criterios preestablecidos y debe ser realizado por el responsable de seguridad e higiene teniendo en cuenta el origen y forma de los riesgos (caídas de objetos, golpes, aplastamientos, pinchazos, etc.).

Una vez analizados los riesgos, se procederá a definir las prestaciones que habrán de tener los calzados de seguridad para responder eficazmente a los riesgos presentes en el lugar de trabajo.

Para ello tendrá en cuenta una serie de factores que son propios al origen y forma de los riesgos valorados. A modo de ejemplo se indican algunos de estos factores:

- Resistencia al impacto en caída libre.
- Resistencia a las proyecciones de objetos a velocidad.
- Resistencia al aplastamiento.
- Resistencia a la perforación.
- Resistencia al plegado.
- Resistencia a la corrosión de punteras y plantillas de seguridad metálicas.
- Resistencia a agentes químicos.
- Impermeabilidad al agua, disolventes, etc.
- Características antideslizantes de la suela.
- Cierta resistencia al contacto con partículas incandescentes o a altas temperaturas. ⁽¹⁷⁾

1.3.1 CLASIFICACION DEL CALZADO DE SEGURIDAD

Tipo I. Calzado de protección para uso general: Es aquel destinado a usarse en actividades donde el trabajador no está expuesto a riesgos de agentes físicos de acción mecánica.

Tipo II. Calzado de protección con puntera: Es aquel destinado a proteger los dedos de los pies, donde existen riesgos de agentes físicos de acción mecánica.

Tipo III. Calzado de protección dieléctrico: Es aquel destinado a proteger al usuario en zonas donde exista riesgo de descarga eléctrica.

Tipo IV. Calzado de protección conductor de electricidad: Es aquel que sirve para descargar la energía estática del cuerpo humano que se generó por acciones de trabajo.

Tipo V. Calzado de protección metatarsal: Es aquel que lleva un componente integral protector del empeine del pie, el cual resguarda razonablemente contra impactos directos al metatarso.

Tipo VI. Calzado de protección resistente a la penetración de objetos punzo cortantes hacia la planta del pie: Es aquel que evita la afección de la planta del pie del usuario debido a la incrustación directa de ciertos objetos punzo cortantes que traspasan la suela del calzado.

Tipo VII. Calzado de Protección Impermeable: Es aquel destinado a proteger al usuario del riesgo de filtración de líquidos o polvos finos a la parte interna, a través del mismo.⁽¹⁸⁾

1.4 PLANTILLAS PARA CALZADO

El objetivo de una plantilla es disminuir la presión vertical y de cizallamiento sobre las zonas del pie que están sometidas a una excesiva carga o esfuerzo. Las plantillas son ortesis plantares que se colocan dentro del calzado y que pueden utilizarse para prevenir las úlceras en el pie entre otras ventajas. Para ayudar al tratamiento de las condiciones que se manifiestan en los pies existen diferentes opciones; una de ellas es la terapia mecánica, la cual representa un 87% de efectividad en el tratamiento de los pies. La terapia mecánica tiene como propósito el estudio de la manufactura de dispositivos dentro del zapato o hacia fuera del zapato para corregir el pie, acomodar y soportar cualquier condición fisiológica, deformidad o disfunción.⁽¹⁹⁾

Como se menciono anteriormente, las plantillas tienen dos funciones básicas: repartir las cargas soportadas por el pie distribuyéndolas sobre toda la planta y almohadillar el apoyo de las zonas donde éste es inadecuado. El reparto de las

cargas plantares es especialmente importante cuando existe pie cavo, en el que el apoyo se realiza exclusivamente en el talón y en el antepié. Estas zonas están sometidas, lógicamente, a un aumento de presión de acuerdo con la fórmula: "Presión = Fuerza / Superficie".⁽¹⁹⁾

Con la utilización de plantillas, se rellena la zona correspondiente a los arcos plantares interno y externo, consiguiendo un aumento de la superficie de apoyo y por tanto una disminución de la presión parcial soportada por cada centímetro cuadrado de la piel plantar. El almohadillado plantar que proporciona la plantilla también tiene una función muy importante en las cabezas de los metatarsianos, por tratarse de una zona especialmente desprotegida. Están indicadas en pies contracturados, rígidos, con ulceraciones, neuropáticos, pies diabéticos, pies con prominencias óseas, secuelas de fracturas o traumatismos y, en general, siempre que se desee conseguir una gran descarga y amortiguación.⁽¹⁹⁾

Una forma de clasificar las plantillas es según su dureza, estas pueden tener una base y almohadillado rígido, semirrígido y blando, o la combinación de ellos de acuerdo al uso al que este dirigido:

— *Plantillas rígidas*: Se pueden fabricar en acero, aluminio o plásticos duros como el polipropileno, polietileno, laminado en resina. Tienen la ventaja de que son muy resistentes al uso y por tanto de larga duración, pero esta dureza no las hace recomendables.

— *Plantillas semirrígidas*: Son muy útiles para descargar las zonas correspondientes a las cabezas de los metatarsianos, mediante un relleno de los arcos interno y externo del pie, sin embargo su principal inconveniente radica en la falta de almohadillado de estas zonas.

— *Plantillas blandas*: Se fabrican en plásticos blandos que generalmente son espumas de baja densidad. Estos materiales, además de conseguir un buen almohadillado de toda la planta del pie, permiten absorber la fuerza del impacto que se produce durante la marcha⁽¹⁹⁾.

Otro tipo de variantes dentro de la fabricación de plantillas depende de la clasificación de acuerdo a su longitud; en la Figura 11 se pueden diferenciar tres tipos: ⁽²⁰⁾

- Plantillas completas: cubren toda la superficie plantar.
- Plantillas de tres cuartos de longitud: abarcan desde el talón hasta sobrepasar las cabezas metatarsianas.
- Plantillas cortas: abarcan desde el talón hasta las cabezas metatarsianas.

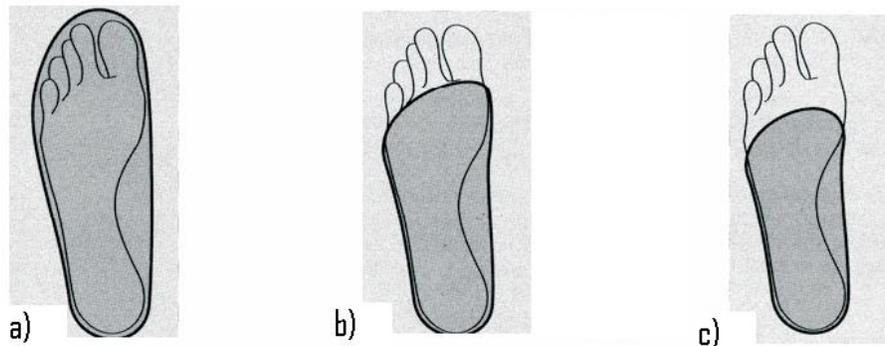


Figura 11. a) Plantillas completas; b) Plantillas $\frac{3}{4}$; c) Plantillas cortas ⁽²⁰⁾

1.4.1 MATERIALES PARA FABRICACION DE PLANTILLAS

Dentro de la diversidad de materiales que se han analizado algunos de ellos muestran beneficios en su uso como plantillas para calzado. Además de sus características viscoelásticas que le confieren buenas propiedades mecánicas, la espuma de poliuretano como material para plantilla presenta la ventaja de ser un material accesible en cuanto a la proveeduría, lo cual permite que sea más barato que otros materiales del tipo espumado, además de la versatilidad que presenta en su formulación pudiéndose obtener desde espumas flexibles hasta espumas rígidas. ⁽²¹⁾ Aunado a esas características, el poliuretano presenta la ventaja de ser un material totalmente conocido en la región del Bajío Mexicano puesto que su producción data ya de hace unas décadas en cuanto a la industria

del calzado se refiere. Esto lo sitúa a la delantera en comparación con otros materiales empleados como absorbedores de impacto tales como Plastazote ® (polietileno espumado), látex o silicona por mencionar algunos. ⁽⁷⁾⁽⁸⁾

1.4.2 EL POLIURETANO

Los poliuretanos son una familia de polímeros que se caracterizan por su versatilidad, dando lugar a materiales que varían en propiedades desde espumas muy blandas a plásticos rígidos, y que juegan un papel vital en muchas industrias. Por otra parte, en la vida cotidiana nos vemos inmersos en una gran variedad de artículos de poliuretano en contacto directo con nuestro cuerpo: Suelas de zapatos, colchones, cojines, juguetes, pinturas, prótesis, material quirúrgico y piezas automotrices. ⁽²¹⁾

Los reactivos principales de la síntesis del poliuretano son los isocianatos y los alcoholes. Los isocianatos pueden ser de tipo aromático o alifático. Del consumo total, los isocianatos aromáticos como TDI y MDI, se usan casi en un 90% en relación con los isocianatos alifáticos. Los isocianatos aromáticos se emplean por su disponibilidad en el mercado y su bajo costo comparado con los isocianatos alifáticos. Los isocianatos alifáticos se usan para conferir propiedades más especiales que generalmente se requieren en los recubrimientos. ⁽²¹⁾

Por otro lado, los alcoholes pueden ser prepolímeros base poliéster o poliéter, de éstos dos, los que más se emplean son los de tipo poliéter en casi 10 veces más que los de poliéster. ⁽²¹⁾

Se pueden obtener una gran variedad de propiedades físicas específicas modificando la formulación con el fin conseguir dichas propiedades para cada aplicación. Esta modificación se lleva a cabo mediante el uso de sustancias especiales llamadas *aditivos* que al añadirlas a los componentes de la fórmula

propician cambios estructurales del polímero, que se manifiestan ya sea en su procesamiento o en su comportamiento posterior de acuerdo a su uso final.

1.4.3 QUÍMICA DEL POLIURETANO

Los poliuretanos son polímeros que contienen un grupo uretano en su cadena estructural. Estos polímeros comparten la química del isocianato que al reaccionar con un alcohol, da lugar a la formación de un poliuretano. Esta reacción es un método comercialmente importante para la obtención de poliuretano ⁽²¹⁾. En la Figura 12 se muestra la reacción general de la síntesis de poliuretano.

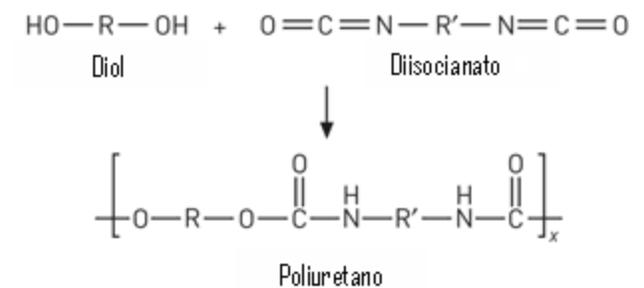


Figura 12. Síntesis de Poliuretano

En la síntesis del poliuretano se llevan a cabo diversas reacciones importantes con el grupo isocianato:

Con alcoholes: los alcoholes primarios son más reactivos que secundarios y éstos más que terciarios y fenoles. Se forma un grupo uretano. Los fenoles reaccionan más lentos que los alcoholes y se rompen fácilmente al calentar para volver a dar los productos iniciales, por lo que se emplean en la preparación de isocianatos bloqueados.

