



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS –AREA INDUSTRIAL-

PROTOTIPO DE UNA HORMA PERSONALIZADA EN 3D:
UN NUEVO EJE

TESIS

Que para optar por el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:

EDGAR REY GARCÍA SÁNCHEZ

Tutor:

Dr. DANIEL ALDAMA ÁVALOS
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. Junio, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Quiero reconocer antes que todo, a mi asesor de tesis el **Dr. Daniel Aldama Avalos** que con sus observaciones y paciencia hicieron posible la realización de cada etapa de éste proyecto

También a la **Universidad Nacional Autónoma de México**, noble institución que me ha dado la oportunidad de formarme académicamente y las herramientas necesarias para llevar a cabo todo el proceso de la investigación

Por su puesto, a familiares y amigos por sus palabras de aliento, en especial a mi madre **Julieta Sánchez y García**, que es mi ejemplo y fuente de motivación

Y sobre todo a **Dios** por su infinitud

ÍNDICE

Introducción.....	12
Capítulo I. La industria del calzado	21
I.1. Evolución del calzado	22
I.1.1. La historia del calzado en el mundo.....	22
I.1.2. Historia del calzado en México	23
I.2. Los clústeres de calzado en el mundo	27
I.2.1. La industria del calzado en Asia	27
I.2.2. La industria del calzado en Europa.....	29
I.2.3. La industria del calzado en América	30
I.3. La economía en cuestión de calzado.....	34
I.3.1. La comercialización del calzado en el mundo.....	34
I.3.2. El comercio de calzado en México y América Latina	36
I.3.2.1. Los socios más importantes para México.....	36
I.3.2.2. El comercio de calzado entre México y América Latina.....	39
Capítulo II. La horma y sus implicaciones	41
II.1. El objeto de la horma	42
II.1.1. Su función.....	42
II.1.2. Partes principales de una horma	42
II.2. Los sistemas de diseño.....	46
II.2.1. Sistema ruso	46
II.2.2. Sistema WMS-AKA64.....	49
II.3. La manufactura de la horma	50
II.3.1. La horma de madera.....	50
II.3.2. La horma de aluminio	52
II.3.3. La horma de PE	52
II.4 Las diferentes tallas en el mundo.....	55
II.4.1. Escala inglesa.....	56

II.4.2. Escala norteamericana	58
II.4.3. Escala francesa	58
II.4.4. Escala mondopoint	60
II.5. El patronaje y la fabricación del calzado	63
II.5.1 Los patrones de corte	63
II.5.2. La manufactura del calzado.....	65
II.5.2.1. Fabricación tipo cementado.....	66
II.5.2.2. Fabricación tipo Goodyear Welt	66
II.5.2.3. Fabricación tipo Stitch Down & S. Crispino	67
II.5.2.4. Otros tipos de fabricación	67
Capítulo III. La personalización del calzado	69
III.1. Definición y paradigma.....	70
III.2. Clasificación del calzado.....	73
III.2.1. Casos especiales de personalización	75
III.2.1.1. El calzado ortopédico (molde de escayola)	75
III.2.1.2. Caso Universidad Politécnica de Guadalajara, México	77
III.2.1.3. El proyecto ERGOSHOE	78
III.3. El personalizado de la horma.....	80
III.3.1. Metodología Wang, Chang y Lin.....	80
III.3.2. Metodología Wang, Zhang, Lu y Lui	82
III.3.3. Metodología Luximon.....	83
III.4. Innovación de hormas en patentes	86
Capítulo IV. La huella y el parámetro inicial	89
IV.1. Anatomía básica para el diseño.....	90
IV.1.1. La estructura ósea.....	90
IV.1.2. Los músculos y tendones.....	92
IV.1.3. Ubicación de los ligamentos en el pie	93
IV.2. Metodología para ubicar el eje de simetría.....	94
IV.2.1. Material y equipo	94
IV.2.2. Preparación	95
IV.2.3. Proceso de escaneo.....	95

IV.2.3.1. Construcción del contorno del pie	96
IV.2.3.2. Trazo del eje de simetría de la huella del pie	96
IV.2.3.3. El parámetro inicial o longitud del pie.....	97
IV.2.4. Manejo de datos.....	98
IV.3. Relación entre la huella y la periferia del pie	102
IV.3.1. Delimitación de la huella del pie	102
IV.3.2. La aparente holgura entre la huella y la periferia.....	103
IV.4. El parámetro inicial y la horma.....	104
IV.4.1. La longitud de la planta en la horma.....	104
IV.4.2. La longitud total de la horma	104
Capítulo V. La planta de la horma: un diseño personalizado	106
V.1. Sistemas base para la parametrización del pie	107
V.2. Parámetro del talón	108
V.2.1. Longitud del talón	108
V.2.2. Ancho del talón.....	109
V.3. Parámetro del empeine.....	111
V.3.1. Longitud del empeine	111
V.3.2. Ancho del empeine.....	112
V.4. Parámetros del recio.....	114
V.4.1. Longitud al 1er metatarso.....	114
V.4.2. Longitud hasta el 5º metatarso	114
V.4.3. Ancho del recio perpendicular al eje.....	115
V.4.4. Ancho del recio desde el primer al quinto metatarso.....	116
V.5. Parámetros de los dedos.....	118
V.5.1. Longitud de los dedos	118
V.5.2. Ancho de los dedos.....	120
V.5.3. El ancho de los dedos de forma diagonal.....	121
V.5.4. Ángulo de los dedos.....	122
V.5.5. Ángulo de los dedos respecto al eje simétrico	124
V.6. La planta de la horma	125
V.6.1. El eje propuesto contra el eje tradicional.....	125

V.6.2. Factores de corrección para el nuevo eje.....	126
V.6.3. Los parámetros del nuevo eje	128
V.6.4. Elaboración de la superficie plantar básica	130
Capítulo VI. El modelo del pie y sus diez secciones o cuadramenes.....	132
VI.1. Consideraciones previas.....	133
VI.1.1. Puntos y regiones de ajuste para el pie.....	133
VI.1.2. Las partes más susceptibles del pie.....	135
VI.2. Recolección de datos y medidas	140
VI.2.1. Las tres circunferencias principales del pie	140
VI.2.2. Las alturas básicas del pie	141
VI.3. El desarrollo volumétrico del modelo del pie.....	145
VI.3.1. Parte posterior del pie	146
VI.3.2. Parte media del pie.....	147
VI.3.3. Parte anterior del pie	148
VI.3.4. Las diez secciones o cuadramenes.....	149
Capítulo VII Consideraciones dinámicas del andar	151
VII.1. Perspectiva científica.....	152
VII.1.1. El ciclo de la marcha	152
VII.1.2. La energía, trabajo y fuerzas en la marcha	154
VII.2. La biomecánica del pie	160
VII.2.1. Análisis de la postura “Choque de talón”	160
VII.2.1.1. Diagrama de cuerpo libre	162
VII.2.2. Análisis de la postura “Media estancia”	167
VII.2.2.1. Diagrama de cuerpo libre	169
VII.2.3. Análisis de la postura “Impulso con los dedos”.....	172
VII.2.3.1. Diagrama de cuerpo libre	172
VII.3. Las circunferencias principales en las posturas del pie	176
VII.3.1. Forma y dimensiones del tobillo	177
VII.3.2. Forma y dimensiones de los dedos.....	178
VII.3.3. Forma y dimensiones del recio.....	179
VII.3.4. Forma y dimensiones del empeine.....	180

VII.3.5. Análisis de las circunferencias principales	181
Capítulo VIII El prototipo de la horma.....	182
VIII.1. Ajustes en el modelo virtual.....	183
VIII.1.1 Cuadramen o sección I y II de la horma	183
VIII.1.2. Cuadramen o sección III y IV de la horma.....	184
VIII.1.3. Cuadramen o sección V y VI de la horma	184
VIII.1.4. Cuadramen o sección VII y VIII de la horma	186
VIII.1.5. Cuadramen o sección IX y X de la horma	188
VIII.2. Ingeniería del prototipo 0	189
VIII.2.1. Prototipado rápido bajo la tecnología FDM (Fuse deposition modeling)	190
VIII.2.2. Funcionalidad del ensamble.....	191
VIII.2.3. Modularidad de la horma o reconfiguración	192
VIII.2.4. Guías en bajo relieve para la manufactura artesanal	193
VIII.2.5. Análisis de elementos finito en el prototipo.....	194
VIII.2.6. Manufactura FDM y su costo.....	197
Capítulo IX Conclusiones y recomendaciones	201
IX.1. Cumplimiento de los objetivos.....	202
IX.2. Recomendaciones.....	207
Bibliografía	210
Anexos	219
Anexo 1.- Diferentes ejes del pie	219
Anexo 2.- Brannock.....	220
Anexo 3.- Podograma	221
Anexo 4.- La distribución del peso	222
Anexo 5.- Corte transversal y longitudinal del pie	223
Anexo 6.- Tipos del pie	225
Anexo 7.- Puntos y regiones importantes en el pie.....	226
Anexo 8.- Principales parámetros antropométricos del pie	227
Anexo 9.- Lesiones más comunes	228
Anexo 10.- La marcha humana en diapositivas	230

Anexo 11.- La energía cinética y potencial en la marcha.....	231
Anexo 12.- Fuerzas de reacción	232
Anexo 13.- Centro de masa del cuerpo.....	233
Anexo 14.- Los músculos de la pierna	235
Anexo 15.- Registro electromiográfico de la actividad muscular	236
Anexo 16.- Articulaciones y ejes del retropié	237
Anexo 17.- Polígono de sustentación y ángulo de Fick.....	240
Anexo 18.- Diferentes movimientos de las articulaciones del pie.....	241
Anexo 19.- Las articulaciones en el cuerpo humano.....	242
Anexo 20.- Método de segmento de enlace por Winter	243
Anexo 21.- Datos antropométricos.....	244
Anexo 22.- Tabla. Linear and Angular Kinematics-Foot.....	246
Anexo 23.- Trayectoria de presión en el pie.....	248
Anexo 24.- Propiedades del bioplástico PLA	249
Anexo 25.- Análisis de Elementos Finito FEA.....	251
Anexo 26.- Relación de costos.....	252
Apéndice	253
Apéndice 1.- El modelo virtual del pie izquierdo.....	253
Apéndice 2.-Modelo del pie en la postura “Choque del talón”.....	254
Apéndice 3.- Escaneo del pie.....	255
Apéndice 4.- Mapa de coordenadas en autocad.....	256
Apéndice 5.- Producción de la horma por FDM	258

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Calzado mesoamericano.....	23
Ilustración 2. La antigua industria en León Guanajuato, México.	25
Ilustración 3. Países productores de calzado en Asia	28
Ilustración 4. Países productores de calzado en Europa	30
Ilustración 5. Países productores de calzado en América.....	31
Ilustración 6. Exportaciones mexicanas de calzado y su tendencia	37
Ilustración 7. Rubros de calzado que se exportan.....	37
Ilustración 8. Países que importan calzado a México y su tendencia.....	38
Ilustración 9. Rubros de calzado que se importa a México	38
Ilustración 10. Las partes principales de la horma	43
Ilustración 11. El perfil de la horma	43
Ilustración 12. Los 35 parámetros de una horma	44
Ilustración 13. La planta y el perfil en la horma	47
Ilustración 14. Contorno de la plantilla, sistema WMS	49
Ilustración 15. Elaboración de una horma de manera artesanal	51
Ilustración 16. Diagrama para elaborar una horma a mano	51
Ilustración 17. Acabado superficial de una horma de aluminio.....	52
Ilustración 18. Extrusión y maquinado de una horma de plástico.....	53
Ilustración 19. Proceso moderno para la elaboración de una horma	54
Ilustración 20. Tipos de escaneo de una horma.....	54
Ilustración 21. Parte inferior de la horma.....	57
Ilustración 22. Perfil de la horma	57
Ilustración 23. Partes principales de una horma en el sistema francés.....	58
Ilustración 24. Diseño tradicional de los patrones sobre la horma	63
Ilustración 25. Patrones en el calzado.....	64
Ilustración 26. Diseño de patrones por computadora	65
Ilustración 27. Calzado y horma para fabricación tipo cementado	66
Ilustración 28. Calzado y horma para fabricación tipo Goodyear Welt.....	66
Ilustración 29. Calzado y horma para fabricación tipo Stich Down & S. Crispino ..	67
Ilustración 30. Calzado fabricado con tecnología 3D printing.....	68
Ilustración 31. El paradigma de la producción.....	71
Ilustración 32. Variedad de productos vs productividad	72
Ilustración 33. La personalización en masa para el diseño de calzado.....	73
Ilustración 34. Los tres ejes de la personalización en el calzado	74
Ilustración 35. Proceso para la obtención de un molde de yeso	76
Ilustración 36. Horma fabricada en 3D printing	77
Ilustración 37. Diagrama de flujo para calzado a la medida	78

Ilustración 38. Portal de personalización para calzado deportivo New Balance....	79
Ilustración 39. Portal para la venta de zapato hecho a la medida y a mano.....	79
Ilustración 40. Metodología para la obtención de las circunferencias del pie.....	81
Ilustración 41. La superficie de la horma por secciones.....	82
Ilustración 42. Diseño del contorno y la parte baja de la horma.....	84
Ilustración 43. Patentes de interés.....	88
Ilustración 44. La estructura ósea del pie.....	91
Ilustración 45. Músculos y tendones del pie.....	92
Ilustración 46. Ligamentos del pie derecho.....	93
Ilustración 47. Escaneo de la planta del pie.....	95
Ilustración 48. El contorno de los pies.....	96
Ilustración 49. El eje de simetría en el pie.....	97
Ilustración 50. El parámetro inicial o la longitud del pie.....	98
Ilustración 51. Medición de la talla del pie derecho.....	100
Ilustración 52. La huella del pie.....	102
Ilustración 53. Falsa holgura en los pies.....	103
Ilustración 54. Longitud de la huella.....	104
Ilustración 55. La planta y sus tres medidas.....	105
Ilustración 56. Longitud del talón.....	109
Ilustración 57. Ancho del talón.....	110
Ilustración 58. Longitud del empeine.....	112
Ilustración 59. Ancho del empeine.....	113
Ilustración 60. Parámetros del recio.....	115
Ilustración 61. Ancho del recio perpendicular al eje.....	116
Ilustración 62. Ancho del recio en forma diagonal al eje.....	117
Ilustración 63. Longitud de los dedos.....	119
Ilustración 64. Ancho en la zona de los dedos.....	120
Ilustración 65. El ancho de los dedos diagonalmente.....	121
Ilustración 66. Ángulo de los dedos.....	123
Ilustración 67. Ángulo de los dedos otra forma de medir.....	124
Ilustración 68. Comparativo entre el eje nuevo y el tradicional.....	126
Ilustración 69. Diferencias entre ejes.....	127
Ilustración 70. Silueta de la planta de la horma.....	131
Ilustración 71. Los aspectos para el confort en las diez secciones del pie derecho.....	135
Ilustración 72. Los puntos más susceptibles en la parte superior e inferior del pie.....	137
Ilustración 73. Ubicación de los puntos más susceptibles del pie derecho en su cara lateral y medial.....	139
Ilustración 74. Medición de las tres circunferencias principales del pie.....	140
Ilustración 75. Alturas en los diversos puntos del pie.....	142

Ilustración 76. Representación de la parte posterior del pie.....	146
Ilustración 77. Representación de la parte media del pie.....	147
Ilustración 78. Representación de la parte anterior del pie.....	148
Ilustración 79. El modelo del pie “Extremidad derecha”	149
Ilustración 80. El modelo del pie “Extremidad derecha” continuación	150
Ilustración 81. El ciclo de la marcha (pie izquierdo)	152
Ilustración 82. Valores promedio del caminar en hombres y mujeres	154
Ilustración 83. Modelos para representar el caminar.....	155
Ilustración 84. Trabajo negativo y positivo de los músculos.....	156
Ilustración 85. Fuerzas de reacción del suelo generadas por el pie.....	157
Ilustración 86. Relación entre la fuerza de reacción vertical y las posturas del pie	158
Ilustración 87. Las posturas del pie y los músculos que intervienen	159
Ilustración 88. Vistas de la postura “Choque del talón”,	161
Ilustración 89. Diagrama de cuerpo libre "momento inercial del pie".....	164
Ilustración 90. Diagrama de cuerpo libre "fuerzas y reacciones"	165
Ilustración 91. Diagrama de cuerpo libre "Momento de reacción"	166
Ilustración 92. Diapositivas de la postura “Media estancia”	168
Ilustración 93. Diagrama de cuerpo libre "Centro de presión"	169
Ilustración 94. Diagrama de cuerpo libre "Fuerzas en el tobillo"	170
Ilustración 95. Diagrama de cuerpo libre "momento generado"	171
Ilustración 96. Diagrama de cuerpo libre "Centro de masa, radio de giro y momento de inercia"	172
Ilustración 97. Diagrama de cuerpo libre "fuerzas y reacciones".....	174
Ilustración 98. Diagrama de cuerpo libre "Momento generado"	175
Ilustración 99. Circunferencia del tobillo.....	177
Ilustración 100. Circunferencia de los dedos.....	178
Ilustración 101. Circunferencia del recio.....	179
Ilustración 102. Circunferencia del empeine.....	180
Ilustración 103. Sección o cuadramen I y II de la horma.....	183
Ilustración 104. Sección III y IV de la horma	184
Ilustración 105. Sección V y VI de la horma	185
Ilustración 106. Ángulo inferior de la horma	185
Ilustración 107. Sección VII y VIII de la horma	186
Ilustración 108. Vectores de posición para ajuste en la horma	187
Ilustración 109. Sección IX y X de la horma.....	188
Ilustración 110. Prototipo de hormas bajo la tecnología Fused Deposition Modeling	190
Ilustración 111. Ensamble en el prototipo de la horma.....	191
Ilustración 112. La modularidad del prototipo.....	192
Ilustración 113. Guías para la manufactura artesanal	193

Ilustración 114. Análisis de elementos finito del prototipo parte posterior	194
Ilustración 115. Análisis de elementos finito del prototipo parte media	195
Ilustración 116. Análisis de elementos finito del prototipo parte anterior	196

Índice de tablas

Tabla 1. Países productores de calzado (pares)	34
Tabla 2. Países consumidores de calzado (pares).....	35
Tabla 3. Países exportadores de calzado (millones de dólares)	35
Tabla 4. Países importadores de calzado (millones de dólares)	36
Tabla 5. Exportaciones de calzado y productos análogos mexicanos a América Latina.....	39
Tabla 6. Importaciones de calzado y productos análogos de América Latina hacia México	40
Tabla 7. Parámetros principales en el sistema ruso.....	48
Tabla 8. Parámetros del sistema WMS-AKA64.....	50
Tabla 9. Multiajuste en longitud y ancho para la talla 5.....	56
Tabla 10. Tallas mondopoint	61
Tabla 11. Equivalencia de algunas tallas en el mundo.....	62
Tabla 12. Parámetros según Luximon.....	85
Tabla 13. Longitud de los pies.....	99
Tabla 14. Las medidas obtenidas con el Brannock para el pie derecho.....	100
Tabla 15. Las medidas obtenidas con el Brannock para el pie izquierdo.....	100
Tabla 16. Comparativo de parámetros y nomenclatura propuesta.....	107
Tabla 17. Corrección de parámetros del pie derecho.....	128
Tabla 18. Corrección de parámetros del pie izquierdo	128
Tabla 19. Resumen de constantes con factor de corrección.....	129
Tabla 20. Parámetros corregidos para el nuevo eje	129
Tabla 21. Puntos y regiones para el confort en el pie	134
Tabla 22. Los puntos más susceptibles del pie en su parte superior e inferior ...	136
Tabla 23. Los puntos más susceptibles del pie en su parte lateral, medial y posterior	138
Tabla 24. Resumen de las circunferencias del pie	141
Tabla 25. Resumen de las alturas del pie sobre sus circunferencias.....	142
Tabla 26. Medidas para el confort del pie derecho.....	143
Tabla 27. Medidas para el confort del pie izquierdo	144
Tabla 28. Circunferencias del pie en las tres posturas de estudio	181
Tabla 29. Tabla resumen de vectores de posición	188
Tabla 30. resumen de los costos y gastos del prototipo de la horma	200

Introducción

Planteamiento del problema

Los pies junto con las piernas juegan un papel fundamental para el ser humano, nos desplazan de un lugar a otro, mantienen el cuerpo erguido, equilibran el propio peso y dan la facultad de practicar algún deporte.

En los orígenes de la humanidad, el hombre comenzó a cuidar sus pies con un rústico recubrimiento atado con cintas, ya sea para protegerse del frío o por la necesidad de desplazarse en terrenos accidentados y pedregosos. Hoy en día el calzado también se usa para proporcionar el soporte adecuado, según la actividad a realizar.

El beneficio por el uso del calzado en las diversas etapas de la vida, a veces no es lo que se espera, un reporte alemán referente al pie, presentado en el DIABETES FORUM del año 2015, señala que el 82% de su población usa calzado que no está relacionado con el tamaño de sus pies¹. Otro estudio igual de importante, efectuado por el Institute for Preventive Foot Health² en Estados Unidos revela que en promedio cada persona necesita probarse de dos a tres pares de zapatos antes de elegir el que mejor le ajuste.

En México no es la excepción; para empezar, no existe un estudio detallado respecto a la antropometría del pie, si a esto le sumamos problemas de obesidad en la población, cambios generacionales de talla, mestizaje y migración, el calzado desafortunadamente no refleja las características anatómicas del consumidor.

El uso de calzado incorrecto, ya sea por su diseño, estructura, forma o simplemente por a una mala elección, puede generar una serie de consecuencias que van desde

¹ Boehm, R. (Junio 2015). The foot & the shoe, measurement & size. Darco Europe. GmbH. Germany.

² Preventive Foot Health Institute (2012) (página web), National Foot Health Assessment. U.S.

las leves como ampollas y callosidades hasta algunas muy serias que incapaciten gradualmente la movilidad del pie.

Países incluyendo el nuestro, han manejado para una misma talla diferentes anchos; sin embargo, en la práctica es una actividad poco viable mantener un inventario con toda esa variedad para un mismo modelo.

Marco de referencia

El calzado como parte de la indumentaria personal, entra en los escaparates de moda, Italia y España lo han enmarcado con gran tradición en la industria del vestido, se fomenta su estudio como parte de la alta costura, con diseños refinados y sofisticados. Otros países como China y Vietnam, ofrecen gran producción a bajo costo, lo que incentiva a las marcas de renombre a buscar estos maquiladores para obtener enormes ganancias.

Muchos fabricantes han visto en el calzado hecho a la medida una estrategia comercial muy competitiva; por ejemplo, para cautivar a un usuario insatisfecho o alguno con un gusto altamente exclusivo que le guste vestir con calzado hecho a mano. Desde que se acuñó el término “personalizado” en el año de 1987, por Stan Davis; el concepto se ha ido desarrollado gradualmente hasta visualizar todo un sistema de personalización en masa, convirtiendo al cliente en codiseñador durante las diversas etapas del desarrollo del producto, expresando sus necesidades y/o requerimientos (Tseng, Hu y Wang; 2014, p.2 y 3)³.

Al revisar la norma ISO, el concepto de calidad dice: “la calidad es el total de las características de una entidad que añade a su capacidad para satisfacer necesidades explícitas e implícitas” (ISO 8402:1994)⁴. Mientras que la norma está

³ Tseng, Hu & Wang. (2014). Mass customization, University of Science and Technology, Hong Kong and University of Michigan, USA. (Academic paper) CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Springer Publications.

⁴ Peach, R. (1999) Manual de ISO 9000, tercera edición, Mc Graw Hill. México.

encaminada en cero defectos en productos iguales; la personalización pretende hacer objetos exclusivos, no importando si sólo le satisface a una sola persona.

Expertos como Wang, Lin y Luximon; se han dado a la tarea de encaminar diversos estudios en cuanto a la personalización del diseño de hormas y calzado, ayudados por el uso de nuevas tecnologías de simulación, medición e imagen. Por otro lado, la comunidad europea a través de un grupo multidisciplinario llamado ERGOSHOE han desarrollado todo un sistema de diseño-producción de calzado a través de escáner y software especializados para reunir datos, procesarlos en diversas tareas y obtener calzado con un alto grado de personalización.

Justificación

Para dimensionar la importancia de la industria del calzado en México, según datos del INEGI, hay tres ciudades y cinco municipios que representan más del 85% de la producción nacional, entre estos destacan: León, Guadalajara y Toluca⁵. Para algunos municipios su economía gira completamente en su elaboración; por ejemplo, en Guanajuato, la participación en el PIB del año 2015 fue del 6.3 % a nivel estado y del 17% a nivel municipio. Otro caso para mencionar es la región de Ticul en Yucatán, donde casi la mitad de la población económicamente activa se dedica a este rubro de una manera casi artesanal.

Por ser la horma la pieza clave donde gira la manufactura del calzado, se eligió esta para ser estudiada desde un punto de vista integral, sistémico de acuerdo a lo aprendido en la maestría; relacionando anatomía, antropometría, ergonomía y por su puesto biomecánica ya que debe ir más allá de las simples cualidades externas para su uso y no sólo entrar en la categoría de moda y estilo.

⁵ INEGI. (2014). *Estadísticas a propósito de la industria del calzado*. Recuperado de www.internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825068332.pdf.

Preguntas de investigación

- 1.- ¿Cómo abordan los principales fabricantes y diseñadores la personalización del calzado?
- 2.- ¿Será posible considerar a la huella del pie dentro de los parámetros de diseño de la horma?
- 3.- ¿Qué diferencias habrá al parametrizar con la huella respecto a la forma tradicional?
- 4.- ¿Qué aspectos de ajuste-comfort debe llevar el desarrollo volumétrico de la horma?
- 5.- ¿Cómo cambia la forma y las dimensiones del pie al caminar?
- 6.- ¿Existen aspectos dinámicos que mejoren la ergonomía del calzado?
- 7.- ¿Cuáles son los beneficios de fabricar un prototipo de horma con tecnología FDM?

Hipótesis

A partir de la huella del pie, se puede desarrollar un prototipo de horma personalizada que cumpla con los parámetros de diseño y que a su vez satisfaga las necesidades ergonómicas del pie al caminar.

Objetivo general

Desarrollar un prototipo de horma personalizada a partir de la huella del pie, considerando cada uno de los parámetros de diseño y que a su vez satisfaga las necesidades ergonómicas del pie al caminar.

Objetivos particulares

- 1.- Investigar cómo abordan los principales fabricantes y diseñadores la personalización del calzado.
- 2.- Considerar a la huella del pie dentro de los parámetros de diseño de la horma.
- 3.- Encontrar las diferencias al parametrizar con la huella respecto a la forma tradicional.
- 4.- Establecer los aspectos de ajuste-confort que debe llevar el desarrollo volumétrico de la horma.
- 5.- Identificar los cambios de forma y las dimensiones del pie al caminar.
- 6.- Integrar aspectos dinámicos para mejorar la ergonomía del calzado.
- 7.- Fabricar un prototipo de horma con tecnología FDM y mostrar sus beneficios.

Metodología

Para realizar esta tesis, se llevó a cabo una investigación exhaustiva de lo que representa el calzado y la horma en México, y en el mundo. Las fuentes consultadas fueron de diversa índole, desde libros y revistas especializadas, notas de periódicos, tesis de maestría y doctorado, blogs de fabricantes, videos encaminados a la manufactura, conferencias de representantes de la cámara del calzado, asistencia en ferias, exposiciones y museos, reportes de simposios, crónicas históricas, normas y bases de datos de patentes; donde se extrajo la información más relevante.

En lo que concierne a los temas técnicos del área médica; además de libros y revistas, se consultaron artículos y publicaciones en las bases de datos de las editoriales como Elsevier ScienceDirect, SciELO, Google Académico y otros buscadores con lo último en investigación.

Como base para la sustentación y análisis se utilizaron los sistemas de diseño horma-calzado ruso, alemán y chino, por tener un respaldo científico de varios años

de investigación y su vinculación con la industria. En lo que concierne al área de la ingeniería industrial como lo es el diseño, la manufactura y la personalización de la horma, la información fue seleccionada de acuerdo a los criterios de pertinencia, exhaustividad y actualidad; y se encontró principalmente en libros técnicos de manufactura y en artículos de investigación con los descubrimientos más recientes. Otros materiales de consulta fueron las normas ISO y ASTM consultadas directamente en su página electrónica.

Dentro de éste proyecto de investigación fue necesario un individuo que sirviera de modelo para someterlo a una serie de pruebas bajo el método científico; primero para establecer la huella y su eje y segundo para estudiar cómo se ven afectadas las dimensiones del pie por las fuerzas involucradas durante la marcha, para lo cual fue necesario edificar un área de trabajo y realizar una serie de mediciones, fotografías y escaneos de cada pie en sus diferentes posturas.

Una herramienta poderosa para el análisis fue autocad para elaborar modelos virtuales del pie, ya que hacer mediciones con la extremidad en movimientos es muy difícil sin la tecnología necesaria; también es necesario mencionar que gracias a las máquinas de la tecnología 4.0 han abierto la posibilidad de manufacturar piezas con formas complejas e intrincadas, dando la posibilidad de presentar en físico una horma en tamaño real para cada pie con todas las cualidades y medidas establecidas en este proyecto.

Propósito

El calzado como parte de la indumentaria del ser humano ha recibido una especial atención principalmente por diseñadores de moda proponiendo nuevos estilos y materiales; también la medicina ha hecho notables aportaciones para mantener un pie clínicamente sano y a la par de todo esto, la industria y sus agremiados, se han dado a la tarea de normalizar tallas, metodologías y procedimientos de trabajo.

En México hablando del ramo zapatero, el concepto de clúster industrial, según las conclusiones de Rbellotti & Schmitz (1999) no ha tenido una consolidación favorable; pues el proteccionismo del mercado interno ha limitado la competencia y la especialización, y por otro lado el gremio carece de un lenguaje técnico bien normalizado y un sistema adecuado de medidas. Desde mi punto de vista Guanajuato es la entidad que ha hecho notables esfuerzos para la profesionalización del oficio, vinculando a la industria, escuelas a nivel licenciatura y fomentando el establecimiento de centros para la innovación y el diseño.

A nivel mundial, toda la información del calzado está muy restringida; es decir no circula libremente por internet; por ejemplo, la normatividad es proporcionada mutilada con la leyenda hoja no disponible y hablando de las hormas es aún más difícil e inaccesible.

Este trabajo tiene el objeto de presentar una nueva metodología para el desarrollo de la horma, bajo la premisa de que la huella es un elemento único e irreplicable en cada individuo, la personalización gira en torno de ésta y tiene el propósito de cimentar las bases para un mejor ajuste a través de un enfoque holístico, integrando diversas disciplinas como: anatomía, ergonomía, antropometría y dinámica. Sin pretender ser una guía ortopédica, ni mucho menos resolver ciertas patologías que le competen al área médica.

Capitulado

En el primer capítulo se aborda los orígenes y la evolución que ha experimentado el calzado en el mundo; su economía y los principales clústeres en Europa, Asia y América; Además de un breve recorrido en el desarrollo de la industria zapatera en México.

En el segundo capítulo se expone la importancia y la función de la horma, sus partes principales, los sistemas de diseño horma-calzado más importantes, las diferentes tallas en el mundo y algunos tipos de fabricación del calzado.

En el tercer capítulo se aborda el concepto de la personalización en masa y su floreciente campo de acción, se revisa el programa europeo llamado “ergoshoe” y su impacto al concebir el diseño y la fabricación del calzado; también se muestran los diferentes tipos de personalización que van desde los elementales hasta los del ámbito médico, también se analizan las metodologías de ciertos investigadores en cuanto al diseño personalizado de la horma; así como una revisión de algunas patentes de interés.

En el cuarto capítulo se muestra una metodología para encontrar el eje geométrico de la huella a través de una imagen escaneada del pie, la cual es trabajada en autocad para encontrar el parámetro inicial; además, se traza su periferia, y se señalan las posibles holguras de la planta.

En el quinto capítulo se vincula el parámetro inicial con los demás parámetros con el objeto de encontrar cada parte del pie, sustentado por tres sistemas de diseño: el ruso, chino y alemán, y a partir de sus diez secciones se traza la superficie plantar, además se determina su ancho y se analizan las desviaciones por usa el nuevo eje en lugar del tradicional.

En el sexto capítulo se desarrolla el eje cartesiano z a partir de la superficie plantar contenida en el plano x-y; es decir, se construyen los modelos virtuales del pie a través de sus diez secciones, considerando tres circunferencias básicas y se da una especial atención a los puntos y/o zonas críticas para el ajuste de la horma.

En el séptimo capítulo se realiza un análisis biomecánico en el pie por el método de secciones, donde se busca encontrar la relación entre deformación y las fuerzas generadas al caminar.

En el octavo capítulo se integran los aspectos estáticos y dinámicos encontrados en los capítulos anteriores para plasmar en el prototipo de la horma y se materializa a

través de la tecnología FDM; también, se rompe el paradigma de la horma tradicional agregando cualidades de funcionalidad y modularidad, encaminado a concebir un mejor calzado.

En el último capítulo se ofrecen las conclusiones y recomendaciones donde se discuten los resultados obtenidos y se comparan con los ya establecidos; así como las posibles líneas de investigación que no fueron abordadas y que son relevantes para el diseño en la horma.

Capítulo I. La industria del calzado

En este capítulo se mencionan los orígenes y la evolución que ha sufrido el calzado en el transcurso de los años, se exponen los principales clústeres en Europa, Asia y América; así como una revisión de las estadísticas de comercio de los principales países productores y consumidores de calzado en el mundo. Sin olvidar la industria que existe en nuestro país.

I.1. Evolución del calzado

El calzado, creado con la intención de proteger al pie, se ha convertido, sin duda, en un artículo primordial en la indumentaria del hombre, y se ha ido perfeccionando poco a poco con el transcurso de los años. En este subcapítulo se trata a detalle la evolución del calzado en el mundo y los primeros gremios que formaron la industria del calzado en México.

I.1.1. La historia del calzado en el mundo

El calzado se ha utilizado desde tiempos remotos; así lo demuestran las pinturas rupestres de España, el hallazgo de un zapato en una cueva de Armenia de 5,000 años de antigüedad y otro en la región central de Oregon, Estados Unidos, descubierto por Luther Cressman, de 9,500 años (Choklat, 2012, p. 10)⁶.

Las civilizaciones egipcia, sumeria y mesopotámica sabían tratar el cuero, utilizaban materiales como madera, papiro, junco, hojas entrelazadas y tela teñida. Los griegos y romanos, en la Antigüedad, usaban sandalias adecuadas a sus actividades. En la Edad Media se usó calzado cubierto de piel de vaca y cabra (González, 5 de abril de 2013, párr. 6)⁷. En el Renacimiento se introdujo la punta pronunciada, el tacón, los bordados; como sinónimo de estatus social (Choklat, 2012, p. 13)⁸.

Francia, en el siglo XIX, era considerada la capital cultural de la época; además destacó por su desarrollo en alta costura, así como en el diseño y la confección de calzado (Choklat, 2012, p. 13)⁹. A finales del mismo siglo surgieron nuevas formas de fabricación y la llamada producción en serie (El calzado, 2010, párr. 5)¹⁰.

⁶ Choklat, A. (2012). *Diseño de Calzado*. Barcelona, España. Gustavo Gili.

⁷ González, M. (5 de abril de 2013). Historia del calzado y su evolución, un poco de historia [mensaje en un blog]. Recuperado de <http://historiadecalzado.blogspot.mx/>.

⁸ Choklat, A. (2012). Op. Cit..

⁹ Choklat, A. (2012). Op. Cit.

¹⁰ Museo del objeto del objeto (2010). El calzado. [mensaje en un blog]. Recuperado de <http://elmodo.mx/el-mododel-mododel-calzado/>.

El zapato deportivo se inventó en Estados Unidos (1916), y debido a que las guerras acaecidas durante el siglo XX provocaron escasez de materiales, comenzaron a desarrollarse materiales sintéticos. En los años 50 se inventa el tacón de aguja o *stiletto*, después los mocasines, las altas plataformas y la tendencia urbana que marca las últimas décadas del siglo XX (González, 5 de abril de 2013, párr. 1)¹¹.

I.1.2. Historia del calzado en México

En la época prehispánica se usó un tipo de calzado que en náhuatl se le llamaba *Cactli*, hecho de piel de ciervo y jaguar; llevaba unas correas cosidas con hilo de ixtle y otras fibras como el henequén (Pérez, 19 de octubre de 1999, párr. 1)¹². En cuanto a su diseño, mantenía al descubierto el dorso del pie cubriendo sólo la parte del talón; el emperador, los sacerdotes, guerreros y comerciantes de alto rango los portaban. Con la llegada de los españoles se establecieron talleres de curtido, y se incorporaron nuevas técnicas de fabricación y otros materiales; el llamado *Cactli* se convirtió en el huarache, y al producto del mestizaje, la bota y el botín (Norandi, 24 de febrero de 2002, párr. 2-3)¹³.

Ilustración 1. Calzado mesoamericano



Fotografía tomada en el museo de calzado "El Borcegui". Bolívar 27, Centro Histórico. Ciudad de México.

¹¹ González, M. (5 de abril de 2013). Op. Cit.

¹² Pérez, A. (19 de octubre de 1999). Dime quién eres y te diré qué zapatos usas. *El Universal*. Recuperado de <http://archivo.eluniversal.com.mx/estilos/2043.html>.

¹³ Norandi, M. (24 de febrero de 2002.). El zapato, más que protección para el pie, todo un objeto de moda. *La Jornada*. Recuperado de <http://www.jornada.unam.mx/2002/02/24/06anesp.php?origen=index.html>.

El zapato masculino, a finales del siglo XVI y hasta el siglo XVII, tuvo dos estilos: el borceguí negro con hebilla de plata y las botas de montar. Los zapatos femeninos eran más variados: solían ser de piel o terciopelo negro, con tacón pequeño y bordados con hilos de oro y plata; eran únicamente para la clase alta. El intercambio comercial durante el siglo XVII con Asia incorporó la seda y el raso al calzado. El estilo rococó del siglo XVIII añadió la pedrería y el bordado. La moda barroca se sustituyó por la neoclásica surgida del imperio napoleónico. Los zapatos femeninos se fabricaban sin tacón, de seda o cabritilla blanca y para los hombres altas botas de charol negro (Norandi, 24 de febrero de 2002, párr. 2 y 3)¹⁴.

En 1645 se tenían censadas 36 casas tipo taller para la fabricación de calzado; en 1869 aumentaron a 50. La primera fábrica se llamó “La Nueva Industria”, que inició en 1872 bajo la dirección del Sr. Eugenio Zamarripa. En 1900 el gremio de la industria del cuero creció hasta representar el 17% de la población económicamente activa, y gracias al Sr. Tereso Durán, que poseía gran visión empresarial, comenzó la producción en serie (*México desconocido*, julio de 2010, párr. 2, 6 y 7)¹⁵. En 1920, la ciudad de León, en Guanajuato, fue llamada “La ciudad de los talleres”, ya que concentraba una gran cantidad de tenerías y zapaterías (Amat, 6 de octubre de 2010, párr. 10)¹⁶.

El artesano zapatero se desarrolló en las picas familiares y el trabajo a domicilio; y las microempresas crecieron hasta formar los pequeños centros industriales. Entre la primera y la segunda guerra mundial, en México hubo una mecanización de la industria familiar debido a la reforma social cardenista, se amplió el mercado interno

¹⁴ Norandi, M. (24 de febrero de 2002). Op. Cit..

¹⁵ *México Desconocido*. (Julio de 2010). Historia de la industria zapatera en León, Guanajuato. [Mensaje en un blog]. Recuperado de www.mexicodesconocido.com.mx/historia-de-la-zapatera-en-leon-guanajuato.html.

¹⁶ Amat, J. (6 de octubre de 2010). El zapato ayer y hoy. La historia de la industria del calzado en León, Guanajuato; México. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://zapatotirapie.blogspot.mx/2010/10/la-historia-de-la-industria-del-calzado.html>.

de consumo, y comenzó la producción de forma sistematizada (Iglesias, E. 1998, pág. 59)¹⁷.

Ilustración 2. La antigua industria en León Guanajuato, México.



LA NUEVA INDUSTRIA
CASA ESTABLECIDA EN 1872.
Gran Teneria "El Cuera Pintado"
Y FABRICA DE CALZADO.
EUGENIO ZAMARRIPA.
TENERIA LEON ZAPATERIA
SOLEADO MORDE, NUM. 132. LEON, 1310. SOLEADO NUMERO 134.
APARTADO 35. TELEFONO 168.
LA PRACTICA DE TREINTA Y OCHO AÑOS
EN LOS RAMOS
DE TENERIA Y ZAPATERIA,
Y LA CONSTANCIA DE MIS CLIENTES EN EL CONSUMO,
es la mejor garantia de la bondad de
los articulos que fabrico, manufactura-
dos con materiales de primera clase.
ESPECIALIDAD EN CALZADO
PARA LA
FRONTERA DEL NORTE
Y ZVELA SUPERIOR DE GASSARA DE ZINCINO.
Este Cuen estableció en León el primer despacho de Comercio el año de 1832.
PRECIOS - MODICOS,
EQUIDAD Y PRONTITUD EN LOS PEDIDOS.

J. ISABEL MACIAS
FABRICANTE DE CALZADO.
UNICO PRIMER GRAN PREMIO
EN LA EXPOSICION DE LEON.
D.E. 1896.
CASA FUNDADA EN 1832.
Manufactura de Galeno conforme a los últimos adelantos. Materias de primera clase y Harinas de todas sañas.
LAS MEJORES IMITACIONES
CALZADO ESPAÑOL Y AMERICANO.
Debido a la gran demanda de pedidos foráneos que tiene esta fabrica, la que se manifiesta por la bondad de sus trabajos, se hace saber que solo serán atendidos aquellos pedidos que vengan acompañados de su valor.
VENTAS AL POR MAYOR
EN LOS TALLERES: INDIO TRISTE N° 11.
Para compras al menudeo, ocarrá Ud. al acreditado Almacén
"LA ABEJA"
PORTAL CUERRERO N° 13

Fuente: Imagen obtenida de internet (4 de Marzo de 2017) del blog "Docplayer" dirección electrónica: <https://docplayer.es/68427740-La-historia-de-calzado-leones-a-traves-de-los-siglos.html>.

¹⁷ Iglesias, Esther. (1998). Op. Cit.

En la década de 1950, la industria se modernizó, incorporando tecnología de Estados Unidos y Europa; también se establecieron las ferias nacionales de calzado. En la década de 1960 ocurre un cambio generacional y una expansión que cimentó la industria del calzado. A principios de 1970 se tenía una producción de 200,000 pares diarios y una plantilla de 1,920 establecimientos productores que en su totalidad albergaban 76,800 trabajadores (Iglesias, E. 1998, p. 60)¹⁸.

De acuerdo con Hernández, E. (2007, p. 97)¹⁹, al finalizar la década de los setenta, la industria del calzado llegó a producir hasta 210 millones de pares anuales (575,342 pares diarios), empleando incluso a 115,000 trabajadores. La crisis de los años ochenta afectó a la industria, reduciendo la producción 50%, aproximadamente, y los días de trabajo a cuatro por semana. Las causas fueron: la devaluación del peso, la caída del consumo interno, la pobre calidad y los altos precios de los insumos de importación.

La entrada de México en 1986 al GATT hizo que la media arancelaria se redujera gradualmente del 27% al 13.1%, aunado a un incremento en las importaciones de hasta 626%, lo que provocó que a partir de 1987 se iniciara un acelerado descenso para caer en un déficit comercial de 132 millones de dólares. En el año de 1993, el estado de Guanajuato cerró 159 empresas; de la misma manera, en Jalisco hubo un cierre de 140, y se perdieron 23,000 empleos. El calzado sintético fue el rubro más afectado, pues entró al país con un valor de 1.5 dólares, proveniente de Taiwán (Hernández, 2007, p. 99-109)²⁰.

Continuando con Hernández E. (2007), con el Tratado de Libre Comercio de América del Norte, en el año de 1994 se modernizaron las leyes en materia de comercio exterior, se impuso el derecho de salvaguarda y la protección ante el *dumping*; las exportaciones de México se vieron favorecidas al bajar el arancel hacia Estados Unidos. En 1996, gracias al TLCAN, se llegó a contabilizar cerca de 500 mil plazas laborales, y de 50 empresas exportadoras existentes pasaron a

¹⁸ Iglesias, Esther. (1998). Op. Cit.

¹⁹ Hernández, E. (2007). Op. Cit.

²⁰ Hernández, E. (2007). Op. Cit.

establecerse 140; la cuota productiva era de 767,123 pares diarios. Sin embargo, a finales del año 2002 se volvió a contraer drásticamente la producción a sólo 465,753 pares diarios; en cambio, las importaciones crecieron de 13,698 pares diarios a 63,013 pares en el mismo periodo.

A partir de 2002 la balanza comercial de calzado en México fue negativa (INEGI, 2014, p. 26)²¹; no ayudó tener 10 tratados comerciales con otros países. Según la Universidad de Harvard, México perdió competitividad en el *ranking* mundial ante el ingreso de China a la Organización Mundial de Comercio (Hernández, 2007, p. 110)²².

I.2. Los clústeres de calzado en el mundo

Los clústeres son regiones productoras de calzado donde concurren diseñadores, productores, maquiladores, fabricantes o vendedores de maquinaria y materias primas, comerciantes y prestadores de servicios diversos. En el presente subcapítulo se exponen los principales centros fabriles en cada continente.

I.2.1. La industria del calzado en Asia

Según datos de Legiscomex (2006, p. 2-6)²³, en China, en 2004, había 20,000 empresas que trabajaban el cuero y 1.6 millones de empleados en la industria del zapato. La región de Guangdong aporta el 24% de la producción de zapato de piel y el 32% del de goma, tela y plástico; al año fabrica más de 3,000 millones de pares, lo que representa la mitad de la producción del país. Le sigue la región de Fujian,

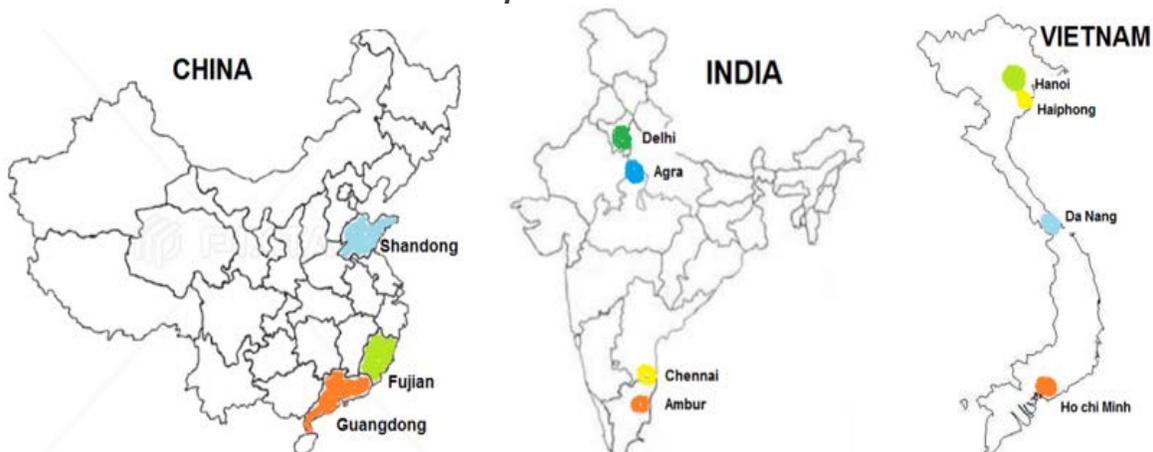
²¹ INEGI. (2014). *Estadísticas a propósito de la industria del calzado*. Recuperado de www.internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825068332.pdf.

²² Hernández, E. (2007). Op. Cit.

²³ Legiscomex. (2006). *Calzado de China. Inteligencia de mercados*. Recuperado de www.legiscomex.com/BancoMedios/Documentos%20PDF/calzadochina.pdf

con el 21 y 18%, respectivamente, y después la provincia de Shandong, con el 7% en total.

Ilustración 3. Países productores de calzado en Asia



Fuente: Para China datos tomados de Legiscomex (2006); para India, datos tomados de Export helpdesk (diciembre de 2016); para Vietnam, datos tomados de Italtrade (diciembre de 2016).

En la India existen casi 4,000 empresas constituidas principalmente por artesanos y microindustria; su capacidad productiva es de 1.8 millones de pares de zapatos anuales. Los dos clústeres del calzado están formados por el eje Delhi-Agra y Chennai-Ambur. Las tres principales empresas, de acuerdo con su producción en la India son: Bata India, Relaxo y Mirza; la primera tuvo una participación del 27.6% en 2009 (Export helpdesk, diciembre de 2016)²⁴.

Según Dussel (2016, p. 49)²⁵, Vietnam es considerado el país con el crecimiento más dinámico después de China, ya que su producción se mantiene por encima de su consumo; exportó 758 millones de pares, con un valor de 12,200 millones de dólares, en 2014. Cuenta con 1,300 empresas, aproximadamente, y casi 850,000 empleados; es decir, un promedio de 640 trabajadores por empresa.

²⁴ Export helpdesk. (Diciembre de 2016). Departamento de Comercio Exterior de la Comisión Europea, Export helpdesk. Recuperado de: http://exporthelp.europa.eu/thdapp/display.htm;jsessionid=52324AA89189D8F9F4658FCEF15E9BD0?page=st%2fst_Estadisticas.html&docType=main&languageId=es. Ahora Trade Helpdesk.

²⁵ Dussel, P. (2016). *Efectos del TTP en la cadena de valor del calzado mexicano/La industria del calzado en Vietnam*. México, CICEG-UNAM.

De las 819 empresas registradas para la producción de cuero y calzado en 2010, 28.7% eran parcial o completamente extranjeras, y 61.9% eran públicas. Más de la mitad de las exportaciones de calzado las realiza la empresa Nike (Dussel, 2016, p. 50)²⁶. También maquila otras marcas de fama mundial, como Reebok, Timberland, Clarks, Puma, etcétera (Italtrade, diciembre de 2016, p. 6)²⁷.

La mayoría de las industrias están situadas en el sur, en las regiones de Ho Chi Minh, Binh Duong y Dong Nai; y es en estas provincias donde se concentra la mayor producción del país. Al norte, las fábricas se ubican en Hai Phong y Hanoi, y 10 empresas están asentadas en la región central: Thua Thien Hue, Da Nang y Khanh Hoa. La industria del calzado en Vietnam contribuye con la tercera parte del PIB (Nguyen, T. 2009, p.11)²⁸.

I.2.2. La industria del calzado en Europa

Se considera a Italia como el principal productor de calzado de la Unión Europea, con el 33.4%, y el segundo exportador mundial. Las pequeñas y medianas empresas situadas en las regiones de Marcas, Toscana, Véneto, Lombardía, Campania y Apulia, representan el 93.4% de las empresas del país y concentran el 91.8% de los trabajadores. Sus distritos industriales están bien organizados (Ortiz, 2015, p. 11-13)²⁹. De acuerdo con Miranda (2005, p. 11-18)³⁰, las características de este modelo distrital son: su gran flexibilidad productiva, se adapta a los cambios en

²⁶ Dussel, P. (2016). Op. Cit.

²⁷ Italtrade. (Diciembre de 2016). Estudio de mercado italiano en Vietnam. Recuperado de: www.italtrade.com/countries/asia/vietnam/CON5_TONG_PRES_EN.pdf

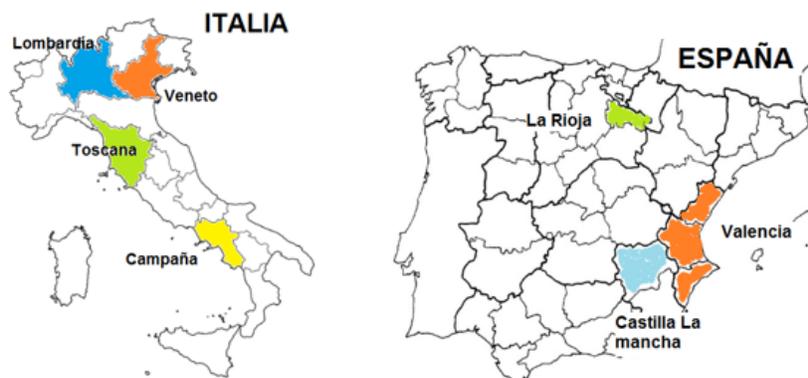
²⁸ Nguyen, T. (2009). *Leather and footwear industry in Vietnam: The labor markets and gender impact of the global economic slowdown on value chains*. Federal Ministry for Economic Cooperation and Development. Germany.

²⁹ Ortiz, L. (2015). Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Milán. *Ministerio de Economía, Industria y Competitividad*, Gobierno de España. Recuperado de: <http://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/estudios-de-mercados-y-otros-documentos-de-comercio-exterior/index.html>

³⁰ Miranda, J. (2005). Calzado y distritos industriales en el Mediterráneo: una visión de largo plazo. *Mediterráneo e Historia Económica*. núm. 7 de la Colección Mediterráneo Económico. Instituto de Estudios Socioeconómicos de Cajamar, España

la demanda, los costos de producción son reducidos y mantiene un alto estándar de calidad y moda, fortaleciendo así su imagen y su marca.

Ilustración 4. Países productores de calzado en Europa



Fuente: Para Italia, datos tomados de Ortiz (2015), Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Milán; para España, datos tomados de FICE (2011); Los retos futuros del sector calzado.

En España, la comunidad valenciana aporta el 65% de la producción nacional; en segundo lugar se encuentra la comunidad de Castilla-La Mancha, con el 10.6%; y en tercer lugar la comunidad de La Rioja, con el 7.8% (FICE, 2011, p. 13)³¹. Se tienen registradas 1,729 empresas (año 2009) y un promedio de 15.8 trabajadores por empresa (FICE, 2012, p. 14)³².

I.2.3. La industria del calzado en América

En Brasil existen un poco más de 8,000 empresas y arriba de 350,000 puestos de trabajo; su producción se dirige al mercado interno, con una manufactura casi artesanal (Kvaternik, 2014, p. 8-11)³³. El conglomerado industrial está localizado en el sur y sudeste del país, con un volumen de producción del 32.7 y 23.4%, respectivamente, sobre todo en las regiones de Rio Grande do Sur y São Paulo. El

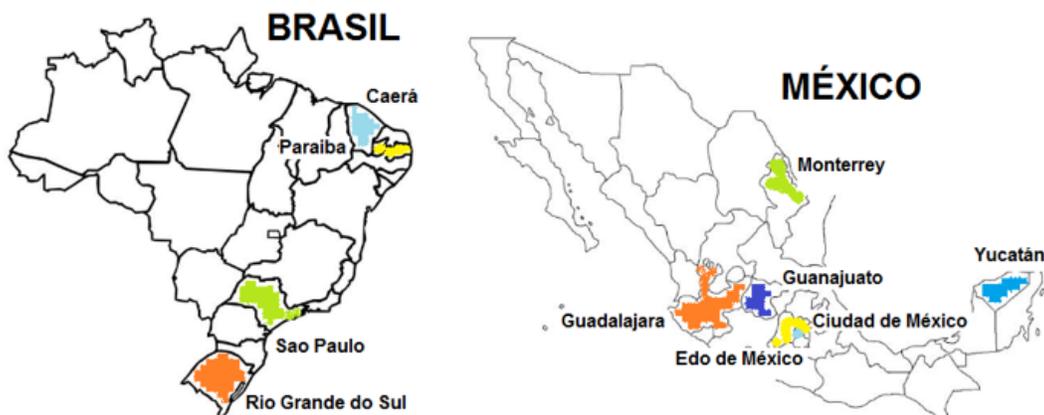
³¹ FICE. (2011). Horizonte 2015-2020. Los retos futuros del sector calzado. Federación de Industrias del Calzado Español. Recuperado de http://iies.es/wp-content/uploads/2016/05/horizonte_2015_2020__los_retos_futuros_del_sector_calzado_.pdf.

³² FICE. (2012). *Estudios de prospectiva sobre escenarios futuros para la industria del calzado a medio y largo plazo*. Federación de industrias del Calzado Español. Recuperado de http://www.clustercalzado.es/spa/ESCENARIOS%20Horizonte_DEF.PDF.

³³ Kvaternik, M. (2014). *El mercado de calzado en Brasil*. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Sao Paulo. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, Gobierno de España. Recuperado de <http://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/estudios-de-mercados-y-otros-documentos-de-comercio-exterior/index.html>

otro sector con grandes empresas está ubicado al noreste de Brasil, y representa el 43.3%; incluye Ceará, Bahía y Paraíba Campina Grande (Abicalçados, mayo de 2017)³⁴.

Ilustración 5. Países productores de calzado en América



Fuente: Para Brasil, datos tomados de Abicalçados; para México, datos tomados de INEGI (2014).

Según el INEGI (2014, p. 10)³⁵, en México la industria de calzado se encuentra concentrada en ocho municipios del país; éstos representan el 85.4% de la producción total y son:

- 1) León (Guanajuato) con el 57.8%
- 2) Guadalajara (Jalisco) con el 10%
- 3) San Francisco del Rincón (Guanajuato) con el 6.7%
- 4) Purísima del Rincón (Guanajuato) con el 3.9%
- 5) Zapopan (Jalisco) con el 3.1%
- 6) Iztapalapa (Ciudad de México) con el 1.4%
- 7) Toluca (Estado de México) con el 1.35%
- 8) San Mateo Atenco (Estado de México) con el 1.2%

³⁴ Abicalçados. (Mayo 2017). Associação Brasileira das Indústrias de Calçados. Recuperada de <http://www.abicalcados.com.br/>.

³⁵ INEGI. (2014). Op. Cit.

El estado del país que más calzado produce es Guanajuato, los municipios de León, San Francisco del Rincón y Purísima del Rincón suman el 68.4% nacional (INEGI, 2014, p. 9)³⁶. La producción asciende a 175 millones de pares, con 3,394 unidades económicas y 160,000 empleos directos e indirectos; la participación en el PIB a nivel nacional es del 0.43%, a nivel estado representa el 6.30% y a nivel municipal es del 17% (CICEG, 2015, p. 1)³⁷. Los principales productos son el zapato de piel para caballero y niño, la bota y el tipo industrial.

La segunda región del país con mayor producción de calzado es Jalisco; los mini talleres y picas familiares generalmente trabajan para las grandes empresas que se concentran en Zapopan y Guadalajara (CICEJ, 15 de febrero de 2013, p. 1)³⁸. Estadísticas del INEGI (2014) muestran que la participación fue del 13.1%, a nivel nacional, con 546 unidades económicas y 13,963 empleos directos; su principal producto es el calzado para dama (Unión Jalisco, 15 de febrero de 2013, párr. 1)³⁹.

En Yucatán, Mérida y el municipio de Ticul tienen una participación importante en la elaboración de calzado: representan el 4.12% a nivel nacional, la producción se estima en 453,600 pares del calzado al año y ocupa un total de 1,992 empleados en el sector, que son el 27.5% de todas las personas económicamente activas en la ciudad; aunque no es considerada por el INEGI (Martín, Parra & Navarrete, 2015, p. 8-9)⁴⁰.

En el Estado de México, destacan el municipio de San Mateo Atenco y Toluca; su participación es del 2.5% nacional, con 1,343 unidades económicas y 7,864 empleos directos. Su producción fue de 651 millones de pesos en 2014 (INEGI, 2014, p. 10)⁴¹.

³⁶ INEGI. (2014). Op. Cit.

³⁷ CICEG. (2015). Cámara de la Industria del Calzado del estado de Guanajuato, sector datos. Recuperado de www.ciceg.org/pdf/sector_datos.pdf.

³⁸ Unión Jalisco. (15 de febrero de 2013). Jalisco provee el 80% del calzado que usan las mexicanas. *EL UNIVERSAL*. Recuperado de <http://archivo.unionjalisco.mx/articulo/2013/02/15/economia/guadalajara/jalisco-provee-80-del-calzado-que-usan-las-mexicanas>.

³⁹ CICEJ. (15 de febrero de 2013). Cámara de la Industria del Calzado en el estado de Jalisco.

⁴⁰ Martín, Parra y Navarrete. (2015). *La industria del calzado de Ticul, un panorama hacia la competitividad*. 20º Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional de México. Cuernavaca, Morelos. AMECIDER CRIM UNAM.

⁴¹ INEGI. (2014). Op. Cit.

Otros sitios manufactureros son Ciudad Juárez, Chihuahua, en donde son especialistas en bota vaquera; Monterrey, Nuevo León, donde manufacturan zapato industrial (Iglesias, 1998, p. 27)⁴²; y el barrio de Tepito, en la Ciudad de México, con talleres de calzado diverso (Jarquín, M. 1994)⁴³.

⁴² Iglesias, E. (1998). Op. Cit.

⁴³ Jarquín, M. (1994). *La Producción de Calzado en Tepito*. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias de Humanidades, Coordinación de Humanidades, UNAM.

I.3. La economía en cuestión de calzado

En la actualidad el máximo productor de calzado es China y el mayor maquilador es Vietnam; hay otras industrias de calzado importantes, como la brasileña, que abastece a su gran mercado local, y la mexicana, que es totalmente dependiente del mercado norteamericano. A continuación, en la Tabla 1, se muestran las estadísticas de los principales países productores de calzado, y por supuesto se le da un mayor énfasis a México.

I.3.1. La comercialización del calzado en el mundo

Según Dussel (2016, p. 21)⁴⁴, el principal productor de calzado es China, con 15,700 millones de pares, le sigue la India y Vietnam; México ocupa el noveno sitio, con 245 millones de pares.

Tabla 1. Países productores de calzado (pares)

LUGAR	PAÍS	2010	2013	2014
1	CHINA	12,597	14,200	15,700
2	INDIA	2,060	2,015	2,065
3	VIETNAM	760	770	910
4	BRASIL	894	900	900
5	INDONESIA	658	700	724
9	MÉXICO	244	245	245
10	ITALIA	203	202	197
36	EU	25	30	29

Fuente: Dussel P. (2016), considerando calzado en general, p. 21. (cifras en millones)

⁴⁴ Dussel, P. (2016). Op. Cit.

China es el primer consumidor de calzado en el mundo, con 3,646 millones de pares, le sigue Estados Unidos, con 2,295 millones y la India con 2,048 millones durante el 2014 (Dussel, 2016. p. 21)⁴⁵.

Tabla 2. Países consumidores de calzado (pares)

LUGAR	PAÍS	2010	2013	2014
1	CHINA	2,700	3,678	3,646
2	EU	2,335	2,285	2,295
3	INDIA	2,034	2,068	2,048
4	BRASIL	780	816	807
5	JAPÓN	693	674	607
8	ALEMANIA	385		435
13	MÉXICO	283	304	318
22	VIETNAM	70	145	183

Fuente: Dussel, P. (2016), p. 21. (cifras en millones)

De acuerdo con los datos de Dussel, China exporta el equivalente a 53,837 millones de dólares, lo cual representa el 40.5%; México exporta 572 millones de dólares anuales, y ocupa el lugar 26 entre los países exportadores de calzado.

Tabla 3. Países exportadores de calzado (millones de dólares)

LUGAR	PAÍS	2010	2013	2014
1	CHINA	33,665	48,145	53,837
2	VIETNAM	4,224	10,030	12,200
3	ITALIA	8,755	10,722	11,138
4	BÉLGICA	3,717	4,688	5,566
5	ALEMANIA	3,444	4,446	5,166
7	HONG KONG	5,244	4,848	4,014
18	BRASIL	1,487	1,095	1,067
26	MÉXICO	329	593	572

Fuente: Dussel, P. (2016), p. 21.

⁴⁵ Dussel, P. (2016). Op. Cit. p. 21.

Estados Unidos es el país que más calzado importa, con 26,595 millones de dólares, lo que representa el 21.8%; le sigue Alemania, con 8.2%; Francia, con 6.1% y el Reino Unido con 5.8%. En el caso de México, ocupa el lugar 21 (Dussel, 2016, p. 21)⁴⁶.

Tabla 4. Países importadores de calzado (millones de dólares)

LUGAR	PAÍS	2010	2013	2014
1	EU	21,531	25,317	26,595
2	ALEMANIA	6,815	8,825	10,028
3	FRANCIA	5,802	6,807	7,437
4	REINO UNIDO	5,529	6,314	7,110
5	ITALIA	4,928	5,092	5,504
14	HONG KONG	4,676	4,569	4,288
21	MÉXICO	583	861	963
41	VIETNAM	20	203	389

Fuente: Dussel, P. (2016), p. 21.

I.3.2. El comercio de calzado en México y América Latina

Este apartado se subdivide en dos partes: la primera se refiere a los principales socios comerciales de México y el mundo, y en la segunda parte se menciona el comercio de nuestro país con los países latinoamericanos por su cercanía.

I.3.2.1. Los socios más importantes para México

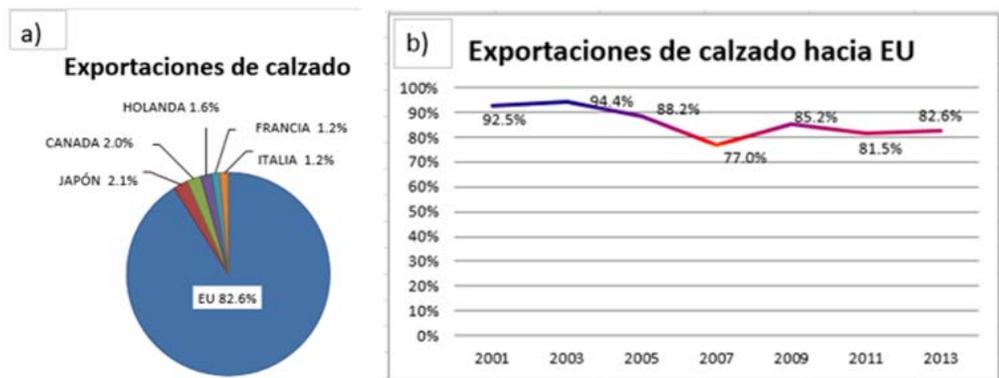
De acuerdo con datos del INEGI (2014)⁴⁷, el principal mercado es Estados Unidos, ya que absorbe 82.6% de la producción, le sigue Japón con 2.1%, Canadá con 2.0%, Holanda con 1.6%, Francia con 1.2% e Italia con 1.2%, ver la ilustración siguiente, inciso a). Cabe resaltar que las exportaciones de calzado hacia Estados

⁴⁶ Dussel, P. (2016). Op. Cit.

⁴⁷ INEGI. (2014). Op. Cit.

Unidos han disminuido gradualmente desde el año 2002, pues México pasó de ser el primer socio comercial al segundo lugar, ver inciso b.

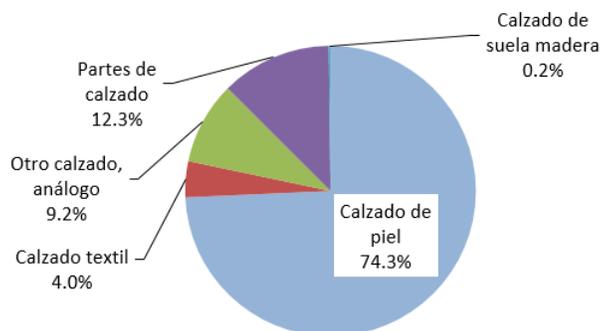
Ilustración 6. Exportaciones mexicanas de calzado y su tendencia



Fuente: INEGI (2014).

La partida de calzado que más se exporta es la de piel, pues representa el 74.3% de la producción, le sigue el calzado de hule o plástico con el 9.2% y al último el calzado textil con el 4.0% (INEGI, 2014, p. 20)⁴⁸.

Ilustración 7. Rubros de calzado que se exportan

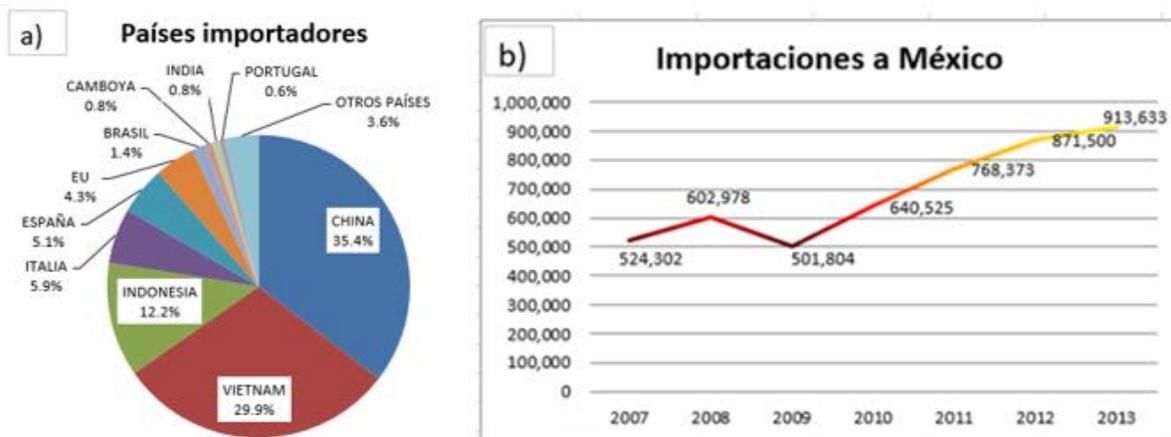


Fuente: INEGI (2014).

⁴⁸ INEGI. (2014). Op. Cit.

Las principales importaciones de calzado hacia México provienen sólo de tres países, que en su conjunto representan el 77.5%, y son: China, con el 35.4%, Vietnam con el 29.9% e Indonesia con 12.2%, ver la ilustración siguiente, inciso a). El monto de las importaciones hace que la balanza comercial sea deficitaria, ver el inciso b, (INEGI 2014, p. 23, 25)⁴⁹.

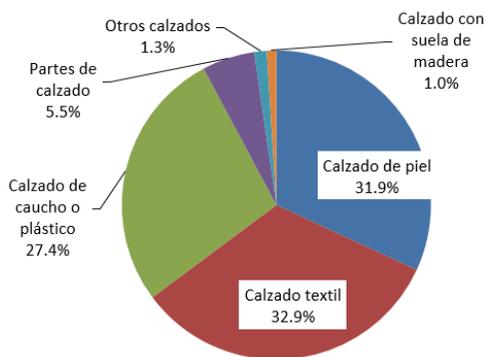
Ilustración 8. Países que importan calzado a México y su tendencia



Fuente: INEGI (2014).

Las partidas de calzado que más se importan a México son: textil, con 32.9%, le sigue la piel, con 31.9%, y por último de caucho o plástico, con 27.4% (INEGI 2014, p. 24)⁵⁰.

Ilustración 9. Rubros de calzado que se importa a México



Fuente: INEGI (2014).

⁴⁹ INEGI. (2014). Op. Cit.

⁵⁰ INEGI. (2014). Op. Cit.

I.3.2.2. El comercio de calzado entre México y América Latina

El volumen de venta con latinoamerica no se compara con lo que vende a nivel mundial, por lo que es preciso ubicar a México en otro contexto.

El 31.79% de las exportaciones mexicanas están dirigidas a Panamá (71.88 millones de dólares), le sigue Cuba, con 42.61 millones de dólares y Colombia con 30.82 millones de dólares (ALADI, 2016)⁵¹.

Tabla 5. Exportaciones de calzado y productos análogos mexicanos a América Latina

PAÍS	Datos en millones de dólares															TOTAL ACUMULADO	PORCENTAJE	
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014			
ARGENTINA	0.1	-	-	0.0	-	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1	1.0	0.0	1.49	0.66%	
BOLIVIA	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.7		1.61	0.71%	
BRASIL	-	0.0	0.1	0.0	-	0.0	0.1	0.3	0.2	1.4	3.7	5.6	8.2	3.1	1.9	24.47	10.82%	
CHILE	5.1	1.5	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2	0.3	0.7	0.3	2.3	2.9	14.90	6.59%	
COLOMBIA	0.3	0.5	0.5	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.8	0.5	1.4	2.7	4.0	8.0	10.4	30.82	13.63%	
CUBA	3.7	2.6	1.1	1.5	0.5	3.3	2.4	2.3	3.4	3.1	1.8	4.1	4.3	3.8	4.6	42.61	18.84%	
ECUADOR	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.3	0.6	0.1	0.2	0.4	2.40	1.06%	
PANAMÁ	2.2	0.5	1.1	0.6	0.4	0.1	0.5	46.3	1.9	4.2	0.9	2.5	3.4	4.0	3.4	71.88	31.79%	
PARAGUAY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.1	0.0	0.2	0.5	0.81	0.36%	
PERU	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.7	0.5	0.3	0.3	0.5	0.6	0.4	4.23	1.87%	
URUGUAY	0.0	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.1	0.2	0.7	1.6	5.3	7.90	3.49%	
VENEZUELA	0.5	0.7	0.2	0.4	0.3	1.3	2.3	2.9	4.4	1.6	0.7	2.4	2.2	1.5	1.5	23.02	10.18%	
																TOTAL	226.12	100%

Fuente: ALADI (2016).

De acuerdo con los datos de ALADI (2016), las importaciones que llegan a nuestro país provienen principalmente de Brasil, con el 85.93% (552.74 millones de dólares), le sigue Colombia con 7.34% y Chile con 3.68%⁵².

⁵¹ ALADI. (2016). *Asociación Latinoamericana de Integración*. (Página web). Recuperado de <http://www.aladi.org/sitioAladi/paisesMiembros.html>

⁵² ALADI. (2016). Op. Cit.

Tabla 6. Importaciones de calzado y productos análogos de América Latina hacia México

PAÍS	Datos en millones de dólares															TOTAL ACUMULADO	PORCENTAJE	
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014			
ARGENTINA	0.3	-	0.3	0.4	0.5	0.5	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	0.2	0.1	3.46	0.54%	
BOLIVIA	0.2	0.1	-	-	-	0.1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	-	0.1	1.46	0.23%	
BRASIL	10.2	28.2	50.9	69.5	77.4	71.8	55.6	44.4	41.2	22.1	20.0	18.1	15.9	12.9	14.6	552.74	85.93%	
CHILE	2.0	1.3	2.1	1.7	1.2	1.4	2.4	2.7	2.4	1.6	1.7	1.4	1.4	0.3	0.1	23.66	3.68%	
COLOMBIA	1.1	0.8	1.2	3.9	5.3	6.3	4.3	3.0	3.1	3.5	2.6	4.8	2.9	2.8	1.8	47.24	7.34%	
CUBA	-	0.0	-	0.0	-	-	-	-	0.0	-	-	-	-	-	-	0.01	0.00%	
ECUADOR	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	-	0.0	-	0.20	0.03%	
PANAMÁ	0.0	0.1	-	-	-	-	-	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.48	0.07%	
PARAGUAY	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-	-	-	0.0	-	0.0	-	0.04	0.01%	
PERU	-	-	-	-	-	1.3	1.4	0.6	0.9	1.3	1.7	1.8	1.1	1.6	1.3	13.02	2.02%	
URUGUAY	0.0	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.86	0.13%	
VENEZUELA	0.1	-	-	-	0.0	-	-	0.0	0.0	-	-	0.0	-	-	0.0	0.07	0.01%	
																TOTAL	643.25	100%

Fuente: ALADI (2016).

