



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Medición de la deformación en piel
humana utilizando correlación de
imágenes digitales**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A N

Jonathan David López Lugo

Jorge Alejandro Benítez Martínez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Carlos Alberto Palacios Morales



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



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

En estas líneas nos gustaría agradecer a las instituciones y personas que nos brindaron su apoyo y ayuda para la realización de este trabajo.

Primero quisiéramos agradecer al Instituto Nacional de Rehabilitación Guillermo Ibarra Ibarra, en especial al Laboratorio de Ingeniería de Rehabilitación por permitirnos hacer uso de sistema Aramis 5 LMT, así como el uso del equipo de computo en el laboratorio. También quisiéramos agradecer al laboratorio de tejido conjuntivo de la Unidad de Quemados del INR y al Dr. Gerardo Leiva por permitirnos el uso del cutómetro.

Agradecemos a la Dra. Michelin Álvarez Camacho y al Dr. Carlos Alberto Palacios Morales por la asesoría para la realización de esta tesis.

Igualmente expresamos nuestra gratitud al Dr. Francisco Manuel Sánchez Arévalo del Laboratorio de mecánica y micro-mecánica de sólidos en el Instituto de Investigaciones en Materiales por el espacio de trabajo en su laboratorio y el trabajo de orientación en esta tesis. A la Universidad Nacional Autónoma Nacional de México por brindarnos una educación de calidad y el gran acervo bibliográfico que nos permitió consultar.

Por ultimo quisiéramos agradecer el apoyo de nuestras familias quienes fueron muy importantes para la conclusión exitosa de este trabajo.

Índice general

Agradecimientos

Resumen

Introducción

Objetivos

1. Marco teórico	1
1.1. Piel humana	1
1.2. Rango de movimiento articular y contractura por quemaduras	2
1.3. Técnicas de medición	2
1.3.1. Fotografía	4
1.3.2. Tensión o tracción	5
1.3.3. Torsión	6
1.3.4. Indentación	7
1.3.5. Succión	7
1.4. Correlación de Imágenes Digitales	11
1.4.1. Principio de Operación	11
1.4.2. Preparación de la superficie	11
1.4.3. Toma de imágenes del muestreo	13
1.4.4. Principio de obtención de datos	13
2. Metodología y técnica experimental	17
2.1. Correlación de Imágenes Digitales	17
2.1.1. Volumen y calibración	18
2.1.2. Análisis factorial	20
2.1.3. Dispositivo de posicionamiento	23
2.1.4. Preparación	27

ÍNDICE GENERAL

2.1.5. Movimientos de mano y antebrazo para las mediciones con CID	37
2.2. Cutómetro	47
2.2.1. Descripción del experimento.	47
2.2.2. Preparación	48
2.2.3. Adquisición de datos	50
2.2.4. Manejo de datos	52
3. Resultados	57
3.1. Análisis Factorial	58
3.2. Análisis FEM de dispositivo auxiliar	66
3.3. Campos de desplazamiento	67
3.3.1. Flexión de articulación metacarapofalángica	67
3.3.2. Puño compuesto	67
3.3.3. Flexión y Extensión de muñeca	67
3.4. Deformación	69
3.5. Perfiles k , γ y δ	72
4. Discusión y Conclusiones finales	75
4.1. Análisis Factorial	75
4.2. Campos de desplazamiento y deformación	76
4.3. Parámetros k , γ y δ	77
A. Medición de sujetos	79
B. Método de tangentes	81

Resumen

Se sabe que la piel es el órgano que nos protege del ambiente y puede sufrir daños por diferentes mecanismos; térmico (quemaduras), mecánico (cortes) o químico que pueden dañarnos gravemente. En ocasiones, sin embargo este órgano se ve afectado de manera grave y su mecanismo de reparación no resulta suficiente para sanar la herida; específicamente las quemaduras, si ocurren en un área relativamente grande, necesitan de la intervención médica para ayudarla a sanar. Para este fin se colocan cubiertas dérmicas, injertos o andamios. Aún así, la piel no vuelve a su estado original y pueden presentarse contracturas, zonas de piel muy rígida que no permite el movimiento.

En el presente trabajo se abordó el tema de la medición del comportamiento de la piel del antebrazo y mano al realizar algunos movimientos articulares, debido a que las manos son las zonas con mayor índice de quemaduras.

Se mostrarán dos técnicas para obtener el comportamiento de la piel, la técnica de correlación de imágenes (CID) digitales y la técnica de succión con Cutómetro. La CID es una técnica óptica que permite observar y medir el desplazamiento y deformación de una superficie en pruebas dinámicas. Y el Cutómetro aplica una presión negativa por un pequeño orificio a la superficie de la piel y registra la altura que alcanza la columna de piel a lo largo de varios ciclos en el tiempo.

Para comprobar la repetitividad de las mediciones con la CID se realizó un análisis factorial para determinar las variables más importantes que pudieran afectar el experimento como el control del movimiento, el tipo de preparación del patrón aleatorio. Como consecuencia de los resultados del análisis factorial se diseñó un dispositivo para auxiliar en el posicionamiento de los sujetos y limitar los rangos de movimiento para la medición con CID. Éste dispositivo auxiliar se sometió a un análisis por elementos finitos antes de ser desarrollado y se presentarán los resultados más relevantes de éste. De la técnica CID se obtuvieron campos de deformación y desplazamiento

Resumen

de la piel donde se identificaron patrones y zonas de mayor importancia en el movimiento de la articulación.

La prueba de succión se realizó en el antebrazo y mano en puntos distribuidos uniformemente, de la que se obtuvieron curvas de altura-tiempo para cada uno. Con estas curvas se obtuvieron tres diferentes parámetros.

Los resultados se mostraron como un perfil de punto sobre las superficies del antebrazo en supinación, posición del antebrazo con la palma de la mano viendo hacia el cielo, y pronación, posición del antebrazo con la palma de la mano viendo hacia el piso.

Con estos datos se muestra la caracterización general que podrá ser usada en un futuro para sujetos quemados.

Introducción

Las quemaduras son lesiones a la piel u otro tejido orgánico causadas principalmente por la transferencia aguda de energía (mecánica, térmica, eléctrica, química, radiación) que genera, de forma local, zonas de hiperemia, estasis, necroptosis, así como también una respuesta inflamatoria sistémica que busca detener y reparar dicho daño(Moctezuma-Paz et al., 2015).

Las quemaduras se encuentran entre las principales causas de pérdida de años de vida ajustados en función de la discapacidad en los países de ingreso bajo y mediano.Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) las quemaduras constituyen un problema de salud pública a nivel mundial y provocan alrededor de 265 000 muertes al año, de las cuales la mayoría se produce en los países de ingreso bajo y mediano.

En 2004, casi 11 millones de personas de todo el mundo sufrieron quemaduras lo suficientemente graves para requerir atención médica.En México el Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica, de la Dirección General de Epidemiología de la Secretaria de Salud, reportó que durante el periodo comprendido del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011 se quemaron 262 305 personas, en el año 2013 se reportaron 126 786 nuevos casos por quemaduras y de enero a junio de 2014 hubo 65 182 casos de quemaduras. De dichas quemaduras 56 % sucedieron en adultos de 20 a 50 años de edad y 32 % en niños de 0 a 19 años de edad.A escala nacional 93 % de todos los pacientes quemados fueron atendidos en hospitales públicos(Moctezuma-Paz et al., 2015).

Introducción

La atención médica del paciente quemado es muy costosa por los gastos pre-hospitalarios y hospitalarios (incluyendo los costos de la biotecnología consumible, estudios paraclínicos, medicamentos, nutrición, etcétera). Se ha estimado que los costos por paciente varían de 30 mil a 499 999 pesos en casos de severidad leve sin disfunción orgánica, de 500 mil a 5 millones de pesos en casos de severidad moderada (con o sin disfunción orgánica) y de 5 a 40 millones en casos severos (con o sin falla orgánica múltiple)(Paz et al., 2012).

Es por eso que en el Centro Nacional de Investigación y atención a los quemados (CENIAC) surgió la necesidad de evaluar la deformación y desplazamiento, de una forma cuantitativa, de la piel al realizar distintas sollicitaciones dinámicas, para identificar diferencias entre piel sana y piel con secuelas de cicatrices por quemaduras.

En esta tesis se presenta el trabajo realizado de una novedosa técnica para medir campos de deformación y desplazamiento de la piel del antebrazo y mano en sujetos sanos. En el capítulo uno se presenta una revisión de las técnicas que se han aplicado para el estudio de la piel. En el capítulo dos se presenta el montaje de la técnica experimental para la medición de deformaciones y desplazamiento *in situ* de la piel mediante la técnica de Correlación de Imágenes Digitales (CID), así como la deformación de la piel mediante la técnica de succión. En el capítulo tres se presentan los resultados obtenidos del uso de la técnica CID y de la técnica de succión y por último se comparan los resultados obtenidos en estas trabajos con la literatura.

Objetivos

- Montar la técnica de Correlación de Imágenes Digitales (CID) para el estudio de la deformación en antebrazo y mano.
- Medir los desplazamientos y deformaciones *in situ* del antebrazo y dorso de la mano durante la solicitud dinámica de los movimientos de flexión metacarpofalángica, puño compuesto, flexión de muñeca y extensión de muñeca asistida.
- Utilizar un dispositivo de succión utilizado clínicamente como complemento del análisis de la piel.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1. Piel humana

La piel es un órgano que en condiciones normales está constituida por tres capas (Figura 1.1) de diferente grosor y composición que en conjunto le proporcionan ciertas características mecánicas que permiten el movimiento articular. Sin embargo cuando ésta sufre quemaduras o alguna condición que requiera una reparación de gran escala, el rango de movilidad puede reducirse debido a que las características mecánicas del tejido cicatrizante cambian.

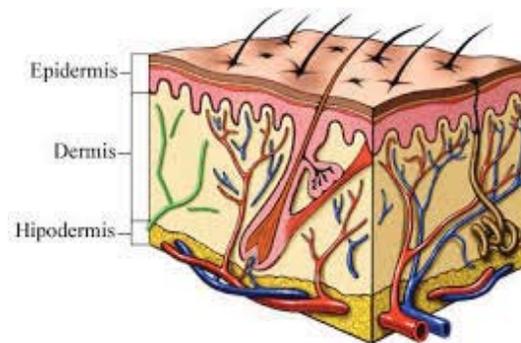


Figura 1.1: Capas de la piel.¹

¹<https://www.cancercarewny.com/content.aspx?chunkiid=121166>, Abril 2017.

2 Marco teórico

1.2. Rango de movimiento articular y contractura por quemaduras

De acuerdo con Richard et al. (2009), las principales zonas de contractura y sus movimientos asociados se mencionan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Áreas probadas y contracturas de cicatriz asociadas a quemaduras.

Torso y cuello anterior	Flexión de cuello
Pliegue axilar y torso anterior	Aducción de hombro
Pliegue axilar y torso posterior	Extensión de hombro
Brazo anterior	Flexión de codo
Parte ventral del antebrazo	Flexión de muñeca
Parte dorsal de la mano	Flexión metacarpofalángica
Parte dorsal de los dedos	Extension interfalángica

De acuerdo con las estadísticas de la OMS mencionadas anteriormente y a los resultados de Richard. En esta tesis se estudiaron los movimientos de flexión metacarpofalángica, puño compuesto, flexión de muñeca y extensión de muñeca para analizar la región ventral y dorsal del antebrazo, así como región dorsal de la mano, en sujetos aparentemente sanos. En la siguiente sección se hace un resumen de las técnicas que se han utilizado para medir propiedades y observar el comportamiento mecánico de la piel *in vivo*.

1.3. Técnicas de medición

En la literatura existen diferentes autores que han tratado de registrar el comportamiento en regiones de la piel con diferentes condiciones de movimiento.

Richard et al. (2009), utilizó fotografía de doble exposición antes y después de realizar movimientos articulares para determinar las zonas de reclutamiento de piel y definir unidades funcionales por articulación.

Wilson et al. (2015), utilizó correlación de imágenes digitales para evaluar de forma dinámica el efecto de la toxina botulínica aplicada en la cara.

Staloff et al. (2008), estudió el desplazamiento de la piel de la cara y la dis-

tribución de la fuerza para conocer el mecanismo de formación de arrugas. Maiti et al. (2016), analizaron tomografía de coherencia óptica y correlación de imágenes digitales para estudiar los cambios de la piel provocados por movimiento articular.

Sin embargo las técnicas que se han usado no permiten reproducir del todo las regiones de deformación, desplazamiento o bien la diferencia en características mecánicas entre piel sana y piel con cicatrices al realizar movimientos articulares en el rango de movimiento normal de una articulación. Por lo que al revisar las técnicas que se han aplicado para la evaluación mecánica de la piel, nos permitió tener un panorama global de los modelos obtenidos hasta ahora, con el cual se puede proponer un método alternativo para medir el comportamiento mecánico de la piel bajo condiciones dinámicas naturales. Esta información puede ser útil para evaluar el tratamiento en quemaduras de la piel del antebrazo y mano.

En la Tabla 1.2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos por diversos autores utilizando las técnicas de medición durante el movimiento articular. Los resultados arrojan el porcentaje de deformación y compresión. Estas técnicas no permiten la caracterización mecánica. Por que se han probado otras técnicas para obtener el módulo de Young.

Tabla 1.2: Resumen de artículos con técnicas de CID Y Fotografía

Autor	Zona	Técnica	Resultados
Wilson et al. (2015)	Cara	CID	Deformaciones en Glabella Compresión Vertical de 1.15-2.51 %, Compresión Horizontal de 2.6-9.11 % , en Frente Compresión Vertical de 1.67-6.73 % , Compresión Horizontal de 0.83-4.83 %
Richard et al. (2009)	Antebrazo y mano	Fotografía	Porcentaje de piel reclutada por sujetos en distintos movimientos articulares
Evans and Holt (2009)	Antebrazo	CID	Se comparó con el modelo de Ogden con la realidad y se observó un error debido a la anisotropía del material y la aproximación del modelo
Maiti et al. (2016)	Antebrazo	CID	Se obtuvieron valores de deformación de 5.6 % en el eje X y 23.3 % en el eje Y

4 Marco teórico

En la Tabla 1.3 se muestran algunos valores reportados para el módulo de Young de la piel.

Tabla 1.3: Mediciones *in vivo* del módulo de elasticidad para la piel.

Autor	Zona	Valor del módulo elástico	Técnica
Agache et al. (1980)	Región dorsal del antebrazo	0.42-0.85 MPa	Torsión
Delalleau et al. (2008)	Antebrazo	0.35-0.5 MPa	Tensión
Pailler-Mattei et al. (2008)	Antebrazo	0.0045-0.008 MPa	Identación
Boyer et al. (2012)	Región ventral del antebrazo	0.0062-0.014 MPa	Succión
Diridollou et al. (2000)	Antebrazo	0.041-0.22 MPa	Succión
PANISSET (1992) y Agache et al. (1992)	Región ventral del antebrazo	0.25 MPa	Succión

A continuación se describe cada una de las técnicas presentadas en la tabla anterior.

1.3.1. Fotografía

Para obtener la cantidad de piel requerida para un movimiento funcional se ha utilizado la fotografía como herramienta para observar sus cambios (Richard et al., 2009). El procedimiento empleado consiste en colocar marcas distribuidas uniformemente sobre la superficie de la piel en posición neutral (posición humana de referencia). Posteriormente se coloca la persona en la posición inicial y se toma una fotografía, después se toma una fotografía en la posición designada como final con la técnica de doble exposición para

traslapar las dos posiciones en una sola fotografía. (Agache et al., 1980). Ésta permite medir el desplazamiento de las marcas e identificar las zona de reclutamiento² más alejada a la articulación en movimiento y se construye una gráfica donde se muestra la zona más alejada que sufre desplazamiento como se muestra en la Figura 1.2.

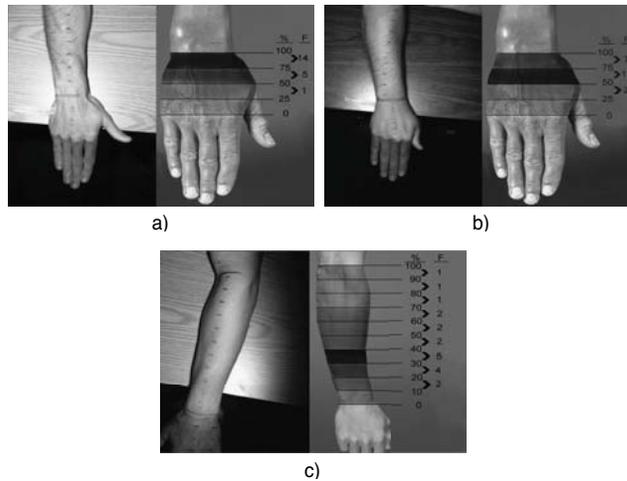


Figura 1.2: a) Fotografía de flexión de articulación metacarpofalángica. b) Fotografía de puño compuesto. c) Fotografía de flexión de muñeca. Todas las fotografías fueron con doble exposición, en la imagen de la izquierda se pueden observar las marcas distribuidas a lo largo de la mano y antebrazo. En la imagen de la derecha se muestran las secciones de reclutamiento con diferentes tonos de gris que indican el numero de las personas que reclutaron piel desde esa sección. Richard et al. (2009)

1.3.2. Tensión o tracción

Las pruebas de tensión en la piel se realizan con el mismo principio de los ensayos de tracción en probetas metálicas o poliméricas. Ya que las prueba se realiza in situ, no es posible contar con una probeta, por lo que se colocan dos dispositivos de sujeción en el antebrazo con una separación conocida entre ellos. En la prueba se aplica una fuerza de tracción en los dispositivos de sujeción como se muestra en la Figura 1.3 y el desplazamiento se hace a velocidad constante (Delalleau et al., 2008). Los extremos cuentan con galgas extensométricas la curva esfuerzo-deformación σ - ϵ y se calcula el módulo de Young de la piel.

²Región de la cual se empieza a reclutar la piel para permitir el movimiento articular

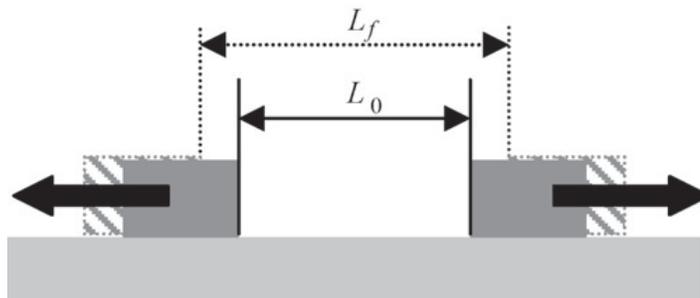


Figura 1.3: Diagrama de la prueba de tensión. Delalleau et al. (2008)

1.3.3. Torsión

Las pruebas de torsión se realizan con reómetros o con discos acoplados a motores, la prueba consiste en colocar un disco sobre la piel y hacerlo girar algunos grados (2° - 6°) con un par conocido. Se analiza la deformación resultante y la relajación (Agache et al., 1980) de la piel para obtener el módulo de corte. Estas pruebas se realizan en un ambiente controlado y es necesaria una preparación superficial de la zona. El antebrazo se rasura y se realiza una limpieza para quitar lípidos y células residuales (Leveque et al., 1980).