Con aminas: las aminas alifáticas son más reactivas que las aromáticas; las aminas primarias más que secundarias. Se forma un grupo urea. La reactividad de las aromáticas se reduce con sustituyentes en orto al grupo amina o con sustituyentes electronegativos (p.e. cloro). Las aminas se emplean como

extendedores, aunque existen en el mercado algunos poliéteres flexibles de cadena larga con grupos amino terminales que se emplean para formar los segmentos blandos.

Con agua: se forma un ácido carbámico que se descompone en una amina primaria más CO₂. La amina reacciona con más isocianato para formar urea y el CO₂ actúa de agente espumante. Esta reacción (Figura 2.) se emplea mucho en la fabricación de espumas flexibles ⁽²¹⁾.

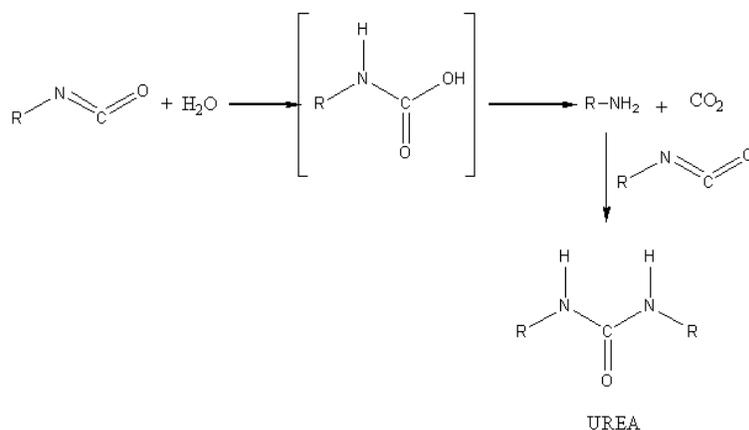


Figura 13.- Estructura de la reacción del isocianato con agua.

1.4.4 ADITIVOS

La espuma suave y los elastómeros que recobran su forma lentamente después de ser comprimidos son referidos como materiales viscoelásticos. Estos materiales son usados generalmente por sus excelentes propiedades de absorción de energía. Las espumas viscoelásticas son empleadas para acojinamiento de confort y protección al impacto.

La espuma viscoelástica se caracteriza por su lenta recuperación en cuanto a sus dimensiones iniciales después de aplicarse una compresión. Cuando el peso del objeto se dispone sobre una espuma viscoelástica, la espuma lentamente

toma la forma del objeto, y después de que el objeto es removido, la espuma lentamente recupera su forma inicial ⁽²²⁾.

Debido a la alta energía que posee el grupo isocianato, el poliuretano puede sintetizarse a partir de sus componentes básicos mencionados anteriormente. Sin embargo los requerimientos específicos para cada caso en la producción de poliuretano hace necesario el uso de aditivos como agentes auxiliares en dicho procedimiento.

En primer plano se puede ajustar la velocidad de reacción del poliuretano de acuerdo a cada aplicación. Se emplean también surfactantes, agentes espumantes, biocidas, agentes de bloque, pigmentos y fillers.

A continuación se describen algunos de los aditivos de mayor uso en la producción de poliuretanos:

EXTENDEDORES DE CADENA

Son compuestos de bajo peso molecular que pueden extender la cadena (funcionalidad 2) o formar entrecruzamientos (funcionalidad mayor de 2). Habitualmente son alcoholes como etilenglicol, butanodiol, glicerina, trimetilolpropano o aminas. El extendedor se añade usualmente en suficiente cantidad como para permitir la segregación de segmentos duros que resultan en un aumento del módulo elástico y de la Tg del segmento duro del polímero (que es una medida del punto de reblandecimiento e indica el límite superior de temperatura de trabajo). El butanodiol (BD) es el que más se usa, al igual que el bis-(β-hidroxietil) éter de la hidroquinona (HQEE) o del resorcinol (HER), que introducen anillos aromáticos, cuando se quiere mejorar la dureza y la resistencia al desgarro manteniendo las propiedades mecánicas a temperatura elevada. ⁽²¹⁾

CATALIZADORES

Son aditivos que esencialmente aumentan la velocidad de reacción. Se usan prácticamente en todas las formulaciones de PU, ya que en la industria un menor tiempo de reacción significa una mayor producción, pero son

especialmente importantes en la reacción de formación de espumas, donde se debe equilibrar la reacción de espumado con la reacción de polimerización, de tal modo que ambas sean simultáneas. Para alcanzar dicho objetivo se emplean aminas aromáticas terciarias y compuestos organometálicos para la reacción de formación del uretano.

Las aminas terciarias son los catalizadores más ampliamente usados en la fabricación de espumas. Entre la multitud de ofertas comerciales disponibles, cabe destacar el diaminobiciclooctano (DABCO), que es un sólido soluble en agua, glicoles y poliéteres que puede usarse en la mayoría de tipos de PU. ⁽²¹⁾

ESPUMANTES

La reacción de formación de un PU es exotérmica y el calor generado sirve para vaporizar un agente espumante o propelente líquido en la producción de espumas. Líquidos de bajo punto de ebullición son utilizados en la fabricación de espumas rígidas.

Otra forma de generar un gas es la reacción del isocianato con agua para producir CO₂, que se aprovecha como espumante. Este es el método más antiguo e importante en la producción de espuma flexible.

Es poco práctico usar sólo espumantes líquidos en espumas flexibles de baja densidad, porque es necesario el calor que desprende la reacción del isocianato con agua para completar la polimerización y vaporizar el espumante líquido.

Para aplicaciones especiales han ido usados líquidos de bajo punto de ebullición tales como los fluorocarbonos que, aunque tuvieron gran auge en el pasado, actualmente se ha evitado su aplicación debido a las restricciones ambientales de cada país. ⁽²¹⁾

SURFACTANTES

Estos materiales juegan un papel importante principalmente en la manufactura de espumas, su función en este caso es estabilizar las celdillas para que no

colapsen hasta que las paredes sean lo suficientemente fuertes para soportar su peso. Se emplean casi con exclusividad siliconas o surfactantes basados en ellas (copolímeros de PDSM con poliéter injertado). Estos estabilizadores son usados para abatir la tensión superficial de las materias primas y actúa como emulsificante del sistema total. Algunas veces ayudan en la integración de componentes incompatibles de la mezcla. ⁽²¹⁾

PLASTIFICANTES

Se usan casi exclusivamente en algunas formulaciones de elastómeros de PU vulcanizables, termoplásticos y sellantes. Los plastificantes habituales en plásticos no son compatibles con los PU por lo que se emplean algunos de tipo éster (ftalatos y melitatos). ⁽²¹⁾

CARGAS Y COLORANTES

Su función es modificar ciertas propiedades de dureza, resistencia al desgarre, inflamabilidad, etc. Entre los aditivos de este tipo más comunes se encuentra el negro de humo, materiales inorgánicos como pigmentos o fibras para paneles de puertas de automóvil. También sirven a veces para reducir costos, como son las cargas minerales. Entre las cargas inorgánicas se pueden citar: carbonato cálcico, sulfato de bario, caolines, sílices expandidas y coloidales, y vidrio en microesferas y fibras. Las cargas deben estar secas cuando se emplean en PU. Se pueden incluir en la formulación por razones estéticas o para identificación. Se usan tanto orgánicos como inorgánicos. El más ampliamente usado es el negro de humo; como protector de rayos UV se emplea en relaciones a partir de 0,1 partes por 100 de polioliol. ⁽²¹⁾

2 JUSTIFICACION

La necesidad actual de conjuntar la calidad y el confort en la fabricación de calzado de seguridad conlleva a una serie de beneficios que se reflejan en la salud de quien lo usa, contribuyendo a mejorar la productividad en su respectivo centro de trabajo respetando la integridad de su persona.

De acuerdo a estudios recientes se considera que de un 10% a 15% de trabajadores se incapacita por lesiones del pie relacionadas con el trabajo. Un obrero que esta cansado y que sufre de dolor esta menos alerta y es más propenso a actuar inseguramente, lo cual puede resultar en un accidente laboral ⁽²³⁾.

Con el objetivo de ser precursores en la innovación del calzado de seguridad en México, la empresa involucrada en el proyecto identifico esta necesidad y en conjunto con CIATEC se han propuesto coadyuvar al diseño y construcción de calzado de seguridad como un producto tecnológicamente vanguardista, que cumpla satisfactoriamente con los parámetros biomecánicos y que además le permita comercializar su producto con el valor agregado que le confiere un estudio de tal magnitud en una industria que poco se ha desarrollado en los últimos años. Aunado a ello se debe resaltar el beneficio intrínseco que obtiene el consumidor al hacerse de un calzado tecnológicamente diseñado a un precio accesible.

Otro de los aspectos importantes que motivan la realización de este proyecto es establecer los lineamientos técnicos para conformar una metodología específica para la evaluación del calzado de seguridad, para que éste pueda considerarse confortable. El desarrollo y la evaluación biomecánica de plantillas son parte fundamental de este trabajo para alcanzar el objetivo.

2.1 OBJETIVO GENERAL:

- Obtener plantillas de poliuretano y evaluarlas a partir de pruebas biomecánicas de atenuación de impactos de acuerdo a la norma ASTM F 1614-99- A, y de esta forma proponer formulaciones de poliuretano para plantillas y que éstas influyan positivamente en el confort del calzado de seguridad en México.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Obtener plantillas de poliuretano a partir de un diseño de experimentos modificando su formulación con la adición de aditivos para determinar su efecto sobre los parámetros biomecánicos energía absorbida y rigidez.
- Evaluar las plantillas de poliuretano en calzado de seguridad fabricado con suela de poliuretano, suela de hule vulcanizado y suela microporosa mediante pruebas de atenuación de impactos de acuerdo a la norma ASTM F 1614-99- A.
- Proponer opciones de plantillas para su uso en calzado fabricado con diferente tipo de suela y que coadyuven al confort de los mismos.

2.3 HIPOTESIS

El poliuretano es una resina sintética que se caracteriza por su escasa permeabilidad a los gases, alta resistencia química y excelente aislamiento eléctrico; además, son materiales cuyas propiedades varían desde espumas muy blandas hasta plásticos rígidos o con propiedades viscoelásticas. Se pueden obtener espumas flexibles, semirígidas y rígidas en diferentes densidades. ⁽²¹⁾

Esta versatilidad en la síntesis de poliuretano es la razón por la cual se propone este material para la fabricación de plantillas confortables. La manipulación de algunas variables de proceso así como la incorporación de otros aditivos a la formulación nos permitirá analizar el intervalo de densidades en el cual la

plantilla obtenida pueda considerarse como una innovación en cuanto a confort en su uso en calzado de seguridad diseñado de acuerdo a las características del pie de la población de México.