Capítulo II. La horma y sus implicaciones

En el capítulo anterior se mencionó la evolución que tuvo el calzado a lo largo de los años, mostrando que países son innovadores y quienes son productores; Ahora toca el turno de hablar de la horma, remontándose más atrás en el tiempo, es difícil determinar el momento exacto en que se inventa una; sin embargo, su creación es sin duda, el resultado de perfeccionar año tras año el arte de hacer calzado. La horma sustituyó al pie como un molde rígido y se convirtió como parte esencial en el taller del artesano y en la producción en fábrica.

En este capítulo se expone la importancia y función de la horma, sus partes principales, los diferentes tipos que existen, sus procesos de fabricación; así como las distintas tallas en el mundo y los sistemas de diseño que a criterio son los más importantes.

II.1. El objeto de la horma

Según el Oxford Dictionary of English, la palabra *last* (horma) se deriva del inglés antiguo *læste*, que significa “seguir” (Morgan, 2015, p. 40)⁵³. Actualmente se le conoce como *shoe last* en idioma inglés. En este subcapítulo se verá a detalle el objeto de la horma, cómo se elabora y las partes principales hasta llegar a los 35 parámetros.

II.1.1. Su función

En su *textbook*, Thorton (1953, p. 26)⁵⁴, afirma que para hacer un zapato de una forma específica, es necesario construirlo gradualmente en un molde, llamado horma. Hoy en día, éstas son de madera (arce), de aluminio, y anteriormente se fabricaban en hierro. La imagen más antigua de una horma data de 1688; sin embargo, se cree que existieron muchos años antes.

II.1.2. Partes principales de una horma

En sus inicios, la horma era un secreto de un artesano especialista, el cual se perdía con la muerte de la persona. La información para elaborar estas hormas respondió a varias escuelas e iniciativas de las cuales, no se tiene en texto alguno; sin embargo, a través de los años esta información fue necesario ordenarla y difundirla hasta cierto punto.

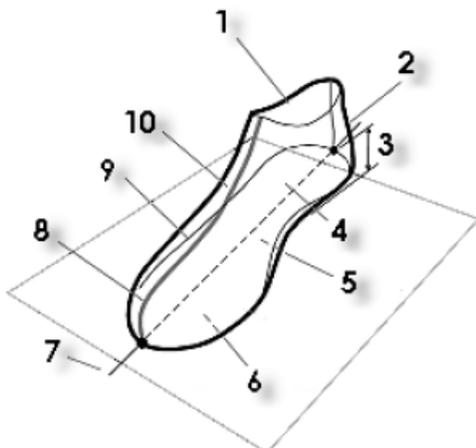
A continuación, mencionaremos la contribución que algunas instituciones, especialistas y/o fabricantes comparten con el mundo. El Instituto de Biomecánica de Valencia, en conjunto con Mcneel & Associates (2005), quienes se unieron con

⁵³ Morgan, S. (Noviembre 2015). The development of the shoemaking last. *Satra bulletin*. UK. Recuperado de: <https://www.satrapublications.com/bulletin/article.php?id=1563>.

⁵⁴ Thornton. (1953). *Textbook of footwear manufacture*. The National Trade Press. Great Britain.

finés comerciales para ofrecer un software que facilita el diseño de la horma, han establecido sus principales partes para su reconocimiento e identificación.

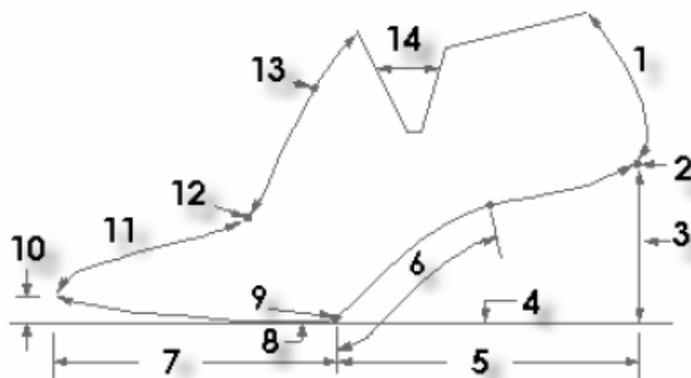
Ilustración 10. Las partes principales de la horma



Fuente: Institute of biomechanics of Valencia and Robert Mcneel & Associates (2015).⁵⁵ Partes de una horma: línea superior (1), talón (2), elevación del talón (3), superficie lateral interior (4), zona de ruptura (5), suela (6), eje de horma (7), dedo del pie (8), curva única (9), superficie lateral exterior (10), p. 6.

En la siguiente ilustración con el perfil de la horma se señalan las curvas más importantes con su respectiva descripción.

Ilustración 11. El perfil de la horma

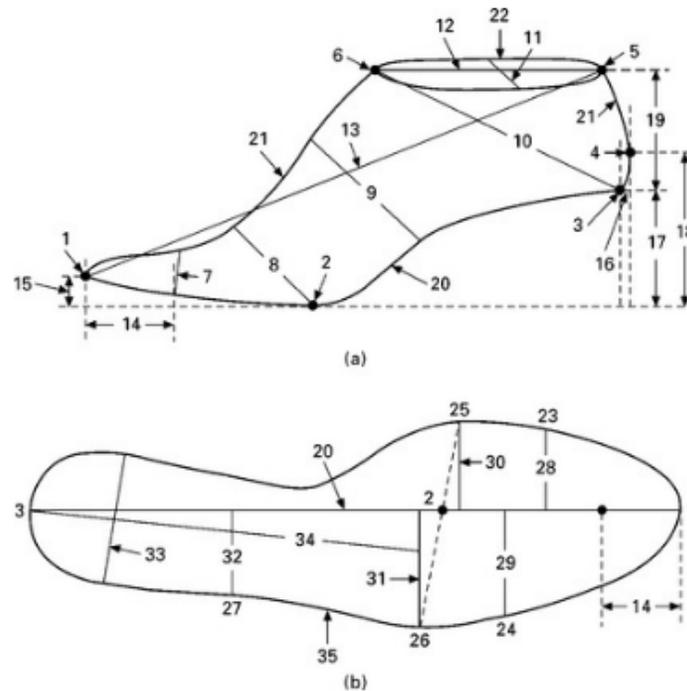


Fuente: Institute of biomechanics of Valencia and Robert Mcneel & Associates (2005). p. 7. Descripción: curva de talón (1), punto de talón (2), elevación de talón (3), plano de base (4), parte posterior (5), curva de vástago (6), parte anterior (7), punto de rodadura (8), rotura de pelota (recio) (9), puntera de resorte (10), longitud de vamp (11), punto de vamp (12), punto de pique (13), corte en v (14), p. 6.

⁵⁵ Institute of biomechanics of Valencia and Robert Mcneel & Associates (2005). *Shoe design and visualization*. Trabajo Recuperado de <https://es.scribd.com/document/24449481/Rhinoceros-Advanced-Training-Series>.

Por su parte, Luximon (2013, p. 205)⁵⁶, señala en su libro que se pueden encontrar hasta 35 partes en una horma, todas relacionadas con el ajuste del calzado. A continuación, se enumeran cada una en la siguiente ilustración.

Ilustración 12. Los 35 parámetros de una horma



Fuente: Luximon, A. (2013), p. 205.⁵⁷

- 1) Punto delantero central, desde el punto de intersección de la línea superior e inferior.
- 2) Superficie de soporte inferior (punto de rodadura), base del dedo donde toca al suelo primero y es la intersección del eje longitudinal y la línea que va de los puntos 25 y 26.
- 3) Punto posterior de la horma, también llamado punto central del talón sobre el eje longitudinal de la horma.
- 4) Máximo punto de la curvatura del talón.
- 5) Punto posterior del talón de la línea superior.
- 6) Punto anterior de la línea superior (abertura).
- 7) Altura del dedo gordo del pie.

⁵⁶ Luximon, A. (2013). *Handbook of footwear design and manufacture* (The textile institute). Woodhead Publishing, UK.

⁵⁷ Luximon, A. (2013). Op. Cit.

- 8) Circunferencia del recio (circunferencia del contorno de los metatarsianos).
- 9) Circunferencia del empeine a través del punto de cintura (27).
- 10) Circunferencia del talón a través del punto anterior (6) y el punto posterior (3).
- 11) Ancho de la línea superior (abertura).
- 12) Longitud de la línea superior.
- 13) Longitud desde el dedo del pie (1) hasta el punto posterior de la línea superior del talón (5).
- 14) Tolerancia longitudinal de los dedos.
- 15) Resorte del dedo, es la altura desde el plano de la tierra hasta el punto 1 de la horma.
- 16) Cámara alrededor del talón, distancia entre el punto 3 y el 4.
- 17) Elevación del talón desde el plano de la tierra hasta el punto 3.
- 18) Altura del talón desde el plano de la tierra hasta el máximo punto del talón (4).
- 19) Altura de la espalda del talón desde el punto 3 hasta el punto 5.
- 20) Eje longitudinal de la parte inferior de la horma.
- 21) Línea curva desde la parte delantera de abajo de la horma (1) hasta el punto anterior de la línea superior (6).
- 22) Línea superior de la abertura.
- 23) Punto de contacto del dedo gordo del pie.
- 24) Punto de contacto del dedo pequeño del pie.
- 25) Primera falange metatarsiana del pie.
- 26) Quinta falange metatarsiana del pie.
- 27) Punto de cintura que corresponde a la saliente de la base del quinto metatarsiano del pie.
- 28) Ancho del dedo gordo del pie desde el punto de contacto (23) al eje longitudinal.
- 29) Ancho del dedo pequeño del pie desde el punto de contacto (24) hasta el eje longitudinal.

- 30) Ancho de la primera falange metatarsiana del pie del punto de contacto (25) al eje longitudinal.
- 31) Ancho de la quinta falange metatarsiana del pie del punto de contacto (26) al eje longitudinal.
- 32) Ancho exterior de la cintura desde el punto 27 al eje longitudinal del pie.
- 33) Ancho del talón.
- 34) Línea bisectriz del talón.
- 35) Contorno del pie.

II.2. Los sistemas de diseño

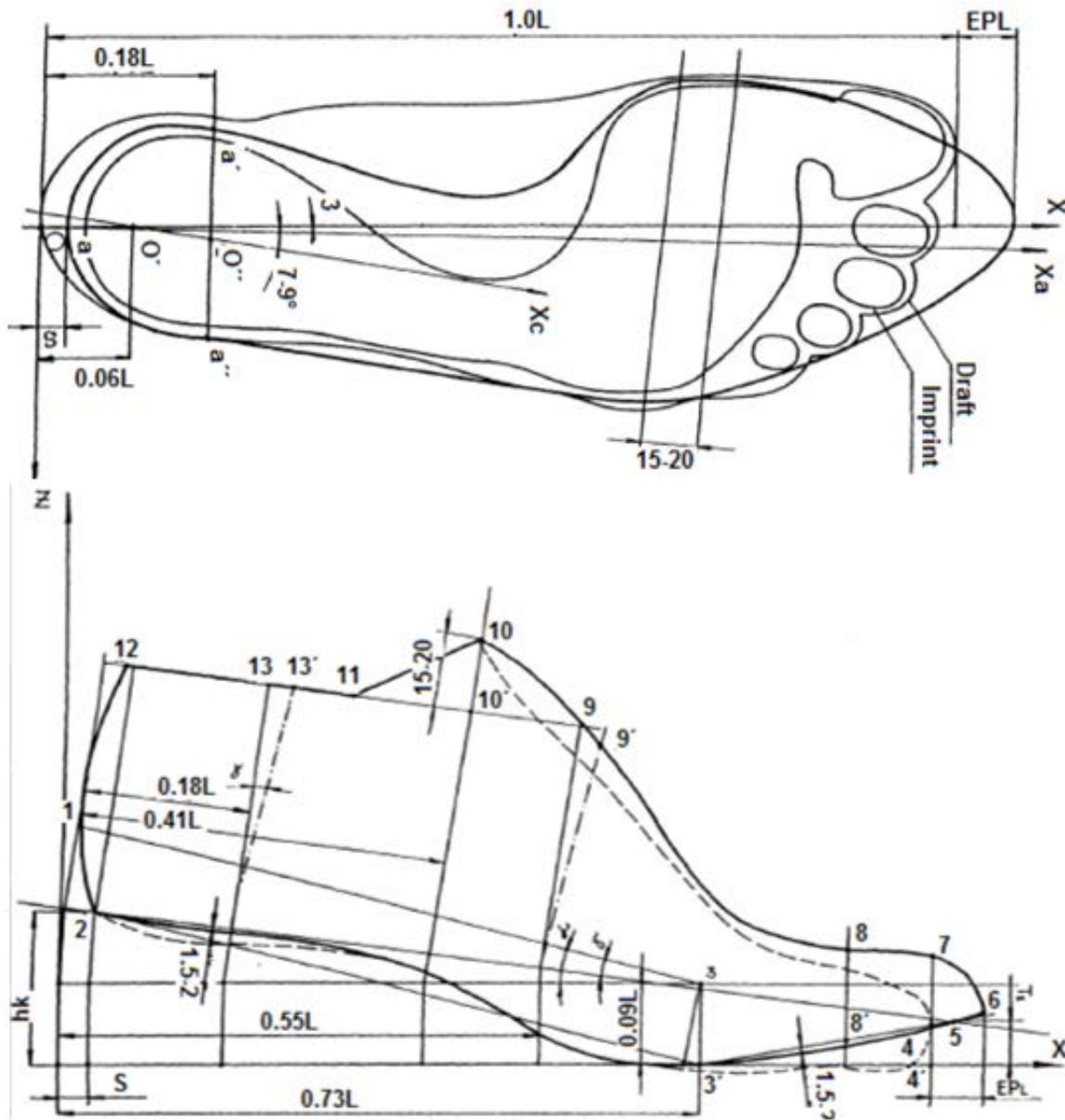
A través de los años, en todo el mundo, expertos zapateros, especialistas en ortopedia e investigadores se han dado a la tarea de encontrar y posteriormente refinar ciertos lineamientos que guíen la elaboración del calzado. Hay dos sistemas muy importantes, que son el sistema alemán WMS-AKA64 y el sistema ruso, que a través de estudios estadísticos poblacionales, establecieron ciertas constantes que determinan parámetros muy específicos en función de la longitud del pie. Cada uno por separado ha sido el resultado de exhaustivas investigaciones en el campo mencionado para diseñar dicha horma.

II.2.1. Sistema ruso

El sistema ruso de diseño está normalizado por la Footwear Last. Russian State Standard No. 3927-88, 1990. A continuación, se muestra el plantograma que es parte de una técnica para bosquejar el pie y establecer la huella, todo sobre un plano XY, donde el eje OXa (eje del pie) es paralelo al eje X (Gordeyeva, 1998, p. 145)⁵⁸.

⁵⁸ Gordeyeva, O. (1998). *3D Numerical modelling and manipulation of a shoe last* (Tesis doctoral, De Montfort University in collaboration with Saint-Petersburg State University of Technology and Design, UK). Recuperado de: https://www.dora.dmu.ac.uk/bitstream/handle/2086/10741/3D_numerical_modelling_and_manipulation_of_a_shoe_last.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Ilustración 13. La planta y el perfil en la horma



Fuente: Gordeyeva, O. (1998). a) Patrón de la planta y b) El perfil de la horma, p. 148 y 154.

La siguiente tabla muestra los parámetros más significativos para calcular y localizar en el bosquejo de la horma; no solamente involucra a la planta del pie; también la circunferencia del recio.

Tabla 7. Parámetros principales en el sistema ruso

#	PARÁMETRO	CONSTANTE POR LA LONGITUD DEL PIE (L)
MEDIDAS DE LONGITUD		
1	Longitud del pie	1L
2	Longitud hasta el 5º dedo	0.8L
3	Longitud del recio medial	0.73L
4	Longitud del recio lateral	0.62L
5	Longitud al punto del empeine	0.42L
6	Centro del tobillo interno	0.26L
7	Centro del tobillo externo	0.20L
8	Punto central del talón	0.18L
MEDIDAS DE AMPLITUD		
9	Ancho del recio lateral	0.62L
10	Ancho del recio medial	0.73L
11	Ancho del asiento	0.18L
MEDIDAS DE ALTURA		
12	Al dedo gordo	0.9L
13	Mitad del pie	0.5L
MEDIDAS DE CIRCUNFERENCIA		
14	Circunferencia del recio lateral	0.62L
15	Circunferencia del recio medial	0.72L
16	Circunferencia del empeine	0.55L

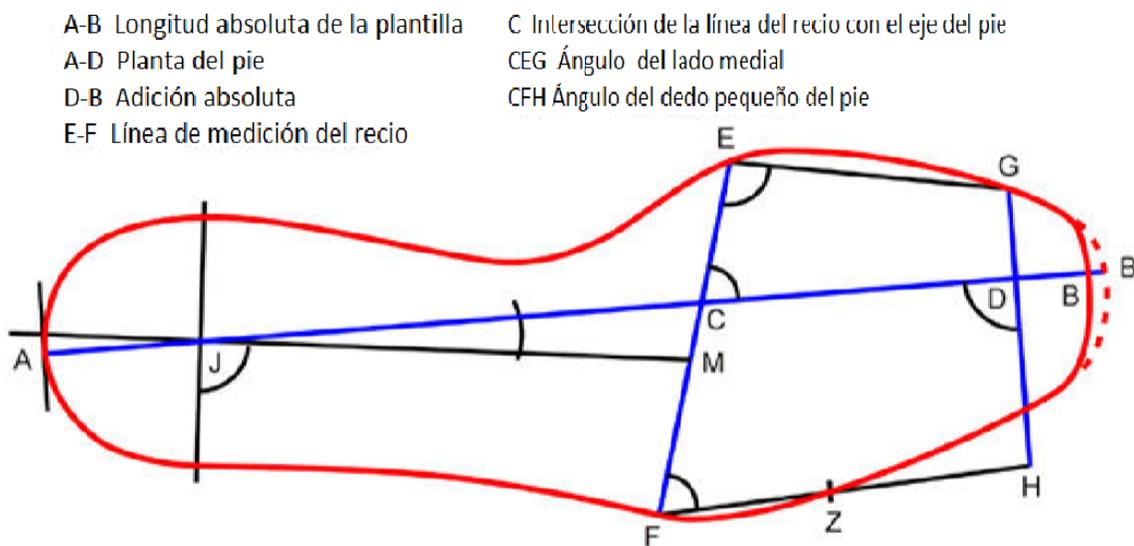
Fuente: Gordeyeva, O. (1998), p. 144-145.

II.2.2. Sistema WMS-AKA64

El sistema WMS (AKA64) se creó en Alemania y se consolidó hasta 1964, mediante un proceso gradual de estandarización junto con la industria y el comercio del calzado. El propósito fue crear un producto que cumpliera con el requisito médico de no afectar los pies de niños y jóvenes. La estructura y los aspectos técnicos persisten hasta nuestros días (Mauch, M., 2007, p. 35)⁵⁹.

Enseguida se mencionan los requisitos de diseño más importantes apoyado en el contorno de la base de la horma, según WMS: AB, longitud de la plantilla; AD, longitud del pie; DB, adición en la longitud del pie; EF, ancho del recio; CEG, ángulo del 1er dedo; CFH, ángulo del 5º dedo.

Ilustración 14. Contorno de la plantilla, sistema WMS



Fuente: (Mauch, M., 2007), p. 36.

La siguiente tabla muestra los parámetros más importantes del sistema WMS-AKA64 y su respectivo valor.

⁵⁹ Mauch, M. (2007). *Kindliche Fußmorphologie* (Tesis doctoral), Technischen Universität Chemnitz, Dutschland.

Tabla 8. Parámetros del sistema WMS-AKA64

#	PARÁMETRO	VALOR
1	Longitud del pie AD	A calcular
2	Espacio para los dedos DB	15-18 mm para tallas > 31
3	Longitud al punto A desde C	63% de la longitud de plantilla
4	Longitud de C hasta B	37% de la longitud de plantilla
5	Ángulo C	74°
6	Ángulo E	96° para tallas de 27-35
7	Ángulo F	71° para tallas > 27
8	Longitud Z	80% de la longitud de AD
9	Ángulo CJM	6°

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de Mauch, M. (2007), p. 36-37.

II.3. La manufactura de la horma

A través de la historia se ensayaron varios materiales que fungían como parte de una horma; en fechas recientes, los materiales más utilizados para su fabricación han sido la madera, el acero y el aluminio. Para realizar hormas maestras y moldearlas a mano, la madera sigue siendo el material preferido para trabajos de personalización de alta clase o para obras de arte. Según Luximon (2013, p. 216)⁶⁰ las herramientas principales para su conformación son: limas, papel lija, plantillas, patrones, etcétera.

II.3.1. La horma de madera

Los criterios de Morgan (2015, párr. 3)⁶¹ al seleccionar la madera son los siguientes: un bloque libre de nudos; textura dura para evitar abolladuras y conservar bordes definidos; resistente para clavar pernos, tachuelas y remaches, además de

⁶⁰ Luximon, A. (2013). Op. Cit.

⁶¹ Morgan, S. (2015). Op. Cit.

conservar su pulido superficial y ser capaz de evitar la absorción de humedad, ver la ilustración siguiente.

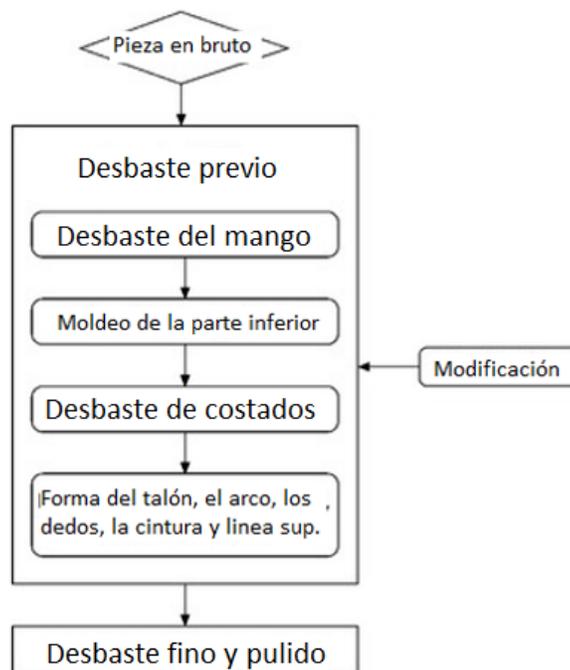
Ilustración 15. Elaboración de una horma de manera artesanal



Fuente: Morgan (2015), p. 40.

El siguiente diagrama de flujo muestra las etapas de la construcción de una horma.

Ilustración 16. Diagrama para elaborar una horma a mano



Fuente: Luximon (2013), p. 216.

II.3.2. La horma de aluminio

El aluminio para la fabricación de hormas se recomienda utilizarlo para el calzado vulcanizado, pues este material es resistente al calor, por lo que resulta ideal para la elaboración de botas de goma estilo Wellington. La horma es fabricada mediante el proceso de fundición de arena, con un corazón para generar productos huecos y su acabado superficial es a mano (*How shoe last are made*, 2017, párr. 5)⁶².

Ilustración 17. Acabado superficial de una horma de aluminio



Fuente: Imagen recuperada de internet (15 de marzo 2018) <http://sneakerfactory.net/sneakers/2017/11/how-shoe-lasts-are-made-2/>

II.3.3. La horma de PE

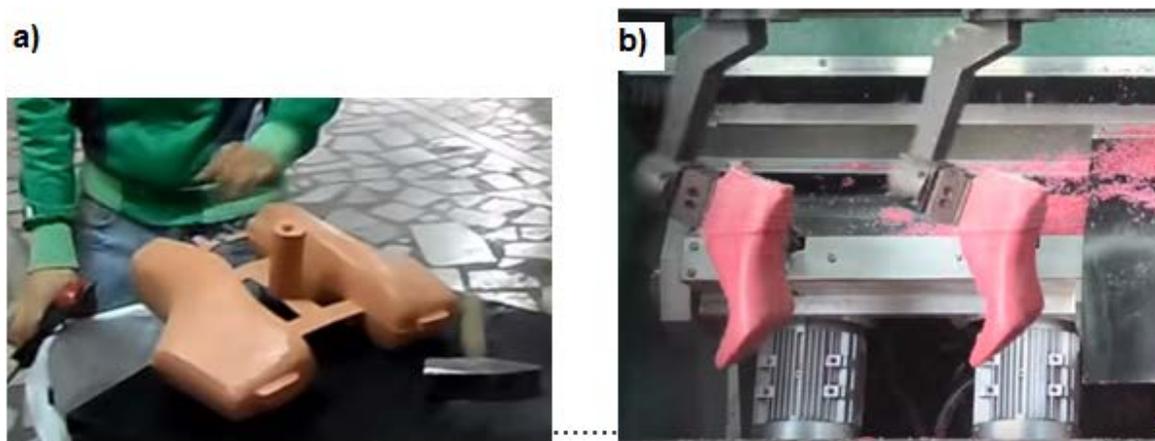
En la fabricación de hormas, se ha generalizado el uso del polietileno de alta y baja densidad. Las hormas en bruto obtenidas mediante el proceso de inyección, se desbastan hasta darle forma en máquinas de control numérico a gran velocidad, con un acabado preciso. Entre sus ventajas se encuentran la durabilidad y la resistencia a la humedad (*How shoe last are made*, 14 de noviembre de 2017, párr. 4)⁶³.

⁶² *How shoe last are made*. (14 de noviembre de 2017). *How shoes are made: The sneaker factory*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://sneakerfactory.net/sneakers/2017/11/how-shoe-lasts-are-made-2/>

⁶³ *How shoe last are made*. (14 de noviembre de 2017). Op. Cit.

A continuación, se presentan imágenes obtenidas de videos diferentes para ejemplificar parte del proceso de conformado de una horma plástica. En la siguiente figura, inciso a) se observa un par de hormas después de haber sido desmoldada de la matriz y en el inciso b) la horma es maquinada hasta lograr su acabado final.

Ilustración 18. Extrusión y maquinado de una horma de plástico

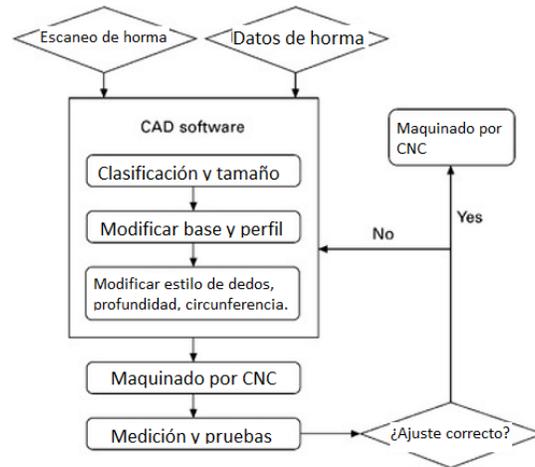


Fuente: a) Extrusión de horma Imagen recuperada de video: Mülayim, V. (6 de febrero de 2014). *Plastic shoe last injection wedge, mass, block footwear manufacturer Turkey* (video). De www.youtube.com/watch?v=hRCfKgYrpCM. b) Maquinado de horma en CNC, imagen recuperada de video: Schle Group (24 de septiembre 2014). *SL-PLM4: 5AS complete shoe last finishing machine SL-PLM415* (video). De www.youtube.com/watch?v=_jTpWhrAuYA&t=27s

El conformado moderno es a partir de una horma maestra, que es escaneada y modelada en 3D por medio de la computadora, esto facilita cambiar ciertos parámetros del diseño con un *software* especializado y posteriormente realizar las copias en máquinas de control numérico (Luximon 2013, p. 219)⁶⁴.

⁶⁴ Luximon, A. (2013). Op. Cit.

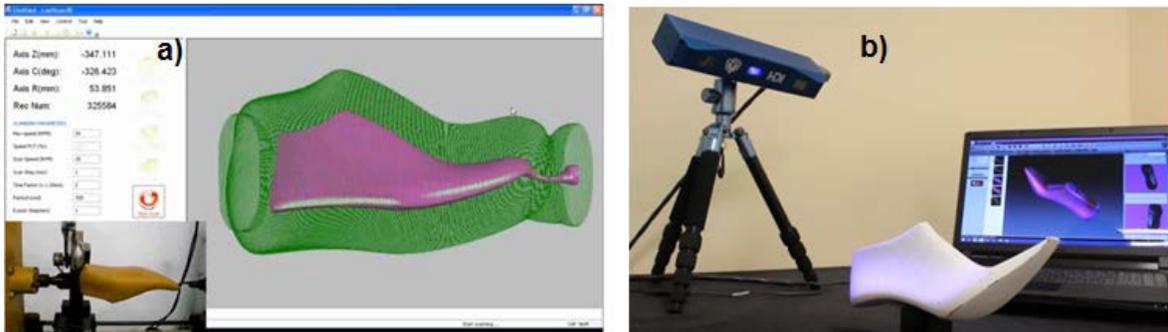
Ilustración 19. Proceso moderno para la elaboración de una horma



Fuente: Luximon, A. (2013), p. 219.

Como se mencionó anteriormente, la tecnología en *software* y el escáner son parte fundamental en la digitalización en 3D de la horma. Hasta el momento hay dos tecnologías para efectuar el escaneo, una es por medio de luz estructurada y la otra por rayo láser⁶⁵.

Ilustración 20. Tipos de escaneo de una horma



Fuente: a) Imagen recuperada de: Minh MA Voung Ha (3 de julio de 2010). *Shoelast 3D Scanner - LASTSCAN3D - Máy chép hình 3D*. (video). De https://www.youtube.com/watch?v=YhKqNQTq6_0; b) Imagen recuperada de: ThinkScan3D (22 de julio de 2014). *Compact 3D scanner for Shoe makers. BLUE LED technology* (video). De <https://www.youtube.com/watch?v=15XYM6oT5gg>

⁶⁵ El escaneo en 3D sin contacto se divide en dos grandes tipos; el rayo láser y la luz estructurada, la primera consiste en proyectar un haz de rayo láser sobre el objeto de interés y a su vez el haz de vuelta es capturado por un sensor, dicha triangulación obtiene las coordenadas 3D de la superficie del objeto y para el segundo tipo se proyecta una serie de patrones de luz que son vistos por cámaras, estos llevan palabras codificadas asignados a los píxeles de la imagen por lo cual hay un mapeo de las coordenadas correspondientes, al haber una deformación en el patrón de la imagen ayuda en configurar la nube de puntos.

II.4 Las diferentes tallas en el mundo

Al irse consolidando la industria del calzado, diversos fabricantes se dieron cuenta que para algunos clientes la horma del calzado no es más adecuada, y como se mencionó anteriormente, “la horma es el molde que reemplaza al pie para la fabricación de calzado”, por lo que se dieron a la tarea de establecer distintos anchos para una misma talla de horma; además, de cierta inconsistencia en utilizar dos sistemas de medición, el sistema inglés y el sistema métrico decimal.

En 1688 el genealogista británico Randle Holme, publicó en *The Academy of Armory and Blazon* el primer sistema de medición del calzado en el cual se había acordado ante un gremio de zapateros una escala común basada en un cuarto de pulgada por cada talla; posteriormente, en 1856, en Londres, Robert Gardiner publicó *The illustrated hand book of the foot*, en donde sugirió que los tamaños fueran de un tercio de pulgada; más tarde, en 1880, Edwin B. Simpson, de Nueva York, presentó un sistema completo de medición, que en 1888 fue adoptado oficialmente por la industria del calzado y por los británicos (Sterling Last Corporation, sin fecha, p. 5)⁶⁶.

En este contexto se desarrollaron diferentes sistemas de medición para la fabricación de calzado, obedeciendo a la necesidad de una producción en serie. Entre éstos, se encuentra el ya mencionado sistema inglés (*size*), el sistema alemán, el sistema norteamericano, el sistema métrico Mondopoint y el sistema francés (Barreto, 2006, p. 63)⁶⁷.

⁶⁶ Sterling Last Corporation (sin fecha). *The true story of shoe sizes*. Long Island City, NY.

⁶⁷ Barreto, S. (2006). *Diseño de calzado urbano*. Buenos Aires: Editorial Nobuko.

II.4.1. Escala inglesa

De acuerdo con Thornton (1953, p. 57)⁶⁸, la escala se divide en dos, una escala para niños que va de 0 a 13 (4 a 8 $\frac{1}{3}$ pulgadas) y en una escala para adultos de 1 a 12 (8 $\frac{2}{3}$ a 12 $\frac{1}{3}$ pulgadas). Las medias tallas se hacen de 1/6 pulgada. Las hormas están hechas con diferentes anchos del recio (su circunferencia) conservando la misma longitud como lo indica la siguiente tabla.

Tabla 9. Multiajuste en longitud y ancho para la talla 5

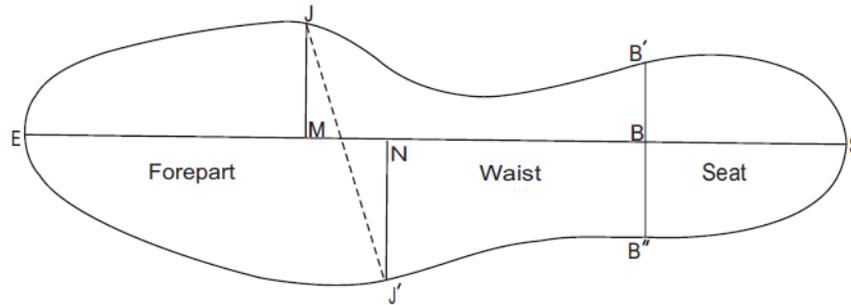
Ajuste	Longitud (in)	Circunferencia (in)
AAAA AAA AA A B	$\left. \begin{array}{l} 9\frac{19}{24} \\ 9\frac{20}{24} \\ 9\frac{21}{24} \\ 9\frac{22}{24} \\ 9\frac{23}{24} \end{array} \right\} \frac{1}{24} \text{ Reducción}$	$\left. \begin{array}{l} 7\frac{5}{16} \\ 7\frac{8}{16} \\ 7\frac{11}{16} \\ 7\frac{14}{16} \\ 8\frac{1}{16} \end{array} \right\} \frac{3}{16} \text{ Grado}$
C D E	$\left. \begin{array}{l} 10 \\ 10 \\ 10 \end{array} \right\} \text{ Sin cambio}$	$\left. \begin{array}{l} 8\frac{4}{16} \\ 8\frac{8}{16} \\ 8\frac{12}{16} \end{array} \right\} \frac{1}{4} \text{ Grado}$
EE EEE EEEE	$\left. \begin{array}{l} 10\frac{1}{24} \\ 10\frac{2}{24} \\ 10\frac{3}{24} \end{array} \right\} \frac{1}{24} \text{ Incremento}$	$\left. \begin{array}{l} 8\frac{15}{16} \\ 9\frac{2}{16} \\ 9\frac{5}{16} \end{array} \right\} \frac{3}{16} \text{ Grado}$

Fuente: Thornton (1953), p. 58.

Las medidas de una horma según la escala inglesa se obtienen al considerar como base la longitud estándar, ver la siguiente figura.

⁶⁸ Thornton, J. (1953). Op. Cit.

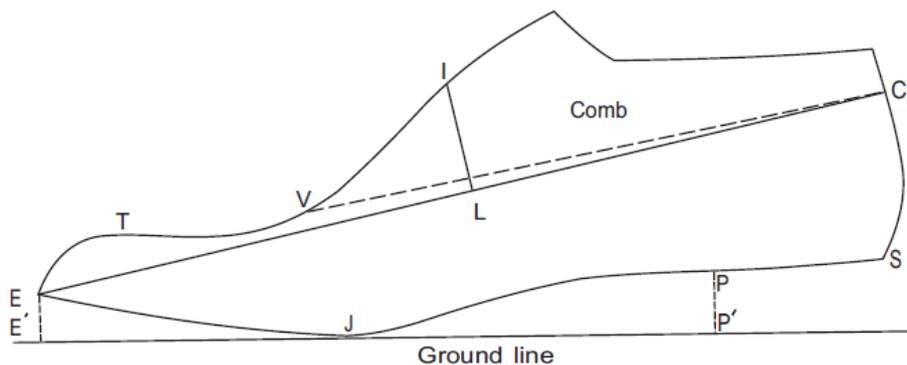
Ilustración 21. Parte inferior de la horma



Fuente: Thornton (1953). Descripción de la parte inferior de la horma. E = centro de la forma de los dedos del pie; S = centro de la forma del talón. (Las posiciones de E y S son difíciles de definir, pero se pueden ubicar fácilmente en las hormas); SB = $\frac{1}{4}$ SL (longitud estándar); B'B'' = ancho del talón; SM = $\frac{2}{3}$ SL; MN = $\frac{1}{10}$ SL; SNJ' = 90° (posición de la junta exterior); SMJ = 90° (posición conjunta interna), p. 61.

El perfil de la horma se aprecia con sus proporciones más importantes, como lo muestra la siguiente figura.

Ilustración 22. Perfil de la horma



Fuente: Thornton (1953, p. 61). Descripción del perfil de la horma: J = punto de contacto o banda de rodadura; PP' = talón o paso; EE' = resorte del dedo del pie; S = posición del asiento; E = fin de los dedos; C = contrapunto; SC = $\frac{1}{5}$ SL; V = posición de vamp; CV = $\frac{7}{10}$ SL; I = empeine; CLI = 90° ; L es $\frac{1}{2}$ SL; T = parte superior de los dedos de los pies (punto más alto sobre los dedos de los pies). Nota: SL es la longitud total.

II.4.2. Escala norteamericana

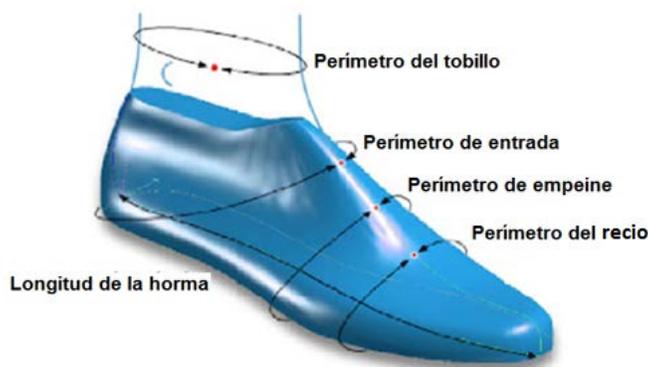
Esta escala es igual a la inglesa, con la excepción de que comienza con el tamaño 0 = 3 11/12 de pulgada. Cada tamaño es por lo tanto 1/12 pulgadas más corto que su equivalente inglés. El intervalo de cada talla es el mismo en 1/3 de pulgada. (Thornton, 1953, p. 60)⁶⁹.

II.4.3. Escala francesa

El sistema francés se basa en mediciones métricas, una talla equivale a 2/3 de centímetro. Comparado con el sistema de medición norteamericano, 5 tallas francesas equivalen a 4 tallas completas más 3 medios números, por lo que se tiene más tallas en el sistema americano (Sterling Last Corporation, sin fecha, p. 8)⁷⁰.

Las medidas de la horma según la escala francesa se obtienen por los siguientes parámetros.

Ilustración 23. Partes principales de una horma en el sistema francés



Fuente: CIATEC (Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas)⁷¹

⁶⁹ Thornton, J. (1953). Op. Cit.

⁷⁰ Sterling Last Corporation (sin fecha).

⁷¹ CIATEC. (9 de mayo 2018). Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas. (Sitio web) Recuperado de <http://blog.ciatec.mx/2010/03/terminologia-de-hormas-para-calzado.html>

Se usa un pie de 27.3 cm de largo para ejemplificar como se obtienen algunos parámetros importantes en el sistema francés. A continuación, se muestran los siguientes cálculos

Longitud de la horma. Se calcula multiplicando por $3/2$ la longitud del pie obtenida en cm (1 PF o punto francés = $2/3$ cm). Ejemplo: $3/2 \times 27.3 \text{ cm} = 41 \text{ PF}$ aproximadamente.

Indicador de ancho. Es un parámetro que sirve para saber si una horma se considera como normal, gruesa o delgada. Fórmula $IA = (\text{recio} \times 2) - PF$. Ejemplo: $(21.6 \text{ cm} \times 2) - 37 \text{ PF} = 6.2$ (se considera como normal).

Perímetro del recio. Es la medida del contorno de una horma en la zona de los metatarsos. Fórmula: $IA + PF/2$; donde IA es ancho, PF son puntos franceses. Ejemplo: $6 + 41/2 = 23.5 \text{ cm}$

Perímetro de empeine. Medida que se toma en la zona media alrededor del empeine. Fórmula: $\text{recio} + 5 \text{ mm}$. Ejemplo: $23.5 \text{ cm} + 5 \text{ mm} = 24 \text{ cm}$

Perímetro de entrada. Es la medida del contorno tomada desde el talón hasta la zona de entrada. Fórmula: $LH \text{ cm} + IA$; donde LH es longitud de horma e IA es indicador de ancho. Ejemplo: $27.3 \text{ cm} + 6 \text{ cm} = 33.3 \text{ cm}$

Perímetro de tobillo. Medida del contorno tomada en la zona superior del tobillo. Fórmula: $\text{recio} - 5 \text{ mm}$. Ejemplo: $23.5 \text{ cm} - 0.5 \text{ cm} = 23 \text{ cm}$ ⁷²

Al finalizar de explicar las diferentes escalas se verá la tabla 11 donde se muestran el comparativo de las principales tallas en el mundo.

⁷² CIATEC. (9 de mayo 2018). Op. Cit.

II.4.4. Escala mondopoint

El sistema métrico fue propuesto en 1670 por el vicario francés Gabriel Mouton. En 1801 Francia adoptó el sistema, y hasta 1875 un grupo de naciones se reunió para discutir su adopción; en sus inicios pensaron llamarlo europoint; sin embargo terminó llamándose mondopoint con la intención de integrarse otros países fuera de Europa. (Sterling Last Corporation, sin fecha, p. 9)⁷³.

El sistema mondopoint está respaldado por la norma ISO 9704-1991, utiliza los milímetros para clasificar la longitud y el ancho del calzado según las medidas del pie; generalmente las tallas vienen integradas por dos números, por ejemplo (250/96), lo que significa que de largo son 250 mm por 96 mm de ancho. Longitudinalmente, crece 5 mm por talla y para el caso del ancho 4 mm considerando tres tipos de amplitud tanto para dama como para caballero (Luximon, A., 2013, p. 223-224)⁷⁴.

⁷³ Sterling Last Corporation (sin fecha). Op. Cit.

⁷⁴ Luximon, A. (2013). Op. Cit.

Tabla 10. Tallas mondopoint

Length size	Est. last length (mm)	Foot length (mm)	Width size – Foot width (mm)						
			Baby/Kids	Women	Men				
110	125	110	49.4	-	-	-	-	-	-
115	130	115	50.9	-	-	-	-	-	-
120	135	120	52.3	-	-	-	-	-	-
125	140	125	53.7	-	-	-	-	-	-
130	145	130	55.1	-	-	-	-	-	-
135	150	135	56.6	-	-	-	-	-	-
140	155	140	58.0	-	-	-	-	-	-
145	160	145	59.4	-	-	-	-	-	-
150	165	150	60.9	-	-	-	-	-	-
155	170	155	62.3	-	-	-	-	-	-
160	175	160	63.7	-	-	-	-	-	-
165	180	165	65.1	-	-	-	-	-	-
170	185	170	66.6	-	-	-	-	-	-
175	190	175	68.0	-	-	-	-	-	-
180	195	180	69.4	-	-	-	-	-	-
185	200	185	70.9	-	-	-	-	-	-
190	205	190	72.3	-	-	-	-	-	-
195	210	195	73.7	-	-	-	-	-	-
200	215	200	75.1	-	-	-	-	-	-
205	220	205	76.6	-	-	-	-	-	-
210	225	210	78.0	-	-	-	-	-	-
215	230	215	79.4	-	82	86	-	-	-
220	235	220	80.9	-	84	88	-	-	-
225	240	225	82.3	82	86	90	-	-	-
230	245	230	83.7	84	88	92	-	-	-
235	250	235	85.1	86	90	94	-	-	-
240	255	240	-	88	92	96	-	90	94
245	260	245	-	90	94	98	88	92	96
250	265	250	-	92	96	100	90	94	98
255	270	255	-	94	98	102	92	96	100
260	275	260	-	96	100	104	94	98	102
265	280	265	-	98	102	-	96	100	104
270	285	270	-	100	104	-	98	102	106
275	290	275	-	-	-	-	100	104	108
280	295	280	-	-	-	-	102	106	110
285	300	285	-	-	-	-	104	108	-
290	305	290	-	-	-	-	106	110	-

Fuente: Luximon (2013), p. 225.

La siguiente tabla integra las escalas más importantes de medición del calzado: inglesa, americana y francesa, y las compara con el sistema inglés y el sistema métrico decimal.

Tabla 11. Equivalencia de algunas tallas en el mundo

Engelska size	Engelska tum	Amerikanska size	Paris Point	Centimeter
			2/3 cm ↓	1 cm ↓
			↑ 2	↑ 2
	1		3	3
			4	4
			5	5
	2		6	6
			7	7
			8	8
	3		9	9
			10	10
			11	11
	4		12	12
			13	13
			14	14
↓ 0	4 3"	↓ 0	15	15
1/3" ↓		1/3" ↓	16	16
↑ 2	4 1/4	↑ 2	17	17
	4 1/4		18	18
3	5 4"	3	19	19
		4	20	20
		5	21	21
	6	6	22	22
		7	23	23
		8	24	24
	7	9	25	25
		10	26	26
		11	27	27
		12	28	28
	8	13	29	29
		14	30	30
		15	31	31
		16	32	32
1		17	33	33
2	9	18	34	34
3		19	35	35
4		20	36	36
5	10	21	37	37
6		22	38	38
7		23	39	39
		24	40	40
		25	41	41
8	11	26	42	42
9		27	43	43
10		28	44	44
11	12	29	45	45

Fuente: Bengt (2004), p. 7⁷⁵.

⁷⁵Bengt, A. (2004). *Recommendation to suppliers and manufactures of orthopaedic footwear concerning sizes and shoes and last* [Reporte del The Swedish Handicap Institute] recuperado de internet www.yumpu.com/en/document/read/11650433/foot-last-shoe

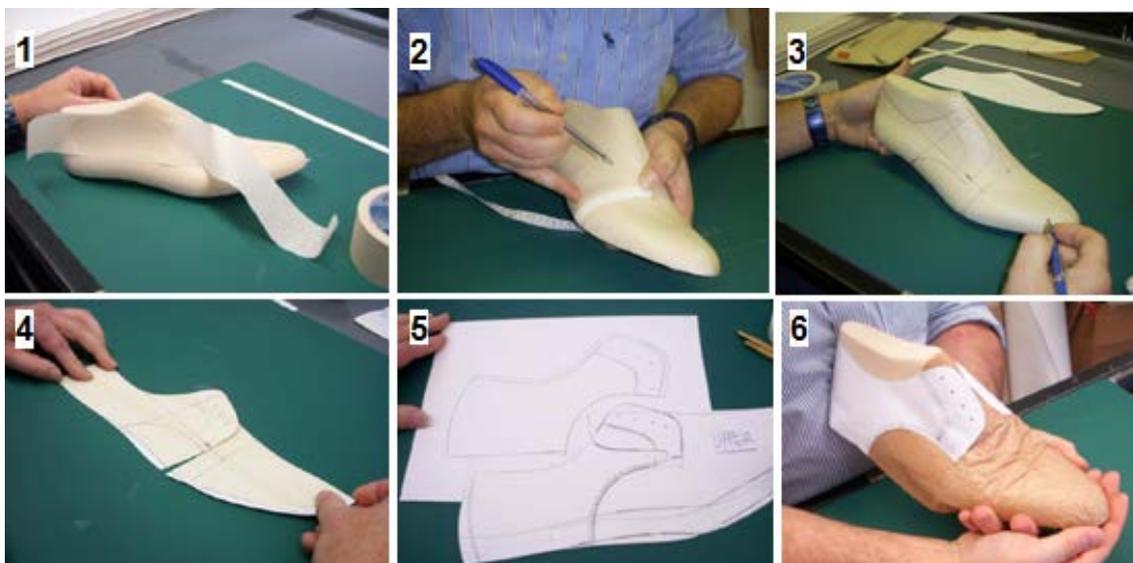
II.5. El patronaje y la fabricación del calzado

Como ya se había mencionado anteriormente, la horma sirve de molde para el montado de la piel o tela en la suela; además tiene otra función, y es permitir dibujar los patrones para establecer una moda o estilo de calzado. A continuación, se explica qué es el patronaje y los tipos de fabricación más importantes.

II.5.1 Los patrones de corte

La forma tradicional de obtener las medidas de una horma tridimensional en piezas bidimensionales es encintando la horma completamente, después dibujar los trazos que establecen el tipo de calzado a elaborar; posteriormente es necesario retirar la cinta y recortar los patrones en las partes fundamentales para formar el calzado (Choklat, 2012, p. 42)⁷⁶. Ver la ilustración siguiente.

Ilustración 24. Diseño tradicional de los patrones sobre la horma



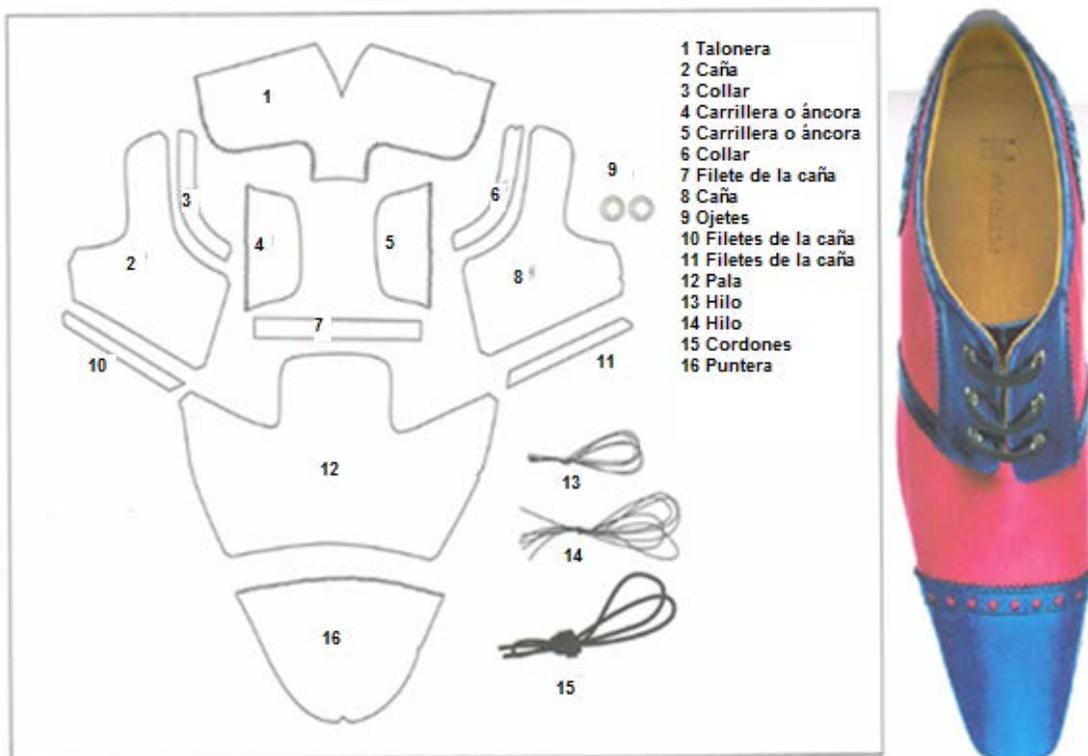
Fuente: Handbook pattern making. Shoe future (2007-2013), p. 19-23⁷⁷

⁷⁶ Choklat, A. (2012). *Diseño de Calzado*. Barcelona, España. Gustavo Gili.

⁷⁷ Handbook pattern making. Shoe future (2007-2013). *Lifelong learning programme Leonardo da Vinci*. Strojarska ulica Croacia. Recuperado de www.shoe-learn.com/documents/5.FOOTWEAR_PATTERN_MAKING.pdf

Conforme se ha desarrollado la industria, los nombres de algunas partes componentes del calzado se han estandarizado, como: caña, talonera, pala, carrilleras, etcétera, sin importar si es de niño o de adulto, ver la ilustración siguiente.

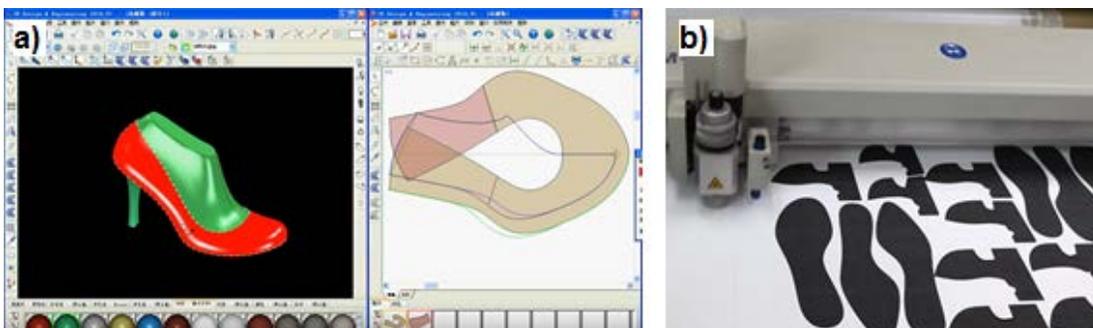
Ilustración 25. Patrones en el calzado



Fuente: Choklat, A. (2012).

En la actualidad se usa CAD CAM para diseñar y obtener los patrones en una horma virtual, con las diferentes posibilidades y ventajas de poder acotar, colorear, variar su forma, tamaño y reproducción (Handbook pattern making. 2007-13, p. 24-26)⁷⁸.

Ilustración 26. Diseño de patrones por computadora



Fuente: a) Imagen recuperada de Jacywur (5 de octubre de 2011). *3D Footwear Patterns Design Software.avi*. (Video), de <https://www.youtube.com/watch?v=2t9HW01x3vg>; b) Imagen recuperada de TheCreativeReport (22 de febrero de 2011). *The Making of a Shoe Last by Tsubo*. (Video), de <https://www.youtube.com/watch?v=D3DXXgA7LDQ>

II.5.2. La manufactura del calzado

En el transcurso de los años se inventaron diferentes métodos para hacer calzado. Los maestros zapateros alcanzaron una gran destreza y conocimiento con sólo utilizar las manos; sin embargo, la mecanización trajo agilidad a la industria e innovación en otras técnicas de fabricación; por lo cual, se dio el reemplazo de las hormas tradicionales de madera por las de plástico. A continuación, se describen los tres tipos de fabricación más comunes a nivel mundial.

⁷⁸ Handbook pattern making. Shoe future. (2007-2013). Op, cit.

II.5.2.1. Fabricación tipo cementado

En la fabricación de tipo cementado, el corte, principalmente de piel, se monta sobre la horma y posteriormente se pega la suela entera (Sieburth, 1936, p. 51)⁷⁹. Las hormas para este proceso de fabricación se hacen de plástico y con partes metálicas en el talón y en la zona del arco.

Ilustración 27. Calzado y horma para fabricación tipo cementado

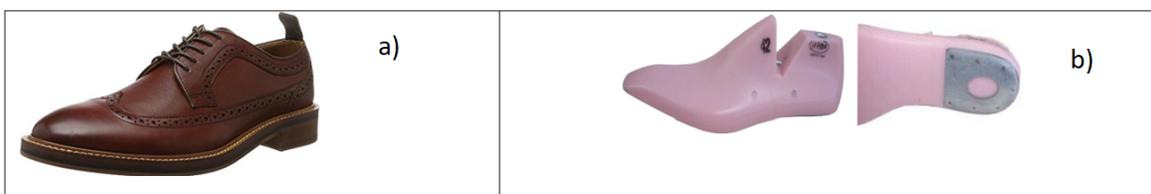


Fuente: Inciso a) Portal Flexi, recuperado el 3 de noviembre de 2017 de <http://flexi.shoes/mx/section/construcciones/>. Inciso b) *Handbook pattern making. Shoe future* (2007-2013), p. 3.

II.5.2.2. Fabricación tipo Goodyear Welt

El tipo de fabricación Goodyear-Welt lleva doble costura; la primera, une la plantilla con el corte o montado y la segunda costura, une la suela con la pestaña (Sieburth, 1936, p. 55)⁸⁰. Las hormas son hechas de plástico para producción en serie, con un biselado a lo largo del borde y chapa de metal en el talón.

Ilustración 28. Calzado y horma para fabricación tipo Goodyear Welt



Fuente: a) Portal Flexi, recuperado el 3 de noviembre de 2017, de <http://flexi.shoes/mx/section/construcciones/>. Inciso b) *Handbook pattern making. Shoe future* (2007-2013), p. 4.

⁷⁹ Sieburth, R. (1936) *The shoe repairer's manual*. The Gill Publications, Inc., Boston, Mass.

⁸⁰ Sieburth, R. (1936). Op. Cit.

II.5.2.3. Fabricación tipo Stitch Down & S. Crispino

En este tipo de fabricación, la parte superior se cose a la plantilla o entre suela con un pespunte vertical, además va cementado (Handbook pattern making. Shoe future, 2007-2013, p. 5)⁸¹. Las hormas se elaboran de plástico con un biselado a lo largo del borde, sin chapado de metal en el talón.

Ilustración 29. Calzado y horma para fabricación tipo Stich Down & S. Crispino



Fuente: Incisos a) y b) Handbook pattern making. Shoe future (2007-2013), p. 5.

II.5.2.4. Otros tipos de fabricación

En su *Textbook* Thornton (1953, p. 254) clasifica en dos grandes grupos la construcción del calzado: uno es el pegado y el otro es el cosido a máquina. Por su parte, en el manual de reparación de calzado, Sieburth (1936, p. 51-60)⁸² hace mención de las siguientes técnicas: McKay, Moccasin, Pre welt, Pegged Standard Screw. En el portal de la marca Flexi®, en el apartado de construcciones, se muestra otros tipos de fabricación, como: inyección directa, California, Strobel pegado, Guante, Solestitch y Opanka⁸³.

⁸¹ Handbook pattern making. Shoe future (2007-2013). Op. Cit.

⁸² Sieburth, R. (1936).

⁸³ Flexi (3 de noviembre de 2017). Portal. Imagen recuperada de <http://flexi.shoes/mx/section/construcciones/>

Actualmente, con la tecnología 3D *printing* y el uso de *software* que facilitan el diseño por computadora, varios diseñadores han creado prototipos de calzado hechos completamente de plástico, y diversas marcas mundialmente reconocidas han manufacturando sólo las suelas en el calzado deportivo.

Ilustración 30. Calzado fabricado con tecnología 3D printing



Fuente: a) Imagen recuperada de Diedecke, F. (22 de marzo de 2018). *3D Printed Shoes | Startup Image Video*. (video). De <https://www.youtube.com/watch?v=yuwDibzBS44>; b) Imagen recuperada de Gizmodo (7 de marzo de 2016). *We Beat Up Under Armour's New 3D-Printed Shoe and It Survived*. (Video). De <https://www.youtube.com/watch?v=4BMVsfs8evg>; c) Vocativ (7 de abril de 2017). *This Is Adidas' First Mass Market 3D-Printed Shoe*. (Video). De <https://www.youtube.com/watch?v=qlomslovAnI>.

Capítulo III. La personalización del calzado

Con las nuevas técnicas para elaborar calzado, se pasó de un producto reparable a otro totalmente desechable, por lo que el oficio de zapatero y sus talleres se pensaba casi al borde de la extinción. Sin embargo, el arte de hacer calzado a mano con enfoque industrializado, se ha ido poco a poco consolidando. Empresas exclusivas y diseñadores de renombre han reinventado este oficio con alto grado de sofisticación, para clientes exigentes y de alto poder adquisitivo.

Los desafíos son muchos para empezar no existe una normalización que sustente las bases para desarrollar el diseño del calzado bajo el concepto de personalizado. Hace unos años, expertos en el tema, se ha dado a la tarea de volver a investigar los conceptos como el confort⁸⁴ y el ajuste.

En este capítulo se aborda la definición del concepto de personalización en masa por diversos autores, se expone la evolución de la industria y su posible proyección hacia el futuro y los primeros intentos de la clasificación de la personalización; también se muestran los esfuerzos realizados por el programa de innovación y desarrollo de la comisión europea para personalizar calzado bajo el programa ERGOSHOE. Por otro lado, se describe cómo la ortopedia realiza calzado a la medida y se expone el desarrollo de una horma donde se trata una patología clínica por parte de la Universidad Politécnica de Guadalajara en México. Además, se muestran las investigaciones más recientes a nivel mundial en la personalización de una horma y su metodología, y por último se hace una revisión de patentes, donde dos trabajos muestran información relevante para éste proyecto de tesis.

⁸⁴ El término confort de acuerdo a la Real Academia Española es bienestar o comodidad material. Consulta por internet <https://dle.rae.es>

III.1. Definición y paradigma

La personalización en masa se ha vuelto un requerimiento que los clientes demandan para satisfacer sus necesidades.

El primero en concebir el término de personalización en masa fue Stan Davis en 1987, y fue desarrollado por Pine en 1993 (Tseng, Hu y Wang; 2014, p. 2)⁸⁵.

Según Böer y Dulio (2007)⁸⁶, la definición de personalización en masa es la producción de bienes con un alto grado de particularidades utilizando la eficiencia industrial.

De acuerdo con Da Silveira et al. (2001), se refiere a la provisión de grandes volúmenes de productos o servicios personalizados a costos relativamente bajos mediante la adopción de procesos flexibles (Luximon, 2001, p. 262)⁸⁷.

Para Tseng y Piller (2003), la esencia de la personalización en masa es convertir al cliente en codiseñador, donde exprese sus requerimientos y sea parte primordial en el desarrollo del producto (Tseng et al. 2014, p. 3)⁸⁸.

De acuerdo con Böer y Dulio (2007, p. 2)⁸⁹, la personalización en masa es parte de un paradigma de producción que inicia en la década del 2000 y se considera como una necesidad de la sociedad, en un ambiente de mercado globalizado. El modelo de negocio se concibe en un sistema de producción de jalón, donde a partir de la venta, se diseña el calzado y posteriormente se fabrica y/o ensambla. Claro está que el nuevo sistema de producción debe estar apoyado por la tecnología de la información y un tipo de manufactura reconfigurable.

⁸⁵ Tseng, Hu & Wang. (2014). *Mass customization*, University of Science and Technology, Hong Kong and University of Michigan, USA. (Academic paper) CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Springer Publications.

⁸⁶ Böer & Dulio (2007). Op. Cit.

⁸⁷ Luximon, A. (2013). Op. Cit.

⁸⁸ Tseng et al. (2014). Op. Cit..

⁸⁹ Böer & Dulio. (2007). *Mass customization and footwear: Myth, salvation or reality?* Euroshoe (proyecto de investigación), X,177. Springer. ISBN 978-1-84628-864-7.

Ilustración 31. El paradigma de la producción

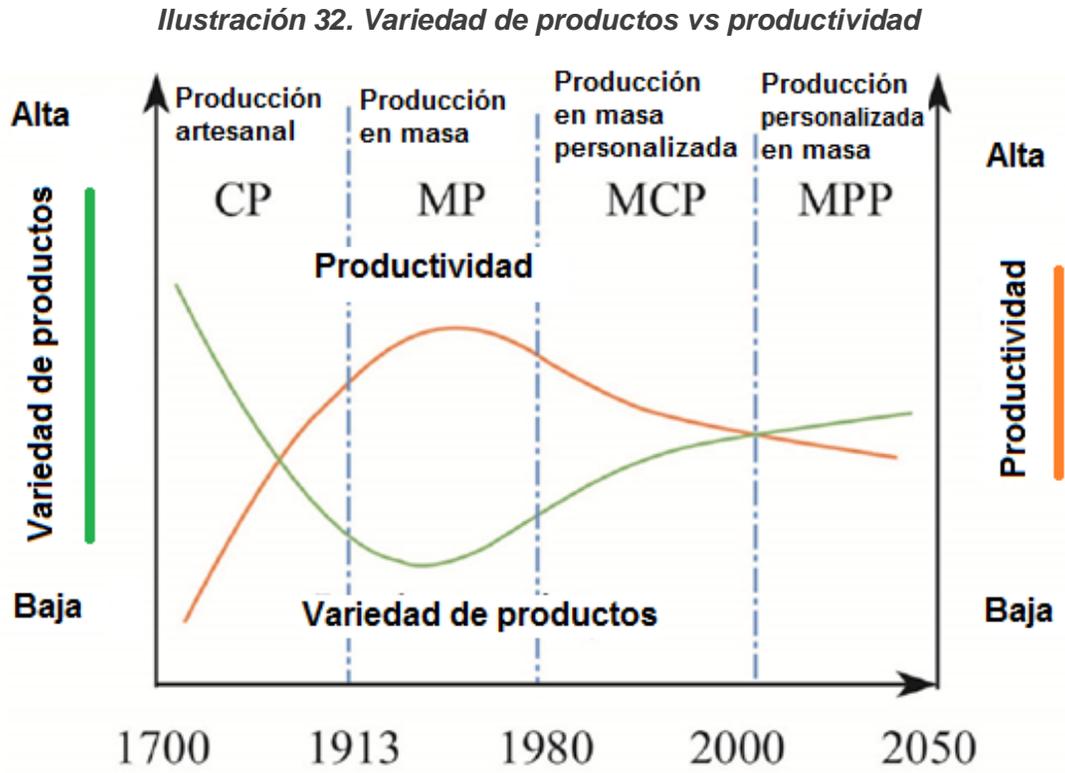
PARADIGMA	PRODUCCIÓN ARTESANAL	PRODUCCIÓN EN MASA	PRODUCCIÓN FLEXIBLE	PERSONALIZACIÓN EN MASA	PRODUCCIÓN SUSTENTABLE
Inicio	-1850	1913	-1980	2000	2020?
Necesidades de la sociedad	Productos personalizados	Productos de bajo costo	Variedad de productos	Producto personalizado	Productos limpios
Mercado	Volumen muy pequeño de productos	Demanda > suministro Demanda constante	Suministro > volúmenes pequeños de producto	Globalización Demanda fluctuante	Medio ambiente
Modelo de negocio	Jalar Venta- diseño- manufactura- ensamble	Empujar Diseño- hechura- ensamble- venta	Empujar-jalar Diseño- manufactura- venta- ensamble	Jalar Diseño- venta- manufactura- ensamble	Jalar Diseño amigable al medio ambiente- venta- manufactura- ensamble
Facilitador de la tecnología	Electricidad	Partes intercambiables	Computadoras	Tecnología de la información*	Tecnología Nano/bio/material
Facilitador de procesos	Máquinas y herramientas	Línea de montaje	Sistema de manufactura flexible, robots	Sistema de manufactura reconfigurable **	Incremento de la manufactura

Fuente: Böer & Dulio (2007), p. 2. * Tecnología de la información: son los diferentes medios de comunicación, principalmente la computadora, máquinas de control numérico y los robots. ** Sistemas de manufactura reconfigurable: sistema de manufactura flexible, planeación de los recursos de la empresa y la administración del ciclo de vida del producto.

Los investigadores ante este sistema de producción consideran que se están forjando las bases para el desarrollo de la cuarta revolución industrial, donde la MCP (Mass Customer Production) se transforma en MPP (Mass Personalization Production) dentro de un comercio altamente globalizado, clientes preocupados por el cuidado al medio ambiente, en un mundo virtualmente desarrollado y con la creciente utilización de las máquinas 3D printing (Wang, Ma, Yang & Wang, 2017, p. 313)⁹⁰.

⁹⁰ Wang, Ma, Yang & Wang. (2017). *Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production*. Adv. manuf. (2017) 5:311-320. Shanghai University and Springer-Verlag GmbH Germany, part of the Springer nature. Recuperado de <http://doi.org/10.1007/s40436-017-0204-7>.

En la denominada personalización en masa, se hace realidad un mercado altamente competitivo de una demanda fluctuante que ofrece gran variedad de productos y mayor certeza de cumplir con las necesidades únicas del cliente.



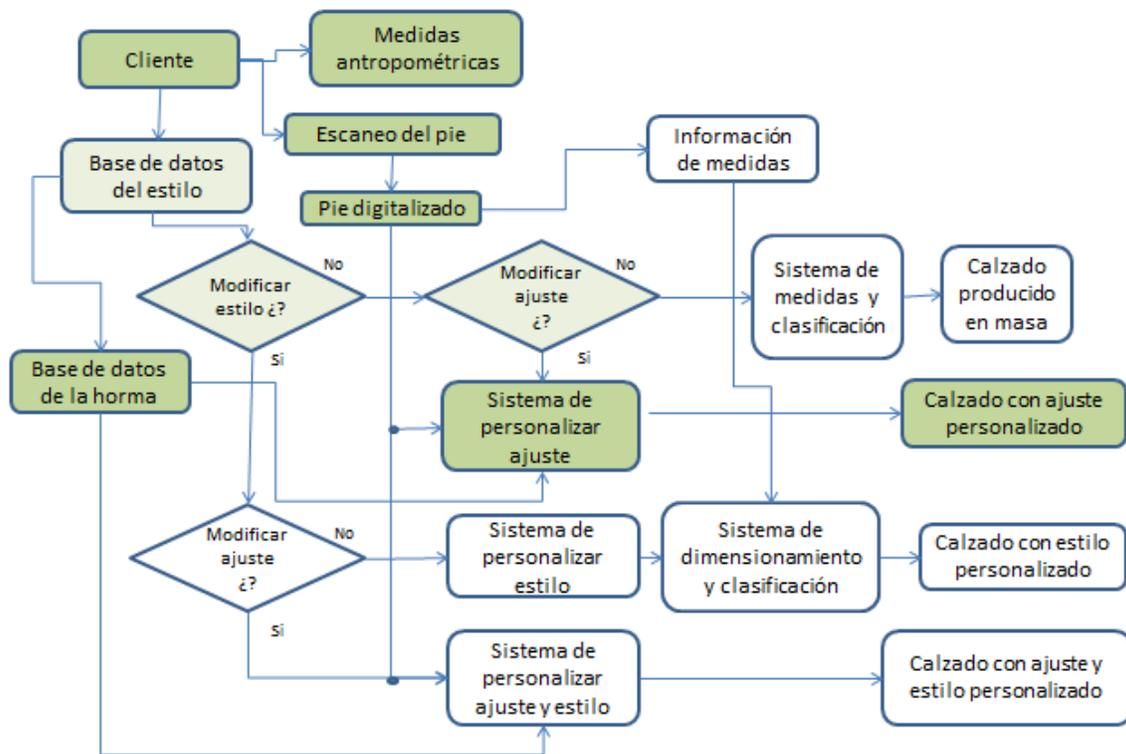
Fuente: Wang, Ma, Yang & Wang (2017), p. 2.

III.2. Clasificación del calzado

De acuerdo con Luximon (2001)⁹¹ hay cuatro tipos de fabricación: en el primer caso, el calzado es producido bajo las técnicas convencionales de producción en serie; en el segundo caso, se personaliza el ajuste del calzado; en el tercer caso, se personaliza el estilo y en el último, se personaliza tanto el ajuste como el estilo.

En el diagrama que se muestra a continuación el punto de partida para el calzado con ajuste personalizado, sus actividades antecesoras, son el escaneo del pie, la digitalización y la base de datos de la horma.

Ilustración 33. La personalización en masa para el diseño de calzado



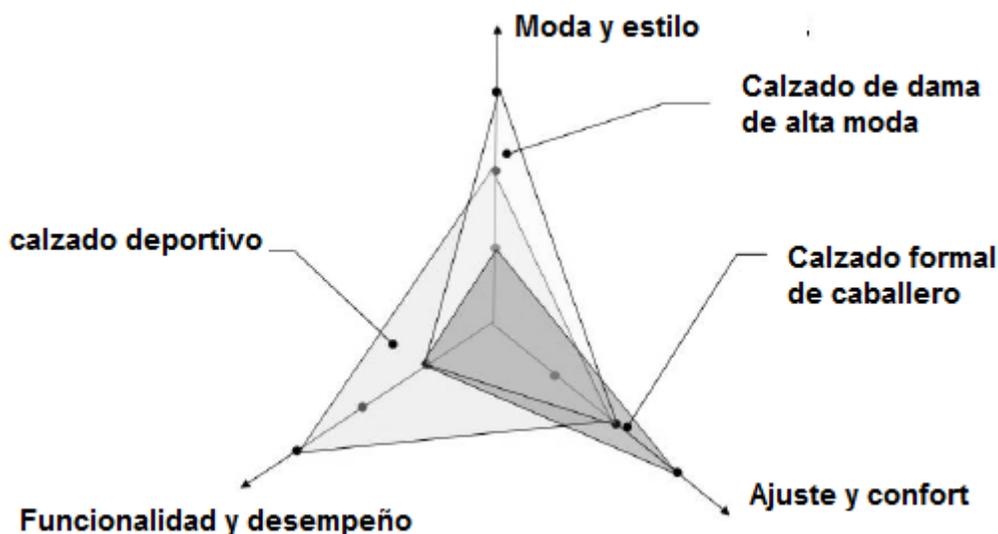
Fuente: Luximon (2001), p. 264.

⁹¹ Luximon, A. (2013). Op. Cit. p. 264.

De acuerdo con Böer & Dulio (2007, p. 18)⁹² se han determinado diferentes grados de personalización en el calzado, desde la elemental que sólo contempla el estilo del mismo, hasta una gran personalización que abarca el perfecto ajuste del calzado llamado “*made to order*” donde todos los componentes del producto son manufacturados con base en los requerimientos y especificaciones del cliente; sin embargo, puede pasar a un grado máximo de manufactura llamada “*develop to order*” donde el consumidor se vuelve codiseñador con el fabricante.

Continuando con el mismo autor, existen tres ejes donde se debe desarrollar la personalización del calzado y son: moda-estilo, ajuste-confort y por último funcionalidad y desempeño.

Ilustración 34. Los tres ejes de la personalización en el calzado



Fuente: Böer & Dulio (2007), p. 19.

⁹² Böer & Dulio. (2007). Op.Cit.

III.2.1. Casos especiales de personalización

Es común que los médicos ortopedistas al tratar algunas patologías del pie utilicen plantillas o calzado ortopédico, con la intención de corregir ciertas anomalías como desviaciones de forma, alteraciones esqueléticas, amputaciones y alteraciones de la función; para esto, ellos obtienen las medidas específicas del pie con el tradicional molde de yeso grado médico. Sin embargo, poco a poco esta forma tradicional de obtener la forma y las dimensiones se ha visto beneficiada por la innovación de los instrumentos de medición que vienen a remplazar los antiguos métodos, con el uso del escáner además de dimensionar mapea las zonas de mayor presión en el pie. Con todos estos adelantos en Europa se ha venido trabajando en personalizar el calzado desde su concepción en la toma de medidas y la preferencia del estilo hasta su elaboración como calzado terminado.