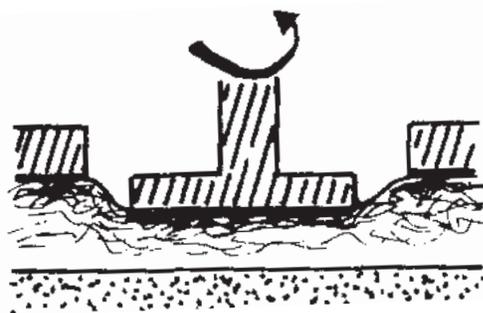


Figura 1.4: Diagrama de la prueba de torsión. Leveque et al. (1980)

1.3.4. Indentación

La indentación permite obtener propiedades mecánicas en dirección normal a la superficie sin pre-tensionar la piel antes de la prueba (Pailler-Mattei et al., 2008). Se coloca un indentador cónico en contacto con la piel y se desplaza una distancia δ con una fuerza F a velocidad constante. La profundidad máxima de penetración se fija de acuerdo al espesor promedio de las capas internas de la piel que se propongan tomar en cuenta. Los datos de fuerza contra el desplazamiento derivan en el parámetro K de rigidez con el que posteriormente se calcula el módulo de Young.



Figura 1.5: Prueba de indentación en antebrazo movilizado. Delalleau et al. (2006)

1.3.5. Succión

La técnica de succión consiste en aplicar un esfuerzo normal sobre la piel a través de un tubo por el que se genera una presión negativa.

En el mercado existe un instrumento conocido Cutómetro (Cutometer) que mide la deformación de la piel cuyo principio de operación está basado en esta técnica.

Una prueba típica de succión consiste en el aumento de presión y mantenerla algún tiempo hasta alcanzar un estado estable; aunque también pueden realizarse pruebas con presión variable (Diridollou et al., 2000). La respuesta típica de esta prueba se muestra en la Figura 1.6, la cual muestra el desplazamiento en mm aplicado sobre la piel en función del tiempo.

8 Marco teórico

A partir de este comportamiento se definen varios parámetros para evaluar el estado de la piel, los cuales son utilizados por los dermatólogos actualmente; éstos parámetros se han correlacionado con la edad de los sujetos, el uso de cremas, tratamientos enfermedades de la piel, etc. Cabe destacar que a pesar de que sean parámetros muy utilizados, su origen es empírico y no hay en la literatura algún estudio que relacione éstos con alguna propiedad mecánica (Huang and Zheng, 2015).

Tabla 1.4: Parámetros definidos por el fabricante y usados clínicamente

Parámetros relativos	Parámetros absolutos	Definición
	U_e	Deformación inmediata
	U_v	Deformación viscoelástica: Plasticidad
	U_r	Retracción inmediata
R_0	U_f	Deformación final: Distensión
R_1	$U_f - U_a$	Mínima deformación: Extensión
R_2	U_a / U_f	Elasticidad burda
R_3	Comparación entre la primera y última amplitud máxima	Cambio en máxima amplitud con deformación sucesiva
R_4	Comparación entre la primera y última amplitud mínima	Cambio en mínima amplitud con deformación sucesiva
R_5	U_r / U_e	Elasticidad pura
R_6	U_v / U_e	Proporción entre la deformación retrasada y la inmediata
R_7	U_r / U_f	Elasticidad biológica
R_8	U_a	Retracción final
R_9	$R_3 - R_0$	última amplitud máxima menos deformación máxima

Debido a que los parámetros mencionados en la Tabla 1.4 no han podido ser relacionados con propiedades mecánicas y además no consideran la presión aplicada, se definen 3 parámetros para presión constante en varios ciclos:

$$k = \frac{P_{min}}{d_1} \quad (1.1)$$

$$\delta = \frac{d_1}{d_0} \quad (1.2)$$

$$\gamma = \frac{d_n - d_1}{d_1} \quad (1.3)$$

donde k es un parámetro similar al obtenido en una prueba de indentación, e indica cómo se deforma la piel bajo cierta presión, δ y γ son parámetros del grado de cedencia que presenta la piel en 1 y n ciclos respectivamente, d_0 , d_1 y d_n se obtuvieron de la Figura 1.7 (Huang and Zheng, 2015).

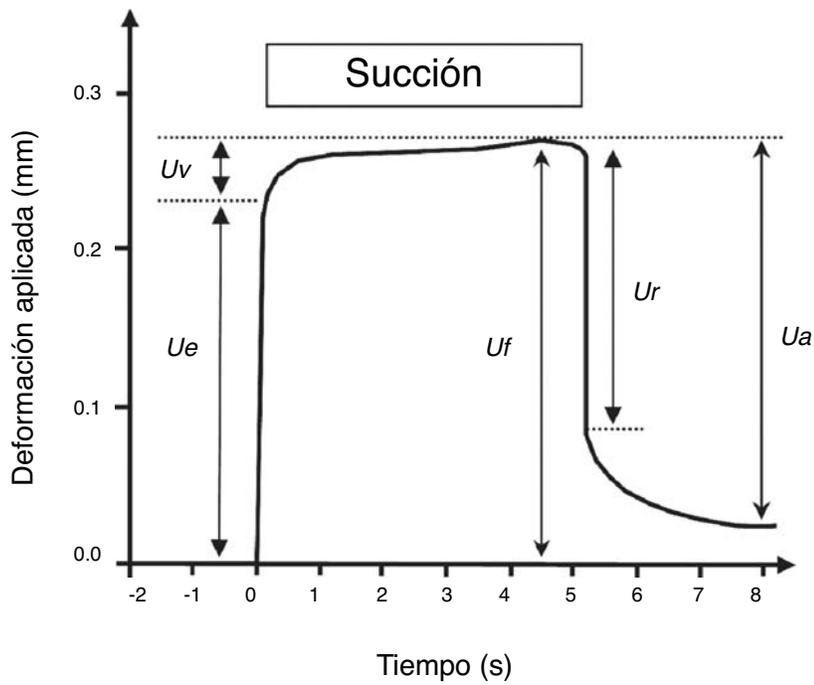


Figura 1.6: Curva típica de la prueba de succión. Donde U_e Elasticidad, U_v Viscoelasticidad, U_f Extensión máxima de la piel, U_r Retracción, U_a Flexibilidad. Huang and Zheng (2015)

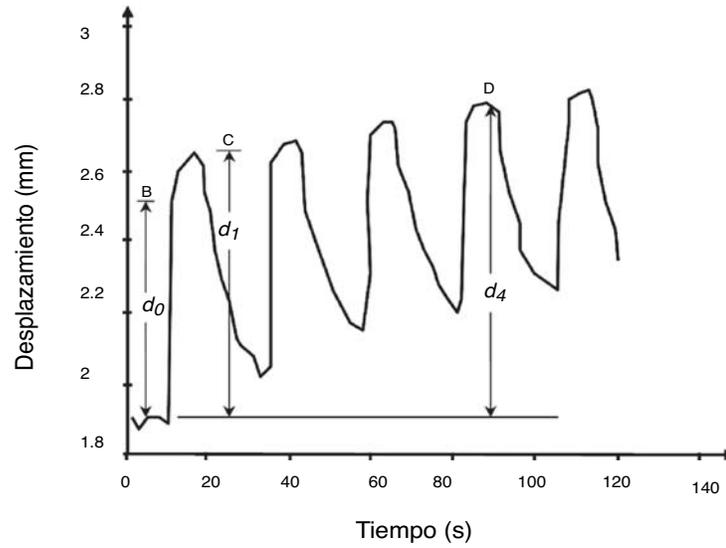


Figura 1.7: Curva típica con varios ciclos de succión. Huang and Zheng (2015)

En la siguiente sección se hace una descripción detallada del método de Correlación de Imágenes Digitales.

1.4. Correlación de Imágenes Digitales

1.4.1. Principio de Operación

La técnica de Correlación de Imágenes Digitales(CID) permite la obtención del campo de desplazamiento y deformación de una superficie plana o curva. La técnica compara una imagen de referencia (superficie sin deformar) con los estados de superficie deformada. Esta técnica puede ser utilizada tanto en bi-dimensional (2D, con una sola cámara) como tridimensional (3D, con dos o más cámaras)(Palanca et al., 2016). En este trabajo se utiliza el proceso que da la vista en tres dimensiones. En la tabla 1.5 se presentan algunas ventajas y desventajas del uso de la técnica.

Tabla 1.5: Ventajas y Desventajas del uso de CID. Palanca et al. (2016)

Ventajas	Desventajas
Estudio in vivo	Estudio en tiempo no real
Método no invasivo	Limitación en el campo de visualización
Campo completo de medición de desplazamiento y deformación	Control de parámetros en la medición
Aplicable a cualquier material sólido	Requiere preparación previa de la superficie a analizar

El sistema de medición consiste principalmente en dos cámaras, un sistema de iluminación, tarjetas de calibración, equipo de sincronización y adquisición de datos.

En la técnica de CID existen tres pasos principales los cuales son:

1. Preparación de la superficie.
2. Toma de imágenes del muestreo.
3. Principio de obtención de datos.

1.4.2. Preparación de la superficie

La preparación de la superficie y la iluminación son factores importante en el uso de la técnica de CID, ya que de esto depende si los resultados que

12 Marco teórico

arroja el análisis son por las condiciones de carga real aplicada o por una mala preparación o una mala iluminación de la superficie a analizar, debido a que el equipo detecta los píxeles de cada una de las imágenes capturadas mediante la preparación del patrón estocástico blanco/ negro en escala 50:50.

Para un mejor uso de la técnica, la superficie de interés debe contar con un patrón estocástico que se deforme conjuntamente con la misma; además, debe haber un alto contraste en la preparación y que la superficie sea de color mate, para no generar brillos que afecten la visualización de las cámaras. Para determinar cómo debe de ser el patrón estocástico, se tiene que conocer las dimensiones de la muestra a analizar. Con base en esto, se puede tomar de referencia los patrones de preparación para diferentes tamaños contenidos en el manual de usuario del equipo (GOM, 2011), de esta manera, se prepara la superficie de la muestra de una forma adecuada.

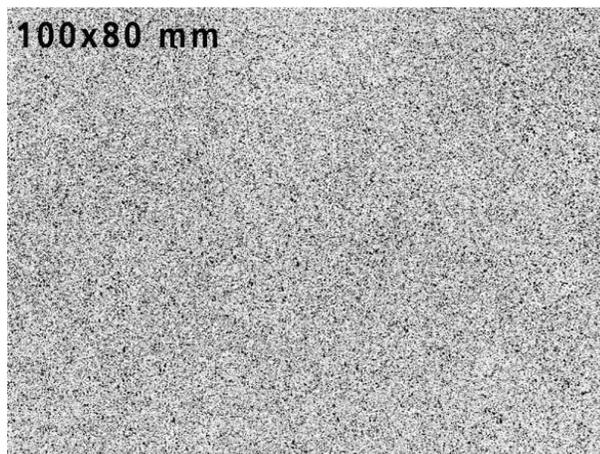


Figura 1.8: Imagen del patrón de preparación a utilizar para un tamaño de muestra de 100x80[mm]. (GOM, 2011)

1.4.3. Toma de imágenes del muestreo

Una vez preparada la superficie de la muestra con el patrón estocástico adecuado, se continúa con la toma de imágenes durante la prueba, para posteriormente ser analizadas por el software. Para poder realizar el muestreo de la prueba se debe hacer el montaje adecuado del equipo tomando como base los parámetros, mostrados en (Figura 1.9) y posteriormente calibrar al volumen correspondiente al tamaño de la muestra.

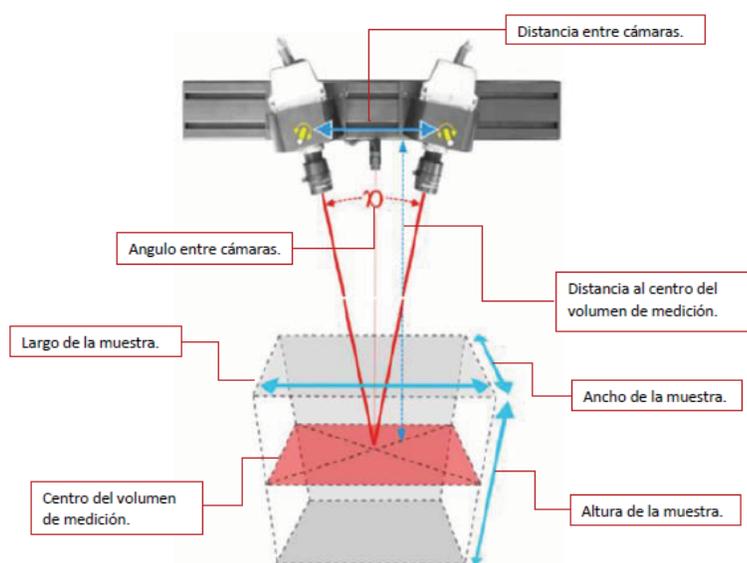


Figura 1.9: Cámaras del equipo ARAMIS. (GOM, 2008)

1.4.4. Principio de obtención de datos

Una vez capturadas las imágenes durante el movimiento de la muestra, se tiene una secuencia de imágenes desde la posición inicial (Imagen de referencia), hasta la posición final. La técnica de CID calcula el desplazamiento en cada uno de los puntos de las imágenes, comparando la imagen en estudio con la de referencia. (Figura 1.10) Para el cálculo del desplazamiento, la imagen es dividida de forma uniforme en distintos conjuntos, denominados facetas; cada faceta (Figura 1.11) es procesada para calcular el valor medio de la escala de grises de 0 a 255 existente en cada una de ella y se busca la misma faceta en la imagen deformada.

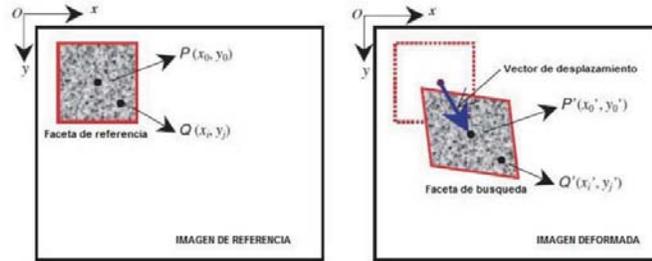


Figura 1.10: Esquema ilustrativo sobre el funcionamiento del método CID. (Pan et al., 2009)

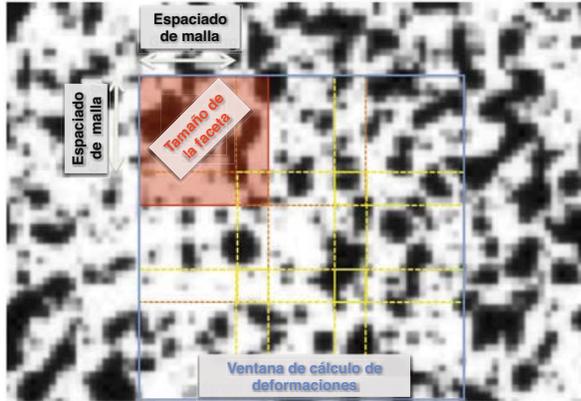


Figura 1.11: Esquema ilustrativo de una faceta. (Palanca et al., 2016)

Para el cálculo de la deformación el software toma la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{|P^*Q^*| - |PQ|}{|PQ|} \quad (1.4)$$

donde:

P y Q son puntos en la imagen de referencia (sin deformar). P tiene coordenadas (x, y, z) y Q que se encuentra en su vecindad tiene coordenadas $(x + dx, y + dy, z + dz)$. Así, P^* y Q^* son los mismos puntos pero desplazados en la imagen siguiente (deformada). P^* tiene coordenadas (x^*, y^*, z^*) y Q^* , $(x^* + dx^*, y^* + dy^*, z^* + dz^*)$, como se muestran en la Figura 1.12.

Por tanto:

$$|PQ| = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \quad (1.5)$$

$$|P^*Q^*| = \sqrt{(dx^*)^2 + (dy^*)^2 + (dz^*)^2} \quad (1.6)$$

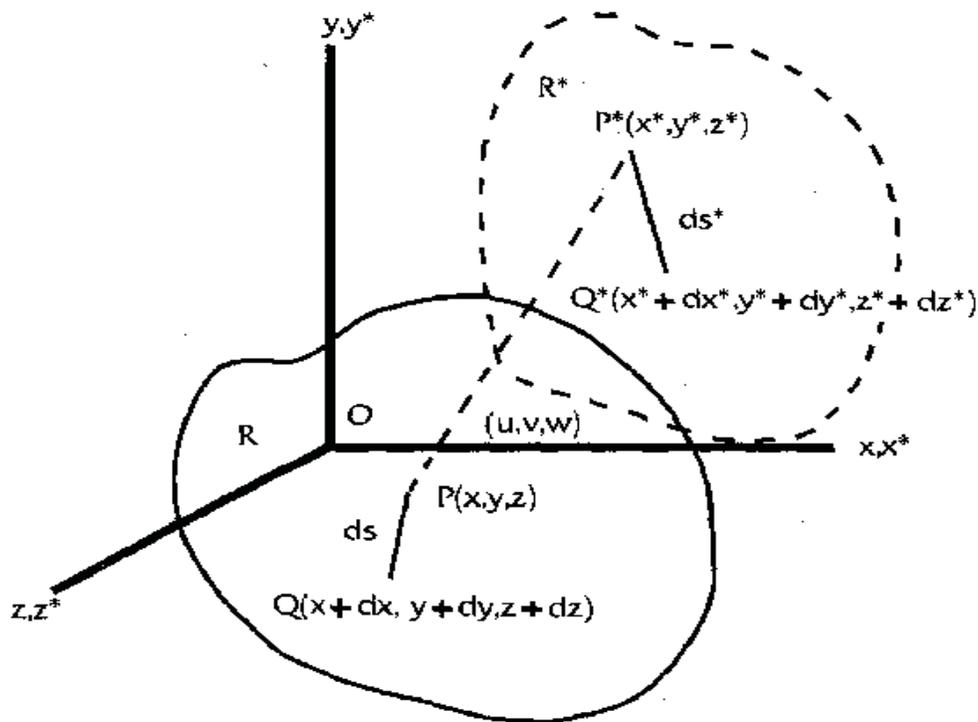


Figura 1.12: Segmento de línea PQ en cuerpo deformado y sin deformar. (Chu et al., 1985)

Aunque existen diferentes tipos de técnicas de medición de la piel, muchas de ellas son invasivas, por lo que al querer aplicar este tipo de estudio a personas con cicatriz por quemaduras podría lastimarlas, por lo cual, en la presente tesis se implementará la técnica CID para la medición *in situ* de la deformación de la piel en mano y antebrazo.

En el siguiente capítulo se hablará del montaje de la técnica experimental para el análisis de los movimientos de flexión metacarpofalángica, puño compuesto, flexión de muñeca y extensión de muñeca, así como la mediante la técnica de succión utilizando el dispositivo Cutómetro.

Capítulo 2

Metodología y técnica experimental

En este capítulo se hablará sobre el montaje de la técnica experimental para la medición de deformaciones y desplazamientos *in situ* de la piel del antebrazo y mano bajo diferentes condiciones dinámicas mediante la técnica de Correlación de Imágenes Digitales (CID), así como la medición de la deformación de la piel mediante la técnica de succión utilizando el dispositivo cutómetro.

2.1. Correlación de Imágenes Digitales

Para la adquisición de datos se utilizó el equipo ARAMIS 5LMT que consta de dos cámaras de estereo visión ajustables, con una resolución de 2448 x 2050 pixeles, fuente de iluminación externa y un apuntador láser (Figura.2.1).



Figura 2.1: Cámaras del equipo ARAMIS

18 Metodología y técnica experimental

El primer paso para la calibración del equipo requiere conocer el volumen de medición; es decir, las dimensiones del objeto a analizar más el espacio que ocupará éste en su máximo desplazamiento o deformación. Con base en este volumen se determina la distancia entre cámaras, centro del volumen de medición (Figura. 1.9) y el panel requerido para la calibración del equipo.

2.1.1. Volumen y calibración

Debido a que el sistema ARAMIS necesita una calibración que depende del área de medición es necesario determinar los valores mencionados en la Figura 1.9.