3 PRUEBAS DE ATENUACION DE IMPACTOS

La resistencia al impacto se define como la energía absorbida por el material por unidad de área, en un ensayo a muy alta velocidad de deformación (impacto). La capacidad de absorber energía depende no sólo del tipo y microestructura del material, sino también de su forma, tamaño y espesor. Debido a ello los ensayos de impacto se llevan a cabo en condiciones normalizadas. ⁽²⁴⁾ De otra manera, la atenuación de impactos se entiende como la capacidad del cuerpo humano o del calzado de disminuir o absorber energía de las fuerzas que se generan al producirse el contacto del pie con el suelo durante la marcha, el correr o al saltar ⁽¹⁾.

Los impactos y la vibración subsiguiente, que se propaga a través de la estructura esquelética, han sido relacionados con falta de confort e incluso con trastornos degenerativos del cartílago articular. Sin embargo, la transmisión de los impactos a lo largo del cuerpo también tiene un papel beneficioso para el crecimiento y fortalecimiento óseo y muscular. Asimismo, la capacidad de amortiguación depende de la edad del usuario, ya que la capacidad de amortiguación del tejido blando del talón disminuye con la edad. Por estos motivos, es importante que la capacidad de amortiguación de un calzado sea adecuada al uso y al usuario, sin ser demasiado baja ni demasiado elevada. Por tanto, el diseño del calzado debe suplementar los mecanismos naturales del cuerpo humano. Esto se consigue a través de un diseño adecuado de la cazoleta y/o de la correcta combinación de los materiales situados debajo del talón ⁽¹⁾.

Las pruebas de impacto cubren la medida de las características de atenuación de impactos de alta frecuencia en la zona del talón, de acuerdo al método “A” descrito en la norma ASTM F 1614-99 para los materiales y sistemas utilizados en la fabricación de calzado. A partir de esta norma se estudian principalmente dos parámetros: la rigidez y la capacidad del material para absorber energía. La rigidez se relaciona con la fuerza transmitida hacia el cuerpo al realizar una

actividad, mientras que la segunda se refiere con la cantidad de energía que el material puede disipar y que no es transmitida al cuerpo. Estos parámetros no están necesariamente correlacionados. Las características deseables para un buen material de confort son una baja rigidez y una alta capacidad de absorción de energía ⁽²⁹⁾.

3.1 PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

Para verificar que una plantilla cumpla con los requerimientos necesarios para considerarla un elemento de confort, debe ajustarse a los siguientes parámetros de acuerdo a la norma ASTM F 1614-99 (Tabla 3-1):

TABLA 3-1

Prueba	Mínimo	Máximo
Rigidez	45,000 N/m	90,000 N/m
Energía Absorbida	0.9 Joules	1.8 Joules

Los parámetros estudiados en el método de atenuación de impactos de alta frecuencia son: Fuerza máxima (N), Compresión máxima (mm), Rigidez (N/m) y Energía absorbida (J). El procedimiento que se muestra a continuación se realizará cuando las probetas sean zapatos terminados, los cuales pueden o no incluir plantillas.

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE ATENUACION DE IMPACTOS:

A.- Se configurará el equipo de la siguiente forma:

Impactador	Masa	Altura	No. Ciclos	Periodo de ciclos
42mm. de diámetro	Varilla: 1,25 kg. Masa roja: 4,0 kg.	43 mm.	5	2,2 s

B.- El zapato se coloca debajo del dispositivo de impacto de 42 mm de diámetro, como se observa en la Figura 14. La altura se ajusta automáticamente con los discos centradores.

C.- Se activa el equipo para realizar la medición. Dos mediciones de 10 impactos y una ultima medición de 5 impactos que son las que nos proporcionan los resultados de la prueba.

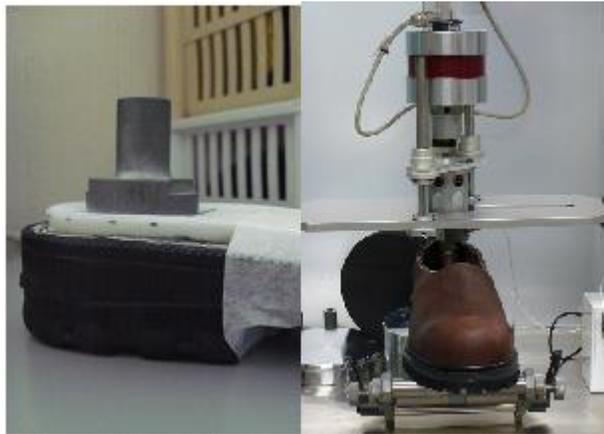


Figura 14. Adaptación del calzado para la atenuación de impactos.

D.- Se reporta el promedio de las cinco mediciones en los parámetros de rigidez del material reportada en unidades de (N/m), con una exactitud de 1 unidad por lo menos y energía absorbida para el material reportado en unidades de (J) con una exactitud de 0,00001 unidades.

3.2 EL EQUIPO DE MEDICION

EL equipo (Lecus) con el que cuenta el Laboratorio de Biomecánica de CIATEC fabricado por el Instituto de Biomecánica de Valencia, el cuál se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Maquina de absorción de impactos.

La maquina debe ser capaz de realizar impactos de alta frecuencia con duración de 0,005 a 0,05 s. Debe evitar rebotes y realizar ciclos de impactos, esto es, realizar por lo menos 5 impactos en intervalos de 1,0 a 3.0 s cada uno de ellos. Además debe estar instrumentada con un dispositivo capaz de medir la fuerza que se necesita para deformar el material a ensayar, con una exactitud de 0.1 N y un rango de medida de 0 a 500 N. Debe estar provista de un dispositivo para medir la deformación que sufra el material al aplicarle el impacto de alta frecuencia.

Esta medición se debe hacer con una exactitud de 0,01 mm por lo menos y con un rango de 0,1 mm a 15.0 mm.; además debe contar con un sistema que permita medir con exactitud de 1.0 mm la distancia a la cual se dejara caer la masa sobre el material a ensayar. También debe tener un mecanismo para cambiar el impactador y la masa de ensayo. La maquina debe de tener la

capacidad de capturar los datos con una frecuencia mínima de 1000 Hz., esto significa que debe tomar por lo menos un dato de las magnitudes que se ocupan cada 1,0 ms.

Impactador.- Es la pieza metálica circular que hace contacto con la plantilla y planta del zapato. El área de contacto con los materiales debe ser tal que el diámetro del impactador sea de $42,0 \pm 0,1$ mm y los bordes estén redondeados con un radio de $1,0 \pm 0,2$ mm.

Masas de ensayo- Son las masas que se utilizan en el equipo y existen dos diferentes, la varilla 1.25 ± 0.1 Kg. y a masa roja que tiene una masa de 4 ± 0.1 Kg.

Micrómetro – Micrómetro con base de metal con diámetro de 50 ± 5 mm. y “pie” con un diámetro de 5 ± 2 mm con una resolución de 0,01 mm que ejerza una carga sobre el material a medir de 300 ± 100 g, además su rango de medición debe ser de 0,01mm hasta máximo de 10 mm.

Vernier- Con una resolución de 0,01mm y rango de medición de 0,01mm hasta 150.00 mm.

3.3 Análisis del método de pruebas de atenuación de impactos en plantillas para calzado.

A partir de la metodología establecida en el Laboratorio de Biomecánica de CIATEC para la norma ASTM F 1614-99 A, se llevaron a cabo una las pruebas de atenuación de impactos en una primera serie de 13 plantillas, la cual solo resulto satisfactoria para el calzado con suela de PU en cuanto al coeficiente de determinación $R^2_{ajustada}$ se refiere, resultando también un error estadístico muy alto. Para explicar este comportamiento estadístico se pensó que el no haberse producido y evaluado el total de las plantillas referentes a los puntos al centro

provenientes del diseño de experimentos, fue la posible causa de la falta de ajuste de los datos a la ecuación de regresión correspondiente. Posteriormente se elaboraron las 7 plantillas correspondientes a los puntos al centro faltantes para después evaluarlas junto con las 13 plantillas anteriores. Este nuevo análisis no generó cambios significativos en cuanto al valor de $R^2_{ajustada}$, por lo que se analizó nuevamente el diseño de experimentos intentando llegar a la obtención de resultados que se ajustaran mejor al modelo que describe el proceso.

Para la segunda etapa se tomó en cuenta que la estrechez de los niveles de los factores, provoca que el efecto sobre la variable de respuesta debido a ellos, sea demasiado pequeño al cambiar de nivel ⁽²⁷⁾. Los niveles de los factores se ampliaron. Se realizó una nueva corrida completa de 20 plantillas incluyendo todos los puntos al centro que propone el diseño de experimentos. A partir del análisis de varianza se observó que los datos obtenidos no representan un cambio importante en el coeficiente de determinación $R^2_{ajustada}$, lo cual nos dice que mediante tales datos no podemos explicar la variabilidad de la respuesta en estudio. Tal situación indujo al análisis minucioso del método de ensayo, observando que la parte del talón no era lo suficientemente amplia para que al colocar la plantilla ésta hiciera contacto con la totalidad de la superficie en su interacción con la suela, lo cual también evitaba que el *impactador* hiciera contacto de forma paralela a la superficie de la plantilla, por lo cual se generaban datos que carecían de confiabilidad. Este es un elemento que podría producir inconsistencia en el análisis de los datos provenientes de la evaluación de los parámetros biomecánicos. Lo anterior nos llevó a modificar la forma de llevar a cabo la evaluación, sobretodo en lo que se refiere a la adaptación de la parte trasera del calzado a las dimensiones de la plantilla. Esta conjetura se fundamenta en que la variabilidad atribuible a los factores estudiados es pequeña ($R^2_{ajustada} < 70\%$) cuando los errores de medición son altos ⁽²⁷⁾. Las modificaciones hechas a la configuración del calzado se muestran en las figuras 4.3 y 4.4 que se presentan a continuación.



Figura 4.3 Adaptación inicial del calzado



Figura 4.4 Modificaciones al calzado para mejorar la adaptación plantilla-calzado

Para tratar de disminuir el error estadístico, se hicieron modificaciones también en la configuración de la plantilla. El diseño de la plantilla proviene de un estudio donde se prevé en el diseño una cazoleta en la parte trasera de la plantilla, con el objetivo de ayudar al confinamiento del almohadillado natural del talón y así mejorar su eficiencia en cuanto a la amortiguación de impactos⁽³²⁾. Para efectos de mejorar el método de evaluación de parámetros biomecánicos de acuerdo a la norma ASTM F 1614-99 A, hubo la necesidad de eliminar la cazoleta de la plantilla para llevar a cabo la evaluación biomecánica de la misma; ello debido a que el contorno inferior de la cazoleta no permitía el contacto óptimo del impactador como lo indica la norma; es decir, debe existir contacto total entre las superficies paralelas, en este caso entre la plantilla y el impactador. En la figura 4.5, se observa como se acotó la zona de impacto y se sujetó la plantilla, considerando que ésta va unida al calzado con adhesivo y que en la primera evaluación la plantilla vibraba al momento del impacto, lo cual

provocaba que la serie de impactos de cada ciclo se efectuaran en diferente lugar de la plantilla, tomando de referencia el impacto inicial y el impacto final. Tales modificaciones no se contemplaron en el procedimiento inicial de evaluación proporcionado por el Laboratorio de Biomecánica de CIATEC.