III.2.1.1. El calzado ortopédico (molde de escayola)

El calzado especial hecho a la medida por un ortopedista es una opción para un paciente que no encuentra un calzado ortopédico estándar, necesario para la rehabilitación y/o su tratamiento (Gorgues, 2006, p. 110-114)⁹³

Los pasos para elaborar calzado ortopédico son los siguientes:

1. Toma de medidas en el pie del paciente (diámetro del empeine, metatarsos y maléolos; altura de los dedos, altura de la caña).
2. Colocación de vendas de yeso para formar el molde en negativo
3. Obtención del molde positivo
4. Rectificado del molde
5. Construcción de la horma en madera
6. Cortado y cosido de la piel y el forro

⁹³ Gorgues, J. (2006). Elaboración del molde de escayola y toma de medidas para la adaptación del calzado ortopédico a medida, *OFFARM-ELSEVIER*. Vol. 25. Núm. 1.

7. Pegado y cosido de la suela
8. Acabado del calzado

A continuación se ejemplifica por medio de imágenes, el procedimiento para la obtención del molde positivo en yeso (ver ilustración siguiente).

Ilustración 35. Proceso para la obtención de un molde de yeso



Fuente: Gorgues, J. (2006).

III.2.1.2. Caso Universidad Politécnica de Guadalajara, México

Los investigadores de la Universidad Politécnica en la ciudad de Guadalajara, México, se dieron a la tarea de realizar una horma para calzado ortopédico, atendiendo la malformación en las extremidades inferiores de una paciente con “pie equino varo aducto congénito” según diagnóstico. La metodología usada fue combinar la técnica tradicional del molde de yeso con lo más novedoso en el uso de escáner y 3D *printing* (Neri, Santana & García, 2016)⁹⁴.

Los pasos de la metodología fueron los siguientes:

1. Obtención del molde negativo y positivo en yeso
2. Escaneo del molde positivo y digitalización con el *software* Rhino v. 5
3. Desarrollo de la horma utilizando AKA64 en autocad 2016
4. Desarrollo volumétrico en Rhino v. 5
5. Evaluación de la horma por elemento finito en Inventor 2016
6. Fabricación de la horma por 3D printing en plástico ABS.

Ilustración 36. Horma fabricada en 3D printing



Fuente: Neri, Santana & García. (2016).

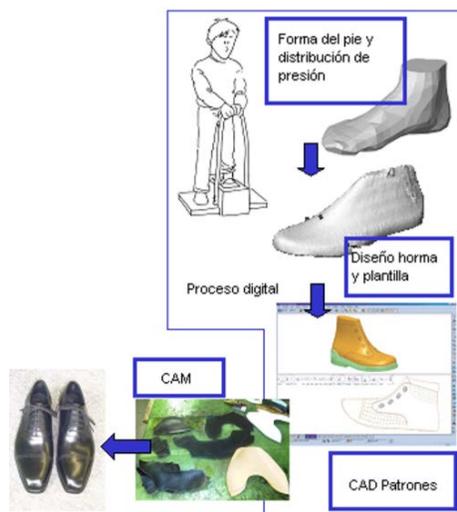
⁹⁴ Neri, Santana & García. (2016). *Desarrollo de proceso para la elaboración de horma personalizada mediante el uso de herramientas de manufactura flexible. Una visión sistémica. IFDP'16-Systems& Design: Beyond Processes and Thinking*, Universitat Politècnica de València, Spain, 2016. Pág 613-621. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/IFDP.2016.3735>

III.2.1.3. El proyecto ERGOSHOE

INESCOP (Instituto Tecnológico del Calzado y Conexas) es un organismo español de innovación y desarrollo que inicia en la década de los noventa el proyecto llamado ERGOSHOE, entre los dieciocho socios, se cuentan empresas del ramo y centros de investigación de diversos países como Francia, Holanda e Italia; que tienen como objetivo principal, establecer nuevos modelos de negocio e incrementar el valor agregado al producto final. La innovación generada por este organismo debe ser implementada en cada nación en sus diversas áreas de trabajo. Entre los objetivos particulares, ERGOSHOE busca producir calzado a la medida adaptado a las necesidades funcionales del individuo e incorporar criterios antropométricos con la finalidad de obtener un calzado personalizado (Montiel, E. 2004, p. 3 y 4)⁹⁵.

ERGOSHOE ha establecido toda una metodología para el proceso en la fabricación del calzado, usan moderna tecnología en escaners para capturar la forma y las medidas del pie, la digitalización por computadora, la creación de software para diseñar la horma y los patrones, hasta la manufactura del calzado.

Ilustración 37. Diagrama de flujo para calzado a la medida

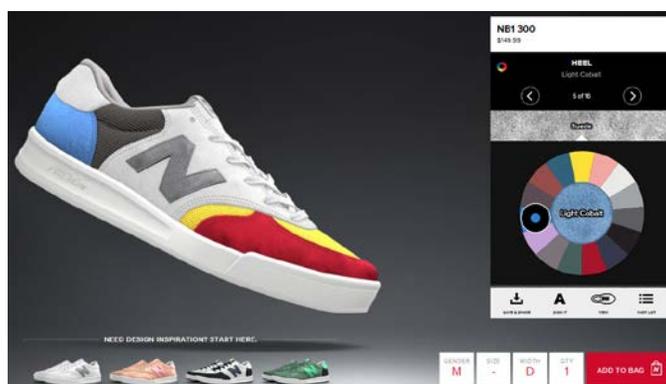


Fuente: Montiel, E. (2004).

⁹⁵ Montiel, E. (2004). *Calzado personalizado. Una oportunidad para competir*. Trabajo presentado en CALZATECNIA (2004) España. Documento recuperado de: http://www.lavirtu.com/eniusimg/enius4/2006/02/adjuntos_fichero_114649.pdf.

Muchas marcas de calzado, inclusive el deportivo han visto a la personalización como una estrategia de mercado para mantener cautivo a un sector de la población que buscan conseguir productos hasta cierto punto únicos, un ejemplo es la empresa New Balance en su línea de tenis, proporciona al cliente en su portal de internet hasta dieciséis posibles alternativas de modificar el exterior en el momento de su compra, ver la ilustración siguiente.

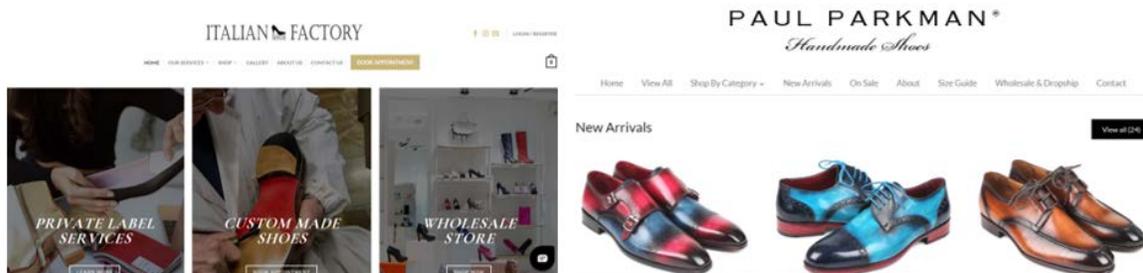
Ilustración 38. Portal de personalización para calzado deportivo New Balance



Fuente: Imagen recuperada de internet (18 de octubre de 2018), <https://www.newbalance.com/nb1/explore/>

Otras marcas de renombre ofrecen zapato hecho a la medida y otras ofrecen el producto hecho a mano, con sólo mandar la talla o mejor aún con las dimensiones del cliente cuando se encuentran en el mismo país, ver la ilustración siguiente.

Ilustración 39. Portal para la venta de zapato hecho a la medida y a mano



Fuente: Imagen recuperada de internet (18 de octubre de 2018). <https://www.italianshoefactory.com/> y <https://online.paulparkman.com/>

III.3. El personalizado de la horma

Hace más de una década se comenzó a investigar los diversos parámetros que se deben tomar en cuenta para diseñar un calzado personalizado, con la intención de obtener un producto que satisfaga al máximo las necesidades y requerimientos de la persona, principalmente en cuestión de la comodidad. Por este motivo se han abierto ciertas posturas referente a éste tema y los investigadores se han dado a la tarea de profundizar en los conceptos de ajuste y confort, pues cabe decir que ambos términos pueden ser muy subjetivos y poco claros; por otro lado, se han establecido diversas metodologías para el prototipado rápido en el diseño de la horma con el objetivo de producirlo industrialmente. El panorama hoy día parece más favorable que hace diez años, pues los avances en cuestión del CAD-CAM, la realidad virtual, las máquinas de manufactura aditiva y la accesibilidad en escáner facilitan el camino. En este subcapítulo se exponen tres diferentes metodologías para el diseño y el prototipado de la horma.

III.3.1. Metodología Wang, Chang y Lin

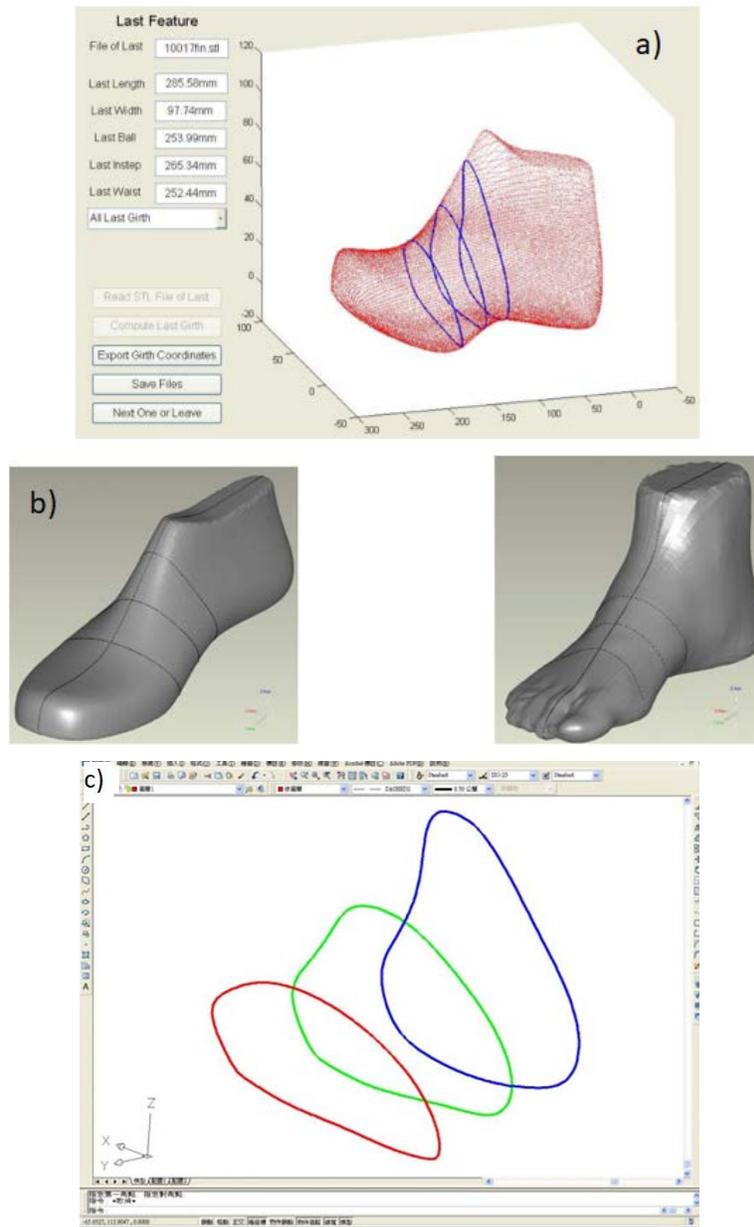
Son cinco puntos los que proponen Wang, Chang y Lin (2008, p. 1)⁹⁶ en su metodología para encontrar la horma más adecuada en la elaboración de calzado; a continuación, se enumera:

1. Escanear el pie y la horma en una nube de puntos y elaborar la figura.
2. Encontrar y determinar las tres circunferencias más importantes, utilizando el algoritmo de rebanar (*slicing*) en un archivo STL.
3. Evaluar la circunferencia de la horma por teoría difusa, determinando el umbral del ajuste.

⁹⁶ Wang, Chang & Lin (2008). A systematic approach in shoe last design for human feet. Department of Industrial Design, Tung-Hai University, Taichi, Taiwan. Department of Industrial Engineering and Management, Nan-Kai University of Technology, Nan-Tou, Taiwan. ResearchGate Berlín Germany. DOI:10.1109/IEEM.2008.4738061.

4. Encontrar los anchos de cada circunferencia mediante el proceso de análisis de jerarquía.
5. Establecer el rango de ajuste en la horma que sea más adecuado para el pie.

Ilustración 40. Metodología para la obtención de las circunferencias del pie



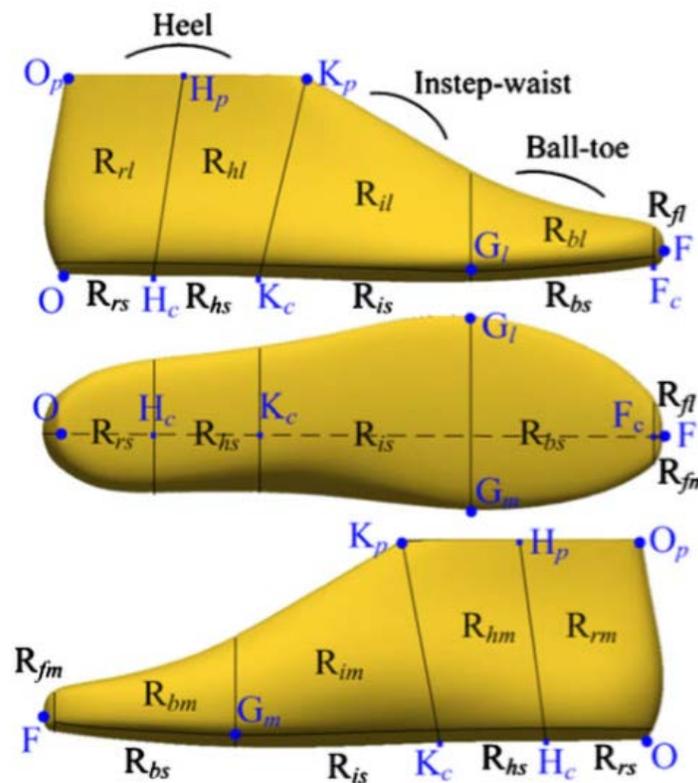
Fuente: Wang, Chang & Lin (2008). En el inciso a) por medio de la interfaz se obtiene por MATLAB una nube de puntos, posteriormente en el inciso b) por medio de Geomagic se determinan las circunferencias del pie en la horma y en el inciso c) se determina su longitud de las circunferencias en Autocad.

III.3.2. Metodología Wang, Zhang, Lu y Lui

De acuerdo con la metodología de Wang, Zhang, Lu y Liu (2011)⁹⁷ se propone la rápida personalización en un sistema CAD; esto es, manipular previamente una horma de manera seccionada. El método se describe a continuación:

1. Se remodela el contorno curvo del mallado por partes y en multicapas.
2. Proponen cinco tipos de restricciones para manipular la superficie de la horma.
3. Reconstrucción de tres partes principales que involucran a 14 regiones.
4. La horma ya modificada puede servir para diseñar otros estilos de hormas.

Ilustración 41. La superficie de la horma por secciones



Fuente: Wang, Zhang, Lu & Liu (2011), p. 177.

⁹⁷ Wang, Zhang, Lu & Liu (2011). *Rapid parametric design methods for shoe-last customization*. Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China. College of Garment and Art Design, Jiaxing University, China. *Int J Adv Manuf Technol* (2011) 54:173-186. DOI:10.1007/s00170-010-3144-y.

III.3.3. Metodología Luximon

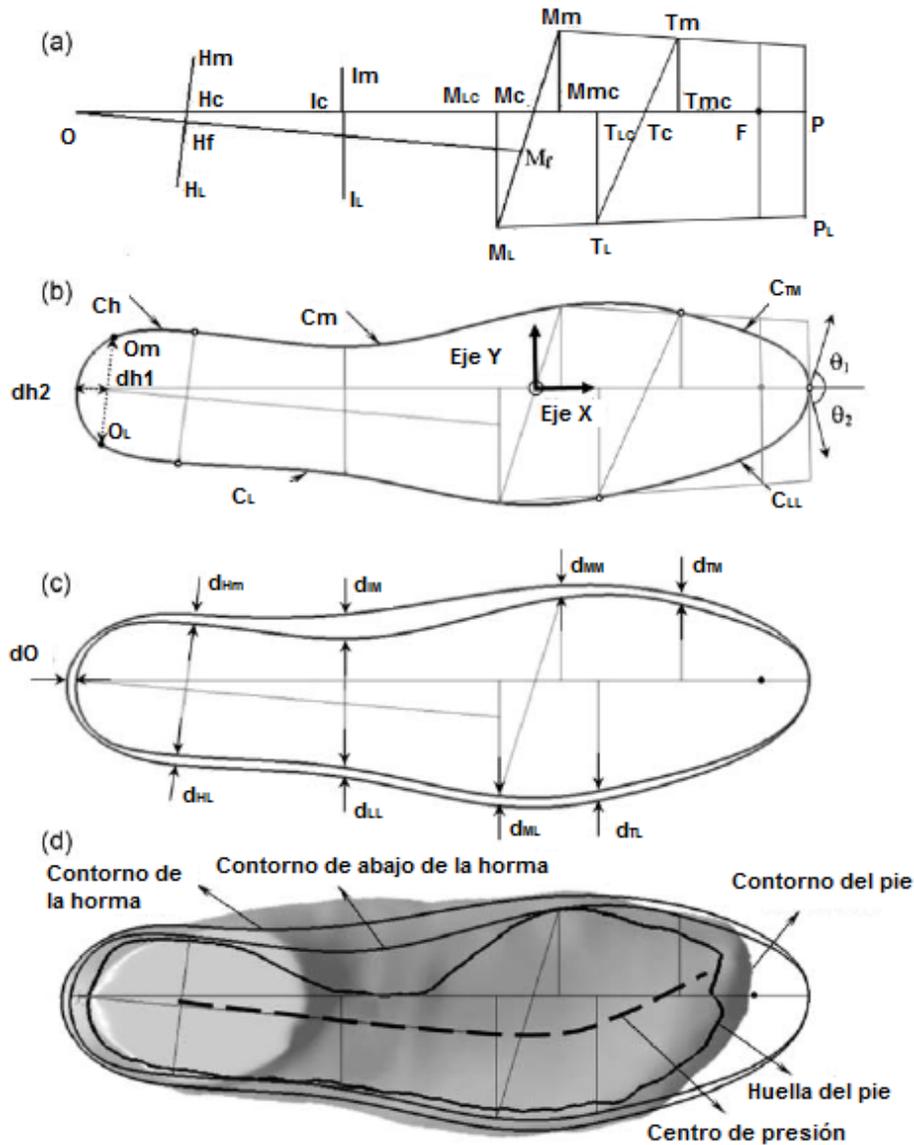
Con la necesidad de reducir el tiempo para obtener una horma personalizada en una producción en masa, proponen Luximon A. & Luximon Y. (2009)⁹⁸ un método que a continuación se enumera:

1. Relacionar los datos del pie con los datos de la horma.
2. Desarrollar un modelo básico donde se establezca la huella del pie.
3. A partir de la huella del pie, dibujar el perfil de la horma.
4. Dibujar la sección transversal de la horma y los contornos.
5. Dibujar en 3D el modelo generado.
6. Modificar la altura y la punta donde van los dedos del pie.
7. Personalizar la horma.

La metodología que propone el diseñador Luximon tiene como base el sistema chino y el sistema AKA64, Aunque existen ciertas similitudes; el sistema alemán toma de referencia a la talla 6B y Luximon propone la talla 23 (3), considerando ser la más representativa en calzado para dama.

⁹⁸ Luximon A. & Luximon Y.(2009) *Shoe last design innovation for better shoe fitting*. Institute of textile and clothing. the Honk Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloom. Hong Kong. School of Design, The Honk Kong Polytechnic University, Hung Hom, Honk Kong. Elsevier. DOI:10.1016/j.compind.2009.05.015. pág. 2

Ilustración 42. Diseño del contorno y la parte baja de la horma



Fuente: Luximon, A. & Luximon, L. (2009).

Los parámetros que utiliza Luximon para el diseño de la horma personalizada se tomaron de la figura anterior en el inciso a), c) y de la bibliografía mencionada.

Tabla 12. Parámetros según Luximon

#	PARÁMETRO	VALOR
1	OF	Longitud del pie
2	OHc	$0.167 \cdot OF$
3	HmHf=HfHl	
4	Olc	$0.40 \cdot OF$
5	IG	
6	ILlc	$0.16 \cdot IG$
7	ILlm	$0.472 \cdot ILlc$
8	OMLc	$0.628 \cdot OF$
9	OMmc	$0.72 \cdot OF$
10	MLMLc	$0.222 \cdot BG$
11	MmMmc	$0.157 \cdot BG$
12	OTLc	$0.776 \cdot OF$
13	TLTLc	$0.212 \cdot BG$
14	OTMc	$0.899 \cdot OF$
15	TmTmc	$0.145 \cdot BG$
16	FP	15 mm
17	< PHcMf	6°
18	< TmMmMf	100.8°
19	< TLMLMf	71.9°
20	< PMcMm	75.4°
21	OMc	$0.682 \cdot OF$
22	δO	3 mm
23	δHm	3.6 mm
24	δHL	2.2 mm
25	δlm	10 mm
26	δIL	3 mm
27	δMm	3 mm
28	δML	2 mm
29	δTm	0.5 mm
30	δTL	2 mm

Fuente: Tabla elaborada con datos tomados de Luximon, A. & Luximon, L. (2009). Nota: IG = circunferencia del empeine, BG = circunferencia del recio.

III.4. Innovación de hormas en patentes

Para el siguiente apartado se consideró un estudio colombiano del año 2014 donde participó un organismo gubernamental llamado *Industria y Comercio* y una institución por nombre *Pontificia Universidad Javeriana*⁹⁹ en conjunto realizaron un análisis a partir de un banco de patentes a nivel mundial con un enfoque antropométrico y biomecánico del pie, la metodología utilizada se describe a continuación:

1. Fase de coordinación (aquí se decidió abordar nueva tecnología en hormas para calzado)
2. Fase de búsqueda (se consideró más de 30 oficinas de patentes en países como Estados Unidos, China, Gran Bretaña, Japón, Alemania, México y Colombia, con la ayuda del *software* “Thomson Innovation”)
3. Fase de análisis e interpretación (se utilizó métodos bibliométricos, redes sociales, apoyo de un experto y el *software* “VantagePoint”).

Como resultado se encontraron 1,763 invenciones relacionadas con la antropometría y 6,400 patentes sobre diseño de hormas. Los países líderes en invenciones son Estados Unidos, Japón, Alemania y China; sin embargo, los que más patentan son Estados Unidos, Taiwán, Alemania e Italia.

Las oficinas destino donde se busca proteger las solicitudes son: Estados Unidos, Japón, Alemania, la European Patent Office (EPO), la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) y China. De los 1,264 solicitantes se puede decir que 613 son personas, 600 empresas y 51 organizaciones educativas.

⁹⁹ Industria y comercio & Pontificia Universidad Javeriana (2014). *Antropometría y diseño de hormas para calzado*. Recuperado de: http://www.sic.gov.co/recursos_user/documentos/publicaciones/Boletin_calzado.pdf

De acuerdo con la clasificación de patentes se obtuvieron los siguientes resultados:

- ❖ Dispositivos e instrumentos para la medición del pie: 924 invenciones en 2,961 solicitudes.
- ❖ Elaboración de hormas y componentes de calzado: 738 invenciones en 3,004 solicitudes.
- ❖ Mecanismos y sistemas de manufactura: 248 invenciones en 971 solicitudes.
- ❖ Artículos y métodos comerciales para la venta de calzado: 232 invenciones en 1,016 solicitudes.
- ❖ Calzado especializado: 224 invenciones en 1,068 solicitudes.
- ❖ Diseño asistido: 142 invenciones con 608 solicitudes.
- ❖ Componentes y métodos: 75 invenciones en 618 solicitudes.

Entre las tendencias antes expuestas, la que se consideran de mayor importancia para este trabajo de tesis es la elaboración de hormas y componentes de calzado. Las invenciones buscan incorporar el uso de máquinas para la fabricación y reparación de hormas, estructura para remover hormas, etc. Los principales solicitantes fueron: Achilles Corp. K. K. de Japón, Nike Inc. de Estados Unidos, Actis ETS de Francia y Ming-Te Chen de Taiwán.

También se toma en cuenta el rubro de calzado especializado que está encaminado a evitar molestias o lesiones, ya que se busca potenciar el confort y se proponen métodos de manufactura. Entre los principales solicitantes están Nike Inc. de Estados Unidos, Tyrolia Freizeitgeraete de Austria, Bonus Ortho System a Islani HF de Islandia y GRD Biotech Inc. de Estados Unidos.

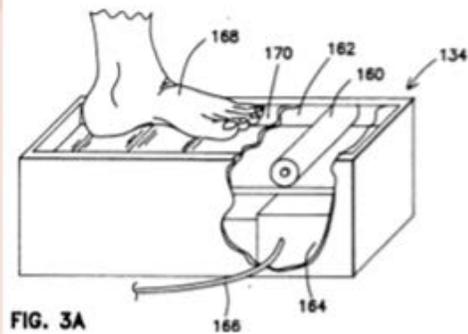
Las patentes de mayor relevancia que se encontraron fueron las siguientes:

Ilustración 43. Patentes de interés

Título inglés: Footwear visual image cataloging and sizing
Título español: Imagen visual para catalogación y dimensionamiento de calzado
Solicitante: Foot Image Technology Inc. (Estados Unidos)
Oficina de destino: Estados Unidos

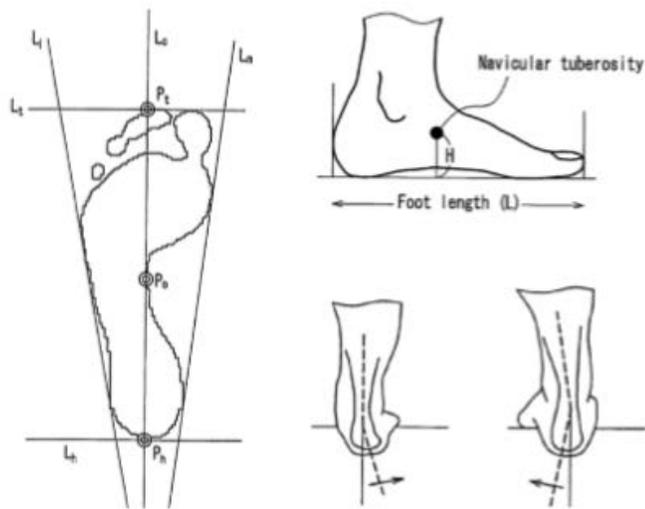
Contenido técnico: el sistema incluye una pantalla de visualización para la captura de la imagen del pie a medir, una imagen de un tipo de calzado seleccionado y un dispositivo de entrada que provoca un movimiento relativo entre las dos imágenes para así determinar electrónicamente el ajuste del calzado seleccionado con el pie medido. El sistema puede incluir un dispositivo de medición del pie y una base de datos de calzado para proporcionar datos del calzado a la pantalla de visualización. Además, el sistema integrado está provisto de un catálogo visual de imágenes y una selección que incluye el dispositivo de medición de calzado, un dispositivo de procesamiento de datos, un dispositivo de almacenamiento y la pantalla de visualización.

Esta invención integra todo el proceso de ventas de calzado a partir de la medición del pie y el ensamble del diseño con la fabricación de calzado.



Title: System and method for assisting shoe selection
Título: Sistema y método para asistir la selección de calzado
Solicitante: Mizuno K. K. (Japón)
Oficina de destino: Estados Unidos, Japón y OMPI

Contenido técnico: esta invención presenta una unidad de selección que escoge el tipo de calzado adecuado para el cliente basándose en información almacenada sobre zapatos y en las características anatómicas del pie, determinadas a partir de la normalización de los datos de entrada y su relación con el estado del pie. Este es un sistema capaz de seleccionar y presentar, de manera confiable, el tipo de calzado óptimo para el cliente.



Fuente: Industria y comercio & Pontificia Universidad Javeriana (2014).

Capítulo IV. La huella y el parámetro inicial

Al haber expuesto los principales conceptos de la personalización en el capítulo anterior y sus principales exponentes, en éste apartado se desarrollará una metodología propia encaminada a encontrar el eje geométrico de la huella como pieza clave de la personalización y la determinación del parámetro inicial; además se tocarán temas de anatomía básica del pie, que son necesarios para entender ciertos términos.

IV.1. Anatomía básica para el diseño

Para entender cómo está constituido anatómicamente y el funcionamiento elemental del pie; en este apartado se explica a detalle, la estructura ósea, se visualizan los músculos y tendones responsables de generar el movimiento, y los ligamentos que mantienen unido a todo el pie.

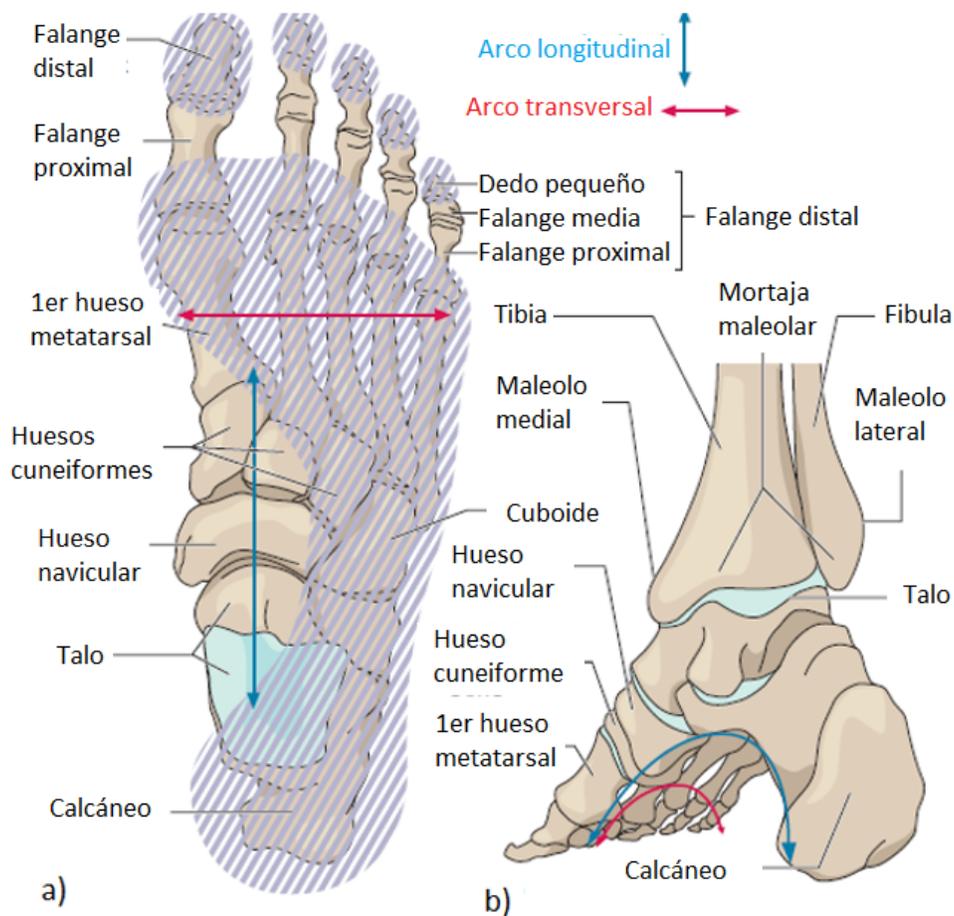
IV.1.1. La estructura ósea

El pie lo integran veitiseis huesos, los cuales se divide en tres grupos principalmente: el grupo del tarso que tiene siete huesos cuneiformes; el metatarso constituido por cinco huesos y el antepie con catorce falanges llamadas distal, medial y proximal que forman los dedos (Faller & Schuenke, 2004)¹⁰⁰. Y seis articulaciones llamadas: tobillo, subtalar, mediatarsal, tarsometatarsal, metatarsofalangea e interfalangeal (Abboud, R.J. 2002)¹⁰¹.

¹⁰⁰ Faller & Schuenke, (2004). *The human body (An introduction to structure and fuction)*. Stuttgart, Germany, Thieme, p. 172.

¹⁰¹ Abboud, R.J. (2002) Relevant foot biomechanics. Mini-symposium: *The elective foot*. Foot Pressure analysis laboratory/clinic, University orthopaedic & trauma surgery departamento, TORT centre, Ninewells hospital & medical school, Dundee DDI 9sY, Scotlan, UK. *Current Orthopedics* (2002) 16, 165-179. Published by Elsevier Ltd.

Ilustración 44. La estructura ósea del pie



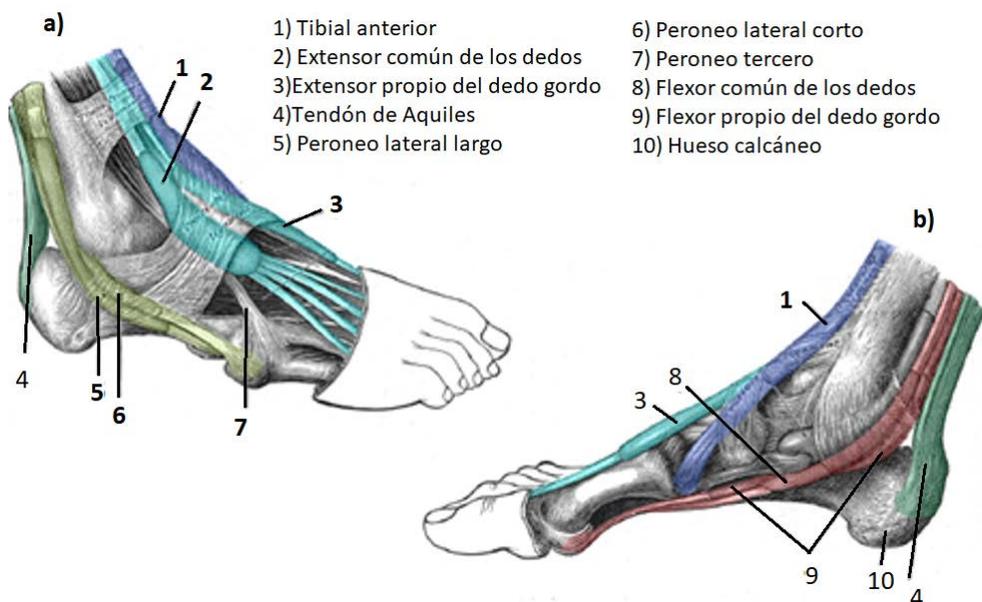
Fuente: Faller & Schuenke (p. 176, 2004).

Desde un enfoque ingenieril se observa que hay huesos en el pie que indudablemente se encuentran en un esfuerzo mecánico ya sea por tensión o compresión al estar sometidos continuamente por el peso del cuerpo y cambiar de un estado a otro al momento de caminar. En el inciso a) la imagen está en vista superior para mostrar los diversos huesos que lo componen, además se observa un entramado en color violeta que indica la zona de apoyo del pie. Para el inciso b) la imagen está en vista posterior medial donde se ve claramente los dos arcos del pie con la finalidad de distribuir el peso y que deben ser considerados al igual que lo anterior en el diseño de la horma.

IV.1.2. Los músculos y tendones

El tobillo es una articulación de bisagra cuyo eje recorre la tróclea del astrágalo y conecta los dos maléolos permitiendo el libre movimiento para el pie, lo anterior se debe considerar para establecer el escote y ancho de la entrada en el calzado. Por otro lado los músculos y los tendones que llegan hasta los dedos generan el movimiento de las falanges; cuando la punta del pie se levanta se le llama dorsiflexión y a la acción de bajar el antepie flexión plantar (Faller & Schuenke, 2004)¹⁰² Esto debe ser considerado en el diseño de la horma, además de contemplar un espacio superior llamado cámara para el movimiento de los dedos.

Ilustración 45. Músculos y tendones del pie



Fuente: Lewis (1858)¹⁰³ Se muestran en la vista lateral (inciso a) y la vista medial (inciso b) los músculos y tendones que recorren el pie hasta conectarse con cada hueso; cabe decir que la mayoría de éstos vienen desde la pierna y en el caso del tendón de Aquiles nace en el muslo.

Biomecánicamente los músculos y tendones hacen la función de tensar como los cables de un puente o una grúa; estos ayudan a mover los huesos en su conjunto y a colocarlos en las diferentes posiciones que uno elija.

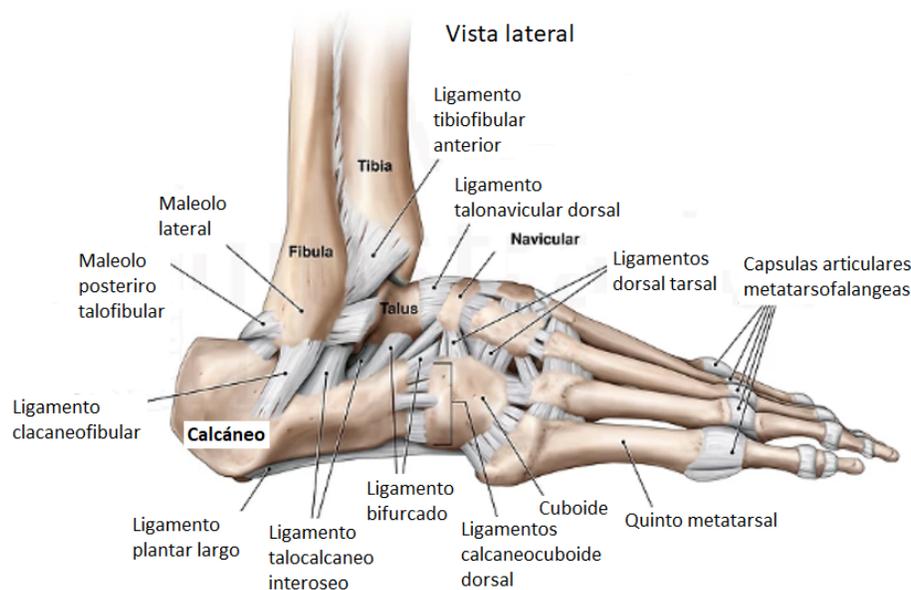
¹⁰² Faller & Schuenke. (2004). *The human body (An introduction to structure and function)*. Stuttgart, Germany, Thieme, p. 182.

¹⁰³ Lewis, W. (1858). *Gray's Anatomy*. Philadelphia and New York, Lea & Febiger 20th edition.

IV.1.3. Ubicación de los ligamentos en el pie

Otros aspectos igual de importantes para el diseño y de acuerdo con Faller & Schuenke (2004)¹⁰⁴, es la estabilidad que proporcionan los ligamentos en el pie; por ejemplo en la articulación del tobillo existen tres ligamentos laterales y un ligamento deltoideo medial, pues la tibia y el peroné están estrechamente unidos por la articulación llamada sindesmótica al nivel de los maléolos y en general los ligamentos se encuentran en cada unión de los huesos. No se debe olvidar que la horma debe ser diseñada para producir calzado que dé protección y soporte al pie tanto en reposo como en movimiento, principalmente sobre superficies irregulares.

Ilustración 46. Ligamentos del pie derecho



Vista lateral en la que se pueden apreciar los diversos ligamentos que mantienen unidos los huesos del pie; sus nombres hacen referencia a las zonas donde están ubicados. Fuente: Imagen recuperada de internet (Marzo 2019): <http://www.biomedillustrations.com/general-anatomy-exhibits>

La analogía de los ligamentos con respecto a la disciplina de la ingeniería pone de manifiesto la capacidad de juntar hueso con hueso como el cople que une dos piezas y además cumple la función de encapsularlos como una abrazadera o brida.

¹⁰⁴ Faller & Schuenke. (2004). Op. Cit. p. 182,

IV.2. Metodología para ubicar el eje de simetría

La siguiente metodología está dividida en cuatro partes, la primera menciona el material y el equipo utilizado, la segunda la preparación del pie del individuo a escanear, la tercera explica el proceso mismo del escaneo y la última el manejo de datos para ser trabajados; al final se delimita el contorno de la huella y se traza su eje. Es necesario precisar que **la siguiente metodología no ha sido replicada de algún trabajo previo o utilizada por otros investigadores.**

El individuo para el estudio fue elegido bajo los siguientes criterios:

- Edad: Adulto joven entre 30 y 40 años.
- Peso: De compleción regular, sin problemas de alimentación.
- Sexo: De preferencia varón con hábitos de uso de calzado no exclusivo.
- Salud: Sin problemas severos de los pies.
- Enfermedades: Sin alguna enfermedad crónica degenerativa.
- Hábitos de calzado: uso de calzado deportivo y casual.

IV.2.1. Material y equipo

Para realizar esta tarea se utilizó lo siguiente:

- Un escáner 2D de la marca Brother, modelo DCP-J140W, con una capacidad de copia de 1200 x 1200 dpi (densidad de puntos o pixels en una pulgada cuadrada en color), calidad de resolución de 1200 x 2400 dpi, hasta más de 19,200 x 19,200 dpi en resolución interpolada y un área de escaneo de 210 mm de ancho y 291 mm de longitud¹⁰⁵.
- Una cinta flexible de acetato transparente de 75 mm de largo por 3.5 cm de ancho y un espesor de 0.5 mm para colocar alrededor del pie.
- Dos lámparas de restirador con un foco de 40 w
- Una cámara digital de la marca sony modelo cibershot de 14 megapíxeles de resolución.
- Un desinfectante de pies.
- Una toalla de tela para limpiar.
- Una mesa de trabajo de 50 x 50 cm cuadrados.
- Una escenografía de color blanco.

¹⁰⁵ Basic User's Guide, Brother Industries Ltd.

- Un calibrador vernier marca mitutoyo.
- Dos escuadras profesionales de dibujo.
- Un tripié para la cámara marca vanguard.

IV.2.2. Preparación

Se prepara la escenografía en color blanco, el set de trabajo o mesa a un costado, y en el piso el escáner para apoyar al pie, alrededor las lámparas bien distribuidas y el tripié con la cámara.

Por otro lado, el individuo que servirá de modelo debe estar previamente aseado de los pies y con un paño seco se debe retirar el polvo y la humedad para que la imagen en el escáner resulte lo más nítida. Ya con los pies listos se coloca la cinta de acetato transparente alrededor de cada pie.

IV.2.3. Proceso de escaneo

Para realizar el proceso, la persona debe permanecer erguida con el pie inmóvil sobre el cristal; la cinta colocada con anterioridad debe rodear el contorno de la extremidad; es decir, tangente a la redondez de éste y a su vez perpendicular al cristal del escáner, con el objeto de establecer los límites reales del pie, como se muestra en la fotografía.

Ilustración 47. Escaneo de la planta del pie

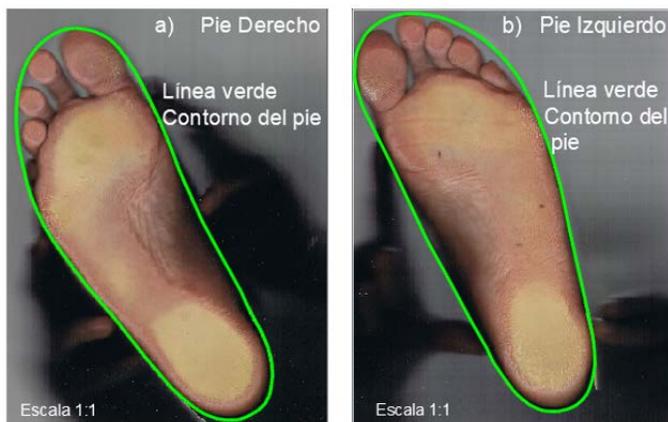


Elaboración propia, imagen representativa de la digitalización de la planta del pie derecho con la cinta alrededor de éste para establecer el contorno.

IV.2.3.1. Construcción del contorno del pie

En autocad se resalta en color verde la cinta transparente colocada alrededor del pie para formar el contorno, como se muestra en la siguiente imagen.

Ilustración 48. El contorno de los pies



Elaboración propia, vista plantar digitalizada a una escala real mostrando su contorno, en el inciso a) pie derecho y b) pie izquierdo.

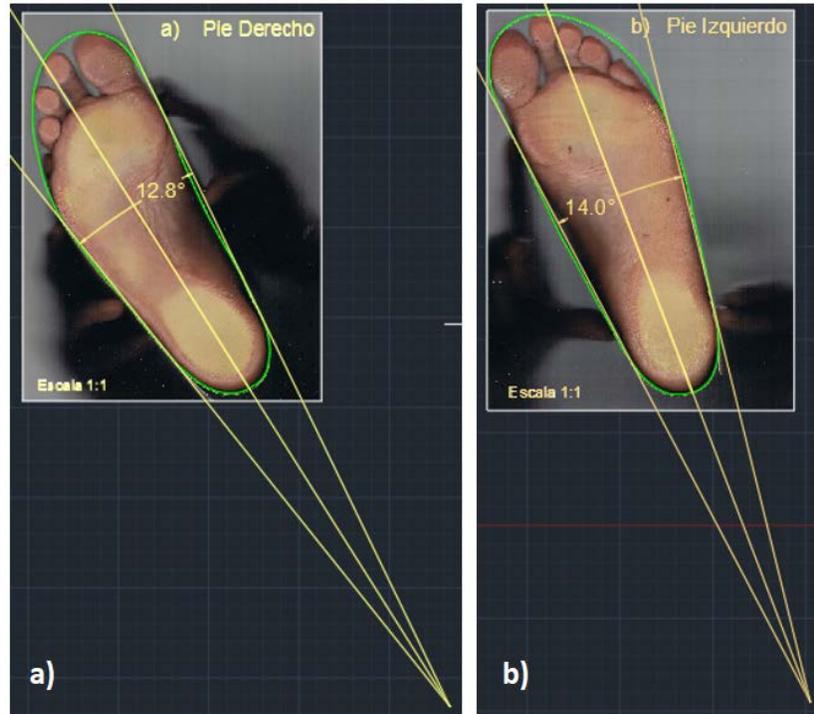
IV.2.3.2. Trazo del eje de simetría de la huella del pie

En los estudios del doctor Ledos (Viladot 2001, p. 43)¹⁰⁶, había llegado a la conclusión de que el pie está inscrito en un ángulo de 12°; donde, uno de sus lados pasa por el quinto metatarso y el otro por el hueso navicular del empeine. Sin embargo, nos es el único hay diferentes ejes en el pie ver el anexo 1 (para una mayor información y comprensión del tema). **En este trabajo de tesis y como una propuesta personal, el concepto del ángulo del pie antes mencionado se retoma, pero con otro enfoque, es decir a partir de la huella se construye un nuevo eje.** Al construir éste ángulo sus lados deben ser tangentes en la zona del recio y a la zona del talón, el contorno trazado del pie anteriormente ayuda para tal propósito; éstos lados dibujados se prolongan por detrás del pie hasta formar el

¹⁰⁶ Viladot, A. (2001). *Patología del antepié*. España. Springer-Verlag, 4ª edición.

vértice. Ya con el ángulo formado, se traza su bisectriz; la cual ésta se convierte en el eje de simetría de la huella, ver la ilustración siguiente.

Ilustración 49. El eje de simetría en el pie



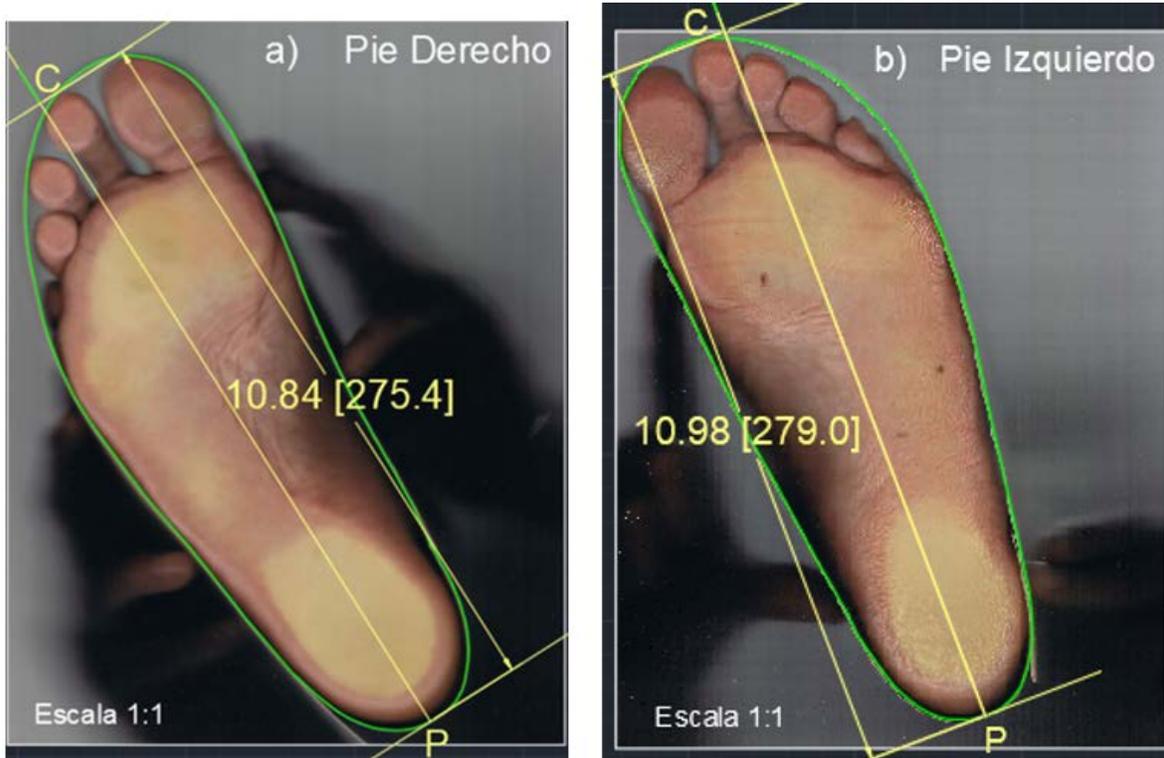
Elaboración propia en Autocad versión 17.

En la ilustración anterior, se puede apreciar que el ángulo formado en el pie derecho tiene una medida de 12.8° y para el izquierdo de 14.0° ; también se puede apreciar el eje de simetría para cada pie; el cual pasa entre el segundo y el tercer dedo. Diferente a lo que tradicionalmente se maneja por diseñadores y fabricantes de hormas, donde el eje pasa sobre el segundo dedo.

IV.2.3.3. El parámetro inicial o longitud del pie

Al haber trazado el eje de simetría y la periferia del pie; el siguiente paso es determinar la longitud del pie. Por lo que la longitud en autocad es de 275.4 mm en el pie derecho y de 279 mm en el izquierdo, quedando dicha distancia entre los puntos P-C como lo muestra la ilustración siguiente.

Ilustración 50. El parámetro inicial o la longitud del pie



Elaboración propia en Autocad versión 17

IV.2.4. Manejo de datos

Como se puede apreciar, determinar las medidas del pie en autocad es una tarea sencilla; pero hay un instrumento llamado Brannock exclusivo para medir la talla. En esta sección se hace una comparación entre las medidas obtenidas del instrumento mencionado y la nueva metodología, para encontrar posibles desviaciones en las lecturas. Por lo que se proponen dos posibles hipótesis de contraste

Como hipótesis nula H_0 :

¿Es sumamente confiable utilizar una imagen escaneada para ser trabajada en autocad?, considerando un nivel de significancia del 95%.

Como hipótesis alternativa H_1 :

Si una medida cae fuera del nivel de significancia propuesto (95%) desechar tal procedimiento.

Diseño del experimento

1. Se registra la longitud del pie de acuerdo a lo establecido en autocad, ver tabla 13.
2. Se realizan diez medidas de la longitud del pie con el instrumento Brannock y se registran en la tabla 14 y 15 respectivamente.
3. Se analizan dichos datos a través del contraste de hipótesis con la llamada distribución t de student, para pequeñas muestras.
4. Se establece el grado de confianza.

Con la metodología propuesta, se realizó lo siguiente: La imagen escaneada se digitalizada en la computadora y posteriormente se importa en autocad en un archivo PDF de alta resolución para trabajarlo con una escala de 1:1 y se acota la huella, obteniendo los siguientes resultados.

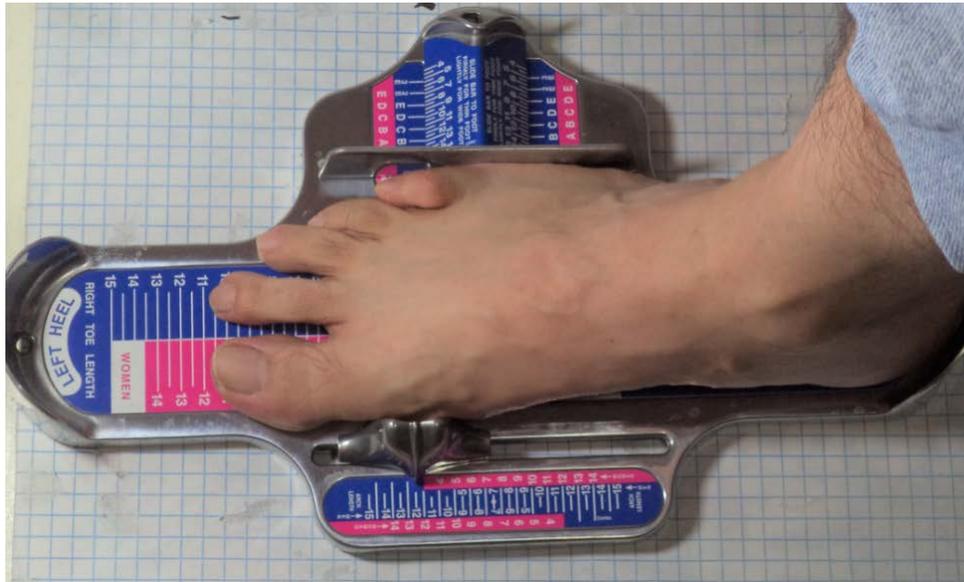
Tabla 13. Longitud de los pies

PIE DERECHO		PIE IZQUIERDO	
Talla: 29 1/5	Longitud: 275.4 mm	Talla: 29 1/5	Longitud: 279 mm

Elaboración propia, la longitud de los pies fueron determinadas de las imágenes escaneadas y que posteriormente fueron trabajadas en autocad. La talla del pie fue consultada en la tabla 11.

Por lo que dentro del diseño del experimento se ha formulado dos hipótesis estadísticas con la finalidad de aceptar o rechazar dicho procedimiento de acuerdo al grado de precisión. Con el instrumento Brannock device, se realizan diez mediciones como se muestra en la siguiente figura.

Ilustración 51. Medición de la talla del pie derecho



Fotografía propia, se determinó la talla del pie con el dispositivo de medición Brannock. Datos del dispositivo: Genuine Brannock Device; Syracuse NY, combination model.

En las siguientes tablas se registraron las medidas efectuadas por el instrumento de medición.

Tabla 14. Las medidas obtenidas con el Brannock para el pie derecho

274 mm	277 mm	276 mm	274 mm	275 mm
277 mm	275 mm	274.5 mm	273 mm	276 mm

Elaboración propia. Nota: El instrumento Brannock nos da la talla más no la longitud del pie, por lo que es necesario obtener su equivalencia en centímetros y restarle 15 mm para obtener la longitud aproximada del pie.

Tabla 15. Las medidas obtenidas con el Brannock para el pie izquierdo

278.9 mm	279.2 mm	278 mm	279.8 mm	280 mm
278.5 mm	278 mm	280.5 mm	279.4 mm	278.4 mm

Elaboración propia. Nota: El instrumento Brannock nos da la talla más no la longitud del pie, por lo que es necesario obtener su equivalencia en centímetros y restarle 15 mm para obtener la longitud aproximada del pie.

A continuación, se desarrollan las operaciones; como media “ μ ” se considera la medida obtenida en autocad;

Media muestral: $\bar{y} = \frac{\sum y}{n}$

Pie derecho $\bar{y} = \frac{274+277+276+274+275+277+275+274.5+273+276}{10} = 275.15 \text{ mm}$

Pie izquierdo $\bar{y} = \frac{278.9+279.2+278+279.8+280+278.5+278+280.5+279.4+278.4}{10} = 279.07 \text{ mm}$

Desviación típica: $s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}{n}}$

Pie derecho

$$s =$$

$$\sqrt{\frac{(274-275.15)^2+(277-275.15)^2+(276-275.15)^2+(274-275.15)^2+(275-275.15)^2+(277-275.15)^2+(275-275.15)^2+(274.5-275.15)^2+(273-275.15)^2+(276-275.15)^2}{10}}$$

$$s = 1.26 \text{ mm}$$

Pie izquierdo

$$s =$$

$$\sqrt{\frac{(278.9-279.07)^2+(279.2-279.07)^2+(278-279.07)^2+(279.8-279.07)^2+(280-279.07)^2+(278.5-279.07)^2+(278-279.07)^2+(280.5-279.07)^2+(279.4-279.07)^2+(278.4-279.07)^2}{10}}$$

$$s = 0.81 \text{ mm}$$

Para un contraste de dos colas; bajo la hipótesis H_0 , se tiene:

$$t = \frac{(\bar{Y} - \mu)}{s} \sqrt{n - 1}$$

$$t = \frac{(275.15-275.4)}{1.26} \sqrt{10 - 1} = -0.59 \text{ pie derecho}$$

$$t = \frac{(279.07-279)}{0.81} \sqrt{10 - 1} = 0.25 \text{ pie izquierdo}$$

Para un nivel de significancia del 95% y 9 grados de libertad, el intervalo que da la tabla t de Student de un libro de estadística es de +/- 1.83, por lo que los valores obtenidos con el instrumento de medición y el valor obtenido de la imagen escaneada del pie en autocad cumplen con la hipótesis nula H_0 .

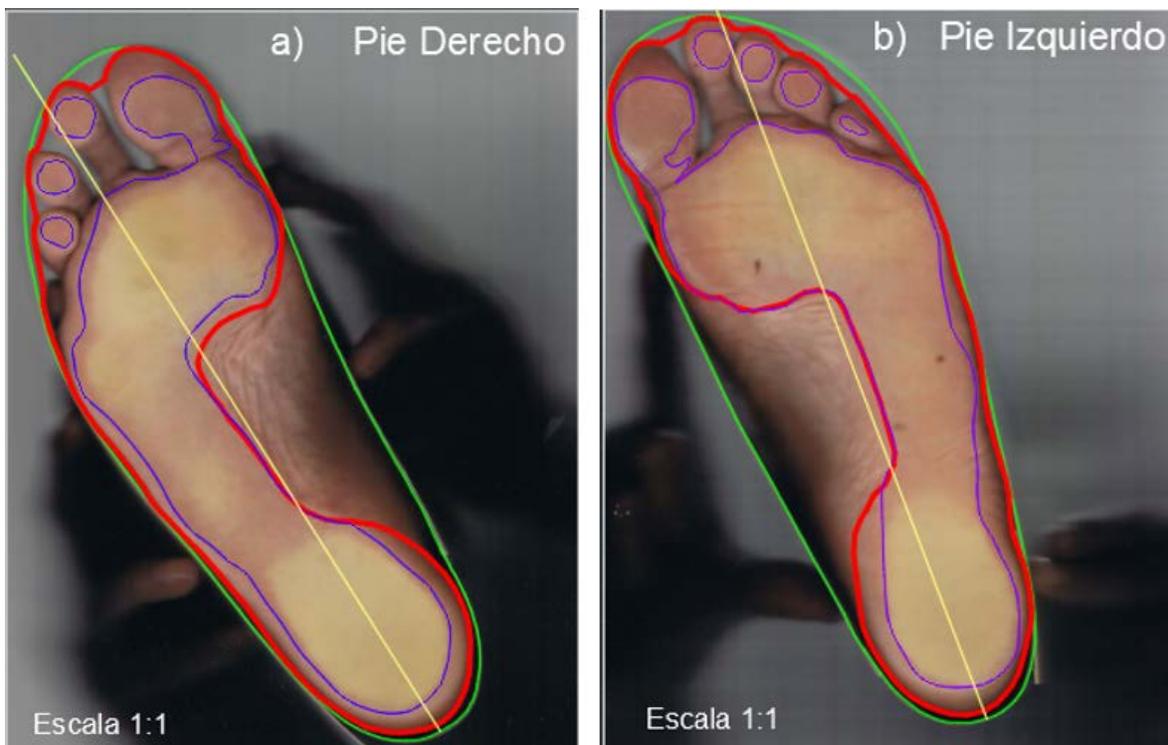
IV.3. Relación entre la huella y la periferia del pie

Una actividad dentro de ésta metodología es diferenciar el contorno de la huella y lo que representa la periferia del pie pues esto dará la pauta para proponer la planta de la horma.

IV.3.1. Delimitación de la huella del pie

Volviendo al sistema autocad, se resalta por medio de una línea en color rojo las partes donde apoya el pie; ahí se observan zonas de color más claro, por lo que es necesario delimitar por segunda vez ahora en color morado, dando por resultado la similitud que se tiene con la técnica del podograma que en medicina se usa ampliamente, ver el anexo 3. Ahora se puede visualizar cuales son las partes de contacto que tiene el pie con el suelo y por su puesto nos da una idea donde se ejerce mayor presión y la distribución de la carga, ver el anexo 4.

Ilustración 52. La huella del pie



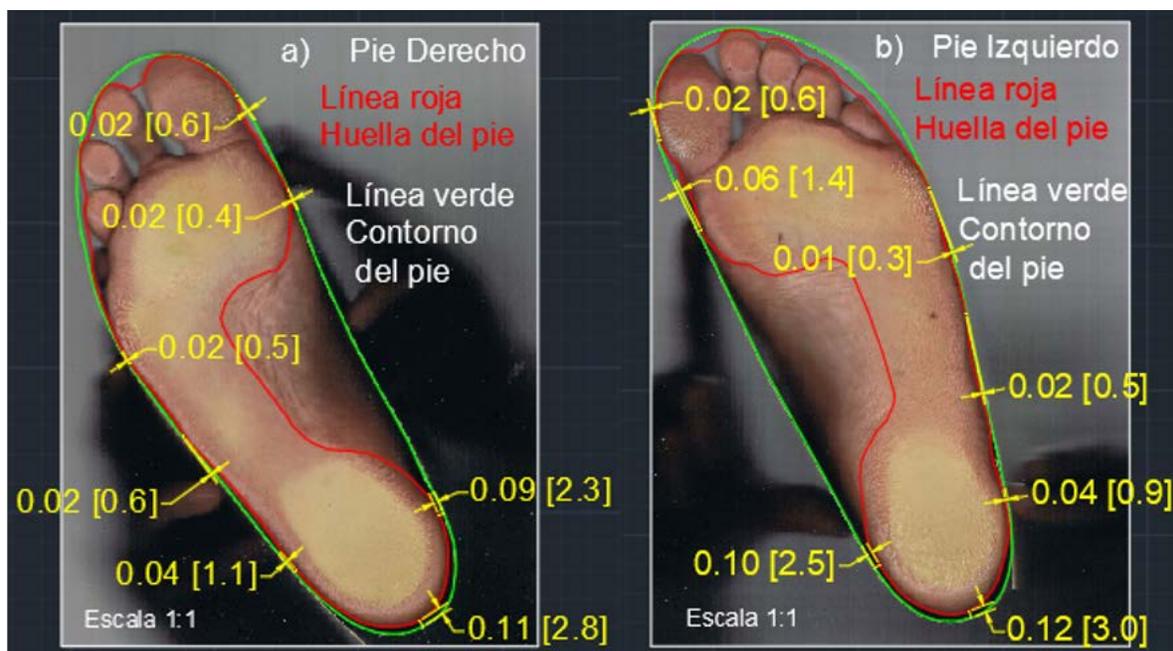
Fuente: Elaboración propia, inciso a) y b); En color rojo los límites de la huella y en color morado las partes de mayor contacto con el suelo

IV.3.2. La aparente holgura entre la huella y la periferia

Entre la huella (línea roja) y la línea periférica (en verde), hay puntos donde estas dos se aproximan demasiado y aparentan cierta holgura que no existe, debido a la redondez en el contorno del pie y al juego de sombras que dan una perspectiva de lejanía.

Determinar la aparente holgura alrededor del pie es esencial para entender las dimensiones que debe tener la horma. A continuación, se menciona cada una y en amarillo se resaltan las más significativas: Para el pie derecho en la zona medial del talón hay 2.3 mm, en su lateral 1.1 mm y en la cara posterior 2.8 mm; ya en la zona del empeine, en su cara lateral existe 0.6 mm; en la zona del recio lateral 0.5 mm y medial 0.6 mm; por último, en la zona del 1er dedo hay 0.6 mm; ver la ilustración siguiente. Cabe resaltar que entre ambos pies existe una diferencia en la zona del 1er metatarso de 1 mm de diferencia

Ilustración 53. Falsa holgura en los pies



Fuente: Elaboración propia en Autocad versión 17. Las cotas en amarillo están en pulgadas y entre paréntesis se indica su equivalencia en milímetros. En el inciso a) se expone el pie derecho y para el inciso b) el pie izquierdo.

IV.4. El parámetro inicial y la horma

Al haber establecido la aparente holgura y la longitud del pie ya se puede encontrar *la longitud de la planta y la longitud total de la horma*, la cual se verá en los siguientes apartados.

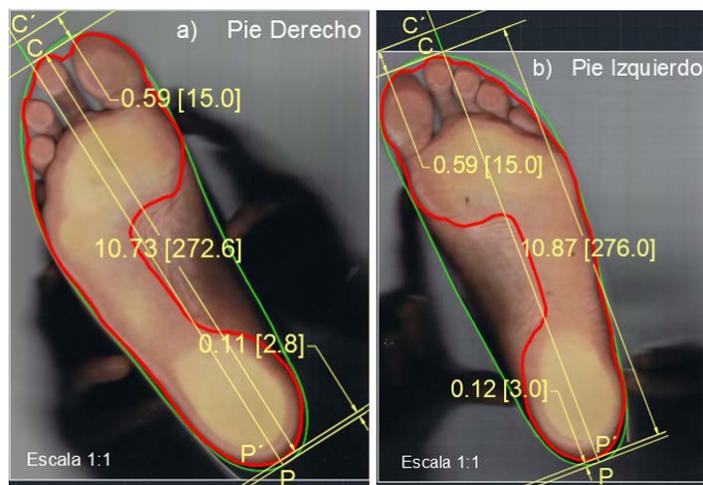
IV.4.1. La longitud de la planta en la horma

Para obtener la *longitud de la planta de la horma*, en el caso del pie derecho se toma la longitud de la huella que es de 272.6 mm que está entre los puntos P'-C y se le adiciona 15 mm de espacio para dar libertad de extender los dedos (esto se explicarán a detalle en el capítulo V); por lo que resulta 287.6 mm ahora de P' a C'. Siguiendo el mismo procedimiento, el pie izquierdo da una longitud de 291 mm entre los puntos P' y C'. Ver ilustración siguiente, incisos a) y b).

IV.4.2. La longitud total de la horma

A partir de la longitud de la planta de la horma se adiciona la aparente holgura del talón y se obtiene *la longitud total de la horma*; o sea a la longitud de 287.6 mm más 2.8 mm dan por resultado 290.4 mm y para el pie izquierdo con el mismo procedimiento se obtiene 294 mm. Ahora queda entre los puntos P y C', ver ilustración siguiente, incisos a) y b).

Ilustración 54. Longitud de la huella



Fuente: Elaboración propia

De manera ilustrativa, se muestran las tres medidas con diferente color en la siguiente figura.

Ilustración 55. La planta y sus tres medidas



Fuente: Elaboración propia con trazos efectuados en autocad ver. 17

Capítulo V. La planta de la horma: un diseño personalizado

Ya con la metodología para encontrar un nuevo eje y habiendo encontrado algunas longitudes básicas entre ellas la del pie, en este capítulo toca el turno de parametrizar al pie, desde el talón hasta los dedos, auxiliado por medio de tres sistemas de diseño; con ello se podrá determinar la utilidad del nuevo eje y las posibles diferencias con el eje tradicional. Además, ésta parametrización forjará las bases para elaborar la silueta de la planta de la horma.

V.1. Sistemas base para la parametrización del pie

Hay ciertos parámetros del pie que no son fáciles de medir a simple vista, por lo que es necesario auxiliarse de los parámetros sugeridos en los sistemas de diseño (WMS-AKA64, sistema ruso y el que propone Luximon); los cuales se describieron en el capítulo II y III.

En este apartado se propone una nomenclatura nueva para normalizar y unificar los criterios que cada sistema propone; para que sean más fácil de manejar. La propuesta es que cada letra y nombre se defina de acuerdo a su ubicación; por ejemplo, M si está en el metatarso adicionando la letra M o L según si es del lado medial o lateral, además es necesario considerar un color específico para cada sistema; por ejemplo, azul para el sistema Luximon, anaranjado para el sistema ruso y azul claro para el WMS-AKA64. A continuación en la tabla 16 se concentran dichos parámetros con la nomenclatura propuesta.

Tabla 16. Comparativo de parámetros y nomenclatura propuesta

#	DESCRIPCIÓN	SISTEMA			Entre puntos
		LUXIMON	AKA64	RUSO	Nomenclatura propuesta
HUELLA (FOOTPRINT)					
1	Longitud de la huella (del talón a los dedos)	OF	AD	1L	P-C
TALÓN (HELL)					
2	Longitud del talón	0.167*OF	-	0.18*L	P-T
3	Ancho del talón	-		0.18*L	M-L y M'-L'
4	Longitud transversal del talón con 2o eje	-		-	
EMPEINE/INSTEP					
5	Longitud hasta el empeine	0.40*OF		0.42*L	P-E y P'-E'
6	Circunferencia del empeine (IG)	Según medición	Según medición	0.55*L	
7	Ancho lateral del empeine	0.16*IG	-	-	E-L y E'-L'
8	Ancho medial del empeine	0.472*(0.16*IG)	-	-	E-M y E'-M'
RECIO/BALL					
9	Longitud del talón al 5o metatarso	0.628*OF	-	0.62*L	P-r y P'-r'
10	Longitud del talón al 1er metatarso	0.72*OF	-	0.73*L	P-R y P'-R'
11	Long. del talón a la diagonal de los metatarsos	0.682*OF	0.63*AD	-	P-Q y P'-Q'

12	Circunferencia del recio (BG)	Según medición	Según medición	Según medición	
13	Ancho del 5o metatarso al eje simétrico	0.222*BG	-	0.62*L	r-L y r'-L'
14	Ancho del 1er metatarso al eje simétrico	0.157*BG	-	0.62*L	R-M y R'-M'
15	Diag. 5o dedo hasta el eje simétrico	-	0.23*BG	-	L-Q y L'-Q'
16	Diag. 1er metatarso hasta el eje simétrico	-	0.15*BG	-	M-Q y M'-Q'
DEDOS/TOES					
17	Long. del talón al 5to dedo	0.776*OF	-	0.8*L	P-d y P'-d'
18	Ancho del 5to dedo al eje simétrico	0.212*BG	-	-	d-L y d'-L'
19	Long. del talón hasta el 1er dedo	0.899*OF	-	0.9*L	P-D y P'-D'
20	Ancho del 1er dedo al eje simétrico	0.145*BG	-	-	D-M y D'-M'
21	Cámara para los dedos	15 mm	15-18 mm t.>31	EPL	C-C'
ÁNGULO DE DEDOS/TOES ANGLE					
22	Ángulo entre el eje longitudinal y el eje de presión	6°	6°	7-9°	
23	Ángulo del 1er dedo	100.8°	96° t.27-35	-	< MM
24	Ángulo del 5o dedo	71.9°	71° t.>27	-	< ML
25	Ángulo entre eje longitudinal con el 1er metatarso	75.4°	74°	-	< O

Fuente: Tabla elaborada con datos tomados de Mauch (2007), Gordeyeva (1998) y Luximon, A. & Luximon, L. (2009).

V.2. Parámetro del talón

Los parámetros se calcularán de acuerdo a cada sistema, anotando su nomenclatura y el color asignado.

V.2.1. Longitud del talón

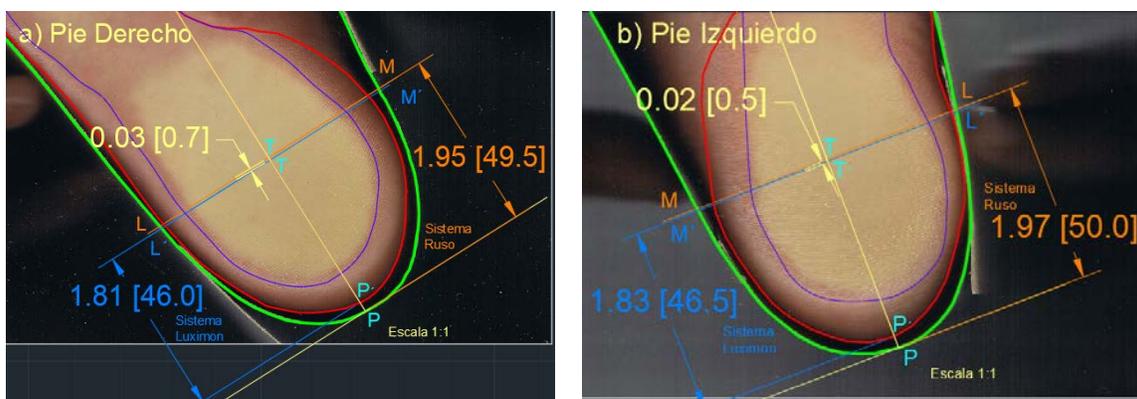
Para obtener *la longitud del talón* se usan los datos de la tabla 16, ítem número 2. Se empieza con el sistema ruso y el cálculo queda así, a la longitud del pie que es de 275.4 mm se le multiplica la constante 0.18, dando por resultado 49.5 mm, esta longitud se ubica sobre el nuevo eje, partiendo del punto P y al final de la longitud se le asigna la letra T; entonces *la longitud del talón* queda comprendida entre estos dos puntos, Para el sistema Luximon el cálculo es similar, sólo que la constante que propone es de 0.167, la cual al ser multiplicada por la longitud del pie 275.4 mm da por resultado 46.0 mm, esta longitud se ubica entre los puntos P' y T' para

diferenciarlos del sistema anterior; sólo que en color azul. Estos cálculos hasta el momento son únicamente para el pie derecho.

Es necesario enfatizar que para el sistema ruso las longitudes se inician a partir de la periferia del pie (línea verde) y para el sistema Luximon se inicia a partir de la huella (línea roja); ver ilustración 55, inciso a).

Para el pie izquierdo, los cálculos se efectúan de la misma forma y los resultados son los siguientes, para el sistema ruso *la longitud del talón* es: $0.18 \cdot (279 \text{ mm}) = 50.2 \text{ mm}$, ubicado entre los puntos P y T y para el sistema Luximon se tiene: $0.167 \cdot (279 \text{ mm}) = 46.5 \text{ mm}$, quedando entre P' y T'; ver ilustración siguiente, inciso b).