Para determinar el largo que tendría el volumen de medición se midió el largo del antebrazo y palma de la mano de 20 sujetos de edad comprendida entre los 21 a 24 años (Tabla. 2.1), y con estos datos se determinó la longitud máxima que debía tener el volumen de medición, que para nuestro caso la longitud fue de $300 \times 275 \times 120 \text{ mm}^3$.

Tabla 2.1: Datos promedio de medidas tomadas

Edad	Antebrazo	Palma de la Mano
22.7 ± 1.42 años	288 ± 12.8 mm	80 ± 9 mm

En la tabla 2.2 se muestran las distancias y ángulo requeridos para realizar el experimento. Estos datos fueron extraídos del manual del equipo.

Tabla 2.2: Tabla de parámetros de calibración para lentes de 17 mm.

Ancho de la muestra	Altura de la muestra	Distancia entre cámaras	Distancia al centro del volumen de medición	Ángulo entre cámaras
250 mm	120 mm	254 mm	660 mm	25°

Después de haber ajustado los parámetros anteriores, se enfocaron los lentes y se ajustó la apertura de éstos. Posteriormente con las cámaras observando la superficie de la mesa desde arriba (Figura 2.2) se utilizó el panel CP 20 350x280 para calibrar.

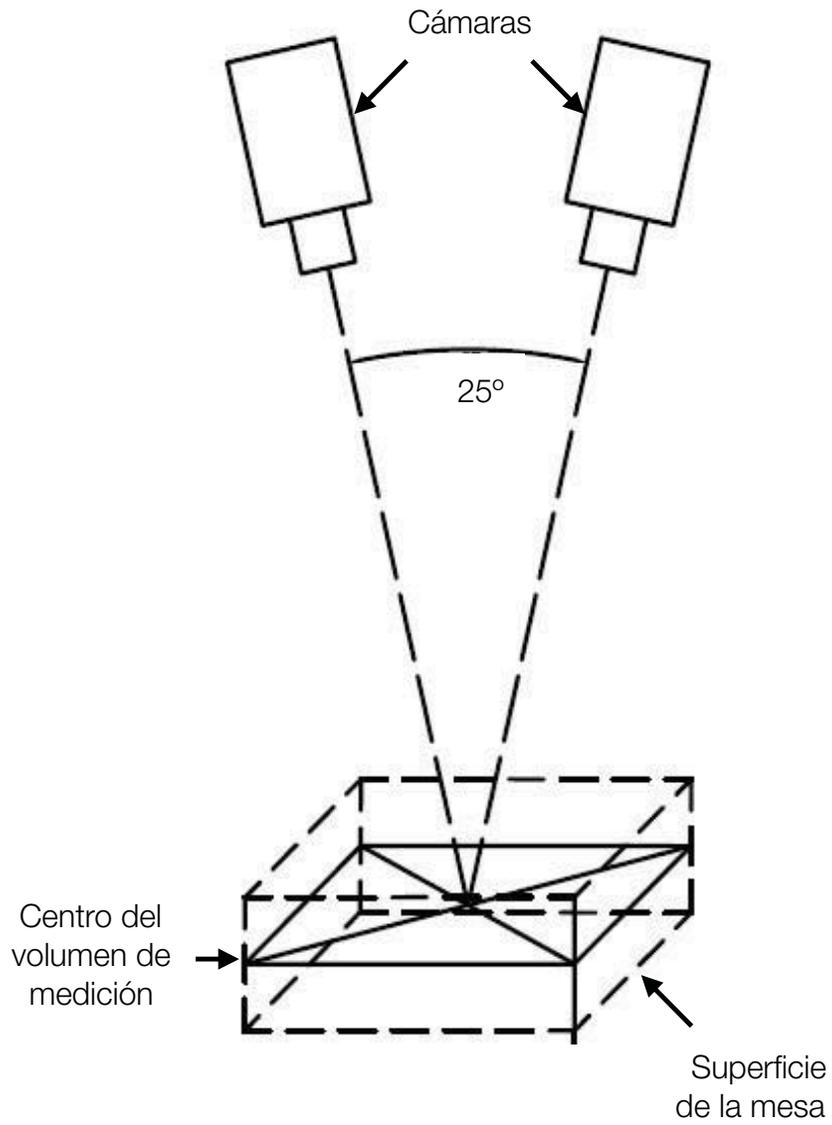


Figura 2.2: Posicionamiento de las cámaras para calibración del equipo y toma de datos.

20 Metodología y técnica experimental

Para que la superficie del antebrazo a analizar correspondiera con el centro de calibración se elevó el panel a una altura de 65 mm con respecto a la superficie de la mesa (Figura. 2.2)

En el paso del proceso de calibración donde se requiere colocar la cámara perpendicular al panel, se inclinó el panel 12.5° , con una altura de 11.125 [cm], para que la cámara izquierda o derecha tuvieron una vista perpendicular a este (Figura.2.3), con este paso se evita el manejo de las cámaras en una posición peligrosa y complicada.



Figura 2.3: Panel de calibración perpendicular (a) cámara derecha e (b) izquierda.

2.1.2. Análisis factorial

El análisis factorial es una herramienta que permite conocer las variables principales que afectan las mediciones de un experimento. Para este análisis se hace una hipótesis sobre aquellos parámetros que pudieran afectar el experimento. Éstos parámetros, llamados factores, deben ser controlables ya que las mediciones se deben hacer con las diferentes variaciones de los factores hasta agotar todas las posibilidades. Posteriormente los resultados del análisis se comparan para observar qué factores afectaron más las mediciones. En este caso se utilizó el porcentaje de variación para comparar los resultados de de las mediciones.

El porcentaje de variación se define como el coeficiente de variación multiplicado por 100, como se muestra a continuación:

$$P.V. = C.V. * 100 = \frac{\sqrt{\frac{\Sigma(x-\bar{x})^2}{N}}}{\bar{x}} * 100 \quad (2.1)$$

donde:

\bar{x} = la media.

N = número de muestras.

Debido a que la técnica de CID no ha sido utilizada para mediciones *in situ* en áreas de deformación tan grandes como la piel de una extremidad, surgen dudas sobre las variaciones que puede tener la toma de datos debidos a errores inherentes a la técnica o a los propios sujetos.

Por lo tanto en esta investigación se busco conocer el efecto en la medición de variables como el método de preparación, el sujeto o a las condiciones ambientales.

Para encontrar el porcentaje de repetitividad se realizó un experimento factorial en el que se variaron los factores que podrían afectar los valores de la medición.

Los tres factores considerados fueron las condiciones ambientales del laboratorio, la incertidumbre de la medición propia del equipo y el método de preparación de la superficie. Para variar las condiciones ambientales se realizaron mediciones en diferentes días, para la incertidumbre del equipo se repitió la prueba tres veces en cada sujeto y por último para preparación de la superficie se utilizó uno método de aplicación distinto cada día. Ver Tabla 2.3.

22 Metodología y técnica experimental

Tabla 2.3: Tipo de preparación por día

Día	Base blanca	Patrón Aleatorio	Número de repeticiones
Día 1	Capas de pintura digital y talco	Pintura acrílica negra	3 Repeticiones
Día 2	Maquillaje artístico	Pintura acrílica negra	3 Repeticiones
Día 3	Maquillaje artístico	Polvo de carboncillo y polvo de gis color gris	3 Repeticiones



Figura 2.4: Alineación del pliegue palmar distal con el borde de la mesa.

Para el experimento se realizó el movimiento de flexión y extensión de la articulación metacarpofalángica. Se colocó la mano haciendo coincidir la marca del pliegue palmar distal con el borde de la mesa (Figura 2.4) y se les pidió realizar el movimiento de flexión y extensión metacarpofalángica durante 4 segundos, el muestreo se hizo con 40 imágenes a una frecuencia de 10 Hz .

Se obtuvieron campos de desplazamiento y deformación asociados a cada

fotografía tomada a lo largo del movimiento de flexión y se seleccionaron las imágenes que corresponden a la flexión máxima de las falanges, en éstas se obtuvo el desplazamiento en el eje transversal de la mano (eje "X") y en el eje longitudinal del antebrazo (eje "Y") así como deformación máxima.

2.1.3. Dispositivo de posicionamiento

Al analizar los datos se pudo observar que los sujetos no tenían manera de controlar de manera precisa sus movimientos en las diferentes pruebas, además de que no regresaban a la posición inicial.

Con el fin de controlar el rango de movimiento de la mano de los sujetos se optó por el diseño de un dispositivo bajo ciertos requerimientos (Tabla 2.4) que permitiera obtener siempre la misma posición inicial y final para ser usado en los movimientos de flexión metacarpofalángica, puño compuesto, flexión de muñeca y extensión de muñeca.

Basándonos en las medidas tomadas para determinar el volumen de calibración se diseñó el dispositivo de posicionamiento. (Figura 2.7)

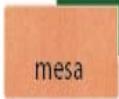
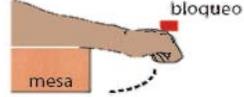
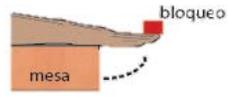
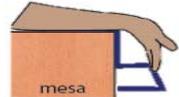
El dispositivo consta de 4 piezas que limitan el rango de movimiento de la mano, estas son ajustables para proporcionar a cada individuo la restricción más adecuada a las dimensiones de sus extremidades. (Figura 2.6)

Después de haber realizado el diseño que cumpliera con los requerimientos se procedió a hacer un análisis estático por elementos finitos de la estructura. El objetivo de este análisis fue la elección de un diseño óptimo, para que la pieza tuviera la rigidez suficiente y no se flexionara por la carga de trabajo haciendo que la restricción de extensión a 0° no se cumpliera. (Figura 2.5)

Se le aplicaron al modelo dos cargas puntuales de 10 N en los extremos de la pieza representando el peso máximo de carga y se usaron apoyos fijos para toda la parte posterior (Figura 2.5). Se decidió construirlo de acero 1018 ya que este material mostró ser de utilidad para éste caso. Se mostrarán más adelante los resultados de los cambios de geometría con éste material.

24 Metodología y técnica experimental

Tabla 2.4: Requerimientos del dispositivo de posicionamiento

Requerimiento	Ejemplo
Sujeción sobre la mesa	
Limitar el movimiento a 0° de extensión de muñeca (flexión-extensión muñeca)	
Limitar el movimiento a 0° de extensión de metacarpos (flexión-extensión metacarpos)	
Limitar el movimiento a 0° de extensión de falanges distales en el movimiento de puño compuesto	
Limitar el movimiento a 0° de flexión de muñeca (flexión-extensión de muñeca)	
Limitar el movimiento máximo a 70° (durante el movimiento flexión - extensión de muñeca)	

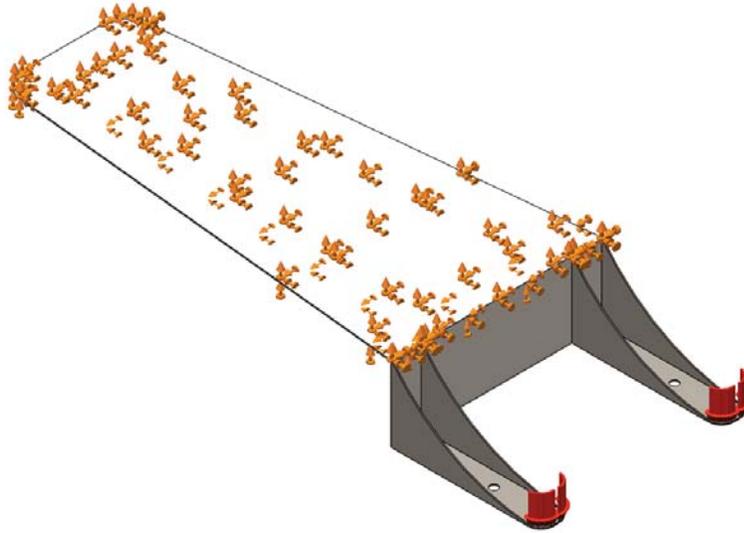


Figura 2.5: Visualización de modelo con restricciones

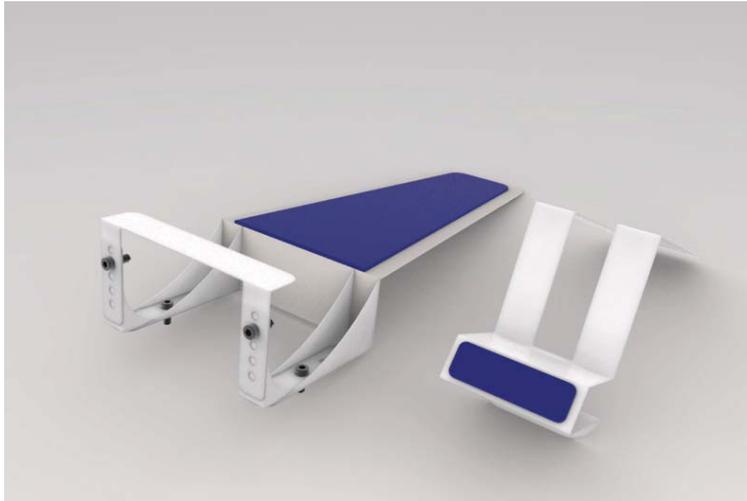


Figura 2.6: Render del dispositivo de posicionamiento para los diferentes movimientos.

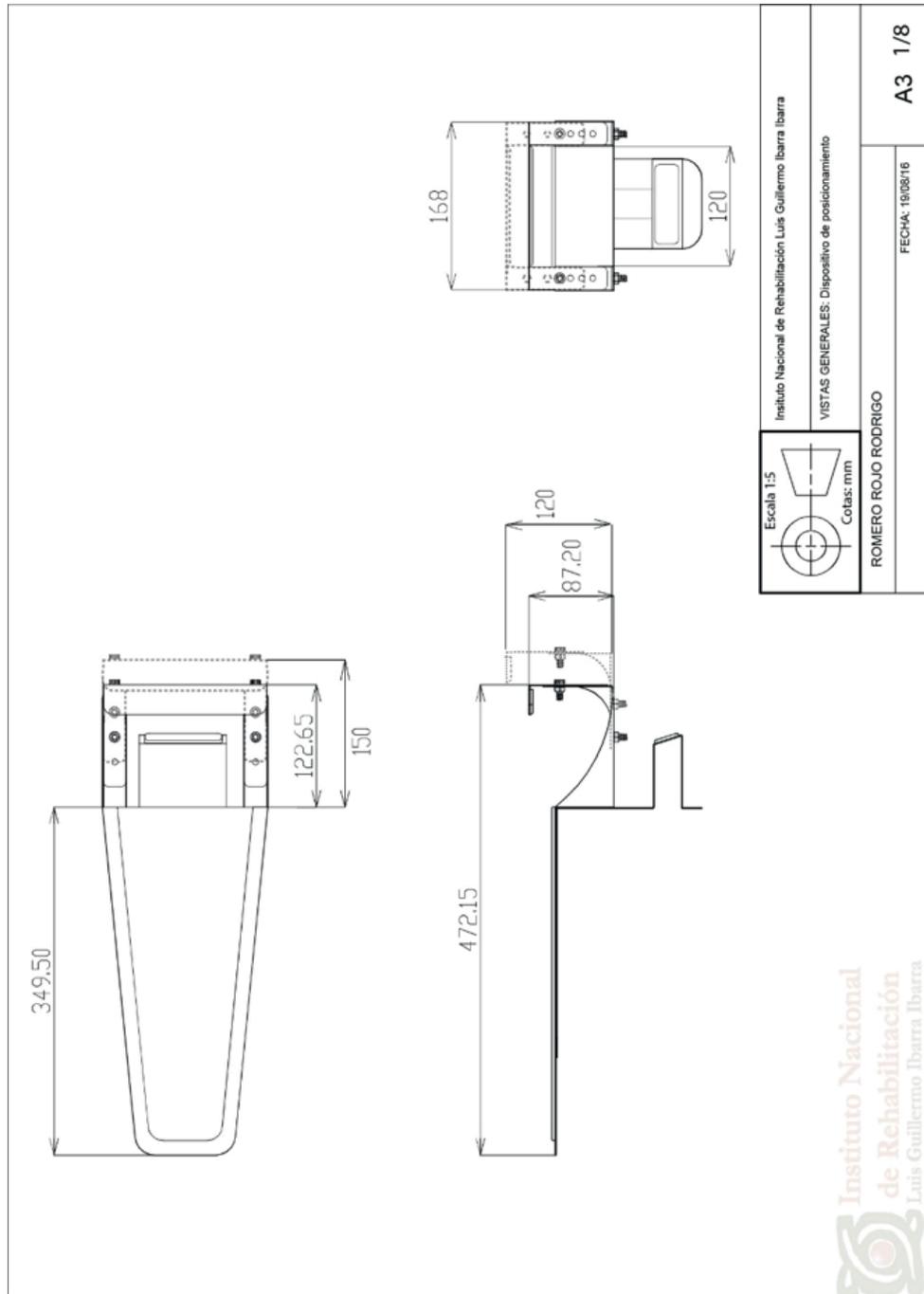


Figura 2.7: Planos del dispositivo de posicionamiento.

2.1.4. Preparación

En la medición participaron como voluntarios los investigadores sin ninguna cicatriz visible, sin exposición severa reciente al sol, sin pérdida considerable de peso reciente, ni historial de enfermedades cutáneas. Los sujetos retiraron el vello del antebrazo y mano en su totalidad con un rastrillo dos días antes de la medición, tuvieron un aseo normal en la mañana, se les pidió no usar cremas ni humectantes el día de la prueba.

Tabla 2.5: Datos de los sujetos participantes en la prueba.

Brazo dominante	Sexo	Número de sujeto
Derecho	Masculino	1
Derecho	Masculino	2
Izquierdo	Masculino	3

Se dividió el análisis de este estudio en dos etapas, en la primera se analizó la región dorsal del antebrazo y mano; en la segunda se analizó la región ventral del antebrazo. Por lo tanto se preparó la superficie en dos sesiones.

Preparación región dorsal del antebrazo

La preparación consistió en tres etapas, en la primera se pintó con una capa de maquillaje artístico color blanco desde el pliegue del codo hasta la articulación interfalángica proximal como se muestra en la Figura 2.8.



Figura 2.8: Preparación superficial con maquillaje artístico blanco.

En la segunda etapa se dibujaron 7 marcas de referencia con lápiz tinta:

28 Metodología y técnica experimental

Surco de la muñeca: Se le pidió el sujeto posicionar el antebrazo a 90° , se ubicó el surco de la muñeca en la parte ventral del antebrazo y se marcó. Después se proyectó la línea a la parte dorsal del antebrazo con una regla flexible (Figura 2.9 (b)).

Pliegue de codo: Para marcar la línea de referencia se posicionó el antebrazo en flexión a 45° aproximadamente apoyando el codo sobre la mesa y se marcó con lápiz tinta el pliegue del codo (Figura 2.9).

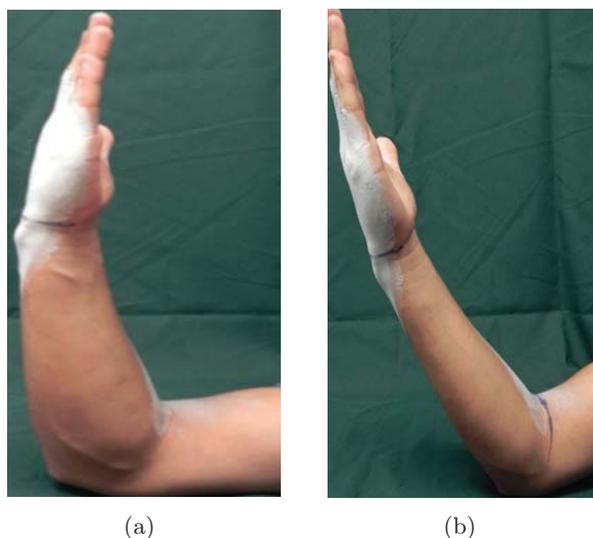


Figura 2.9: a) Ubicación del Surco de la muñeca posición a 90° , b) Ubicación del pliegue del codo Posición a 45° aproximadamente.

Línea media de la mano: Para marcar la línea media de la mano, se midió con un vernier el ancho de la muñeca y se colocó una marca en la mitad de esta distancia; posteriormente, se midió el ancho de la tercera falange y se colocó una marca a la mitad de esta distancia, se trazó una línea que uniera las dos marcas (Figura 2.10).

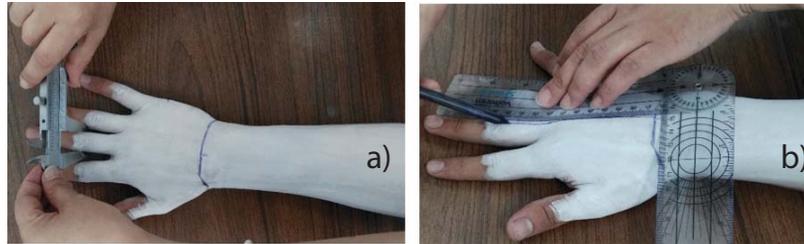


Figura 2.10: Línea media de la mano, a) medición del ancho del dedo para determinar la mitad, b) trazo de la línea.

Línea de referencia a dos pulgadas proximal del surco de la muñeca: Se marcó una línea paralela a la línea del surco de la muñeca a 2 pulgadas proximal, la cual fue medida con una cinta métrica (Figura 2.11).

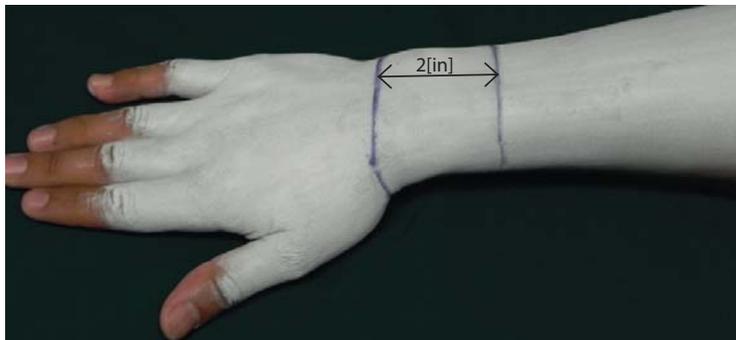


Figura 2.11: Marca de la línea de referencia a 2 pulgadas proximal del surco de la muñeca.

Mitad del antebrazo: Para marcar la mitad del antebrazo se tomó como referencia la mitad de la distancia total entre el pliegue del codo y el surco de la muñeca (Figura 2.12).



Figura 2.12: Marca de la línea de referencia a la mitad del antebrazo.

Pliegue palmar distal: Para la ubicación del pliegue palmar distal se le pidió al sujeto que realizara la flexión metacarpofalángica a 90° y se marcó con el lápiz tinta el pliegue (Figura 2.13 (a)). Línea de referencia a un centímetro del pliegue palmar distal hacia proximal: se marcó una línea paralela al pliegue palmar distal a un 1 centímetro proximal (Figura 2.13 (b)).

En las Figuras 2.14 y 2.15 se pueden observar todas las marcas requeridas para el experimento en pronación, las cuales permiten al sujeto colocar el antebrazo en una posición conocida.

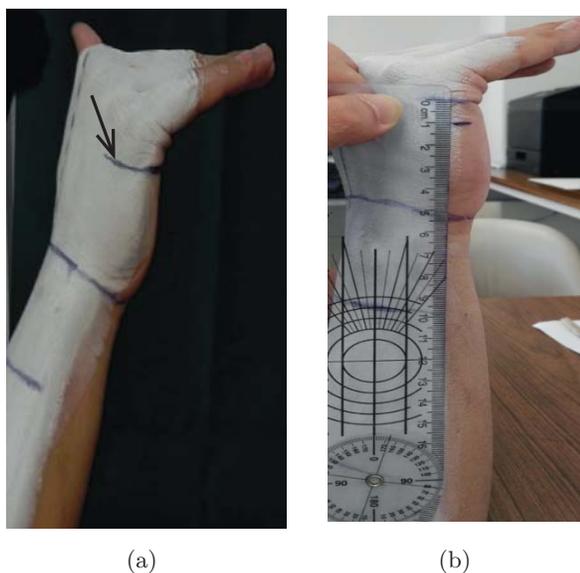


Figura 2.13: a) Línea de referencia en el surco palmar distal, b) Línea de referencia distal a 1 centímetro proximal al surco palmar.

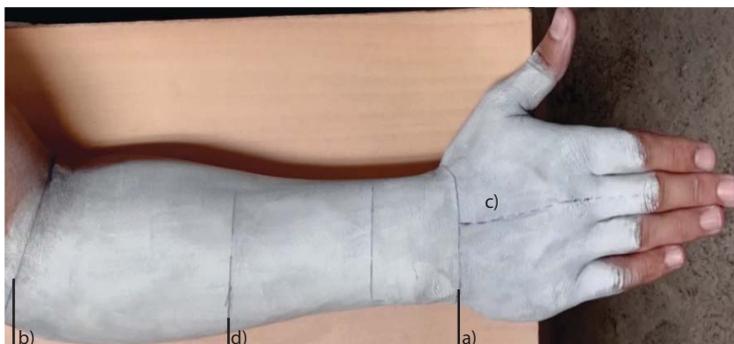


Figura 2.14: Marcas de referencia en el antebrazo y mano, a) Surco de la muñeca, b) Pliegue del codo, c) Línea media de la mano, d) Mitad entre surco de la muñeca y pliegue del codo.



Figura 2.15: Marcas de referencia en antebrazo y mano, a) Línea a 2 pulgadas proximal del surco de la muñeca, b) Pliegue palmar distal, c) Línea a 1 cm proximal del pliegue palmar distal.

En la tercera etapa se aplicó el patrón aleatorio de puntos, el polvo para el patrón se obtuvo mediante el desbaste de carboncillo y gis color gris con una navaja. Después de haber obtenido la mezcla de polvos se esparció con una brocha para maquillaje dando pequeños golpeteos en el mango.

Por último mediante la aspersion de polvo de carboncillo con polvo de gis color gris generó el patrón estocástico de puntos requerido (Figura 2.16).



Figura 2.16: Preparación del patrón Estocástico por aspersión de gis en polvo color gris y polvo de carboncillo.

Preparación región ventral del antebrazo

La preparación de forma similar a la región dorsal del brazo, se aplicó en tres etapas. En la primera se pintó con una capa de maquillaje artístico color blanco desde el pliegue del codo hasta la articulación de la muñeca (Figura 2.17).



Figura 2.17: Preparación de la superficie con maquillaje artístico blanco.

Posteriormente, se dibujaron 4 marcas de referencia con lápiz tinta en la región ventral del antebrazo.

Surco de la muñeca: se le pidió al sujeto posicionar el antebrazo a 90° , se ubicó el surco de la muñeca en la parte ventral del antebrazo y se marcó (Figura 2.18).



Figura 2.18: Línea de referencia en el surco de la muñeca.

34 Metodología y técnica experimental

Pliegue de codo: Para marcar las líneas de referencia se posicionó el antebrazo en flexión a 45° aproximadamente apoyando el codo sobre la mesa y se marcó con lápiz tinta el pliegue del codo (Figura 2.19).



Figura 2.19: Ubicación de la línea del pliegue del codo.

Línea de referencia a una pulgada proximal del surco de la muñeca: se marcó una línea paralela a la línea del surco de la muñeca a 1 pulgada proximal, la cual fue medida con una cinta métrica (Figura 2.20).

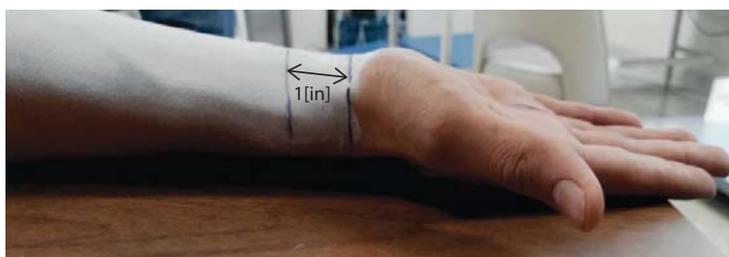


Figura 2.20: Línea de referencia a una pulgada proximal al surco de la muñeca.

Eje longitudinal del antebrazo: Para marcar la línea media de la mano, con un vernier se midió el ancho de la muñeca y se colocó una marca en la mitad de esta distancia; posteriormente se midió el ancho de la articulación

del codo en supinación y se colocó una marca a la mitad de esta distancia, se trazó una línea que uniera las dos marcas (Figura 2.21).

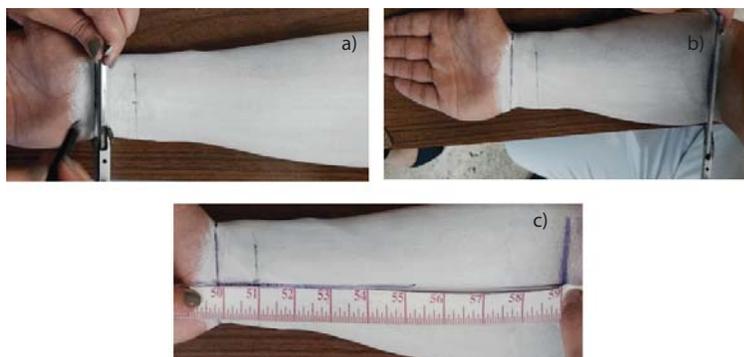


Figura 2.21: Eje longitudinal del antebrazo, a) medición del ancho de la muñeca para determinar la mitad, b) medición del ancho del codo para determinar la mitad, c) trazo del eje longitudinal.

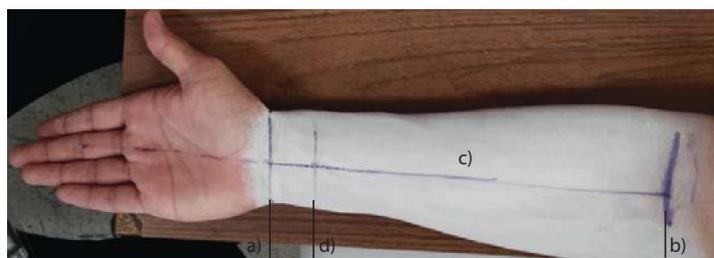


Figura 2.22: Marcas de referencia parte ventral del antebrazo, a) surco de la muñeca, b) Pliegue del codo, c) eje longitudinal del antebrazo, d) Línea a 1 mm proximal del surco de la muñeca.

Por último mediante la aspersion del polvo color gris se generó el patrón estocástico sobre la superficie (Figura 2.23) como se describió anteriormente.



Figura 2.23: Preparación de la superficie con maquillaje artístico blanco y patrón estocástico.

2.1.5. Movimientos de mano y antebrazo para las mediciones con CID

Una vez realizado el análisis de errores y la disminución de los mismos, se prosiguió la toma de datos experimentales.

La adquisición se realizó en el laboratorio de ingeniería de rehabilitación en el Instituto Nacional de Rehabilitación con las luces del cuarto apagadas y a temperatura ambiente.

Se le pidió al sujeto sentarse en un banco a un costado de la mesa como se muestra en las Figuras 2.24 y 2.25.

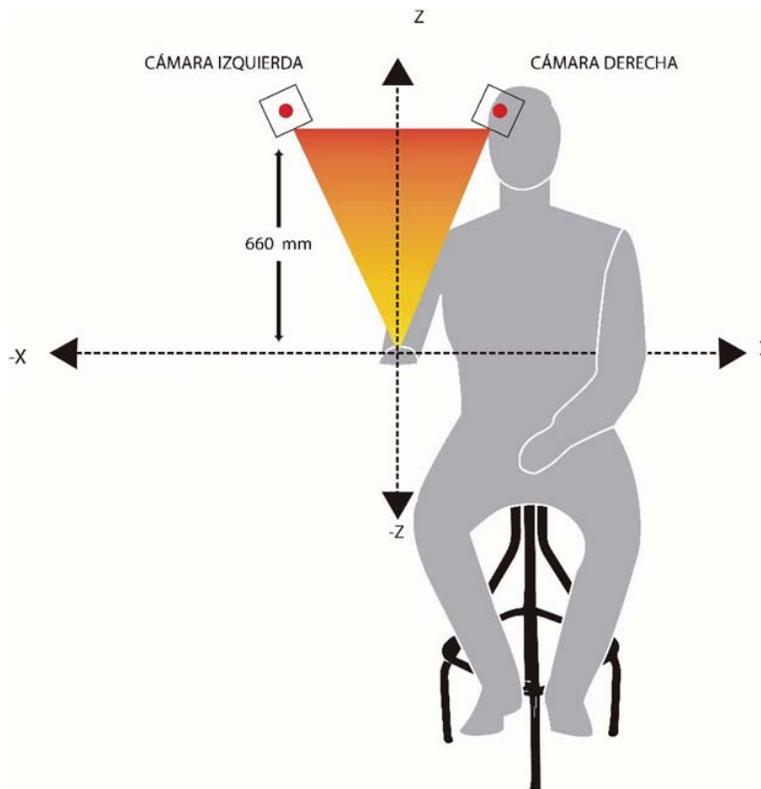


Figura 2.24: Diagrama ilustrativo de la posición de las cámaras y el sujeto para la toma de datos vista frontal.

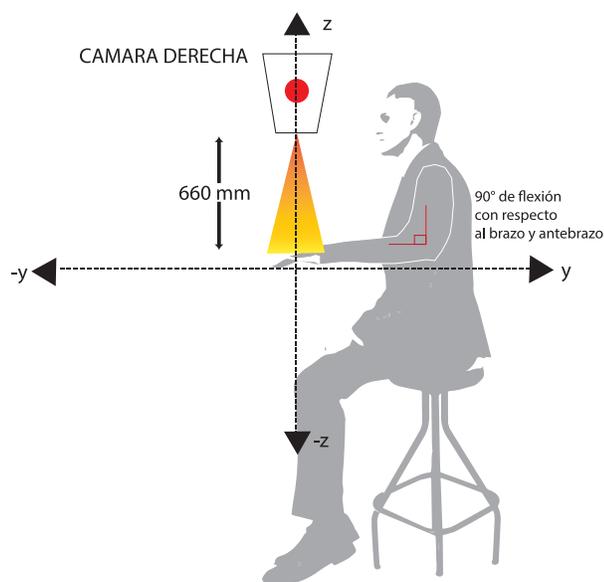


Figura 2.25: Diagrama ilustrativo de la posición de las cámaras y el sujeto para la toma de datos vista lateral.

Antes de iniciar la toma de datos se comprobó la calidad del patrón estocástico con tres imágenes en posición estática, la preparación tuvo un error menor de 0.03 píxeles.

Para el análisis de la parte dorsal del antebrazo y mano se realizaron los siguientes movimientos:

Flexión Metacarpofalángica

Se definió un área de medición comprendida desde la cabeza de los metacarpianos hasta la mitad del antebrazo.

Para iniciar se posicionó la mano haciendo coincidir la marca de referencia del pliegue palmar distal con el borde del dispositivo de posicionamiento en pronación y extensión completa (Figura 2.26).

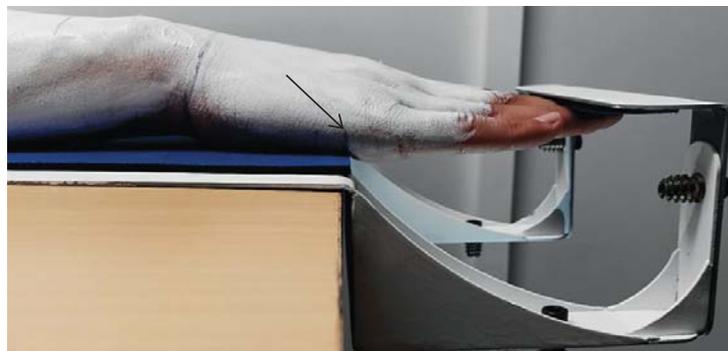


Figura 2.26: Alineación de la marca de referencia 6 con el borde del dispositivo de posicionamiento y posición inicial.

Para hacer coincidir la línea media de la mano perpendicular a la línea del surco de la muñeca se le pidió a los sujetos realizar abducción o aducción de la mano (Figura 2.27).



Figura 2.27: Marca de referencia 3 perpendicular a la línea de referencia 1.

Después de hacer esta alineación se le pidió al sujeto realizar el movimiento de flexión metacarpofalángica. El sujeto partió de la posición inicial descrita anteriormente hasta la posición final a 90° (Figura 2.28) con el fin de que se familiarizara con el movimiento se le pidió que lo realizara cuatro veces. Para la toma de datos, se le pidió al sujeto que realizara la flexión en 2 segundos y regresar a la posición inicial en 2 segundos teniendo un tiempo total de adquisición de 4 segundos.



Figura 2.28: Movimiento flexión metacarpofalángica.

Para la toma de imágenes se le indicó al sujeto en qué momento empezar a realizar el movimiento. El muestreo se realizó con una frecuencia de 10Hz durante 4 segundos, teniendo un total de 40 imágenes.

Puño compuesto

Se definió un área de medición comprendida desde la cabeza de los metacarpianos hasta la mitad del antebrazo. Para la posición inicial se colocó la mano haciendo coincidir la marca a 1 centímetro proximal del pliegue palmar distal con el borde del dispositivo de posicionamiento en pronación completa (Figura 2.29).

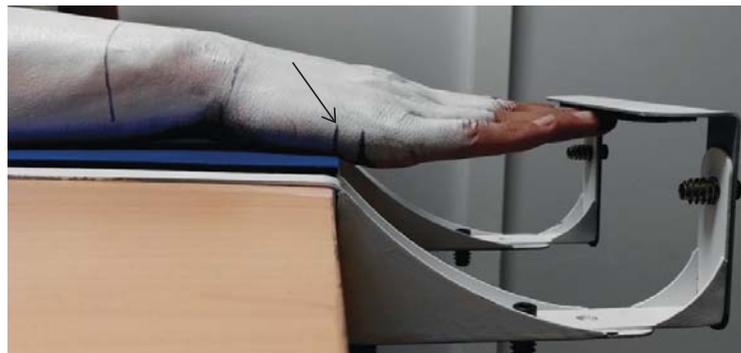


Figura 2.29: Alineación de la marca de referencia 7 con el borde del dispositivo de posicionamiento y posición inicial.

Para hacer coincidir la línea media de la mano perpendicular a la línea del surco de la muñeca se le pidió a los sujetos realizar abducción o aducción de la mano (Figura 2.27).

Después de hacer esta alineación se le pidió al sujeto realizar el movimiento de flexión interfalángica distal proximal (Figura 2.30), metacarpofalángica progresivamente únicamente de la segunda a la quinta falange (Figura 2.31). El sujeto partió de la posición inicial descrita anteriormente hasta la posición final de flexión interfalángica distal proximal, después hasta la posición final de flexión metacarpofalángica, con el fin de que se familiarizara con el movimiento se le pidió que lo realizara cuatro veces. Para la toma de datos se le pidió hacer el movimiento previamente descrito en 4 segundos y regresar a la posición inicial en 4 segundos teniendo un tiempo total de adquisición de 8 segundos.



Figura 2.30: Flexión interfalángica distal proximal.



Figura 2.31: Flexión metacarpofalángica, posición final del movimiento de puño compuesto.

Para la toma de imágenes se le indicó al sujeto en que momento empezar

42 Metodología y técnica experimental

a realizar el movimiento. El muestreo se realizó con una frecuencia de 10Hz durante un tiempo de 8 segundos teniendo un total de 80 imágenes.

Flexión Muñeca

Se definió un área de medición comprendida desde la marca del surco de la muñeca hasta la marca del pliegue del codo.

Para la posición inicial se colocó la mano haciendo coincidir la marca a 2 pulgadas proximal del surco de la muñeca con el borde del dispositivo de posicionamiento (Figura 2.32).

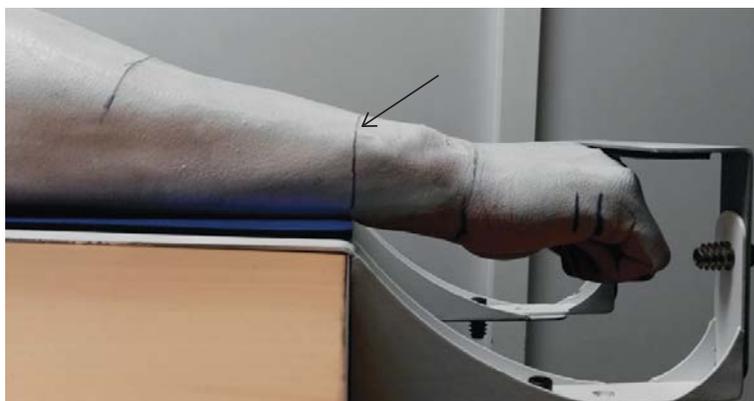


Figura 2.32: Alineación de la marca de referencia 4 con el borde del dispositivo de posicionamiento y posición inicial.

Para hacer coincidir la línea media de la mano perpendicular a la línea del surco de la muñeca se le pidió a los sujetos realizar abducción o aducción de la mano (Figura 2.27).

Después de hacer esta alineación se le pidió al sujeto con el puño cerrado únicamente de la segunda a la quinta falange realizar el movimiento de flexión de muñeca. El sujeto partió de la posición inicial descrita anteriormente hasta la posición final a 90° (Figura 2.33) con el fin de que se familiarizara con el movimiento se le pidió que lo realizara cuatro veces. Para la toma de datos, se le pidió al sujeto que realizara la flexión en 4 segundos y regresar a la posición inicial en 4 segundos teniendo un tiempo total de adquisición de 8 segundos.



Figura 2.33: Flexión de muñeca, posición final del movimiento.

Para la toma de imágenes se le indicó al sujeto en que momento empezar a realizar el movimiento. El muestreo se realizó con una frecuencia de 10Hz durante un tiempo de 8 segundos, por lo que se obtuvieron 80 imágenes.

Extensión de muñeca asistida

Se definió un área de medición comprendida desde el surco de la muñeca hasta el pliegue del codo. Para tal objetivo se ajustó el largo y altura del tope del dispositivo de posicionamiento, posteriormente para la posición inicial se colocó el brazo haciendo coincidir la marca a 1 pulgada proximal del surco de la muñeca con el borde del dispositivo de posicionamiento (Figura 2.34).



Figura 2.34: Alineación de la marca de referencia 3 con el borde del dispositivo de posicionamiento y posición inicial.

Para hacer coincidir el eje longitudinal del antebrazo perpendicular a la línea del surco de la muñeca se le pidió a los sujetos realizar abducción o aducción de la mano (Figura 2.35).



Figura 2.35: Línea 4 perpendicular a línea 1.

Después de hacer esta alineación se le pidió al sujeto realizar el movi-

46 Metodología y técnica experimental

miento de extensión de muñeca, al sujeto se le aplicó una fuerza externa con el fin de lograr una extensión de 70° y un regreso a la posición inicial controlada (Figura 2.36). Con el fin de que se familiarizara con el movimiento, este se realizó cuatro veces.



Figura 2.36: Extensión máxima de 70° .

Para la toma de datos, se realizó la extensión asistida en 4 segundos y se regresó a la posición inicial en 4 segundos teniendo un tiempo total de adquisición de 8 segundos a una frecuencia de 10 Hz, teniendo un total de 80 imágenes.

2.2. Cutómetro

En esta sección se hablará sobre el montaje de la técnica experimental de la medición de flexibilidad de la piel en los mismos 3 sujetos, aparentemente sanos con el dispositivo Cutometer 580, con el objetivo de conocer el comportamiento de la piel en la región del miembro superior dominante. Para el experimento se controló el mayor número de parámetros que pudieran afectar las propiedades de la piel; como son la hidratación, la vellosidad en la zona de medición y la presencia de cosméticos.

2.2.1. Descripción del experimento.

El dispositivo Cutómetro 580 de marca Courage + Khazaka electronic GmbH es un aparato utilizado en la industria cosmética para evaluar de manera clínica la elasticidad de la piel. Su principio de funcionamiento consiste en la aplicación de presión negativa constante sobre la superficie de la piel para medir la altura que alcanza la columna de piel a través del tiempo. La aplicación de la presión se realiza a través de un orificio de 2 mm de diámetro. La medición se realizó a lo largo de antebrazo y mano de 3 sujetos a los que se les aplicó una presión de -450 mbar en 10 ciclos de 4 segundos cada uno con 2 segundos de succión y 2 de relajación de la piel. La frecuencia de muestreo del instrumento fue de 100 Hz. Adicionalmente se les pidió rasurar el antebrazo con un día de anticipación para eliminar el efecto de la irritación de la piel, no aplicarse ningún tipo de cosmético o hidratante 24 horas antes de la prueba y realizar aseo normal por la mañana. Los sujetos estuvieron en reposo durante aproximadamente 50 minutos en un cuarto sin exposición directa al sol.

2.2.2. Preparación

Debido a que el dispositivo mide en regiones de 2 mm de diámetro es necesario dividir la región de interés en puntos específicos localizables de manera precisa en todos los sujetos. Para este fin se utilizaron marcas en referencias anatómicas comunes de fácil localización. Además, se dividió el estudio en 4 regiones de toma de datos, como se muestra en la Figura 2.37, los nudillos, el espacio interfalángico, el dorso de la mano, el dorso del antebrazo y la región ventral del antebrazo.

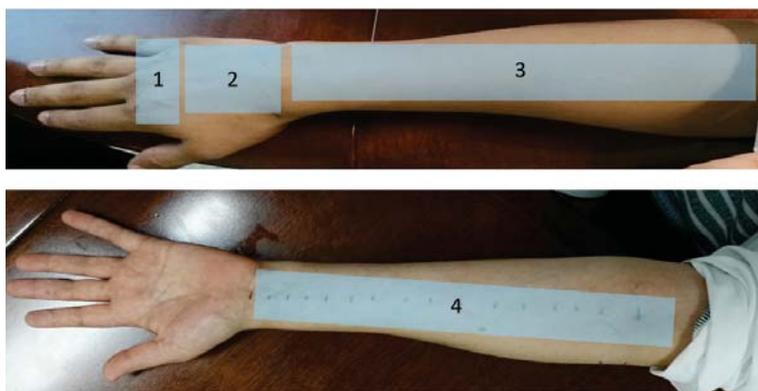


Figura 2.37: Numeración de las zonas de estudio.

Para ubicar los puntos de interés se colocaron dos marcas como referencia, en posición neutra, que delimitan las regiones de medición. En el dorso, con el antebrazo en pronación se marcó el punto medio del pliegue de la muñeca. En la parte ventral, con el antebrazo en supinación se marcó también el punto medio del pliegue de la muñeca. A continuación se describe el procedimiento para marcar cada región.

Región 1: Se marcaron los nudillos desde el segundo al quinto con la mano extendida sobre la mesa (Figura 2.38 (a)). Para las marcas en el espacio interfalángico se midió la distancia entre las marcas de los nudillos y se colocaron a la mitad entre estas (Figura 2.38 (b)).

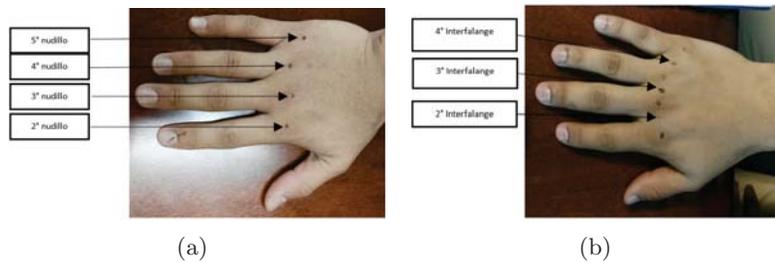


Figura 2.38: Marcas de referencia en región 1. a) Marcas en los nudillos, b) Marcas en las interfalanges.

Región 2: Se marcaron puntos cada centímetro desde el cero de referencia (pliegue de la muñeca) hasta el tercer nudillo.

Región 3: Se marcó cada centímetro desde el cero de referencia hasta el medio de la marca del pliegue del codo. (Figura 2.39)

Región 4: Se marcó desde el cero de referencia hasta el medio de la marca del pliegue del codo. (Figura 2.40)

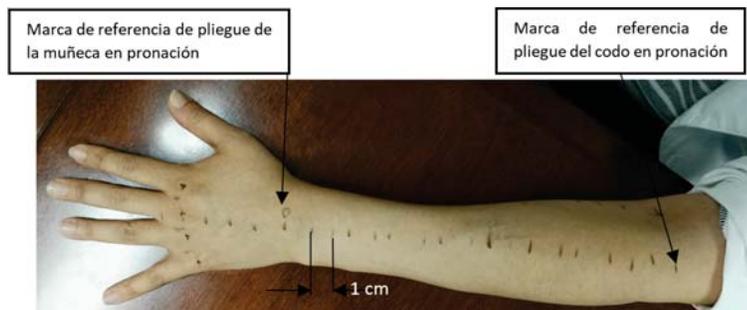


Figura 2.39: Marcas con 1cm de separación a lo largo del brazo dominante. Se puede apreciar el punto de referencia en la muñeca.

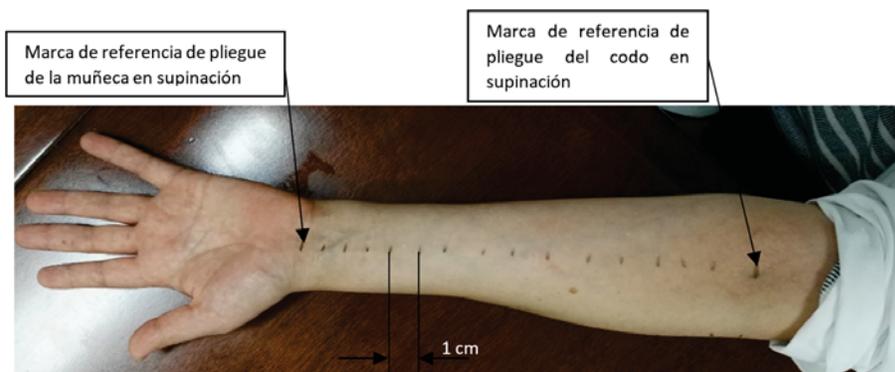


Figura 2.40: Marcas del brazo en supinación.

2.2.3. Adquisición de datos

Para la toma de datos se le pidió a los sujetos colocar el antebrazo sobre la mesa y no moverlo mientras se ejecutaba la medición, como se muestra en la Figura 2.41 (a) y (b).



Figura 2.41: Postura para la toma de datos. a) postura del antebrazo en supinación, b) postura del antebrazo en pronación

Se colocó el cutómetro en el punto de interés y se presionó un poco sobre la piel para asegurar el aislamiento de la cámara. Se eligió el modo 1 que consiste en 10 ciclos de succión-relajación de 4 segundos cada uno.



Figura 2.42: Toma de datos con el cutómetro.

Se realizaron 3 repeticiones de la medición en la región 1 por sujeto y una sola medición en las demás regiones.

2.2.4. Manejo de datos

A partir del experimento con el dispositivo Cutómetro se obtuvieron una serie de puntos para construir la curva altura-tiempo de los diez ciclos de succión, de esta curva se requieren obtener las alturas d_0 , d_1 y d_{10} para la Ecuación (1.1), (1.2) y (1.3)). La altura d_0 limita su comportamiento lineal y fue localizado por el método tangentes, las otras dos alturas se tomaron como la máxima altura registrada en el ciclo uno y diez respectivamente. Al graficar los puntos para obtener las alturas se pudo observar la existencia de ruido a lo largo de toda la señal (Figura 2.43), por lo que previamente se debió realizar un filtrado para obtener resultados confiables. El procesado de la información del Cutómetro se dividió en dos partes, el filtrado de la señal y posteriormente la obtención de las alturas. A continuación se presenta a detalle el proceso seguido para cada señal.

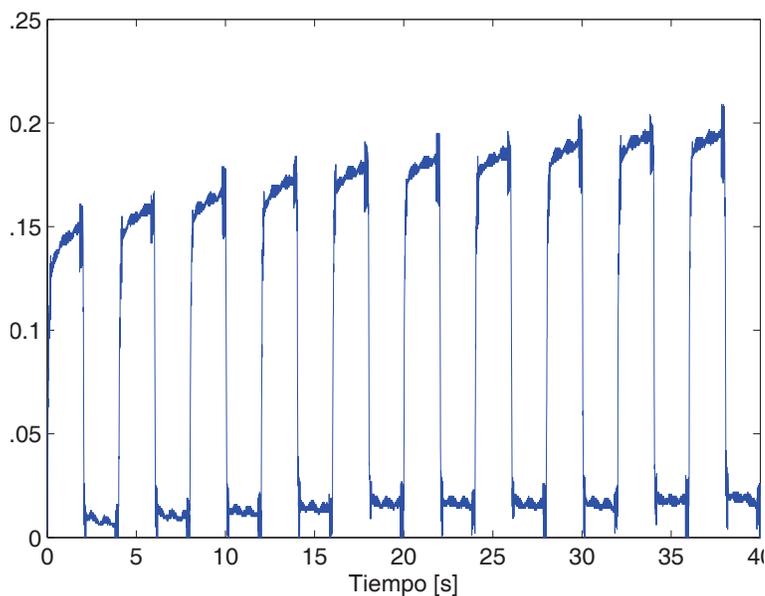


Figura 2.43: Señal de salida de Cutómetro

- Para comenzar se realizó un análisis por transformada de Fourier donde se observó en el espectro de frecuencias (Figura 2.44) que la frecuencia del ruido era aproximadamente de los 40 Hz, por lo que se aplicó un filtro digital paso bajas para removerlo. El filtro elegido se usó con una ventana tipo kaiser con $longitudde21y\beta = 3$ y frecuencia de corte de 35Hz.

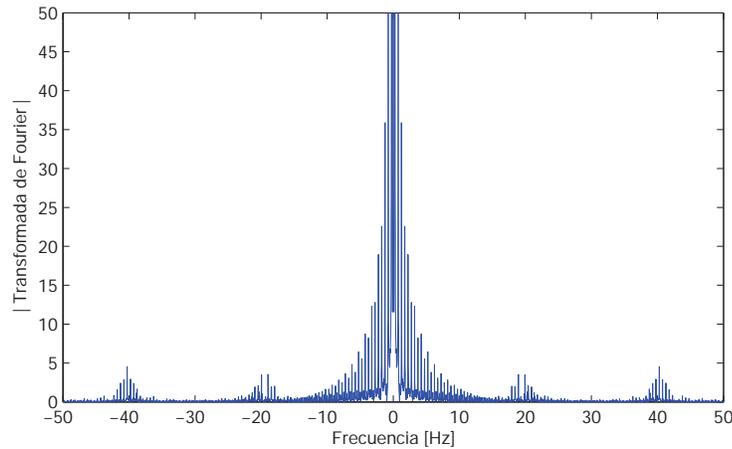


Figura 2.44: Espectro de potencia de la señal obtenido con la transformada de Fourier.

- Posteriormente se procedió a obtener el parámetro d_0 en el que se presenta el comportamiento no lineal, se utilizó el método de tangentes, que consiste en ubicar el punto de intersección entre dos rectas tangentes a la señal, obtenidas a través de regresión lineal de los puntos donde la señal es significativamente lineal y finalmente ubicar el punto correspondiente en la señal.

Para ubicar los puntos con los que realizar la regresión lineal de la primera sección se derivó la señal para ubicar el punto de menor cambio, a partir del cual se realizó una regresión lineal con 5 puntos anteriores y 5 posteriores de los datos. Para la obtención del punto central de la segunda recta se usó la mitad del dominio del primer ciclo, de 0 a 200 ms y también se utilizaron 5 puntos hacia ambos lados.

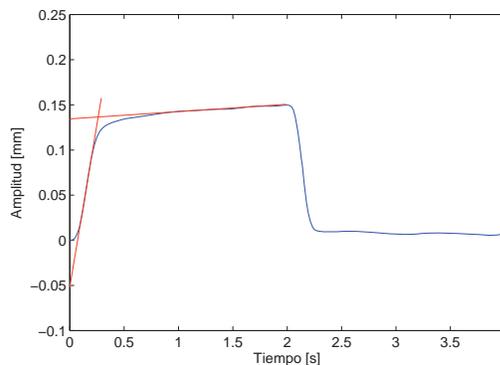


Figura 2.45: Gráfica con ambas rectas de regresión lineal de la señal en el primer ciclo.

- Una vez obtenidas las ecuaciones de las regresión lineal se construyó un sistema de ecuaciones con estas para obtener el punto de intersección. De éste último se tomó el valor de su abscisa t y de la lista de valores de la señal se encontró el punto más parecido, comparando cada uno hasta obtener una diferencia mínima. Con este valor de "t" se obtuvo el valor de d_0 correspondiente (Figura 2.46).

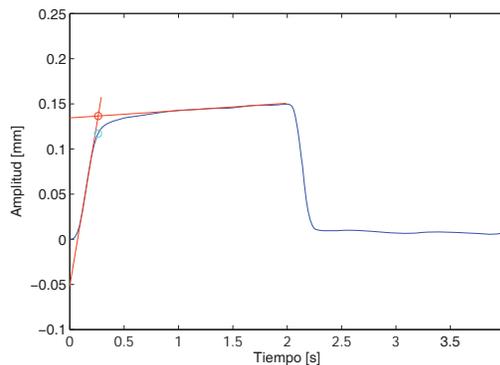


Figura 2.46: Localización de puntos.

En la Figura 2.47 se presenta el diagrama resumido del procedimiento para el manejo y procesamiento de las señales para obtener d_0 y calcular δ .

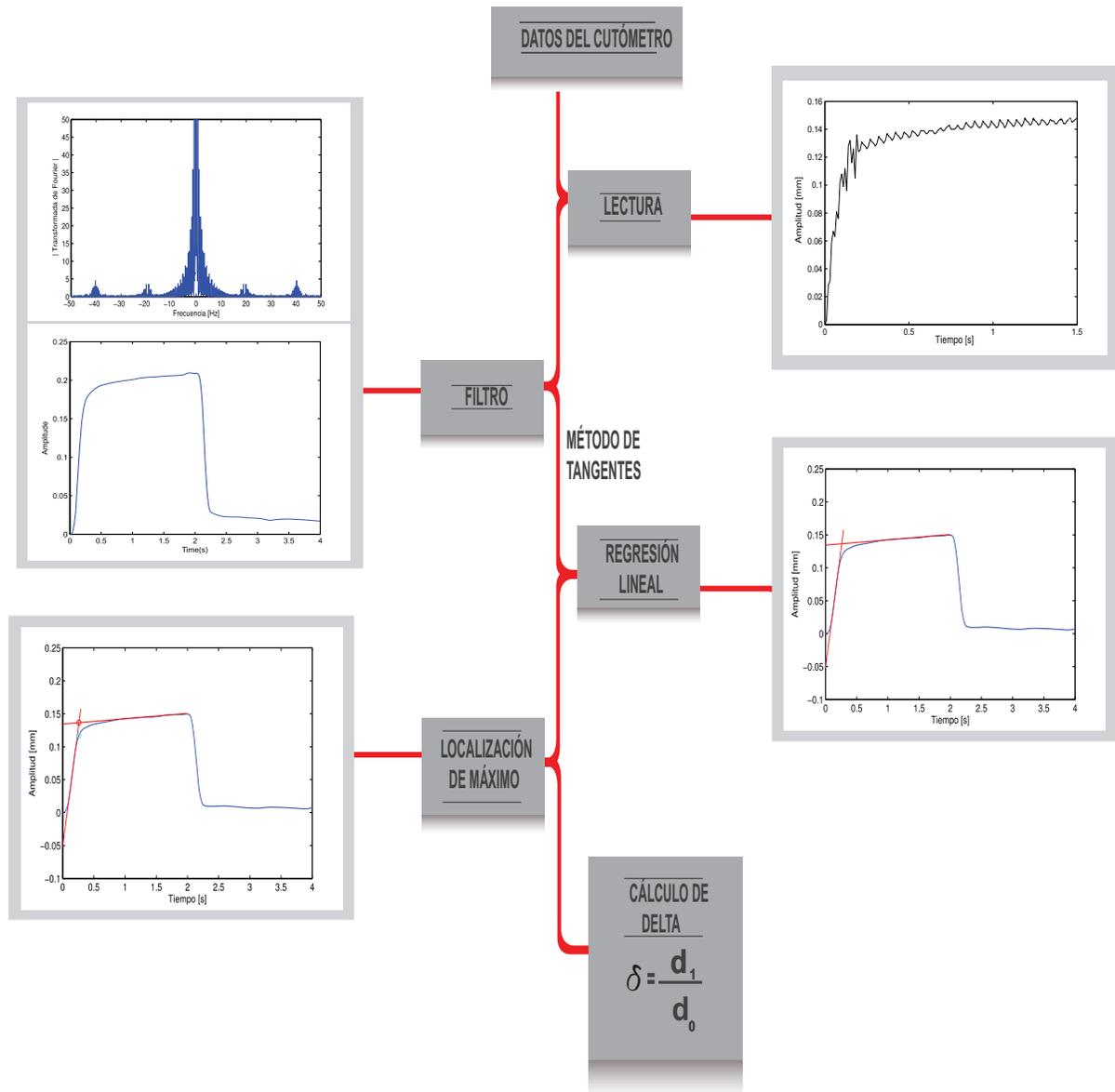


Figura 2.47: Diagrama de flujo con procedimiento para el cálculo de la rigidez de la piel. P: Presión aplicada, d: Altura de la columna de piel. Huang and Zheng (2015)

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados producto de las mediciones realizadas en los 3 sujetos sanos y los derivados del diseño experimental. El capítulo se dividirá en 4 secciones. En la primera se mostrarán los resultados obtenidos de los datos del experimento factorial donde se pueden observar las variaciones de las mediciones debidas a diferentes parámetros. En la segunda sección se mostrarán los resultados obtenidos del análisis estático mediante elementos finitos del dispositivo auxiliar para controlar la posición de referencia y la posición final de los sujetos en cada uno de los movimientos, en la tercera sección se mostrarán los resultados de campos de desplazamiento y deformación en el antebrazo y mano mediante uso de la técnica de CDI, Por último en la cuarta sección se mostrará la rigidez de la piel en el eje longitudinal del antebrazo y mano, medida con el dispositivo Cutómetro.

3.1. Análisis Factorial

De la colección de imágenes de los campos de deformación y desplazamiento de la flexión de articulación metacarpofalángica en la imagen de su posición máxima se tomaron los valores máximos de desplazamiento en dirección X, Y y la deformación.

Como herramienta para conocer la variabilidad de los experimentos se calcularon los porcentajes de variación de las tres mediciones diarias con los datos de desplazamiento en la dirección Y, ya que esta dirección permite observar las zonas de reclutamiento y la cantidad de piel desplazada, con esto se construye la Figura 3.1 donde se puede observar la variación de los datos medidos durante los tres días de pruebas en cada uno de los sujetos.

En los primeros dos días de pruebas las variaciones de los datos fueron mínimas, manteniéndose abajo del 10 %, sin embargo el último día todos los sujetos presentaron una gran variación respecto a días anteriores y solo el sujeto 1 se mantuvo bajo el 10 %. El sujeto 2 obtuvo un coeficiente de arriba de 15 %, y el sujeto 3 fue aumentando su porcentaje de variación a lo largo de los tres días hasta llegar aun máximo de 30 %. (Figura3.1).

Debido a esta variación se analizaron las fotografías tomadas con el equipo ARAMIS y se observó la falta de control en el rango de movimiento de los sujetos desde la posición inicial a la final. El intervalo de movimiento de cada uno de los sujetos se controló con la implementación de un dispositivo auxiliar que permite restringir la posición final e inicial de la mano.

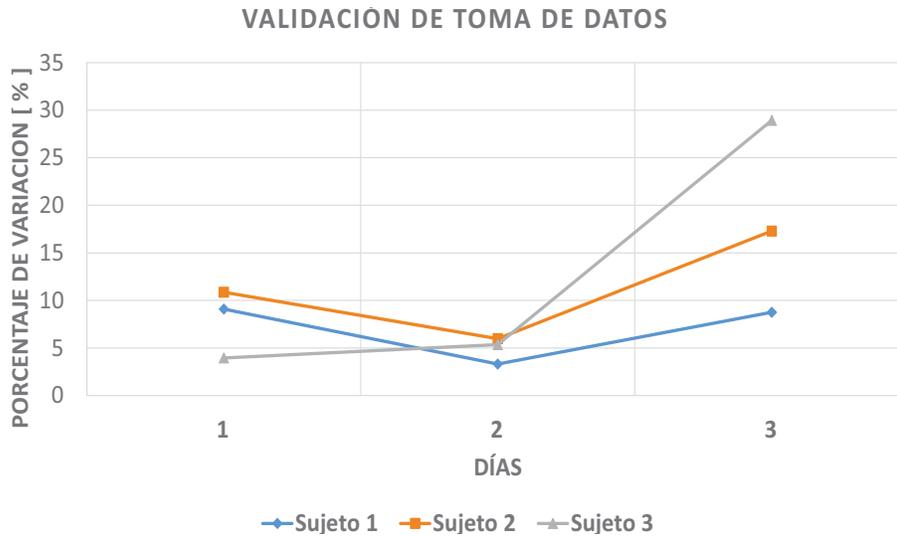


Figura 3.1: Se muestran los porcentajes de variación de los tres sujetos, donde se observa que el día 3 todos los sujetos tuvieron una gran variación entre sus mediciones comparada con los días anteriores, debida a las variaciones en la posición inicial de los sujetos. Día 1: Pintura digital con patrón aleatorio de pintura acrílica negra, Día 2: Maquillaje artístico con patrón de puntos aleatorio de pintura acrílica negra, Día 3: Maquillaje artístico con patrón aleatorio de polvo de carboncillo y polvo de gis gris.

El análisis intrasujeto se realizó para conocer la variación de los datos de cada sujeto a lo largo de los tres diferentes días. Se calculó el porcentaje de variación con el promedio de cada día, se utilizaron los valores obtenidos de la deformación (Figura 3.6) y los desplazamientos en la dirección X (Figura 3.4) y Y (Figura 3.5).

El análisis intrasujeto se realizó para conocer la variación de los datos de cada sujeto a lo largo de los tres diferentes días. Se calculó el porcentaje de variación con el promedio de cada día, se utilizaron los valores obtenidos de la deformación y los desplazamientos en la dirección X y Y.

En el desplazamiento sobre el eje X la variación máxima en el sujeto 1 ocurrió hacia medial de 24 %, aunque hacia cubital la variación fue muy cercana (23 %). Para el sujeto 2 la mayor variación se encontró en el desplazamiento X de lado cubital (26 %) y en radial de manera menor (25 %). El sujeto 3 tuvo una variación alta en desplazamiento X hacia medial de 30 %, en lateral el porcentaje fue de 20 % (Figura 3.2). Para los tres sujetos la variación en deformación fue la menor, estando todos alrededor del 10 %.

La variación en los máximos cubitales y radiales se podría deber a la colocación del antebrazo en la posición inicial en la mesa. Lo que se solucionó con la localización y uso de referencias anatómicas.

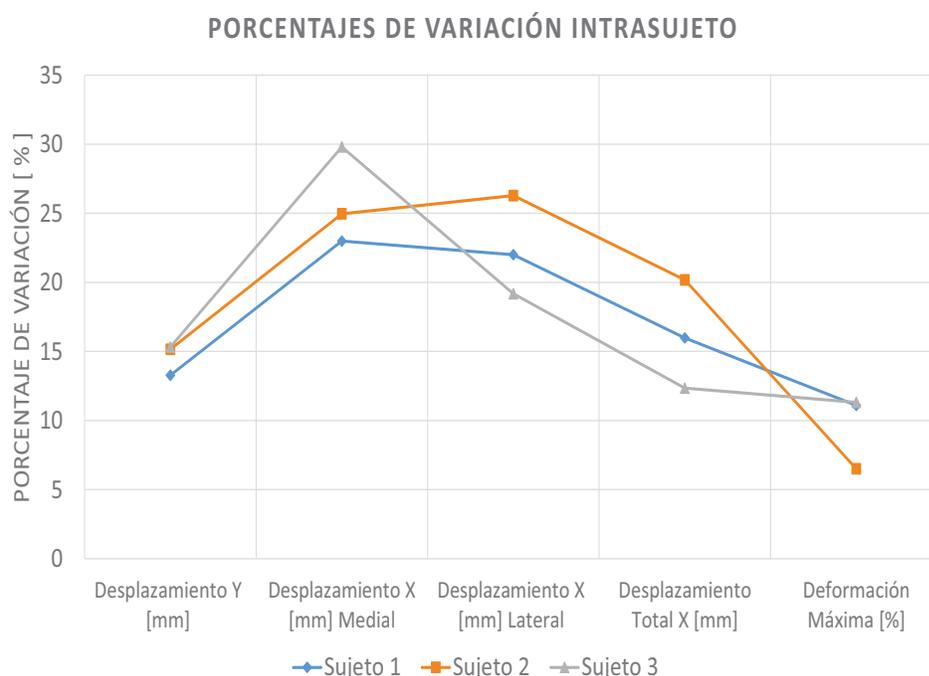


Figura 3.2: Análisis intrasujeto, donde se muestran los porcentajes de variación de cada valor máximo en tres gráficas.

Para el análisis intersujeto se promediaron los valores de los tres días de cada sujeto, obteniendo un valor por sujeto. Con éstos valores promedio de los 3 sujetos se calculó el porcentaje de variación entre ellos.

Las variaciones mayores ocurrieron en el desplazamiento X hacia medial causado por la falta de control de la posición inicial. Y la variación menor ocurrió en el desplazamiento Y con 4%. Con el análisis intrasujeto se demostró que la deformación mostraba un valor con menos variación. (Figura 3.3)

El porcentaje de variación de la deformación fue de 25 %, mucho más alto que el porcentaje de variación de los sujetos en el análisis intrasujeto, lo que indica una variación grande con respecto a los tres sujetos. Ésta diferencia podría ser debida a factores inherentes de cada individuo como complexión, peso, masa muscular, etc.

A continuación se muestran los desplazamientos y deformaciones obtenidos con la técnica Correlación de Imágenes Digitales. Para esta serie de experimentos no se utilizó el dispositivo de posicionamiento. Se muestran tres mediciones de cada sujeto, una por día. Cada fila representa un sujeto diferente, y cada columna un día diferente. Se presentan 3 matrices de mediciones, donde la Figura 3.4 muestra los desplazamientos en dirección X, la Figura 3.5 muestra los desplazamientos en la dirección Y, y la Figura 3.6 muestra la deformación máxima.

En la Figura 3.4 se puede observar que aunque los valores para cada sujeto y cada día son diferentes existe un patrón donde los máximos de desplazamiento en el eje transversal de la mano se presentan aproximadamente en el nudillo quinto y segundo, en este caso el signo negativo de la escala de colores nos indica el sentido del desplazamiento siendo el color azul el desplazamiento hacia cubital para el caso de los primeros dos sujetos y hacia radial en el caso del último sujeto, el color rojo nos indica un desplazamiento hacia radial para el caso de los dos primeros sujetos y hacia cubital para el caso del tercer sujeto.

En la Figura 3.5 se puede observar de igual manera un patrón muy similar en todos los sujetos aunque los valores sean diferentes, en esta matriz el máximo desplazamiento en el eje longitudinal del antebrazo se puede apreciar en el tercer nudillo para todos los sujetos, el valor negativo del desplazamiento nos indica el sentido en el cual se da este desplazamiento.

En la Figura 3.6 es un poco menos apreciable a primera instancia un patrón, sin embargo al analizar detalladamente cada uno de los sujetos se puede observar que existe en cada uno una zona de deformación mayor que se presenta entre los nudillos.

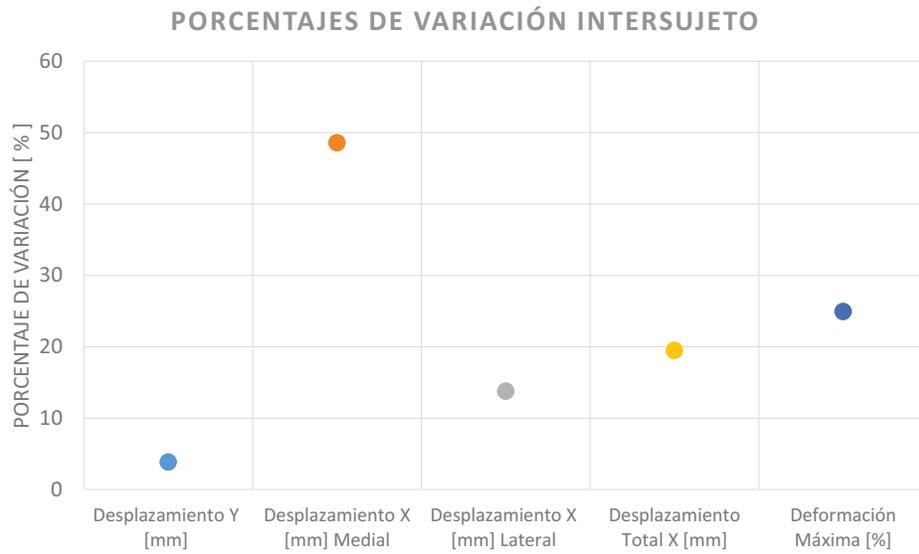


Figura 3.3: Análisis intersujeto, se muestran los porcentajes de variación calculados con los valores de cada sujeto. La máxima variación en dirección X medial es debida a que los sujetos no tuvieron un control preciso en las posiciones inicial y final.

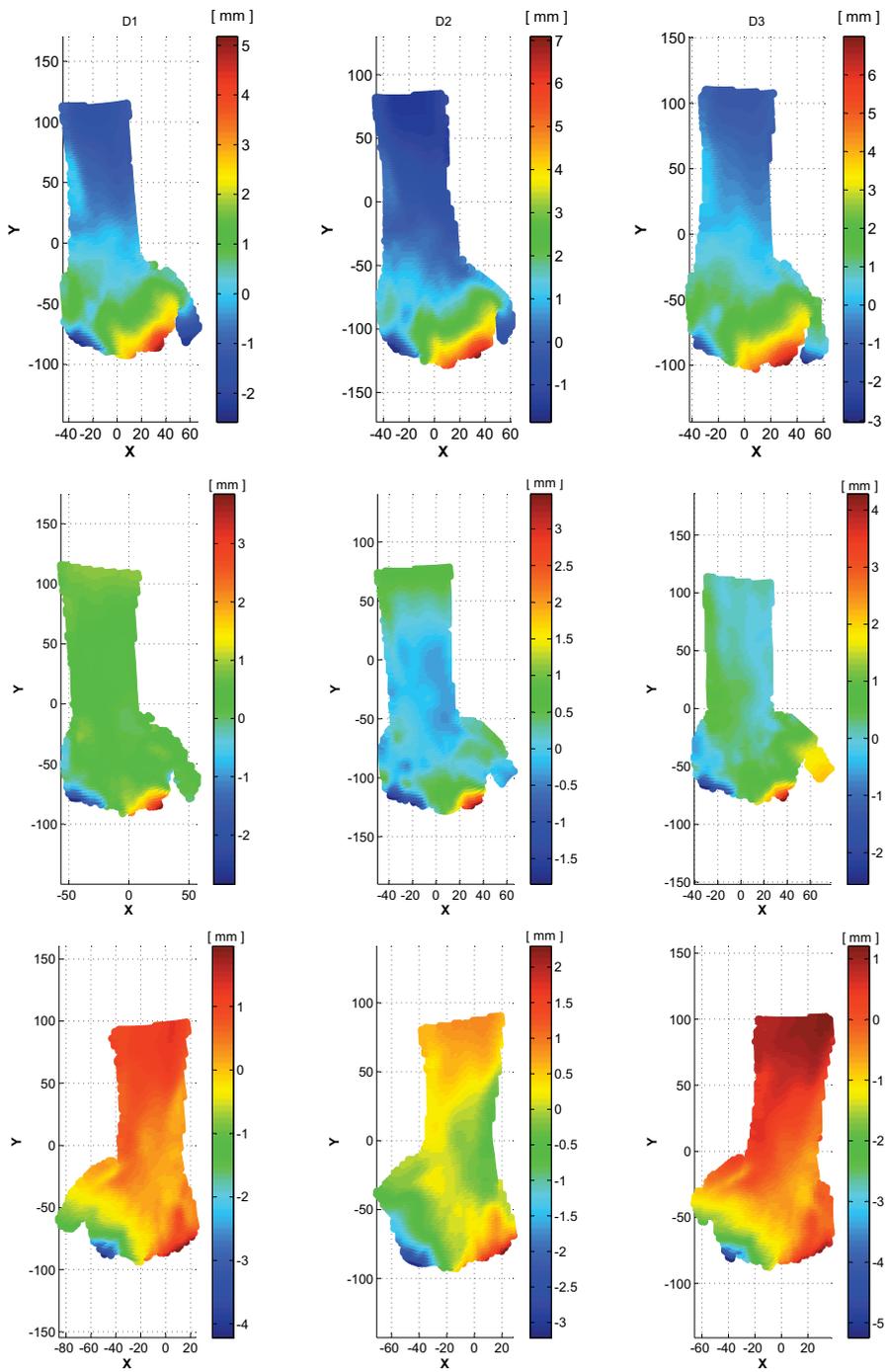


Figura 3.4: Matriz del campo de desplazamiento en los tres sujetos en el eje X .

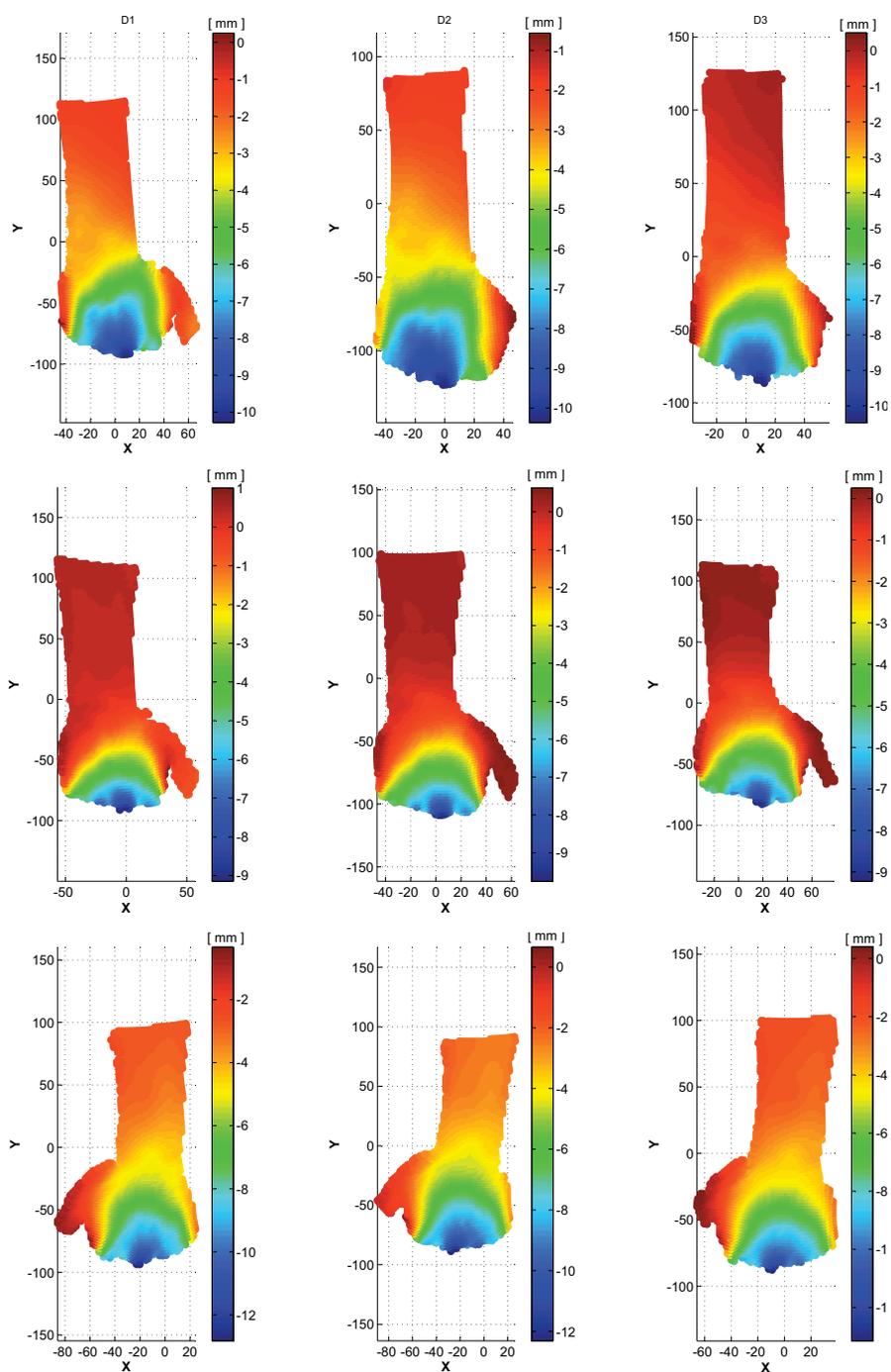


Figura 3.5: Matriz del campo de desplazamiento en los tres sujetos en el eje Y .

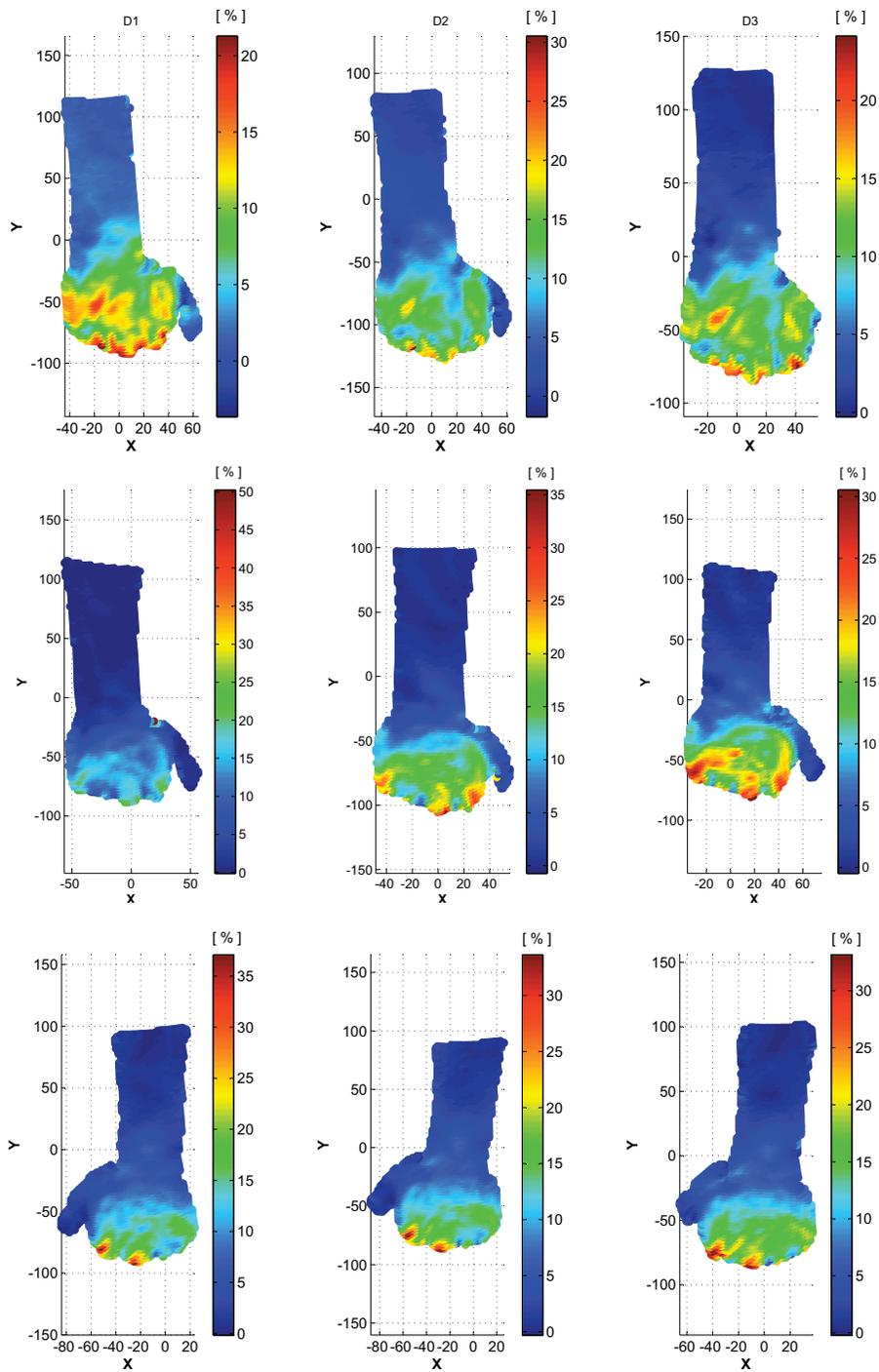
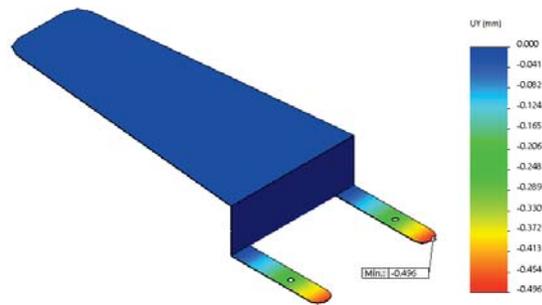


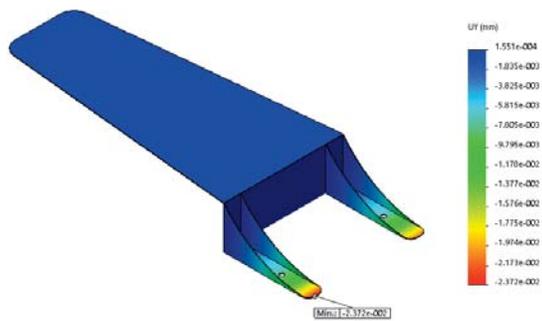
Figura 3.6: Matriz del campo de deformación en los tres sujetos.

3.2. Análisis FEM de dispositivo auxiliar

Al realizar el análisis por elementos finitos en el diseño del dispositivo auxiliar se obtuvieron mapas de los esfuerzos máximos y el desplazamiento de la pieza en los que se observan en los puntos más extremos los efectos del peso de la estructura. En la Figura 3.7 se puede observar la pieza final con refuerzos en el ángulo que se forma de 90° , afectada por el peso de las piezas que deben soportar en su extremo. Los resultados se visualizan con una escala de color sobre la pieza con la que se pueden identificar las zonas de mayor desplazamiento. Se observaron diferencias notables en ambos diseños, los esfuerzos visiblemente se concentran en los ángulos de 90° en el que no cuenta con refuerzos, contrario al que sí cuenta ellos en donde se distribuyen de mejor manera.



(a)



(b)

Figura 3.7: Visualización de desplazamiento, consecuencia de la deformación de la pieza en mm. a) Pieza sin refuerzos (mínimo desplazamiento= 0.496 mm). b) Pieza con refuerzos en ángulo de 90° (mínimo desplazamiento=0.02372 mm).

3.3. Campos de desplazamiento

En esta sección se muestran el resultado de los campos de desplazamiento en dirección X y dirección Y. Los campos mostrados corresponden a un solo sujeto y de la imagen donde se aprecia el máximo arco de movimiento para los 4 movimientos contemplados en el experimento.

3.3.1. Flexión de articulación metacarapofalángica

Al realizarse éste movimiento se puede prever que existirá un reclutamiento de piel no solo del dorso de la mano sino también del antebrazo. En la Figura 3.8 (a) se puede observar que el reclutamiento se lleva acabo desde un tercio distal del antebrazo y que existe un patrón semicircular de desplazamiento con su centro aproximadamente en el tercer nudillo.

En la Figura 3.8(b) se observa un desplazamiento en dirección X a ambos lados de la mano en la zona de la segunda y quinta cabeza de metacarpiano, aunque es importante destacar que el lado radial el que requiere más desplazamiento de piel para este movimiento.

3.3.2. Puño compuesto

El desplazamiento en la dirección Y se muestra en la Figura 3.8 (c) aquí se observa un patrón semicircular con una magnitud de desplazamiento menor al observado en flexión metacarpofalángica. En la dirección X, (Figura 3.8 (d)) se encuentra el máximo desplazamiento en el lado cubital. Para el puño compuesto, el desplazamiento mayor de piel se realiza en dirección X.

3.3.3. Flexión y Extensión de muñeca

En la flexión y extensión de muñeca se observó que sólo se requiere del desplazamiento en dirección Y para realizar los movimientos mencionados, ya que es mínima la contribución en la dirección perpendicular. El patrón de desplazamiento en la flexión de muñeca es semicircular en su extremo inferior radial, pero en el resto del brazo el patrón resulta irregular debido posiblemente al cambio de volumen debido a contracción muscular al realizar el movimiento. (Figura 3.8(e))

La extensión de muñeca presenta un patrón semicircular en el primer tercio distal y después de éste el patrón se va modificando por la anatomía del antebrazo. (Figura 3.8(f))

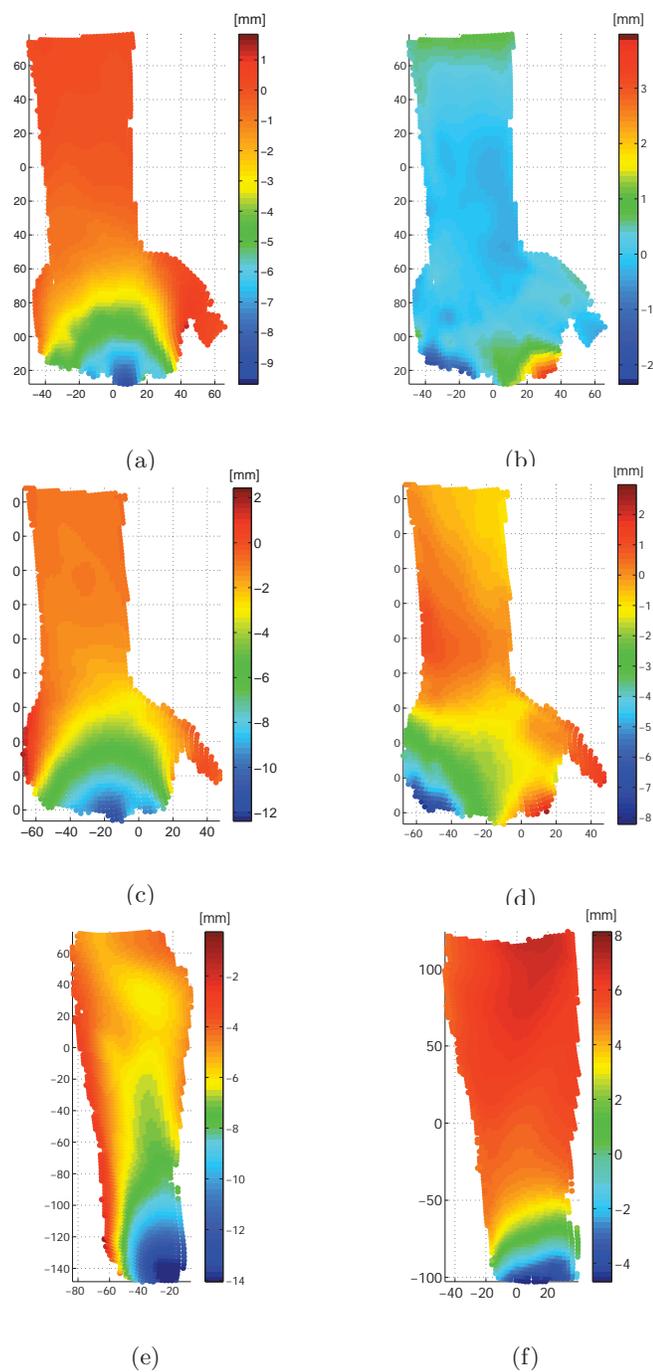


Figura 3.8: Campos de desplazamiento en mm. a) Flexión de articulación metacarpofalángica, desplazamiento en dirección Y. b) Flexión de articulación metacarpofalángica, desplazamiento en dirección X. c) Puño compuesto, desplazamiento en dirección Y d) Puño compuesto, desplazamiento en dirección X. e) Flexión de muñeca, desplazamiento en dirección Y. f) Extensión de muñeca, desplazamiento en dirección Y

3.4. Deformación

En esta sección se presentan el resultado de los campos de deformación causados por el movimiento articular de los sujetos. Los campos mostrados corresponden a un solo sujeto en su arco máximo de movimiento para los 4 movimientos contemplados en el experimento.

Para la flexión de la articulación metacarpofalángica la deformación mayor se ubica en las cabezas del 2° al 5° metacarpiano y en el espacio interfalángico entre el 2°-3° y de 3°-4° (Figura 3.9 (a)). Siendo en el 3° metacarpiano donde ocurre la mayor deformación. La deformación ocurre en resto de la mano pero en menor magnitud, sin embargo en el antebrazo no se registra deformación alguna.

En el puño compuesto la deformación mayor ocurre en un área más grande que en la flexión metacarpofalángica, ésta se ubica en las cuatro cabezas de los metacarpianos, excepto en el 4°, y se extiende en los extremos radial y distal hacia proximal. Así mismo los espacios interfalángicos sufren una gran deformación. En el resto de la mano la deformación se vuelve más uniforme tomando un valor aproximado promedio de la mitad del máximo (Figura 3.9 (b)).

Para la flexión de muñeca la máxima deformación se concentra en el lado inferior radial del antebrazo y tiene un patrón semicircular parecido al de desplazamiento. En la zona restante del antebrazo la deformación es pequeña pero revela superficialmente el perfil del músculo que actúa en este movimiento.

El campo de deformación en la extensión de muñeca tiene su zona de mayor deformación ubicada en el primer tercio distal del antebrazo con una forma irregular debida el hueso del antebrazo. En el resto del antebrazo la deformación es más uniforme hasta llegar a cerca de cero deformación desde el segundo tercio distal hasta el pliegue del codo.

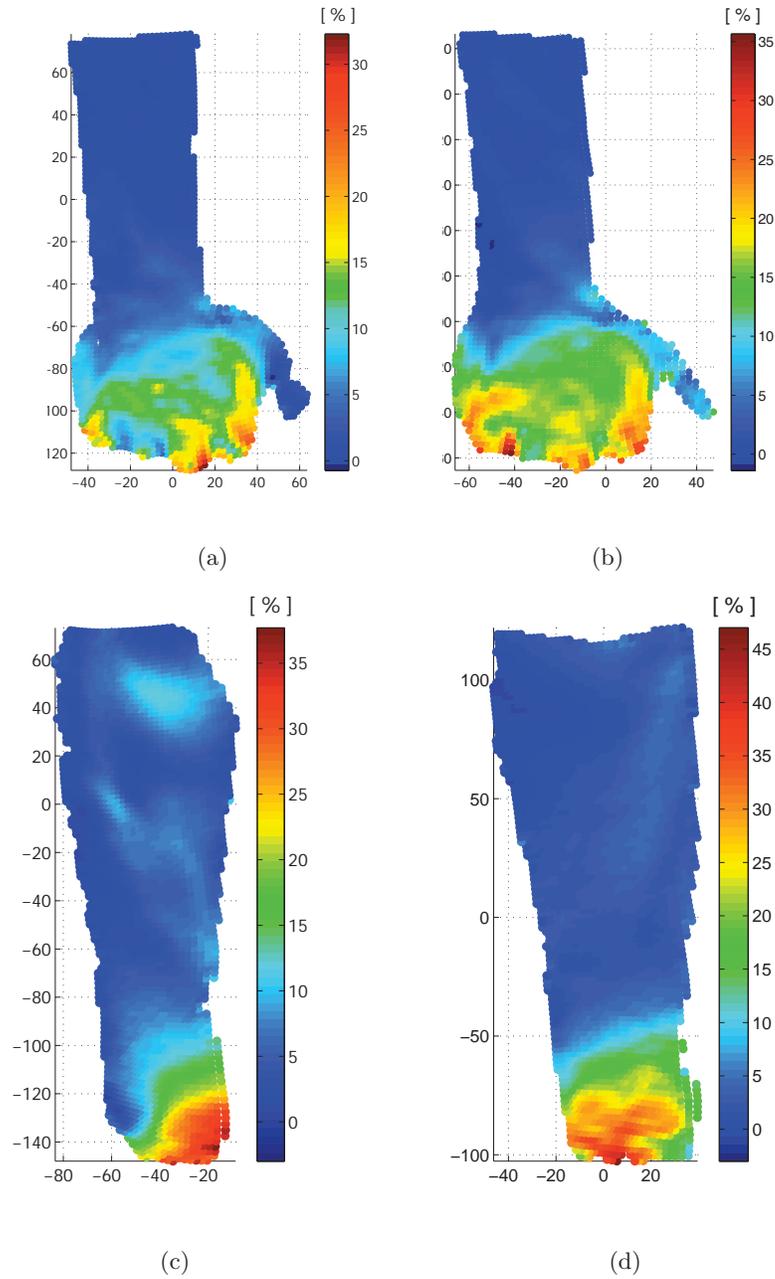


Figura 3.9: Campos de deformación de los cuatro movimientos en porcentaje. a) Flexión de articulación metacarpofalángica. b) Puño compuesto. c) Flexión de muñeca. d) Extensión de muñeca. (La escala de colores representa el porcentaje de deformación.)

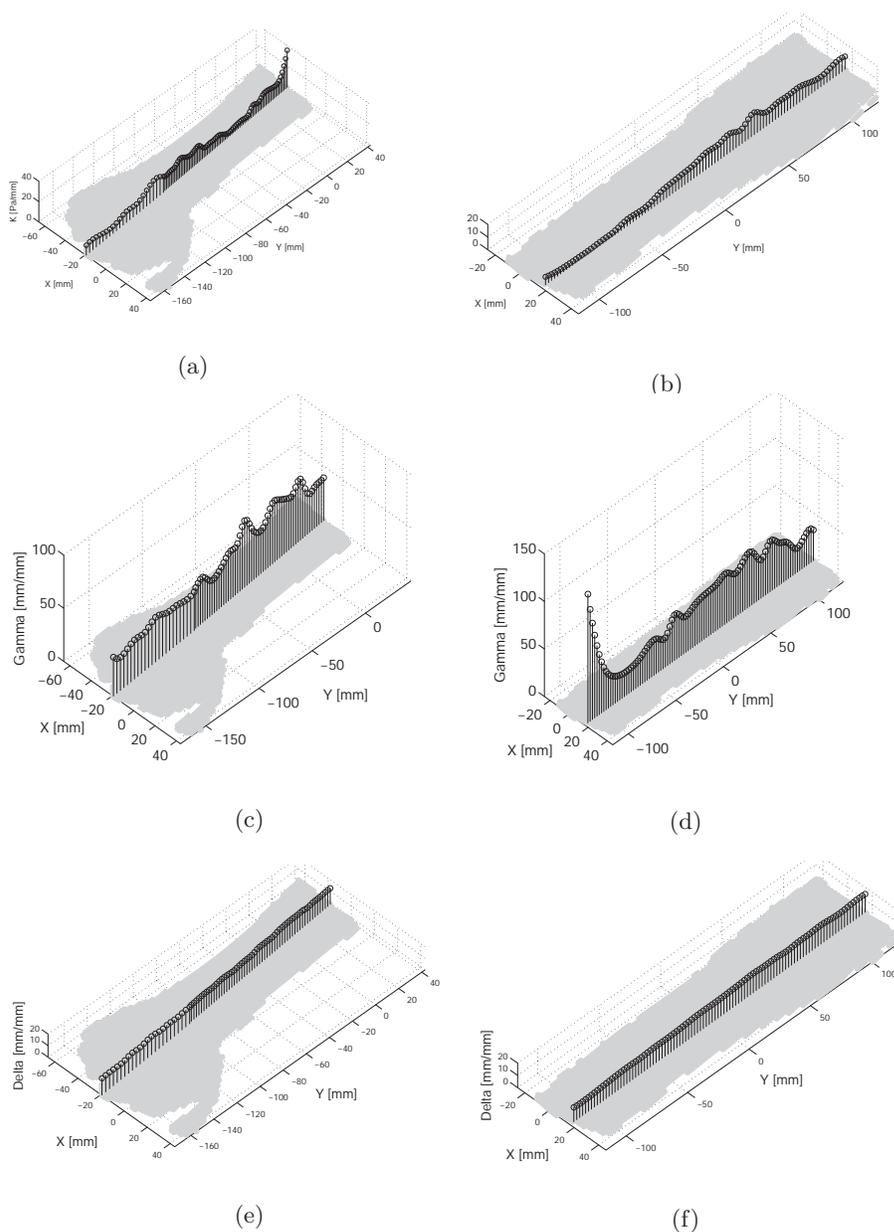
3.5. Perfiles k , γ y δ 

Figura 3.10: a) Rigidez en antebrazo y dorso de la mano en pronación. b) Rigidez en antebrazo en supinación (a) y (b) están multiplicados por un factor de 10^{-5} . c) Parámetro γ en antebrazo y dorso de la mano en pronación. d) Parámetro γ en antebrazo en supinación, (c) y (d) están multiplicados por un factor de 10^2 . Los valores mostrados representan el promedio de los valores de los tres sujetos, (e) y (f) están multiplicados por un factor de 10.

En esta sección se muestran los valores calculados de los parámetros k , γ y δ con los datos obtenidos del dispositivo Cutómetro, donde el eje Z representa el valor del parámetro. Estos valores se sobrepusieron en mallas obtenidas del sistema ARAMIS de un sujeto para generar la superficie del antebrazo.

En la Figura 3.10 (a) y (b) se muestran los valores del parámetro k (rigidez) a lo largo del antebrazo y dorso de la mano. La Figura 3.10 (a) muestra el perfil promedio obtenido con los datos de los tres sujetos en la mitad del antebrazo en pronación y el dorso de la mano. De esta imagen se puede observar que desde el tercer nudillo hasta el pliegue de la muñeca la rigidez aumenta de manera uniforme, lo que indicaría que la piel del pliegue de la muñeca se deforma menos que en el nudillo, si se aplicara la misma carga en ambos puntos. A lo largo del antebrazo el comportamiento es difícil de describir ya que no presenta ningún patrón identificable. En la Figura 3.10 (b) se observa el patrón de rigidez en el antebrazo en supinación, en la que se observa que desde el pliegue de la muñeca hasta el pliegue del codo, la rigidez va aumentando de manera casi uniforme, con algunas variaciones en el segundo tercio distal, lo que significa una deformación menor de la piel en pliegue del codo que en el de la muñeca al aplicar una misma carga.

El parámetro γ , que representa el grado de reblandecimiento de la piel después de n ciclos de succión se muestra en la Figura 3.10 (c) y (d). Para el caso de antebrazo en pronación y el dorso de la mano se muestra la Figura 3.10 (c), donde se puede observar que la piel de todo el dorso de la mano tiene un reblandecimiento (parámetro γ) casi igual. En el resto de la imagen, el antebrazo muestra varias zonas diferentes entre sí del parámetro γ que deben ser efecto de la pretensión que la piel tiene. La Figura 3.10 (d) muestra el perfil de γ del antebrazo en pronación. En la primera parte de la figura, cerca del pliegue de la muñeca, se observa un γ más alto que en todo ese lado del antebrazo, que implica que esa parte del antebrazo es más susceptible a un mayor reblandecimiento. Además, el centro del antebrazo se observa una ligera tendencia a un valor constante.

En la Figura 3.10 (e) se observa el perfil del parámetro δ , que representa el creep (fluencia) del material después de un ciclo de succión. En la Figura 3.10 (e) se muestra el caso del dorso de la mano y antebrazo en pronación, se puede observar que este parámetro se encuentra alrededor de los valores 1.3 y 1.5, por lo que son muy parecidos a lo largo de toda la superficie. Algo semejante sucede en la Figura 3.10 (f) con el perfil de δ en el antebrazo en supinación, ya que los valores se encuentran entre 1.2 y 1.6 a lo largo de todo el antebrazo, con lo que se puede observar que el perfil es casi constante.

Capítulo 4

Discusión y Conclusiones finales

4.1. Análisis Factorial

Antes de comenzar las mediciones se tenía la inquietud de conocer la confiabilidad del equipo al realizar varias mediciones de un mismo sujeto. Para poder justificar que una medición es suficiente para obtener datos confiables y así, acelerar la toma de datos y reducir el volumen de datos para analizar. Con este análisis se esperaba encontrar la variación de los valores de desplazamiento y deformación de cada sujeto en diferentes condiciones y las diferencias entre los sujetos. Se encontró que las variaciones más grandes se debían al posicionamiento de los sujetos en la prueba. Los datos de deformación fueron los más confiables tomando como base su bajo porcentaje de variación, y los de menor confiabilidad fueron los del desplazamiento medial y lateral (30 %). De estos resultados se desprende la idea de restringir el movimiento con un dispositivo y el uso de marcas anatómicas para posicionarse. En la deformación se obtuvo un porcentaje de variación bajo que permite el uso de sus datos con mayor seguridad. Finalmente este tipo de diseño experimental no permite observar el comportamiento de diferentes factores como la humedad de la piel, masa muscular, índice de masa corporal, etc. Para mejorar la medición se puede normalizar las dimensiones de las extremidades medidas para una comparación más efectiva entre los datos de los sujetos.

Este dispositivo permitió a controlar las posiciones de inicio y fin para los movimientos de flexión de muñeca, flexión metacarpofalángica, puño compuesto y extensión de muñeca y se diseñó con para permitir la visualiza-

ción de la región dorsal del antebrazo y mano y región ventral del antebrazo.

Si se requiriera visualizar otra zona de la mano o bien una solicitud de movimiento diferente se deberá fabricar otro dispositivo que permita tener un control sobre las especificaciones del movimiento a realizar y la zona de interés. En Maiti et al. (2016) se puede observar un ejemplo de un dispositivo diseñado especialmente para el movimiento de flexión-extensión del antebrazo.

4.2. Campos de desplazamiento y deformación

En la literatura no existen reportes de campos de deformación o desplazamiento de la superficie de la piel, lo más cercano es un mapa de reclutamiento en unidades funcionales de (Richard et al., 2009) en el que se registran los porcentajes de reclutamiento de la piel al realizar un movimiento articular. Los resultados indican que en la flexión de articulación metacarpofalángica y el puño compuesto se tiene un patrón semicircular de desplazamiento con centro en el tercer nudillo para la dirección Y y un patrón asimétrico en el eje X, la deformación máxima se ubicó en el espacio interfalángico. Para la flexión de muñeca también se observó un patrón semicircular pero con centro en el borde inferior derecho del antebrazo y la deformación máxima en el mismo borde, la extensión de muñeca muestra un patrón semicircular con centro en el medio inferior del antebrazo y la deformación máxima se localizó en el primer tercio distal del antebrazo. Los patrones semicirculares pudieron deberse a la distribución de los nudillos en la mano. En el antebrazo para la flexión y extensión de muñeca los patrones se podrían deber a que al llegar a la posición máxima el extremo del antebrazo tiene forma semicircular. Existen zonas de poca deformación en el antebrazo que parecen deberse a la activación muscular al realizar los movimientos. El experimento estuvo limitado por el rango de visión de las cámaras ya que en ciertos momentos del experimento en las fotografías tomadas se perdían de vista las falanges proximales, ya que había un cambio de dirección en el plano de los dedos y la cámara no podía observarlos. Para obtener un campo de desplazamiento y deformación más completo se debería tener acceso a más cámaras que aumenten el rango de visión del equipo.

4.3. Parámetros k , γ y δ

(Huang and Zheng, 2015) en su libro *Measurement of Soft Tissue Elasticity in vivo* menciona las ecuaciones (1.1), (1.2) y (1.3) para el cálculo de los parámetros k , γ y δ para obtener el comportamiento de la piel con el método de succión. En esta tesis se obtuvieron perfiles de dichos parámetros a lo largo del antebrazo en pronación y supinación para cada sujeto. En las gráficas mostradas en la Figura 3.10 (a) y (b) se puede ver que los valores del parámetro k varía a lo largo del antebrazo, esto puede deberse a que la pre-tensión de la piel en cada zona. La Figura 3.10 (c) y (d) muestran el parámetro γ en el que se graficaron la diferencia entre d_{10} y d_1 . Si la altura máxima de cada ciclo fuera la misma, γ sería cero, pero debido a que se obtuvo un valor diferente a cero, la altura máxima en cada ciclo tiende a aumentar conforme aumentan los ciclos en la prueba de succión. Esto debido a que no se le permite a la piel retornar a su estado inicial, por lo que esta tiende a fluir ya que es un sólido viscoelástico. En la Figura 3.10 (e) y (f) se graficaron los perfiles δ , en los cuales la variación a lo largo del antebrazo fue poca ya que todos los valores se encuentran entre 1.3 y 1.6. Este resultado significa que la razón entre la altura máxima (d_1) y la altura lineal máxima (d_0) es casi constante en todos los puntos medidos del antebrazo y dorso de la mano. Debido a que se trata del mismo material, la fluencia de la piel ante una presión constante debe ser la misma en cualquier punto.

Como trabajo futuro se propone hacer la prueba en más sujetos y más repeticiones en cada sujetos con el fin de tener un mejor promedio de los parámetros k y γ a lo largo de la mano, ya que eliminaría errores en la medición con el dispositivo Cutómetro.

Así mismo se propone hacer una prueba para conocer el tiempo de relajación de la piel, aplicando una presión y tiempo de aplicación similar a la usada en este trabajo, pero con un solo ciclo y un tiempo de relajación más amplio para captar toda la información. Para conocer un módulo de Young de la piel se plantea la posibilidad de hacer un experimento con el dispositivo Cutómetro a presión variable, como el realizado por Diridollou et al. (2000).

Apéndice A

Medición de sujetos

Para la elección de el volumen de medición se obtuvieron las dimensiones de los antebrazos y manos de 20 sujetos. Para lo cual se eligió un grupo control de sujetos del genero masculino con edades entre 22 y 27 años. Las mediciones se realizaron en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y se midió el antebrazo y mano del lado dominante. Se midió desde el pliegue del codo al pliegue de la muñeca para el antebrazo y del pliegue del codo a la punta de la tercera falange para la mano.

En la Tabla A.1 se muestran las edades y medidas de todos los sujetos. Las unidades de longitud son milímetros.

De estos datos se obtuvieron los promedios y sus desviaciones estándar para tener rangos de dimensiones.

De la Tabla A.2 se tomó la mitad del promedio de la mano y del antebrazo para obtener el área de medición para el movimiento de flexión de articulación metacarpo-falangica la cual dio una distancia de 285.5 mm, y para los otros tres movimientos se utilizó el promedio del largo del antebrazo ya que la superficie de la mano no se midió para estos casos la cual fue de 288 mm.

De acuerdo a estas medidas se eligió el volumen más adecuado para todo el experimento tomando en cuenta los volúmenes disponibles por el equipo, por lo que se eligió el volumen de 300 mm X 275 mm X 120 mm.

Tabla A.1: Datos obtenidos de las mediciones.

Edad	Antebrazo	Mano
21	31	18
22	28	18.5
21	30	19
24	28	20
21	31	18
22	28	18
23	28	16
23	26	18
23	29	19
22	29	17
25	29	18
27	28	18
23	28	18
22	29	18
23	30	18
23	29	20
22	28	19
22	30	19
22	30	19
23	27	19

Tabla A.2: Promedios de las mediciones.

Edad	Antebrazo	Mano
22.7± 1.42	288± 12.8 mm	183.7± 9.3 mm

Apéndice B

Método de tangentes

Filtro paso bajas

```
fc=50 % Frecuencia de corte  $W_n=(2/F_s)*fc$ ;  
b=fir1(20,Wn,'low',kaiser(21,3));  
yin=filter(b,1,x); % Aplicación del filtro
```

Obtención de D_0

Regresión lineal principal

```
[r1, m1, b1]=regression(tp,yp,'one');  
b1r=repmat(b1,30,1);  
Yreg1=m1*t+b1r;
```

Regresión lineal superior

```
[r2, m2, b2]=regression(ts,ys,'one');  
b2r=repmat(b2,200,1);  
Yreg2=m2*t+b2r;
```

Resolución de sistema de ecuaciones

```
m=[-m11; -m21];  
b=[b1; b2];  
S=m;
```

Ubicar punto Y en la señal

```
while dif > 2 % Cuando el error sea menor a 2 %  
p=p+1; % Índice para localizar el punto más cercano  
dif=((S(1,1)-t(p,1))*100)/S(1,1); %Calculo del porcentaje de error
```

82 Método de tangentes

Obtención de d_1 y d_{10}

$d_1 = \max(y(1:400), 1)$

$d_{10} = \max(y(3600:4000), 1)$

Cálculo de parámetros

$K = P/d_1$; % Rigidez [Pa/mm]

$\Gamma = (d_{10} - d_1)/d_1$ % Softening (Reblandecimiento) [mm/mm]

$\Delta = (d_1/d_0)$ % Creep (Fluencia) [mm/mm]

Bibliografía

- Agache, P., C. Monneur, J. Leveque, and J. De Rigal
1980. Mechanical properties and young's modulus of human skin in vivo. *Archives of dermatological research*, 269(3):221–232.
- Agache, P., D. Varchon, A. Rochefort, and P. Humbert
1992. Noninvasive assessment of a biaxial young modulus of human skin in vivo. In *9th International Symp. Bioeng. Skin, Sendai*.
- Boyer, G., C. P. Mattei, J. Molimard, M. Pericoi, S. Laquieze, and H. Zahouani
2012. Non contact method for in vivo assessment of skin mechanical properties for assessing effect of ageing. *Medical engineering & physics*, 34(2):172–178.
- Chu, T., W. Ranson, and M. A. Sutton
1985. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental mechanics*, 25(3):232–244.
- Delalleau, A., G. Josse, J. Lagarde, H. Zahouani, and J. Bergheau
2008. Characterization of the mechanical properties of skin by inverse analysis combined with an extensometry test. *Wear*, 264(5):405–410.
- Delalleau, A., G. Josse, J.-M. Lagarde, H. Zahouani, and J.-M. Bergheau
2006. Characterization of the mechanical properties of skin by inverse analysis combined with the indentation test. *Journal of biomechanics*, 39(9):1603–1610.
- Diridollou, S., F. Patat, F. Gens, L. Vaillant, D. Black, J. Lagarde, Y. Gall, and M. Berson
2000. In vivo model of the mechanical properties of the human skin under suction. *Skin Research and technology*, 6(4):214–221.

- Evans, S. L. and C. A. Holt
2009. Measuring the mechanical properties of human skin in vivo using digital image correlation and finite element modelling. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 44(5):337–345.
- GOM, A.
2008. Manual de usuario - hardware. 49:1–45.
- GOM, A.
2011. Manual de usuario - software. 49:1–137.
- Huang, Y.-P. and Y.-P. Zheng
2015. *Measurement of Soft Tissue Elasticity in Vivo: Techniques and Applications*. CRC Press.
- Leveque, J., J. De Rigal, P. Agache, and C. Monneur
1980. Influence of ageing on the in vivo extensibility of human skin at a low stress. *Archives of Dermatological Research*, 269(2):127–135.
- Maiti, R., L.-C. Gerhardt, Z. S. Lee, R. A. Byers, D. Woods, J. A. Sanz-Herrera, S. E. Franklin, R. Lewis, S. J. Matcher, and M. J. Carré
2016. In vivo measurement of skin surface strain and sub-surface layer deformation induced by natural tissue stretching. *journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 62:556–569.
- Moctezuma-Paz, L. E., I. Páez-Franco, S. Jiménez-González, K. D. Miguel-Jaimes, G. Foncerrada-Ortega, A. Y. Sánchez-Flores, N. A. González-Contreras, N. X. Albores-de la Riva, and V. Nuñez-Luna
2015. Epidemiología de las quemaduras en Mexico. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 20(1):78–82.
- Pailler-Mattei, C., S. Bec, and H. Zahouani
2008. In vivo measurements of the elastic mechanical properties of human skin by indentation tests. *Medical engineering & physics*, 30(5):599–606.
- Palanca, M., G. Tozzi, and L. Cristofolini
2016. The use of digital image correlation in the biomechanical area: a review. *International biomechanics*, 3(1):1–21.
- Pan, B., K. Qian, H. Xie, and A. Asundi
2009. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement science and technology*, 20(6):062001.

PANISSET, F.

1992. *LE STRATUM CORNEUM: SA PLACE DANS LA FONCTION MECANIQUE DE LA PEAU HUMAINE IN VIVO*. PhD thesis.

Paz, L. E. M., I. P. Franco, S. J. González, D. K. M. Jaimes, J. S. Bacilo, O. B. Vázquez, E. M. Sánchez, E. H. Gómez, J. F. Alamillo, and V. N. Luna

2012. Manejo antiisquémico de las quemaduras eléctricas en niños. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17(4):313–324.

Richard, R. L., M. E. Lester, S. F. Miller, J. K. Bailey, T. L. Hedman, W. S. Dewey, M. Greer, E. M. Renz, S. E. Wolf, and L. H. Blackbourne

2009. Identification of cutaneous functional units related to burn scar contracture development. *Journal of burn care & research*, 30(4):625–631.

Staloff, I. A., E. Guan, S. Katz, M. Rafailovitch, A. Sokolov, and S. Sokolov

2008. An in vivo study of the mechanical properties of facial skin and influence of aging using digital image speckle correlation. *Skin Research and Technology*, 14(2):127–134.

Wilson, A. J., B. C. Chin, V. M. Hsu, M. N. Mirzabeigi, and I. Percec

2015. Digital image correlation: a novel dynamic three-dimensional imaging technique for precise quantification of the dynamic rhytid and botulinum toxin type a efficacy. *Plastic and reconstructive surgery*, 135(5):869e–876e.