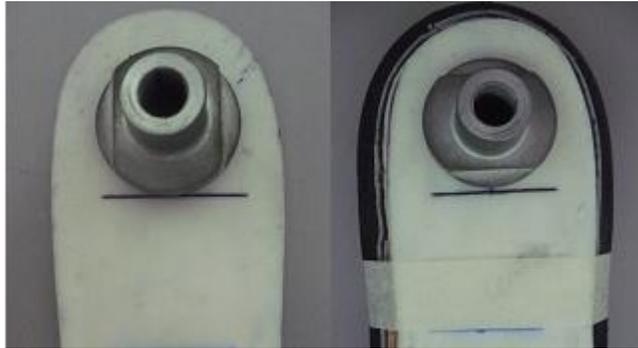


Figura 4.5 Adaptación de la plantilla al diámetro del impactador.

4 PARTE EXPERIMENTAL

4.1 Metodología

Para la obtención de las plantillas se tomo en cuenta el procedimiento sugerido por el proveedor de acuerdo a la ficha técnica de los materiales. Se adicionaron dos aditivos a la formulación de poliuretano de acuerdo al diseño de experimentos utilizado. La intención del uso de aditivos complementarios a la formulación es por un lado, mejorar las características viscoelásticas del poliuretano, y por otra parte estudiar el comportamiento del material a partir de la adición de un espumante externo a la formulación. La producción de las plantillas se llevo a cabo a nivel laboratorio en un molde fabricado con resina epóxica, para posteriormente escalarlo a nivel industrial. Un esquema general de la síntesis del poliuretano se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1.- Etapas de la síntesis del poliuretano. ⁽²⁵⁾

☉ Los reactivos principales empleados son:

- Isocianato- P
- Polioliol- R

- La relación de la mezcla es 100:180 (isocianato: polioli)
- Para el caso de este trabajo se adicionaron a la formulación otros aditivos codificados como A y B, esto en la búsqueda de mejorar las propiedades mecánicas de las plantillas en su posterior evaluación biomecánica.
- La densidad teórica es de 0.4 g/cm^3 (para 80 g de mezcla en un molde de 200 cm^3). En el presente estudio no existe restricción, al menos inicialmente, en cuanto al establecimiento del valor de la densidad, ya que ésta se determinará una vez seleccionada(s) la(s) plantilla(s) que cumplan con la norma ASTM F 1614-99 A
- El proceso se realizó con temperatura de precalentamiento de moldes de 50°C aproximadamente.
- Utilizamos una velocidad de mezclado es de 2500 rpm.
- Se empleo catalizador de amina terciaria al 0.5% respecto de la mezcla de polioli; esto en cuanto a la producción de plantillas en laboratorio, ya que dicho porcentaje se ajustará a las condiciones productivas cuando se fabriquen industrialmente.
- A partir del diseño de experimentos se produjeron 40 unidades de plantillas en dos etapas para su posterior evaluación biomecánica (figura 4.2).



Figura 4.2. Plantillas de poliuretano.

5 RESULTADOS Y DISCUSION

Un estudio inicial de los parámetros biomecánicos se llevo a cabo con la finalidad de verificar el efecto positivo que conlleva el uso de ortesis plantares como complementos integrales del confort en el calzado. La evaluación de tales parámetros se realizo en el marco de la norma ASTM F 1614-99 A, cuyos valores se muestran en la Tabla 5-1. Al evaluar el calzado sin plantillas los resultados se observan fuera del intervalo de valores que marca la norma, de acuerdo a la Tabla 5-2. Ello explica la importancia del uso de ortesis plantares como aditamentos que ayudan a la atenuación de los impactos generados por la propia biomecánica del cuerpo humano, lo cual se puede verificar en las Tablas 5-3, 5-4 y 5-5 que contienen los resultados de la evaluación el calzado con la serie de plantillas de poliuretano que se produjeron en laboratorio en la última etapa de experimentación.

Tabla 5-1. Norma ASTM- F 1614-99 A

Prueba	Mínimo	Máximo
Rigidez	45,000 N/m	90,000 N/m
Energía Absorbida	0.9 Joules	1.8 Joules

Tabla 5-2. Resultados de atenuación de impactos en calzado sin plantilla.

Calzado con suela de:	Rigidez (N/m)	Energía absorbida (Joules)
Poliuretano	93027	0.84052
Hule vulcanizado	109878	0.81492
Microporosa	113639	0.81627

Tabla 5-3. Resultados de atenuación de impactos en calzado con suela de poliuretano.

Experimento	Rigidez (N/m)	Energía Absorbida (Joules)	Costo(par)*
F1	71156	1.07239	\$ 6.28
F2	82404	0.95134	\$ 8.15
F3	69660	1.10509	\$ 6.28
F4	81386	1.02041	\$ 8.15
F5	68264	1.18042	\$ 6.28
F6	86471	0.98507	\$ 8.15
F7	73653	1.06097	\$ 6.28
F8	85624	1.00089	\$ 8.15
F9	67857	1.18354	\$ 7.21
F10	75080	1.10527	\$ 7.21
F11	73119	1.11033	\$ 8.15
F12	72290	1.12584	\$ 8.15
F13	81308	1.00547	\$ 7.21

* Costo de materia prima.

Tabla 5-4. Resultados de atenuación de impactos en calzado con suela Microporosa.

Experimento	Rigidez (N/m)	Energía Absorbida (Joules)	Costo(par)*
F1	69015	1.0995	\$ 6.28
F2	71468	1.08911	\$ 8.15
F3	66465	1.14652	\$ 6.28
F4	56653	1.20723	\$ 8.15
F5	64982	1.17033	\$ 6.28
F6	65408	1.15215	\$ 8.15
F7	64884	1.13286	\$ 6.28
F8	57259	1.19058	\$ 8.15
F9	67109	1.12096	\$ 7.21
F10	64670	1.17421	\$ 7.21
F11	62910	1.14073	\$ 8.15
F12	56327	1.2002	\$ 8.15
F13	67298	1.15365	\$ 7.21

* Costo de materia prima.

Tabla 5-5. Resultados de atenuación de impactos en calzado con suela Hule Vulcanizado.

Experimento	Rigidez (N/m)	Energía Absorbida (Joules)	Costo(par)*
F1	64258	1.09643	\$ 6.28
F2	52003	1.16364	\$ 8.15
F3	59506	1.16692	\$ 6.28
F4	57924	1.16146	\$ 8.15
F5	69731	1.10291	\$ 6.28
F6	68247	1.05805	\$ 8.15
F7	62345	1.12010	\$ 6.28
F8	57461	1.15254	\$ 8.15
F9	65832	1.11691	\$ 7.21
F10	69018	1.08874	\$ 7.21
F11	60405	1.08614	\$ 8.15
F12	56370	1.14867	\$ 8.15
F13	60354	1.13994	\$ 7.21

* Costo de materia prima.

El medio para analizar los datos que describen el comportamiento de los factores en estudio sobre la variabilidad de las respuestas *energía absorbida* y *rigidez*, fue un diseño de experimentos realizado en el software STATGRAPHICS. Como punto de partida, la Tabla 5-6 muestra a través de un resumen de los diseños experimentales realizados desde el inicio de este trabajo, los coeficientes de determinación que se han obtenido a partir de las modificaciones que se hicieron en principio a los niveles de los factores y posteriormente al calzado en lo que se refiere a su configuración. Cabe señalar que para considerar que los factores estudiados afectan de manera significativa la variabilidad de la respuesta, es recomendable una $R^2_{ajustada}$ mayor al 70%, de acuerdo al análisis estadístico que proponen Gutiérrez-De la Vara (Análisis y Diseño de Experimentos; Mc Graw-Hill; 2004) ⁽²⁸⁾. La Tabla 5-6 resume también el análisis mostrado anteriormente en el capítulo 3.

Tabla 5-6. Resumen del coeficiente de determinación $R^2_{ajustada}$

Tipo de suela	Variable de salida	R^2_A	R^2_A	R^2_A
		DIC 2007	MARZO 2008	ABRIL 2008
MICROPOROSA	Energía Absorbida	0.0	0.0	72.3873
	Rigidez	43.757	9.19061	66.082
PU	Energía Absorbida	89.6101	46.4648	82.2121
	Rigidez	86.8889	58.5833	79.095
HULE	Energía Absorbida	0.0	46.5665	81.9952
	Rigidez	0.0	16.4125	83.8231

5.1 Determinación de la densidad de las plantillas

Para verificar el comportamiento de cada factor respecto a sus efectos, las graficas de Pareto tienen la característica de mostrar la significancia de los factores y/o interacciones respecto a la variabilidad que se observa en determinada respuesta. En este caso se define el factor A: CM, como la cantidad de la mezcla reactiva polioliol-isocianato utilizados para la síntesis del poliuretano, el factor B: Agua y finalmente el factor C: Plastificante; estos últimos empleados como aditivos en la síntesis del poliuretano. Inicialmente se muestra en la Tabla 5-7 el análisis de varianza para la variable de respuesta *densidad*, donde se puede observar que el único factor que presenta significancia para explicar la variabilidad de dicha respuesta es el factor A, al resultar con un valor de $p < 0.05$, esto con un nivel de confianza del 95%. En la figura 5.1 se muestra el diagrama de Pareto correspondiente.

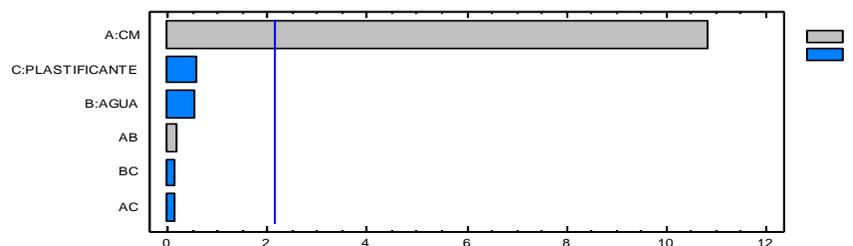


Figura 5.1 Grafica de Pareto para densidad.

Tabla 5-7. Análisis de varianza para densidad.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>
A:CM	0.0531217	1	0.0531217	117.47	0.0000
B:AGUA	0.000130411	1	0.000130411	0.29	0.6003
C:PLASTIFICANTE	0.000167445	1	0.000167445	0.37	0.5533
AB	0.0000198025	1	0.0000198025	0.04	0.8375
AC	0.00000961	1	0.00000961	0.02	0.8863
BC	0.00001296	1	0.00001296	0.03	0.8682
Total error	0.00587899	13	0.00045223		
Total (corr.)	0.0593409	19			

R²= 90.0929 %R² ajustada = 85.5203 %

El resumen del análisis de varianza de la Tabla 5-7 muestra una R²_{ajustada} del 85% lo cual indica que el diseño de experimentos genera un modelo matemático con el cual se pueden predecir las respuestas en estudio ⁽²⁸⁾. Aunque la *densidad* no está incluida dentro de la norma que delimita este trabajo, sin duda es un factor importante en lo que a la producción de poliuretano se refiere, ya que evidentemente influye en el costo del artículo a producir debido a que la densidad es directamente proporcional a la cantidad de material (mezcla polioli-isocianato) que se consume en este caso para la fabricación de cada plantilla. Otra implicación importante de la densidad del poliuretano es en cuanto a las propiedades mecánicas del producto final como se observa en los resultados de las pruebas de atenuación de impactos, ya que a medida que la *densidad* aumenta también lo hace la *rigidez*; ello de acuerdo a los datos mostrados en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8. Comparativo densidad-rigidez

Cantidad de mezcla*(g)	Densidad(g/cm³)	Rigidez(N/m)
60	0.5263	68787
70	0.6271	72509
80	0.7181	82272

* Mezcla polioli-isocianato

El aumento de rigidez de un material evaluado mediante pruebas de atenuación de impactos, no se debe únicamente al incremento de la densidad del mismo; García A. et al. establecen en un estudio realizado a cinco diferentes materiales para plantilla, que la rigidez aumenta con la velocidad de deformación de los impactos a que es sometido un material, debido a sus propiedades viscoelásticas (29).