Ilustración 56. Longitud del talón



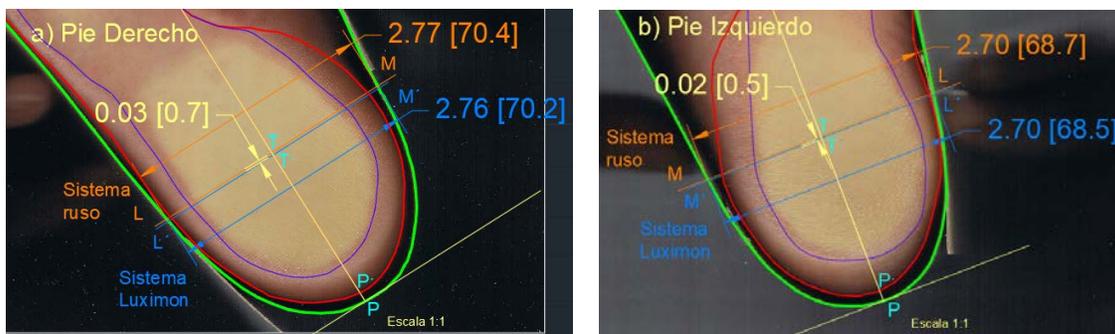
Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

V.2.2. Ancho del talón

Al haber establecido la longitud del talón con ambos sistemas y para ambos pies; el paso siguiente, es acotar *el ancho del talón*. Para realizar esto, se trazan una perpendiculares al eje de la huella a través de cada punto encontrado T y T'; esta perpendicular corta la periferia (línea verde) en ambos lados del pie y para una mejor identificación se le asigna la letra M si estamos hablando de la cara interna y L si es la externa; por lo que el ancho del talón queda comprendido entre los puntos M y L;

para el sistema Luximon quedaría entre los puntos M' y L'; utilizando la misma nomenclatura de color, ver la ilustración siguiente, incisos a) y b).

Ilustración 57. Ancho del talón



Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

Al observar las perpendiculares que pasan por T y T', se puede apreciar que ambas líneas están muy próximas con apenas 0.7 mm de separación; por lo que el *ancho del talón* casi tiene la misma longitud en ambos sistemas (70.4 mm y 70.2 mm) para el pie derecho y para el izquierdo (68.7 mm y 68.5 mm); ver ilustración anterior, incisos a y b. Por lo que se cumple con el parámetro número 2 y 3 de la tabla 16.

Como nota adicional el retropié tiene un hueso llamado astrágalo que tiene la función de soportar el peso de todo el cuerpo que imprime la tibia y el peroné e inmediatamente por debajo de él se encuentra el hueso calcáneo el cual da forma al talón y es el responsable de hacer contacto con el suelo; para mayor información ver anexo 5.

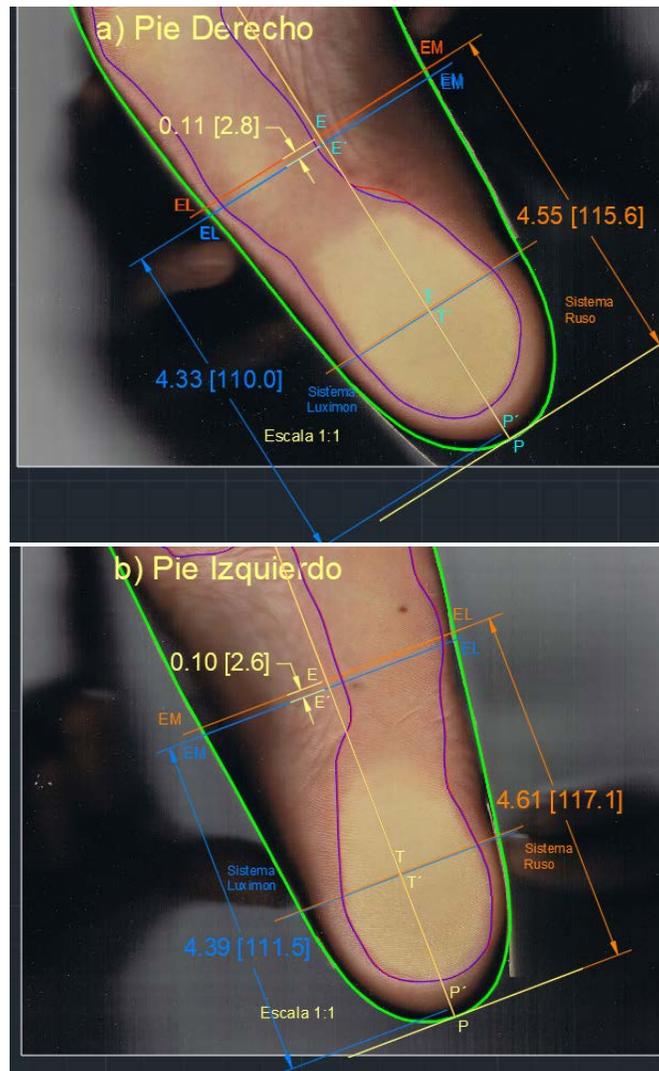
V.3. Parámetro del empeine

Al igual que en los parámetros del talón, existe un parámetro llamado *longitud del empeine* que debe ser calculado y posteriormente el *ancho del empeine*; para entender la peculiaridad de su forma es necesario conocer la estructura del pie, se recomienda ver el anexo 5 donde se muestra de manera explícita cada sección de la extremidad. Al igual que en la sección del talón éste se especificará entre qué puntos se encuentra su longitud con su respectivo código de colores.

V.3.1. Longitud del empeine

Para calcular tal longitud se toma el parámetro 5 de la tabla 16. El cálculo siguiendo el mismo orden de sistemas y de pies es: a 275.4 mm se le multiplica la constante 0.42, el resultado es 115.6 mm; parte del punto y donde llega se le asigna el punto E. Para el otro sistema a la longitud de 275.4 mm se le multiplica la constante 0.40 y da por resultado 110.1 mm; ubicándose entre los P' y E', ver ilustración siguiente, inciso a). El mismo procedimiento se repite para el pie izquierdo, con el primer sistema da $(279 \text{ mm}) * 0.42 = 117.1 \text{ mm}$ entre los puntos P y E y con el segundo da $(279 \text{ mm}) * 0.40 = 111.6 \text{ mm}$, entre P' y E'; Es necesario mencionar que la diferencia entre estos dos sistemas es de 2.6 mm; ver ilustración siguiente, inciso b).

Ilustración 58. Longitud del empeine



Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

V.3.2. Ancho del empeine

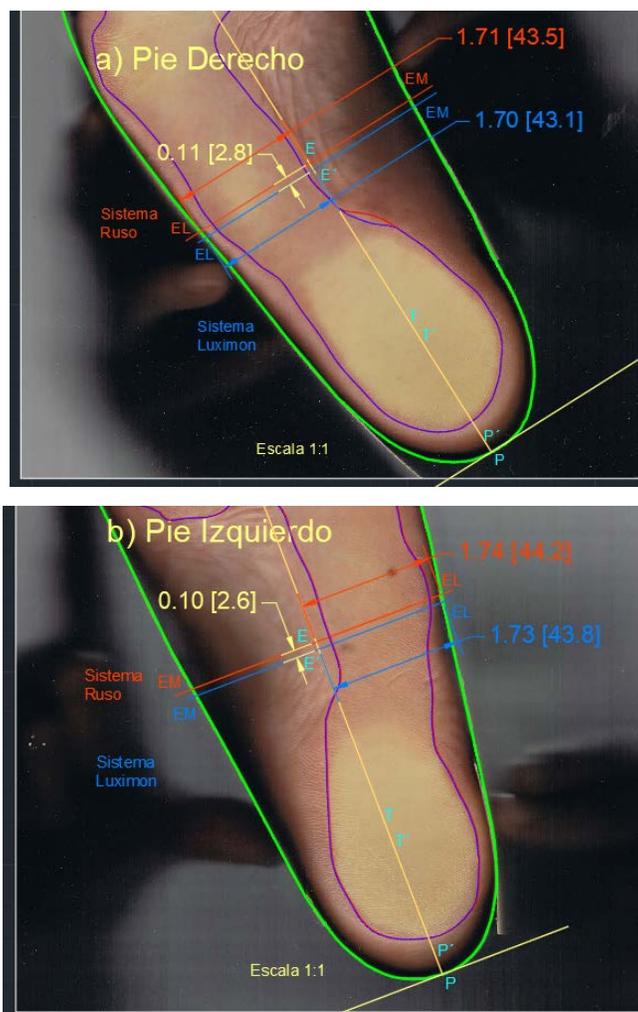
El *ancho del empeine* se determina después de haber calculado su longitud. La determinación de dicha magnitud es igual a la del talón, se trazan perpendiculares a través de los puntos encontrados E y E', hasta intersectar el contorno de la periferia (línea verde); siguiendo el mismo procedimiento, con el primer sistema se obtiene 43.5 mm de ancho entre los puntos E y L y con el segundo sistema se obtiene 43.1 mm, entre los puntos E' y L'; ver ilustración siguiente, inciso a). Para

el empeine medial se le asignó 18.7 mm a criterio a partir del eje geométrico (zona del arco del pie).

Para el pie izquierdo los resultados fueron los siguientes; 44.2 mm, entre los puntos E y L; y 43.8 mm entre E' y L'); ver ilustración siguiente, inciso b).

Es necesario mencionar que las magnitudes obtenidas, tienen la finalidad de localizar dos huesos muy importantes, el primero es la base del 5º metatarso (cara externa del pie) y el segundo es el hueso navicular (parte interna del pie); además se han cumplido con los parámetros 5, 7 y 8 de la tabla 16.

Ilustración 59. Ancho del empeine



Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

V.4. Parámetros del recio

El recio es una articulación formada por las cabezas de los metatarsos y la base de los dedos. Para ubicar la longitud del 1er metatarso situado en la cara medial y la longitud del 5º metatarso en la cara lateral; cada sistema ha propuesto su propio parámetro, que a continuación se explica.

V.4.1. Longitud al 1er metatarso

Para calcular la longitud del 1er metatarso del pie derecho, se toma el ítem 10 de la tabla 16; con el sistema ruso la operación es la siguiente, a la longitud del pie de 275.4 mm se le multiplica la constante 0.73 y da como resultado 201 mm, esta longitud queda representada entre los puntos P y R (color anaranjado). Con Luximon se usa en la operación, la constante 0.72, de esta manera $(275.4 \text{ mm}) \cdot 0.72$ da por resultado 198.3 mm, tal magnitud queda comprendida entre los puntos P' y R' (color azul); ver ilustración siguiente, inciso a).

Para el pie izquierdo, el resultado con el sistema ruso es de 203.5 mm entre los puntos P y R y con Luximon de 200.7 mm entre P' y R'. Al comparar la ubicación de los resultados para ambos pies, se puede apreciar que coinciden en el mismo sitio; ver la ilustración siguiente, inciso b).

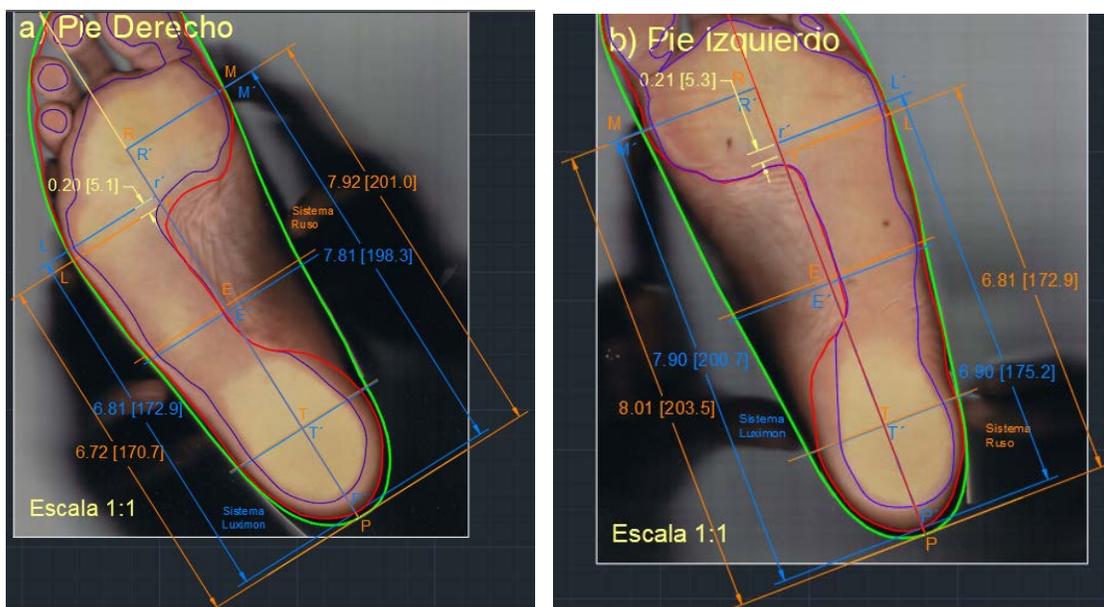
V.4.2. Longitud hasta el 5º metatarso

Ahora toca el turno de explicar el cálculo para encontrar la *longitud del talón* hasta el 5º metatarso, como es habitual se empieza con el pie derecho; es decir, a la longitud del pie 275.4 mm se le multiplica la constante 0.62 del sistema ruso y da por resultado una longitud de 170.7 mm, representado entre los puntos P y r (en color anaranjado); ver ilustración siguiente, inciso a). Con el sistema Luximon la operación es la siguiente $(275.4) \cdot 0.628$ da por resultado 172.9 mm, entre los puntos

P' y r' (en color azul). Para éste parámetro existe una diferencia de 5.1 mm entre un sistema y otro.

En el caso del pie izquierdo, se sigue el mismo orden y la misma nomenclatura, el cálculo es $(279) \cdot 0.62$ con longitud de 172.9 mm, entre los puntos P y r, (en color anaranjado) y con el sistema Luximon el cálculo es $(279) \cdot 0.628$ con resultado de 175.2 mm entre los puntos P' y r', (en color azul); también se resalta que la diferencia entre estos dos parámetros es de 5.3 mm respectivamente; ver la ilustración siguiente, inciso b).

Ilustración 60. Parámetros del recio



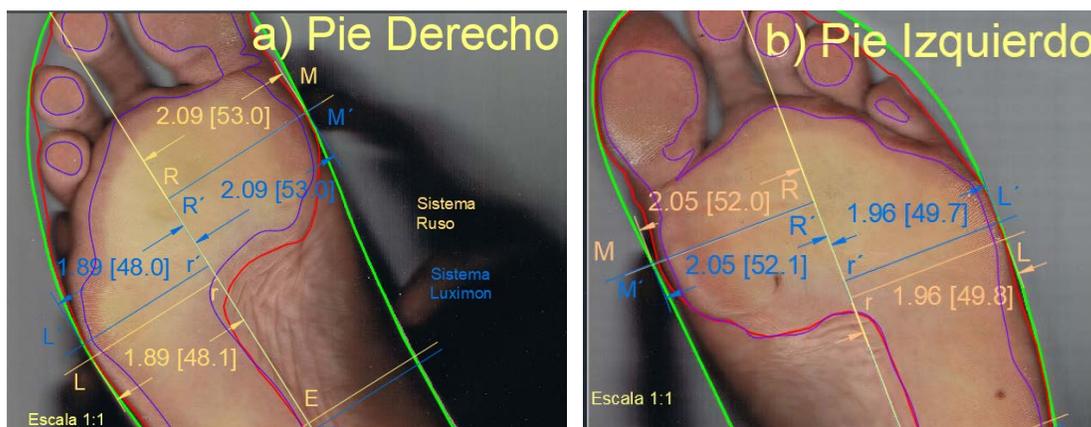
Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

V.4.3. Ancho del recio perpendicular al eje

Para obtener el *ancho del recio*, nos auxiliaremos de los puntos encontrados sobre el eje de simetría que son R y r para el sistema ruso y de los puntos R' y r' para el sistema Luximon, a través de estos se traza una perpendicular hasta intersectar el contorno de la huella y la periferia, a estos puntos se les llama M y L. Por lo tanto,

al determinar el ancho del recio sumamos dos secciones, una ubicada entre los puntos R y M y la otra entre los puntos r y L. Por ejemplo, para el pie derecho con los resultados del sistema ruso, se tiene lo siguiente: a 53 mm se le suma 48.1 mm y da por resultado 101.1 mm, (color anaranjado). Con los datos obtenidos del sistema Luximon y para el mismo pie, la operación es 53 mm más 48 mm da por resultado 101 mm, (color azul); sólo 0.1 mm de diferencia entre ambos sistemas. Se repite el procedimiento para el pie izquierdo, con el sistema ruso se tiene 52 mm más 49.8 mm se tiene un ancho de 101.8 mm y con Luximon se tiene 52.1 mm más 49.7 mm es igual a 101.8 mm; ver la ilustración siguiente, inciso a) y b).

Ilustración 61. Ancho del recio perpendicular al eje

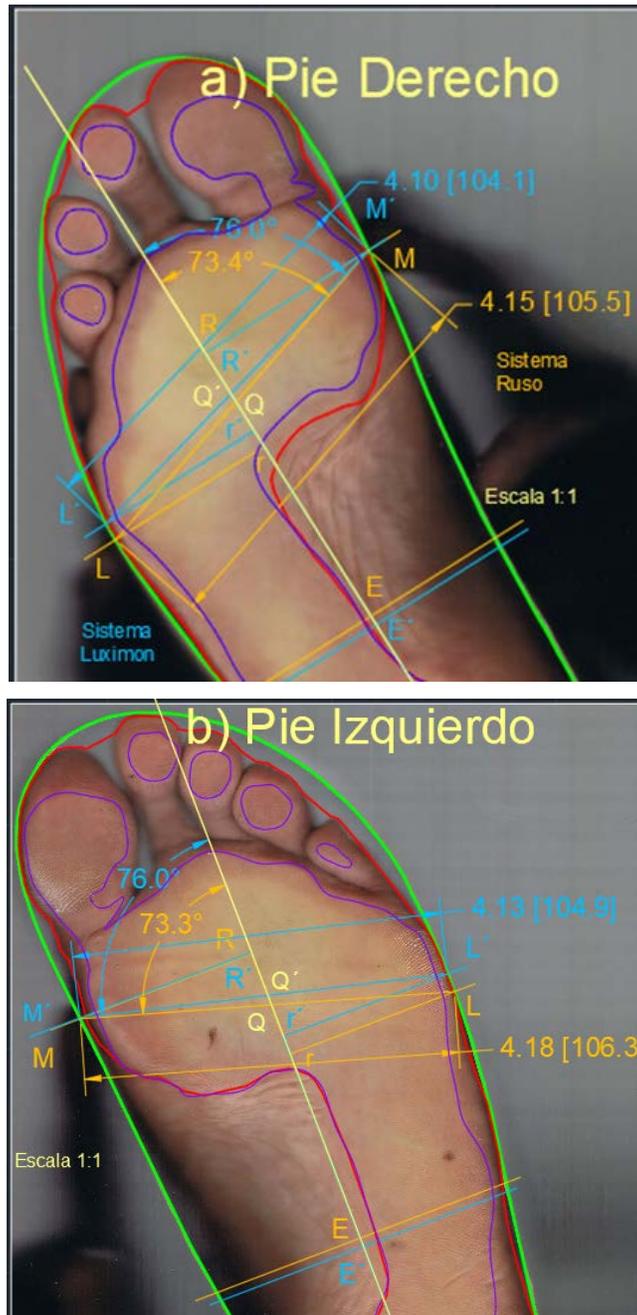


Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

V.4.4. Ancho del recio desde el primer al quinto metatarso

Otra manera de medir el ancho del recio es a través de la diagonal representada entre los puntos M y L; la cual a continuación se va a determinar para cada sistema. El ancho para el pie derecho con el sistema ruso es de 105.5 mm y con el sistema Luximon es de 104.1 mm. Para el pie izquierdo y siguiendo el mismo procedimiento, se obtiene 106.3 mm y 104.9 mm de ancho respectivamente; ver la ilustración siguiente, inciso a) y b).

Ilustración 62. Ancho del recio en forma diagonal al eje



Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

Las diagonales entre los puntos M y L así como M' y L' representan el ancho del recio y cada uno corta al eje de simetría en los puntos Q y Q' respectivamente; Otro aspecto importante es el ángulo que forma cada diagonal con el eje de simetría, en

el pie derecho con el sistema ruso da 73.4° y con Luximon 76° . Para el pie izquierdo siguiendo el mismo orden el ángulo fue de 73.3° y de 76° con el otro sistema.

Por lo que se cumple con los parámetros 9, 10, 13, 14, 15, 16.

V.5. Parámetros de los dedos

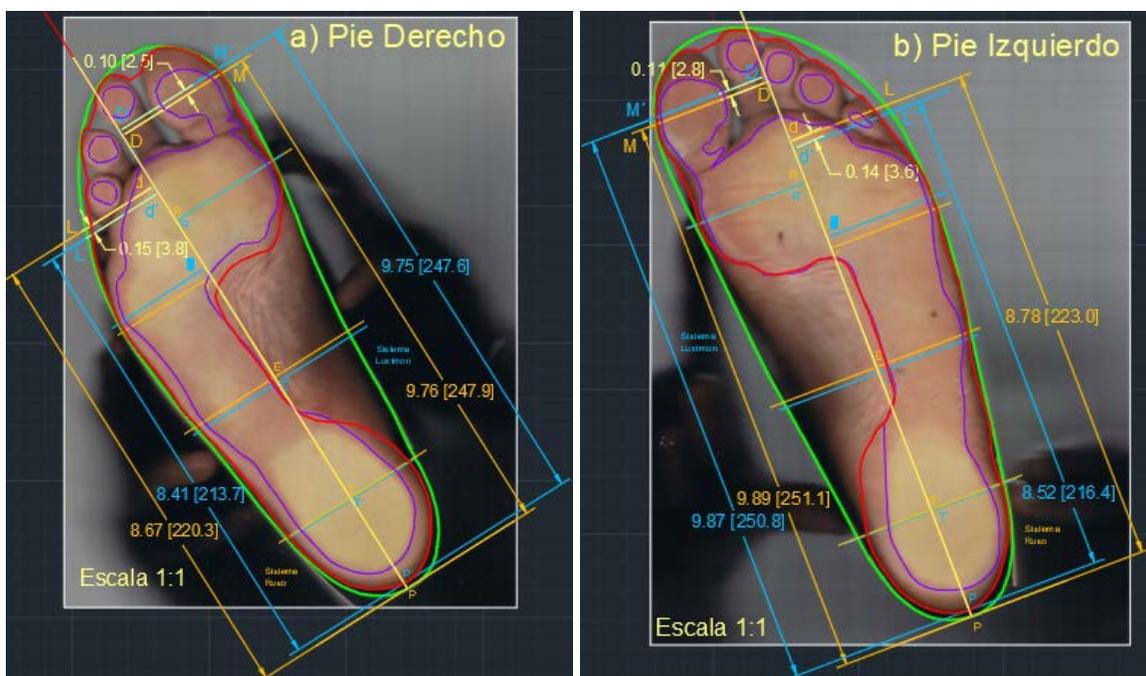
Para determinar los parámetros de los dedos es necesario primero calcular la longitud que hay del talón al 1er dedo (dedo gordo) y del talón al 5º dedo (dedo pequeño), posteriormente se determina el ancho que existe entre estos dos dedos tomando como referencia el eje de simetría; todo esto con la intención de establecer los puntos necesarios para el diseño. Enseguida se explica a detalle.

V.5.1. Longitud de los dedos

La *longitud de los dedos* se mide desde el talón hasta el punto donde se encuentra la articulación de la primera falange del dedo. El cálculo para el primer dedo es como sigue, a la longitud del pie 275.4 mm se le multiplica la constante 0.9 y da por resultado 247.9 mm, considerando esta distancia entre los puntos P y D, recordando que el sistema ruso se representa en color anaranjado; con el sistema Luximon se sigue el mismo procedimiento pero se utiliza otra constante; por lo cual, queda así a 275.4 mm se le multiplica 0.899 dando por resultado 247.6 mm, esta distancia se ubica entre P' y D', en color azul; la diferencia entre una longitud y la otra es de 2.5 mm; ver la ilustración siguiente, inciso a). Siguiendo con el pie derecho, el cálculo para el quinto dedo, es el siguiente a la longitud del pie que es 275.4 mm se le multiplica la constante del sistema ruso (0.8) por lo que el resultado es de 220.3 mm; quedando esta magnitud entre los puntos P y d. Con el sistema Luximon se calcula igual, sólo que con otra constante; el cálculo queda así a 275.4 mm se multiplica por 0.776 y da por resultado 213.7 mm; esta longitud queda entre los puntos P' y d'; ver la ilustración siguiente, inciso a); la diferencia entre estas dos longitudes es de 3.8 mm.

El cálculo para encontrar la longitud hasta el primer dedo del pie izquierdo es la siguiente, a la longitud del pie 279 mm se le multiplica la constante 0.9 y el resultado da 251.1 mm; por lo que queda entre los puntos P y D, representado en color anaranjado. Con el sistema Luximon se calcula así 279 mm por 0.899 y el resultado es 250.8 mm, comprendido entre los puntos P' y D' en color azul; se puede apreciar que la diferencia entre las longitudes es de 2.8 mm; ver la ilustración siguiente, inciso b). El cálculo para encontrar la longitud hasta el quinto dedo con el sistema ruso se efectúa de esta manera a 279 mm que es la longitud del pie se le multiplica la constante 0.8 y da por resultado 223.2 mm; la longitud se ubica entre los puntos P y d, en color anaranjado y con el sistema Luximon a 279 mm se multiplica por 0.776 dando por resultado 216.5 mm; la longitud queda entre los puntos P' y d' en color azul; ver la ilustración siguiente, inciso b); entre estas dos longitudes se puede apreciar que existe una diferencia de 3.6 mm.

Ilustración 63. Longitud de los dedos



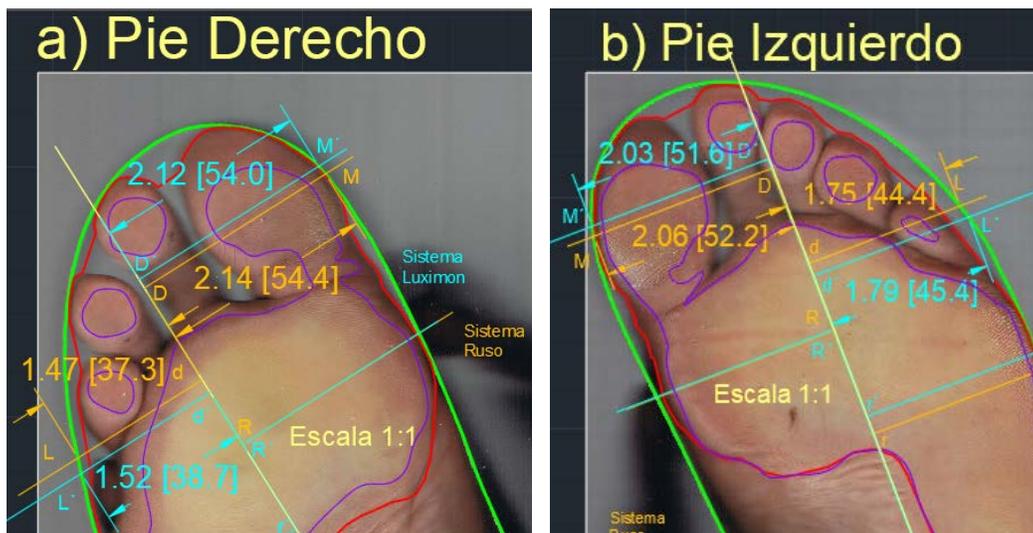
Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

Como se ha venido comentando, las distancias calculadas al primer dedo como al quinto coincide precisamente con su articulación; sin embargo, existen diferencias de apenas unos milímetros entre los dos sistemas. De acuerdo a lo realizado, es necesario apreciar y determinar las particularidades de los pies en estudio, con el objeto de valorar y decidir qué puntos son los más adecuados para considerar en el diseño de la planta de la horma la cual se verá en el apartado V.6.

V.5.2. Ancho de los dedos

Al haber calculado la longitud del primer y quinto dedo, el paso siguiente es determinar la magnitud que involucra el *ancho de los dedos*, pues éste parámetro es muy importante, ya que posteriormente será necesario establecer cierta amplitud de la horma que no impida la plena libertad de movimiento. Por el momento se determina el ancho de los dedos, ver la ilustración siguiente, inciso a) y b).

Ilustración 64. Ancho en la zona de los dedos



Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

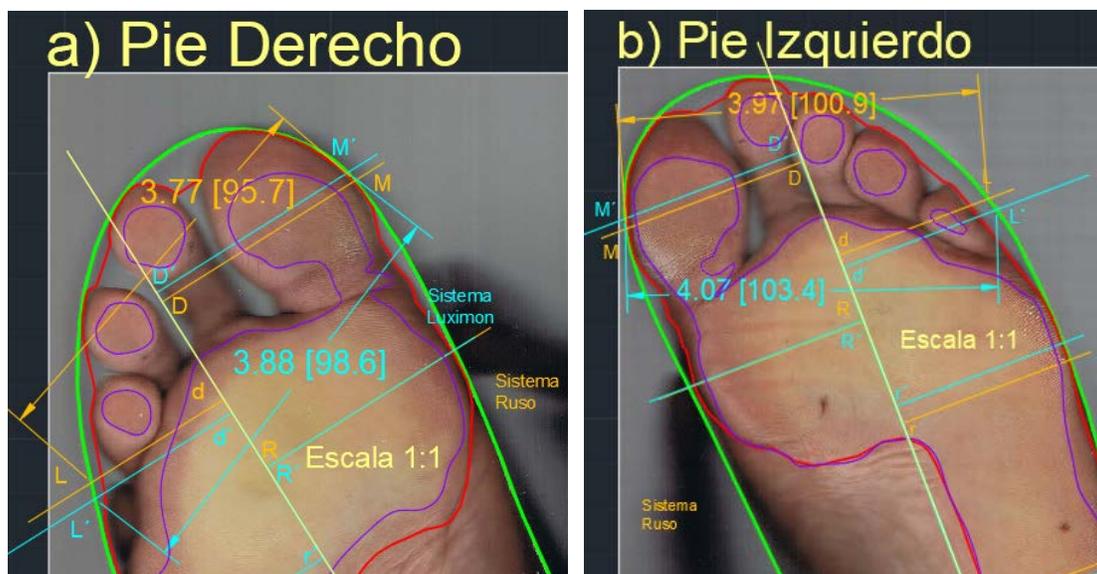
Como se puede apreciar en la ilustración anterior, en el sistema ruso el ancho para el pie derecho es el siguiente: del punto M a D tiene 54.4 mm y del punto L a D son

37.3 mm, (para una rápida ubicación se encuentran en color anaranjado); al sumar estas dos magnitudes dan un total de 91.7 mm que representan el ancho de los dedos. La suma para el sistema Luximon da un resultado de 92.7 mm, (mostrado en color azul). Se puede apreciar que existe una diferencia de apenas 1 mm entre los dos anchos. Para el pie izquierdo, siguiendo el mismo orden y la nomenclatura, se tiene que, para el sistema ruso el ancho es de 96.6 mm y para el sistema Luximon es de 97 mm, por lo que la diferencia es de tan sólo 0.4 mm entre estas dos medidas. Por otra parte, al comparar las dimensiones del pie derecho con el izquierdo existe una diferencia de aproximadamente 4.9 mm en el sistema ruso y de 4.3 mm con Luximon.

V.5.3. El ancho de los dedos de forma diagonal

Otra forma de medir el ancho de los dedos es encontrar la distancia que hay entre la primera articulación (dedo gordo) y la quinta articulación (dedo pequeño); esto es, entre los puntos M y L ó M' y L' de ambos sistemas.

Ilustración 65. El ancho de los dedos diagonalmente



Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

De acuerdo a la ilustración anterior la longitud de la diagonal del pie derecho para el sistema ruso (color anaranjado) es de 95.7 mm y para el sistema Luximon (color azul) es de 98.6 mm; se puede ver que hay una diferencia de 2.9 mm entre sistemas. En el pie izquierdo, con el sistema ruso la distancia es de 100.9 mm y para el sistema Luximon es de 103.4 mm con una diferencia de 2.5 mm. Al comparar las magnitudes entre pies se observa que es más ancho el pie izquierdo con 5.2 mm que el derecho con 4.8 mm comparado entre su mismo sistema.

Por lo tanto, se cumplió con los parámetros 17, 18, 19 y 20 de la tabla 16.

V.5.4. Ángulo de los dedos

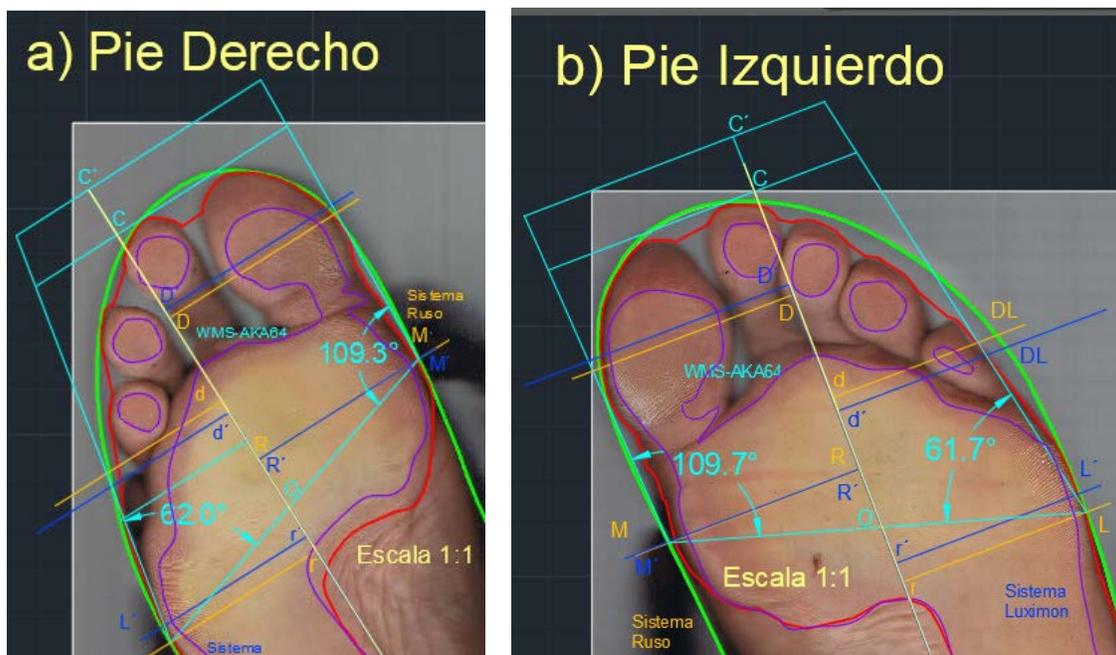
Los dedos del pie son de suma importancia; pues al igual que el tobillo, es una articulación indispensable para la movilidad; por lo cual es necesario considerar un espacio adecuado para poder extender y flexionar los dedos al caminar. En su obra Mauch (2007, pág 32)¹⁰⁷, menciona que en las investigaciones de Kristen (2004) & Maier (1990) ambos establecieron asignar 6 mm adicionales para poder extenderse el pie bajo condiciones de carga, además en el sistema alemán WMS-AKA64 sugirieron agregar otros 9 mm por el movimiento relativo que tiene el pie dentro del calzado debido al empuje que ejerce la extremidad al caminar; en total son 15 mm adicionales que se le asignan a la longitud del pie.

El sistema WMS-AKA64 en su momento, realizó un estudio detallado sobre la amplitud que tienen los dedos del pie al estar en reposo, en relación con el ancho que tiene el recio (zona metatarsal), por lo que idearon encontrar los grados que

¹⁰⁷ Mauch (2007). Op cit.

hay entre la diagonal que une el primer y quinto metatarso con la amplitud que tiene el primer y quinto dedo. Para realizar esta metodología, sobre la diagonal que une los puntos M y L de la zona metatarsal, en cada punto se prolonga una línea tangente al primer y quinto dedo hasta llegar a la perpendicular que pasa por el punto C que fue previamente trazada; este trazo se puede observar en la siguiente ilustración, incisos a) y b); el siguiente paso es encontrar el ángulo que forman dichas líneas con respecto a la diagonal M-L (Se aclara que la diagonal ML se tomó con base al sistema ruso por considerarlo más representativo ya que incluye la cabeza del quinto metatarso).

Ilustración 66. Ángulo de los dedos



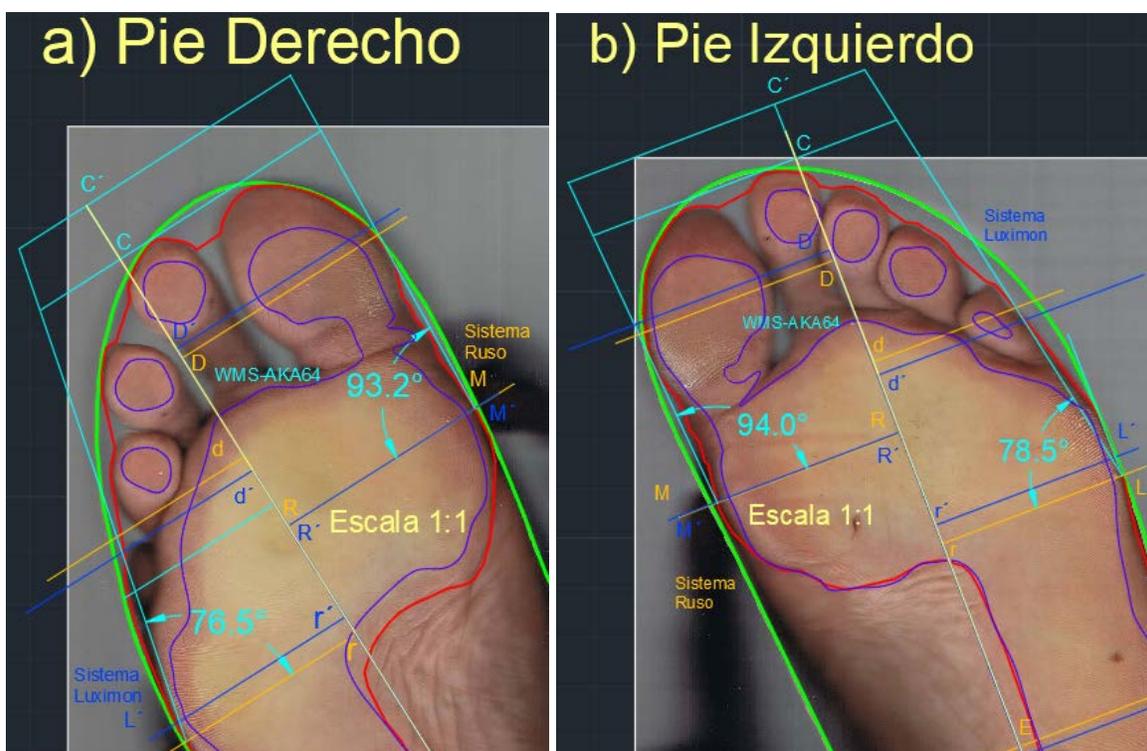
Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

Se aprecia en color azul claro los ángulos que fueron determinados entre la diagonal M-L y las tangentes de cada dedo; para el pie derecho la amplitud del primer dedo es de 109.3° y para el quinto es de 62°. En el pie izquierdo forman un ángulo de 109.7° y de 61.7° respectivamente. Es importante mencionar que el punto de intersección de la diagonal M-L con el eje simétrico del pie, se le asignó la letra O.

V.5.5. Ángulo de los dedos respecto al eje simétrico

Otra forma de encontrar el ángulo que forman los dedos es tomar las líneas tangentes a los dedos y en lugar de tomar la diagonal M-L, se toman las perpendiculares al eje de simetría que salen de los puntos R y r respectivamente como se muestra en la ilustración 66, inciso a) y b); En el pie derecho, el ángulo del primer dedo es de 93.2° y para el quinto es de 76.5° . Para el pie izquierdo se determinó un ángulo de 94.0° y de 78.5° siguiendo el mismo orden.

Ilustración 67. Ángulo de los dedos otra forma de medir



Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 16

Como nota importante, varios autores entre ellos Mauch (2007)¹⁰⁸ menciona una clasificación de los pies, tomando como referencia la forma y la altura de los dedos, clasificándolos en tres grandes tipos: griego, egipcio y cuadrado; para mayor detalle, ver el anexo 6.

¹⁰⁸ Mauch (2007). Op cit.

V.6. La planta de la horma

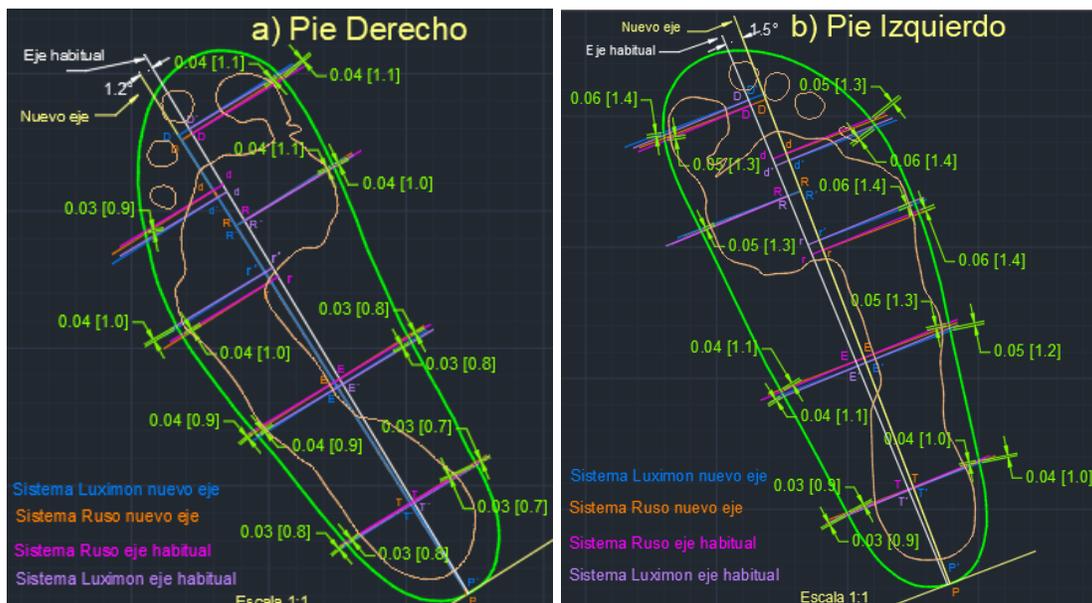
Al haber calculado cada uno de los parámetros y construido sus respectivos trazados, el siguiente paso es dibujar la silueta de la planta de la horma en un plano x-y.

La planta de la horma es de suma importancia, pues es una representación de la forma y de las medidas que tiene el pie en toda su extensión. Sin embargo, al proponer un nuevo eje es lógico pensar que los parámetros calculados hayan cambiado y que los puntos encontrados no correspondan a lo establecido por cada sistema; por lo que se desarrollan las respuestas a las siguientes preguntas ¿Cuántos grados se movieron los parámetros? y ¿Cómo repercuten para el diseño de la planta? por medio de un análisis comparativo entre los resultados del nuevo eje y el tradicional y terminando con el diseño de la planta de la horma.

V.6.1. El eje propuesto contra el eje tradicional

En este apartado se hace un comparativo de manera gráfica de los valores obtenidos entre el eje propuesto y el tradicional; se detalla cada parámetro y para evitar confusión se les asigna a los resultados del eje tradicional, un color fucsia para el sistema ruso y violeta para el sistema Luximon. En cuanto al eje, que se ha venido trabajando se conservan los mismos colores (anaranjado y azul); ver la ilustración siguiente.

Ilustración 68. Comparativo entre el eje nuevo y el tradicional



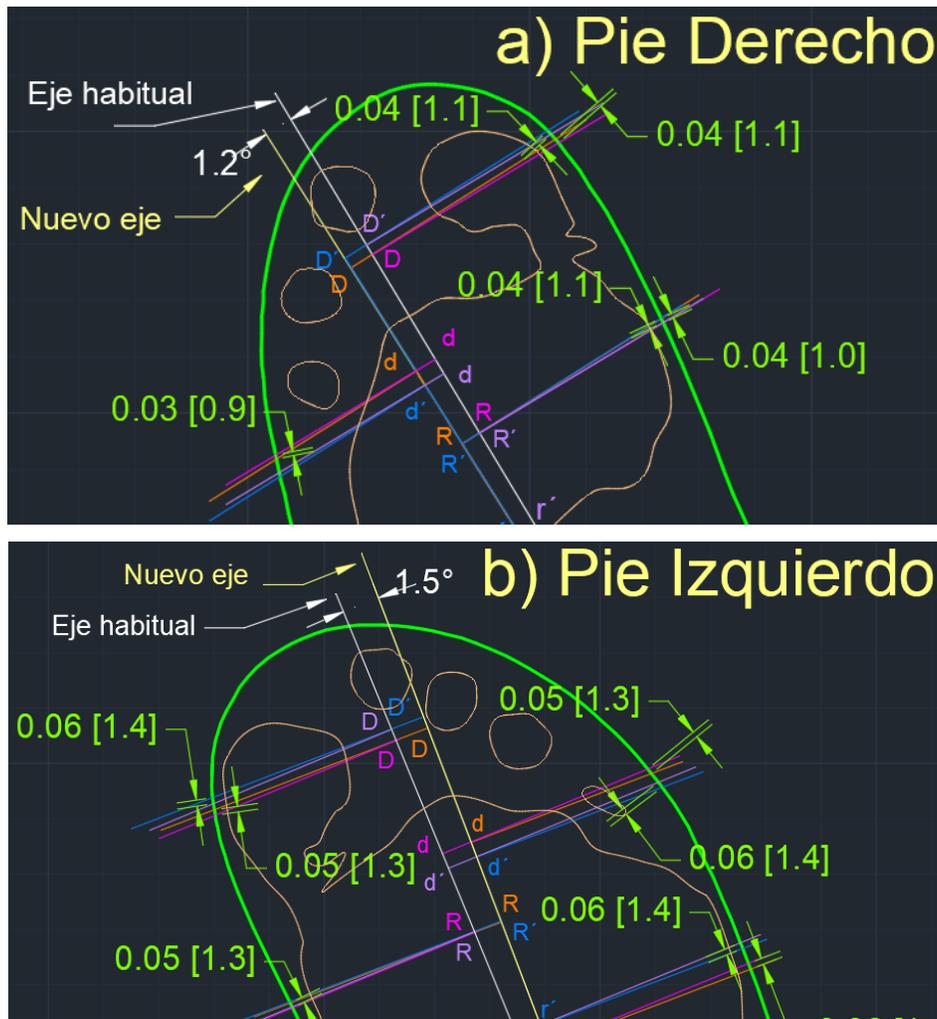
Elaboración propia en autocad v. 18

De la figura anterior podemos apreciar que en el pie derecho existe un desfase de 1.2° entre ambos ejes, esto ocasiona que las intersecciones con la periferia del pie (línea verde) corten en otro punto, éstas diferencias se hacen más evidentes hacia los dedos del pie que en la zona del talón; por ejemplo, para el talón, existe una diferencia de apenas 0.7 mm, en cambio para el primer dedo es de 1.1 mm. Para el caso del pie izquierdo el desfase entre los ejes es de 1.5° y las diferencias encontradas son ligeramente mayores, como se muestran en la ilustración anterior.

V.6.2. Factores de corrección para el nuevo eje

Las diferencias encontradas por el uso del nuevo eje, tal vez daría inicio a una controversia en que si la medida es muy pequeña para ser tomada en cuenta o no, sin embargo, se dio a la tarea de calcular el factor de corrección para dichas desviaciones. Como se puede observar, por el lado medial el factor deben ser restado al parámetro encontrado, mientras que por la parte de afuera del pie debe ser sumado; ver ilustración 68.

Ilustración 69. Diferencias entre ejes



Elaboración propia en autocad v. 18

Para una mayor comprensión de lo explicado en el párrafo anterior, se muestra a continuación dos tablas: la primera dedicada al pie derecho, donde se involucra el cálculo para cada parámetro y el factor de corrección; ya sea sumado o restado según el lado que corresponda y la segunda tabla con datos exclusivamente del pie izquierdo.

Tabla 17. Corrección de parámetros del pie derecho

UBICACIÓN	LADO MEDIAL		LADO LATERAL	
	SISTEMA			
	Ruso	Luximon	Ruso	Luximon
Talón	$0.18(275.4)-0.7= 48.87$	$0.167(275.4)-0.7= 45.29$	$0.18(275.4)+0.8=50.37$	$0.167(275.4)+0.8=46.79$
Empeine	$0.42(275.4)-0.8=114.86$	$0.40(275.4)-0.8=109.36$	$0.42(275.4)+0.9=116.56$	$0.40(275.4)+0.9=111.06$
Recio 1er dedo	$0.73(275.4)-1.0=200.04$	$0.72(275.4)-1.0=197.28$	No aplica	No aplica
Recio 5º dedo	No aplica	No aplica	$0.62(275.4)+1.0=171.74$	$0.628(275.4)+1.0=173.95$
1er Dedo	$0.9(275.4)-1.1= 246.76$	$0.899(275.4)-1.1=246.48$	No aplica	No aplica
5º Dedo	No aplica	No aplica	$0.8(275.4)+0.9=221.22$	$0.776(275.4)+0.9=214.61$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Corrección de parámetros del pie izquierdo

UBICACIÓN	LADO MEDIAL		LADO LATERAL	
	SISTEMA			
	Ruso	Luximon	Ruso	Luximon
Talón	$0.18(279)-0.9=49.32$	$0.167(279)-0.9=45.69$	$0.18(279)+1.0=51.22$	$0.167(279)+1.0=47.59$
Empeine	$0.42(279)-1.1=116.08$	$0.40(279)-1.1=110.5$	$0.42(279)+1.2=118.38$	$0.40(279)+1.2=112.8$
Recio 1er dedo	$0.73(279)-1.3=202.37$	$0.72(279)-1.3=199.58$	No aplica	No aplica
Recio 5º dedo	No aplica	No aplica	$0.62(279)+1.4=174.38$	$0.628(279)+1.4=176.61$
1er Dedo	$0.9(279)-1.4=249.7$	$0.899(279)-1.4=249.42$	No aplica	No aplica
5º Dedo	No aplica	No aplica	$0.8(279)+1.3=224.5$	$0.776(279)+1.4=217.90$

Fuente: Elaboración propia

V.6.3. Los parámetros del nuevo eje

Al haber considerado las ligeras desviaciones compensadas con la suma o resta del factor de corrección encontrado; a continuación se muestra la tabla 19 con un resumen de las constantes modificadas para cada lado del pie en los dos sistemas trabajados.

Tabla 19. Resumen de constantes con factor de corrección

UBICACIÓN	SISTEMA							
	Ruso				Luximon			
	Pie derecho		Pie izquierdo		Pie derecho		Pie izquierdo	
	Lado medial	Lado lateral	Lado medial	Lado lateral	Lado medial	Lado lateral	Lado medial	Lado lateral
Talón	0.1774	0.1828	0.1767	0.1835	0.1644	0.1698	0.1637	0.1705
Empeine	0.4170	0.4232	0.4160	0.4243	0.3970	0.4032	0.3960	0.4043
Recio 1er dedo	0.7263	N/A	0.7253	N/A	0.7163	N/A	0.7153	N/A
Recio 5º dedo	N/A	0.6236	N/A	0.6250	N/A	0.6316	N/A	0.6330
1er Dedo	0.8960	N/A	0.8949	N/A	0.8949	N/A	0.8939	N/A
5º Dedo	N/A	0.8032	N/A	0.8046	N/A	0.7792	N/A	0.7810

Fuente: Elaboración propia

Por cuestiones prácticas se consideró el valor promedio de su lado medial y lateral de la tabla anterior y se plasmó en la tabla 18, ahí se muestran los resultados para el nuevo eje; cabe decir que estos datos comparados con las constantes originales no cambian, sólo si se considera tomar dos o más cifras significativas.

Tabla 20. Parámetros corregidos para el nuevo eje

UBICACIÓN	SISTEMA			
	Ruso		Luximon	
	Pie derecho	Pie izquierdo	Pie derecho	Pie izquierdo
Talón	0.1801	0.1801	0.1671	0.1671
Empeine	0.4201	0.4201	0.4001	0.4001
Recio 1er dedo	0.7263	0.7253	0.7163	0.7153
Recio 5º dedo	0.6236	0.6250	0.6316	0.6330
1er Dedo	0.8960	0.8949	0.8949	0.8939
5º Dedo	0.8032	0.8046	0.7792	0.7810

Fuente: Elaboración propia

V.6.4. Elaboración de la superficie plantar básica

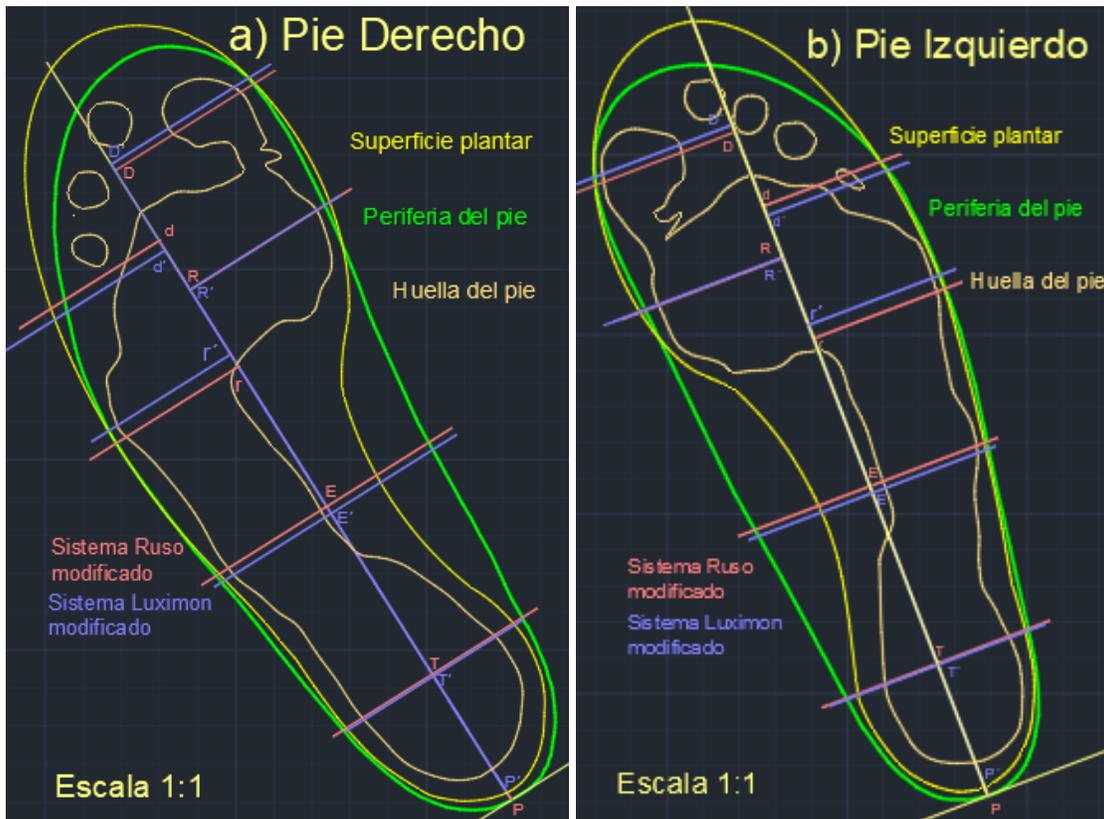
Al tener todos los parámetros ubicados en la planta del pie, ya sea para el talón, empeine, recio y los dedos; el siguiente paso es trazar el contorno de la planta de la horma con la ayuda de los puntos encontrados. Debe quedar en claro que ésta no puede ser menor a la huella ni mayor a su periferia. Para su diseño se hace uso de diversas herramientas como líneas auxiliares, figuras geométricas, además de las herramientas que proporciona el software autocad con los comandos Spline y 3-point. Las consideraciones para el diseño son las siguientes:

- En la parte lateral del empeine no se debe acentuar demasiado la cintura del pie, con el objeto de albergar y dar suficiente espacio a la base del 5º metatarso.
- Para el libre movimiento de los dedos se debe considerar un espacio considerable desde la zona del recio hasta la punta del pie.
- Los ángulos de los dedos deben guiar que puntos son los que deben estar en contacto con el calzado para darle figura y el espacio adecuado.
- La articulación del recio se le debe dar una atención especial, ya que es una zona de mucha flexión cercana a la periferia y en contacto permanente con el calzado.
- En el arco medial del pie, como ya se comentó hay una zona de transición o semiapoyo muy cerca al eje propuesto; por lo que es necesario considerar una pequeña área de la suela para brindarle soporte (para este trabajo de tesis se consideró 18.7 mm) a partir del eje hasta donde el arco empieza a verse más pronunciado.
- En la parte trasera del talón debe considerarse una pequeña cámara o espacio para albergar su curvatura.

A continuación, se muestra la silueta de la planta de la horma (línea amarilla) considerando las recomendaciones anteriores, incluyendo el factor de corrección propuesto a cada parámetro modificando su color para evitar confusión, el sistema ruso de naranja se cambió a rosa y el azul del sistema luximon a morado. Cabe

decir qué en la parte de los dedos, la silueta de la planta de la horma debe sobrepasar la periferia del pie para dar libertad al movimiento natural y constante de estos y que fue explicado anteriormente (sección V.5.4); ver la ilustración 69, inciso a) y b).

Ilustración 70. Silueta de la planta de la horma



Fuente: Elaboración propia en autocad v. 18.

La silueta de la planta de la horma podría considerarse mayor a la huella pero menor a la periferia del pie. En el proceso de manufactura del calzado, la entresuela es el primer componente que se fija en la horma con su superficie plana y no es precisamente redondeada como es realmente el talón.

Capítulo VI. El modelo del pie y sus diez secciones o cuadramenes

En el capítulo anterior se trabajó todo lo referente a la planta de la horma dentro del plano x-y. En este apartado se trabajará todo lo referente al eje z para darle forma y volumen al pie, tomando como base el trabajo previamente desarrollado a partir de la planta, la huella y sus parámetros encontrados.

Es necesario hacer notar que al hablar de confort es un tema muy subjetivo por lo que se considerará como un sinónimo de bienestar al reflejar las medidas del pie como buen ajuste.

VI.1. Consideraciones previas

Existen dos estudios muy importantes, los cuales se toman de base para el desarrollo del capítulo, el primero es de la Universidad Tecnológica de Lasi, que muestran veinte aspectos antropométricos muy importantes del pie y por otro lado el estudio del Instituto Biomecánico de Valencia donde establecen catorce parámetros para el buen ajuste del pie en el calzado; cada tabla se puede consultar en los anexos 7 y 8. Por cuestiones de practicidad y para fines de éste proyecto se analizó y fusionó la información de ambos estudios dando como resultado la tabla 21 que lleva de nombre “Puntos y regiones para el confort en el pie”; cabe decir que el término confort es considerado en esta tesis como sinónimo de un buen ajuste del calzado en el pie. En la sección VI.1.2. se echa mano de otra investigación donde expone las lesiones más comunes en la extremidad debido a la actividad física.

VI.1.1. Puntos y regiones de ajuste para el pie

Existen puntos y regiones del pie que deben ser considerados por su importancia en el diseño de la horma y que impacta en su confort por el uso del calzado; la siguiente tabla muestra cada uno de estos conceptos, agrupándolos de acuerdo a

su sección y cara del pie; además cada punto se le asignó una letra para su rápida identificación.

Tabla 21. Puntos y regiones para el confort en el pie

Cara lateral		Nomenclatura propuesta
Sección	Punto o región en el pie	
Posterior	Altura del pternion	A
	Ángulo del talón	B
Talón-Empeine	Altura del sphyrion fibural	C
	Maleolo fibural	D
Empeine-Recio	Base del 5º metatarso	E
Recio-Dedos	Altura del 5º dedo	F
	Cabeza del 5º metatarso (recio)	G
Parte medial		
Sección	Punto o Región en el pie	
Talón-Empeine	Altura del sphyrion tibial	H
	Maleolo tibial	I
Empeine-Recio	Hueso navicular	J
Recio-Dedos	Altura del 1er dedo	K
	Cabeza del 1er metatarso (recio)	L
Dedos-Punta	Altura de la uña del 1er dedo	M
Parte superior		
Sección	Punto o Región en el pie	
Empeine-Recio	Altura del hueso navicular	N
Recio-Dedos	Altura del 2º al 4º dedo	Ñ
Dedos-Punta	Altura de las falanges distales	O
Circunferencias del pie		
	Empeine	P
	Recio	Q
	Dedos	R

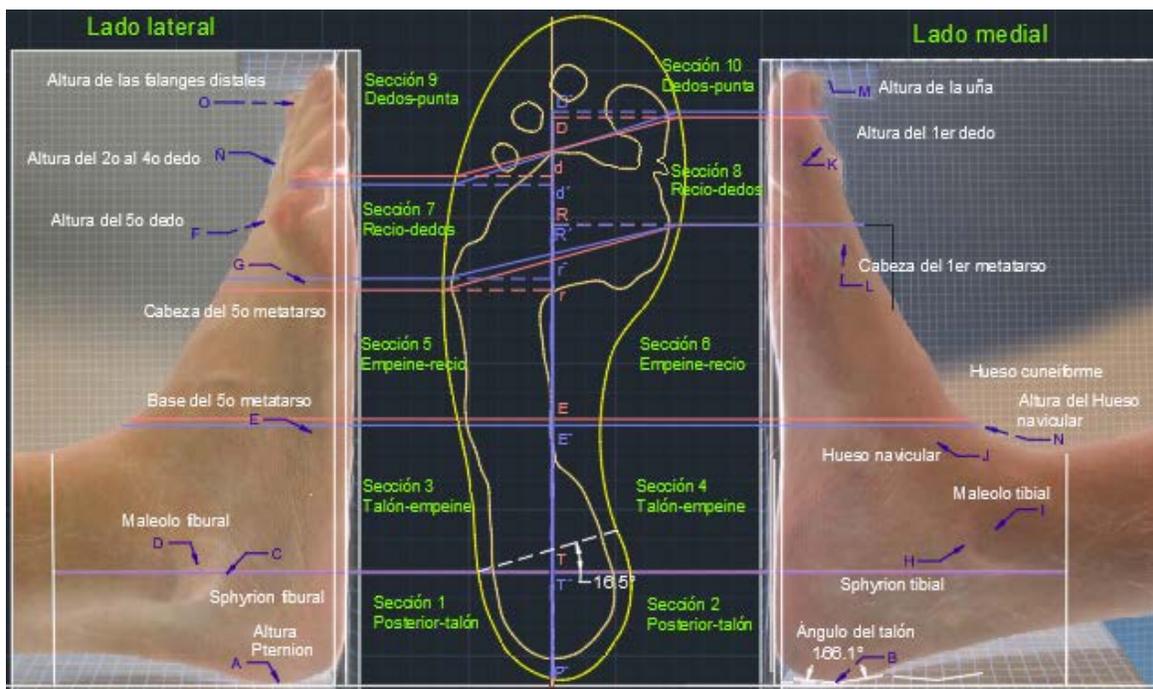
Elaboración propia con datos tomados de Nácher, B. et al. (2005)¹⁰⁹. Y Sharghie & Costea (2013)¹¹⁰.

¹⁰⁹ Nácher, B.; Alemany, S.; González, J.C.; Alcántara, E.; García-Hernández, J.; Heras, S. & Juan, A. (2005). A footwear fit classification model base on anthropometric data. Instituto de Biomecánica de Valencia y el departamento de sistemas informáticos y computacionales. ResearchGate. July 2006. DOI: 10.4273/2006-01-2356.

¹¹⁰ Sharghie & Costea (June 2013). Anthropometric study of the foot using 3D scanning method and statistical analysis. International Symposium in Knitting and Apparel- ISKA 2013. "Gheorghe Asachi" Technical University of Lasi-Romania, Doctoral School of the Faculty of Textil-Lether and Industrial Management.

Con los datos de la tabla anterior se ejemplifica de manera gráfica los puntos y las regiones que impactan al confort, relacionando a su vez la huella y los perfiles del pie.

Ilustración 71. Los aspectos para el confort en las diez secciones del pie derecho



Elaboración propia en autocad v. 19; con datos de la tabla 21. En ésta ilustración se presentan las diez secciones de la huella derecha relacionadas con las alturas clave que impactan en el ajuste del calzado .

Dentro de las observaciones podemos resaltar que los parámetros calculados en el capítulo anterior de la huella, al ser prolongarlos hacia arriba del pie coinciden con algunos puntos y regiones que son considerados para el buen ajuste de la horma y del calzado, digno de tomarse en cuenta para el proceso de la personalización.

VI.1.2. Las partes más susceptibles del pie

Ya teniendo la ubicación exacta de los puntos que son fundamentales para el confort del pie, el siguiente paso es relacionar las áreas de éste que desafortunadamente

son más susceptibles de sufrir lesiones. Hay que recordar que el calzado además de proporcionar confort, también debe de brindar protección y para realizar esta tarea, se hará uso de un estudio en medicina del deporte de la Universidad de Wisconsin (ver el anexo 9), ubicando los diferentes padecimientos en las diez secciones del pie.

Tabla 22. Los puntos más susceptibles del pie en su parte superior e inferior

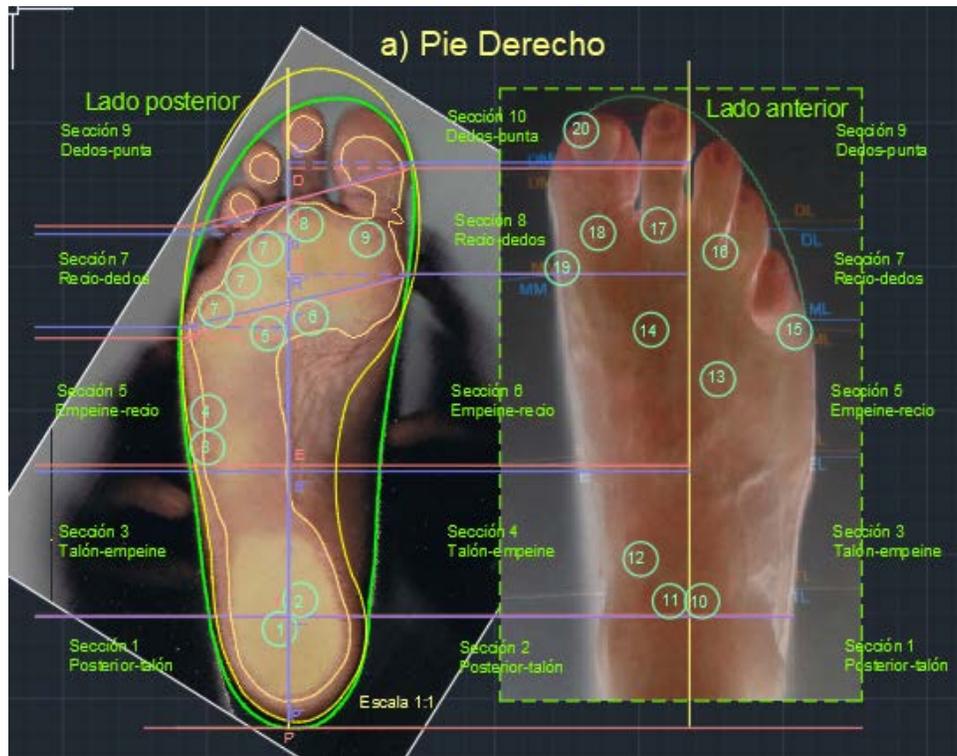
Sección inferior		Padecimiento del pie	#
Talón-empeine	Cuadrante (1 y 2) parte lateral	Almohadilla plantar	No. 1
	Cuadrante (3 y 4) parte medial	Fascitis plantar	No. 2
Empeine-recio	Cuadrante (5) parte lateral	Fractura por avulsión del 5º metatarso	No. 3
		Fractura de Jones	No. 4
		Fractura por estrés del 3er metatarsiano	No. 5
	Cuadrante (6) parte medial	Fractura por estrés del 2º metatarsiano	No. 6
Recio-dedos	Cuadrante (7) parte lateral	Metatarsalgia	No. 7
	Cuadrante (8) parte medial	Metatarsalgia	No. 8
		Sesamoiditis	No. 9
Sección superior		Padecimiento del pie	#
Talón-empeine	Cuadrante (3 y 4) parte lateral	Osteocondritis disecante	No. 10
	Cuadrante (4) parte medial	Pinzamiento anterior del tobillo	No. 11
		Fractura por estrés navicular	No. 12
Empeine-recio	Cuadrante (5) parte lateral	Tarso anterior síndrome de túnel	No. 13
	Cuadrante (6) parte medial	Esguince de Lisfrac	No. 14
Recio-dedos	Cuadrante (7) parte lateral	Juanete 5º dedo	No. 15
		Neuroma de Morton	No. 16
	Cuadrante (8) parte medial	Infarto de Freiberg	No. 17
		Hallux rigidus	No. 18
	Juanete 1er dedo	No. 19	
Dedos-punta	Cuadrante (10) parte medial	Paroniquia	No. 20

Datos tomados de: Young, C.; Niedfeldt, M.; Morris, G. & Earkes, K. (2005)¹¹¹. Clinical examination of the foot an ankle. División of Sport Medicine, Medical College of Wisconsin, 9200 W Wisconsin Avenue, Milwaukee, WI 53226, USA. DOI:10.1016/j.pop.2004.11.002. de la tabla 21 y anexo 9, y su ubicación en los cuadrantes del pie como una propuesta para éste proyecto de tesis.

¹¹¹ Young, C.; Niedfeldt, M.; Morris, G. & Earkes, K. (2005). Clinical examination of the foot an ankle. División of Sport Medicine, Medical College of Wisconsin, 9200 W Wisconsin Avenue, Milwaukee, WI 53226, USA. DOI:10.1016/j.pop.2004.11.002

Utilizando los datos de la tabla 22 se ilustra dichos puntos relacionados con la susceptibilidad en la planta y la parte superior del pie, igual que en la ilustración 70 se ubican los cuadrantes o secciones propuestos para una fácil identificación.

Ilustración 72. Los puntos más susceptibles en la parte superior e inferior del pie



Elaboración propia en autocad v. 18; con datos de la tabla anterior; se presenta al pie derecho visto desde abajo, seccionado en diez partes o cuadrantes con el objeto de ubicar puntos y zonas representativas en el ajuste en la horma.

Como se observa los puntos 2 y 11 de la sección 4, el punto 6 y 14 de la sección 6, los puntos 8 y 9 con los puntos 17 y 18 respectivamente de la sección 8 parece coincidir en su cara opuesta del pie.

Continuando con los puntos susceptibles, la siguiente tabla concentra éstos para la parte lateral y medial del pie.

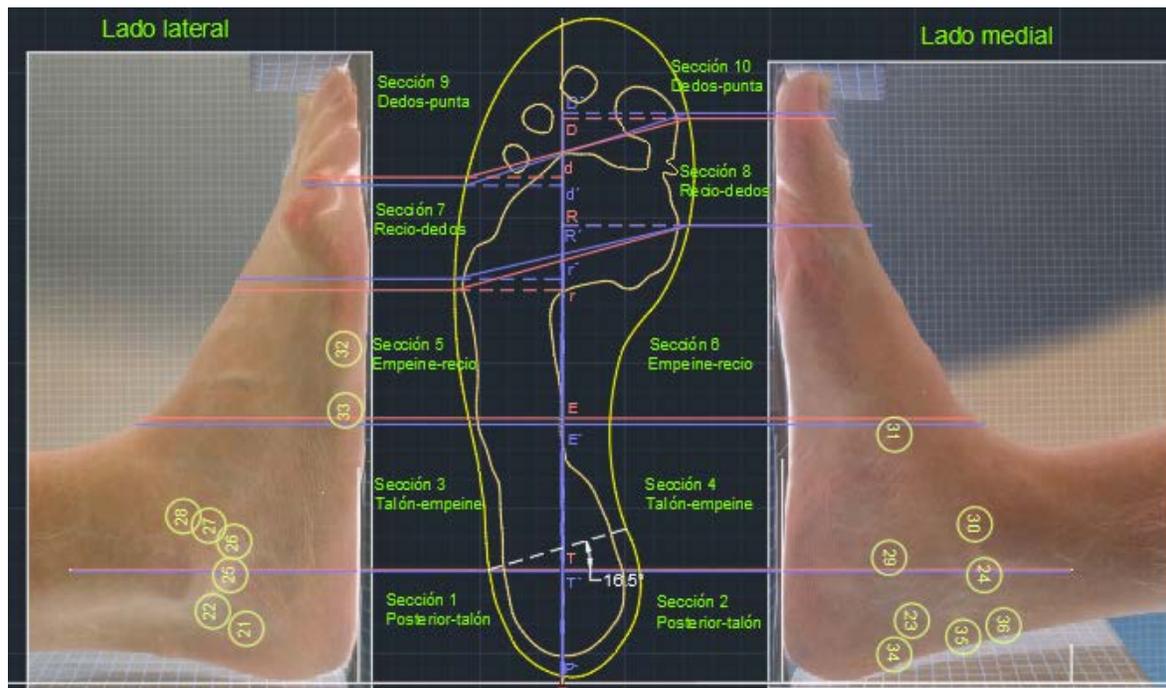
Tabla 23. Los puntos más susceptibles del pie en su parte lateral, medial y posterior

Sección medial y lateral		Padecimiento del pie	#
Posterior-talón	Cuadrante (1) parte lateral	Bursitis retrocalcaneal	No. 21
		Pinzamiento posterior del tobillo	No. 22
	Cuadrante (2) parte medial	Bursitis retrocalcaneal	No. 23
		Síndrome del túnel tarsal	No. 24
Talón-empeine	Cuadrante (3) parte lateral	Ligamento calcaneo fibular	No. 25
		Tarso sinusual	No. 26
		Ligamento anterior talofibular	No. 27
		Ligamento anterior del tobillo	No. 28
	Cuadrante (4) parte medial	Atrapamiento del nervio plantar	No. 29
		Esguince medial de tobillo	No. 30
Empeine-recio	Cuadrante (5) parte medial	Nudo de Henry	No. 31
		Fractura de avulsión del 5º metatarso	No. 32
		Fractura de Jones	No. 33
Sección posterior		Padecimiento del pie	#
Posterior	Involucra a los cuadrantes (1 y 2) parte medial y lateral	Apoficitis calcánea	No. 34
		Tendinitis de Aquiles	No. 35
		Ruptura de tendón de Aquiles	No. 36

Elaboración propia con datos tomados de: Young, C.; Niedfeldt, M.; Morris, G. & Earkes, K. (2005). Clinical examination of the foot and ankle. División of Sport Medicine, Medical College of Wisconsin, 9200 W Wisconsin Avenue, Milwaukee, WI 53226, USA. DOI:10.1016/j.pop.2004.11.002 y su ubicación en los cuadrantes del pie como una propuesta para éste proyecto de tesis.

Como una manera de representar los datos de la tabla anterior se muestra la ilustración 72 relacionando las secciones del pie y los puntos de interés.

Ilustración 73. Ubicación de los puntos más susceptibles del pie derecho en su cara lateral y medial



Elaboración propia en autocad v. 18; con datos tomados de la tabla 23 y anexo 9. Como nota aclaratoria los puntos señalados como 32 y 33 fueron repetidos nuevamente en relación a sus similares 3 y 4 de la tabla 22 e ilustración 71 ya que involucran tanto el lado inferior y el costado del pie.

Es necesario mencionar que los puntos 3 y 4 de la ilustración 71 son los correspondientes con los puntos 32 y 33 de la ilustración 72, respectivamente en ese orden ya que al ser la lesión en la orilla del pie involucra tanto la planta como el costado del mismo.

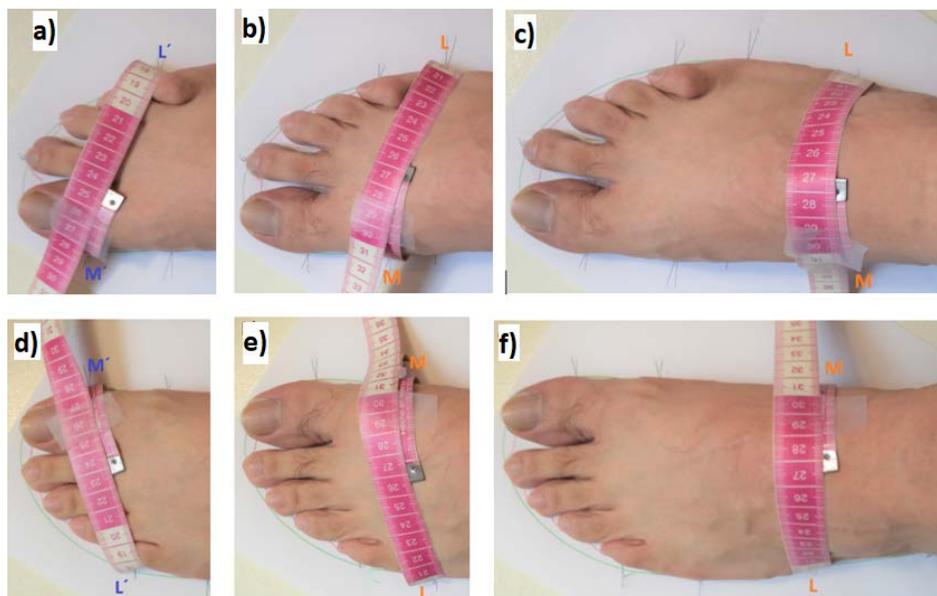
VI.2. Recolección de datos y medidas

Para encontrar y determinar, las medidas y características peculiares del pie, será necesario llevar a cabo una sesión formal de medición dentro del set ya anteriormente preparado y descrito en el capítulo IV, Ahí será necesario utilizar herramientas como calibrador vernier, cinta métrica flexible, plantillas para el pie y la mesa de trabajo para apoyar y situar la extremidad; además una forma de registro visual como la cámara digital. A continuación, se muestra tales resultados.

VI.2.1. Las tres circunferencias principales del pie

De acuerdo a la tabla 21 existen tres circunferencias básicas, las cuales son: la del empeine, recio y los dedos; para efectuar esta tarea se utilizó una cinta métrica flexible muy utilizada en la industria del calzado y una plantilla con la silueta de la huella para situar correctamente al pie.

Ilustración 74. Medición de las tres circunferencias principales del pie



Elaboración propia fotografías tomadas en el momento de la medición de las tres circunferencias más importantes del pie: incisos a y d dedos, b y e recio y, c y f empeine. En la parte superior se ilustra el pie derecho y abajo el izquierdo.

A continuación, se muestra una tabla resumen con las circunferencias de ambos pies, las cuales servirán para el modelado del pie.

Tabla 24. Resumen de las circunferencias del pie

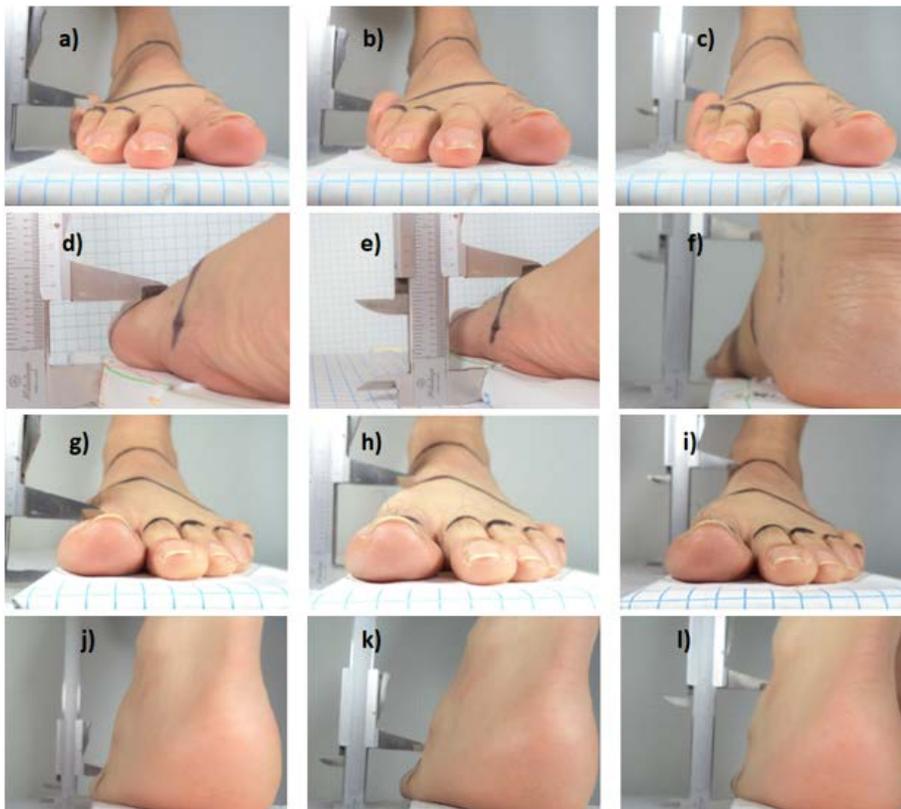
Extremidad	Circunferencia de los dedos	Circunferencia del recio	Circunferencia del empeine
Derecha	23.7 mm	25.6 mm	26.5 mm
Izquierda	22.7 mm	25.6 mm	26.4 mm

Elaboración propia con datos obtenidos en la medición del pie

VI.2.2. Las alturas básicas del pie

Para medir las alturas del pie se tomó como referencia las tres circunferencias básicas, determinando su magnitud en su parte medial y lateral.

Ilustración 75. Alturas en los diversos puntos del pie



Elaboración propia, fotografías obtenidas del proceso de medición del pie en sus vistas lateral y medial.

Al obtener la medida de ciertas alturas los datos se concentran en una tabla resumen que a continuación se muestra.

Tabla 25. Resumen de las alturas del pie sobre sus circunferencias

Extremidad	Cara	Dedos		Recio		Empeine	
Derecha	Medial	0.776 in	19.735 mm	1.410 in	35.814 mm	3.103 in	78.841 mm
	Lateral	0.884 in	22.470 mm	0.845 in	21.463 mm	1.302 in	33.096 mm
Izquierda	Medial	0.830 in	21.082 mm	1.586 in	40.284 mm	2.903 in	73.736 mm
	Lateral	0.710 in	18.034 mm	0.935 in	23.749 mm	2.775 in	30.485 mm

Elaboración propia con datos obtenidos en la sesión de medición

Como se había comentado hay puntos del pie donde es necesario obtener sus dimensiones, la mayoría son alturas en ciertos puntos de la extremidad excepto en

el concepto J de la tabla siguiente donde se considera su ancho. Estas medidas en su conjunto impactan notablemente en el ajuste de la horma.

Tabla 26. Medidas para el confort del pie derecho

Parte lateral		Nomenclatura	Medida pulg.	Medida mm
Sección	Punto o región en el pie			
Posterior	Altura del pternion	A	1	25.4
	Ángulo del talón	B	166.1°	
Talón-Empeine	Altura del sphyrion fibural	C	2.43	61.72
	Maleolo fibural	D	3.25	82.55
Empeine-Recio	Base del 5º metatarso	E	1.075	27.30
Recio-Dedos	Altura del 5º dedo	F	1.310	33.27
	Cabeza del 5º metatarso (recio)	G	0.904	22.96
Parte medial				
Sección	Punto o región en el pie			
Talón-Empeine	Altura del sphyrion tibial	H	3.055	77.59
	Maleolo tibial	I	3.50	88.9
Empeine-Recio	Hueso navicular	J	2.675	67.94
Recio-Dedos	Altura del 1er dedo	K	1	25.4
	Cabeza del 1er metatarso (recio)	L	1.7	43.18
Dedos-Punta	Altura de la uña del 1er dedo	M	0.9	22.86
Parte superior				
Sección	Punto o Región en el pie			
Empeine-Recio	Altura del hueso navicular	N	3.670	93.21
Recio-Dedos	Altura del 2º al 4º dedo	Ñ	0.970	24.63
Dedos-Punta	Altura de las falanges distales	O	0.980	24.89

Elaboración propia con datos tomados de la tabla 21 y de la sesión de medición del pie

Ahora se registran las medidas del pie izquierdo con los mismos conceptos de la extremidad derecha

Tabla 27. Medidas para el confort del pie izquierdo

Parte lateral		Nomenclatura	Medida pulg.	Medida mm
Sección	Punto o región en el pie			
Posterior	Altura del pternion	A	1	25.4
	Ángulo del talón	B		
Talón-Empeine	Altura del sphyrion fibural	C	2.270	57.65
	Maleolo fibural	D	3.25	82.55
Empeine-Recio	Base del 5º metatarso	E	1.095	27.81
Recio-Dedos	Altura del 5º dedo	F	0.910	23.11
	Cabeza del 5º metatarso (recio)	G	0.910	23.11
Parte medial				
Sección	Punto o región en el pie			
Talón-Empeine	Altura del sphyrion tibial	H	2.97	75.43
	Maleolo tibial	I	3.465	88.01
Empeine-Recio	Hueso navicular	J	2.665	67.69
Recio-Dedos	Altura del 1er dedo	K	0.910	23.11
	Cabeza del 1er metatarso (recio)	L	1.710	43.43
Dedos-Punta	Altura de la uña del 1er dedo	M	0.970	24.63
Parte superior				
Sección	Punto o Región en el pie			
Empeine-Recio	Altura del hueso navicular	N	3.660	92.96
Recio-Dedos	Altura del 2º al 4º dedo	N	0.810	20.57
Dedos-Punta	Altura de las falanges distales	O	0.912	23.16

Elaboración propia con datos tomados de la tabla 21 y de la sesión de medición del pie

Dentro de los datos observados de las tablas 26 y 27 hay que hacer énfasis en la altura del 5º dedo del pie derecho; se observa un cierto levantamiento de su falange, ésta llega medir 33.27 mm comparada con los 23.11 mm de su equivalente en el pie izquierdo.

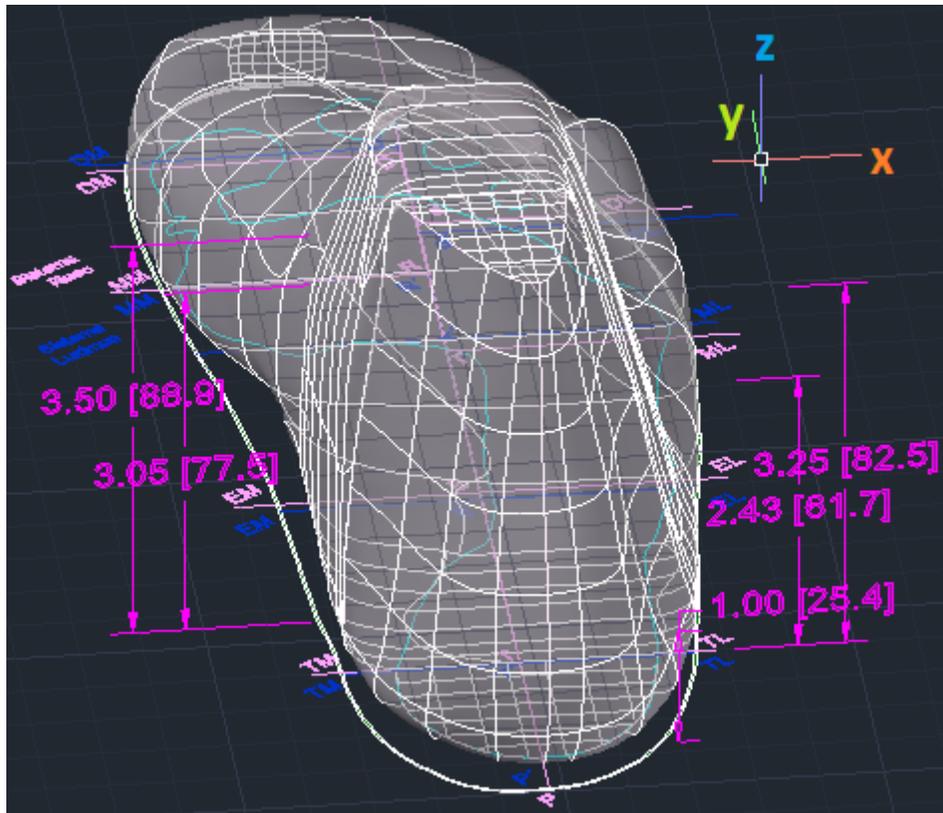
VI.3. El desarrollo volumétrico del modelo del pie

En éste subcapítulo se desarrolla el volumen del pie a través de su eje Z; tomando como base la huella del pie y todos los datos recopilados en la sesión de medición; tanto alturas como circunferencias, considerando también punos de ajuste y sus partes más susceptibles del pie.

VI.3.1. Parte posterior del pie

Se diseña la parte posterior del pie considerando las secciones 1 y 2 y parte de las secciones 3 y 4 de la huella; entre las medidas más importantes se encuentran los maléolos tibial y fibular, el tendón de Aquiles y la parte más pronunciada del talón llamada Pthernion.

Ilustración 76. Representación de la parte posterior del pie

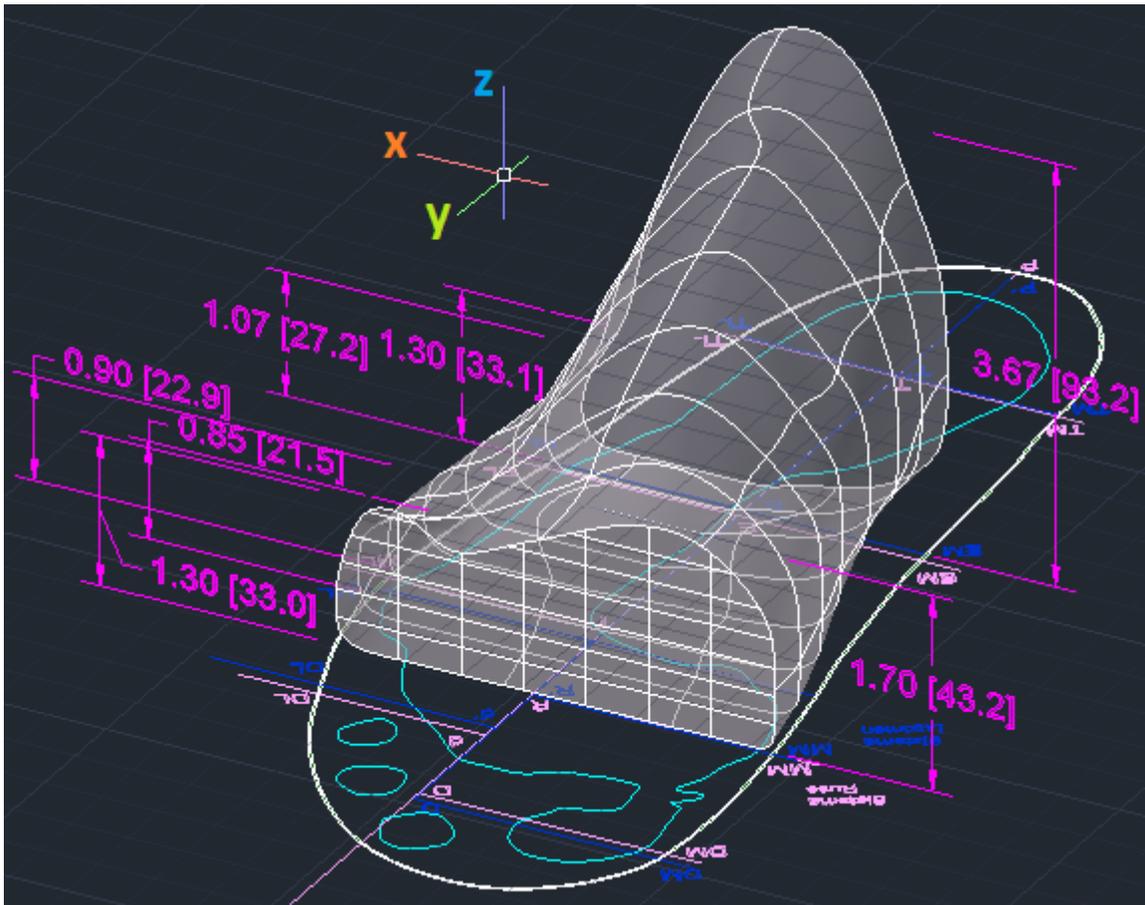


Desarrollo propio del pie derecho en autocad versión 18.

VI.3.2. Parte media del pie

El diseño de la parte media del pie es considerando la sección 3, 4, 5, 6 y una pequeña porción de la sección 7 de la huella; ente las partes más importantes se encuentran la altura del empeine, el arco medial del pie, la base del 5º metatarso y el recio.

Ilustración 77. Representación de la parte media del pie

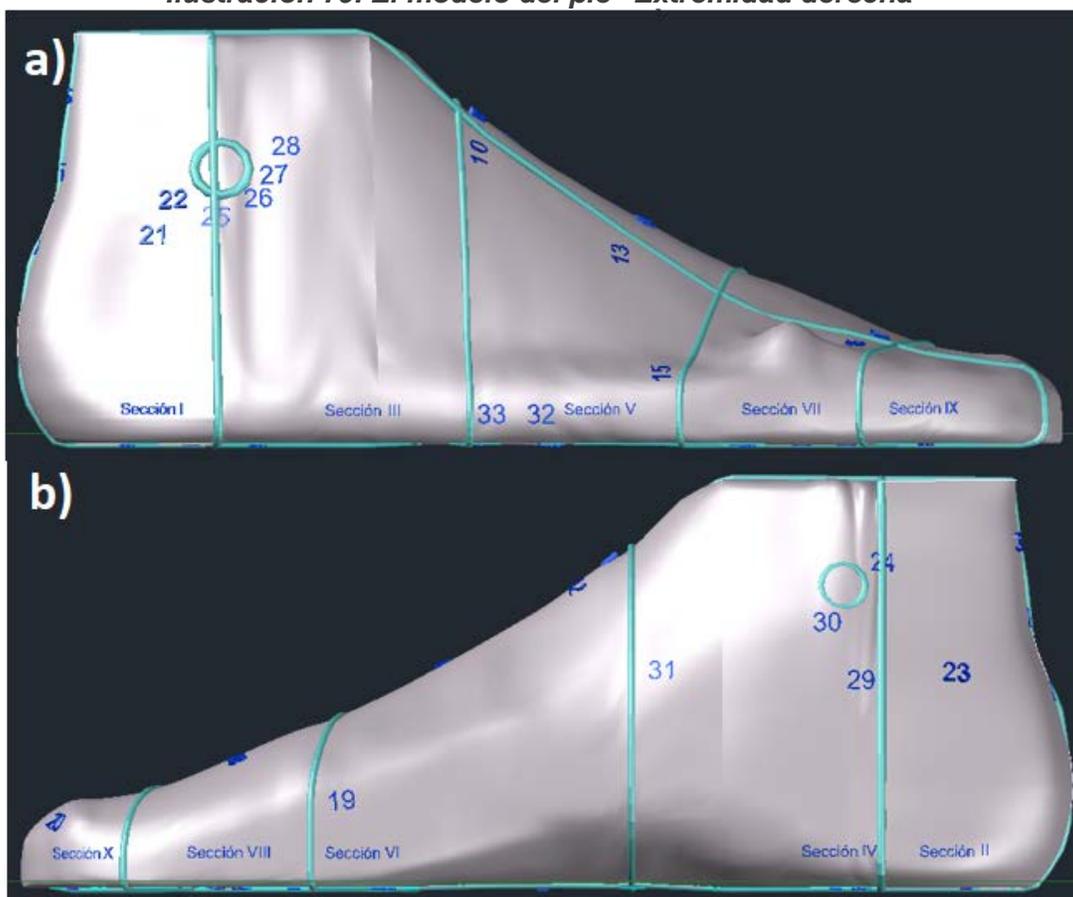


Desarrollo propio del pie derecho en autocad versión 18.

VI.3.4. Las diez secciones o cuadramenes

Para el modelo del pie; cada sección de éste fue trabajada por separado, con sus respectivas medidas y peculiaridades de forma implícitas. Lo cual da por resultado una personalización no sólo en dimensiones; sino también, se colocaron ciertos números que muestran los puntos de mejor ajuste y de susceptibilidad que deben ser considerados en el diseño de la horma y para su rápida localización de estos se dividió por medio de líneas las diez secciones del pie que, de acuerdo a los parámetros iniciales ya se habían visto, a continuación se muestra.

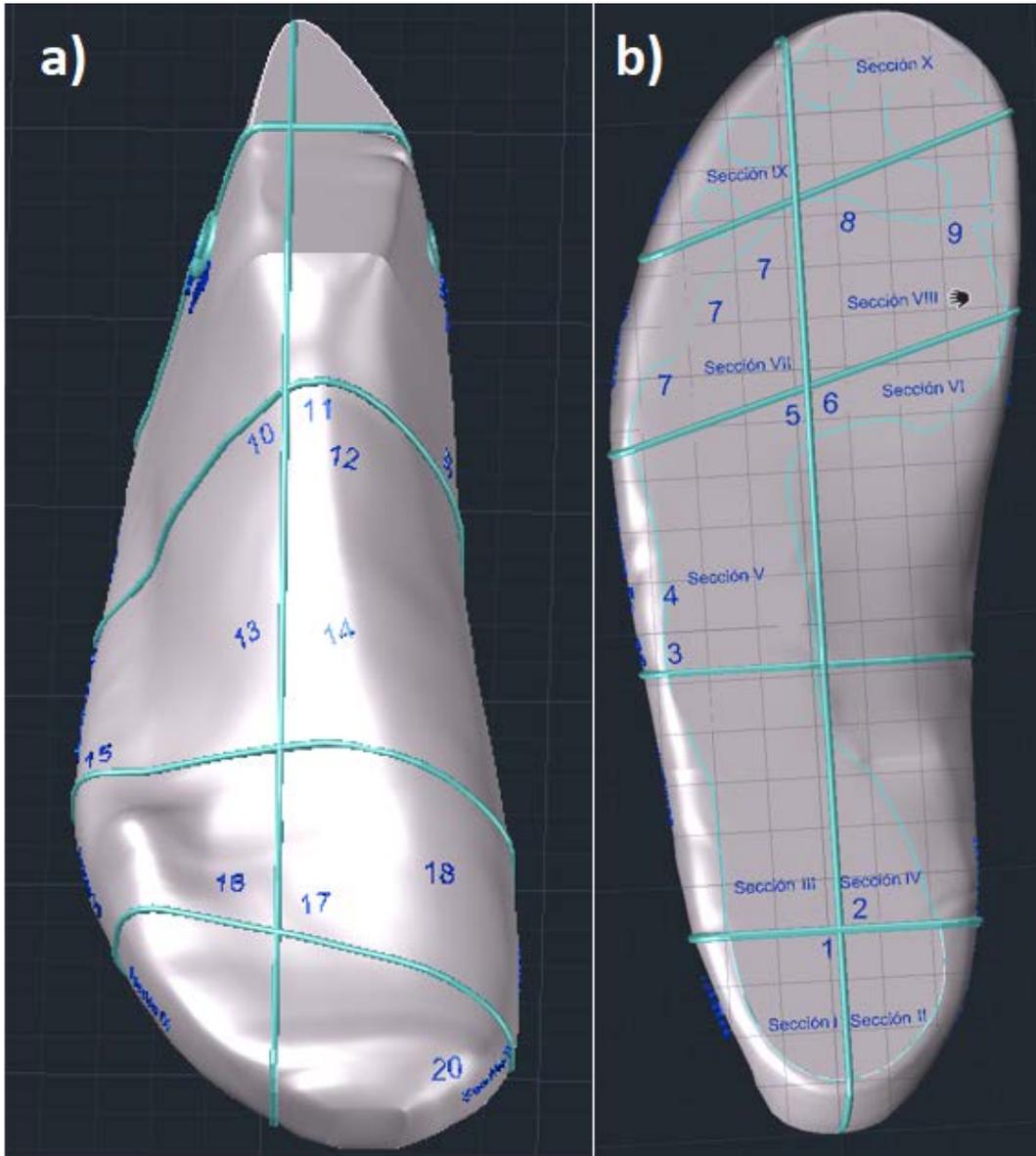
Ilustración 79. El modelo del pie “Extremidad derecha”



Elaboración propia en autocad versión 2021. En el inciso a) vista lateral del modelo del pie y b) vista medial del modelo, en ambas figuras se considera la extremidad derecha.

También en la parte superior y posterior del pie existen puntos de ajuste y confort, los cuales a continuación se muestran.

Ilustración 80. El modelo del pie “Extremidad derecha” continuación



Elaboración propia en autocad versión 2021. En el inciso a) vista superior y b) vista posterior del modelo del pie, en ambas figuras se considera la extremidad derecha.

En el apéndice se muestra el modelo del pie izquierdo

Capítulo VII Consideraciones dinámicas del andar

Al haber desarrollado el modelo del pie con las medidas y peculiaridades únicas de la persona en estudio y de enfatizar en ciertos aspectos que involucran a su comodidad y ajuste; En este capítulo se encamina a visualizar la deformación natural que sufren las extremidades al caminar cargando su propio peso.

Los músculos y en general el sistema óseo, experimentan una serie de fuerzas internas y externas; por lo que va ser importante realizar un estudio biomecánico del pie para determinar ciertos rasgos o características dinámicas en el andar y que no pueden encontrarse en un estado de reposo. Todo esto tiene la finalidad de ser considerado en el diseño de la horma, que impacten en el ajuste y por supuesto en la comodidad del calzado.

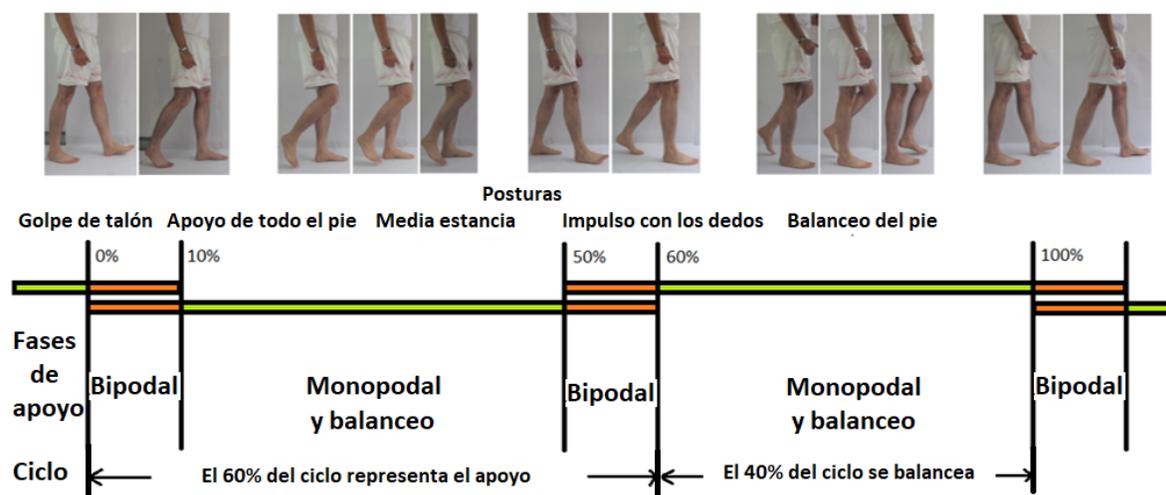
VII.1. Perspectiva científica

Hay numerosos estudios referentes a la marcha en donde se analiza a la extremidad de una manera integral (pie, tobillo, pierna y cadera); en éste subcapítulo se enfocará exclusivamente al pie y a la articulación del tobillo; aunque es necesario mencionar algunas partes anatómicas de la pierna en general.

VII.1.1. El ciclo de la marcha

Para el análisis del ciclo de la marcha, fue considerada una sesión fotográfica con el objeto de capturar a los pies en su movimiento natural, esto fue realizado con una cadencia normal de aproximadamente 110 pasos/min; parte de estas diapositivas se consideraron para elaborar la ilustración 81, en el anexo 10 se muestran todas ellas.

Ilustración 81. El ciclo de la marcha (pie izquierdo)



Diseño y fotografía propia con datos tomados de Rodgers (1988). Dynamic Biomechanics of the Normal Foot and Ankle During Walking and Running. Physical Therapy; volume 68/ number 12. Y Gómez & Sapiña (2005). Estudio Biomecánico de la Marcha en Pacientes con Artrosis de Cadera (Tesis doctoral). Universitat de Valencia España.

Varios especialistas entre ellos Rodgers (1988)¹¹² considera que existen dos fases en el ciclo de la marcha; por ejemplo, una sola extremidad desde que apoya el talón hasta que despega los dedos representa un 60%, mientras el 40% restante se balancea por el aire.

Como se puede ver en la ilustración anterior, dentro de éste 60% se integran cuatro de las cinco posturas principales, las cuales son: golpe de talón, apoyo total del pie, media estancia y despegue de los dedos; dentro de esta fase ocurre el llamado apoyo bipodal donde ambos pies tocan el suelo en un porcentaje relativamente pequeño; hasta que entra a la otra fase balanceándose en el aire para dar el siguiente paso.

Este apoyo bipodal mencionado en el párrafo anterior; mientras un pie toca el suelo con el talón el otro intenta impulsarse con los dedos; esto lo realiza al inicio de completar el paso y cuando se decide en dejar el suelo representando el 20% del ciclo de la marcha.

¹¹² Rodgers, M. (1988). Dynamic Biomechanics of the Normal Foot and Ankle During Walking and Running Volume 68/ Number 12; Physical Therapy, p. 1822-1830

VII.1.2. La energía, trabajo y fuerzas en la marcha

Hay otros factores que afectan la biomecánica de la marcha como la velocidad y las características antropométricas del individuo; por ejemplo la cadencia está definida como la cantidad de pasos por minuto en un andar natural, entre un rango de 101-122 pasos/min Gómez & Sapiña (2005)¹¹³. Ver ilustración siguiente.

Ilustración 82. Valores promedio del caminar en hombres y mujeres

fuente	Cadencia (p/min)		velocidad (m/s)		long. Zancada (m)	
	V	M	V	M	V	M
Murray (1964, 1970)	117	117	1.53	1.30	1.57	1.33
Chao (1983)	102	108	1.20	1.10	1.42	1.22
Kadaba (1990)	112	115	1.34	1.27	1.41	1.30
Perry (1992)	111	117	1.43	1.28	1.46	1.28

Fuente: Gómez & Sapiña (2005) p. 15

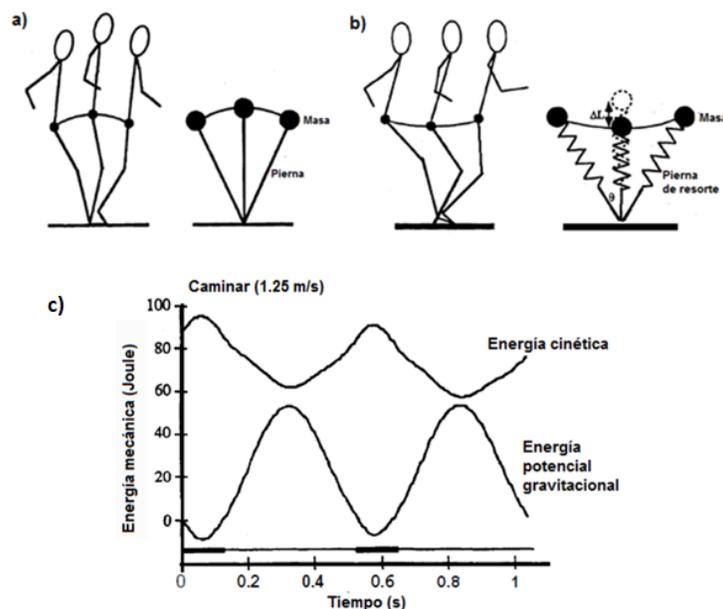
Hay dos modelos teóricos que los especialistas utilizan para simular el caminar, uno es el llamado “resorte de masa” donde se considera a la pelvis como la masa y a las piernas los resortes. El otro modelo es el llamado “péndulo invertido”; ambos explican la transferencia de energía de potencial a cinética y viceversa que experimenta el cuerpo Farley & Ferris (1998)¹¹⁴. Los modelos consideran a las piernas como una articulación completamente rígida sin la capacidad de flexionarse o tomar una postura; Pandy & Berme (1988)¹¹⁵. Sin embargo, se ha encontrado la relación que tiene el centro de masa o COM (por sus siglas en inglés) del cuerpo humano con un movimiento armónico sinusoidal para el intercambio de la energía. Ver ilustración 83 y el anexo 11.

¹¹³ Gómez & Sapiña (2005) Estudio Biomecánico De La Marcha En Pacientes Con Artrosis De Cadera Departamento de Medicina (Tesis doctoral), Universitat de Valencia. Depòsit legal: I.S.B.N.:84-370-6222-5. Edita: Universitat de València. Servei de Publicacions C/ Artes Gráficas, 13 bajo 46010 València España.

¹¹⁴ Farley & Ferris (1998). Biomechanics of walking and running: center of mass movements to muscle action. Exerc Sport Sci Rev. 28 p. 253-85.

¹¹⁵ Pandy & Berme (1988). Synthesis of Human Walking: a Planar Model for Single Support. J Biomech; 21. p. 1053-60

Ilustración 83. Modelos para representar el caminar



Fuente: Farley & Ferris (1998). p. 257-58 Inciso a) y b); inciso c) p. 259

El intercambio de energía mencionado de acuerdo a las investigaciones, existe entre el tronco del cuerpo y toda la extremidad inferior; es decir es un intercambio entre segmentos del cuerpo debido a la acción de músculos y sus articulaciones Winter (1976)¹¹⁶.

Por otro lado la llamada potencia mecánica dentro de la marcha, se ha utilizado como un descriptor global del esfuerzo muscular, producto de la fuerza de reacción del suelo y la velocidad del centro de masa del cuerpo relacionándolo con el gasto energético muscular, Martin & Morgan (1992)¹¹⁷. Sin embargo, se ha concluido que el esfuerzo muscular no tiene relación con la demanda metabólica del cuerpo, Sheila, A. Dugan & Krishna, P. Bhat (2005)¹¹⁸.

¹¹⁶ Winter (1976). The locomotion Laboratory as a Clinical Assessment System. Med prog Technol; 4; p. 95-106

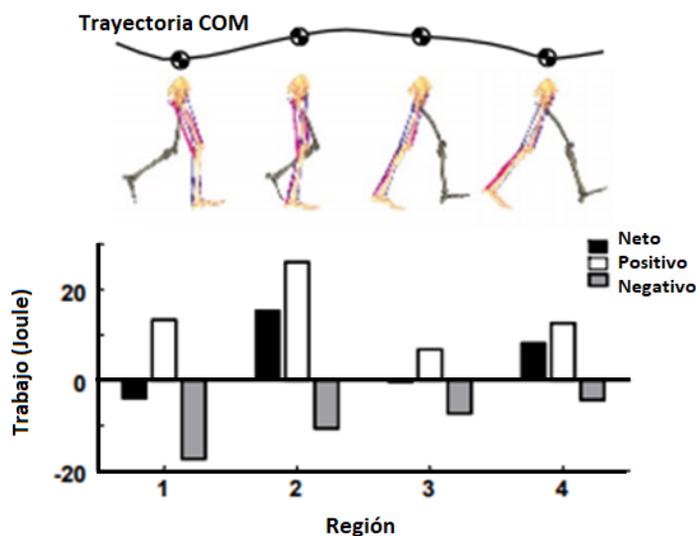
¹¹⁷ Martin & Morgan (1992). Biomechanical Considerations For Economical Walking and Running. Med Sci Sports Exerc; 24 (4). p. 467-74

¹¹⁸ Sheila, A. Dugan & Krishna, P. Bhat (2005). Biomechanics and Analysis of Running Gait. Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Rush University Medical Center 1725 West Harrison, Suite 970, Chicago, IL 60614, USA. 16 p. 603-621. doi:10.1016/j-jpmr.2005.02.007

Por otro lado, aún no se han considerado las propiedades multi-musculares, multi-segmentarias, la co-excitación de los músculos en la coordinación el flujo energético segmentario, así como tampoco el trabajo simultáneo positivo y negativo de los músculos. Neptune, Zajac & Kautz (2004)¹¹⁹.

El concepto de co-excitación muscular mencionado, significa que algunos músculos incurren en una actividad concéntrica; es decir, se contraen para producir el llamado trabajo positivo; mientras otros se alargan para producir un trabajo negativo (actividad excéntrica); también los investigadores han encontrado que los músculos pueden almacenar y liberar cierta energía elástica y que se excluye para el análisis de la potencia externa. (Neptune et al., 2001¹²⁰, 2003¹²¹; Zajac et al., 2003¹²²). En la ilustración siguiente se aprecia el llamado trabajo positivo y negativo de los músculos dentro del ciclo.

Ilustración 84. Trabajo negativo y positivo de los músculos



Fuente: Neptune, Zajac & Kautz (2004).

¹¹⁹ Neptune, Zajac & Kautz (2004). Muscle Mechanical Work Requirements During Normal Walking: The Energetic Cost of Raising the Body's Center-of-mass is Significant. Rehabilitation R&D Center, VA Palo Alto Health Care System, 3801 Miranda Avenue, Palo Alto, CA 94304, USA. Journal of Biomechanics. 37 p. 817-825

¹²⁰ Neptune, Kautz & Zajac (2001). Contributions of the Individual Ankle Plantar flexors to support, forward progression and swing Initiation During Walking. Journal Biomechanics 34; p. 1387-1398.

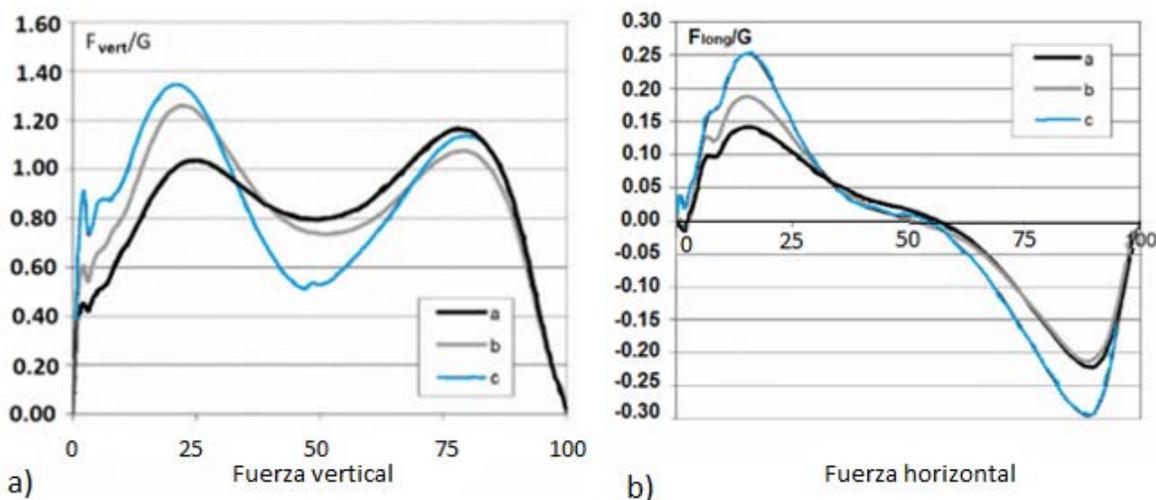
¹²¹ Neptune, Zajac & Kautz (2003). Muscle Force Redistributes Segmental Power for Body Progression During Walking. Gait & Posture.

¹²² Zajac (2003). Biomechanics and Muscle Coordination of Human Walking. Part II: Lessons from dynamical Simulations and Clinical Implications. Gait and Posture 17; p. 1-17.

En cuanto a las fuerzas directas y reactivas, diversos especialistas se han dado a la tarea de analizarlas a través de tapetes piezoeléctricos y las llamadas plataformas de fuerza construidas para tales propósitos; también se ha utilizado cámaras ultrasensibles para capturar el movimiento, inclusive hasta la más mínima desviación y no se diga de los simuladores computacionales que determinan de una manera muy precisa el centro de masa.

Varios estudios, entre ellos la investigación de Jurcevic, Susic & Kodvanj (2008)¹²³ han logrado registrar las fuerzas de reacción en sus tres ejes coordenados simultáneamente con la trayectoria que toma el centro de masa del cuerpo. En la ilustración 85 se muestran las fuerzas de reacción vertical y longitudinal. También ver el anexo 12 y 13.

Ilustración 85. Fuerzas de reacción del suelo generadas por el pie

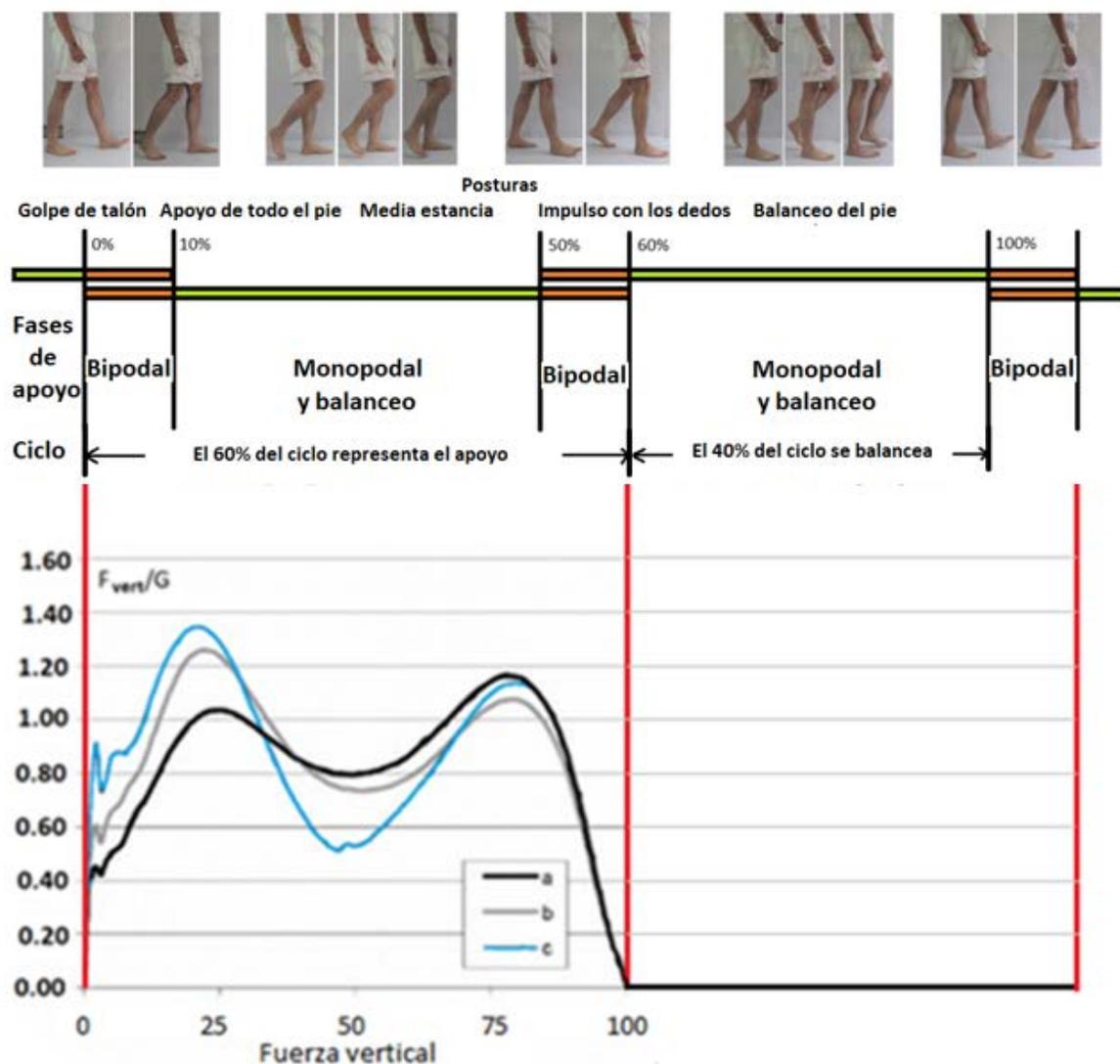


Datos obtenidos de Jurcevic, Susic & Kodvanj (2010). En el inciso a) y b) la línea negra representa el caminar normal, la línea en gris el caminar rápido y en azul, un caminar normal con movimiento exagerado de los brazos; resultados que consideran sólo al pie izquierdo.

¹²³ Jurcevic, Susic & Kodvanj (2010). Biomechanical analysis of walking: Effects of gait velocity and arm swing amplitude. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. University of Zagreb. Ivana Lucica 5 10000 Zagreb, Croatia. Period. Biol. Vol 112, No. 1, 2010.

Al observar la ilustración anterior, la gráfica del inciso a) presenta una doble cúspide o una doble joroba, donde las reacciones son máximas representando entre 110 y 140% del peso corporal; ésta curva al relacionarla con el ciclo de la marcha dichos puntos máximos corresponden a instantes posteriores al “choque de talón” y a instantes previos del “despegue de los dedos”, (apoyo con los metatarsos).

Ilustración 86. Relación entre la fuerza de reacción vertical y las posturas del pie

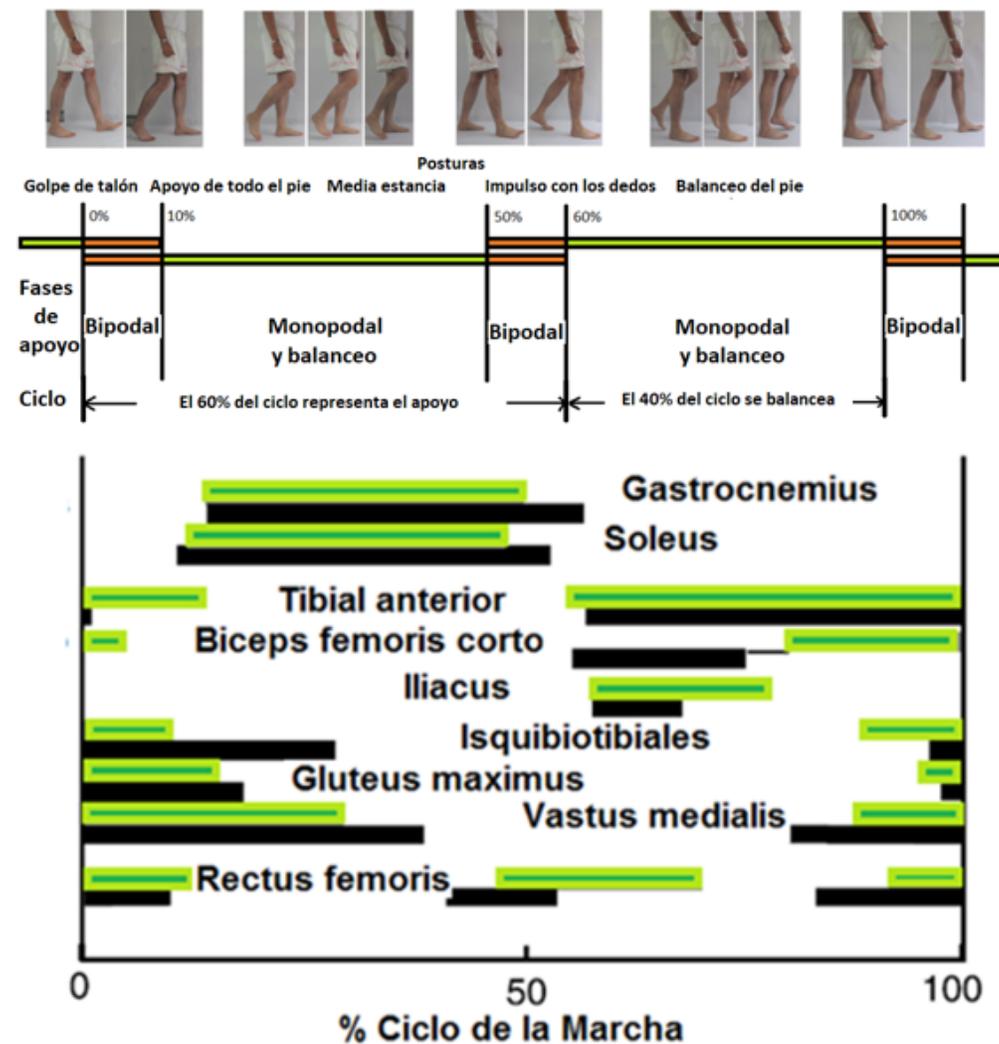


Fuente: Acomodo y fotografía propia con datos tomados de Rodgers (1988). Gómez & Sapiña (2005) y gráfica de Jurcevic, Susic & Kodvanj (2008).

Al relacionar las cinco posturas del ciclo de la marcha con la actividad muscular, se puede mencionar que los músculos responsables del movimiento son: Tibialis anterior, Extensor digitorum longus, Medial gastrocnemius, Lateral gastrocnemius, Soleus y Peroneus longus todos de la pierna, excluyendo el muslo, glúteo y cadera; ver anexo 14.

Es necesario aclarar que el registro electromiográfico hecho por los especialistas, consiste en colocar diversos electrodos en cada músculo para medir el grado de actividad y su sincronía con los demás; ver la siguiente ilustración y anexo 15

Ilustración 87. Las posturas del pie y los músculos que intervienen



Fuente: Acomodo y fotografía propia con datos tomados de Rodgers (1988). Gómez & Sapiña (2005) y gráfica de Zajac, Neptune & Kautz (2003).

VII.2. La biomecánica del pie

De las cinco posturas vistas del ciclo de la marcha, tres se van a estudiar a detalle las cuales son: golpe de talón, despegue de los dedos y la llamada media estancia. La razón por la que se eligieron las dos primeras, es por la fuerza extrema que se experimenta y la tercera por la trayectoria de presión a través de la planta. A continuación, se presenta el análisis por medio de un diagrama de cuerpo libre y la representación en el modelo del pie en dicha postura.

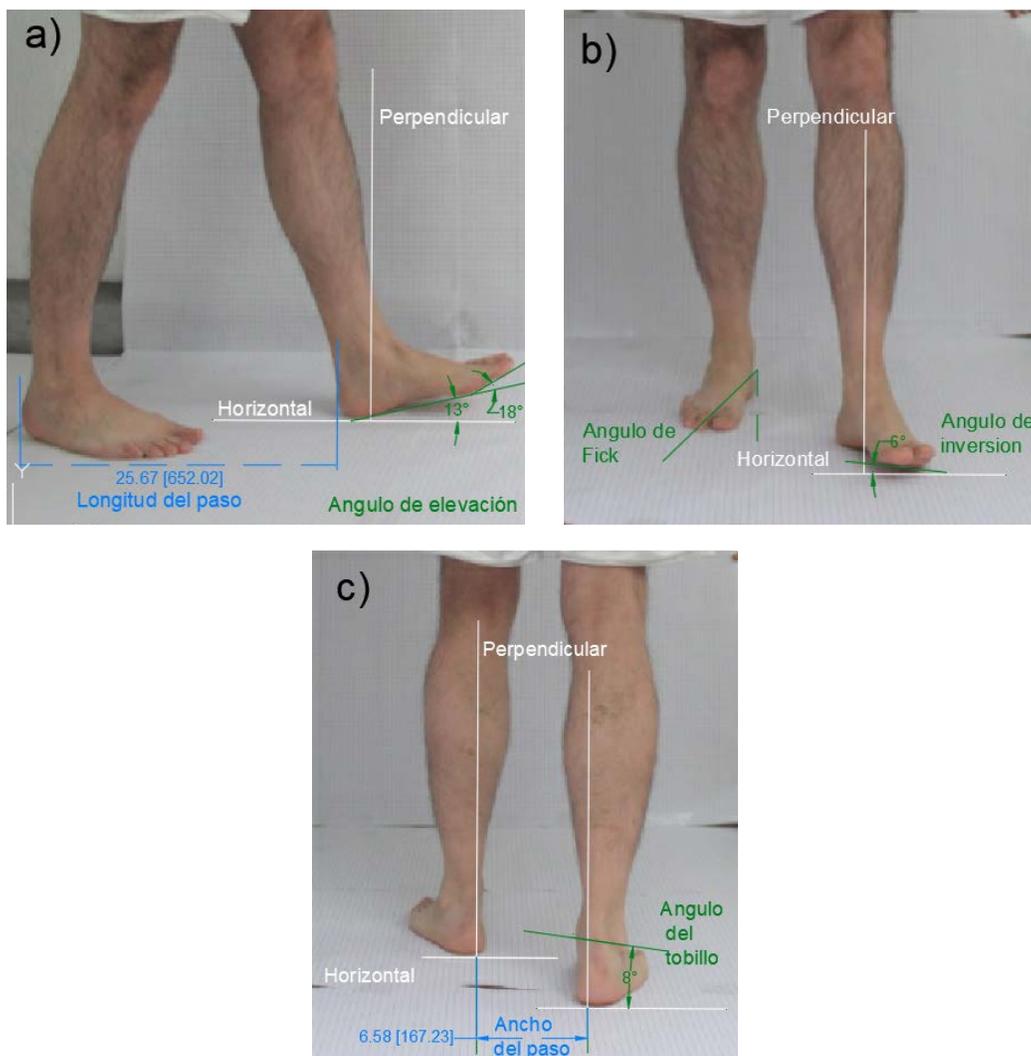
VII.2.1. Análisis de la postura “Choque de talón”

En esta postura, el talón del pie choca con el suelo al dar la zancada; cabe decir que las fuerzas generadas ocasionan una serie de esfuerzos y deformaciones en las articulaciones: Crural, Subtalar y Tarsal transversal (ésta última, cabe decir que está compuesta por la articulación talonavicular y calcaneocuboidea). El movimiento generado, es apenas perceptible a la vista pues ocurre en fracción de segundos. Para una mejor comprensión puede verse dichas articulaciones en el anexo 16.

Previo a ésta postura, al dar la zancada, el pie viene dorsiflexionado y al tocar el suelo con el talón, en la articulación del tobillo se genera un movimiento de flexión plantar en donde los músculos involucrados son: Tibial anterior, extensor largo del dedo gordo y el extensor largo de los demás dedos; por lo que en conjunto efectúan la llamada “contracción excéntrica” generando una desaceleración en la articulación para que el pie se deposite suavemente sobre el suelo. Antes de que se apoye toda la planta, el pie viene en modo inversión y la pierna se rota internamente Abboud (2002) ¹²⁴.

¹²⁴ Abboud, R.J. (2002) Op. Cit.

Ilustración 88. Vistas de la postura “Choque del talón”,



Fuente: Elaboración propia, fotografías tomadas considerando el choque del talón en sus diferentes vistas; inciso a) vista lateral, b) vista frontal y c) vista posterior del pie. En cada una de las imágenes se registró por medio de autocad versión 2021 diversos ángulos y longitudes de relevancia para su estudio.

Como se puede apreciar en la ilustración anterior, al caminar los pies se acomodan con cierta abertura que proporciona cierto equilibrio conocida como base de sustentación; es decir cada pie forma un ángulo imaginario de aproximadamente 18°, también llamado ángulo de Fick, formado desde el eje sagital del cuerpo hasta el eje tradicional del pie; ver anexo 17. En el inciso a y c de las imágenes se puede ver que existe una longitud y ancho del paso, un ángulo de 13° que forma la planta con el suelo, en el inciso b se aprecia al pie ligeramente caído en su parte lateral

llamado ángulo de inversión y en el inciso c el ángulo del tobillo respecto al eje transversal. Ver anexo 18 para mayor detalle.

El eje de la articulación talo crural forma un ángulo de 82° con el plano sagital, 8° con el plano transversal y de 20 a 30° con el plano frontal o coronal. El movimiento predominante es en el plano sagital del pie donde se desarrolla la dorsiflexión y flexión plantar. Sin embargo, por la complejidad de sus movimientos los científicos han ubicado otro eje en el cual también le proporcionan ciertos grados de movimiento éste eje le llaman eje subtalar, el cual lo relacionan con una bisagra ingleteada¹²⁵, algunos otros lo comparan como el acoplamiento de dos engranes cónicos por su movimiento de rotación, ver anexo 19.

VII.2.1.1. Diagrama de cuerpo libre

Ahora se analizará las fuerzas y los momentos involucrados en la articulación del tobillo en dicha postura; para esto Winter (2009)¹²⁶ estableció un método para calcular las fuerzas de reacción y los momentos generados en cada articulación del cuerpo, modelando cada extremidad del cuerpo por medio de segmentos de enlace; es decir analizar cada segmento del resto del cuerpo; por lo que, será necesario auxiliarse de una diapositiva representativa de dicha postura en el software de autocad 2021. Los criterios para analizar dicho segmento se exponen en el anexo 20.

Antes de pasar directamente al diagrama de cuerpo libre de fuerzas y momentos es necesario obtener ciertos datos que servirán para obtener dichas fuerzas. De acuerdo a los resultados de Neptune, et. al (2004) y Jurcevic, et. al (2008) vistos anteriormente, se puede ver que 0.166 veces es la constante que se multiplica por

¹²⁵ Sheila, A. Dugan & Krishna, P. Bhat (2005). Biomechanics and Analysis of Running Gait. Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Rush University Medical Center 1725 West Harrison, Suite 970, Chicago, IL 60614, USA. 16 p. 603-621. doi:10.1016/j-pmr.2005.02.007

¹²⁶ Winter, D. (2009). Biomechanics and Motor Control of Human Movement, Fourth edition; John Wiley & Son, Inc. ISBN: 978-0-470-39818-0. Pag. 108-109

la masa corporal para obtener lo que el pie ejerce horizontalmente de fuerza en el suelo y 1.15 veces lo que representa para la fuerza vertical.

Para una persona con un peso corporal de 80 Kg, su masa se descompone en sus componentes “x” y “y”.

$$\text{Horizontalmente representa: } 80 \text{ kg}(0.166) = 13.3 \text{ kg} \text{ -----(1)}$$

$$\text{Verticalmente representa: } 80 \text{ kg}(1.15) = 92 \text{ kg} \text{ -----(2)}$$

La masa al ser afectada por la gravedad proporciona el peso del cuerpo en Newton:

$$W = (92 \text{ kg})9.8 \frac{m}{s^2} = 901.6 \text{ N} \text{ -----(3)}$$

Otro dato importante es calcular la masa del pie que según tabla del anexo 18 (columna tres), es multiplicar la constante 0.0145 por la masa total de la persona:

$$\text{Masa del pie} = 0.0145(80 \text{ kg}) = 1.16 \text{ kg} \text{ -----(4)}$$

Y su peso es de:

$$\text{Peso del pie} = (1.16 \text{ kg})9.8 \frac{m}{s^2} = 11.368 \text{ N} \text{ -----(5)}$$

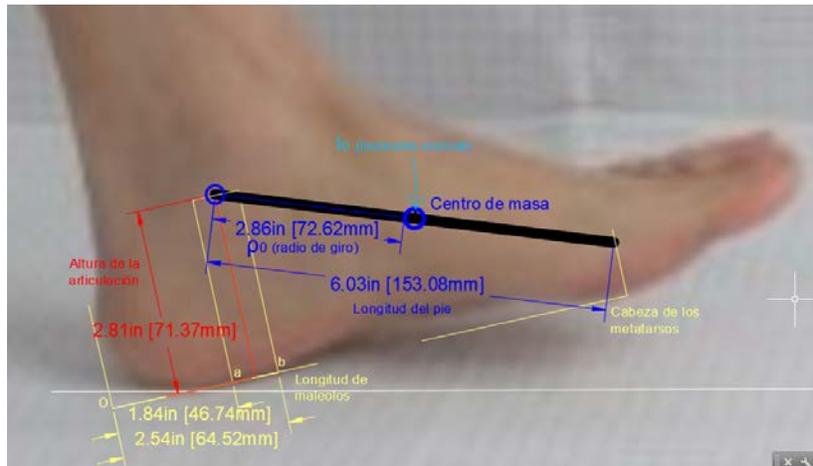
Se dibuja en autocad el segmento que representa al pie, que de acuerdo a la metodología de Winter, va de los maléolos hasta la cabeza de los metatarsos, dando una longitud de 153 mm; con este dato y la constante 0.475 se calcula el radio de giro (ρ_0); ver tabla del anexo 21 (columna seis):

$$\rho_0 = (0.475)15.3 \text{ cm} = 7.26 \text{ cm} = 0.0726 \text{ m} \text{ -----(6)}$$

Por lo que el momento inercial del pie es el producto de su masa con el radio de giro, ver ilustración siguiente:

$$I_0 = (1.16 \text{ kg})(0.0726 \text{ m})^2 = 0.006114 \text{ kg} * \text{m}^2 \text{ -----(7)}$$

Ilustración 89. Diagrama de cuerpo libre "momento inercial del pie"



Elaboración propia según la técnica de segmentos de Winter (2009), donde utiliza el centro de masa y el radio de giro; es necesario hacer notar que no se consideran los dedos ni la parte trasera del talón. La longitud de la articulación se obtuvo del capítulo V sección V.2.1. y la altura del tobillo de la tabla del anexo 16.

Ahora se calculan las fuerzas de reacción en la articulación del tobillo; para esto se hacen uso de la tabla (Linear and angular Kinematics-Foot, ver anexo 22); donde entre otros datos, están registradas las velocidades y las aceleraciones del eje "x" y "y" según la trayectoria del pie al recorrer cada postura. Para estos cálculos se eligió el fotograma 31 que corresponde a instantes posteriores al "choque del talón" y su aceleración en el eje x es de $-5.31 \frac{m}{s^2}$; es necesario aclarar que algunos datos tienen el signo negativo como una consecuencia de la desaceleración que tiene el pie al caminar.

La fuerza horizontal resultante es:

$$\Sigma F_x = ma_x$$

$$R_{x \text{ tobillo}} - F_{x \text{ suelo}} + F_{pie} = ma_x$$

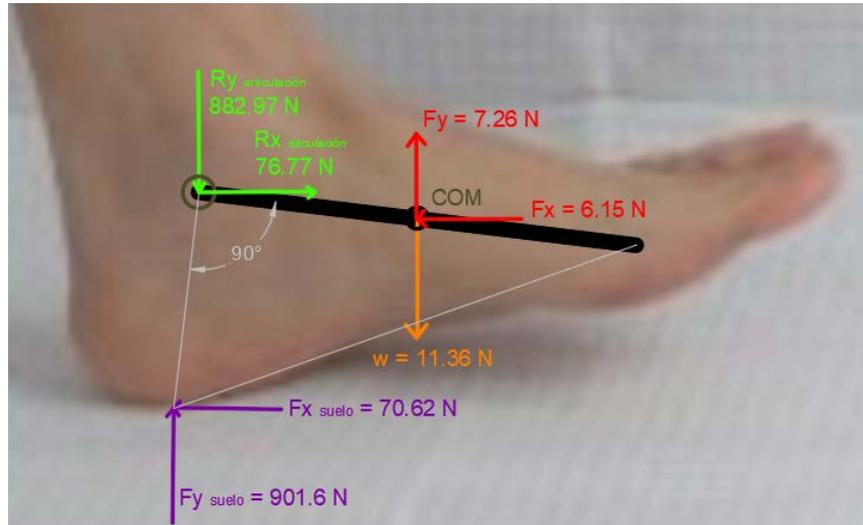
$$R_{x \text{ tobillo}} - (-13.3 \text{ kg}) \left(-5.31 \frac{m}{s^2}\right) + (1.16 \text{ kg}) \left(-5.31 \frac{m}{s^2}\right) = 0$$

$$R_{x \text{ tobillo}} - 70.62 \text{ N} - 6.15 \text{ N} = 0$$

$$R_{x \text{ tobillo}} = 76.77 \text{ N} \text{ -----(8)}$$

Por lo que la reacción en el tobillo es hacia la derecha, ver ilustración siguiente.

Ilustración 90. Diagrama de cuerpo libre "fuerzas y reacciones"



Elaboración propia según la técnica de segmentos de Winter (2009)

Para calcular la fuerza de reacción vertical se utiliza lo que representa el peso corporal, el peso del pie, que son los resultados de las ecuaciones (3) y (5) y la fuerza que es el resultado de la masa del pie por su aceleración de $6.26 \frac{m}{s^2}$, visto en tabla, anexo 22, fotograma 31.

$$\Sigma F_y = ma_y$$

$$R_y + F_{y\text{ suelo}} - W_{pie} = ma_y$$

$$R_y + 901.6\text{ N} - (1.16\text{ kg})\left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) = (1.16\text{ kg})\left(6.26 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$R_y = -901.6\text{ N} + 11.368\text{ N} + 7.2616\text{ N} = -882.97\text{ N} \text{ -----(9)}$$

El signo negativo de la fuerza de reacción en el tobillo indica que es hacia abajo; ver figura anterior; como se pudo ver las fuerzas de reacción del suelo son tomadas como fuerzas iniciales para el cálculo de las reacciones en el tobillo.

El cálculo para obtener el momento generado respecto al centro de masa considera a las fuerzas de reacción R_x , y R_y , el momento inercial del pie, que son los resultados de las ecuaciones (7), (8) y (9); y la aceleración angular obtenida en tablas (anexo 22).

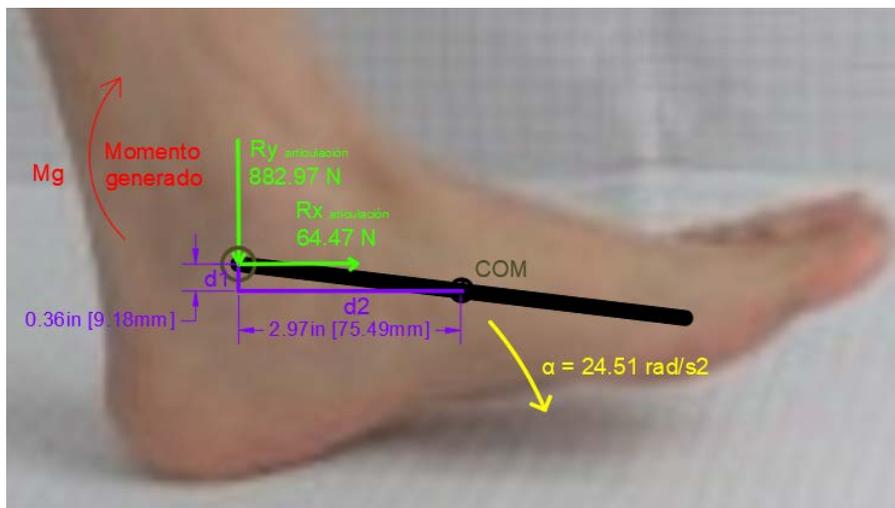
$$M + (R_x * d_1) - (R_y * d_2) = I_0 * \alpha$$

$$M + 64.47 \text{ N}(0.00918 \text{ m}) - 882.97 \text{ N}(0.07549 \text{ m}) = 0.006114 \text{ kg} * \text{m}^2(24.51 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2})$$

$$M - (66.06 \text{ N} - \text{m}) = 0.1498 \text{ N} - \text{m}$$

$$M = +66.21 \text{ N} - \text{m} \text{ ----- (10)}$$

Ilustración 91. Diagrama de cuerpo libre "Momento de reacción"



Elaboración propia según la técnica de segmentos de Winter (2009).

El momento generado en el pie es en sentido horario; por lo que debe de existir un momento de reacción para evitar que el pie caiga repentinamente; esta acción la debe efectuar el músculo tibial anterior en conjunto con el músculo flexor de los dedos y flexor hallus en una acción muscular concéntrica.

Es un hecho que al variar el ángulo del pie antes de que la planta toque completamente el suelo va a influir en los resultados anteriormente obtenidos. El centro de masa de acuerdo al diagrama de cuerpo libre de la ilustración 89 tiene su ubicación precisamente a la altura del hueso navicular donde el tendón del músculo tibial se conecta hasta llegar a la cabeza del primer metatarso.

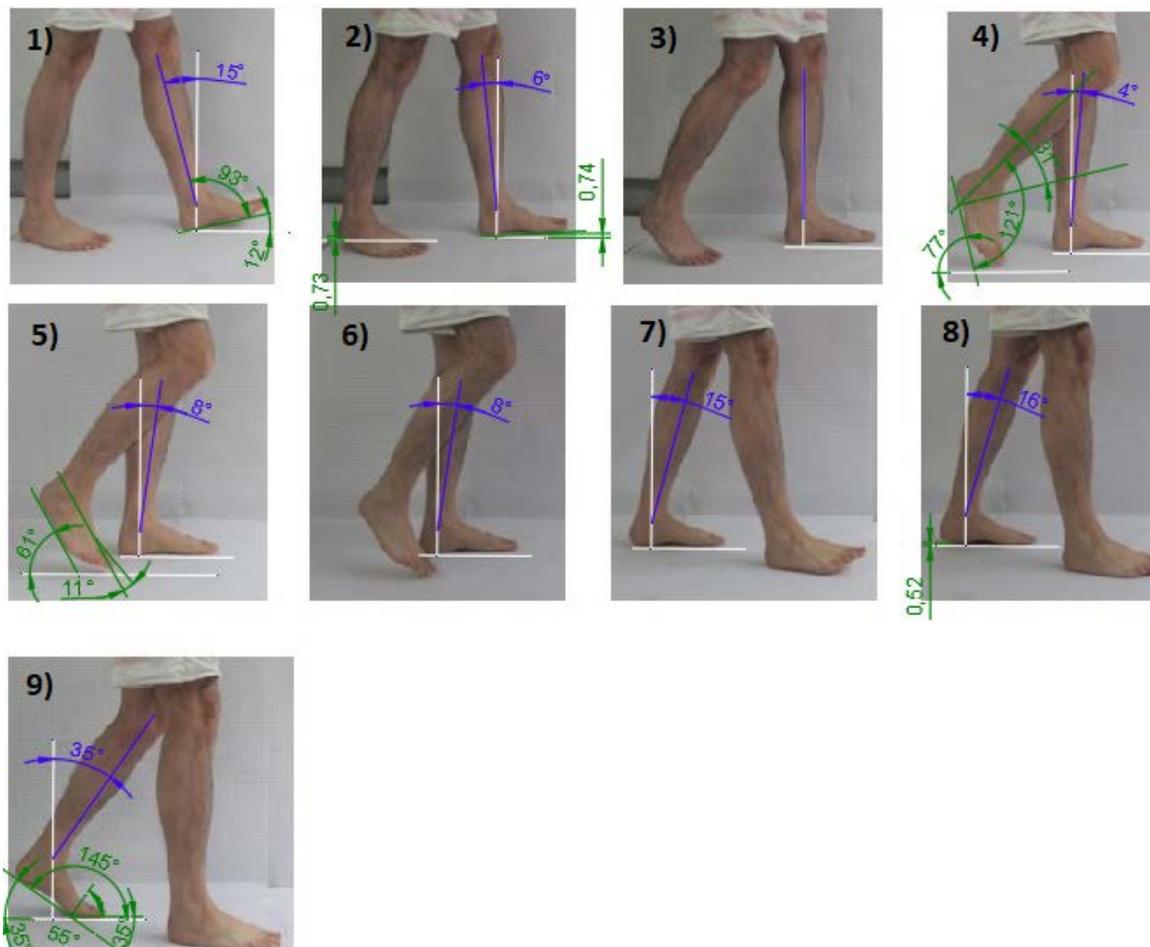
Ya se calcularon las fuerzas y los momentos en la articulación del tobillo al tocar el talón con el suelo; como puede verse el pie viene dorsiflexionado (planta y dedos hacia arriba), en inversión que es ligeramente caído al costado de afuera Abboud (2002) y con 6.8° en abducción con los dedos viendo hacia afuera Murray, Kory & Sepic (1970)¹²⁷

VII.2.2. Análisis de la postura “Media estancia”

Al estar apoyado con un solo pie, el cuerpo por la inercia se mueve hacia adelante, los músculos de la pantorrilla, se alargan principalmente para proporcionar un empuje estimado en un 250 % del peso del cuerpo. Los músculos Peroneo largo y corto estabilizan trasversalmente al tobillo y los de la planta como el flexor digital brevis, el abductor hallucis y digiti minimi apoyan principalmente en conjunto al talón Rodgers (1988), pág. 1825. Ver los músculos involucrados en el anexo 14.

¹²⁷ Murray, Kory & Sepic (1970). Walking patterns of normal women. Arch Phys Med Rehabil 51. US National Library of Medicine National Institutes of Health. p. 637-50

Ilustración 92. Diapositivas de la postura “Media estancia”



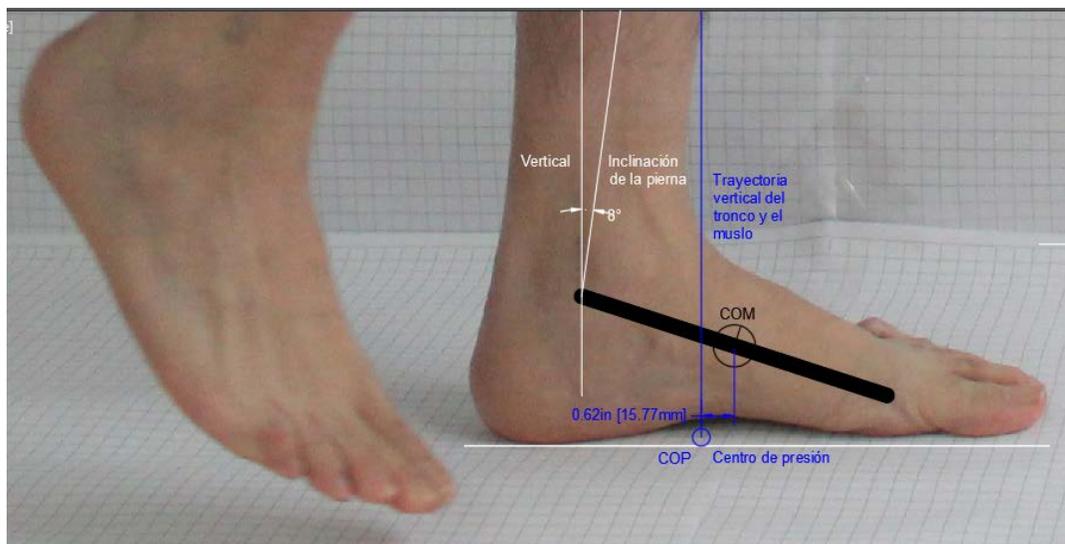
Elaboración propia, fotografías que representan la postura “Media estancia” donde se aprecia claramente cómo apoya la planta en su totalidad, mientras el otro pie se balancea en el aire. En cada una de las imágenes se acotó por medio de autocad versión 2021 diversos ángulos de relevancia para su estudio.

Al apoyar la planta del pie sobre el suelo, inmediatamente le sigue la postura llamada “media estancia” donde una sola extremidad soporta todo el peso del cuerpo, la ilustración anterior ejemplifica esto desde la diapositiva tres a la siete. Con la inercia del cuerpo, la rodilla se flexiona ligeramente y la pierna sufre una inclinación hacia delante respecto a su vertical; esto provoca que el centro de presión conocido como COP (por sus siglas en inglés center of pressure) del pie, dibuje sobre el suelo una trayectoria curva; ver anexo 23.

VII.2.2.1. Diagrama de cuerpo libre

Ahora toca el turno de analizar que le ocurre al pie en la postura "Media estancia" en cuestión de fuerzas; es necesario visualizar el diagrama de cuerpo libre y utilizar la técnica del segmento de enlace, con ciertos datos calculados en la sección VII.2.1.

Ilustración 93. Diagrama de cuerpo libre "Centro de presión"



Elaboración propia: Se dibuja el segmento de enlace (color negro) considerando la misma ubicación y sus medidas. La vertical (color azul) sirve para indicar en qué posición se encuentra el COP (centro de presión) pues coincide con el COM del cuerpo y no coincide precisamente con el COM del pie Winter (2009) pág. 127. Las líneas en color blanco representan la inclinación de la pierna con respecto a su vertical.

De acuerdo a estudios independientes de Neptune, et. al (2004) anexo 12 y Jurcevic, et. al (2008) figura 85; la reacción del suelo es aproximadamente de 0.8 la masa corporal para dicha postura.

Por lo que la masa es:

$$masa\ del\ pie : 80\ kg(0.8) = 64\ kg \text{ -----(11)}$$

Y un peso de:

$$W = (64\ kg)9.8\ \frac{m}{s^2} = 627.2\ N \text{ ----- (12)}$$

La fuerza de reacción en el tobillo se obtiene utilizando los resultados de la ecuación (5) y (12):

$$R_{y \text{ tobillo}} + F_{y \text{ suelo}} - W_{\text{pie}} = ma_y$$
$$R_{y \text{ tobillo}} + 627.2 \text{ N} - 11.368 \text{ N} = 0$$
$$R_{y \text{ tobillo}} = -615.83 \text{ N} \text{ -----(13)}$$

La reacción es hacia abajo

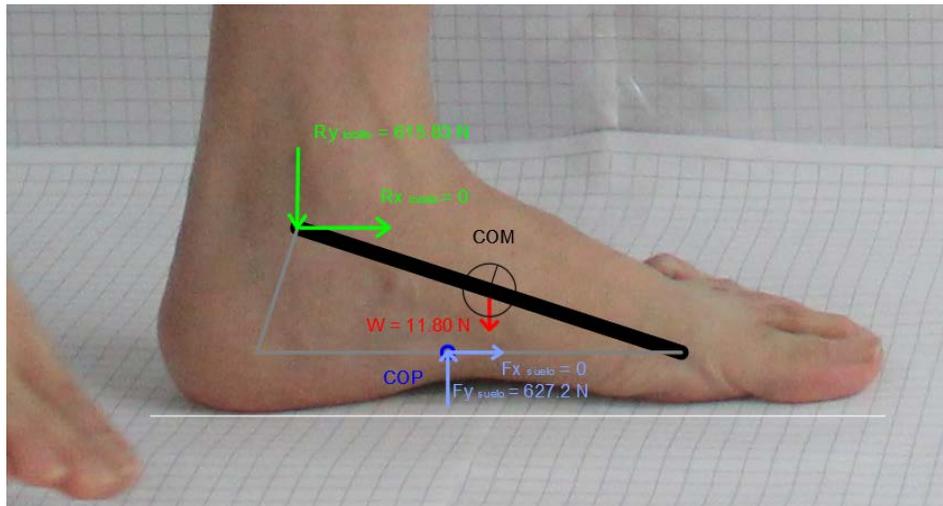
Para obtener las reacciones en el eje horizontal se utiliza la siguiente expresión:

$$R_{x \text{ tobillo}} + F_{x \text{ suelo}} = ma_x$$

Como no hay movimiento horizontal o es igual a cero, se tiene:

$$R_{x \text{ tobillo}} + F_{x \text{ suelo}} = ma_x = 0 \text{ -----(14)}$$

Ilustración 94. Diagrama de cuerpo libre "Fuerzas en el tobillo"



Elaboración propia representando los datos calculados por medio de la técnica "segmento de enlace"

El cálculo del momento generado para el centro de masa es:

$$M + (R_{y \text{ tobillo}} * d_1) + (F_{y \text{ suelo}} * d_2) = I_0 * \alpha$$

Como no hay aceleración angular ni tampoco momento de inercia, la expresión se iguala a cero:

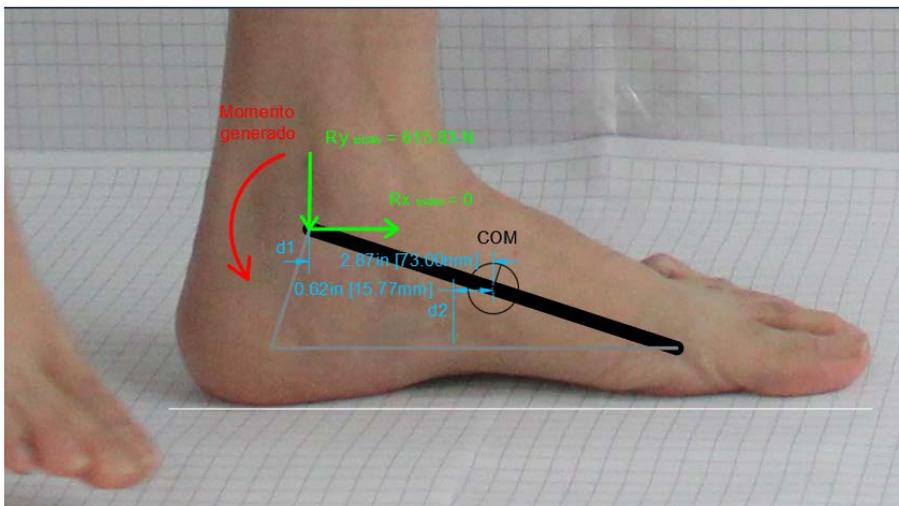
$$M - 615.83 \text{ N} * (0.073 \text{ m}) + 627.2 \text{ N} * (0.0157 \text{ m}) = 0$$

$$M - (44.95 \text{ N} - m) + (9.84 \text{ N} - m) = 0$$

$$M = -35.11 \text{ N} - m \quad \text{-----(15)}$$

Por lo que el momento generado es en sentido anti horario.

Ilustración 95. Diagrama de cuerpo libre "momento generado"



Elaboración propia representando los datos calculados por medio de la técnica "segmento de enlace"

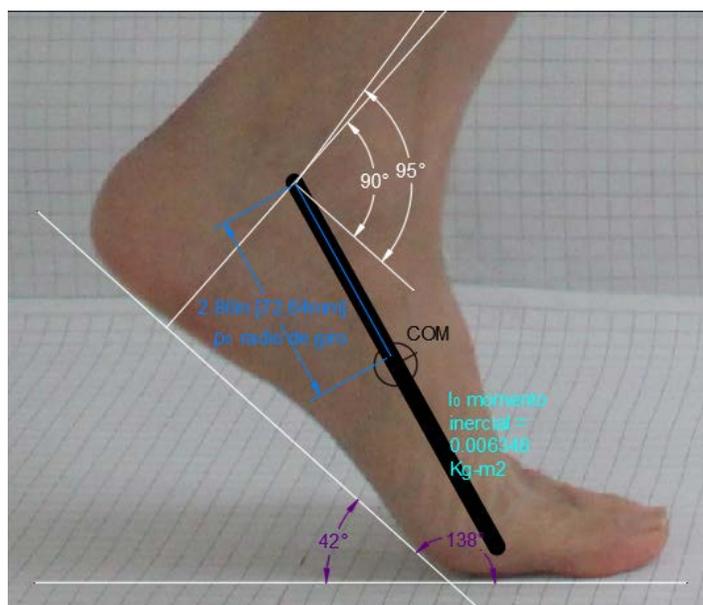
VII.2.3. Análisis de la postura “Impulso con los dedos”

Los músculos que intervienen después del choque del talón son los llamados Soleo y Gastrocnemio para soportar el apoyo en una sola extremidad hasta antes de despegar los dedos para dar nuevamente el paso; simultáneamente la articulación subtalar se traba y origina que el pie se vuelva rígido, capaz de soportar y propulsar a todo el cuerpo Abboud (2002) p. 171. Ver las articulaciones en el anexo 16 y 19.

VII.2.3.1. Diagrama de cuerpo libre

Para los siguientes cálculos es necesario considerar el radio de giro, el momento inercial, la masa y el peso del pie, obtenido en la sección VII.2.1.1.; además la velocidad y la aceleración contenida en la tabla “Linear and Angular Kinematics-Foot” del anexo 22. Para la postura “despegue de los dedos” se considera el fotograma 61 de dicha tabla.

Ilustración 96. Diagrama de cuerpo libre "Centro de masa, radio de giro y momento de inercia"



Elaboración propia: En la ilustración se puede apreciar el radio de giro, el momento inercial y su por supuesto el centro de masa. El pie se flexiona ligeramente en un ángulo de inclinación de 95° (las líneas blancas representan la vertical de la pierna con respecto a la planta, contrastando a la acción de los dedos que se dorsiflexionan en un ángulo de 42° respecto a su horizontal).

Para el cálculo de las fuerzas de reacción en el tobillo, nuevamente se utilizan los resultados de Neptune, et. al (2004) y Jurcevic, et. al (2008) los cuales coinciden que el pie ejerce una fuerza de 1.20 veces la masa corporal.

La reacción del suelo en el pie es de:

$$\text{La masa representa verticalmente: } 80 \text{ kg}(1.20) = 96 \text{ kg} \quad \text{-----}(16)$$

$$\text{La masa representa horizontalmente: } 80 \text{ kg}(0.23) = 18.4 \text{ kg} \quad \text{-----}(17)$$

La masa afectada por la gravedad es:

$$W = (96 \text{ kg})9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 941.76 \text{ N} \quad \text{-----}(18)$$

Se calcula la reacción del tobillo en el eje x, para esto se considera el fotograma 61 de la tabla “Linear and Angular Kinematics-Foot” ver anexo 22, donde la aceleración que lleva el pie, es de $6.40 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, también la masa del pie según el resultado (4) y el resultado (17), por lo que la ecuación queda:

$$R_{x \text{ tobillo}} + F_{x \text{ suelo}} = ma_x$$

$$R_{x \text{ tobillo}} + (18.4 \text{ kg}) \left(6.40 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = (1.16 \text{ kg}) \left(6.40 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

$$R_{x \text{ tobillo}} = 7.42 \text{ N} - 117.76 \text{ N}$$

$$R_{x \text{ tobillo}} = -125.18 \text{ N} \quad \text{-----}(19)$$

La reacción es de 125.18 N horizontalmente hacia la izquierda

Para la reacción en el tobillo en el eje vertical, se considera el peso del cuerpo, el peso del pie y la aceleración del pie verticalmente, ver los resultados (18), (5) y la aceleración de $2.88 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ vista en tabla del anexo 22, la ecuación queda así:

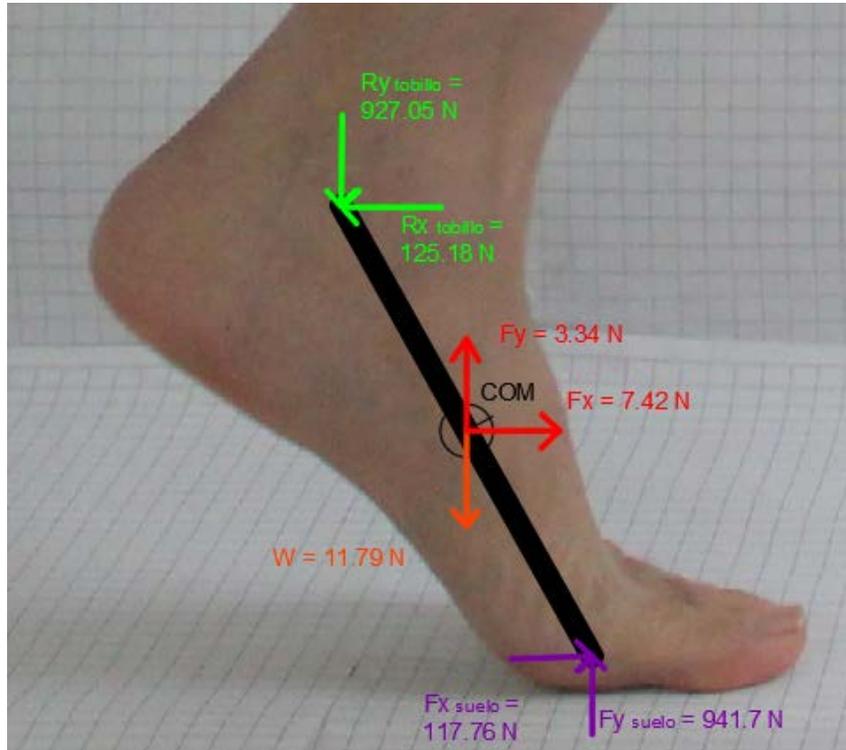
$$R_{y \text{ tobillo}} + F_{y \text{ suelo}} - W_{\text{pie}} = ma_y$$

$$R_{y \text{ tobillo}} + 941.76 \text{ N} - 11.368 \text{ N} = (1.16 \text{ kg}) \left(2.88 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

$$R_{y \text{ tobillo}} = -941.76 \text{ N} + 11.368 \text{ N} + 3.3408 \text{ N} = -927.05 \text{ N} \quad \text{-----}(20)$$

La reacción es de 927.05 N hacia abajo en la articulación del tobillo

Ilustración 97. Diagrama de cuerpo libre "fuerzas y reacciones"



Elaboración propia representando los datos calculados por medio de la técnica "segmento de enlace"

Para la obtención del momento se utilizan los resultados (7), (19), (20) y su velocidad angular del fotograma 61 según tabla del anexo 22; así como sus respectivas distancias, se tiene la siguiente expresión:

$$M - (R_{x\ tobillo} * d_1) - (R_{y\ tobillo} * d_2) = I_0 * \alpha$$

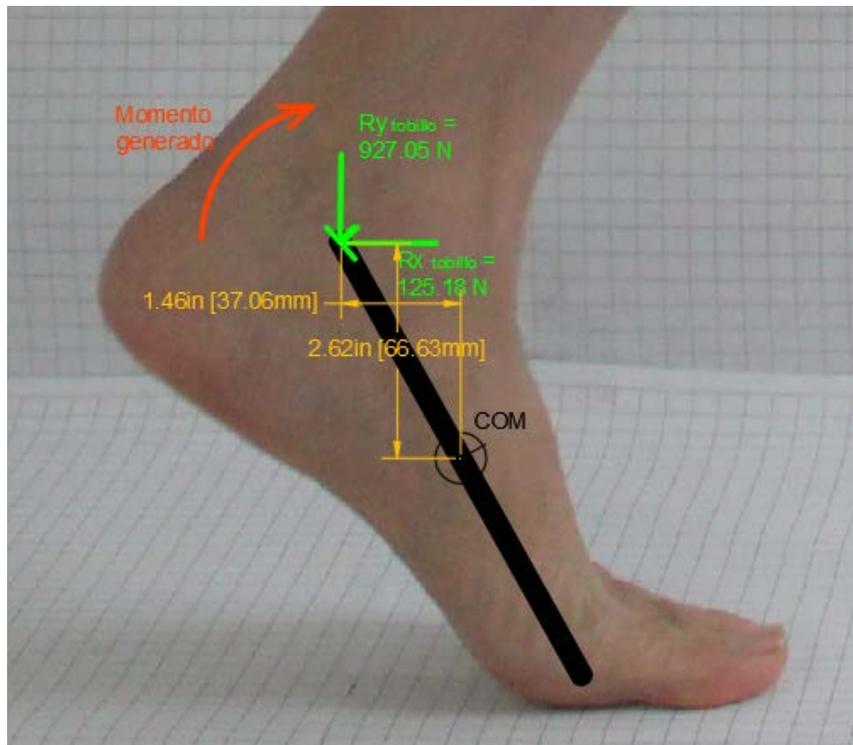
$$M - 125.18\ N * (0.066\ m) - 927.05\ N * (0.037\ m) = 0.006348\ kg * m^2 * (-52.39\ \frac{rad}{s^2})$$

$$M - (42.56\ N - m) = -0.332\ N - m$$

$$M = +42.2307\ N - m \text{ -----(21)}$$

El momento generado es de 42.2307 N-m en sentido horario; el cual se ve representado en la siguiente ilustración:

Ilustración 98. Diagrama de cuerpo libre "Momento generado"



Elaboración propia representando los datos calculados por medio de la técnica "segmento de enlace"

VII.3. Las circunferencias principales en las posturas del pie

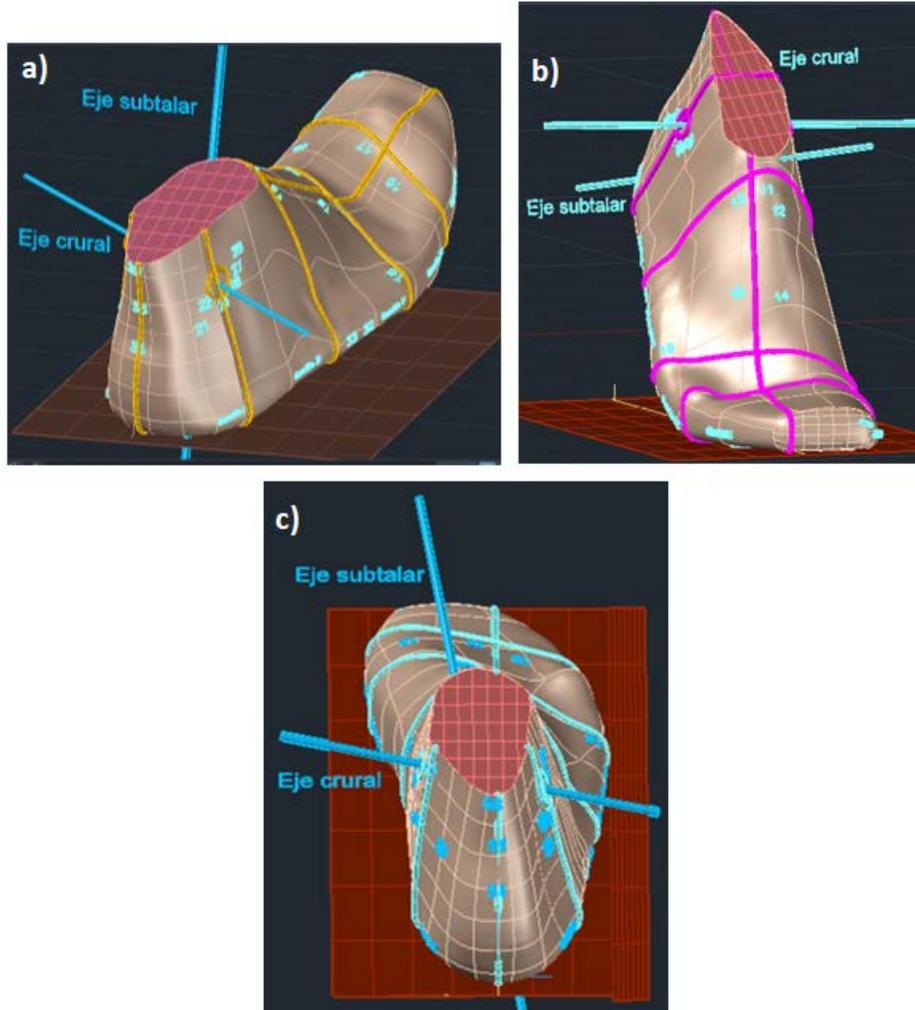
Como se ha visto dentro del ciclo de la marcha, las posturas “choque del talón y despegue de los dedos” toman diferentes formas que son necesarias para llevar a cabo la correcta función del caminar; principalmente sabemos que cumplen con la función de soportar el peso del individuo y de equilibrar su desplazamiento. Aunque su funcionamiento es en conjunto con las piernas, los pies son los que soportan directamente las fuerzas que se ejercen sobre el piso; por lo tanto, se desligan dos preguntas sumamente importantes la primera es: ¿Cómo las posturas impactan en la forma del pie? y ¿Qué cambios sufren en sus dimensiones? Para realizar esto, se llevó a cabo un levantamiento de las medidas en las principales circunferencias del pie en las tres posturas antes analizadas.

Para una mejor comprensión de los cambios de forma y dimensiones del pie se llevó a cabo el modelado del pie para cada postura, reflejando en cada uno lo encontrado en el levantamiento de medidas.

VII.3.1. Forma y dimensiones del tobillo

La circunferencia del tobillo ya que ésta parte de la articulación juega un papel sumamente importante en el cambio de la forma y funcionamiento, En la ilustración siguiente se muestran el modelado del pie en las tres posturas analizadas; por ejemplo en el primer modelo al chocar el talón en el suelo, el tobillo junto con la pierna se desplaza hacia atrás cambiando su forma con dimensión de 28.2 cm comparada con la postura media estancia 28.7 cm la cual es la medida más grande; a diferencia del despegue de los dedos donde el tobillo no sufre un cambio importante en forma pero si en medida 27.5 cm.

Ilustración 99. Circunferencia del tobillo

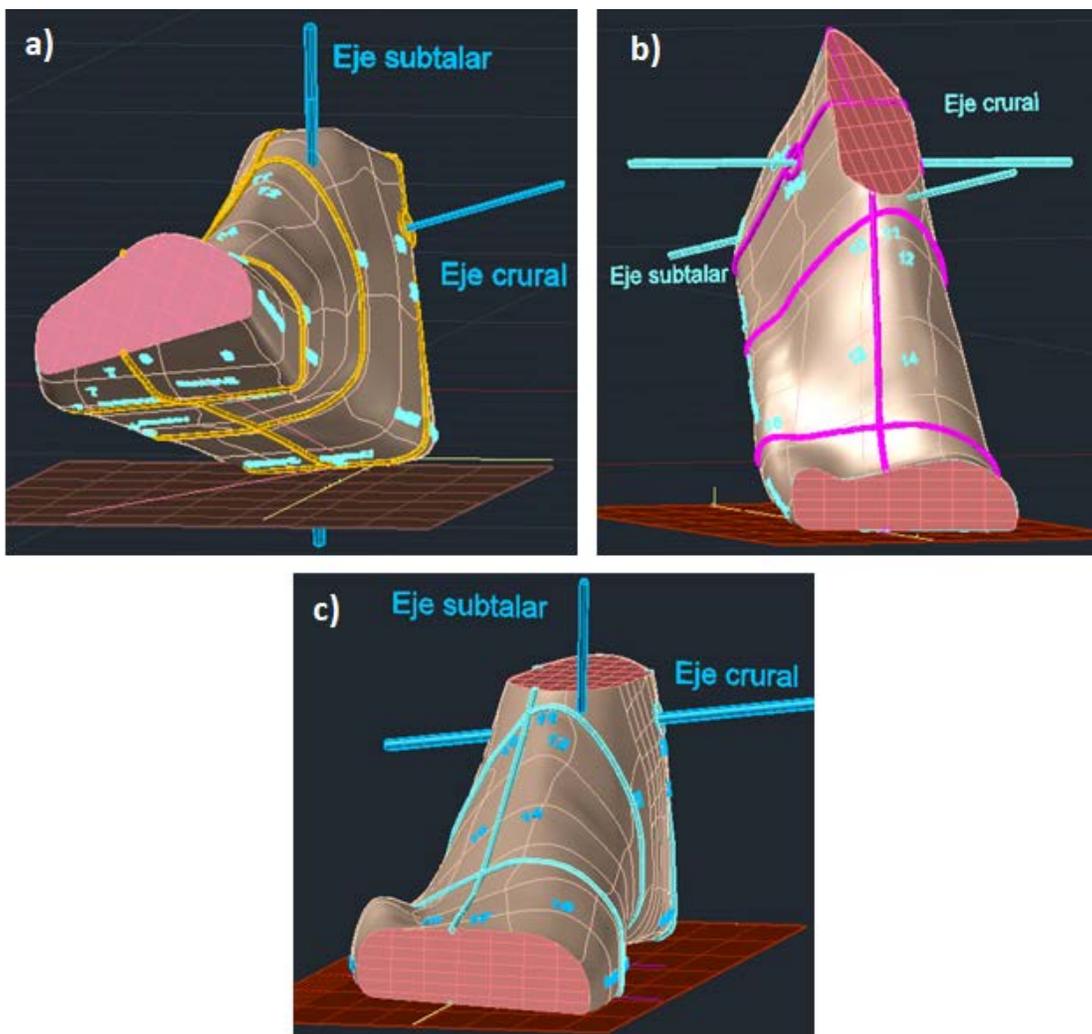


Fuente: Elaboración propia de los modelos del pie en autocad versión 2021, inciso a) Choque del talón, inciso b) despegue de los dedos e inciso c) media estancia; cada uno muestran los ejes crural y subtalar.

VII.3.2. Forma y dimensiones de los dedos

Los dedos son los elementos del pie que más se mueven, al dar el paso se dorsiflexionan formando un cono, el tendón del dedo gordo es independiente de los demás dedos por lo que no siempre se doblan a la misma altura dando una medida de 22.7 cm. El caso opuesto es en la postura de despegue de los dedos donde los dedos se abren ligeramente como abanico y ligeramente se adelantan, su circunferencia es de 24.1 cm y la media estancia con 23.7 cm

Ilustración 100. Circunferencia de los dedos

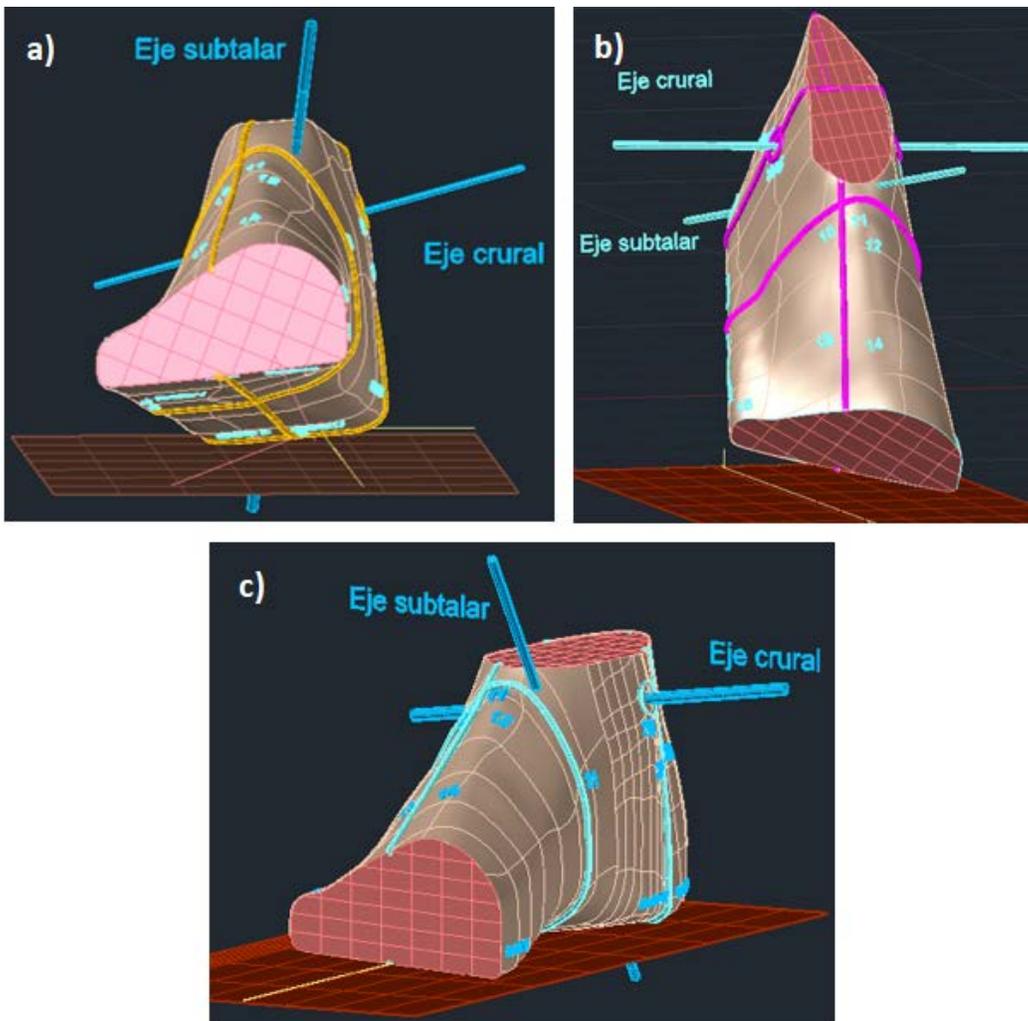


Fuente: Elaboración propia de los modelos del pie en autocad versión 2021, inciso a) Choque del talón, inciso b) despegue de los dedos e inciso c) media estancia; cada uno muestran los ejes crural y subtalar.

VII.3.3. Forma y dimensiones del recio

Al revisar el recio en el modelo del pie, la medida más grande de la circunferencia es en la media estancia con 25.6 cm; cuando se habla de forma se presenta en la postura despegue de los dedos con una planta muy curvada, aunque en medida representa 25.1 cm y con el coque del talón de 25 cm.

Ilustración 101. Circunferencia del recio

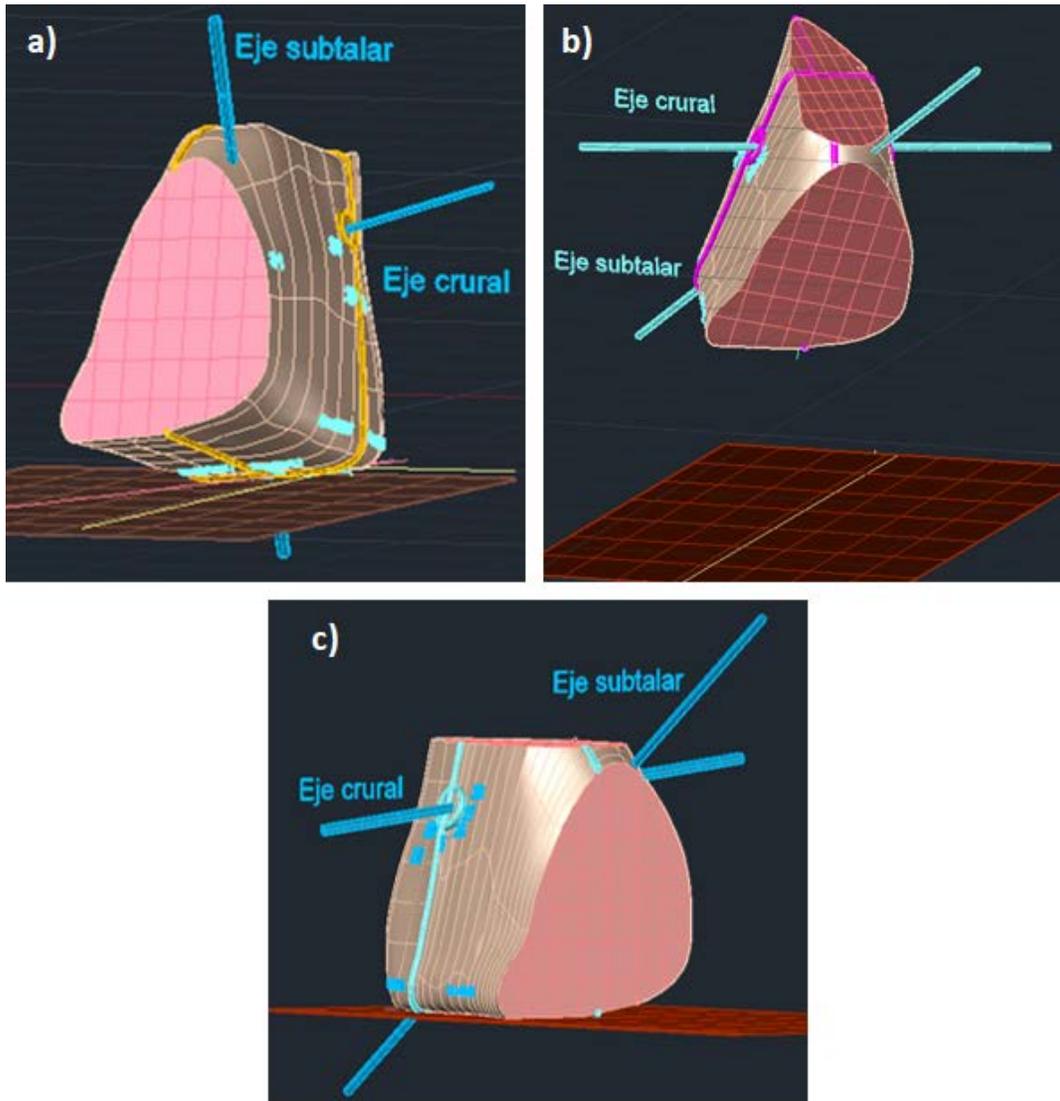


Fuente: Elaboración propia de los modelos del pie en autocad versión 2021, inciso a) Choque del talón, inciso b) despegue de los dedos e inciso c) media estancia; cada uno muestran los ejes crural y subtalar.

VII.3.4. Forma y dimensiones del empeine

La circunferencia del recio es la que menos cambia con 26 cm en el despegue de los dedos, 26.5 cm en media estancia y 26.6 cm en choque del talón.

Ilustración 102. Circunferencia del empeine



Fuente: Elaboración propia de los modelos del pie en autocad versión 2021, inciso a) Choque del talón, inciso b) despegue de los dedos e inciso c) media estancia; cada uno muestran los ejes crural y subtalar.

VII.3.5. Análisis de las circunferencias principales

La siguiente tabla hace un comparativo entre las circunferencias principales de las tres posturas, para la extremidad derecha e izquierda.

Tabla 28. Circunferencias del pie en las tres posturas de estudio

Pie derecho								
Parte del pie	Tobillo		Empeine		Recio		Dedos	
Media estancia (pie estático)	28.7 cm	11.2 in	26.5 cm	10.4 in	25.6 cm	10.0 in	23.7 cm	9.33 in
Pie dinámico (postura)								
Choque del talón	28.2 cm	11.1 in	26.6 cm	10.4 in	25 cm	9.84 in	22.7 cm	8.93 in
Despegue de dedos	27.5 cm	10.8 in	26.0 cm	10.2 in	25.1 cm	9.88 in	24.1 cm	9.49 in
Pie izquierdo								
Parte del pie	Tobillo		Empeine		Recio		Dedos	
Media estancia (pe)	28.5 cm	11.2 in	26.4 cm	10.3 in	25.6 cm	10.0 in	22.7 cm	8.85 in
Pie dinámico (postura)								
Choque del talón	28.0 cm	11.0 in	26.2 cm	10.3 in	24.5 cm	9.64 in	22.0 cm	8.66 in
Despegue de dedos	27.8 cm	10.9 in	25.9 cm	10.0 in	24.9 cm	9.80 in	22.3 cm	8.77 in

Elaboración propia con datos obtenidos de la tabla 24 y en sesión de medidas.

De acuerdo a los resultados obtenidos al medir las circunferencias del pie; las lecturas más grandes son las que respectan al pie en una postura estática; esto no quiere decir que la extremidad este en reposo, sino que está cumpliendo con la función de soportar el peso del cuerpo, como ya se había mencionado. En la postura “choque del talón” las medidas obtenidas para el tobillo y el empeine son ligeramente más grandes comparadas con las medidas de la postura “despegue de los dedos” caso opuesto sucede al considerar las circunferencias del recio y de los dedos, donde en esta última postura son ligeramente más grandes, en ambos pies. Tales observaciones se tomarán en cuenta en el próximo capítulo.

Capítulo VIII El prototipo de la horma

Con el modelo del pie y la simulación de algunas posturas al caminar, visto en el capítulo VI y VII; se muestra un mejor panorama de lo que la extremidad necesita en cuanto al espacio dentro del calzado, por lo que se está hablando de ergonomía¹²⁸ es decir, mientras algunas partes del pie en movimiento no cambian significativamente de forma y/o dimensiones, otras en cambio como la zona del recio, necesitan un espacio considerable para la articulación con los dedos.

Con base a lo anterior “El molde llamado horma” se ajusta con la ayuda de puntos de control que nos brinda la herramienta AutoCAD 2021, e inclusive se propone un punto base u origen para formar vectores y así, facilitar la manipulación de su superficie.

Ya con el modelo virtual de la horma, se lleva al concepto físico a tamaño real, bajo la técnica de prototipado rápido con la tecnología FDM (por sus siglas en inglés Fusion Deposition Modelling), con la finalidad de hacer pruebas funcionales de ensamble; mostrar sus guías en bajo relieve y efectuar un análisis de esfuerzo deformación con el software solidwoks.

¹²⁸ Ergonomía de acuerdo a la Real Academia Española significa estudio de la adaptación de las máquinas, muebles y utensilios a la persona que los emplea habitualmente, para logra mayor comodidad y eficacia. Op. Cit.

VIII.1. Ajustes en el modelo virtual

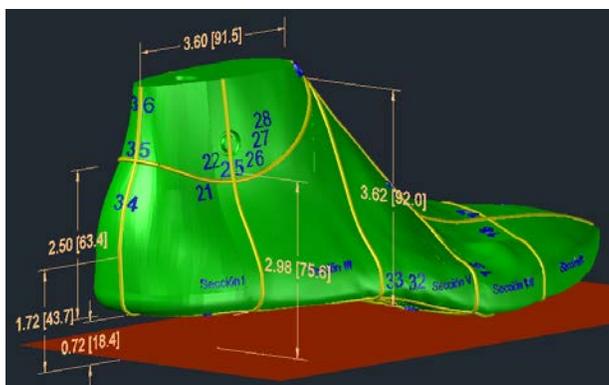
Muchos aspectos importantes en el calzado se han adquirido a través de los años por la experiencia y otros adquiridos por disciplinas como la antropometría, ortopedia, medicina del deporte, etc., estos aspectos forman parte del diseño inicial que toda horma debe contener. Para tal propósito, se llevó a cabo una sesión de escaneo al pie, donde se aprecia su postura en reposo (ver apéndice 3); éstas imágenes fueron analizadas en AutoCAD 2021 y gracias a esto, se encontró ciertas características de forma y sus medidas. A continuación, se detalla.

VIII.1.1 Cuadramen o sección I y II de la horma

Adicional a lo encontrado en el escaneo del pie también se consideran ciertos aspectos dinámicos al caminar.

- ❖ La altura del talón se establece a 18.4 mm con respecto al suelo, para distribuir el peso del cuerpo en todo el pie.
- ❖ La máxima curvatura del talón en su lado posterior llamada pthernion debe estar ubicada a una altura de 43.7 mm con respecto al suelo. Es necesario considerar esta curvatura en la horma para que el calzado cuente con esta cámara para evitar ampollas por su excesivo apriete.
- ❖ La abertura del calzado en su parte posterior se propone a una altura de 63.4 mm y debe rodear al tobillo a una altura de 75.6 mm por debajo de los maléolos hasta subir al empeine a 92 mm.

Ilustración 103. Sección o cuadramen I y II de la horma

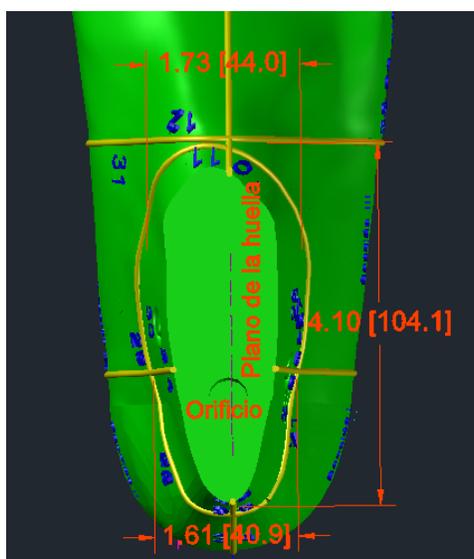


Elaboración propia, se muestra el modelo virtual de la horma donde se especifican las medidas personalizadas del talón y su altura con respecto del suelo, el escote que debe llevar el calzado, los puntos de ajuste y de mayor cuidado del pie en color azul y en amarillo las secciones o cuadramenes respectivos; todo en autocad ver 2021.

VIII.1.2. Cuadramen o sección III y IV de la horma

Las siguientes secciones III y IV junto con las dos anteriores son involucradas para establecer la abertura del calzado. Desde una vista superior, se aprecia con línea punteada el eje propuesto y con respecto a éste la abertura propuesta en amarillo, la cual está cargada ligeramente hacia la parte medial, pues la constitución espacial del tobillo así lo establece; longitudinalmente representa 104.1 mm y transversalmente 44 mm.

Ilustración 104. Sección III y IV de la horma

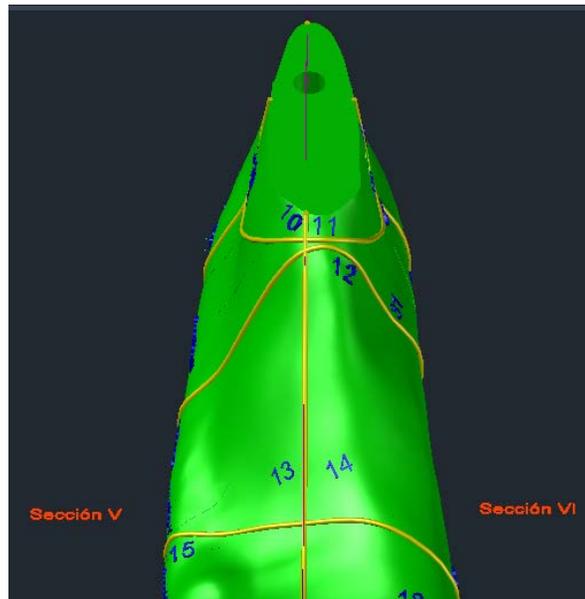


Elaboración propia, ajuste superior de las secciones III y IV de la horma, se puede apreciar que la abertura abarca hasta la circunferencia del empeine y en azul los puntos de interés; todo en autocad ver 2021.

VIII.1.3. Cuadramen o sección V y VI de la horma

En la sección V y VI correspondiente al empeine, generalmente el fabricante coloca la parte sujetadora del calzado; ya sea resorte o agujetas por ser una zona completamente rígida y de poco movimiento; no hay que olvidar que colinda con una zona del recio.

Ilustración 105. Sección V y VI de la horma



Elaboración propia, ajuste superior de las secciones V y VI de la horma

Para la sección V, la horma debe reflejar la caída natural característica del medio pie (se aprecia en el apéndice 3 con la extremidad libre de carga); el pie escaneado se trabaja en autocad versión 2021 y se establece que existe un arco de 134.7 mm en su vista lateral, como se muestra en la siguiente figura.

Ilustración 106. Ángulo inferior de la horma



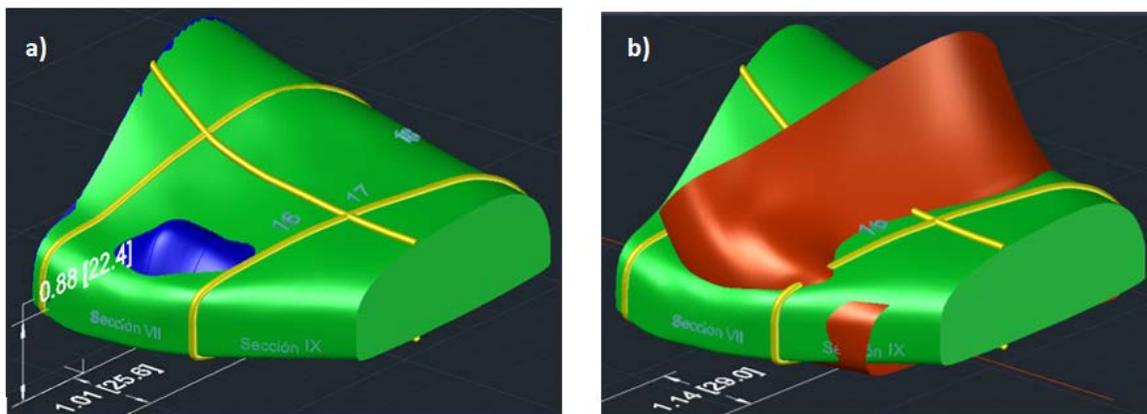
Elaboración propia, ajuste lateral de la sección V respetando el arco medial de la sección VI de la horma

VIII.I.4. Cuadramen o sección VII y VIII de la horma

Las secciones VII y VIII son las que conllevan posiblemente un mayor cuidado para su ajuste, pues coinciden con la zona del recio, articulación muy importante para el desempeño del pie y la movilidad del individuo; Además concentran varios puntos de ajuste o de lesión, representados por los números en color azul. Es necesario mencionar que en la extremidad derecha de la persona en estudio, presenta una patología ortopédica en el 5º dedo llamada “Dedo de sastrecillo”; esto es un encogimiento de las falanges que provoca un levantamiento semejante a una pequeña joroba.

Para ejemplificar el ajuste de la horma, se utiliza el modelo de la horma en color verde y se hace un comparativo de las posturas “Apoyo de la planta (color azul) y “Despegue de los dedos” (color marrón), considerando sólo las secciones VII y VIII, éstas se trasponen para su análisis; con esto, se puede apreciar las partes del pie que sobresalen y son necesarias ajustar. Por ejemplo, se observa en el inciso a) de la ilustración siguiente, la parte en azul que sobresale es el mencionado “Dedo de sastrecillo” y en el inciso b) Al dorsiflexionarse el pie, el 5º dedo se desplaza ligeramente hacia adelante, por lo que es necesario dimensionar a la horma para que el calzado ya tenga el espacio suficiente para albergar dicho dedo.

Ilustración 107. Sección VII y VIII de la horma

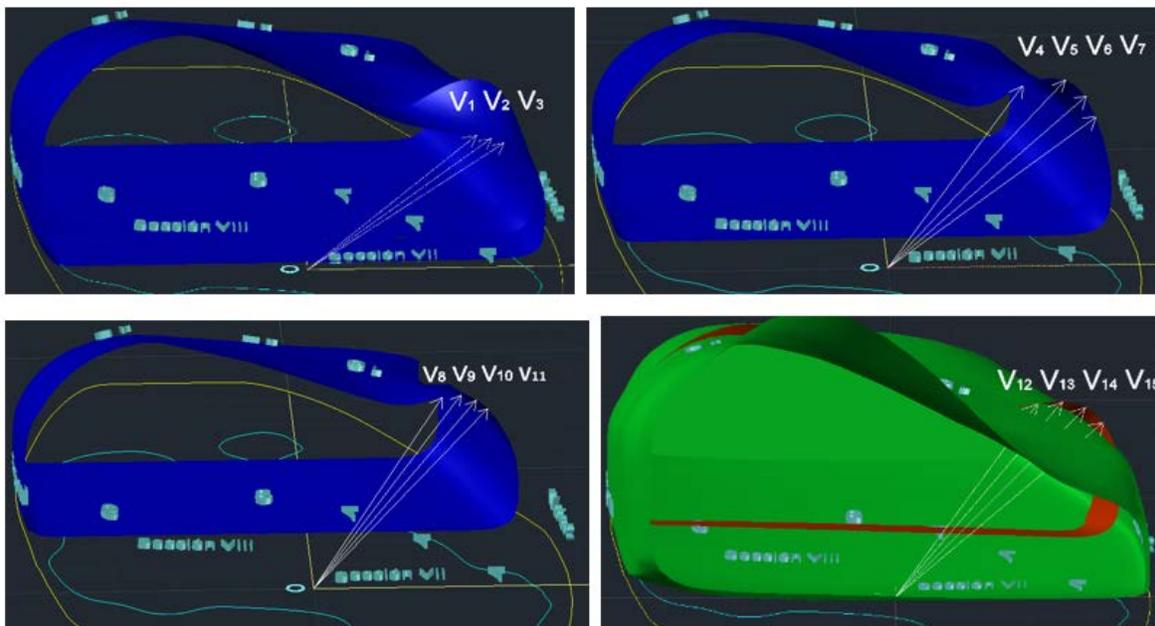


Elaboración propia, en el inciso a) El dedo de sastrecillo se asoma a través del prototipo de la horma en color azul. En el inciso b) Se muestra el desplazamiento de éste mismo dedo hasta la circunferencia en amarillo.

En la ilustración anterior se puede apreciar que las cotas en color blanco, indican que hubo un incremento 3.4 mm longitudinalmente con respecto al suelo, por lo que el 5º dedo requiere más espacio hacia adelante para no sufrir un encogimiento dentro del calzado y esto sólo se determinó para un pie en movimiento, aspecto relevante para un mejor confort.

Al manejar mallas y superficies en Autocad existen los llamados nodos que son puntos de control que sirven para modificar las dimensiones y en general manipular a la horma en su ajuste; estos puntos junto a un origen establecido; por ejemplo, el punto "O" establecido en la sección V.5.4. pueden representar vectores de posición herramienta clave para incrementar o disminuir según sea el caso.

Ilustración 108. Vectores de posición para ajuste en la horma



Elaboración propia, se muestran los vectores para ajustar el dedo de sastrecillo en la horma, al proporcionar las coordenadas x,y y z en Autocad, se tiene la facilidad de poder para variar cualquier eje.

A continuación, se presenta de manera condensada las componentes de los quince vectores.

Tabla 29. Tabla resumen de vectores de posición

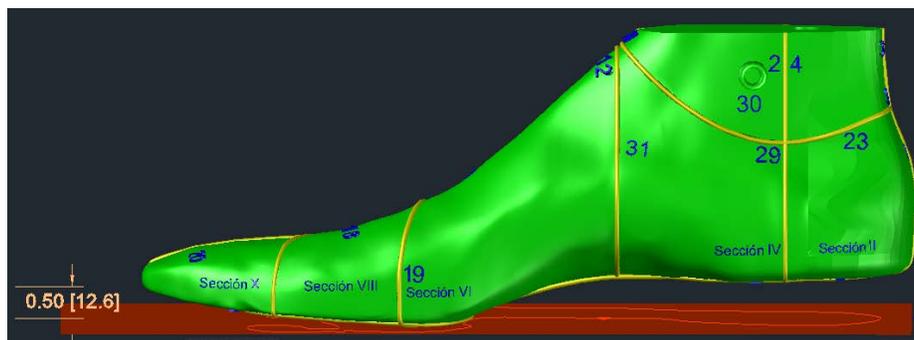
Vector	i	j	k	Θ	Longitud 3D
V ₁	1.30	0.16	1.01	37.8°	1.65
V ₂	1.41	0.16	0.99	34.8°	1.73
V ₃	1.51	0.16	0.95	32°	1.79
V ₄	1.06	0.59	1.25	45.8°	1.74
V ₅	1.39	0.59	1.29	40.5°	1.98
V ₆	1.54	0.59	1.15	34.9°	2.01
V ₇	1.62	0.59	0.98	29.7°	1.98
V ₈	1.01	1.02	1.13	38.2°	1.83
V ₉	1.15	1.02	1.15	36.8°	1.92
V ₁₀	1.27	1.02	1.11	34.2°	1.97
V ₁₁	1.35	1.02	1.03	31.4°	1.98
V ₁₂	1.09	1.34	1.12	33°	2.05
V ₁₃	1.27	1.33	1.13	31.6°	2.16
V ₁₄	1.45	1.28	1.10	29.7°	2.23
V ₁₅	1.58	1.19	1.01	27.1°	2.22

Elaboración propia, se presentan los vectores que sirvieron de ajuste en la horma, con sus componentes i, j y k, el ángulo de dirección y su longitud total en pulgadas.

VIII.I.5. Cuadramen o sección IX y X de la horma

En la sección IX y X se deja una cámara en la parte superior de la horma con el objeto de dar libertad de movimiento a los dedos cuando se dorsiflexionan; también es importante dar una ligera elevación en su punta con respecto al suelo de aproximadamente de 12.6 mm para que el calzado no se atore con el piso.

Ilustración 109. Sección IX y X de la horma



Elaboración propia, ajuste de las secciones o cuadramenes IX y X, parte superior e inferior de la horma.

VIII.2. Ingeniería del prototipo 0

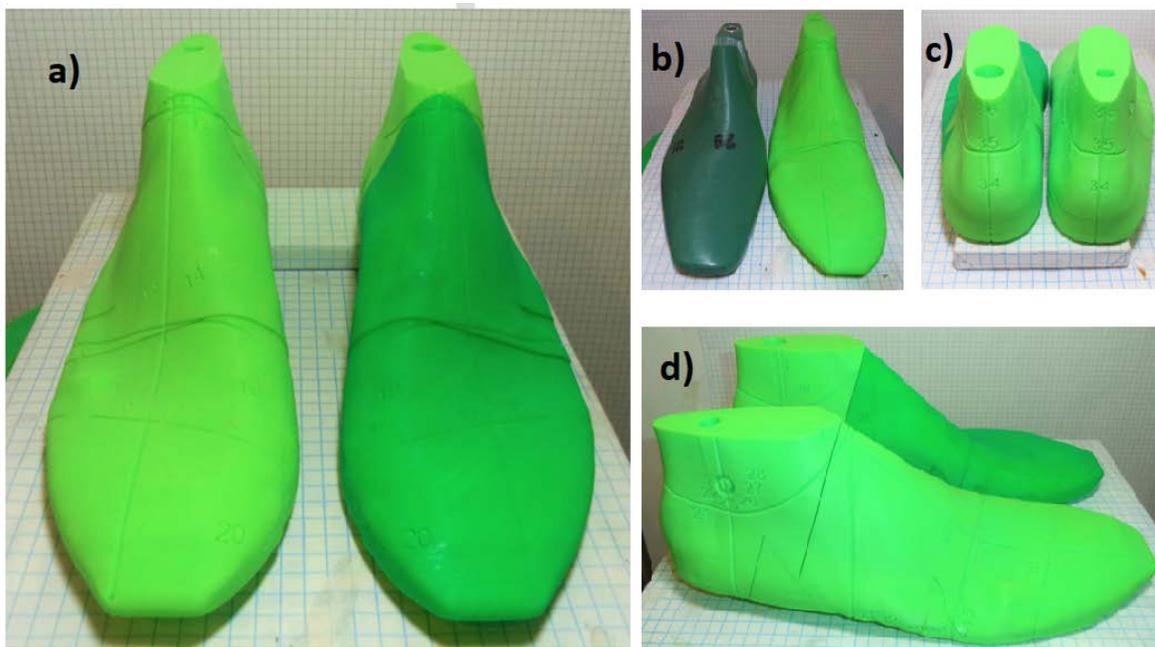
En este apartado se hace una reingeniería de la horma al concebir un prototipo totalmente diferente; es decir, para empezar, se rompe con el paradigma de una horma articulada al proponer una compuesta por sólo ensamble, también una reducción del peso por un material más ligero y totalmente biodegradable; además el prototipo lleva una nomenclatura en su superficie que sirve de guía para la elaboración de patrones y el diseño de calzado. Dentro de las pruebas a las que se someterá éste prototipo son: la validación de su funcionalidad, la modularidad, un análisis de elementos finito con diversos materiales para poner a prueba el diseño y por último se contabilizarán los costos y los gastos por el uso de la tecnología FDM.

VIII.2.1. Prototipado rápido bajo la tecnología FDM (Fuse deposition modeling)

Con el diseño ya ajustado y una reingeniería para hacer una horma totalmente diferente a la tradicional, el siguiente paso es obtener el prototipo de manera física en su tamaño real con el objeto de validar todo lo conceptualizado en el modelo; La técnica utilizada para éste fin es el prototipado rápido bajo la tecnología FDM¹²⁹.

El modelo desarrollado en Autocad versión 2021, se transfiere a la interfaz Cura para convertirse en código G, éste lenguaje divide en capas y trayectorias la fabricación; posteriormente el archivo se carga en la máquina 3D printing para ser interpretado; ver apéndice 5 sobre su manufactura. El material utilizado es el ácido poliláctico, un termoplástico extensamente utilizado para tal tecnología; ver anexo 24 sobre sus características.

Ilustración 110. Prototipo de hormas bajo la tecnología Fused Deposition Modeling



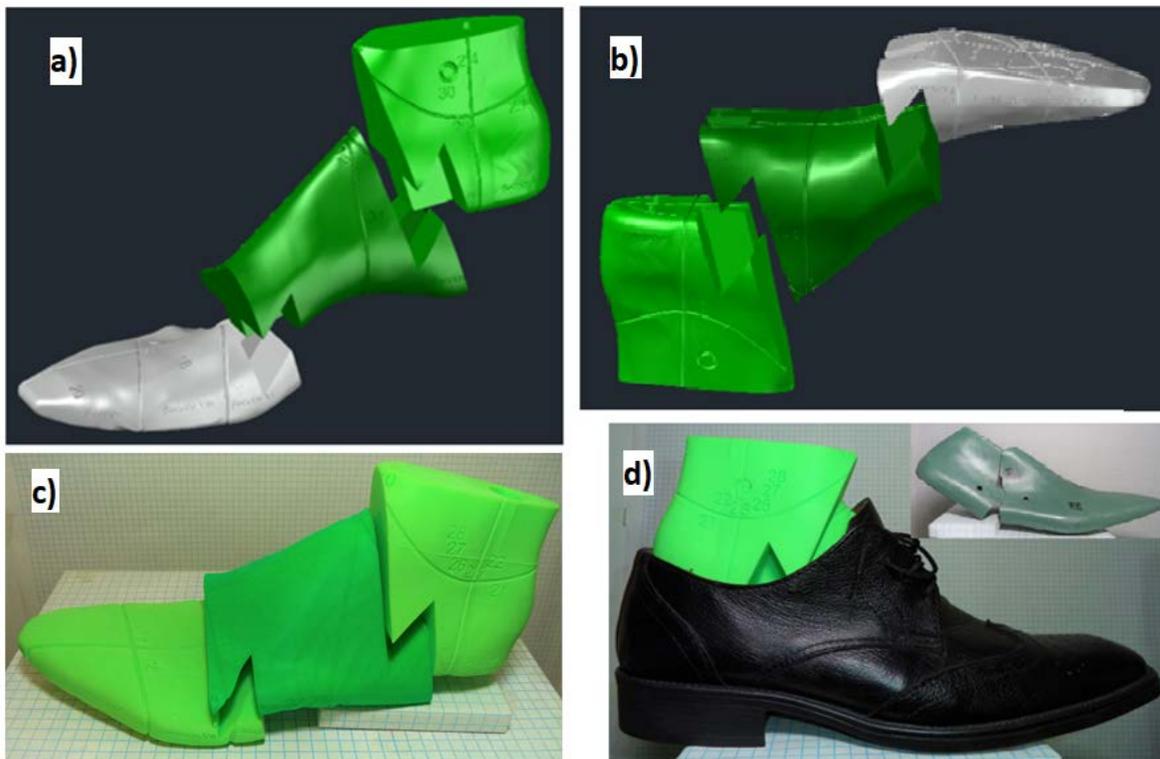
Elaboración propia, en el inciso a) Juego de hormas prototipo elaboradas con material PLA, b) Horma tradicional y horma prototipo, c) Vista posterior y d) vista lateral de los prototipos.

¹²⁹ Tecnología desarrollada en 1988 por Scott Crump presidente de stratasys. Fuente: Blanco, R. (2000) Enciclopedia de plástico, Centro empresarial del plástico S.A. de C.V. México; 2a edición.

VIII.2.2. Funcionalidad del ensamble

Muy al estilo de la teoría del diseño que sienta las bases del ensamble y el desensamble. El prototipo de la horma es conceptualizado como un ensamble de tres partes, las cuales representan el talón, el medio pie y antepié; cada parte se engancha por medio de un ensamble trapezoidal llamado cola de milano y en el mismo lleva un tope en diagonal que impide su total desplazamiento, como se muestra a continuación.

Ilustración 111. Ensamble en el prototipo de la horma



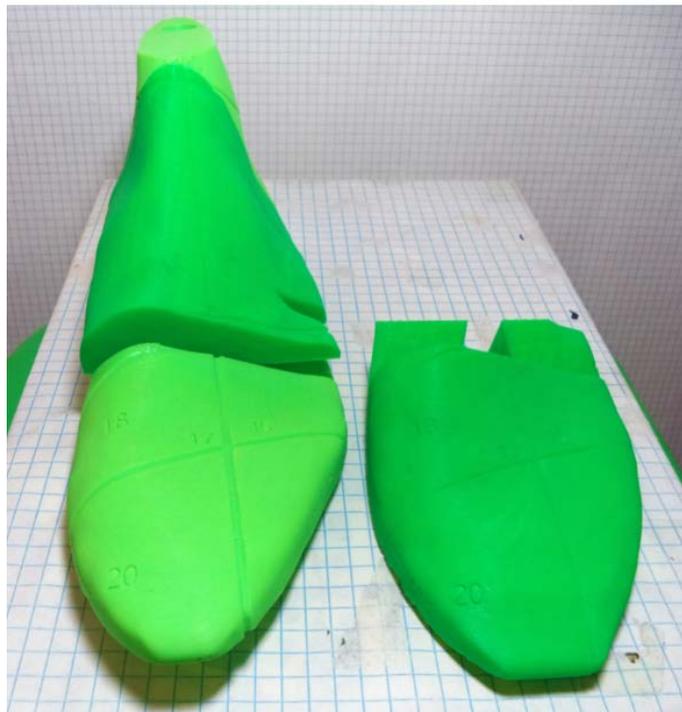
Elaboración propia, en el inciso a) conjunto de ensamble y b) posición de trabajo del prototipo de horma virtual c) ensamble del prototipo físico de la horma y d) Se muestra la funcionalidad del ensamble para poder liberar la horma del calzado ya terminado, en la esquina superior se aprecia la horma tradicional utilizando su articulación.

VIII.2.3. Modularidad de la horma o reconfiguración

La modularidad de los productos es un concepto muy estudiado en ingeniería de manufactura ya que tiene aplicaciones en la producción en serie para elaborar productos genéricos al menos en su etapa inicial.

De acuerdo a lo anterior y la facilidad que da el prototipado rápido, se pueden apreciar en físico y validar de una manera tangible diferentes tipos de hormas al intercambiar sólo el ensamble del ante pie, pues generalmente es la parte que sufre más modificaciones por estilistas del calzado y evita costos de fabricar una sola pieza en una máquina de gran producción, así como reducción de tiempo para su aprobación; también, se pueden detectar fallas o afinar detalles antes de ser liberada a producción.

Ilustración 112. La modularidad del prototipo

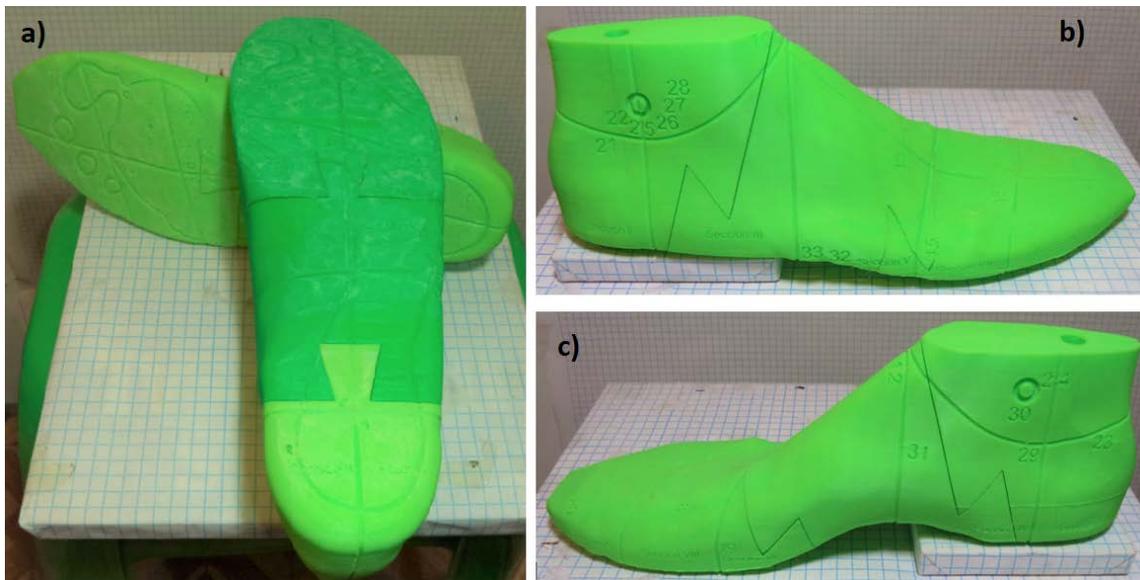


Elaboración propia, al establecer ensambles en partes clave de la horma, el ante pie puede intercambiarse por otro para así establecer un estilo diferente de calzado.

VIII.2.4. Guías en bajo relieve para la manufactura artesanal

Como se ha visto en la sección uno de este capítulo, los números y las circunferencias más importantes del pie han sido plasmadas bajo relieve en el prototipo de la horma con la intención de que sirvan de guía para la elaboración del calzado en la horma definitiva. Aunque la personalización aún está en un porcentaje bastante alto en manos de artesanos que tiene la responsabilidad de seleccionar la plantilla, coser la suela y montar la piel; no se descarta la posibilidad que en un futuro las hormas industriales sean fabricadas en FDM, inclusive para un proceso altamente mecanizado de producción en serie.

Ilustración 113. Guías para la manufactura artesanal



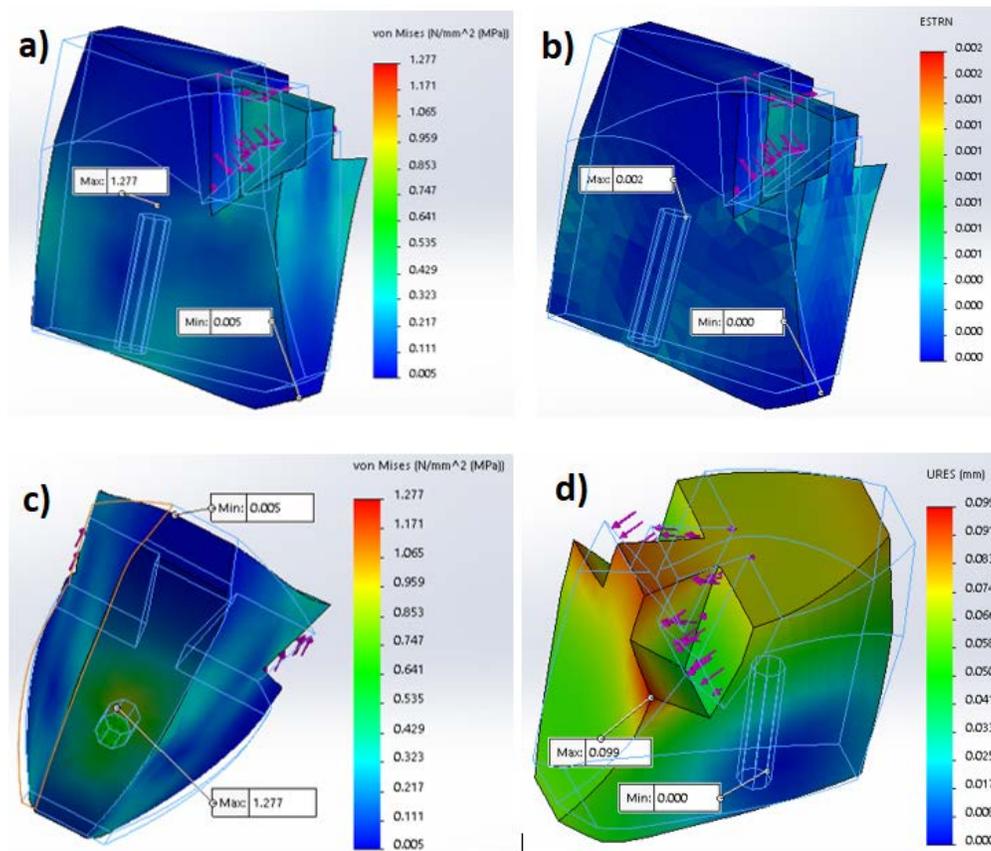
VIII.2.5. Análisis de elementos finito en el prototipo

Para completar con la ingeniería del producto es necesario realizar un análisis de elementos finito con el material más utilizado en la fabricación de hormas que es el polietileno de alta densidad, esto nos permite observar su comportamiento al ser sometido a una fuerza representativa de trabajo y establecer las partes críticas donde posiblemente se presente alguna falla mecánica.

Para su análisis se debe obedecer los siguientes criterios:

- Comportamiento lineal, es decir el desplazamiento es proporcional a la carga.
- La horma experimenta una pequeña deformación estructural.
- Las cargas son estáticas y de aplicación gradual para evitar la inercia.

Ilustración 114. Análisis de elementos finito del prototipo parte posterior

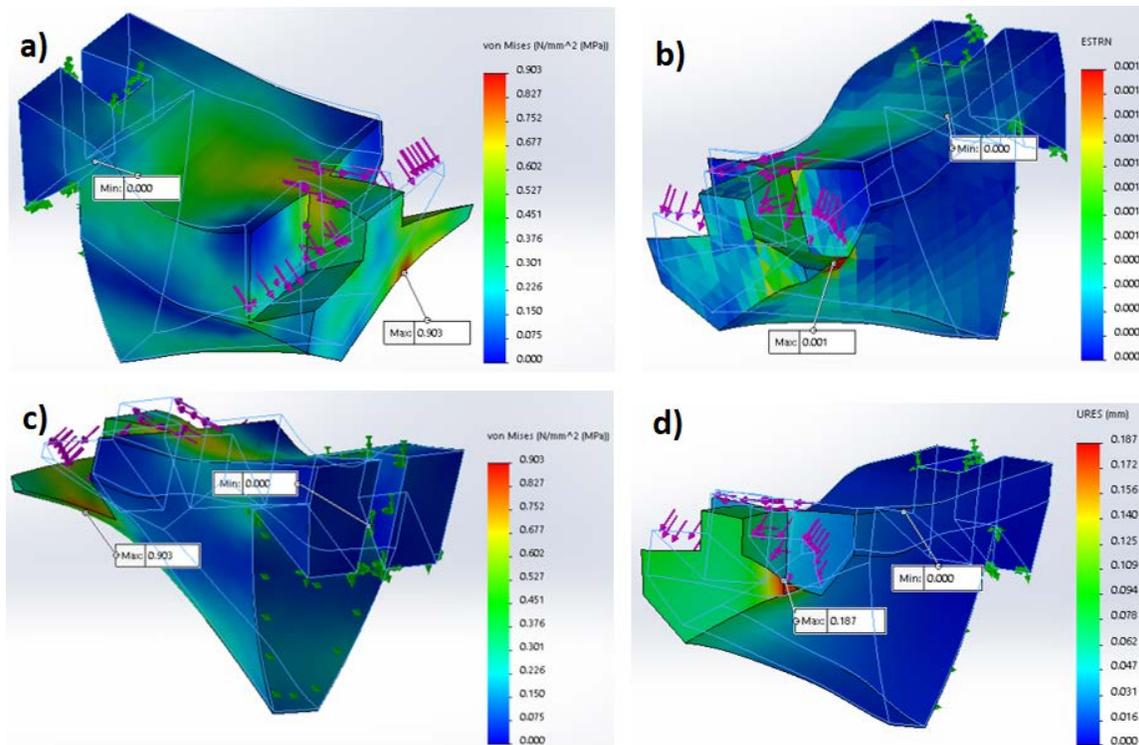


Elaboración propia, inciso a) y c) simulación del esfuerzo vista lateral y vista inferior, inciso b) simulación de deformación y d) simulación de desplazamiento; todo en solidwoks simulation, versión 2017.

La teoría de falla que utiliza éste estudio es la de Von Mises la cual establece un esfuerzo promedio, las condiciones para llevar a cabo la simulación es tener anclado el orificio del prototipo donde se asienta en la herramienta del artesano y la fuerza aplicada de 500 N total en la región del ensamble; el esfuerzo máximo de acuerdo al estudio fue de 1.277 MPa en el orificio de sujeción y por lo tanto es la parte donde sufre una mayor deformación con 0.002, en cuanto al desplazamiento que sufre es precisamente en la zona del ensamble donde mayor se manifiesta con 0.099 mm.

El estudio efectuado para la parte media del prototipo, el anclaje se llevó a cabo en el ensamble posterior y considerándolo como un cuerpo rígido capaz de transferir la misma fuerza de 500 N en la zona de ensamble anterior se colocaron las cargas.

Ilustración 115. Análisis de elementos finito del prototipo parte media

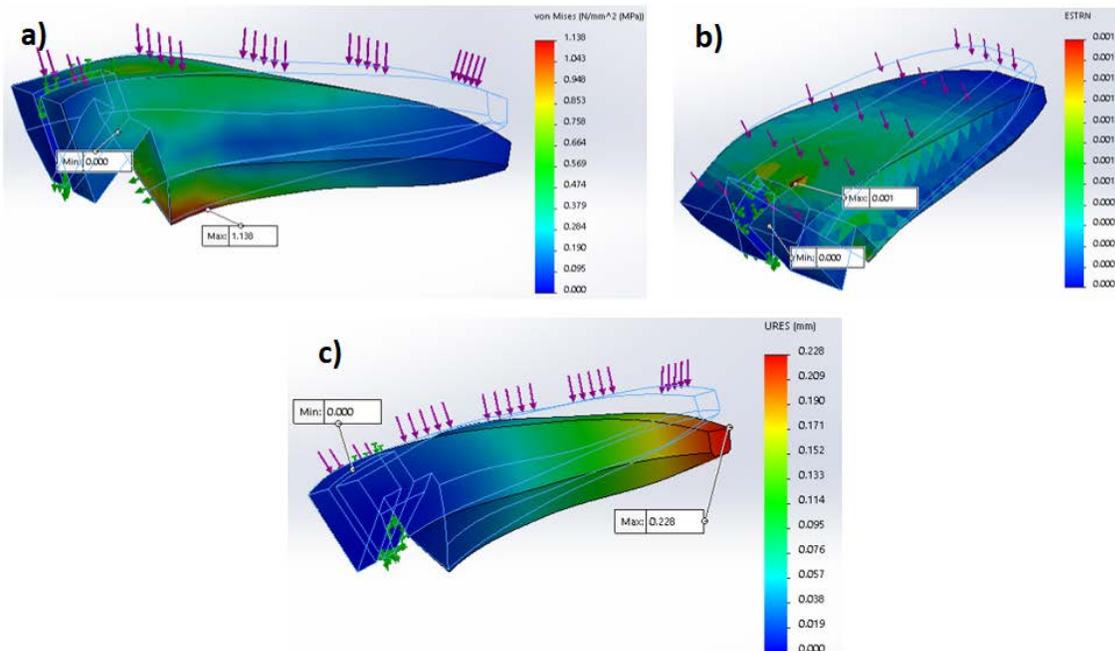


Elaboración propia, en el inciso a) y c) simulación de los esfuerzos en su vista semi lateral frontal y vista lateral trasera, b) simulación de la deformación e inciso d) simulación de su desplazamiento; todo en solidwoks simulation, versión 2017.

Considerando la misma carga de 500 N los resultados del análisis para la parte media del prototipo arrojan que hay una concentración del esfuerzo de 0.903 MPa en la parte lateral del mismo ensamble y que a simple vista es menos robusta que en su lado medial, ahí precisamente es donde se presenta la mayor deformación con 0.001 y hablando en cuestión del desplazamiento es en la punta de dicho ensamble donde se aprecia con 0.187 mm.

Para la parte delantera del prototipo, el análisis se realizó con la misma carga sólo que distribuida en toda la superficie de la planta, el anclado fue en la zona del ensamble y los resultados nos indican que el esfuerzo máximo se desarrolló en su parte inferior con 1.138 MPa y la deformación máxima con un valor de 0.001, se presenta en la parte de arriba cerca de la zona del ensamble y el desplazamiento que sufre es de 0.228 mm en la punta del prototipo.

Ilustración 116. Análisis de elementos finito del prototipo parte anterior



Elaboración propia, en el inciso a) simulación de los esfuerzos en su vista lateral, b) simulación de la deformación en su vista superior y c) simulación de su desplazamiento; todo en solidwoks simulation, versión 2017.

En total el prototipo sufre un desplazamiento máximo de 0.514 mm en su conjunto.

VIII.2.6. Manufactura FDM y su costo

Como parte de la ingeniería industrial compete manejar todo lo relacionado con el costo y gasto del producto, la intervención hombre/máquina y el desarrollo del producto con nuevos materiales.

Dentro de los principios de “Ingeniería de sistemas de fabricación, según Busachia, Erkoyuncub, Colegrovec, Martinac, Wattsd & Drake (2017)¹³⁰ se tiene lo siguiente:

Aspectos técnicos

- Eliminación de la articulación de la horma tradicional por un ensamble
- Mejoramiento del diseño con un alto grado de personalización
- Alternativa del uso de materiales reciclables eliminando la madera y/o HDPE
- Producto terminado más ligero que el hecho en polietileno

Aspectos operacionales

- Apoya la administración de la producción justo a tiempo
- Facilita la mejora continua sobre los procesos
- Acorta el desarrollo de un nuevo producto con el usuario final
- Tecnología que se desvincula de un proceso exclusivo
- Tecnología versátil que no necesita un clúster para su desarrollo
- Capacidad de procesar geometrías complejas y muy diversas

Costos de producción

- Tiempo de producción

Ensamble del talón 13 hr 26 min, más la parte media 20 hr 3 min y el antepié 18 hr 6 min dan un total de 51 hr 33 min para elaborar la horma; o sea el tiempo para fabricar las partes fue de 103 hr 3 min hr/maq. Si se considera una jornada laboral de ocho horas diarias, entonces se está hablando de casi 13 días de trabajo.

¹³⁰ Busachia, Erkoyuncub, Colegrovec, Martinac, Wattsd & Drake (2017) *A review of additive manufacturing technology and cost estimation techniques for the defence sector*; CIRP Journal Manufacturing Science and Technology, volumen 19, November 2017, p 117-128. DOI:10.1016/j.cirpj.2017.07.001.

- Salario del empleado

El salario mínimo para un oficial montador de calzado es de \$148.56 por día de acuerdo al CONASAMI¹³¹ vigente a partir del primero de Enero de 2021. El cálculo para establecer el salario del montador queda así: $148.56 \text{ \$/día} * 13 \text{ días} = \$1,931.28$

- Cantidad de material

La cantidad de material para el ensamble del talón es de 43.49 m, más el medio pie 61.48 m y el antepié con 47.87 m en conjunto dan un total de 152.84 m.

- Costo de material

Como 2.98 gr/m es el factor de conversión que involucra el peso por cada metro de material, se multiplica la cantidad de metros utilizados por el factor $152.84 \text{ m} * 2.98 \text{ gr/m}$ el cual dió un resultado de 455.48 gr de peso.

Considerando que cada kilogramo de filamento vale un promedio \$600 pesos; entonces cada gramo de material es igual a 0.6 \$/gr; por lo que el costo para fabricar cada horma es de: $455.48 \text{ gr} * 0.6 \text{ \$/gr} = \$273.28$.

- Peso de la horma terminada

La horma tradicional de polietileno de alta densidad de la talla 29 pesa 1.05 kg c/u y la horma prototipo en material PLA pesa 375 gr c/u; esto representa casi el 64.28 % menos que el peso de la horma tradicional.

- Diseño en software

El tiempo para el desarrollo del diseño fue de aproximadamente seis meses. Si se considera 6,000 \$/al mes, el precio por tal desarrollo fue de $6,000 \text{ \$/al mes} * 6 \text{ meses}$ da un resultado de \$36,000.

- Consumo de energía eléctrica

El consumo nominal de la máquina es de 480 w = 0.480 kw y el tiempo para fabricar todas las partes del prototipo fue de 103 hr 3 min hr es equivalente a 103.05 hr el

¹³¹ CONASAMI (Comisión nacional de los salarios mínimos) Secretaría del trabajo y previsión social. Dirección electrónica www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/602096/Tabla_de_salarios_m_nimos_vigente_a_partir_de_2021.pdf

cual se multiplica por el consumo nominal de la máquina $0.480 \text{ kw} * 103.05 \text{ hr}$ da un resultado de 49.464 kwh.

El costo unitario de la tarifa doméstica intermedia es de 1.022, por lo que el consumo en pesos es $49.464 \text{ kwh} * 1.022$ da un resultado de 50.55 \$-kwh

- Preparación y puesta a punto

La preparación consiste en nivelar la mesa de trabajo, limpiar la boquilla, cambiar o preparar el filamento, laminar la pieza en el software para optimizar su acabado y vigilar las primeras capas extruidas; tiempo aproximado 15 minutos, o sea 0.25 hr.

Considerando que ésta actividad no requiere un trabajador calificado, se toma como base el salario de un empleado relacionado al ramo dividido entre las horas trabajadas al día $\$148.56/8 \text{ hr}$ da un resultado de 18.57 \$/hr; el cálculo queda así: $18.57 \text{ \$/hr} * 0.25 \text{ hr}$ da un resultado de \$4.64.

Gastos de producción

- Retiro de excedente

Consiste en retirar todo el excedente de material que ha servido de apoyo para producir la horma, es necesario comentar que se requiere de un router para desprender el material más difícil de remover.

En promedio se necesitan 25 min, o sea 0.41 hr para limpiar el excedente con sumo cuidado para no dañar la pieza. El cálculo del gasto es, al salario por hora se le multiplica el tiempo invertido $18.57 \text{ \$/hr} * 0.41 \text{ hr}$ da un resultado de \$7.61.

- Retoque de pintura

Para resaltar los números y letras en la horma, se agrega una actividad adicional la cual consiste en un retoque con pintura. En promedio se llevaría 45 min que equivalen a 0.75 hr por lo que el cálculo queda de esta manera $18.57 \text{ \$/hr} * 0.75 \text{ hr}$ da un resultado de \$13.92.

- Depreciación

El método utilizado para calcular la depreciación es por la técnica de piezas producidas, ya que habrá días en que se use más la máquina y otros en que no. Si se tiene estimado que se produzcan alrededor de 3,000 piezas y el valor de la máquina en promedio es de \$20,000; además el valor de desecho se considera de \$2,000 al término de su vida útil; el cálculo queda así: $(\$20,000 - \$2,000) / 3,000 \text{ pz} = 6 \text{ \$/pza.}$

Tabla 30. resumen de los costos y gastos del prototipo de la horma

Concepto	Costo unitario	Total
Tiempo de producción: 13 días	\$1,931.28	\$3,862.56
Cantidad de material: 152.84 m	\$ 273.28	\$546.57
Diseño en software: Autocad, solidwoks	\$36,000.00	\$36,000.00
Energía eléctrica: \$-kwh	\$50.55	\$101.10
Preparación y puesta a punto	\$4.64	\$9.28
Acabado	\$7.61	\$15.22
Pintura	\$13.92	\$27.85
Depreciación por pieza	\$6	\$12
Máquina	\$20,000	\$20,000
Total	\$58,287.28	\$60,574.58

Elaboración propia: Datos calculados con base a la tabla de salarios CONASAMI, tarifa eléctrica de la ciudad de México CFE y renta mensual del software autocad y solidwoks. Nota: no se están incluyendo gastos de mantenimiento

En la tabla anterior se muestran todos los costos y gastos necesarios para obtener un prototipo de horma la cual parecen bastante elevados; si se llegarán a comparar con el desarrollo de una horma por parte de la manufactura tradicional sería casi equivalentes; sin embargo, excluyendo el costo de la máquina y el diseño darían un total de \$4,574.58

Capítulo IX Conclusiones y recomendaciones

En este proyecto de tesis se materializó el concepto de un prototipo de horma personalizada; desarrollando la metodología necesaria para concebir el diseño desde la propia huella del pie. Sabiendo por diversos estudios, que tanto la huella, como la manera de andar son rasgos exclusivos de cada individuo; la primera tarea fue investigar cómo influye ésta para la realización del calzado; sin embargo, de acuerdo a lo encontrado, la huella no ha sido considerada para el diseño y la manufactura del calzado convencional, excluyendo por supuesto al calzado ortopédico por salir de los objetivos del proyecto. Así que los esfuerzos se centraron en encontrar el parámetro inicial que diera la pauta para establecer los demás parámetros; la tarea no fue simple, se tuvo que echar mano de un escáner que fielmente capturara la huella del pie en tamaño real y en su análisis, surgió la idea de construir a base de geometría el eje de la huella; dentro de lo observado, es necesario destacar que éste eje presenta una desviación de 1.35° en promedio con respecto al eje tradicional muy utilizado en el diseño del calzado. Esto no sólo motivó a seguir estableciendo cada sección del pie, sino también a determinar las desviaciones presentes y a proponer un factor de corrección en dichos parámetros.

Con la parametrización del pie y habiendo propuesto un diseño para la planta de la horma, ya se podía construir la horma; sin embargo, las medidas recolectadas sólo reflejarían a un pie estático; así que, para identificar las necesidades del caminar en el individuo, se ideó elaborar modelos virtuales del pie en tres posturas diferentes, presentes dentro del ciclo de la marcha. Con esto se pudo estudiar sus estados dinámicos, encontrando que el pie se deforma de una manera predecible con un cambio mínimo en sus dimensiones a pesar de generar fuerzas y momentos considerables.

Al estar desarrollando el modelo de horma en un ambiente 3D se encontró que los vectores de posición dieron un buen resultado para modificar ciertas regiones de la superficie, ya que las observaciones encontradas en los modelos dinámicos del pie

fueron muy valiosas para darle las cualidades ergonómicas necesarias para el ajuste en la horma.

Para la fabricación del prototipo de horma se utilizó la tecnología FDM proponiendo una reingeniería del concepto que conocemos como horma, la cual eliminó la articulación que lleva para su desmolde gracias a la funcionalidad que presenta; también se trabajó en la modularidad de piezas intercambiables; así como en el mapeo en bajo relieve de los puntos y zonas más susceptibles del pie y de su ajuste.

IX.1. Cumplimiento de los objetivos

El primer objetivo fue desarrollado en el capítulo III donde se investigó cómo abordan los principales fabricantes y diseñadores la personalización del calzado; hay tres metodologías relevantes que se muestran, los puntos de convergencia son: manejo de escáner y software de diseño, las medidas del pie a personalizar, uso del sistema chino para la parametrización y la manipulación virtual de la horma; entre estos investigadores existen diferencias notables. En la metodología Whan, Chan y Lin maneja tres circunferencias básicas que son recio, cintura y empeine; en éste proyecto no se maneja la circunferencia de la cintura pero sí la de los dedos y el tobillo; con la metodología Whan, Zhang, Lu y Liu se maneja catorce regiones dentro de tres partes principales que son clave para el ajuste, con la metodología Lin el ajuste se da por medio de jerarquización y teoría difusa; en cambio en esta tesis, se presentan 36 puntos y/o zonas de ajuste-confort que debe llevar la horma. Otra diferencia son los modelos virtuales del pie en movimiento, elaborados con la finalidad de obtener características propias del caminar y ninguno de ellos los considera.

El segundo objetivo que es considerar a la huella dentro de los parámetros de diseño, se desarrolló en el capítulo IV. Aquí se propuso una metodología para obtener la huella y trazar su eje, aquí se encontró que éste eje corta justamente por la mitad al intervalo dinámico de dicho pie y se estableció como punto de partida para medir la longitud del pie; o sea, es la variable que sirve para calcular y

desarrollar los demás parámetros. La lectura para el pie derecho fue de 275.4 mm de longitud mientras el izquierdo fue de 279 mm, con una diferencia de 3.4 mm entre ambos, además se estableció la longitud de la planta y la longitud total de la horma.

El tercer objetivo que es encontrar las diferencias al parametrizar la planta del pie con respecto a la forma tradicional, se desarrolló en el capítulo V. Aquí se propuso unificaron tres sistemas de diseño con una nueva nomenclatura para facilitar su manejo y para ubicar cada articulación del pie; ya parametrizada la planta sirvió para formar la silueta de la base de la horma, dentro de ésta silueta se ubicaron diez secciones o cuadramenes bien definidos. Dentro de las diferencias encontradas con el nuevo eje, fue la desviación de 1.2° en el pie derecho y de 1.5° en el izquierdo con respecto al eje tradicional; en consecuencia, cada punto establecido en la periferia tiene una pequeña desviación que va desde 0.7 mm cerca del talón hasta de 1.4 mm en la punta. Debido a esto se sugirieron factores de corrección a los parámetros establecidos por dichos sistemas.

El cuarto objetivo referente a los aspectos de ajuste-comfort del pie que deben ser considerados para el desarrollo volumétrico de la horma, se trató en el capítulo VI. Gracias al trazo de la silueta de la horma y a sus diez secciones propuestas, se realizaron modelos virtuales en 3D para cada pie. Así que dicho cuadrante al darle volumen paso a ser un cuadramen (palabra compuesta al unir cuadrante y volumen). También se les adicionó una nomenclatura en su superficie de acuerdo a los puntos y zonas más susceptibles de lesión, a los aspectos antropométricos y a los puntos de ajuste. Esto dio la pauta para identificar qué en la zona de los maléolos, unión de los cuadramen I y II, y III y IV existen gran concentración de dichos puntos; otra zona se ubica en los cuadramen VII y VIII exactamente donde nacen los dedos del pie, tanto en la parte superior como en la inferior; también se identificó una cierta anomalía en el 5to dedo llamada “Dedo de sastrecillo”; dicho en otras palabras, es una articulación encogida con 33.27 mm de altura comparada con su contraparte de 23.11 mm; o sea 10.16 mm de diferencia. Se hace mención que los modelos virtuales dan una enorme ventaja para observar las diferentes vistas y comparar sus dimensiones y características propias de cada pie.

El quinto objetivo referente a Identificar los cambios de forma y las dimensiones del pie al caminar, se desarrolló en el capítulo VII, donde se realizó un estudio biomecánico llamado “Método del segmento de enlace” para calcular las fuerzas y los momentos generados del pie dentro de la marcha humana. Se eligieron tres posturas: “Choque del talón, “Media estancia” y “Despegue de los dedos” por ser a consideración las más representativas. En estudios previos los especialistas han expuesto que la primer y tercera postura generan fuerzas de reacción totalmente extremas; por lo que se ideó observar los cambios de forma que sufre el pie con respecto a las fuerzas generadas en dichas posturas y desarrollar modelos virtuales; estos modelos se lograron a partir de fotografías, sesión de medidas y por la observación directa al modelo en estudio. Los resultados señalan que una persona con 80 kg de peso a una cadencia de 110 pasos por minuto (caminar promedio), en la primer postura se genera una fuerza vertical de reacción de hasta 882.97 N y un momento de 66.21 N-m lo que significa que la fuerza es transmitida desde la articulación del tobillo hacia el talón del pie, lo que equivale a soportar una persona de 90 kg; en la segunda postura bajo las mismas condiciones en cadencia y peso, la fuerza de reacción fue de 615.83 N y un momento de 35.11 N-m, esto indica que se ejerce una fuerza equivalente al peso de 62.7 kg distribuido en un sólo pie, pues el otro viaja por el aire; en la tercer postura, la reacción fue de 927.05 N y un momento de 42.23 N-m; es decir, el recio del pie soporta el peso equivalente a una persona de 94.5 kg. Por otro lado, el pie se deforma de una forma predecible y sincronizada; trabando y flexionando las articulaciones que ayudan a la motricidad en ambos pies de manera coordinada, así lo comprueban los modelos virtuales; por ultimo las dimensiones en sus principales circunferencias, tuvieron una variación de escasas décimas de milímetro a pesar de efectuar dichos movimientos extremos.

El sexto objetivo referente a la integración de los aspectos dinámicos en la horma para mejorar la ergonomía del calzado, se trabajó en el capítulo VIII, con los resultados obtenidos en los capítulos anteriores se diseñó el prototipo de la horma en 3D, cuadramen por cuadramen, integrando las dimensiones obtenidas y la forma ergonómica que debe llevar ésta, como por ejemplo cierta altura en la parte del talón y su curvatura en la planta del pie. Al contrastar el modelo de la horma en su estado

estático versus estado dinámico, se encontró que, en la parte superior del pie a la altura del recio, está zona sufre un cierto adelanto debido a la flexión de la articulación, el hecho que confirmó dicho movimiento fue el llamado “Dedo de sastrecillo” pues se comprobó que no solamente necesita un mayor espacio hacia arriba dentro del calzado, sino que también, necesita espacio hacia delante de 3.4 mm. El uso de vectores de posición fue una herramienta eficaz para establecer nuevos puntos de ajuste en la superficie de la horma y hacer las modificaciones necesarias.

En la segunda parte de éste mismo capítulo se llevó a cabo el último objetivo, gracias al prototipado rápido que nos ofrece la tecnología FDM se fabricó la horma, no sin antes proponer una reingeniería en ésta. Dentro de los cambios propuestos fue eliminar la articulación metálica que une al talón con el cuerpo de la horma, evitando sobre peso, ahorro de tiempo y una actividad adicional para la unión de ambas partes; otro punto fue proponer modularidad a la nueva horma para su reconfiguración, pues es un concepto reciente que ha tomado notable relevancia en la producción desde el punto de vista de la ingeniería del producto y la manufactura, pues sólo se intercambia la parte de la horma que se desea modificar, sin necesidad de hacer otro prototipo para cada estilo de zapato. Los artesanos que hacen calzado a mano se ven en la necesidad de marcar en la horma ciertas guías que ayudan a crear sus diseños, por lo que se propuso colocar líneas y números para lograr éste propósito y obtener mejores patrones. Con el prototipo en físico se pudo realizar la prueba de funcionalidad que consiste en poder desmoldar fácilmente la horma cuando el calzado ya está terminado. Otra actividad importante fueron las pruebas mecánicas de esfuerzo deformación, por lo que se llevó a cabo un análisis de elementos finito para el prototipo, esto dio una clara idea de la fiabilidad del material a utilizar y de su resistencia en el diseño del ensamble; lo cual se determina que el material PE HD tiene un comportamiento óptimo; pues al ejercer una fuerza de 490.5 N equivalente de 50 kg en su superficie, sufre una deformación de sólo 0.514 mm colineal a la fuerza aplicada. Por último, se enumeran los costos y gastos de producción por FDM los cuales bajo ciertos escenarios podrían ser tan elevados e

incluso similares a la manufactura tradicional CNC, si se considerara la compra del equipo y el tiempo que lleva el desarrollo de dicho producto.

Se concluye que, de acuerdo a la hipótesis formulada, es posible desarrollar un prototipo personalizado de horma a partir de la huella del pie, cumpliendo con los parámetros de diseño e integrando ciertos aspectos ergonómicos propios del pie al caminar.

IX.2. Recomendaciones

A continuación, se exponen las siguientes recomendaciones:

- La personalización en el mundo ha tenido un auge en años recientes ya sea como estrategia de mercado o para mantener cautivo a un cliente; por lo tanto, la participación del usuario final debe jugar un papel preponderante desde el inicio del diseño; encaminando a poseer un producto más humano e individualizado para darle cierta identidad y no como una simple moda o una tendencia consumista.
- Las nuevas tecnologías de manufactura y del manejo de la información abren nuevas y mejores posibilidades para que diseñadores y fabricantes obtengan datos exactos del pie; por lo que se recomienda el uso del escáner para capturar la extremidad en movimiento, con el objeto de ahorrar tiempo y presupuesto en el diseño virtual para elaborar modelos.
- En relación al análisis dinámico del pie; es necesario estudiar posturas que no fueron abordadas en ésta tesis; por citar una, cuando el pie viaja en el aire y no reciba ninguna carga, seguramente se pueden extraer ciertos datos de interés que generen otros puntos o características de ajuste ergonómico y que pueden ser incorporados a la horma.
- En cuestión de hormas y su innovación siguen siendo España e Italia; por otro lado, inversionistas extranjeros como EU traen la maquila acompañada con sus propias hormas, hasta cierto punto aceptable; pero en cuestión de tallas en México es necesario invertir en un estudio científico y técnico encaminado a establecer parámetros antropométricos de la población mexicana, si es necesario en tres sectores centro, norte y sur del país, con actualización recurrentes por los cambios generacionales
- Es necesario analizar a detalle la función que tiene el arco medial del pie al caminar, por lo que es necesario hacer un estudio y establecer el apoyo más adecuado que debe llevar dentro del calzado.

- La mayoría del calzado basan su comodidad en proporcionar una plantilla acolchada que da una sensación de bienestar, pero al terminar sus cualidades después de un tiempo se convierte en un aditamento inservible, por lo que es necesario proponer las plantillas más adecuadas que den soporte y confort a todo el pie de acuerdo a sus movimientos al caminar.
- La nomenclatura propuesta en el prototipo de horma tiene el objeto de poder ayudar al artesano y al fabricante en general a elaborar patrones con mayor facilidad, con esto ya no tiene la necesidad de calcular y marcar las articulaciones del pie en la horma; por lo que, se puede ir agregando al prototipo más distintivos que guíen la elaboración de un determinado tipo o estilo de calzado.
- La estandarización y/o la elaboración de normas para la manufactura aditiva; va en camino, aspectos como el material y la dirección en la deposición de las capas, han sido determinantes para obtener diferentes resistencias en las piezas fabricadas; a pesar de los resultados no muy favorables hasta el día de hoy, no se descarta que en un futuro se utilice el material PLA como sustituto de la madera o el polietileno de alta densidad para la elaboración de hormas de uso industrial y no sólo como prototipos.
- El prototipo “0” o inicial es una idea preconcebida que fue materializada gracias a la tecnología FDM, en la cual se han propuesto una serie de mejoras a partir de una reingeniería que cambia su concepto y su manera tradicional de uso, por lo que da la pauta para seguir proponiendo una serie de pruebas, estudios, ajustes y diversos análisis hasta conseguir el prototipo definitivo.
- Para ejemplificar la metodología en la elaboración de una horma se utilizó un individuo al que le consideraron sus pies como modelos, el cual tiene sus características únicas y específicas; es decir hasta cierto punto se está particularizando el procedimiento; sin embargo, está investigación sienta las bases para un enfoque de personalización a partir de la huella, por lo que abre un panorama para proyectos más ambiciosos, donde se experimenten en diversos sectores de la población e incluso con personas que padecen ciertas enfermedades

en las extremidades, para generalizar el procedimiento y establecer reglas, leyes y nuevos parámetros.

Bibliografía

Libros

- Barreto, S. (2006). *Diseño de calzado urbano*. Buenos Aires: Editorial Nobuko.
- Blanco, R. (2000) *Enciclopedia de plástico*, Centro empresarial del plástico S.A. de C.V. México; 2a edición.
- Choklat, A. (2012). *Diseño de Calzado*. Barcelona, España. Gustavo Gili.
- Dussel, P. (2016). *Efectos del TTP en la cadena de valor del calzado mexicano/La industria del calzado en Vietnam*. México, CICEG-UNAM.
- Faller & Schuenke. (2004). *The human body (An introduction to structure and function)*. Stuttgart, Germany. Edit. Thieme.
- Iglesias, E. (1998). *Las Industrias del Cuero y Calzado en México*. Instituto de Investigaciones Económicas. México, UNAM. pág. 35.
- Jarquín; M. (1994). *La Producción de Calzado en Tepito*. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias de Humanidades. Coordinación de Humanidades. México, UNAM.
- Lewis, W. (1858). *Gray's anatomy*. 20th ed. Philadelphia and New York. Lea & Febiger.
- Luximon, A. (2013) *Handbook of footwear design and manufacture* (The textile institute). UK. Woodhead Publishing.
- Peach, R. (1999) *Manual de ISO 9000*, tercera edición, Mc Graw Hill. México.
- Sieburth, R. (1936). *The shoe repairer's manual*. Boston, Mass. The Gill Publications, Inc.
- Thornton, J. (1953). *Textbook of footwear manufacture*. Great Britain. The National Trade Press.
- Viladot, A. (2001). *Patología del antepié*. 4^a ed. España. Springer-Verlag.
- Winter, D. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, fourth edition; John Wiley & Son, Inc. ISBN: 978-0-470-39818-0.

Foros en internet, listas de direcciones electrónicas y otras comunidades en línea

- Abicalçados. (Mayo 2017). Associação Brasileira das Indústrias de Calçados. (Página web). Recuperado de <http://www.abicalcados.com.br/>.
- ALADI. (2016). Asociación Latinoamericana de Integración. (Página web). Recuperado de <http://www.aladi.org/sitioAladi/paisesMiembros.html>

Amat, J. (6 de octubre de 2010). El zapato ayer y hoy. La historia de la industria del calzado en León Guanajuato; México. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://zapatotirapie.blogspot.mx/2010/10/la-historia-de-la-industria-del-calzado.html>. párr. 10.

CIATEC. (9 de mayo 2018). Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas. (Sitio web) recuperado de <http://blog.ciatec.mx/2010/03/terminologia-de-hormas-para-calzado.html>.

CICEG. (2015). Cámara de la Industria del Calzado del Estado de Guanajuato, sector datos. Recuperado de www.ciceg.org/pdf/sector_datos.pdf.

CICEJ. (15 de febrero de 2013). Cámara de la industria del calzado en el estado de Jalisco. (página web) recuperado de www.cicej.com.mx.

Export helpdesk. (Diciembre de 2016). Departamento de comercio exterior de la comisión europea. (Página Web). Recuperado de http://exporthelp.europa.eu/thdapp/display.htm;jsessionid=52324AA89189D8F9F4658FCEF15E9BD0?page=st%2fst_Estadisticas.html&docType=main&languageId=es. Ahora Trade Helpdesk.

González. (5 de abril de 2013). Historia del calzado y su evolución, un poco de historia [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://historiadelcalzado.blogspot.mx/>.

How shoe last are made. (14 de noviembre de 2017). How shoes are made: The sneaker factory. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://sneakerfactory.net/sneakers/2017/11/how-shoe-lasts-are-made-2/>.

México Desconocido. (Julio de 2010). Historia de la industria zapatera en León, Guanajuato. [Mensaje en un blog]. Recuperado de www.mexicodesconocido.com.mx/historia-de-la-zapatera-en-leon-guanajuato.html.

Museo del objeto del objeto. (2010). El calzado. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://elmodo.mx/el-modo-del-modo/el-calzado/>.

Preventive Foot Healt Institute. (2012). National Foot Healt Assessment. U.S. [Mensaje en un blog]. Recuperado de: <https://www.ipfh.org/resources/surveys/national-foot-health-assessment-2012>.

Publicaciones periódicas

Busachia, Erkoyuncub, Colegrovec, Martinac, Wattsd & Drake (2017) *A review of aditive manufacturing technology and cost estimation techniques for the defence sector*, *CIRP Journal Manufacturing Science and Technology*, volumen 19, November 2017, p 117-128. DOI:10.1016/j.cirpj.2017.07.001.

Farley & Ferris (1998). *Biomechanics of walking and running: center of mass movements to muscle action*. *Exerc Sport Sci Rev*. 28 p. 253-85.

Gorgues, J. (Enero 2006). Elaboración del molde de escayola y toma de medidas para la adaptación del calzado ortopédico a medida, *OFFARM-ELSEVIER*. Vol. 25, núm. 1.

Guerrero, M. (2016) Centro de innovación y diseño para la industria del calzado; *Calzavance órgano informativo del CICEG/* año 32, Nov-dic 2016; p. 14-15

Hernández, E. (2007). Retos y perspectivas de la industria mexicana de calzado ante la apertura comercial. *Espiral, estudios sobre estado y sociedad*. Vol. XIV, núm. 40.

Martin & Morgan (1992). Biomechanical considerations for economical walking and running. *Med Sci Sports Exerc*; 24 (4). p. 467-74

Miranda, J. (2005). Calzado y distritos industriales en el mediterráneo: una visión de largo plazo. *Mediterráneo e Historia Económica*. núm. 7 de la Colección Mediterráneo Económico. Instituto de Estudios Socioeconómicos de Cajamar. España.

Morgan, S. (Noviembre 2015). The development of the shoemaking last. *Satra bulletin*. UK. p. 40
Recuperado de: <https://www.satrapublications.com/bulletin/article.php?id=1563>.

Murray, Kory & Sepic (1970). Walking patterns of normal women. *Arch Phys Med Rehabil* 51. *US National Library of Medicine National Institutes of Health*. p. 637-50

Neptune, Zajac & Kautz (2004). Muscle Mechanical Work Requirements During Normal Walking: The Energetic Cost of Raising the Body's Center-of-mass is Significant. Rehabilitation R&D Center, VA Palo Alto Health Care System, 3801 Miranda Avenue, Palo Alto, CA 94304, USA. *Journal of Biomechanics*. 37 p. 817-825

Neptune, Kautz & Zajac (2001). Contributions of the Individual Ankle Plantar flexors to support, forward progression and swing Initiation During Walking. *Journal Biomechanics* 34; p. 1387-1398.

Neptune, Zajac & Kautz (2003). Muscle Force Redistributes Segmental Power for Body Progression During Walking. *Gait & Posture*.

Norandi, M. (24 de febrero de 2002). El zapato, más que protección para el pie, todo un objeto de moda. *La Jornada*. Recuperado de <http://www.jornada.unam.mx/2002/02/24/06anesp.php?origen=index.html>.

Pandy & Berme (1988). Synthesis of Human Walking: a Planar Model for Single Support. *J Biomech*; 21. p. 1053-60

Pérez, A. (19 de octubre de 1999). Dime quién eres y te diré que zapatos usas. *El Universal*. Recuperado de <http://archivo.eluniversal.com.mx/estilos/2043.html>.

Rodgers, M. (1988). Dynamic Biomechanics of the Normal Foot and Ankle During Walking and Running Volume 68/ Number 12; *Physical Therapy*, p. 1822-1830

Sheila, A. Dugan & Krishna, P. Bhat (2005). Biomechanics and Analysis of Running Gait. Department of Physical Medicine and Rehabilitation, *Rush University Medical Center 1725 West Harrison, Suite 970, Chicago, IL 60614, USA*. 16 p. 603-621. doi:10.1016/j.pmr.2005.02.007

Unión Jalisco (15 de febrero de 2013). Jalisco provee el 80% del calzado que usan las mexicanas. *EL UNIVERSAL*. Recuperado de <http://archivo.unionjalisco.mx/articulo/2013/02/15/economia/guadalajara/jalisco-provee-80-del-calzado-que-usan-las-mexicanas>

Winter (1976). The locomotion Laboratory as a Clinical Assessment System. *Med prog Technol*; 4; p. 95-106

Zajac (2003). Biomechanics and Muscle Coordination of Human Walking. Part II: Lessons from dynamical Simulations and Clinical Implications. *Gait and Posture* 17; p. 1-17.

Informes técnicos y de investigación

Bengt, A. (2004). *Recommendation to suppliers and manufactures of orthopaedic footwear concerning sizes and shoes and last* [Reporte del The Swedish Handicap Institute] recuperado de internet www.yumpu.com/en/document/read/11650433/foot-last-shoe

Böer & Dulio. (2007). *Mass customization and footwear: Myth, salvation or reality? Euroshoe* (proyecto de investigación), X,177. Springer. ISBN 978-1-84628-864-7.

FICE. (2011). *Los retos futuros del sector calzado*. Federación de Industrias del Calzado Español. Horizonte 2015-2020. Recuperado de http://iies.es/wp-content/uploads/2016/05/horizonte_2015_2020_los_retos_futuros_del_sector_calzado_pdf.

FICE. (2012). *Estudios de prospectiva sobre escenarios futuros para la industria del calzado a medio y largo plazo*. Federación de industrias del Calzado Español. Recuperado de http://www.clustercalzado.es/spa/ESCENARIOS%20Horizonte_DEF.PDF

INEGI. (2014). *Estadísticas a propósito de la industria del calzado*. Recuperado de www.internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825068332.pdf.

Industria y comercio & Pontificia Universidad Javeriana. (2014). *Antropometría y diseño de hormas para calzado*. Recuperado de: http://www.sic.gov.co/recursos_user/documentos/publicaciones/Boletin_calzado.pdf.

Italtrade. (Diciembre de 2016) *Estudio de mercado italiano en Vietnam*. Recuperado de: www.italtrade.com/countries/asia/vietnam/CON5_TONG_PRES_EN.pdf.

Jurcevic, Susic & Kodvanj (2010). *Biomechanical analysis of walking: Effects of gait velocity and arm swing amplitude*. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. University of Zagreb. Ivana Lucica 5 10000 Zagreb, Croatia. Period. Biol. Vol 112, No. 1, 2010.

Kvaternik, M. (2014). *El mercado de calzado en Brasil*. Oficina económica y comercial de la embajada de España en Sao Paulo. *Ministerio de Economía, Industria y Competitividad*, Gobierno de España. Recuperado de <http://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/estudios-de-mercados-y-otros-documentos-de-comercio-exterior/index.html>.

Lee, Wan & Rahman (2013). *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics*. 2) Loureiro & Esteves (2019) *In Green Composites for Automotive Applications*. ScienceDirect. Dirección electrónica "sciedirect.com/topics/engineering/poly-lact-acid"

Legiscomex. (2006). *Calzado de China. Inteligencia de mercados*. Recuperado de: <http://www.legiscomex.com/BancoMedios/Documentos%20PDF/calzadochina.pdf>.

Luximon A. & Luximon Y. (2009). *Shoe last design innovation for better shoe fitting*. Institute of textile and clothing. The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon. Hong Kong. School of Design, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Honk Kong. Elsevier. DOI:10.1016/j.compind.2009.05.015. pág. 2

Nácher, B.; Alemany, S.; González, J.C.; Alcántara, E.; García-Hernández, J.; Heras, S. & Juan, A. (2005). *A footwear fit classification model base on anthropometric data*. Instituto de Biomecánica de Valencia y el departamento de sistemas informáticos y computacionales. ResearchGate. July 2006. DOI: 10.4273/2006-01-2356.

Neri, Santana & García. (2016). *Desarrollo de proceso para la elaboración de horma personalizada mediante el uso de herramientas de manufactura flexible. Una visión sistémica. IFDP´16-Systems& Design: Beyond Processes and Thinking*, Universitat Politècnica de València, Spain, 2016. Pág 613-621. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/IFDP.2016.3735>

Nguyen, T. (2009). *Leather and footwear industry in Vietnam: The labor markets and gender impact of the global economic slowdown on value chains*. Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, Germany.

Ortiz, L. (2015). Oficina económica y comercial de la Embajada de España en Milán. *Ministerio de Economía, Industria y Competitividad*, Gobierno de España. Recuperado de: <http://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/estudios-de-mercados-y-otros-documentos-de-comercio-exterior/index.html>

Rabellotti & Schmitz (1999). *The internal heterogeneity of industrial districts in Italy, Brazil and Mexico*. Regional studies 33(2):97-108; doi:10.1080/00343409950122909 ResearchGate.

Sterling Last Corporation (sin fecha). *The true story of shoe sizes*. Long Island City, NY.

Tseng, Hu & Wang. (2014). *Mass customization*, University of science and technology, Hong Kong and University of Michigan, USA. (Academic paper) CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Springer Publications.

Wang, Ma, Yang & Wang. (2017). *Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production*. Adv. manuf. (2017) 5:311-320. Shangai University and Springer-Verlag GmbH Germany, part of the Springer nature. Recuperado de <http://doi.org/10.1007/s40436-017-0204-7>.

Wang, Zhang, Lu & Liu. (2011). *Rapid parametric design methods for shoe-last customization*. Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China. College of Garment and Art Design, Jiaying University, China. Int J Adv Manuf Technol (2011) 54:173-186. DOI:10.1007/s00170-010-3144-y.

Young, C.; Niedfeldt, M.; Morris, G. & Earkes, K. (2005). *Clinical examination of the foot an ankle. División of Sport Medicine*, Medical College of Wisconsin, 9200 W Wisconsin Avenue, Milwaukee, WI 53226, USA. DOI:10.1016/j.pop.2004.11.002

Actas de congresos y simposios

Abboud, R.J. (2002) Relevant foot biomechanics. Mini-symposium: *The elective foot*. Foot Pressure analysis laboratory/clinic, University orthopaedic & trauma surgery departamento, TORT centre, Ninewells hospital & medical school, Dundee DDI 9sY, Scotlan, UK. Current Orthopedics (2002) 16, 165-179. Published by Elsevier Ltd.

Martín, Parra & Navarrete. (2015). La industria del calzado de Ticul, un panorama hacia la competitividad. *20º Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional de México*. Cuernavaca, Morelos. AMECIDER CRIM, UNAM.

Sharghie and Costea (June 2013). Anthropometric study of the foot using 3D scanning method and statistical analysis. *International Symposium in Knitting and Apparel- ISKA 2013*. "Gheorghe Asachi" Technical University of Lasi-Romania, Doctoral School of the Faculty of Textil-Lether and Industrial Management.

Trabajos inéditos o de publicación informal

Handbook pattern making. Shoe future (2007-2013). *Lifelong learning programme Leonardo da Vinci*. Strojarska ulica, Croacia. Recuperado de www.shoe-learn.com/documents/5.FOOTWEAR_PATTERN_MAKING.pdf

Institute of biomechanics of Valencia and Robert Mcneel & Associates (2005). *Shoe design and visualization*. Documento preparado para curso. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/24449481/Rhinoceros-Advanced-Training-Series>.

Montiel, E. (2004). *Calzado personalizado. Una oportunidad para competir*. (Trabajo presentado en CALZATECNIA 2004) España. Documento recuperado de http://www.lavirtu.com/eniusimg/enius4/2006/02/adjuntos_fichero_114649.pdf 18/10/18. pág 3 y 4

Tesis doctorales y de maestría

Gómez & Sapiña (2005) *Estudio Biomecánico De La Marcha En Pacientes Con Artrosis De Cadera Departamento de Medicina (Tesis de doctoral)*, Universitat de Valencia. Depòsit legal: I.S.B.N.:84-370-6222-5. Edita: Universitat de València. Servei de Publicacions C/ Artes Gráficas, 13 bajo 46010 València España.

Gordeyeva, O. (1998). *3D Numerical modelling and manipulation of a shoe last* (Tesis doctoral, De Montfort University in collaboration with Saint-Petersburg State University of Technology and Design, UK). Recuperado de https://www.dora.dmu.ac.uk/bitstream/handle/2086/10741/3D_numerical_modelling_and_manipulation_of_a_shoe_last.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Mauch, M. (2007). *Kindliche Fußmorphologie* (Tesis doctoral), Technischen Universität Chemnitz. Dutchland. Recuperado de <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/5464/data/DissMauch.pdf>

Roca, I. (2005). *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD) (Tesis de licenciatura)*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería Química; Guatemala.

Direcciones web de imágenes recuperadas de internet

Ilustración 2. Fuente: Imagen obtenida de internet (4 de Marzo de 2017) del blog “Docplayer” dirección electrónica: <https://docplayer.es/68427740-La-historia-de-calzado-leones-a-traves-de-los-siglos.html>.

Ilustración 13. Fuente: Imagen recuperada de internet (15 de marzo 2018) <http://sneakerfactory.net/sneakers/2017/11/how-shoe-lasts-are-made-2/>

Ilustración 14. Fuente: a) Extrusión de horma, imagen recuperada de video 15 marzo de 2018 de www.youtube.com/watch?v=hRCfKgYrpCM. b) Maquinado de horma en CNC, imagen recuperada de video 15 de marzo de 2018 de www.youtube.com/watch?v=_jTpWhrAuYA&t=27s

Ilustración 16. Fuente: Escaneo de una horma recuperada el 15 de marzo de 2018 a) https://www.youtube.com/watch?v=YhKqNQTq6_0; b) <https://www.youtube.com/watch?v=15XYM6oT5gg>

Ilustración 24. Fuente: Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=2t9HW01x3vg>, 3D (Footwear Patterns Design Software.avi) y <https://www.youtube.com/watch?v=D3DXXgA7LDQ> (The Making Of A Shoe Last By Tsubo).

Ilustración 25 y 26. Fuente: Flexi (03 de noviembre de 2017). Portal. Imagen recuperada de <http://flexi.shoes/mx/section/construcciones/>

Ilustración 28. Fuente: Recuperado de internet (11/04/18), a) <https://www.youtube.com/watch?v=yuwDibzBS44>, b) <https://www.youtube.com/watch?v=4BMVsfs8evg>, c) <https://www.youtube.com/watch?v=V-fyeIHMOo>

Ilustración 34. Fuente: Imagen recuperada de internet (18 de octubre de 2018). <https://www.newbalance.com/nb1/explore/>

Ilustración 35. Fuente: Imagen recuperada del internet (18 de octubre de 2018). <https://www.italianshoefactory.com/> y <https://online.paulparkman.com/>

Direcciones URL de videos recuperados de internet

Minh MA Voung Ha (3 de julio de 2010). *Shoelast 3D Scanner - LASTSCAN3D - Máy chép hình 3D*. (Video). De https://www.youtube.com/watch?v=YhKqNQTq6_0.

ThinkScan3D (22 de julio de 2014). *Compact 3D scanner for Shoe makers. BLUE LED technology* (Video). De <https://www.youtube.com/watch?v=15XYM6oT5gg>.

Extrusión de horma, imagen recuperada de video: Mülayim, V. (6 de febrero de 2014). *Plastic shoe last injection wedge, mass, block footwear manufacturer Turkey* (Video). De www.youtube.com/watch?v=hRCfKgYrpCM.

Maquinado de horma en CNC, imagen recuperada de video: Schle Group (24 de septiembre 2014). *SL-PLM4: 5AS complete shoe last finishing machine SL-PLM415* (Video). De www.youtube.com/watch?v=_jTpWhrAuYA&t=27.

Prototipo de una horma personalizada en 3D: Un nuevo eje

Diedecke, F. (22 de marzo de 2018). 3D Printed Shoes | Startup Image Video. (Video). De <https://www.youtube.com/watch?v=yuwDibzBS44>.

Gizmodo (7 de marzo de 2016). We Beat Up Under Armour's New 3D-Printed Shoe and It Survived. (Video). De <https://www.youtube.com/watch?v=4BMVsfs8evg>.

Vocativ (7 de abril de 2017). This Is Adidas' First Mass Market 3D-Printed Shoe. (Video). De <https://www.youtube.com/watch?v=qlomslovAnl>.

Jacywur (5 de octubre de 2011). 3D Footwear Patterns Design Software.avi. (Video). De <https://www.youtube.com/watch?v=2t9HW01x3vg>.

TheCreativeReport (22 de febrero de 2011). The Making Of A Shoe Last By Tsubo. (Video). De <https://www.youtube.com/watch?v=D3DXXgA7LDQ>.

Manuales

Basic User's Guide, Brother Industries Ltd.

Visitas a conferencias

"La renegociación del TLCAN. Condiciones y propuestas para la cadena del calzado en México"; impartida por el Lic. Luis Gerardo González García es Presidente de la Cámara de la Industria del Calzado del Estado de Guanajuato (CICEG) y El Dr. Enrique Dussel Peters es Profesor Tiempo Completo del Posgrado en Economía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y es Coordinador del Centro de Estudios China-México (Cechimex) , el 6 de Abril de 2017, en el auditorio Narciso Bassols, organizada por el Centro de estudios China México. Facultad de Economía, UNAM.

"La renegociación del TLCAN, ¿Y China?, llevada a cabo el 14 de Febrero de 2018, en el auditorio Narciso Bassols, organizada por el Centro de estudios China México. Facultad de Economía, UNAM.

Visitas a museos

Museo y Centro Cultural de El Borcegui, A.C. Bolívar 27, piso 1. Centro Histórico CP 06000. Alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México.

Soporte en internet

Dassault Systemes.

Help.solidworks.com/2010/spanish/solidworks/cworks/legacyhelp/simulation/checking_stresses/prot_vonm.html.

Autocad autodesk help home 2018 y 2021

Enciclopedia en línea

Enciclopedia multimedia Microsoft Encarta 99; Funk & Wagnalls, Collier y New Merit Scholar; versión en español.

Diccionario de la Real Academia Española; <https://dle.rae.es>

Normas

ISO Dirección electrónica: www.normas-iso.com

ASTM Dirección electrónica www.astm.org

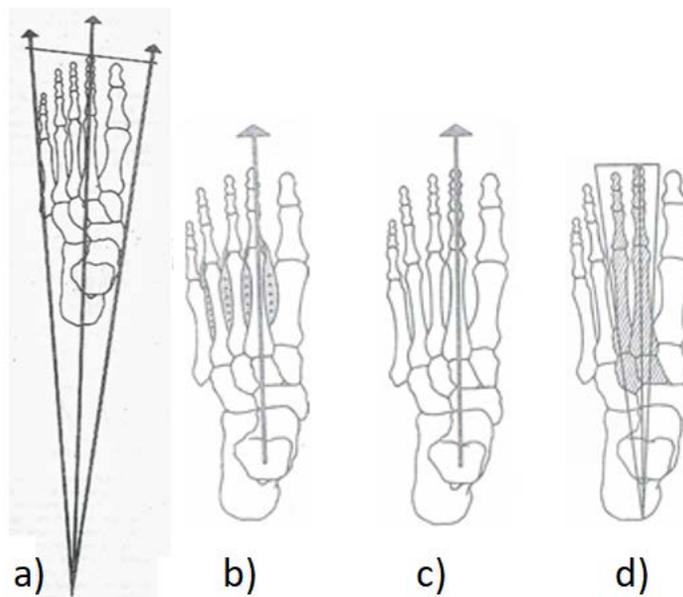
Anexos

Anexo 1.- Diferentes ejes del pie

Según Viladot (2001, p. 43) “el pie es un amortiguador en permanente movimiento, y en conjunto forma una paleta central relativamente fija y dos paletas laterales estabilizadoras, cada una con una musculatura independiente, que durante el balanceo del cuerpo se adapta a un terreno irregular; las paletas laterales por su movilidad caen pasivamente hacia abajo al colocar el pie en descarga y forman el arco metatarsal anterior.”

Existen diferentes ejes en el pie: el eje geométrico en el que dos líneas pasan por los bordes del pie, formando un ángulo de 12° , con el vértice por detrás y la línea que biseca pasa justamente por el segundo metatarsiano, ver ilustración siguiente inciso a, el eje anatómico está representado por el inciso b, el eje estático pasa sobre en el segundo metatarsiano inciso c y el eje dinámico, por su conformación, considera a los dos metatarsianos centrales de característica rígida. La combinación de estos con los denominados metatarsianos periféricos permite que el pie tenga una gran movilidad, inciso d).

Los diferentes ejes del pie



Fuente: Viladot (2003) Inciso a) eje geométrico, b) eje anatómico, c) eje estático y d) eje dinámico. p. 41-42

Anexo 2.- Brannock

La forma tradicional de medir al pie es utilizando un instrumento llamado “brannock” que consta de una base con una regla graduada donde se sitúa al pie, en uno de sus extremos tiene un tope donde se sitúa el talón, en el otro extremo los dedos y por la mitad la regleta mencionada que es deslizable y que se ajusta para medir el ancho del pie, ver ilustración siguiente.

Genuine Brannock Device (Syracuse NY, EU)



Fuente: Imagen recuperada de <http://www.anatomica.fr/images/brannock.jpg> el día 15 Junio de 2019

Anexo 3.- Podograma

El podograma es una representación real de la huella del pie en un papel tipo radiográfico impregnado por un líquido revelador, que al hacer contacto entre ellos se dibuja claramente.

Imagen de un podograma

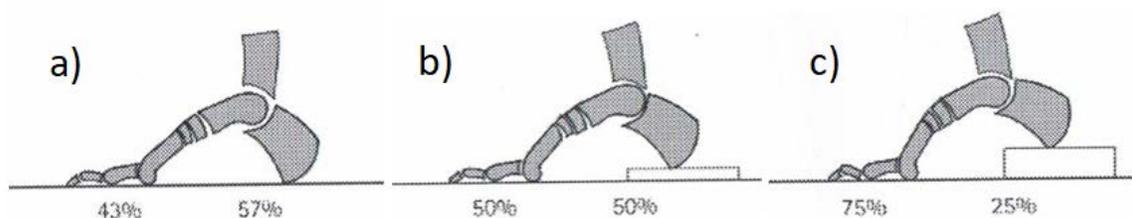


Fuente: Viladot (2001) Op. Cit. pág. 39

Anexo 4.- La distribución del peso

De acuerdo a Barreto, S. (2006). La distribución del peso varía según la altura del talón; descalzo el talón soporta el 57% de la carga y el antepié del 43% ver ilustración siguiente, inciso a; con 2 cm de elevación en el talón la carga se distribuye por igual, inciso b; con 4 cm el talón, éste recibe el 25% de la carga y el antepié soporta hasta el 75%.

Distribución del peso en el pie según la altura

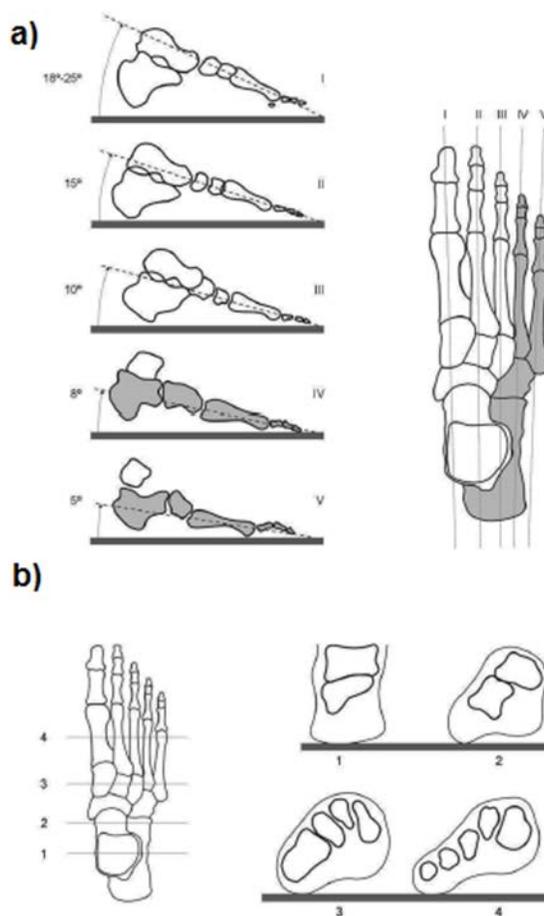


Fuente: Barreto (2006) Op. Cit. Pág. 36.

Anexo 5.- Corte transversal y longitudinal del pie

En posición bipodal el peso del cuerpo es transmitido por la pelvis al suelo a través de las extremidades inferiores. Cada pie soporta, por tanto, la mitad del peso del cuerpo. Al llegar al pie el primer hueso que encuentran las fuerzas es el astrágalo, cuya principal misión cinética es distribuir las fuerzas hacia los diferentes puntos de apoyo.

La bóveda planta: a) vista longitudinal y b) vista transversal



Fuente: Viladot (2003) Op. Cit. P. 470

Cuando se analizan las fuerzas en el plano sagital se ha podido comprobar por análisis baropodométrico que el 60% de las fuerzas se dirigen al calcáneo y el 40% al antepié. Esta proporción varía considerablemente al levantar el talón del suelo, momento en que aumenta la carga que recibe el antepié. Analizando las fuerzas en el plano transversal se observa que también el astrágalo desempeña el papel de distribuidor de cargas. Hacia atrás,

transmite la mayor parte de la carga, que llega al suelo a través de la tuberosidad del calcáneo. Hacia delante, una parte de la fuerza se transmite, a través de la cabeza del astrágalo, a las cuñas y a los 3 primeros metatarsianos, es decir, al llamado «pie dinámico». En el lado externo, las fuerzas llegan al suelo a través de calcáneo, cuboides y metatarsianos, es decir, el «pie estático». En el antepié, como se ha comentado ya, la carga se distribuye a través de todos los metatarsianos, con la particularidad de que el primero, anatómicamente el más dotado, absorbe como mínimo el doble de fuerza que cada uno de los restantes y la transmite al suelo a través de los sesamoideos

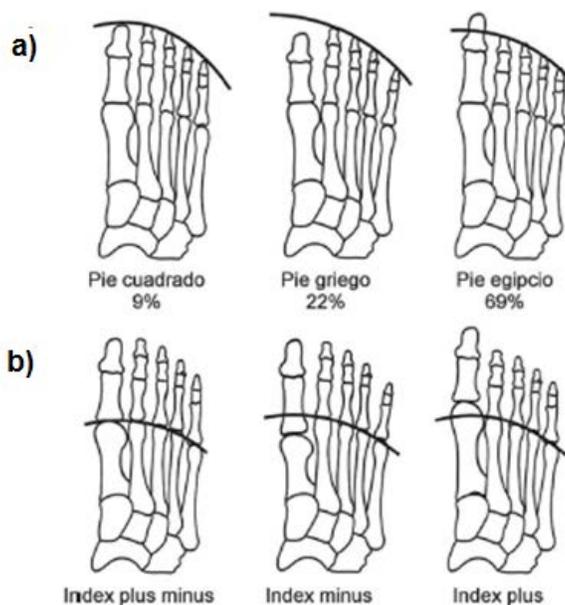
De acuerdo a Viladot (2003). En el parte posterior del pie se encuentra la bóveda plantar, donde los huesos soportan fuerzas de compresión y en la parte posterior, constituido por músculos y ligamentos, resiste esfuerzos de tracción (p. 470).

Anexo 6.- Tipos del pie

Los tipos de pie puede ser clasificados de dos maneras: una por la forma y longitud de los dedos y la otra, por longitud y apoyo metatarsal (Viladot, 2001). Siguiendo con el autor, el tipo de pie más representativo en México es el egipcio con un 42.4%, de acuerdo a un estudio efectuado por él, en el año de 1960 y complementado por otros colegas, después le sigue el pie cuadrado con 36.4% y el pie griego con 19.2% (p. 2). Ver ilustración inciso a.

Para el caso de una clasificación metatarsal hay tres tipos, el primero llamado: Index minus con el 56% de la muestra, le sigue Index plus minus con el 28% y por último index plus con el 16%, cabe resaltar que sólo puede ser observado con la ayuda de rayos x. Para el caso México no especifica el porcentaje, el autor concluye que la región metatarsal del pie, en el continente americano es más desarrollada (p. 6). Ver ilustración 27, inciso b.

Clasificación de acuerdo al tipo de pie (porcentajes a nivel mundial)



Fuente: Viladot, V. (2003) Op. Cit. p. 472

Anexo 7.- Puntos y regiones importantes en el pie

Existen puntos y regiones que visualmente se pueden localizar en el pie sin ningún problema, para ser medidas y consideradas para el diseño de la horma y el calzado; al respecto, se considera pertinente mostrar la siguiente tabla donde se concentran todas estas zonas.

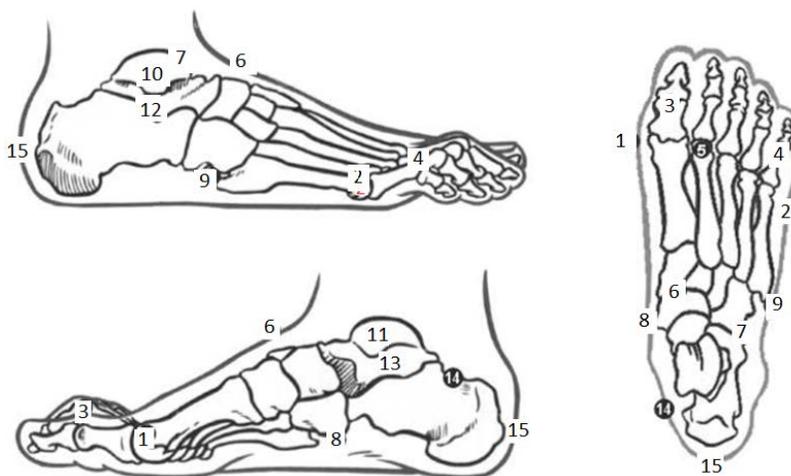
Puntos y zonas a localizar visualmente en el pie

#	NOMBRE	#	NOMBRE
Parte lateral del pie		Parte medial del pie	
10	Zona del maleolo fibular	11	Zona del maleolo tibial
9	Base o tuberosidad del 5º metatarso	8	Hueso navicular
2	Metatarso fibular o cabeza del 5º metatarso	1	Metatarso tibial o cabeza del 1º metatarso
4	Altura de la articulación del 5º dedo	3	Altura de la articulación del 1er dedo
12	Sphyrion fibular	13	Sphyrion tibial
Parte superior del pie			
7	Zona de la articulación del tobillo	Parte posterior del pie	
6	Zona del empeine, hueso navicular	14	Punto superior del talón
5	Zona de los dedos, cabeza del 2º metatarso	15	Pternion

Fuente: Nácher, B.; Alemany, S.; González, J.C.; Alcántara, E.; García-Hernández, J.; Heras, S. & Juan, A. (2005), p. 3.

Con respecto a la tabla anterior, se ejemplifica por medio de ilustraciones los puntos mencionados; en sus tres diferentes vistas superior, medial y lateral.

Puntos y zonas del pie para identificar



Fuente: Nácher et al. (2005). En las figuras se observan números que indican los puntos más relevantes de las características antropométricas del pie (p. 3).

Anexo 8.- Principales parámetros antropométricos del pie

Son veinte parámetros que fueron tomados en cuenta para el estudio realizado a veintitrés voluntarios del sexo masculino en un rango de edad entre treinta a cuarenta años para ambos pies. A continuación, se muestran en la siguiente tabla.

Parámetros antropométricos del pie

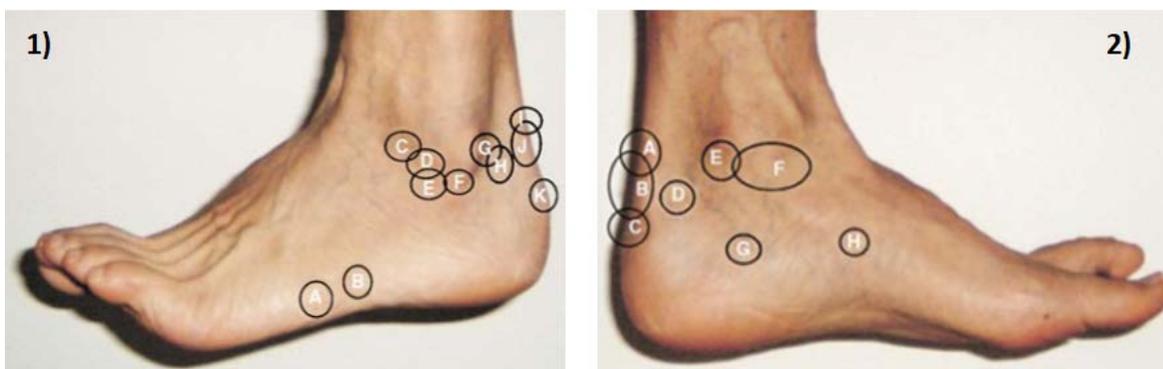
Punto o zona	Parámetro antropométrico
P1	Longitud del pie
P2	Circunferencia del recio
P3	Ancho del pie
P4	Circunferencia del empeine
P5	Ancho del talón
P6	Longitud del empeine
P7	Longitud del empeine fibulare*
P8	Altura del recio
P9	Altura del empeine
P10	Ángulo del primer dedo
P11	Ángulo del quinto dedo
P12	Altura del primer dedo
P13	Altura del quinto dedo
P14	Altura del sphyrion fibulare
P15	Altura del sphyrion
P16	Altura del maléolo lateral
P17	Altura del maléolo medial
P18	Ángulo del hueso del talón*
P19	Circunferencia del talón
P20	Circunferencia del tobillo*

Datos extraídos de la investigación de Sharghie & Costea (June 2013). Anthropometric study of the foot using 3D scanning method and statistical analysis. International Symposium in Knitting and Apparel- ISKA 2013. "Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi-Romania, Doctoral School of the Faculty of Textil-Lether and Industrial Management.

Anexo 9.- Lesiones más comunes

La medicina en el deporte ha contribuido notablemente en un mejor entendimiento de la función del pie y se ha encargado de identificar las lesiones más comunes que sufre al realizar alguna actividad física.

Lesiones más comunes de la parte medial y lateral del pie



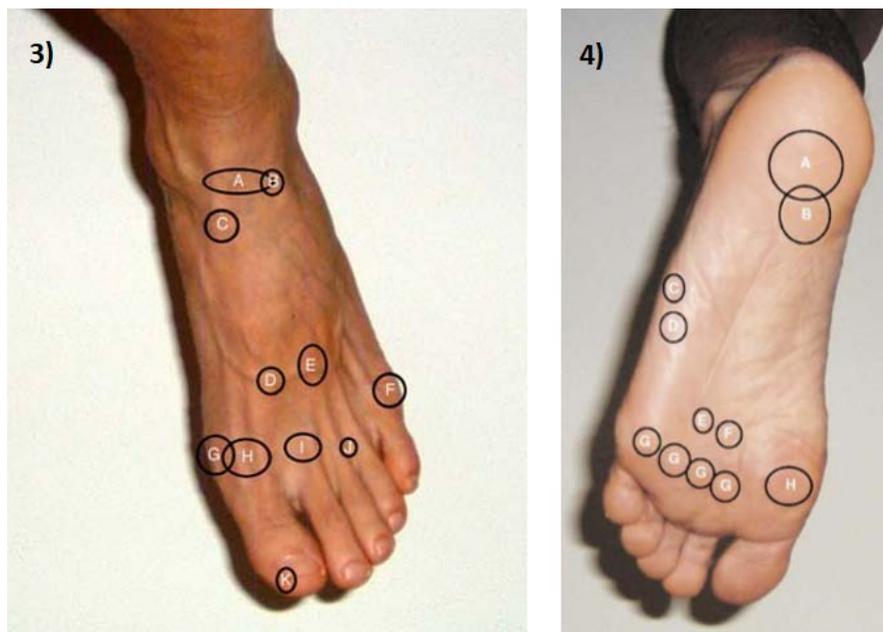
Fuente: Young, C.; Niedfeldt, M.; Morris, G. & Earkes, K. (2005). Clinical examination of the foot and ankle. División of Sport Medicine, Medical College of Wisconsin, 9200 W Wisconsin Avenue, Milwaukee, WI 53226, USA. DOI:10.1016/j.pop.2004.11.002.

En la figura 1 se muestra las ubicaciones típicas de lesión: (A) fractura de Jones; (B) fractura por avulsión del quinto metatarsiano; (C) tobillo anterior; (D) ligamento talofibular anterior; (E) tarso sinusal; (F) ligamento calcaneofibular; (G) pinzamiento posterior del tobillo; (H) bursitis retrocalcaneal; (I) ruptura del tendón de Aquiles; (J) tendinitis de Aquiles; (K) apofisitis calcánea (condición de Sever) y "golpe de bomba".

En la figura 2 se muestra las ubicaciones típicas de lesión: (A) ruptura del tendón de Aquiles; (B) tendinitis de Aquiles; (C) apofisitis calcánea (Condición del servidor) y "tope de la bomba"; (D) bursitis retrocalcaneal; (E) síndrome del túnel tarsal; (F) esguince medial del tobillo; (G) sitio de atrapamiento de la primera rama del nervio plantar lateral; (H) maestro nudo de Henry, sitio de atrapamiento del nervio plantar medial.

Continuación del estudio "Clinical examination of the foot an ankle" para la parte superior e inferior del pie.

Las lesiones más comunes en la parte superior e inferior del pie



Fuente: Young, C.; Niedfeldt, M.; Morris, G. & Earkes, K. (2005). Clinical examination of the foot an ankle. División of Sport Medicine, Medical College of Wisconsin, 9200 W Wisconsin Avenue, Milwaukee, WI 53226, USA. DOI:10.1016/j.pop.2004.11.002.

En la figura 3 se muestra las ubicaciones típicas de lesión: (A) pinzamiento anterior del tobillo; (B) osteocondritis disecante (TOC) del lateral cúpula talar; (C) el punto N: fractura por estrés navicular; (D) esguince de Lisfranc; (E) tarso anterior síndrome del túnel; (F) juanete; (G) juanete; (H) hallux rigidus; (I) necrosis avascular de segundo cabeza metatarsiana (infarto de Freiberg); (J) neuroma interdigital (neuroma de Morton); (K) paroniquia.

En la figura 4 se muestra las ubicaciones típicas de lesión: (A) almohadilla de grasa plantar; (B) fascitis plantar; (C) fractura por avulsión del quinto metatarsiano; (D) Jones fractura; (E) fractura por estrés del tercer metatarsiano; (F) fractura por estrés del segundo metatarsiano; (G) metatarsalgia; (H) sesamoiditis.

Anexo 10.- La marcha humana en diapositivas

Para un mejor entendimiento de la marcha humana se capturó en diapositivas los diversos movimientos que tiene el cuerpo al caminar, se puede apreciar que la persona de pie completamente en reposo empieza con su primer paso, levantando el pie izquierdo hasta tocar el talón con el suelo, en el segundo renglón de diapositivas se inicia con apoyo bipodal, despegando los dedos del pie derecho, viaja en el aire hasta depositar el talón en el suelo, en el tercer renglón comienza con apoyo bipodal levanta el pie izquierdo y repite la misma acción que el derecho hasta tocar nuevamente con el talón completando el ciclo de la marcha.

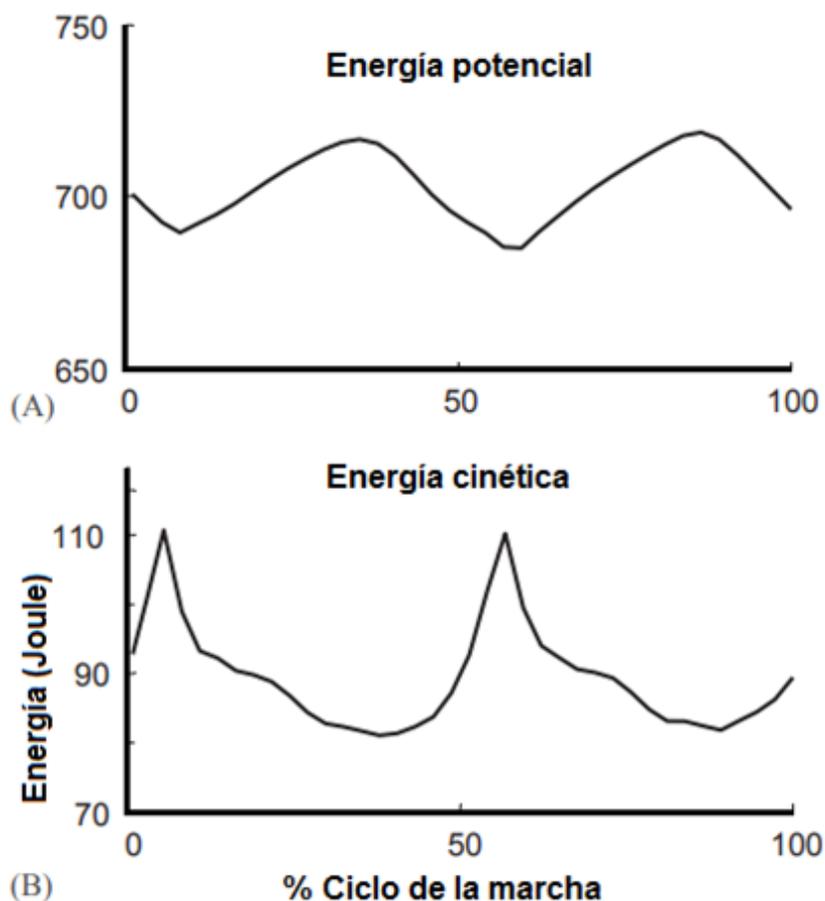
El ciclo de la marcha partiendo desde el reposo



Elaboración propia las diapositivas fueron obtenidas de una cámara canon, modelo rebel T5, con ISO 800 y velocidad de 1/400.

Anexo 11.- La energía cinética y potencial en la marcha

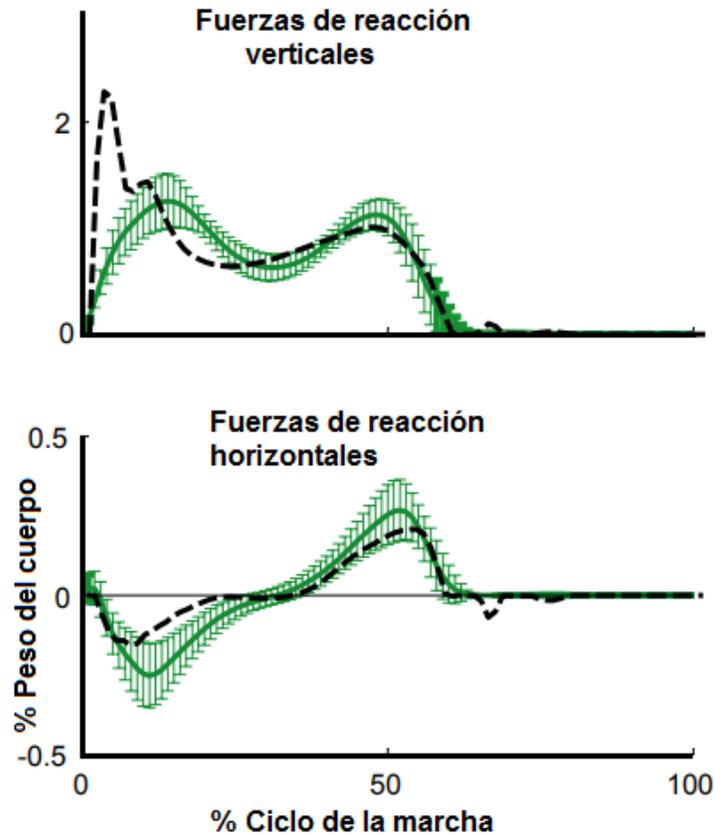
Las siguientes gráficas representan tanto la energía potencial como la cinética desde que se toca el talón con el suelo hasta que vuelve a tocar el talón con el mismo pie; para la primera gráfica, la energía se desempeña tal como una onda sinusoidal en su parte más alta es cuando se efectúa el apoyo unipodal y la parte más baja con bipodal. Para la segunda gráfica, su forma es de diente de sierra coincidiendo sus partes más altas con las más bajas de la anterior figura; demostrando así la conservación de la energía.



Fuente: Neptune, Zajac & Kautz (2004). Muscle Mechanical Work Requirements During Normal Walking: The Energetic Cost of Raising the Body's Center-of-mass is Significant. Rehabilitation R&D Center, VA Palo Alto Health Care System, 3801 Miranda Avenue, Palo Alto, CA 94304, USA. Journal of Biomechanics. 37 p. 817-825

Anexo 12.- Fuerzas de reacción

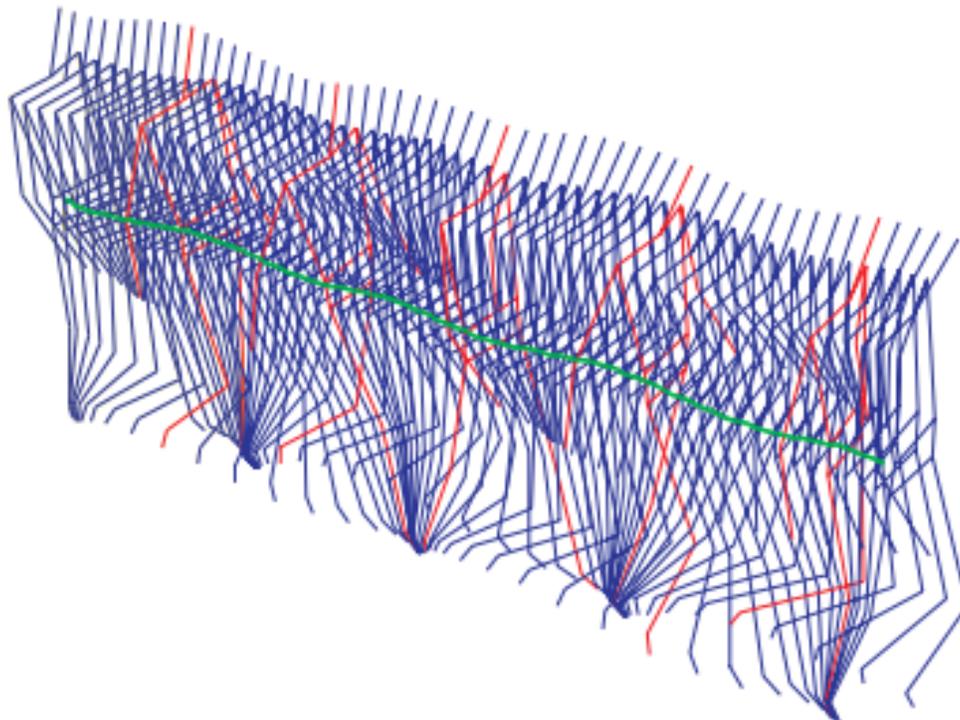
Las siguientes gráficas representan las fuerzas de reacción vertical y horizontal de un estudio encaminado a medir la carga que ejerce el pie desde que toca el suelo con el talón hasta que lo despega con los dedos.



Fuente: Neptune, Zajac & Kautz (2004). Muscle Mechanical Work Requirements During Normal Walking: The Energetic Cost of Raising the Body's Center-of-mass is Significant. Rehabilitation R&D Center, VA Palo Alto Health Care System, 3801 Miranda Avenue, Palo Alto, CA 94304, USA. Journal of Biomechanics. 37 p. 817–825

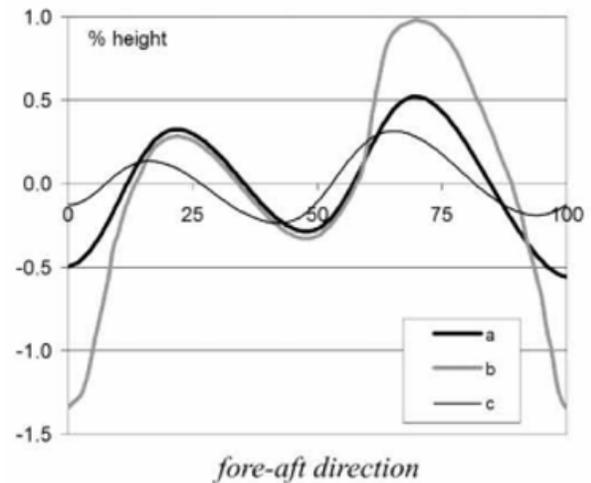
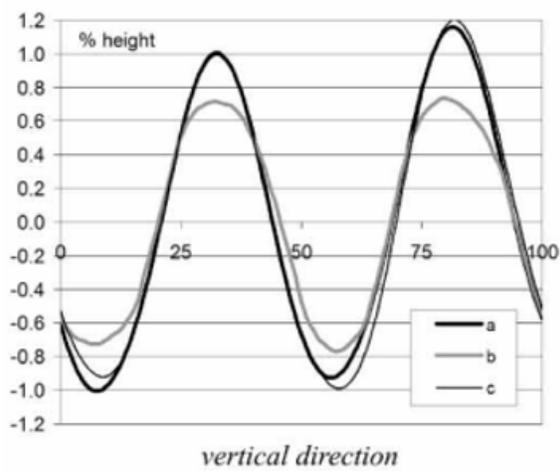
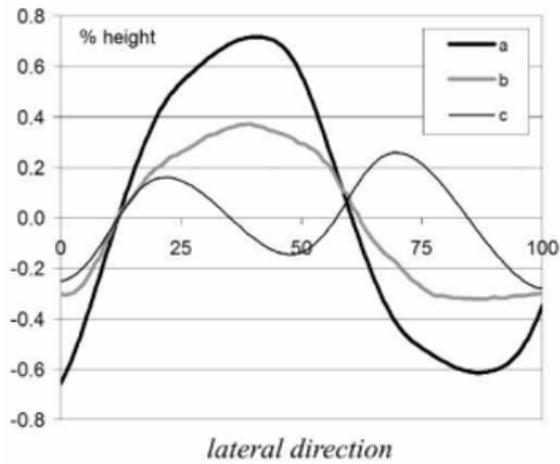
Anexo 13.- Centro de masa del cuerpo

La siguiente ilustración muestra la trayectoria sinusoidal que va dibujando el centroide del cuerpo humano al caminar ejemplificada por la línea verde, en azul la estructura del cuerpo humano y en rojo la misma estructura en apoyo bipodal.



Fuente: Jurcevic, Susic & Kodvanj (2008)

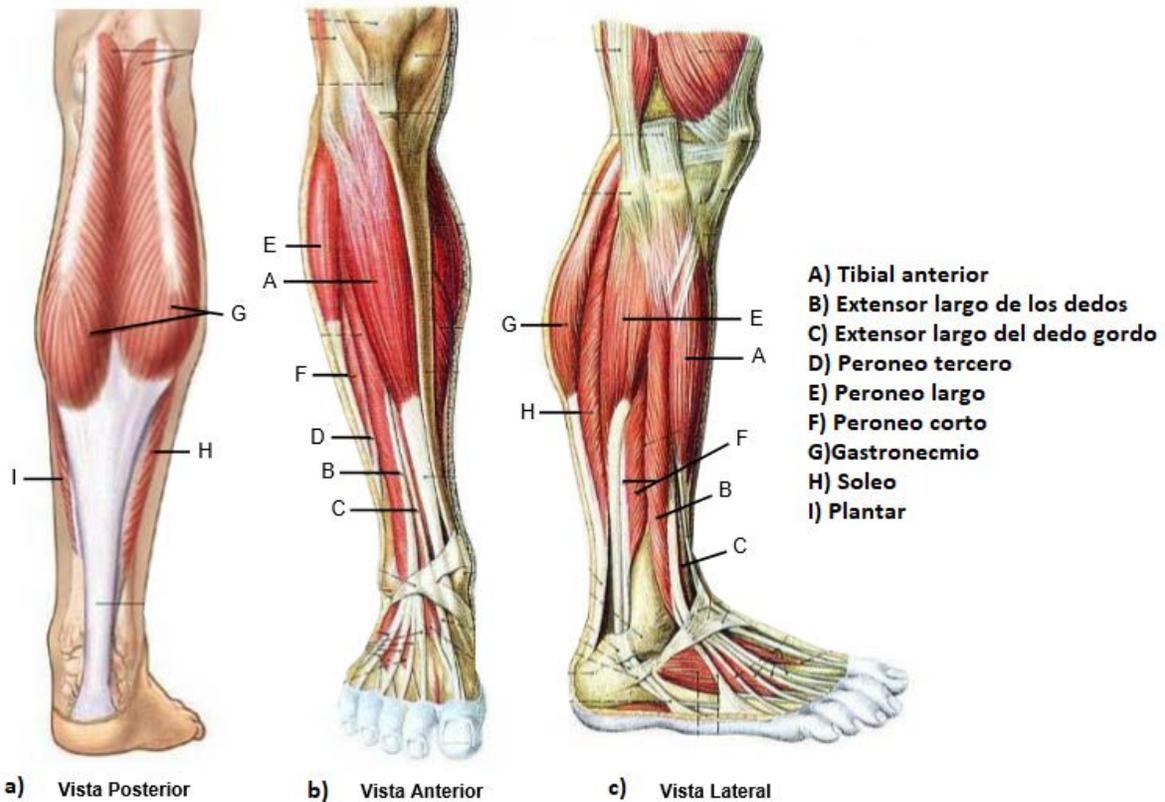
Trayectoria del centro de masa en el eje coordenado



Fuente: Jurcevic, Susic & Kodvanj (2008)

Anexo 14.- Los músculos de la pierna

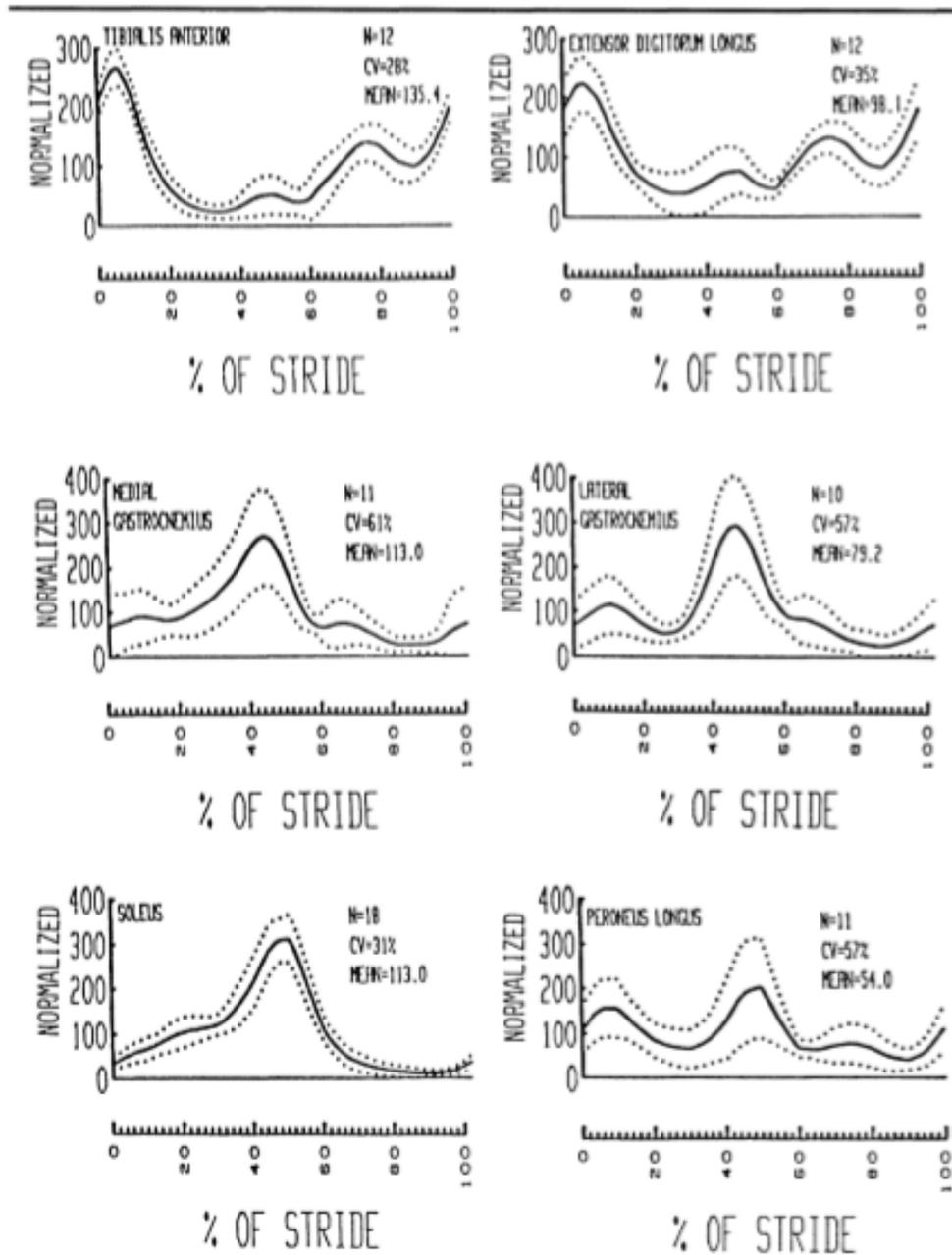
Los músculos de la pierna y que intervienen en el movimiento del pie, se puede apreciar que éstos inician en la pierna y terminan en el pie.



Fuente: Enciclopedia multimedia Microsoft Encarta 99; Funk & Wagnalls, Collier y New Merit Scholar; versión en español

Anexo 15.- Registro electromiográfico de la actividad muscular

Gráficas que representan la actividad muscular respecto al porcentaje del paso

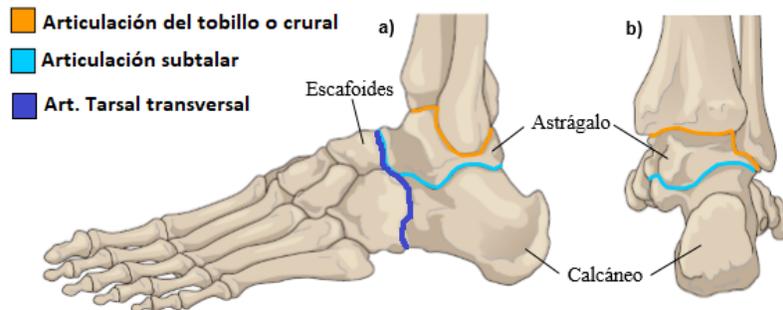


Fuente: Rodgers, M. (1988). Dynamic Biomechanics of the Normal Foot and Ankle During Walking and Running Volume 68/ Number 12; Physical Therapy, pag. 1824

Anexo 16.- Articulaciones y ejes del retropié

En la postura choque del talón las siguientes articulaciones se ven involucradas

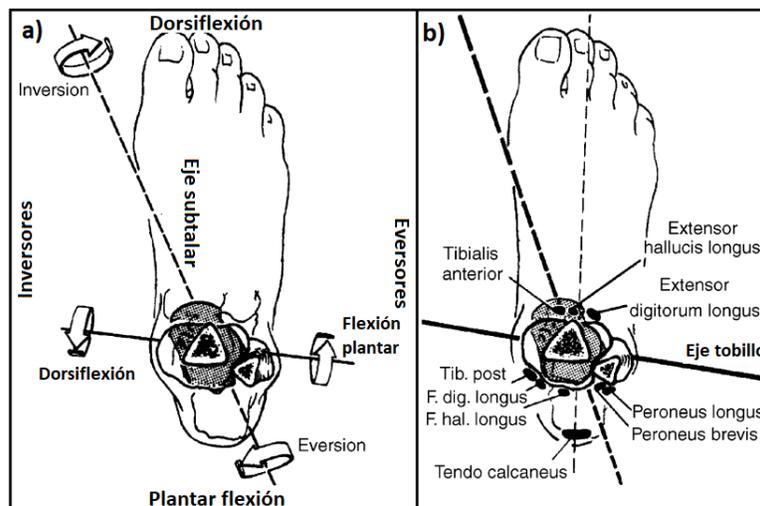
Las tres articulaciones principales



Fuente: Enciclopedia multimedia Microsoft Encarta 99; Funk & Wagnalls, Collier y New Merit Scholar; versión en español.

Corte trasversal del tobillo donde se aprecia la tibia y el peroné y la distribución de los músculos.

Ejes y músculos del tobillo

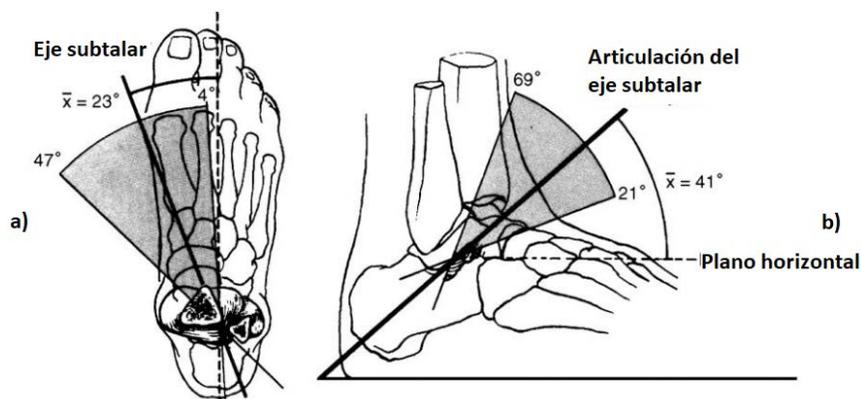


Fuente: Sheila, A. Dugan & Krishna, P. Bhat (2005). Inciso a) Rotación alrededor de los ejes de la articulación subastragalina y del tobillo. Inciso b) Posición de la unidad musculotendinosa en relación con el tobillo y los ejes de la articulación subastragalina. Músculos: Tibial posterior, Flexor digitorum longus, Flexor hallucis longus, Extensor hallucis longus, Extensor digitorum longus, peroneo longus, peroneus brevis.

Prototipo de una horma personalizada en 3D: Un nuevo eje

La articulación subtalar, se ubica entre el astrágalo y el calcáneo, el eje de esta articulación corre hacia abajo en el plano sagital y lateralmente en el plano transversal. Este eje está orientado a la parte medial aproximadamente 23° a partir del eje del pie, visto sobre el plano transversal; con un rango de acción de 4° a 47° . En el plano sagital, el eje articular está orientado 41° en promedio pues está entre 21° a 69° con respecto a la planta del pie y corre distalmente desde la cara dorsal del cuello del astrágalo a la esquina posterolateral del calcáneo. El STJ es análogo a una bisagra oblicua, esto permite moverse de una manera compleja. La orientación del STJ con respecto a la tibia también da como resultado un efecto de bisagra en inglete, el movimiento del pie se transmite proximalmente y da como resultado la rotación interna o externa de la tibia.

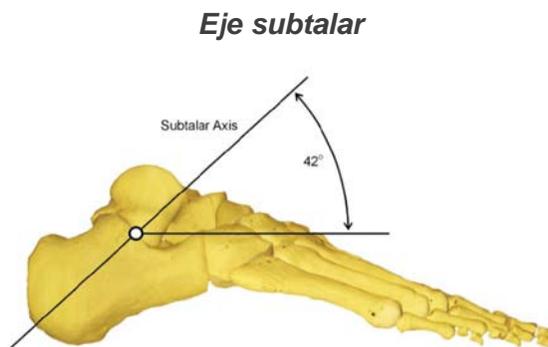
El eje subtalar



Fuente: Sheila, A. Dugan & Krishna, P. Bhat (2005). Eje de la articulación sub astragalina o subtalar como referencia el ángulo se mide sobre el plano transversal y en el inciso b) se mide sobre el plano sagital. En cada uno se muestran los promedios de 23° y de 41° .

Eje subtalar visto por otro autor

El retropié está formado por el hueso astrágalo y el hueso calcáneo, el cual forma un ángulo de 42° aproximadamente con la horizontal, es el más grande y da forma al talón; en la parte de arriba es jalado por el tendón de Aquiles y en la planta por soleus y gastrocnemio.

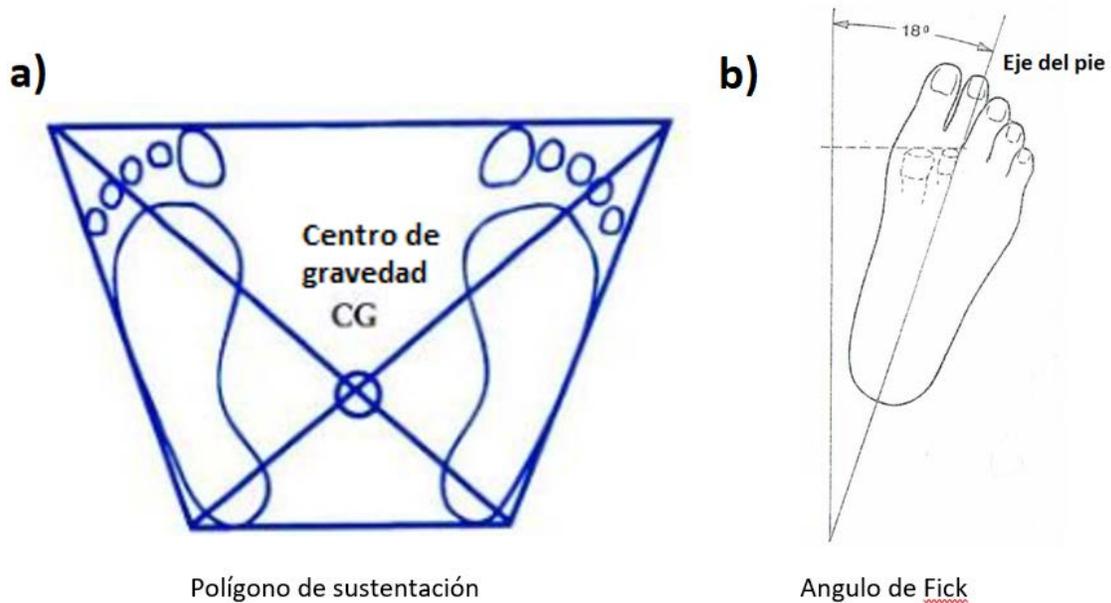


Fuente: Abboud, R.J. (2002) Relevant foot biomechanics. Mini-symposium: The elective foot. Foot Pressure analysis laboratory/clínica, University orthopaedic & trauma surgery departamento, TORT centre, Ninewells hospital & medical school, Dundee DD1 9sY, Scotlan, UK. Current Orthopedics (2002) 16, 165-179. Published by Elsevier Ltd; p. 168

Anexo 17.- Polígono de sustentación y ángulo de Fick

Al estar erguido, el pie toma una postura ligeramente hacia afuera en un ángulo de 18° para generar un equilibrio estable, coincidiendo el centro de gravedad del cuerpo con la intersección de las diagonales de un trapezoide imaginario.

Dibujo del polígono de sustentación y el ángulo de Fick

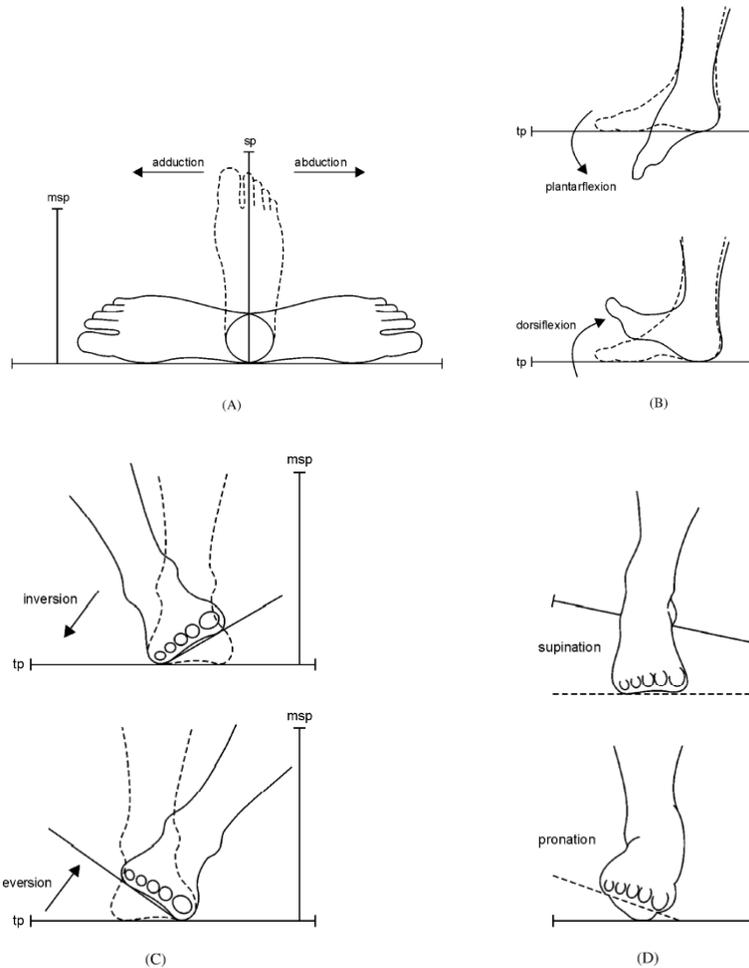


Fuente: Inciso a) Aragón, J. (2002) *El pie diabético*; Barcelona, editorial masson 2ª edición. Inciso b) Viladot, A. (2001) *Patología del antepie*, Springer-Verlag, 4ª edición. España. El autor maneja un ángulo de 18° , otros autores manejan 15° .

Anexo 18.- Diferentes movimientos de las articulaciones del pie

El rango promedio de movimiento del tobillo es de 45° a 20° en dorsiflexión y de 25° a 35° en flexión plantar.

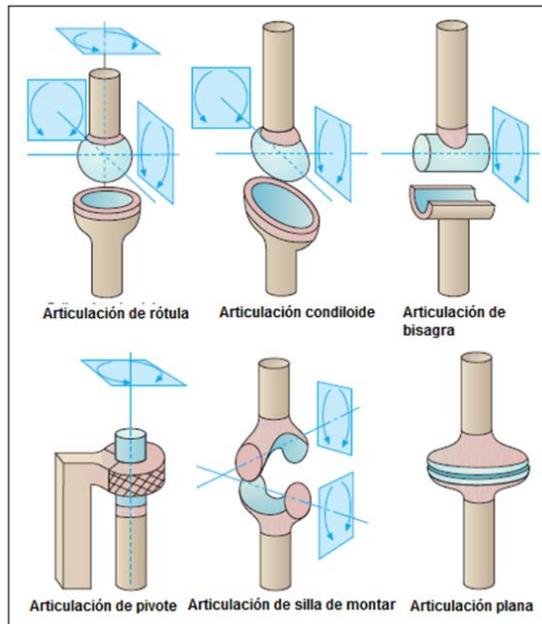
Movimientos de la articulación



Fuente: Abboud, R.J. (2002) Relevant foot biomechanics. Mini-symposium: The elective foot. Foot Pressure analysis laboratory/clínica, University orthopaedic & trauma surgery departamento, TORT centre, Ninewells hospital & medical school, Dundee DDI 9sY, Scotlan, UK. Current Orthopedics (2002) 16, 165-179. Published by Elsevier Ltd; p. 169

Anexo 19.- Las articulaciones en el cuerpo humano

Comparativo de las diversas articulaciones con su similar mecánico.



Fuente: Faller & Chuenke (2004) *The Human Body an Introduction to Structure and Function*. Edit. Thieme NY. p. 121

Movimiento torsional entre la pierna y el pie; así como el acomodo de los huesos del retropié

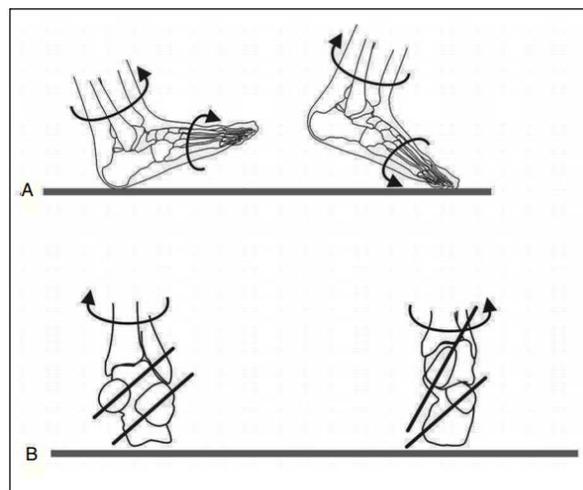


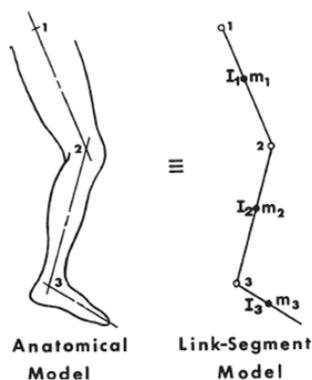
Figura 5. Rotaciones del tobillo y pie durante la marcha, visión sagital (A) y visión frontal (B).

Fuente: Viladot (2003) Inciso a) eje geométrico, b) eje anatómico, c) eje estático y d) eje dinámico. p. 474

Anexo 20.- Método de segmento de enlace por Winter

Consideraciones para calcular las fuerzas y los momentos:

1. Cada segmento tiene una masa fija ubicada como una masa puntual en su COM (Que será el centro de gravedad en la dirección vertical).
2. La ubicación del COM de cada segmento permanece fija durante el movimiento.
3. Las articulaciones se consideran de rótula o de bisagra.
4. El momento de inercia de cada segmento sobre su centro de masa es constante durante el movimiento.
5. La longitud de cada segmento permanece constante durante el movimiento.



Fuente: Winter, D. (2009). Biomechanics and Motor Control of Human Movement, Fourth edition; John Wiley & Son, Inc. ISBN: 978-0-470-39818-0. Pag. 108-109

La figura anterior muestra la equivalencia entre los modelos anatómico y de segmento de enlace para la extremidad inferior. Las masas m_1 , m_2 y m_3 y el momento de inercia de cada segmento I_1 , I_2 e I_3 se consideran concentradas sobre cada COM.

Anexo 21.- Datos antropométricos

Estudios médico forenses se han encargado de encontrar las medidas de cada parte del cuerpo, su masa y densidad.

Tabla resumen de los datos antropométricos

TABLE 4.1 Anthropometric Data

Segment	Definition	Segment Weight/Total Body Weight	Center of Mass/ Segment Length		Radius of Gyration/ Segment Length		Density	
			Proximal	Distal	C of G Proximal	Distal		
Hand	Wrist axis/knuckle II middle finger	0.006 M	0.506	0.494 P	0.297	0.587	0.577 M	1.16
Forearm	Elbow axis/ulnar styloid	0.016 M	0.430	0.570 P	0.303	0.526	0.647 M	1.13
Upper arm	Glenohumeral axis/elbow axis	0.028 M	0.436	0.564 P	0.322	0.542	0.645 M	1.07
Forearm and hand	Elbow axis/ulnar styloid	0.022 M	0.682	0.318 P	0.468	0.827	0.565 P	1.14
Total arm	Glenohumeral joint/ulnar styloid	0.050 M	0.530	0.470 P	0.368	0.645	0.596 P	1.11
Foot	Lateral malleolus/head metatarsal II	0.0145 M	0.50	0.50 P	0.475	0.690	0.690 P	1.10
Leg	Femoral condyles/medial malleolus	0.0465 M	0.433	0.567 P	0.302	0.528	0.643 M	1.09
Thigh	Greater trochanter/femoral condyles	0.100 M	0.433	0.567 P	0.323	0.540	0.653 M	1.05
Foot and leg	Femoral condyles/medial malleolus	0.061 M	0.606	0.394 P	0.416	0.735	0.572 P	1.09
Total leg	Greater trochanter/medial malleolus	0.161 M	0.447	0.553 P	0.326	0.560	0.650 P	1.06
Head and neck	C7-T1 and 1st rib/ear canal	0.081 M	1.000	— PC	0.495	0.116	— PC	1.11
Shoulder mass	Sternoclavicular joint/glenohumeral axis	—	0.712	0.288	—	—	—	1.04
Thorax	C7-T1/T12-L1 and diaphragm*	0.216 PC	0.82	0.18	—	—	—	0.92
Abdomen	T12-L1/L4-L5*	0.139 LC	0.44	0.56	—	—	—	—
Pelvis	L4-L5/greater trochanter*	0.142 LC	0.105	0.895	—	—	—	—
Thorax and abdomen	C7-T1/L4-L5*	0.355 LC	0.63	0.37	—	—	—	—
Abdomen and pelvis	T12-L1/greater trochanter*	0.281 PC	0.27	0.73	—	—	—	1.01
Trunk	Greater trochanter/glenohumeral joint*	0.497 M	0.50	0.50	—	—	—	1.03
Trunk head neck	Greater trochanter/glenohumeral joint*	0.578 MC	0.66	0.34 P	0.503	0.830	0.607 M	—
Head, arms, and trunk (HAT)	Greater trochanter/glenohumeral joint*	0.678 MC	0.626	0.374 PC	0.496	0.798	0.621 PC	—
HAT	Greater trochanter/mid rib	0.678	1.142	—	0.903	1.456	—	—

*NOTE: These segments are presented relative to the length between the greater trochanter and the glenohumeral joint.

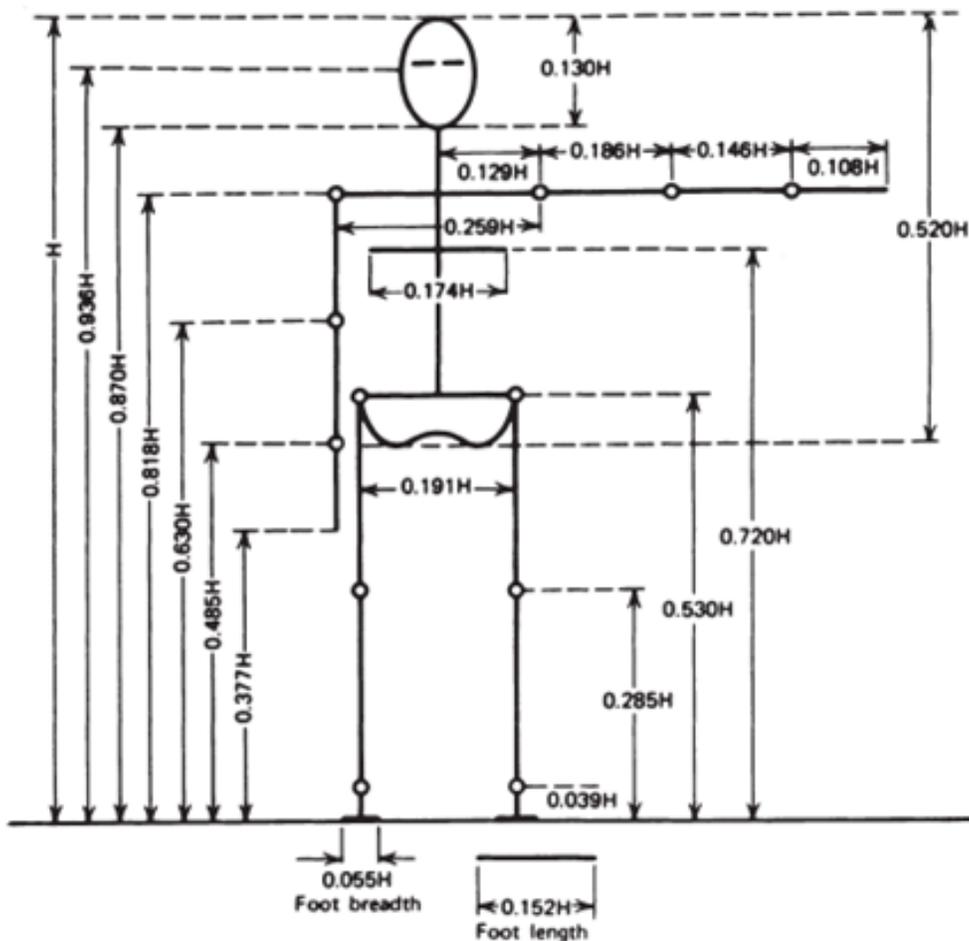
Source Codes: M, Dempster via Miller and Nelson; *Biomechanics of Sport*, Lea and Febiger, Philadelphia, 1973. P, Dempster via Plagenhoef; *Patterns of Human Motion*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ, 1971. L, Dempster via Plagenhoef from living subjects; *Patterns of Human Motion*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1971. C, Calculated.

Fuente: Winter, D. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, Fourth Edition; Editorial John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-470-39818-0, pag. 83

Anexo 21.- Datos antropométricos, continuación

Otro aspecto de la antropometría es encontrar la relación que existe entre la altura del individuo y las longitudes de cada sección del cuerpo.

Longitudes del cuerpo



Fuente: Winter, D. (2009). Biomechanics and Motor Control of Human Movement, Fourth Edition; Editorial John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-470-39818-0, pag. 83

Anexo 22.- Tabla. Linear and Angular Kinematics-Foot

TABLE A.3(a) Linear and Angular Kinematics—Foot

	FRAME	TIME S	THETA DEG	OMEGA R/S	ALPHA R/S/S	CorM-X M	VEL-X M/S	ACC-X M/S/S	CorM-Y M	VEL-Y M/S	ACC-Y M/S/S	
Toe off right	TOR	1	0.000	85.6	-5.01	118.27	0.089	1.937	26.39	0.153	0.814	-4.92
		2	0.014	82.2	-3.11	138.72	0.120	2.310	24.92	0.165	0.707	-9.81
		3	0.029	80.5	-1.04	142.01	0.155	2.650	22.11	0.174	0.533	-13.77
		4	0.043	80.5	0.96	132.71	0.195	2.942	18.72	0.180	0.313	-16.13
		5	0.057	82.1	2.75	115.36	0.239	3.185	15.54	0.183	0.072	-16.70
		6	0.072	85.0	4.25	93.06	0.287	3.386	12.91	0.182	-0.164	-15.72
		7	0.086	89.1	5.41	68.58	0.336	3.555	10.83	0.178	-0.378	-13.58
		8	0.100	93.9	6.22	44.92	0.388	3.696	9.20	0.171	-0.553	-10.64
		9	0.114	99.2	6.70	25.05	0.442	3.818	7.94	0.162	-0.682	-7.27
		10	0.129	104.9	6.93	10.88	0.497	3.923	6.90	0.152	-0.761	-3.80
		11	0.143	110.6	7.01	2.33	0.554	4.015	5.88	0.140	-0.791	-0.37
		12	0.157	116.3	7.00	-2.26	0.612	4.092	4.69	0.129	-0.771	2.99
		13	0.172	122.1	6.94	-4.67	0.671	4.149	3.15	0.118	-0.705	6.11
		14	0.186	127.7	6.87	-5.67	0.731	4.182	1.18	0.109	-0.597	8.65
		15	0.200	133.3	6.78	-5.01	0.791	4.183	-1.12	0.101	-0.457	10.42
		16	0.215	138.8	6.72	-3.24	0.851	4.150	-3.73	0.096	-0.299	11.39
		17	0.229	144.3	6.69	-3.16	0.909	4.076	-6.80	0.093	-0.132	11.57
		18	0.243	149.8	6.63	-8.11	0.967	3.955	-10.45	0.092	0.032	10.78
		19	0.257	155.2	6.46	-19.17	1.023	3.778	-14.54	0.094	0.177	8.80
		20	0.272	160.4	6.08	-34.96	1.075	3.539	-18.79	0.097	0.284	5.61
		21	0.286	165.2	5.46	-53.64	1.124	3.240	-22.83	0.102	0.337	1.47
		22	0.300	169.3	4.55	-73.48	1.168	2.886	-26.24	0.107	0.326	-3.24
		23	0.315	172.6	3.36	-91.19	1.206	2.490	-28.53	0.111	0.245	-7.83

(continued)

TABLE A.3(a) (Continued)

	FRAME	TIME S	THETA DEG	OMEGA R/S	ALPHA R/S/S	CorM-X M	VEL-X M/S	ACC-X M/S/S	CorM-Y M	VEL-Y M/S	ACC-Y M/S/S	
HCR Hell contact right		24	0.329	174.8	1.94	-102.29	1.239	2.070	-29.23	0.114	0.102	-11.35
		25	0.343	175.8	0.43	-104.08	1.266	1.654	-27.90	0.114	-0.080	-12.86
		26	0.357	175.5	-1.03	-97.50	1.286	1.272	-24.51	0.111	-0.266	-11.90
		27	0.372	174.1	-2.36	-85.55	1.302	0.953	-19.64	0.106	-0.420	-8.61
		28	0.386	171.7	-3.48	-68.80	1.314	0.710	-14.43	0.099	-0.512	-3.92
		29	0.400	168.4	-4.32	-43.96	1.322	0.540	-10.02	0.092	-0.532	0.78
		30	0.415	164.6	-4.74	-10.50	1.329	0.424	-7.03	0.084	-0.490	4.32
		31	0.429	160.6	-4.63	24.51	1.334	0.339	-5.31	0.078	-0.409	6.26
		32	0.443	157.0	-4.04	52.05	1.339	0.272	-4.39	0.073	-0.311	6.77
		33	0.458	154.0	-3.14	67.24	1.342	0.214	-3.77	0.069	-0.215	6.26
		34	0.472	151.9	-2.11	68.18	1.345	0.164	-3.06	0.066	-0.132	5.12
		35	0.486	150.6	-1.19	55.74	1.347	0.126	-2.15	0.065	-0.069	3.71
		36	0.500	149.9	-0.52	35.86	1.348	0.103	-1.38	0.064	-0.026	2.36
		37	0.515	149.7	-0.16	17.08	1.350	0.087	-1.21	0.064	-0.001	1.25
		38	0.529	149.7	-0.03	4.56	1.351	0.068	-1.64	0.064	0.010	0.46
		39	0.543	149.7	-0.03	-1.79	1.352	0.040	-2.06	0.065	0.012	0.10
		40	0.558	149.6	-0.08	-4.87	1.352	0.009	-1.91	0.065	0.013	0.16
		41	0.572	149.5	-0.17	-7.39	1.352	-0.015	-1.21	0.065	0.017	0.43
		42	0.586	149.3	-0.29	-10.28	1.352	-0.026	-0.40	0.065	0.025	0.54
		43	0.601	149.0	-0.46	-12.53	1.351	-0.026	0.26	0.066	0.033	0.31
		44	0.615	148.6	-0.65	-12.14	1.351	-0.018	0.76	0.066	0.034	-0.11
		45	0.629	148.0	-0.81	-8.07	1.351	-0.004	1.07	0.067	0.029	-0.47
		46	0.643	147.2	-0.88	-1.88	1.351	0.012	1.10	0.067	0.021	-0.60

Prototipo de una horma personalizada en 3D: Un nuevo eje

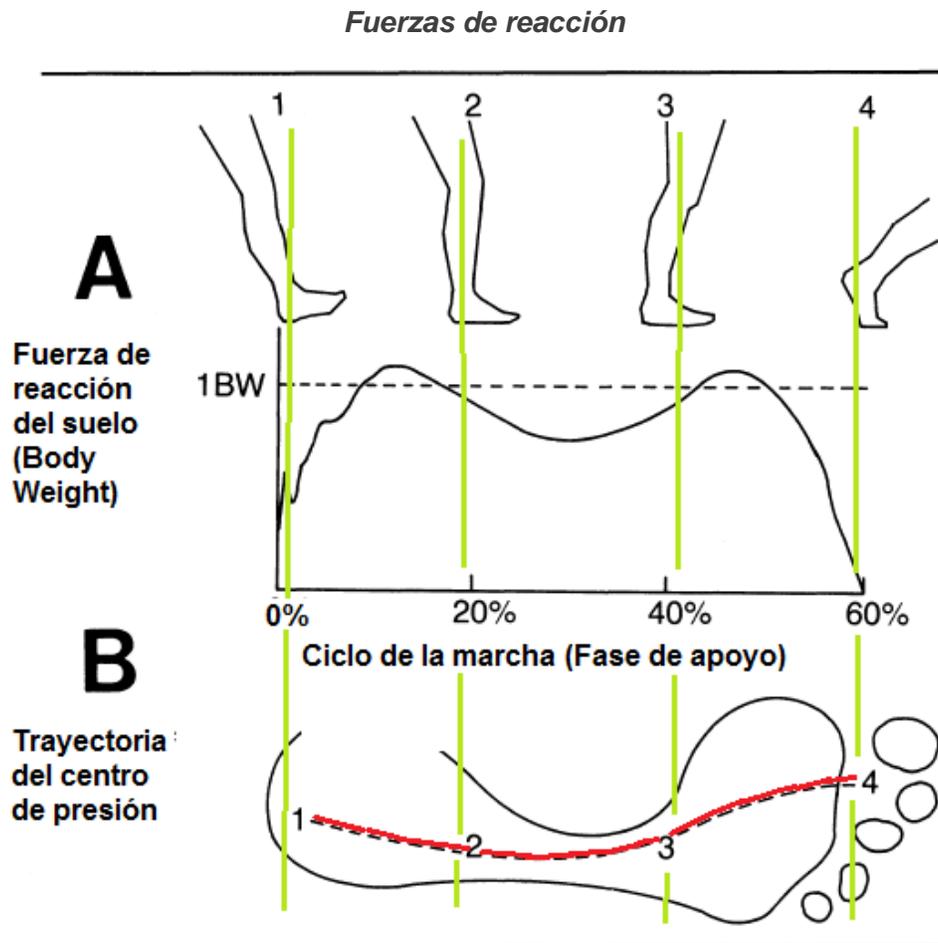
47	0.658	146.5	-0.86	3.55	1.351	0.027	0.96	0.067	0.012	-0.45	
48	0.672	145.8	-0.78	6.31	1.352	0.039	0.86	0.067	0.008	-0.13	
49	0.686	145.2	-0.68	5.50	1.352	0.052	0.88	0.067	0.009	0.13	
50	0.701	144.7	-0.62	1.74	1.353	0.065	0.85	0.068	0.012	0.22	
51	0.715	144.2	-0.63	-2.68	1.354	0.076	0.55	0.068	0.015	0.32	
52	0.729	143.7	-0.70	-5.69	1.355	0.080	0.05	0.068	0.021	0.66	
53	0.744	143.1	-0.80	-7.38	1.356	0.077	-0.32	0.068	0.034	1.25	
54	0.758	142.4	-0.91	-10.45	1.357	0.071	-0.42	0.069	0.056	1.91	
55	0.772	141.6	-1.10	-17.81	1.358	0.065	-0.41	0.070	0.088	2.38	
56	0.786	140.6	-1.42	-28.50	1.359	0.059	-0.42	0.072	0.125	2.38	
57	0.801	139.2	-1.91	-38.25	1.360	0.053	-0.24	0.074	0.156	1.90	
58	0.815	137.4	-2.52	-45.01	1.361	0.053	0.57	0.076	0.179	1.39	
59	0.829	135.1	-3.20	-49.94	1.362	0.069	2.14	0.079	0.196	1.33	
60	0.844	132.2	-3.94	-52.91	1.363	0.114	4.22	0.082	0.217	1.88	
61	0.858	128.6	-4.71	-52.39	1.365	0.190	6.40	0.085	0.250	2.88	
62	0.872	124.5	-5.44	-49.61	1.368	0.297	8.37	0.089	0.300	4.16	
63	0.887	119.7	-6.13	-47.15	1.373	0.429	9.90	0.093	0.369	5.46	
64	0.901	114.4	-6.79	-43.01	1.380	0.580	11.08	0.099	0.456	6.34	
65	0.915	108.6	-7.36	-31.69	1.390	0.746	12.24	0.106	0.550	6.44	
66	0.929	102.4	-7.70	-10.02	1.402	0.930	13.82	0.115	0.640	5.61	
67	0.944	96.0	-7.65	21.54	1.417	1.141	16.00	0.125	0.711	3.93	
68	0.958	89.8	-7.08	60.42	1.434	1.388	18.51	0.135	0.752	1.90	
69	0.972	84.4	-5.92	100.83	1.456	1.671	20.60	0.146	0.754	-1.62	
TOR	70	0.987	80.1	-4.20	133.15	1.482	1.977	21.55	0.157	0.706	-5.36

(continued)

Fuente: Winter, D. (2009). Biomechanics and Motor Control of Human Movement, Fourth edition; John Wiley & Son, Inc. ISBN: 978-0-470-39818-0. Pag. 321-323

Anexo 23.- Trayectoria de presión en el pie

En la fase de apoyo existen tres posturas del pie en las cuales se ejercen diferentes fuerzas.



Fuerzas de reacción del suelo (GRF) debajo del pie al caminar: (A) Gráfico clásico de las GRF verticales durante el ciclo de la marcha (BW = peso corporal; 1= Golpe de talón; 2= Apoyo de planta; 3= media estancia; 4= Despegue). (B) Trayectoria del centro de presión, que representa una serie de centroides instantáneos de las GRF durante la marcha. Fuente: Rodgers, M. (1988). Dynamic Biomechanics of the Normal Foot and Ankle During Walking and Running Volume 68/ Number 12; Physical Therapy, pag. 1825

Anexo 24.- Propiedades del bioplástico PLA

El PLA es un biopolímero con aplicaciones domésticas, médicas y de ingeniería, se obtiene de la fermentación de carbohidratos del maíz y la yuca como el almidón y la celulosa; el proceso de la fermentación se basa en la acción de ciertos microorganismos que producen ácido láctico. Este bioplástico tiene un comportamiento muy similar al PET (tereftalato de polietileno) y también al PP (polipropileno); para la industria 3D es de uso común el PLA, PETG y ABS¹³²

Tabla de las propiedades mecánicas de algunos materiales para impresión 3D

PROPIEDADES	PLA	HDPE ¹³³	PETG ¹³⁴	ABS ¹³⁵
Temperatura de fusión (°C)	188-210	130-136	195-220	200-245
Resistencia a la tracción a la rotura MPa	48	15-40	50	27.6-55.2
Alargamiento por tracción a la rotura %	2.5	>12	120	20
Densidad	1.24	0.94-0.95	1.27	1-1.2

Fuente: elaboración propia con datos tomados de diversas fuentes entre ellas la norma ASTM

Con la manufactura aditiva el producto no obedece a los estándares ya establecidos por las normas ISO las propiedades mecánicas se ven influenciadas por la anisotropía estructural debido al tipo de proceso capa por capa que, de acuerdo a las investigaciones se ha determinado lo siguiente:

- La baja porosidad da como resultado mayores propiedades mecánicas en pruebas estáticas; sin embargo, las propiedades dinámicas mostraron una mayor amortiguación en caso contrario¹³⁶
- A una mayor altura de capa menor resistencia de la pieza
- A un diámetro mayor de la boquilla mejor cohesión de las capas¹³⁷

¹³² Lee, Wan & Rahman (2013) *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics*. 2) Loureiro & Esteves (2019). *In Green Composites for Automotive Applications*. ScienceDirect. Dirección electrónica "sciencedirect.com/topics/engineering/poly-lact-acid"

¹³³ Roca, I. (2005) *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD) (Tesis de licenciatura)*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería Química. Guatemala

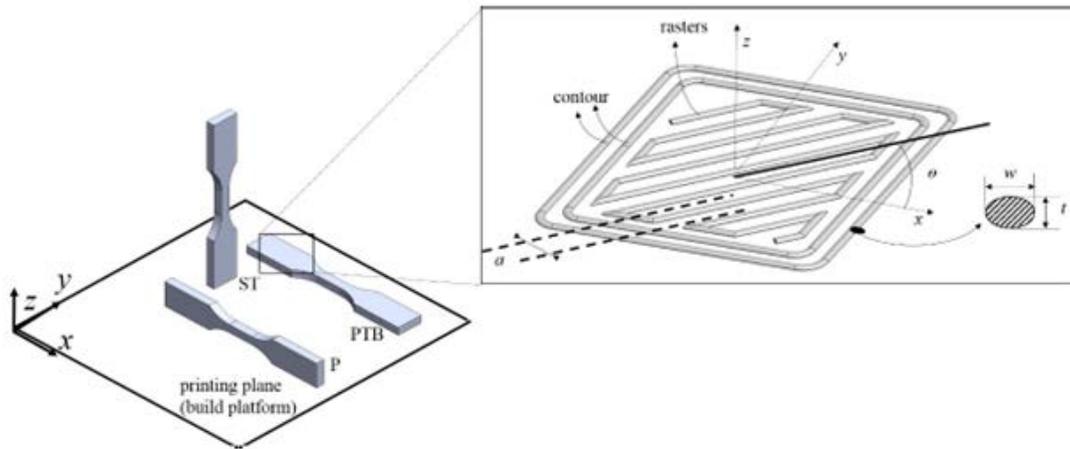
¹³⁴ Normas ASTM

¹³⁵ Portal de la Universidad de Barcelona. Dirección electrónica www.ub.edu

¹³⁶ Cuan-Urquiza, E.; Barocio, E.; Tejada-Ortigoza, V.; Byron, R.; Rodriguez, C.; Roman-Flores, A. (2019). *Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches*. MDPI, *Materials* 2019, 12, 895; doi:10.3390/ma12060895.

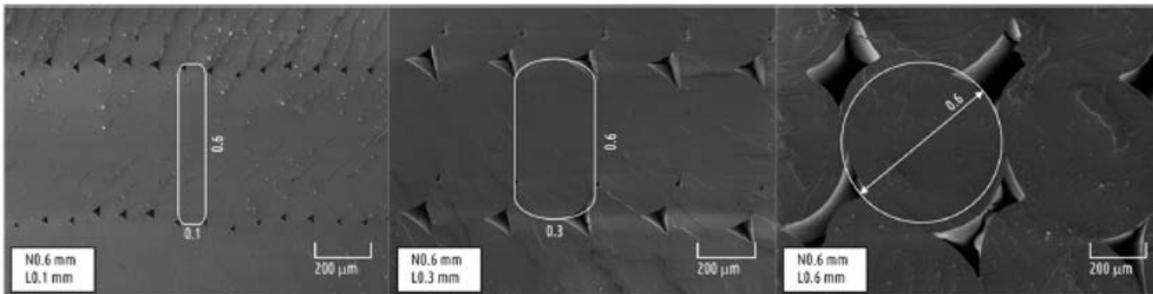
¹³⁷ Kuznetsov, V.; Solonin, A.; Urzhumtsev, O.; Schilling, R.; Tavitov, A. (2018). *Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process*; MDPI; *Polymers* 2018, 10, 313; doi:10.3390/polym10030313

Diferentes tipos de construcción de una probeta para pruebas



Principales parámetros estructurales estudiados en la caracterización mecánica, incluyendo la orientación de impresión, ángulo de trama, número de contornos y sección transversal de trama. (SI = capas transversales, PIB = capas longitudinales y P = capas laterales). Fuente: Cuan-Urquizo. Et al (2019)

Diferentes alturas entre capas



Code	Nozzle Diameter, mm	Layer Thickness, mm	Volumetric Printing Speed, mm ³ /s	Fracture Force ¹ , N	Ultimate Fracture Strength, MPa	Type of Fracture ²
N8L15	0.8	0.15	3	802 (27)	70.7	B
N8L2	0.8	0.2	4	757 (35)	66.8	B
N8L4	0.8	0.4	8	545 (72)	48.1	A
N8L6	0.8	0.6	12	355 (27)	31.3	A
N6L1	0.6	0.1	1.5	771 (17)	68.0	B
N6L15	0.6	0.15	2.2	710 (49)	62.7	B
N6L2	0.6	0.2	3	685 (9)	60.4	B
N6L25	0.6	0.25	3.8	596 (30)	52.6	B
N6L3	0.6	0.3	4.5	573 (51)	50.5	B
N6L35	0.6	0.35	5.2	565 (34)	49.9	B
N6L4	0.6	0.4	6	448 (13)	39.6	A
N6L45	0.6	0.45	6.8	294 (4)	26.0	A
N6L5	0.6	0.5	7.5	229 (21)	20.2	A
N6L6	0.6	0.6	9	207 (12)	18.2	A
N4L06	0.4	0.06	0.6	768 (7)	67.8	B
N4L1	0.4	0.1	1	679 (33)	59.9	B
N4L2	0.4	0.2	2	576 (44)	50.8	B
N4L3	0.4	0.3	3	436 (59)	38.5	B
N4L35	0.4	0.35	3.5	290 (18)	25.6	A
N4L4	0.4	0.4	4	198 (24)	17.5	A

¹ Value in brackets is a standard deviation; ² A—on the interface between layers, B—in the bulk (across the layers).

1 El valor entre paréntesis es una desviación estándar; 2 A — en la interfaz entre capas, B — en general (a través de las capas). Fuente: Kuznetsov. Et al (2018).

Anexo 25.- Análisis de Elementos Finito FEA

El criterio de máxima tensión de Von Mises se basa en la teoría de la energía de distorsión máxima, donde expone que un material dúctil comienza a ceder cuando la tensión de Von Mises es igual al límite de tensión o límite elástico.

En términos de los esfuerzos de tensión principales queda la ecuación:

$$\sigma_{Von\ Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \text{ -----(1)}$$

El software utiliza el límite de tensión de tracción/ruptura¹³⁸

Considerando que el esfuerzo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ -----(2)}$$

Donde F es la fuerza expresada en Newton y A es el área en su sección transversal en mm²

La deformación se calcula con la ecuación:

$$\epsilon = \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \text{ -----(3)}$$

Donde $\Delta s' - \Delta s$ es el cambio de longitud entre la longitud inicial¹³⁹

De la ecuación anterior se toma el cambio de longitud como el desplazamiento

$$\Delta s' - \Delta s \text{ longitud final menos longitud inicial}$$

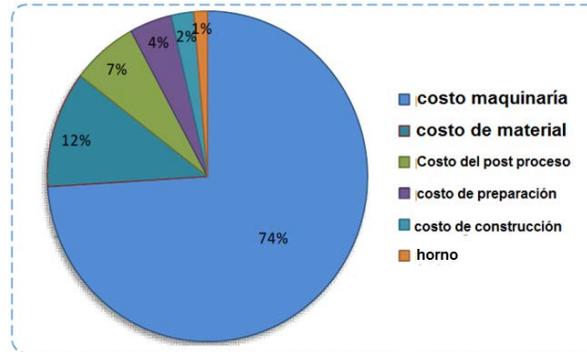
¹³⁸ Obtenido de la página de Dassault Systemes. Help.solidworks.com/2010/spanish/solidworks/cworks/legacyhelp/simulation/checking_stresses/prot_vonm.html.

¹³⁹ Hibbeler, R. (1995) *Mecánica de materiales*; primera reimpresión, editorial CECSA. México.

Anexo 26.- Relación de costos

La siguiente gráfica ilustra aspectos relevantes en cuanto a los principales costos y el porcentaje que representan en la fabricación aditiva.

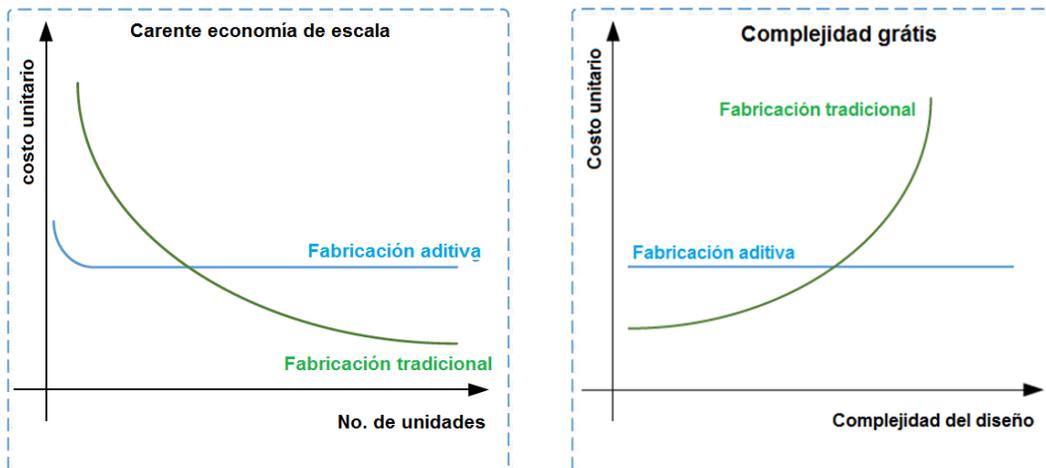
Principales costos de la manufactura aditiva



Fuente: Busachia, Erkoyuncub, Colegrovec, Martinac, Watts & Drake (2017) *A review of additive manufacturing technology and cost estimation techniques for the defence sector*; CIRP Journal Manufacturing Science and Technology, volume 19, November 2017, pag. 117-128. DOI:10.1016/j.cirpj.2017.07.001 de Hopkinson and Dickens (2003). De Lindermann (2012)

Las siguientes gráficas dan una idea de las divergencias que existen entre la manufactura aditiva y la manufactura tradicional respecto al número de unidades y a la complejidad del diseño con respecto al costo unitario.

La manufactura aditiva versus manufactura tradicional



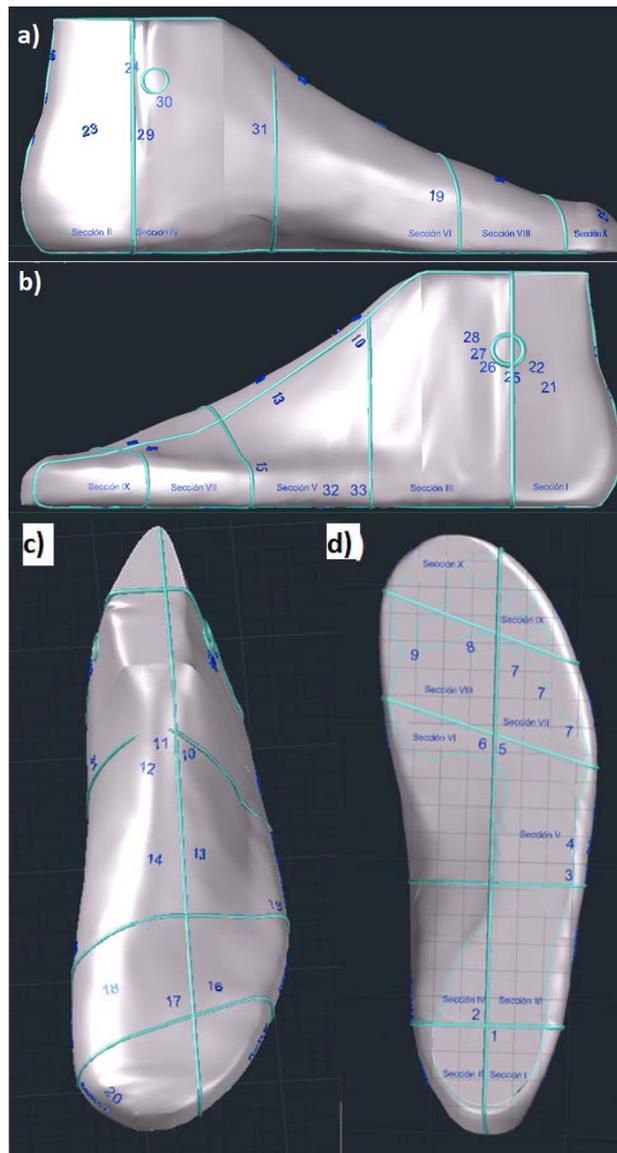
Fuente: Busachia. Et. al (2017)

Apéndice

Apéndice 1.- El modelo virtual del pie izquierdo

Se muestra el modelo virtual del pie como parte complementaria del capítulo VI, en donde sólo aparece la extremidad derecha.

Modelo virtual del pie izquierdo

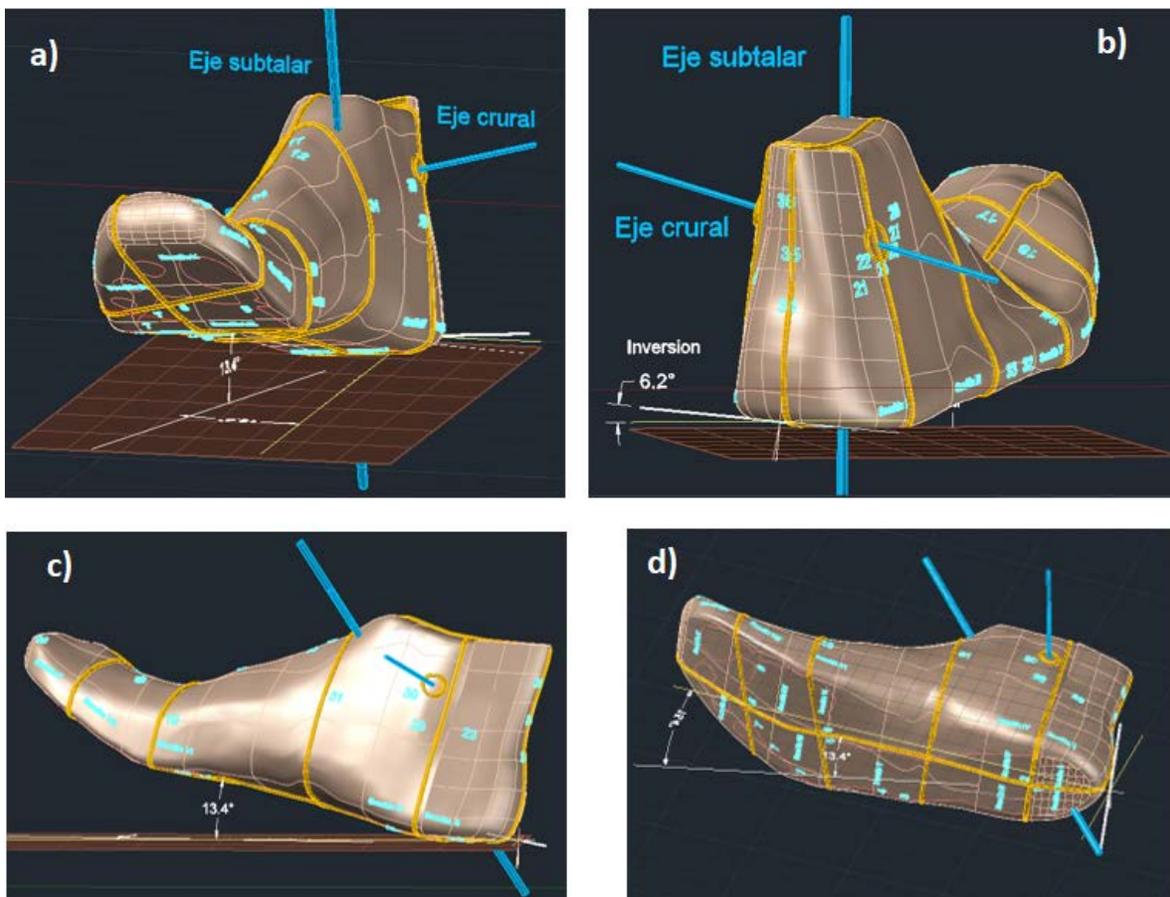


Elaboración propia diseño en autocad 2021 en sus diferentes vistas inciso a) medial, b) lateral, c) superior y d) inferior.

Apéndice 2.-Modelo del pie en la postura “Choque del talón”

El pie dentro de la marcha humana se ve influenciado por dos ejes uno llamado eje crural o del tobillo que permite la flexión hacia arriba o hacia abajo y otro llamado eje subtalar que le proporciona cierta torsión al momento de chocar el talón con el suelo; a continuación, se muestra los dos ejes ejemplificación en el modelo virtual del pie.

Modelo virtual del pie mostrando sus ejes en la postura choque del talón



Elaboración propia, Pie derecho modelado en autocad 2021, considerando sus ejes crural y subtalar; inciso a) vista frontal, b) vista trasera, c) vista medial y d) vista posterior

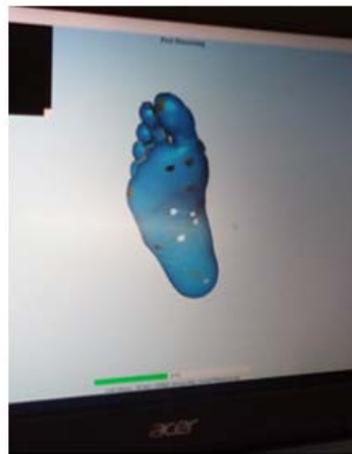
Apéndice 3.- Escaneo del pie

El escaneo en 3D permite modelar al pie e identificar las peculiaridades de su forma.

La preparación para escanear el pie en 3D consiste en:

- 1) Limpiar toda la superficie del pie para evitar algún reflejo de luz
- 2) Realizar algunas marcas clave en el pie para una mejor reconfiguración en el sistema
- 3) Calibrar el escáner a una distancia focal adecuada
- 4) Ajustar el *software* en una resolución adecuada
- 5) Proceder al escaneo del pie en toda su periferia (360°)

Proceso de escaneo del pie en 3D



Sesión de escaneo, las características del equipo son: Marca Shining 3D; 127 V. 4.5 Amp distancia focal de 40 mm con luz estructurada como tecnología.

Apéndice 4.- Mapa de coordenadas en autocad

En el software Autocad se tiene la cualidad de poder encontrar las coordenadas de cada punto involucrado en la horma y cada pareja de puntos pueden ser representados por un vector.

Puntos de control de Autocad

<pre> LINEA Capa: "Vect est 3" Espacio: Espacio modelo Identificador = 2dbef de punto, X= 0.00 Y= 0.00 Z= 0.00 hasta punto, X= 1.30 Y= 0.16 Z= 1.01 En SCP actual, Longitud = 1.31, Ángulo en el plano XY = 7.1 3D Longitud = 1.65, Ángulo del plano XY = 37.8 Incremento X = 1.30, Incremento Y = 0.16, Incremento Z = 1.01 </pre>
<pre> LINEA Capa: "Vect est 3" Espacio: Espacio modelo Identificador = 2dbf0 de punto, X= 0.00 Y= 0.00 Z= 0.00 hasta punto, X= 1.41 Y= 0.16 Z= 0.99 En SCP actual, Longitud = 1.42, Ángulo en el plano XY = 6.5 3D Longitud = 1.73, Ángulo del plano XY = 34.8 Incremento X = 1.41, Incremento Y = 0.16, Incremento Z = 0.99 </pre>
<pre> LINEA Capa: "Vect est 3" Espacio: Espacio modelo Identificador = 2dbf1 de punto, X= 0.00 Y= 0.00 Z= 0.00 hasta punto, X= 1.51 Y= 0.16 Z= 0.95 En SCP actual, Longitud = 1.51, Ángulo en el plano XY = 6.1 3D Longitud = 1.79, Ángulo del plano XY = 32.0 Incremento X = 1.51, Incremento Y = 0.16, Incremento Z = 0.95 </pre>
<pre> LINEA Capa: "Vect est 2" Espacio: Espacio modelo Identificador = 2dbea de punto, X= 0.00 Y= 0.00 Z= 0.00 hasta punto, X= 1.06 Y= 0.59 Z= 1.25 En SCP actual, Longitud = 1.21, Ángulo en el plano XY = 29.1 3D Longitud = 1.74, Ángulo del plano XY = 45.8 Incremento X = 1.06, Incremento Y = 0.59, Incremento Z = 1.25 </pre>
<pre> LINEA Capa: "Vect est 2" Espacio: Espacio modelo Identificador = 2dbec de punto, X= 0.00 Y= 0.00 Z= 0.00 hasta punto, X= 1.39 Y= 0.59 Z= 1.29 En SCP actual, Longitud = 1.51, Ángulo en el plano XY = 23.1 3D Longitud = 1.98, Ángulo del plano XY = 40.5 Incremento X = 1.39, Incremento Y = 0.59, Incremento Z = 1.29 </pre>
<pre> LINEA Capa: "Vect est 2" Espacio: Espacio modelo Identificador = 2dbec de punto, X= 0.00 Y= 0.00 Z= 0.00 hasta punto, X= 1.54 Y= 0.59 Z= 1.15 En SCP actual, Longitud = 1.65, Ángulo en el plano XY = 21.0 3D Longitud = 2.01, Ángulo del plano XY = 34.9 Incremento X = 1.54, Incremento Y = 0.59, Incremento Z = 1.15 </pre>
<pre> LINEA Capa: "Vect est 2" Espacio: Espacio modelo Identificador = 2dbe9 de punto, X= 0.00 Y= 0.00 Z= 0.00 hasta punto, X= 1.62 Y= 0.59 Z= 0.98 En SCP actual, Longitud = 1.72, Ángulo en el plano XY = 20.0 3D Longitud = 1.98, Ángulo del plano XY = 29.7 Incremento X = 1.62, Incremento Y = 0.59, Incremento Z = 0.98 </pre>

Elaboración propia con datos obtenidos de los puntos de control en autocad 2021

Puntos de control de Autocad continuación

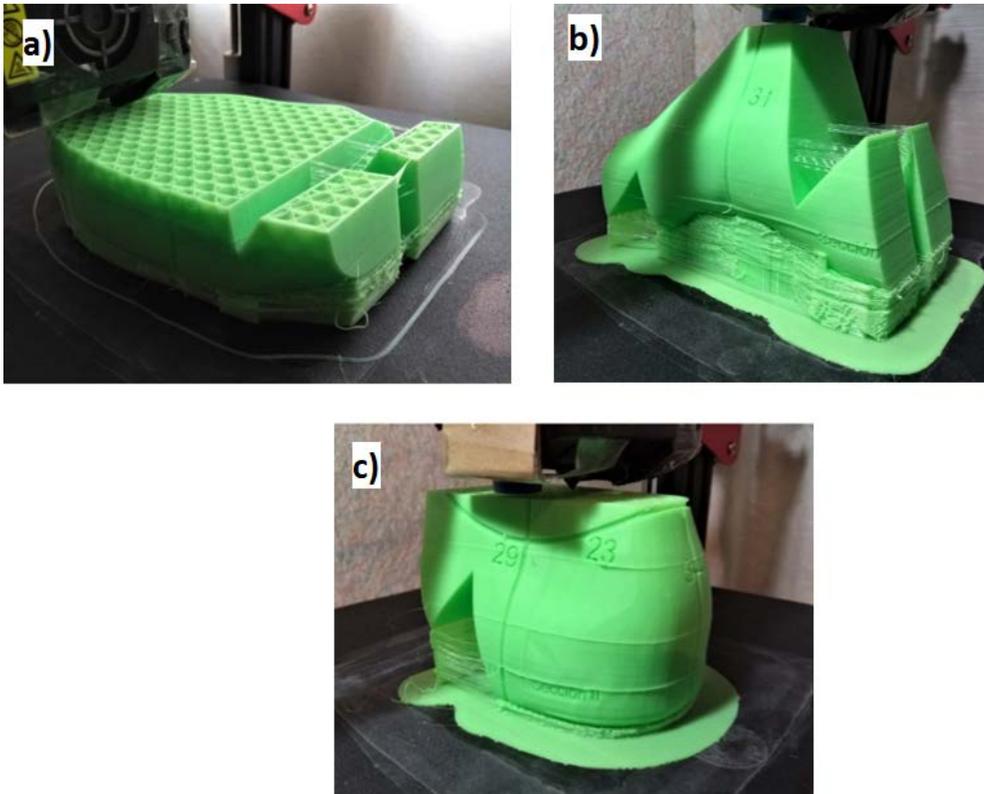
LINEA	Capa: "Vect est 1"
	Espacio: Espacio modelo
	Identificador = 2dbf2
de punto, X=	0.00 Y= 0.00 Z= 0.00
hasta punto, X=	1.01 Y= 1.02 Z= 1.13
En SCP actual, Longitud =	1.44, Ángulo en el plano XY = 45.2
	3D Longitud = 1.83, Ángulo del plano XY = 38.2
	Incremento X = 1.01, Incremento Y = 1.02, Incremento Z = 1.13
LINEA	Capa: "Vect est 1"
	Espacio: Espacio modelo
	Identificador = 2dbf3
de punto, X=	0.00 Y= 0.00 Z= 0.00
hasta punto, X=	1.15 Y= 1.02 Z= 1.15
En SCP actual, Longitud =	1.54, Ángulo en el plano XY = 41.5
	3D Longitud = 1.92, Ángulo del plano XY = 36.8
	Incremento X = 1.15, Incremento Y = 1.02, Incremento Z = 1.15
LINEA	Capa: "Vect est 1"
	Espacio: Espacio modelo
	Identificador = 2dbf4
de punto, X=	0.00 Y= 0.00 Z= 0.00
hasta punto, X=	1.27 Y= 1.02 Z= 1.11
En SCP actual, Longitud =	1.63, Ángulo en el plano XY = 38.7
	3D Longitud = 1.97, Ángulo del plano XY = 34.2
	Incremento X = 1.27, Incremento Y = 1.02, Incremento Z = 1.11
LINEA	Capa: "Vect est 1"
	Espacio: Espacio modelo
	Identificador = 2dbf5
de punto, X=	0.00 Y= 0.00 Z= 0.00
hasta punto, X=	1.35 Y= 1.02 Z= 1.03
En SCP actual, Longitud =	1.69, Ángulo en el plano XY = 37.0
	3D Longitud = 1.98, Ángulo del plano XY = 31.4
	Incremento X = 1.35, Incremento Y = 1.02, Incremento Z = 1.03
LINEA	Capa: "vectores diná"
	Espacio: Espacio modelo
	Identificador = 2dc4b
de punto, X=	0.00 Y= 0.00 Z= 0.00
hasta punto, X=	1.09 Y= 1.34 Z= 1.12
En SCP actual, Longitud =	1.72, Ángulo en el plano XY = 50.9
	3D Longitud = 2.05, Ángulo del plano XY = 33.0
	Incremento X = 1.09, Incremento Y = 1.34, Incremento Z = 1.12
LINEA	Capa: "vectores diná"
	Espacio: Espacio modelo
	Identificador = 2dc4c
de punto, X=	0.00 Y= 0.00 Z= 0.00
hasta punto, X=	1.27 Y= 1.33 Z= 1.13
En SCP actual, Longitud =	1.84, Ángulo en el plano XY = 46.3
	3D Longitud = 2.16, Ángulo del plano XY = 31.6
	Incremento X = 1.27, Incremento Y = 1.33, Incremento Z = 1.13
LINEA	Capa: "vectores diná"
	Espacio: Espacio modelo
	Identificador = 2dc4d
de punto, X=	0.00 Y= 0.00 Z= 0.00
hasta punto, X=	1.45 Y= 1.28 Z= 1.10
En SCP actual, Longitud =	1.94, Ángulo en el plano XY = 41.5
	3D Longitud = 2.23, Ángulo del plano XY = 29.7
	Incremento X = 1.45, Incremento Y = 1.28, Incremento Z = 1.10
LINEA	Capa: "vectores diná"
	Espacio: Espacio modelo
	Identificador = 2dc4e
de punto, X=	0.00 Y= 0.00 Z= 0.00
hasta punto, X=	1.58 Y= 1.19 Z= 1.01
En SCP actual, Longitud =	1.98, Ángulo en el plano XY = 36.9
	3D Longitud = 2.22, Ángulo del plano XY = 27.1
	Incremento X = 1.58, Incremento Y = 1.19, Incremento Z = 1.01

Elaboración propia con datos obtenidos de los puntos de control en autocad 2021

Apéndice 5.- Producción de la horma por FDM

Las condiciones para la fabricación de las partes componentes de la horma fueron: altura de capa de 0.2 mm, el espesor de la pared de 0.8 mm, la densidad de relleno 20% de aspecto cúbico, una boquilla de 0.4 mm y una velocidad de deposición de 50 mm/s.

Producción de las partes que componen a la horma



Elaboración propia, producción de las partes que componen a la horma; en el inciso a) parte delantera, b) parte media y c) parte trasera de la horma.

La siguiente tabla muestra los datos obtenidos del software Cura

Tabla resumen de los insumos teóricos consumidos

	Parte delantera	Parte media	Parte trasera
Tiempo	18 hr 6 min	20 hr 3 min	13 hr 26 min
Cantidad PLA	142.65 gr	183.21 gr	129.62 gr
Longitud PLA	47.87 m	61.48 m	43.498 m

Elaboración propia datos obtenidos de Cura 4.8.0.