5.2 Calzado con suela de poliuretano.

Los efectos del factor A y los factores cuadráticos BB y CC en la figura 5.2 son significativos ($p < 0.05$). A partir de estos datos se observa en la figura 5.3 que para casos como éste, en que se busca maximizar la *energía absorbida*, es recomendable el empleo del nivel bajo del factor A. La Tabla 5-9 muestra el resumen del análisis de varianza para esta respuesta.

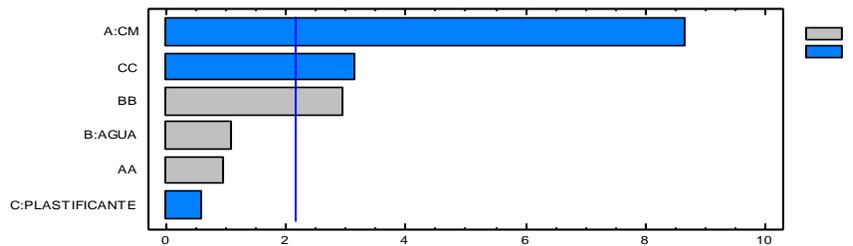


Figura 5.2 Gráfica de Pareto para energía absorbida

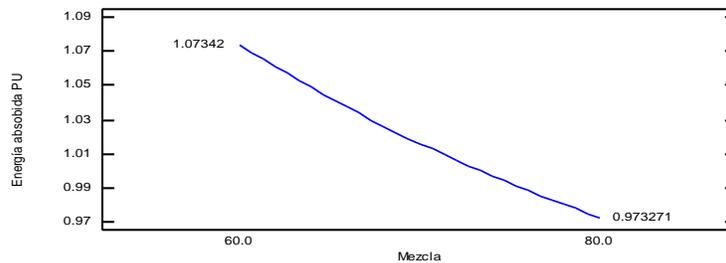


Figura 5.3 Gráfica de efectos principales

Tabla 5-9. Análisis de varianza para energía absorbida.

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	Valor-P
A:CM	0.020059	1	0.020059	75.67	0.0000
B:AGUA	0.000311875	1	0.000311875	1.18	0.2964
C:PLASTIFICANTE	0.0000946688	1	0.0000946688	0.36	0.5597
BB	0.00260151	1	0.00260151	9.81	0.0073
CC	0.00247549	1	0.00247549	9.34	0.0085
Total error	0.00371129	14	0.000265092		
Total (corr.)	0.0285289	19			

$R^2 = 86.9911\%$ R^2 ajustada = **82.3451%**

En cuanto a la respuesta *rigidez* para el calzado con suela de poliuretano los resultados indican, al igual que para la energía absorbida, que el actual es un modelo estadísticamente confiable para modelar dicha respuesta al presentar una R^2 ajustada $> 70\%$ de acuerdo a reportado en el análisis de varianza, cuyo resumen se puede ver en la Tabla 5-10; en donde también se puede observar que, de acuerdo al valor de p obtenido, el factor que afecta significativamente a la respuesta en estudio es el factor A al presentar $p < 0.05$ con un nivel de confianza del 95%. Además, el modelo exhibe una R^2 ajustada del 77.9% lo cual indica que a partir de él se puede predecir el comportamiento de esta respuesta ⁽²⁸⁾. Gráficamente esto se puede observar en la figura 5.4 donde el factor A es el único significativo para explicar la variabilidad la respuesta. Para minimizar el valor de la *rigidez*, la mejor opción es usar el factor A en su nivel bajo, como lo muestra la figura 5.5 en la grafica de efectos principales.

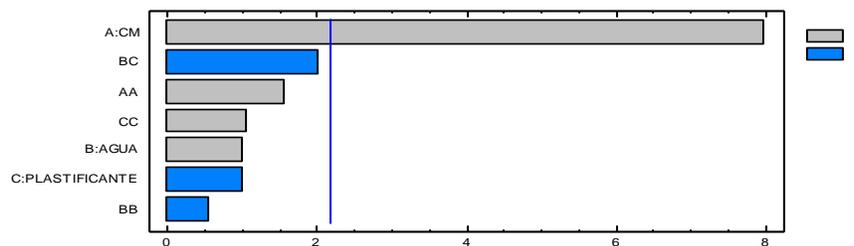


Figura 5.4 Grafica de Pareto para rigidez.

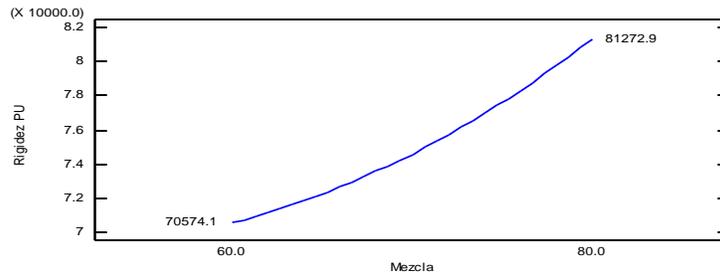


Figura 5.5 Grafica de efectos principales

Tabla 5-10. Análisis de varianza para rigidez.

Fuente	Suma de cuadrados	G L	Cuadrado medio	F	Valor-P
A:CM	2.28927E8	1	2.28927E8	63.75	0.0000
B:AGUA	3.62747E6	1	3.62747E6	1.01	0.3347
C:PLASTIFICANTE	3.61805E6	1	3.61805E6	1.01	0.3353
AA	8.83961E6	1	8.83961E6	2.46	0.1426
BB	1.08392E6	1	1.08392E6	0.30	0.5928
BC	1.45466E7	1	1.45466E7	4.05	0.0671
CC	4.12409E6	1	4.12409E6	1.15	0.3050
Total error	4.30922E7	12	3.59102E6		
Total (corr.)	3.08851E8	19			

$$R^2 = 86.0476 \%$$

$$R^2 \text{ ajustada} = 77.9086 \%$$

5.3 Calzado con suela de hule vulcanizado.

La evaluación de la prueba de atenuación de impactos en las plantillas de poliuretano en calzado con suela de hule vulcanizado, presenta un comportamiento en donde la respuesta *energía absorbida* alcanza un valor de R^2 ajustada por arriba del 70%, por lo que de acuerdo al análisis de varianza de la Tabla 5-11, es un modelo confiable estadísticamente para predecir ⁽²⁸⁾. Igualmente en la figura 5.6 se puede verificar cuales factores son significativos para explicar la variabilidad de la respuesta. En la figura 5.7 se observa a partir del análisis de la grafica de interacciones que existe una dependencia entre los factores A y C, por lo que se establece que al emplear el factor A en su nivel bajo y el factor C en su nivel alto se puede obtener mayores niveles de absorción de energía, que es lo que se pretende para

obtener un material para confort. Cabe señalar que para el calzado con suela de hule vulcanizado se exponen para su análisis las graficas de interacciones debido a que tienen prioridad sobre las graficas de efectos principales ⁽²⁸⁾, ello implica que el empleo de un factor en un determinado nivel dependa directamente de un nivel específico del otro factor.

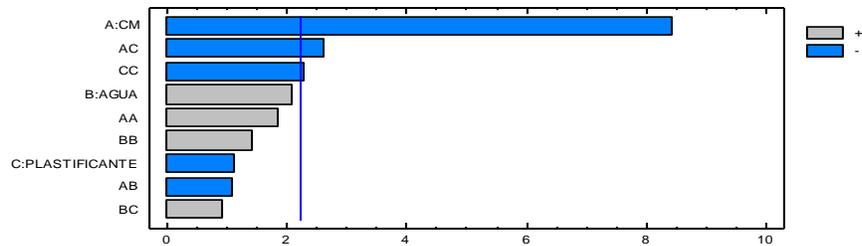


Figura 5.6 Grafica de Pareto para energía absorbida.

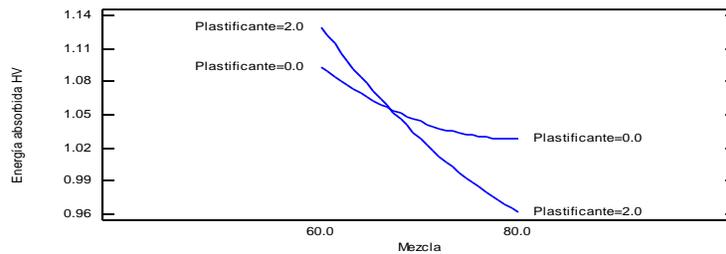


Figura 5.7 Grafica de interacción AC para energía absorbida

Tabla 5-11. Análisis de varianza para energía absorbida.

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	Valor-P
A:CM	0.0271562	1	0.0271562	71.52	0.0000
B:AGUA	0.00163535	1	0.00163535	4.31	0.0647
C:PLASTIFICANTE	0.00046604	1	0.00046604	1.23	0.2938
AA	0.00131116	1	0.00131116	3.45	0.0928
AB	0.000447323	1	0.000447323	1.18	0.3032
AC	0.00261735	1	0.00261735	6.89	0.0254
BB	0.000784578	1	0.000784578	2.07	0.1811
BC	0.000325802	1	0.000325802	0.86	0.3761
CC	0.00196437	1	0.00196437	5.17	0.0462
Total error	0.00379679	10	0.000379679		
Total (corr.)	0.0400667	19			

R²= 90.5238 %

R² ajustada = 81.9952 %

Para la respuesta *rigidez* se observa que el experimento tiene una R^2 ajustada del 83.82%, lo cual rebasa por mucho el 70% mínimo esperado. Así mismo se puede verificar en la Tabla 5-12 que los factores que representan efectos significativos de acuerdo al valor de p son los efectos A, el efecto de interacción AC, y el efecto cuadrático del factor A, ello con un nivel de confiabilidad del 95%. Este comportamiento también se observa en la figura 5.8 en su correspondiente grafica de Pareto. Hablando de confort, se busca una rigidez baja para que un material se considere con buenas propiedades biomecánicas en cuanto a la amortiguación de impactos ⁽²⁹⁾. Por lo que respecta a la figura 5.9, que muestra una grafica de interacciones, se puede verificar que para obtener niveles bajos de *rigidez*, el factor A en su nivel bajo y el nivel alto del factor C, es una buena relación de interacción para obtener el valor de *rigidez* adecuado. Para la interacción BC se observa de acuerdo al comportamiento de las curvas correspondientes, que la combinación de niveles bajo-bajo (-)(-) y alto-alto (+)(+), producen un efecto similar en cuanto al valor de *rigidez* se refiere, por lo que la decisión a tomar depende del factor costo, siendo la combinación de niveles bajos la más adecuada ya que implica un menor consumo de materias primas (factor A: cantidad de mezcla), lo cual impacta directamente en el costo final del producto.

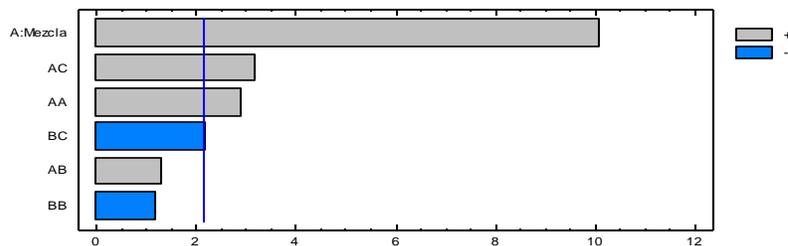


Figura 5.8 Grafica de Pareto para rigidez

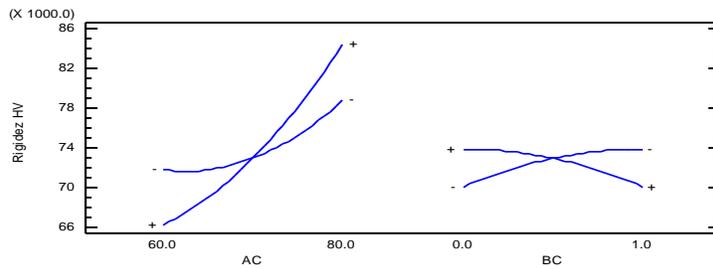


Figura 5.9 Grafica de interacción AC para rigidez

Tabla 5-12. Análisis de varianza para rigidez.

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	Valor-P
A: CM	3.12263E8	1	3.12263E8	101.59	0.0000
AA	2.57466E7	1	2.57466E7	8.38	0.0125
AB	5.39633E6	1	5.39633E6	1.76	0.2080
AC	3.11643E7	1	3.11643E7	10.14	0.0072
BB	4.29536E6	1	4.29536E6	1.40	0.2583
BC	1.46077E7	1	1.46077E7	4.75	0.0482
Total error	3.99569E7	13	3.07361E6		
Total (corr.)	4.30682E8	19			

$R^2 = 90.7224 \%$

R^2 ajustada = **86.4405 %**

5.4 Calzado con suela microporosa.

El resumen del análisis de varianza de la Tabla 5-13 exhibe que el factor A (cantidad de mezcla) es significativo de acuerdo al valor de $p < 0.05$; además este análisis refiere una R^2 ajustada del 72.38% lo cual determina que es un modelo confiable para predecir esta respuesta ⁽²⁸⁾. La grafica de Pareto muestra este comportamiento el cual se observa en la figura 5.10. La grafica de efectos principales de la figura 5.11 indica que el efecto del factor A en su nivel bajo es el adecuado para la evaluación de la energía absorbida; de la cual que se esperan valores altos para considerar la plantilla de poliuretano como un material de confort en cuanto a la atenuación de impactos.

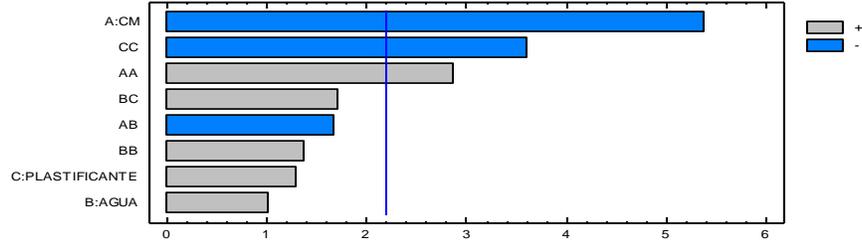


Figura 5.10 Gráfica de Pareto para energía absorbida.

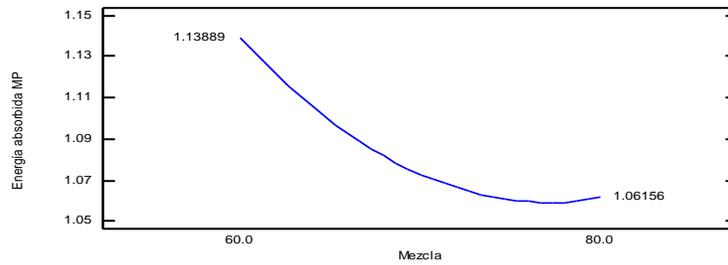


Figura 5.11 Gráfica de efectos principales

Tabla 5-13. Análisis de varianza para energía absorbida.

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	Valor-P
A:CM	0.0119606	1	0.0119606	29.07	0.0002
B:AGUA	0.00041963	1	0.00041963	1.02	0.3342
C:PLASTIFICANTE	0.000690247	1	0.000690247	1.68	0.2217
AA	0.00339161	1	0.00339161	8.24	0.0152
AB	0.0011394	1	0.0011394	2.77	0.1243
BB	0.000778004	1	0.000778004	1.89	0.1964
BC	0.00120236	1	0.00120236	2.92	0.1154
CC	0.00536316	1	0.00536316	13.04	0.0041
Total error	0.00452539	11	0.000411399		
Total (corr.)	0.0283079	19			

$R^2 = 84.0137 \%$

$R^2 \text{ ajustada} = 72.3873 \%$

En cuanto a la evaluación de la *rigidez* el modelo no alcanzó el nivel de confiabilidad esperado ($R^2_{ajustada} > 70\%$), lo cual quiere decir que la ecuación de regresión generada a partir de los datos obtenidos no es confiable para predecir la respuesta cuando se evalúan las plantillas de poliuretano en calzado con suela

microporosa. Para el caso de la *rigidez* se obtuvo una $R^2_{ajustada}$ del 66.082 % la cual es menor al valor mínimo esperado de 70%. Los datos que se muestran en la Tabla 5-14 parecerían ser adecuados para describir el comportamiento de la variabilidad del experimento respecto al valor de p , sin embargo, basándonos estrictamente en el estudio del coeficiente de determinación $R^2_{ajustada}$ se observa que para el análisis de varianza en el calzado con suela microporosa, la evaluación de la *rigidez* muestra efectos significativos de factores que no fueron relevantes estadísticamente para los dos tipos de calzado restantes en el análisis de dicha respuesta; tal es el caso de los factores C y de la interacción BC. Ello se puede verificar comparando los diagramas de Pareto respectivos a cada tipo de calzado (figuras 5.3, 5.5 y 5.7). Una causa de la falta de ajuste de los datos al modelo de predicción puede ser, entre otras, a que los errores de medición fueron altos, lo cual se ve reflejado en un bajo porcentaje ($R^2_{ajustada} < 70\%$) en la calidad global del modelo de regresión ⁽²⁸⁾.

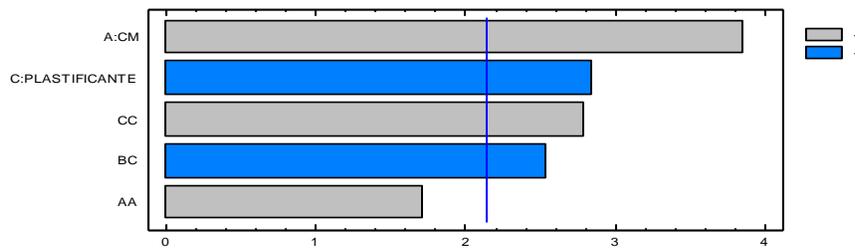


Figura 5.12 Gráfica de Pareto para rigidez

Tabla 5-14. Análisis de varianza para rigidez.

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	Valor-P
A:CM	1.02174E8	1	1.02174E8	14.44	0.0022
C:PLASTIFICANTE	5.5588E7	1	5.5588E7	7.86	0.0149
AA	2.01802E7	1	2.01802E7	2.85	0.1151
AB	4.4142E6	1	4.4142E6	0.62	0.4438
BC	4.43556E7	1	4.43556E7	6.27	0.0264
CC	5.36456E7	1	5.36456E7	7.58	0.0164
Total error	9.199E7	13	7.07615E6		
Total (corr.)	3.85737E8	19			

$R^2 = 75.0078 \%$

$R^2_{ajustada} = 66.082 \%$

El comportamiento de las plantillas de poliuretano en la evaluación de los parámetros biomecánicos *energía absorbida* y *rigidez* se puede explicar haciendo referencia a la norma ASTM F 1614-99 en su apartado A, donde se hace hincapié en que las superficies que interaccionan en esta prueba tanto de la base del aparato de ensayos como de la probeta del material que se evalúa deben ser planas, es decir, debe existir contacto total entre ambas superficies. En el caso del calzado con suela microporosa el diseño y fabricación del mismo no son adecuados, ya que la parte del talón del calzado presenta concavidad en la planta, lo cual no permite el contacto total entre dicha superficie y la superficie de la plantilla, y es precisamente en esa zona del calzado donde se realiza la prueba de atenuación de impactos. Esta deficiencia en el calzado se exhibe en la figura 5.8, donde se observa que la planta de la suela presenta una superficie tal que las mediciones de *energía absorbida* y *rigidez* podrían considerarse no confiables, de ahí el bajo porcentaje de ajuste de los datos, lo cual se ve reflejado en un coeficiente de determinación $R^2_{ajustada}$ menor al 70% esperado.



Figura 5.13 Comparativo de las superficies del calzado evaluado en pruebas de impacto.

En este sentido, Solve y Gil ⁽²⁹⁾ determinaron que la amortiguación de impactos como la reducción de las fuerzas de reacción que se producen al inicio del contacto del pie con el suelo durante la marcha, y que además las propiedades de amortiguación dependen del material de la suela y de la plantilla. Otra consideración importante que se debe de analizar con detenimiento, es que los diseños de la suela varían de acuerdo a la forma de los economizadores que utilizan los fabricantes de las mismas. Esto altera la morfología del talón de la suela lo cuál podría modificar los patrones del impacto, dado que la prueba a la que se sometieron las plantillas precisamente evalúa la *absorción de energía* y

la *rigidez* mediante ciclos de impactos sobre la zona del talón, lo que Solve y Gil ⁽³⁰⁾ mencionan como el diseño de la parte trasera del calzado. Además, es importante señalar que la mejor manera de evaluar la amortiguación en materiales para plantilla para casos personalizados, es mediante un sistema calzado-plantilla con peso controlado, de acuerdo a un estudio realizado en el Instituto de Biomecánica de Valencia ⁽³¹⁾. Es decir, se debe entender la relación pie-plantilla-calzado como un sistema integral para cada caso de estudio.

El análisis de los datos generados a partir de un diseño experimental establece que los resultados obtenidos para todos los tratamientos se encuentran dentro del intervalo de valores que marca la norma ASTM- F 1614-99. En este trabajo, la necesidad de la empresa ligada a este proyecto es, al menos en esta fase inicial, contar con una plantilla que cubra las necesidades comerciales de tres de sus modelos de calzado de seguridad con el cumplimiento de la norma que rige este trabajo como única restricción. Basándonos en ello y en el estudio anteriormente realizado por el laboratorio de Biomecánica de CIATEC en conjunto con empresas de calzado locales miembros de la CICEG; por convenio se ha estrechado el intervalo de valores estableciendo uno que circunde los 70,000 N/m en cuanto a la rigidez, y en el caso de la energía absorbida la decisión se inclina por la unidad experimental que resulte con el valor más alto para esta variable. Los parámetros energía absorbida y rigidez no se correlacionan necesariamente pero técnicamente se busca un material de alta absorción de energía y baja rigidez ⁽²⁹⁾. Cada empresa, de acuerdo a sus estándares de calidad, establece sus propios criterios en cuanto a los parámetros requeridos dentro de los límites marcados por dicha norma, de tal manera que mediante una certificación por parte de CIATEC cada empresa determina dicho intervalo de acuerdo a sus necesidades. De esta forma, podemos traducir los resultados sugiriendo a la empresa fabricante de calzado de seguridad diferentes opciones de plantilla para los tres modelos de calzado. La decisión entre esta variedad de plantillas se puede sustentar también en cuanto al costo unitario de producción de las mismas, al provenir estas de diferentes tratamientos

experimentales, lo que implica el uso de diferentes cantidades de materia prima y el empleo de diferentes aditivos. Otro factor a analizar es la factibilidad de llevar a cabo un procedimiento al momento de fabricarlas, ello en cuanto a tiempos de producción se refiere.

Para poner en contexto el presente trabajo, se exponen a continuación importantes datos provenientes de estudios que han relacionado la biomecánica con los materiales empleados en la elaboración de plantillas y su efecto sobre la distribución de las presiones plantares, y el impacto que ésta tiene en el confort del pie. Dentro de la escasa información científica relacionada con el confort en el calzado, Windle et al. ⁽⁸⁾ establecen que las plantillas de poliuretano (Sorbothane®) usadas en botas militares son efectivas para atenuar la presión máxima durante el impacto del talón y cuando se genera una carga en la parte delantera del pie al caminar o correr; aunque también enfatizaron que los resultados obtenidos en su estudio no eran elementos suficientes para determinar o cambiar el uso actual de las plantillas. Una de las ventajas de las plantillas de poliuretano que se proponen a partir de este estudio, es que se obtienen a un costo menor comparativamente con las plantillas de poliuretano (Sorbothane®) evaluadas en la referencia anterior. Mientras que el costo por par de plantillas que propone este trabajo no excede los \$10.00 m.n. en materias primas, el costo del par de plantillas de Sorbothane cuesta no menos de 12.00 usd., El uso de plantillas de contacto total con la planta del pie reduce las altas presiones de las regiones del talón y de las cabezas metatarsales en comparación con las condiciones que ofrece una plantilla plana; estos datos los reportan Weng-Pin Chen et al. en un estudio donde evalúan cuatro diferentes materiales usados en la elaboración de las plantillas. Kato et al. ⁽²⁷⁾ demostraron que el uso de plantillas moldeadas de poliuretano puede ayudar en la reducción significativa de la presión máxima en la totalidad del pie hasta en un 56.3%, y además incrementar el área de contacto en 62.7%. Lo anterior demuestra que la elección del poliuretano como material para plantillas es una opción importante para la fabricación de las mismas, fundamentando tal elección en sus buenas

propiedades mecánicas como absorbedores de impactos, al costo de las materias primas en comparación con materiales como Plastazote® o Sorbothane®, a la experiencia que se tiene en la fabricación de productos de poliuretano entorno a la industria del calzado así como a lo accesible de su proveeduría.

Las referencias científicas señaladas solo muestran resultados cualitativos tanto de los materiales como del diseño de la forma de la plantilla, de ahí la subjetividad al definir el confort, lo cual nos reserva un amplio margen de oportunidad para que en futuros trabajos se pueda aportar mas conocimiento acerca de este poco explorado tema del binomio *calidad-confort*, y de esta manera coadyuvar al desarrollo y a la competitividad de esta importante rama de la industria mexicana. Aunado a lo anterior, una contribución importante en este ámbito es el incluir, además de los ensayos de valoración experimental con máquina de materiales para plantillas, los ensayos de valoración de éstas con individuos (de acuerdo a la clasificación del IBV). Es decir, se debe analizar la interacción *plantilla-individuo* relacionándola con el comportamiento biomecánico que sus actividades laborales implican. Esto quiere decir que un estudio de este tipo se complementaría al evaluar las plantillas a partir de la medición de las presiones plantares considerando factores como el peso corporal, la edad y la postura del individuo(s) que se involucre(n) en tal estudio, así como los efectos que produce su actividad física cotidiana ya sea estática, semiestática o dinámica.

5.5 Aportación general para futuros trabajos.

En años recientes el concepto “confort” se ha vuelto de uso común al referirse a los productos que confieren comodidad y satisfacción a quienes los usan. Productos como colchones, ortesis y asientos para diferentes actividades, son solo algunos ejemplos de elementos de uso cotidiano cuya elección al momento de adquirirlos ha ido cambiando de tal forma que en la actualidad, el criterio para elegir entre uno y otro producto ya no está supeditado únicamente al aspecto visual o de la moda, sino que ahora también se toman en cuenta otros

factores técnicos cuyo impacto positivo se ve reflejado en la salud del usuario, lo cual incrementa su calidad de vida.

Los nuevos estándares de calidad en el área de productos llamados de confort, no puede entenderse sin tomar en consideración la importancia que ha tomado la biomecánica en su correlación con el desarrollo de materiales absorbedores de energía, la cual proviene de los impactos inherentes a las diferentes actividades que realiza el cuerpo humano, así como de las distintas posturas que adopta el mismo en las etapas de reposo.

Enfocándonos específicamente al estudio del pie, este trabajo propone para futuros estudios: diseñar materiales para ortesis plantares entorno a las propiedades físicas (densidad, dureza, espesor) en las que un material se puede considerar de confort, así como las condiciones de uso en que sus propiedades mecánicas son más eficientes; de ahí la importancia de los materiales desarrollados en el ámbito biomecánico.

Una vía que nos proporcionará los elementos para hacer del confort un concepto menos subjetivo, es el generar nuevas metodologías mediante las cuales se pueda llevar a cabo la evaluación de parámetros biomecánicos como la distribución de presiones plantares y las pruebas de atenuación de impactos, sin perder de vista que tal evaluación produce resultados más cercanos a la realidad si se complementan las pruebas biomecánicas en máquina y en individuos. Para destinar un material de confort a la obtención de ortesis plantares, se debe tomar en cuenta el marco teórico que involucre factores como el índice de masa corporal, la conformación de la estructura ósea al menos de las extremidades inferiores, y la actividad que realiza cotidianamente el individuo o grupo de individuos al que se aplica el estudio biomecánico.

Los diferentes factores que podrían afectar el diseño de ortesis plantares, se han detectado a través del recorrido de este trabajo. Tal aseveración se fundamenta en el análisis de principios básicos, con los que se pretende explicar las variables que se tendrán que tomar en cuenta al diseñar una plantilla así como

en su fabricación; dando por hecho que se ha seleccionado el material adecuado para el objetivo que se persigue.

1. Consideraciones teóricas del diseño de la forma de la plantilla

La forma de la plantilla es uno de los aspectos importantes en el diseño y fabricación de ortesis plantares cuyo uso, conduce a experimentar mejores condiciones de salud en el pie. En años recientes se ha estudiado el efecto entre el uso de una plantilla plana o una conformada, donde ésta última se obtiene al marcar el contorno de la planta del pie (la pisada) con precisión y la primera solo es un elemento que tiene una forma y un espesor determinados, sin tomar en cuenta el relieve natural de la planta del pie.

Al comparar los atributos de plantillas conformadas y plantillas planas, un estudio realizado por Chen H, et al. establece que una plantilla con cazoleta en forma esférica reduce la probabilidad de que el talón se expanda lateralmente, siendo esta una ventaja importante al comparar las dos formas de plantillas. Se ha reportado también que la ortesis moldeada puede reducir la presión plantar de 30 a 40% y que aumentan el área total de contacto hasta en un 10% ⁽⁴⁾.

2. Efecto del espesor de la plantilla

El talón del pie posee una almohadilla natural que a través de los años va disminuyendo su capacidad de absorber energía y como consecuencia también disminuye el grado de amortiguación de los impactos generados al caminar, correr o al estar en reposo ⁽²⁴⁾. Partiendo de ese hecho, se puede predecir que el espesor de la plantilla influye directamente en las propiedades de acojinamiento del material, las cuales contribuyen al confort del calzado. Se han realizado evaluaciones de diferentes materiales para plantilla, llegando a la conclusión de que cada material presenta un comportamiento característico al someterlos a pruebas de atenuación de impactos, mostrando discrepancia en los resultados aun cuando la evaluación se llevo a cabo en probetas del mismo espesor.

Resultados de rigidez muestran que ésta disminuye proporcionalmente al aumentar el espesor de la probeta en estudio ⁽²⁹⁾.

3. Conformación ósea de las extremidades inferiores

Como se estudio en el Capitulo 1, el pie lo constituyen la bóveda plantar, el apoyo posterior o talón y el apoyo anterior o antepié. Para fines de evaluar las propiedades de amortiguación de impactos, se debe recordar que esta prueba biomecánica se realiza en la parte del calzado que corresponde al talón; lo cual nos lleva a definir a éste como la parte más crítica del pie, debido a la cual es posible la bipedestación y la marcha.

En posición bipodal el peso del cuerpo es transmitido por la pelvis al suelo a través de las extremidades inferiores. Cada pie soporta la mitad del peso del cuerpo, las fuerzas generadas por el mismo llegan al pie en primera instancia por el astrágalo, cuya principal función es distribuir las fuerzas hacia los distintos puntos de apoyo; a partir de ello se ha comprobado que el 60% de las fuerzas se dirigen al calcáneo y el 40% al antepié ⁽³³⁾.

Otro aspecto de la conformación de las extremidades inferiores son las alteraciones del pie conocidas como “supinación” y “pronación”, que están relacionados en gran medida con la configuración de la pisada (huella plantar) en cuanto a la forma característica en que se distribuyen las presiones plantares. Ello nos lleva a determinar que el diseño de una ortesis plantar (materiales y forma) no debe limitarse únicamente a su evaluación mediante la caracterización biomecánica en máquina, donde solo se obtienen datos de cuán tan rígido es un material o que cantidad de energía puede disipar; siendo necesario considerar la evaluación de la plantilla en individuos para que de acuerdo a sus necesidades, que debido a su constitución física son particulares, puedan aportar datos reales en cuanto a la sensación y efecto que adquieren al usar este tipo de aditamentos. En este contexto se puede citar a Chen H, et al. quienes establecen: “lo que es comfortable para un grupo de personas puede ser

no comfortable para otro grupo”. La figura A exhibe las dos posiciones del pie y su respectiva huella.

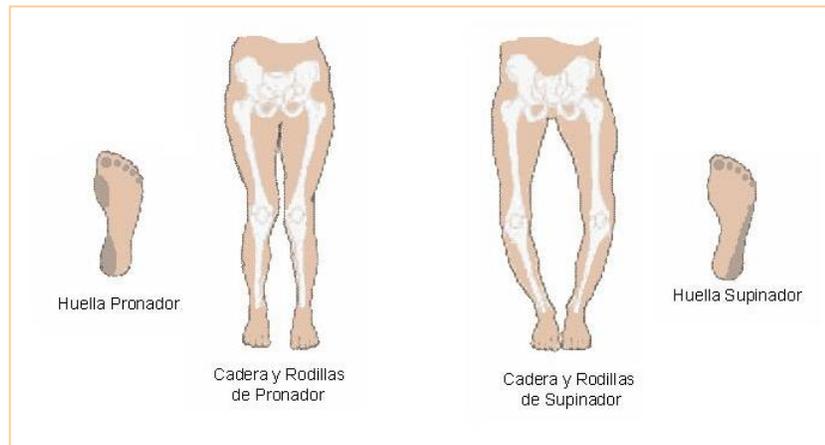


Figura A. Alteraciones del pie y su efecto en la distribución de fuerzas

4. Masa corporal

Por definición, una *fuerza* es toda causa que permite modificar el estado de reposo o de movimiento de un cuerpo, o bien que puede deformar o modificar un movimiento ya existente, mediante un cambio de velocidad o de dirección. A menudo se confunden los conceptos de masa y peso debido a que existe una unidad de masa (kilogramo-masa) y una unidad de peso (kilogramo-peso); por lo que es de utilidad citar la segunda Ley de Newton: " el producto de la masa de un cuerpo por su aceleración es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza que actúa sobre dicho cuerpo". Para facilitar el objetivo de este apartado, se supondrá que la masa del cuerpo humano se refiere al peso, tal como se entiende de manera cotidiana, ello con el fin de dar interpretación llana a la(s) fuerza(s) que inciden sobre el pie.

La presión se define como la aplicación de una fuerza sobre una superficie definida (área). Por lo tanto, al sugerir el uso de determinada plantilla se debe considerar que no tendrá el mismo efecto en una persona de 50Kg que en una persona de 75Kg, aunado a las características del pie mencionadas en el

apartado anterior (4). García et al. definen que tanto la rigidez de un material como la capacidad de absorber energía, dependen del nivel de la carga aplicada. Es posible entender este comportamiento visualizando también el efecto que la fuerza normal que ejerce sobre el cuerpo, ello como una fuerza de reacción de la superficie a la fuerza que transmite la carga ($m \cdot g$), figura B.

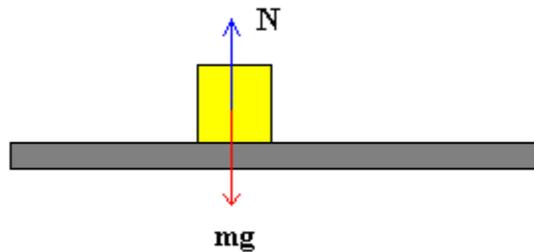


Figura B. Sistema de fuerzas cuerpo-superficie.

La importancia del análisis de fuerzas que involucra el peso de una persona radica en que la rigidez se relaciona con la fuerza transmitida hacia el cuerpo, mientras que la energía absorbida se refiere precisamente a la cantidad de energía que el material puede disipar para no ser transmitida al cuerpo ⁽²⁹⁾.

5. Actividad cotidiana

Es un hecho que la magnitud de las fuerzas ejercidas a través del cuerpo sobre el pie no es igual tomando en cuenta los factores hasta ahora analizados. Como se revisó en el Capítulo 5, el estudio de la velocidad de deformación es fundamental para determinar la rigidez de un material, por lo que se propone para futuros estudios delimitar los diseños de plantillas a partir de la actividad física que se realiza, de la edad del individuo y si éste padece alguna enfermedad que le impida el desarrollo de movimientos corporales biomecánicamente correctos. El efecto de las variables mencionadas sobre la velocidad de deformación, se explican al entender la capacidad de desplazamiento de cada persona, ya sea por la actividad que realiza o por las limitaciones físicas que posea. Es evidente que es diferente la deformación a que es sometida una plantilla destinada a un atleta que la ortesis plantar diseñada para una persona adulta a la que se le puede dificultar el caminar.

6 CONCLUSIONES

El poliuretano es un material del cual ya han sido demostradas sus ventajas en su empleo en la fabricación de plantillas que contribuyen al confort del calzado. Entre esas características se puede mencionar sus excelentes propiedades mecánicas, el costo unitario de producción, la accesibilidad del material en cuanto a la proveeduría y además la amplia experiencia en el conocimiento del proceso de síntesis del poliuretano que se ha adquirido en el ramo del calzado de la región del Bajío en México.

En lo que se refiere a la evaluación del confort mediante ensayos de valoración con maquina, se verifico que las propiedades de amortiguación dependen de los materiales de que están hechos la suela y la plantilla, y por lo tanto de su dureza y su densidad. Se evidencio que la rigidez, en el caso del poliuretano, es proporcional a la densidad del mismo. Además, aunque no se ha hecho patente científicamente una correlación entre los parámetros evaluados, los resultados obtenidos muestran cuantitativamente que lo que se busca en un material confortable es una baja rigidez y una máxima absorción de energía.

Para necesidades de confort personalizado es indispensable caracterizar cada plantilla para determinado tipo de suela; sin embargo, para el objetivo que este trabajo persigue se puede recomendar al fabricante de calzado de seguridad un intervalo de valores en lo referente a la prueba de atenuación de impactos para que se justifique el uso de la plantilla de poliuretano para calzado de seguridad y que de esta forma pueda ser considerado como calzado confortable. De esta manera el presente trabajo sin duda, es un precedente que sienta las bases para que en lo sucesivo se pueda delimitar el diseño del calzado y la selección de materiales para plantilla y por esta vía hacer cada vez menos subjetivo el estudio del confort relacionado a la industria del calzado de seguridad en México.

8 REFERENCIAS

1. González, J.C., Gil Mora, S., Alemany Mut, S., “Revista de Biomecánica”, Instituto de Biomecánica de Valencia, Valencia España. 2004.
2. Lavery LA, Vela SA, Ashry HR, Lanctot DR, Athanasiou KA. Novel methodology to obtain salient biomechanical characteristics of insole materials. *J Am Podiatr Med Assoc.* 1997 Jun; 87(6):266-71.
3. Landorf KB Keenan. Shock Absorbing Insoles and Lower Limb Injury. *Journal of the royal Society of Medicine.* 2006, V. 99.
4. Bonnie Yuk San Tsung, MPhil; Ming Zhang, PhD; Arthur Fuk Tat Mak, PhD; Margaret Wan Nar Wong. Effectiveness of insoles on plantar pressure redistribution. *JRRD*, Volume 41, Number 6A, 2004.
5. Pratt DJ, Rees PH, Rodgers C. Assessment of some shock absorbing insoles. *Prosthet Orthot Int.* 1986 Apr; 10(1):43-5.
6. Pawelka S, Kopf A, Zwick E, Bhm T, Kranzl A. Comparison of two insole materials using subjective parameters and pedobarography (pedar-system). *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 1997 Apr; 12(3):S6-S7.
7. Whithnall R, Eastaugh J, Freemantle N. Do shock absorbing insoles recruits undertaking high levels of physical activity reduce lower limb injury? A randomized controlled trial. *J R Soc Med* 2006; 99:32-37.
8. Windle M, Gregory S, Dixon J S. The shock attenuation characteristics of four different insoles when worn in a military boot during running and marching. *Gait and Posture.* 1999 Mar; 9(1):31-7.
9. Vijay Viswanathan, Sivagami Madhavan, Saraswathy Gnanasundaram, Gautham Gopalakrishna, Bhabendra Nath Das, Mtech Seena Rajasekar, Ambady Ramachandran. Effectiveness of Different Types of Footwear Insoles for the Diabetic Neuropathic Foot. *Diabetes Care*, Vol. 27, No. 2, 2004.
10. Basford JR, Smith MA. Shoe Insoles in the Workplace. *Journal of Rehabilitation Research and Development.* Vol. 26, No. 2; Spring 1989. Reprinted from *Orthopedics* 12:285-289, 1989.
11. Escamilla, E., Fernández, L., Martínez, L. El mundo laboral: influencia en el pie. <http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=728>
12. Pie normal o equilibrado. <http://www.paidotribo.com/pdfs/749/749.0.pdf>
13. Palacios, J. L., Hacia la biomecánica 30 años de investigación en el ciatec. *Revista Ciencia y Desarrollo, CONACYT.* 2006.
14. Chico Ruiz, F. Biomecánica del pie. CIATEC A.C. 2007.
15. PAC Ortopedia Parte D, Libro 1-
<http://www.drscope.com/privados/pac/generales/pdl1/plano.html>
16. Muñoz Almaguer R., Chico Ruiz F., Fuentes Aragón C., Estudio Antropométrico de los Pies de los Usuarios de Calzado de Seguridad en la Republica Mexicana. CIATEC. 2006.
17. Del Pino Lázaro, F. Barrios Muñoz, C. Centro Nacional de Medios de Protección. http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_227.htm
18. NORMA Oficial Mexicana NOM-113-STPS-1994, Calzado de protección.
19. García I., Zambudio R. Ortesis, Calzado y Prótesis.
http://www.esteve.es/EsteveArchivos/1_8/Ar_1_8_42_APR_6.PDF
20. Gorges, J. Plantillas Termoconformadas. Área de Ortopedia del COF de Valencia. Vol. 25 Num 9 Octubre 2006.

21. Fernandez, A. M., "Curso de Poliuretano", Instituto de Ciencia y Tecnología en Polímeros, Madrid, España. 2005.
22. Flexible polyurethane foam; IN•TOUCH®. Polyurethane Foam Association. 2003
23. Canadian Centre for Occupational Health & Safety. 1997-2006. Document last updated on July 31, 2001
24. Cuadrado, T. Abraham, G. Propiedades Mecánicas de Biomateriales. Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), J. B. Justo 4302, Mar del Plata, Argentina.
25. Federation of polyurethane rigid foam Associations (Bing). Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam. Octubre 2006.
26. Minnaard, C.; Universidad CAECE, Buenos Aires, Argentina. 2002.
27. Kato H, Takada T, Kamamura T, Hotta N, Torii S. The reduction and redistribution of plantar pressure using foot orthosis in diabetic patients.
28. Gutierrez H, De la Vara R. Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill. Primera Edición. 2004
29. Garcia, A. C., Durá, J. Dynamic study of insole materials simulating real loads. Instituto de Biomecánica de Valencia. 1994.
30. Solve Camallonga C, Gil Mora S. Proyecto dirigido a incrementar el confort del calzado "made in Spain". Instituto de Biomecánica de Valencia.
31. Alemany Mut S, Olaso Melis J. y Puigcerver Palau S. Desarrollo de un sistema para calzado que reduce la fatiga y dolor de pies. Revista de Biomecánica No. 46; Instituto de Biomecánica de Valencia.
32. Reporte de metodología para desarrollo de plantillas biomecánicas. Chico F, Muñoz R, Vidal C. CIATEC 2006.
33. Viladot A, et al. Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor.