

# Caracterización de tejidos

*Principales ensayos físicos para evaluar la calidad de los tejidos textiles*



Fuente: [Dupont](#)

**Enric Carrera i Gallissà**



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Departament d'Enginyeria Tèxtil i Paperera



## **Enric Carrera i Gallissà**

carrera@catunesco.upc.edu

Doctor Ingeniero textil por la UPC

Profesor titular de Universidad. Departamento de Ingeniería Textil y Papelera de la Universitat Politècnica de Catalunya.

En la Escuela Superior de Ingenierías Industrial, Aeroespacial y Audiovisual de Terrassa (UPC) imparte las asignaturas: Materiales Textiles, Confeccionabilidad de prendas, Textiles para el diseño de productos y Evaluación de la calidad de los tejidos

Ha trabajado principalmente en la evaluación objetiva de tejidos y su tesis doctoral versó sobre la evaluación del cayente de los tejidos de calada.

Carrera-Gallissà, E. *Caracterización de tejidos. Principales ensayos físicos para evaluar la calidad de los tejidos textiles*. Universitat Politècnica de Catalunya. 1ª edición julio 2015. Terrassa. 238 pp

Los derechos de autor o copyright de los contenidos de este libro están sujetos a la licencia



# ÍNDICE

	Pág.
0. PRESENTACION	
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Estructura de los tejidos y sus propiedades	10
1.1.1 Modelos continuos	12
1.1.2 Modelos discontinuos	13
1.1.3 Otras aproximaciones	13
1.1.4 Los tejidos de calada como materiales anisotrópicos	14
2. CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS TEJIDOSI	14
2.1 Parámetros estructurales	15
2.2 Parámetros funcionales	15
2.3 Parámetros de confeccionabilidad	16
2.4 Parámetros de mano	17
3. PARÁMETROS ESTRUCTURALES	18
3.1 Grosor	18
3.1.1 Normativa existente	18
3.1.2 Definiciones y principios de medida	18
3.1.3 Principio de medida y equipo necesario	18
3.2 Compresibilidad	19
3.3 Catálogos de equipos de medida	20
3.4 Videos sobre ensayos de Grosor	20
4. PARÁMETROS FUNCIONALES	21
4.1 Comportamiento mecánico	21
4.1.1 Carga y alargamiento a la rotura por tracción axial	21
4.1.1.1 Método de tiras (UNE 40-085-75 Parte I)	21
4.1.1.1 Videos sobre el ensayo del método de tiras	27
4.1.1.2 Método al agarre (UNE 40-085-75, Parte II)	28

	Pág.
4.1.2. Resistencia al rasgado (UNE 40-404-79)	29
4.1.2.1 Videos de sobre el ensayo de resistencia al desgarro	35
4.1.3 Resistencia al rasgado "Elmendorf". UNE-EN-ISO 13937-1:2000	35
4.1.3.1 Objeto y aplicación del ensayo	35
4.1.3.2 Catálogos de equipos que realizan el ensayo Elmendorf	37
4.1.3.3 Videos sobre ensayos por el método Elmendorf	37
4.1.4 Medida del comportamiento de la costura de los tejidos	37
4.1.4.1 Videos del ensayo de resistencia a las costuras	40
4.1.5 Resistencia al estallido	40
4.1.5.1 Videos del ensayo de resistencia al estallido	43
4.1.6. Fuerza de compresión de los tejidos sobre el cuerpo humano	43
4.1.7 Rigidez a la flexión	44
4.1.7.1 Longitud del voladizo	46
4.1.7.1.1 Videos del ensayo de rigidez a la flexión por el método de long. del voladizo	50
4.1.7.2. Ensayo Kawabata (KES-F)	51
4.1.8. Determinación del cayente estático de los tejidos	51
4.1.8.1 Objetivo del ensayo	51
4.1.8.2 Principio del ensayo	51
4.1.8.3 Catálogos de drapómetros	55
4.1.8.4 Drapómetros digitales	55
4.1.8.4.1 Drapómetro digital UPC	56
4.1.8.5 Aproximación conceptual al estudio analítico del cayente	62
4.1.8.6 Indicadores de cayente	63
4.1.9 Fricción	76
4.1.9.1 Videos sobre ensayos de fricción	80
5. COMPORTAMIENTO ANTE FLUIDOS	81
5.1 Permeabilidad al aire (ISO 9237:1995)	81
5.1.1 Videos sobre los ensayos de permeabilidad al aire	84
5.2 Comportamiento al agua	84

	Pág.
5.2.1 Resistencia a la penetración del agua (ensayo bajo presión hidrostática). EN 20811	84
5.2.1.1 Videos sobre el ensayo de resistencia a la penetración de agua	87
5.2.2 Resistencia al mojado. Spray test (UNE 40-393-84)	87
5.2.2.1 Videos sobre el ensayo Spray test	89
5.2.3 Impermeabilidad de tejidos por el ensayo de ducha Bundesman (UNE EN 29865)	90
5.2.3 Permeabilidad al vapor de agua	96
5.2.3.1 Métodos gravimétricos	98
5.2.3.2 Métodos de placa caliente	100
5.2.4 Control y gestión de la humedad líquida	102
5.2.4.1 Velocidad de difusión del agua. Ensayo de empapado vertical	102
5.2.4.2 Velocidad de difusión del agua. Ensayo de absorción gravimétrico	103
5.2.4.3 Velocidad de difusión del agua. Ensayo del tiempo de secado	104
5.2.4.4 Medida de la difusión de la humedad (Moisture Manegement Tester)	104
6 COMPORTAMIENTO AL USO	109
6.1 Pilling	109
6.1.1 Influencia de la fibra	110
6.1.1.1 Naturaleza de la fibra	110
6.1.1.2 Masa lineal de la fibra	110
6.1.1.3 Longitud de la fibra	111
6.1.1.4 Rizado de la fibra	111
6.1.1.5 Resistencia a la tracción	111
6.1.1.6 Flexibilidad y módulo de elasticidad de la fibra	112
6.1.1.7 Sección transversal de la fibra	112
6.1.1.8 Fricción interfibrilar	112
6.1.2. Parámetros del hilado	113
6.1.2.1 Título del hilado	113
6.1.2.2 Torsión dado	113
6.1.2.3 Velloalidad del hilado	113
6.1.3 Parámetros del tejido	

	Pág.
6,1,3,1 Ligamento y gramaje	113
6.1.3.2 Tisaje y tricotado	114
6.1.4. Operaciones de acabado que reducen el pilling	114
6.1.4.1 Termofijado	114
6.1.4.2 Chamuscado	114
6.1.4.3 Calandrado en caliente	114
6.1.4.4 Tundido	114
6.1.4.5 Aprestos	114
6.1.5 Medida y evaluación del pilling	115
6.1.5.1 Método contenedores	116
6.1.5.1.1 Random Tumble Pilling Tester. ISO 12945-3	116
6.1.5.1.1.1 Videos ensayo Random trumble Pilling tester	117
6.1.5.1.1.2 ICI/M&S Pilling and Snagging Tester	117
6.1.5.1.1.2.1 Videos ensayo ICI/M&S Pilling and Snagging Tester	118
6.5.2 Método probetas planas y desgaste	118
6.1.5.2.1 Ensayo Martindale	118
6.1.5.2.1.1 Videos de ensayo de pilling mediante el equipo Martindale	123
6.2 Resistencia a la abrasión	124
6.2.1 Videos del ensayo de resistencia a la abrasión Martindale	128
6.2.2 AATCC Accelerotor	129
6.3 Resistencia al enganchón. Snag test	129
6.3.1 Videos del ensayo Snag tester	133
6.4 Tendencia al arrugado	133
6.4.1 Determinación de la capacidad de desarrugado (UNE EN 22313)	134
6.4.1.2 Videos del ensayo de recuperación de la arruga	136
6.4.2 Medidor de la recuperación de las arrugas AATCC	136
6.5. Estabilidad dimensional	137
6.6 Conductividad térmica de los tejidos	139
6.6.1 Ensayo Tog meter. ISO 5085-1	141
6.6.1.1 Videos del ensayo TOG METER	148

	Pág.
6.6.2 Conductímetro térmico Mathis TC-30	148
6.6.2.1 Videos ensayo Mathis TCi	149
6.6.3 Medidor del poder adiatérmico SODEMAT	149
6.6.4 Equipo Alambeta	149
6.6.5 KES F-T Thermo Labo IIb	150
6.6.5.1 Video ensayo KES F7 Thermo Labo	155
6.7 Conductividad eléctrica de los tejidos	155
6.7.1 Conductividad y resistencia eléctrica	156
6.7.2 Static Voltmeter (Rothschild)	158
7. CONFECCIONABILIDAD	159
7.1 Equipo FAST	159
7.1.1 FAST-1	160
7.1.2 FAST-2	163
7.1.3 FAST-3	164
7.1.3 FAST-4	171
7.1.4 Representación gráfica de los resultados	173
7.1.5 Interpretación de los resultados FAST	174
7.1.5.1 Extendido	174
7.1.5.2 Corte	175
7.1.5.3 Costura	176
7.1.5.4 Plancha	177
7.1.6 Aplicaciones del equipo FAST	179
7.1.7 Videos sobre el ensayo FAST	179
8. MANO DE LOS TEJIDOS	180
8.1 Concepto	180
8.2 Formas de evaluación	180
8.3 El método Kawabata (KES-FB)	181
8.3.1 Introducción	181

	Pág.
8.3.2. Objetivos del método KES-F	182
8.3.3 Medición de las propiedades mecánicas del tejido	185
8.3.3.1 Tracción	186
8.3.3.2 Flexión	189
8.3.3.3 Cizalladura	193
8.3.3.4 Compresión	195
8.3.3.5 Superficie	197
8.3.3.6 Grosor y gramaje	201
8.3.3.7 Muestreo	201
8.3.3.8 Relación entre los parámetros objetivos y subjetivos	201
8.3.3.9. Videos sobre el ensayo KES FB	202
8.4 El método del anillo y sus diversas evoluciones	202
8.4.1 Ensayo anillo-UPC	206
8.4.1.1 Relaciones entre el ensayo anillo-UPC y el ensayo FAST	208
8.4.1.2 Relaciones entre el ensayo anillo-UPC y el ensayo Kawabata	209
8.4.1.3 Relaciones entre el ensayo del anillo-UPC y el cayente	211
8.5 Phabrometer	215
8.6 Handle-O-Meter	218
8.6.1 Videos ensayo Handle-O-Meter	219
8.7 Fabric Touch Tester FTT	219
8.7.1 Principio de medida	221
8.7.2 Módulo de Compresión	222
8.7.3 Módulo térmico	225
8.7.4 Módulo de flexión	226
8.7.5 Módulo de superficie	228
8.7.6 Video ensayo FTT	231
9. BIBLIOGRAFIA	232

## Presentación

Las características estructurales de los tejidos, condicionan de forma muy notable su comportamiento durante el uso. De hecho los tejidos textiles son unos materiales bastante singulares, por una parte están formados por hilos que pueden presentar diferente composición, masa lineal y torsión. Por otra, tanto su ligamento como densidad puedan variar de forma muy notable. Ello explica el motivo por el cual los tejidos son materiales anisotrópicos, es decir que sus propiedades no son las mismas si se determinan por urdimbre, por trama, al bies, por el haz o bien por el envés. Esta particularidad -la anisotropía- y la gran cantidad de combinaciones posibles de sus elementos constituyentes, explicaría el motivo por el cual es tan difícil simular y prever el comportamiento mecánico de los tejidos.

El concepto de "Diseño textil" acostumbra a ir asociado a las tareas realizadas por dibujantes, estilistas, coloristas y teóricos textiles, es decir la creación de formas, ligamentos, colores y estampados, lo cual es sin duda un aspecto muy importante de la fase proyectual de una prenda. Sin embargo, se olvida con frecuencia, que el principal objetivo de una prenda es su uso y por lo tanto que han de servir para lo que se han pensado, además de venderlas, claro. También es cierto que para producir grandes series, con facilidad, fiabilidad, rapidez y a un coste competitivo, se ha de haber diseñado un adecuado proceso de confección industrial.

Reclamamos, por lo tanto, un concepto integral y no parcial del diseño textil, que incluya tanto los aspectos relacionados con las formas y colores como la ingeniería del producto, es decir la aplicación de conocimientos científicos a la invención, perfeccionamiento y utilización de la técnica para la obtención de un producto. El estudio de la tensión superficial de la gota de sudor y el diseño del tamaño y forma de los poros que permitan que un tejido sea impermeable pero al mismo tiempo transpirable, es también diseño textil y forma parte de la actividad de los ingenieros/as textiles.

En este documento se describen los principales ensayos a los que pueden ser sometidos los tejidos textiles para comprobar la eficacia que aportan al producto final diseñado. Estamos, pues, ante un libro con finalidad docente y un material de soporte para el seguimiento de diversas asignaturas del Grado en Ingeniería de tecnología y diseño textil así como del Máster en Ingeniería de materiales fibrosos de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Consecuente con la finalidad docente del documento, se ha hecho un especial esfuerzo para incluir enlaces web donde observar videos sobre detalles del procedimiento de ensayo de cada equipo descrito, para facilitar su comprensión. También se incluyen enlaces con los catálogos de las principales empresas constructoras de los diferentes equipos de ensayo y con ello permitir un mayor nivel de profundización y detalle.

Este libro no constituye, sin embargo, una descripción detallada de todos ensayos que pueden realizarse sobre tejidos textiles sino una descripción general de los más relevantes. No todos los ensayos descritos tienen un mismo tratamiento y profundidad puesto que en algunos, su importancia en el contexto formativo en que se produce, merece una mayor extensión.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un tejido, es una superficie plana y elástica resultante del entrecruzamiento de hilos (tejidos de calada) o bien el enlazamiento de hilos (tejidos de malla). Una estructura similar la constituye los llamados “no tejidos” que son igualmente una superficie plana elástica pero no son el resultado del entrecruzamiento o enlazamiento de hilos sino del enmarañamiento de fibras, obtenido y consolidado por diferentes métodos.

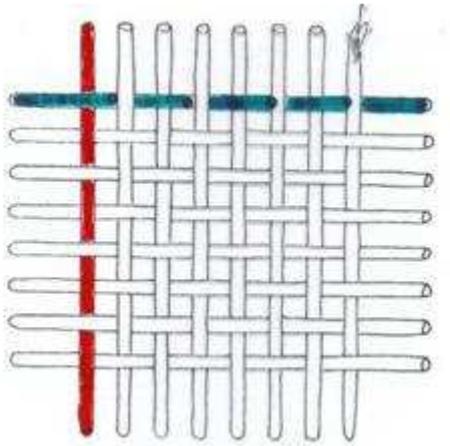


Figura 1. Tejido de calada. Fuente: [mnactec](http://mnactec.com)

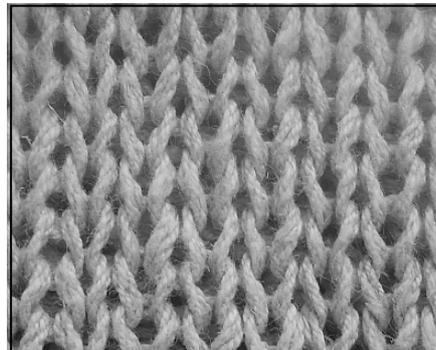
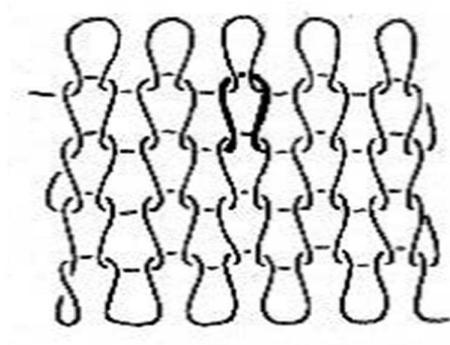


Figura 2. Tejido de malla. Fuente: [tecno-2c](http://tecno-2c.com)

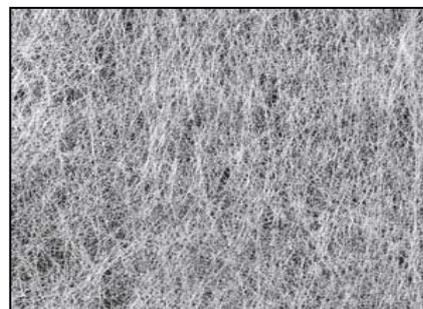
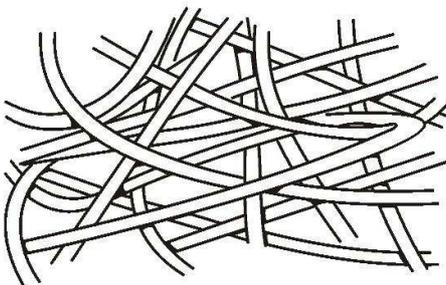


Figura 3. No tejido. Fuente: [atextechnologies](http://atextechnologies.com)

Una vez obtenidos y convenientemente tratados, los tejidos presentan una serie de propiedades que son el resultado de su composición, proceso de obtención y posterior ennoblecimiento (tintura/estampado y acabado).

## 1.1 Estructura de los tejidos y sus propiedades

Muchos de los fenómenos de la mecánica de los tejidos tienen su equivalencia en la mecánica de las estructuras sólidas. Sin embargo la particular microestructura y especialmente la baja rigidez a la flexión que presentan los tejidos en comparación con la rigidez de estructuras laminares parecidas como las membranas hacen que los tejidos presenten un comportamiento no lineal y por regla general una elevada flexibilidad y distorsión lateral (1). Esto ha fomentado que muchos investigadores hayan estudiado el comportamiento de los tejidos como un problema de un sistema dinámico no lineal (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12). En definitiva se puede afirmar que el comportamiento mecánico de los tejidos es mucho más complejo que el de los materiales utilizados convencionalmente en la ingeniería. Esta singularidad hace que los métodos tradicionales utilizados para el análisis y experimentación de esta problemática presenten limitaciones cuando se aplican en el estudio de tejidos textiles.

La compleja geometría de la microestructura porosa de los tejidos hace prácticamente imposible disponer de una solución analítica sencilla en el estudio de las deformaciones de los tejidos, incluso para casos tan aparentemente sencillos como el caso del estudio del cayente. Debido a este tipo de dificultades, la utilización de métodos numéricos y sistemas informáticos de apoyo se postulan como una buena forma de abordar la mayoría de los problemas de la mecánica de los tejidos.

La figura 4 muestra un modelo simplificado de la configuración teórica de los hilos componentes de un tejido de calada (13), que contrasta con la imagen real de este mismo hilado mostrado en la figura. 5. En el modelo teórico, la forma de la sección transversal y las propiedades físicas de un hilado se idealizan. Incluso para este modelo sencillo, los cálculos para establecer los parámetros geométricos requeridos hacen referencia a funciones trascendentes. Para estos parámetros geométricos no hay soluciones analíticas explícitas (13).

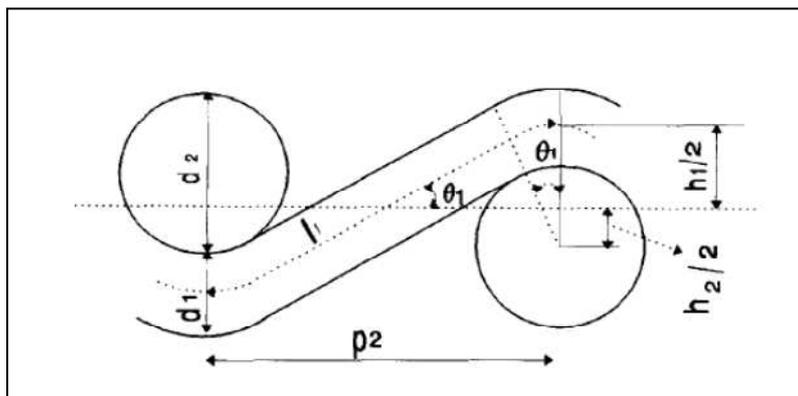


Figura 4. Modelo simplificado de la configuración teórica de los hilos de un tejido de calada (13)

Los primeros estudios sobre las propiedades mecánicas de los tejidos fueron realizados a finales del siglo XIX por investigadores alemanes que trabajaban en el desarrollo de dirigibles (14). En el ámbito de la literatura científica anglosajona se presenta un modelo

geométrico y de fuerzas mecánicas para la estructura de un tejido de calada con ligamento de tafetán (13). Ambos artículos han sido ampliamente utilizados y modificados posteriormente por otros autores.

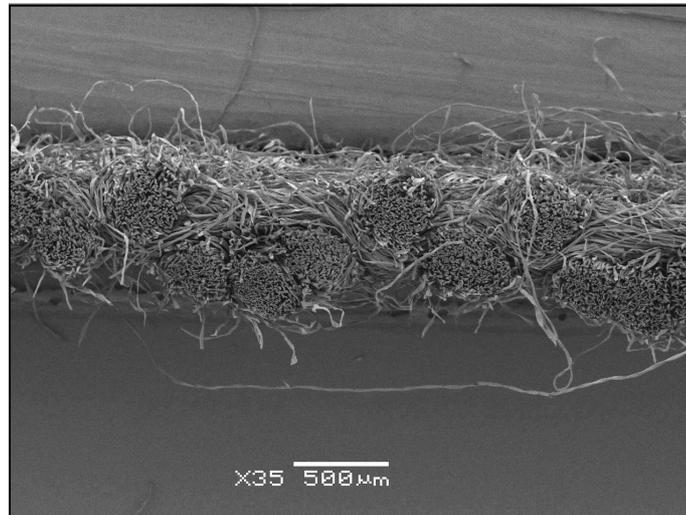


Figura 5. Imagen de la sección de un tejido de calada. Fuente: Servicio Microscopía electrónica, Departamento de Ingeniería Textil y Papelera (UPC).

En los últimos 100 años se han realizado notables avances en la teoría de la estructura geométrica y comportamiento mecánico de los tejidos. Como respuesta a la demanda de la industria, los estudios sobre este campo, han pasado de las etapas de la observación y explicación del fenómeno a las de la predicción y optimización. Los principales avances sobre este campo de estudio pueden encontrarse en los dos libros editados por los principales expertos en este campo (15 y 16). La mecánica de los tejidos, se estudió en un taller del Instituto de Estudios Avanzados de la OTAN celebrado en 1979 (16). Uno de los principales logros de estas investigaciones ha sido el desarrollo del sistema de evaluación objetiva de tejidos Kawabata (KES-F) para la determinación de la mano de los tejidos (17). El tiempo ha demostrado la utilidad de este sistema tanto en el desarrollo de nuevos tejidos, procesos y productos de acabado como en su confeccionabilidad (18).

Desde el taller realizado en el Instituto de Estudios Avanzados de la OTAN que se ha comentado anteriormente, los avances en éste ámbito de estudio se han ralentizado notablemente. El mayor obstáculo que presenta el desarrollo de los estudios en la mecánica de los tejidos es la complejidad de las ecuaciones matemáticas utilizadas para describir el comportamiento complejo de los tejidos. Por otra parte el limitado espectro de soluciones que presentan este tipo de ecuaciones mediante las técnicas analíticas tradicionales ha desincentivado bastante el interés de la comunidad científica por este ámbito de estudio y en la confianza que el estudio de los fundamentos teóricos de la mecánica de los tejidos pueda conducir a aplicaciones prácticas significativas.

En la década de los 60 del siglo XX diversos investigadores del Instituto de Ciencia y Tecnología UMIST de la Universidad de Manchester utilizaron por primera vez técnicas computacionales para el estudio de la mecánica de los tejidos y su comportamiento (19). Los expertos en este ámbito de estudio han seguido varios enfoques distintos desde los modelos continuos a los discontinuos pasando también por modelos físico-geométricos simplificados (20).

### 1.1.1 Modelos continuos

En este enfoque, el tejido es tratado como un material continuo sin considerar su particular microestructura de tal forma que para el análisis de las deformaciones del tejido se utilizan métodos matemáticos propios de la mecánica de los elementos continuos.

Sin embargo, este enfoque difícilmente puede aplicarse de forma general para el estudio de las deformaciones no lineales de los tejidos y requiere la elaboración de ecuaciones específicas así como de programación específica para su obtención y cálculo (21 y 22).

La forma más potente y versátil de abordar la predicción del comportamiento mecánico de los tejidos es la utilización de los elementos finitos. Esta metodología que fue desarrollada en los años 50 del siglo XX para abordar los problemas de la ingeniería de estructuras de acero y otros materiales rígidos es actualmente también una herramienta de análisis esencial para muchos campos de la ingeniería (20).

Algunos investigadores han intentado utilizar el enfoque que aportan los elementos finitos en el ámbito del cayente, con éxito diverso (23). En esta línea se ha conseguido predecir el cayente de un tejido analizándolo como si fuera una membrana ortotrópica utilizando un método geométrico de elementos finitos no lineales (4). Mediante un equipo KES-F se obtuvo el módulo de tensión de la urdimbre y la trama obteniendo asimismo los valores del coeficiente de Poisson que aparecen en la literatura. Con esta metodología este autor (4) obtuvo una razonable concordancia entre la predicción teórica del cayente y los resultados experimentales.

En otro estudio se trató también a los tejidos como si fueran láminas ortotrópicas y para el estudio de los fenómenos de flexión utilizó elementos lámina presentando algunos ejemplos sobre el cayente (24). Este autor ha sido el único capaz de poner sobre la mesa resultados numéricos que demuestran que las diferencias entre el cayente predicho mediante este sistema y el medido experimentalmente difieren en un 10 % aproximadamente.

Se ha utilizado, también, la teoría de láminas sometidas a flexión y a esfuerzo cortante para predecir el cayente de los tejidos (2). En este estudio también trataron el tejido como un material continuo y ortotrópico, utilizando elementos finitos para resolver las ecuaciones. Consideraron el tejido como una lámina plana, que se deforma cuando se deja caer libremente por acción de su propio peso. Precisamente fue el gramaje del tejido el parámetro utilizado para definir el modelo. Los autores utilizaron el método de interacción de Newton-Raphson para resolver ecuaciones no lineales de equilibrio. Las propiedades de los materiales utilizados en el modelo fueron el módulo de Young de la urdimbre y la trama, el módulo de cizalladura, y el coeficiente de Poisson. Finalmente en menos de 8 minutos se obtuvo una simulación satisfactoria del cayente de una probeta de tejido de 30 x 30 cm extendido sobre un pedestal cuadrado de 12 x 12 mediante una workstation IBM RS 6000.

Todo lo explicado anteriormente muestra que es posible simular el cayente de un tejido mediante elementos finitos no lineales, tratando a los tejidos como si fueran láminas ortotrópicas bidimensionales con la flexión y rigidez de una membrana. Los estudios realizados hasta ahora sólo han sido capaces de analizar el cayente de una forma muy elemental. Dado que el análisis de las deformaciones de los tejidos es más difícil de realizar que en otros materiales convencionales utilizados en ingeniería, todavía hace falta avanzar mucho para modelizar con suficiente precisión y fiabilidad todos los posibles tipos de deformación de los tejidos. En el futuro inmediato, habrá que investigar más para realizar comparaciones más precisas entre modelos numéricos teóricos y resultados

experimentales para un amplio espectro de cayentes. Esto ayudaría a establecer la validez del enfoque continuo en el modelado de deformaciones de los tejidos.

Otro aspecto que no ha sido tratado es el efecto de relaciones de tensión-deformación no lineales sobre las deformaciones de los tejidos. Esto se debe en parte a la falta de ecuaciones no lineales propias de la estructura de los tejidos. Posteriormente se realizó un amplio estudio sobre las estructuras y propiedades mecánicas de los tejidos donde establece todo un conjunto de ecuaciones no lineales de los elementos que contribuyen a las propiedades de los tejidos como tensión axial, flexión, cizalladura y compresión (25). La utilización de estas ecuaciones en la simulación con elementos finitos se espera que pueda mejorar la exactitud de la predicción y contribuya a visualizar mejor el efecto de las propiedades no lineales de los tejidos en el aspecto de las prendas de vestir.

### **1.1.2 Modelos discontinuos**

En contraste con los modelos continuos descritos anteriormente, la modelización de los tejidos puede realizarse también a partir de la información de sus elementos componentes como son los hilos de urdimbre y trama en el caso de los tejidos de calada. Diversos autores utilizaron modelos discretos para predecir la respuesta mecánica de los tejidos a partir de la combinación de propiedades de hilo, el ligamento y las interacciones entre ellos (26, 27, 28, 29, 30, 31). Su trabajo, de tipo analítico más que numérico, requiere una gran cantidad de matemáticas y programación específica. En la literatura textil, este tipo de estudios se denominan habitualmente como mecánica estructural de los tejidos (15).

Si consideramos los hilados como si fueran varillas curvas o rectas con puntos de fricción en el cruce entre la urdimbre y la trama en función de la evolución del ligamento, la metodología de los elementos finitos puede utilizarse para estudiar tejidos utilizando modelos discontinuos. A partir de esta concepción se ha estudiado, también, la respuesta dinámica del tejido cuando está sometido a esfuerzos de tracción y desgarro (32).

Por si mismo un modelo discontinuo tiene una utilidad limitada en la predicción de las deformaciones complejas de un tejido debido a la ingente cantidad de hilos que intervienen, sin embargo puede ser útil para predecir las propiedades mecánicas del tejido a partir de las propiedades de los hilos dado que con sólo una pequeña porción del tejido es suficiente para hacer la modelización. El problema es, pues, computacionalmente factible.

Sin embargo la obtención de leyes reales sobre la deformación de los tejidos sólo puede conseguirse mediante técnicas experimentales y la obtención de tejidos con diferentes características estructurales, es un proceso bastante lento y caro, de ahí el interés que tiene la utilización de técnicas de modelización.

### **1.1.3 Otras aproximaciones**

La comunidad de investigadores de expresión gráfica mediante ordenador han tenido un gran interés en reproducir el comportamiento dinámico de los tejidos mediante la animación digital y ya han realizado varios modelos basados en procesos geométricos o modelos físicos simplificados (33). En realidad su propósito no es conseguir una fiel reproducción del comportamiento de los materiales deformables sino una simulación verosímil y creíble que de sensación de realidad a sus animaciones. Los procesos

geométricos junto con simplificaciones físicas también se han aplicado con éxito en el campo de los materiales compuestos (34).

Otros autores han propuesto un modelo basado en las partículas en la simulación del cayente de un tejido (35). En su modelo físico, el tejido no se trata como una lámina continua, sino como un conjunto de partículas que, conceptualmente, representan los puntos de cruce entre hilos de urdimbre y trama en un tejido de tafetán. Las diversas limitaciones y de las interacciones entre las partículas están representados por funciones de energía que se definen a partir de datos del ensayo KES-F, obteniéndose algunos resultados prometedores.

#### 1.1.4 Los tejidos de calada como materiales anisotrópicos

Una singularidad de los tejidos textiles es que se trata de materiales anisótropos (se refiere a la particularidad o capacidad que tiene un material de expandirse y/o contraerse en sus diversas direcciones) de forma que su propiedades varían notablemente en el sentido u orientación en el que son analizados. La rigidez a la flexión no es una excepción y es sabido que varía notablemente si se analiza por urdimbre, por trama o al bias (45°). Varios autores estudiaron este fenómeno en tejidos de calada de bajo gramaje con distintos ligamentos y composiciones (36). Para la medida de la rigidez a la flexión se utilizó el equipo FAST-2 (25) y las probetas respectivas se cortaron en 12 inclinaciones diferentes. Para cada dirección se cortaron 3 probetas siguiendo la típica metodología utilizada en este ensayo (4 lecturas por probeta, es decir: haz, envés, un extremo y otro). Las diferencias obtenidas en este estudio demostraron el comportamiento anisotrópico de la rigidez a la flexión de los tejidos estudiados.

El comportamiento a la flexión de los tejidos de calada puede caracterizarse también mediante la rigidez a la flexión (B) o bien la histéresis de la flexión (2HB) obtenidas en el ensayo KES-F (17). La rigidez a la flexión es la resistencia que ofrece el tejido a ser flexionado y puede definirse como la primera derivada de la curva del momento de curvatura. La histéresis de la flexión es la energía perdida por el tejido durante el ciclo de flexión y recuperación.

Muchos investigadores han realizado estudios sobre la rigidez a la flexión de los tejidos en varias direcciones, sin embargo muy pocos sobre la histéresis de la flexión (37, 38, 39, 40, 41). Tanto (28) como (25) encontraron una elevada relación entre rigidez a la flexión y la histéresis de la flexión. Se encontró, también, una muy buena correlación entre los parámetros de flexión e histéresis medidos a partir de las curvas de recuperación de la deformación de la flexión (28). Otras investigaciones muestran unos elevados coeficientes de correlación (0,933) entre la rigidez a la flexión y la histéresis de la flexión para tejidos de algodón (24). Para tejidos de estambre las correlaciones entre B y 2HB son también elevadas (0,787 y 0,759 respectivamente) lo que implica que la rigidez de flexión y flexión de histéresis no son independientes, pero tienen una relación lineal.

## 2 CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS TEJIDOS

Las propiedades de los tejidos pueden agruparse en las siguientes categorías en función de su uso final:

- Propiedades estéticas (color, brillo, cayente, etc.)
- Propiedades funcionales (arrugabilidad, resistencia al fuego, impermeabilidad, tendencia al pilling, etc.)
- Propiedades de convertibilidad o confeccionabilidad (facilidad para superar con éxito las operaciones de confección industrial, como formabilidad, expansión higral, etc.)
- Propiedades de mano (propiedad emergente resultante de la evaluación de aspectos sensoriales).

Dichas propiedades se evalúan a través del estudio de distintos parámetros que nos explican por una parte la estructura del tejido estudiado (estructurales) y por otra su comportamiento cuando se procesan en durante su confección (confeccionabilidad), cuando son evaluados sensorialmente por los usuarios (mano) o bien cuando ya forman parte de una prenda (uso).

### 2.1 Parámetros estructurales

Nos informan de las características estructurales del sustrato (el tejido) y son:

- Materias componentes. Tipo de fibra y porcentaje de mezcla
- Masa lineal (título) de los hilos de urdimbre y trama (tex)
- Torsión y o retorsión de los hilos componentes (Intensidad en vueltas/m y sentido S ó Z)
- Ondulación de los hilos en el tejido (%)
- Densidad por urdimbre y por trama (calada: hilos y pasadas por cm) (malla: columnas y pasadas por cm)
- Ligamento
- Masa laminar ( $\text{g/m}^2$ )
- Grosor (mm).
- Compresibilidad (%)
- Longitud (m) y anchura de la pieza (mm).

### 2.2 Parámetros funcionales

Nos informan de las propiedades de uso de los tejidos cuando forman parte de una prenda de vestir, producto textil para el hogar u otros.

Dado que la relación de parámetros es muy extensa se acostumbran a agrupar por ámbitos de estudio:

- Comportamiento mecánico
- Comportamiento ante fluidos
- Comportamiento al uso

En este documento, por cuestiones metodológicas, no se analizaran un conjunto de propiedades de gran importancia como son las llamadas solidez, es decir la capacidad

para mantener el color sobre el tejido después de ser sometido a la acción de la luz, el sudor, el lavado, el planchado, etc.

<b>Comportamiento mecánico</b>
Carga y alargamiento a la rotura por tracción (Método de tiras y al agarre)
Resistencia al rasgado
Resistencia al desgarro (Método Elmendorf)
Resistencia al desgarro de los tejidos por enganchón
Resistencia al desgarro de los tejidos por elementos punzantes
Resistencia a las costuras
Resistencia al estallido
Resistencia a la flexión
Cayente
Fricción

Tabla 1. Principales parámetros de comportamiento mecánico

<b>Comportamiento ante fluidos</b>
Permeabilidad al aire
Porosidad: tamaño medio de poro
Porosidad: distribución del tamaño de poros
Permeabilidad al agua (columna de agua)
Penetración de la lluvia (Ensayo Bundesman)
Poder perlante (Spray test)
Velocidad de difusión del agua
Permeabilidad al vapor de agua
Poder absorbente del agua
Repelencia la aceite

Tabla 2. Principales parámetros de comportamiento de los tejidos ante fluidos

<b>Comportamiento al uso</b>
Tendencia al Pilling
Resistencia a la abrasión
Tendencia a los enganchones (Snag test)
Recuperación de la arruga
Estabilidad dimensional
Conductividad térmica
Conductividad eléctrica
Comportamiento al fuego
Resistencia a la degradación por microorganismos
Resistencia al ataque de la Polilla común
Confort

Tabla 3. Principales parámetros de comportamiento al uso de los tejidos

### 2.3 Parámetros de confeccionabilidad

Nos informan de la facilidad o dificultad que presentan los tejidos para superar con éxito las operaciones de confección industrial (corte, costura y plancha). No se trata de parámetros relacionados con la calidad de la prenda sino de la convertibilidad o procesabilidad del tejido.

Para la evaluación de la confeccionabilidad se realiza el ensayo FAST, específicamente diseñado para este fin.



Figura 6. Izquierda [Sasteriabanus](#). Derecha [Ponsuke](#)

### 2.4 Parámetros de mano

La mano es una evaluación sintética de la percepción sensorial que se percibe al tocar un tejido. Si bien hasta hace pocos años se determinaba de forma subjetiva por parte de “expertos” en la actualidad se utilizan dos métodos distintos:

- Ensayo Kawabata
- Ensayo de extracción o anillo
- Ensayo Phabrometer
- Ensayo Fabric Touch Tester



Figura 7. Mano de un tejido. Fuente: [Innovation in Textiles](#)

### **3. PARÁMETROS ESTRUCTURALES**

#### **3.1 Grosor**

El espesor o grosor es un parámetro físico estructural básico de los tejidos.

En los tejidos destinados a la indumentaria, el conocimiento del espesor nos facilita tanto su caracterización como la evaluación de la mano, el cayente y la recuperación de la arruga. El grosor nos permite determinar el volumen de los tejidos, siendo éste un parámetro básico para predecir su capacidad para el aislamiento térmico y acústico. Por otra parte el estudio de la variación del grosor de un tejido durante su uso nos permite conocer su desgaste ante tratamientos de abrasión, encogimiento o contracción.

En algunas aplicaciones industriales, es necesario que el espesor del tejido se encuentre comprendido dentro de unos límites determinados y por lo tanto su correcta determinación es imprescindible.

La variación del grosor de un tejido sometido a diferentes niveles de compresión, nos permite conocer la compresibilidad y capacidad de recuperación, aspecto que tiene una gran influencia en la apreciación subjetiva de la mano de un tejido.

##### **3.1.1 Normativa existente**

Las diversas normas existentes hacen referencia tanto a la medida estricta del grosor de los tejidos de calada, como los de malla, no tejidos, fieltros, mantas, velos y tejidos de pelo

Para su medición las normas utilizadas son:

- UNE 40-224-73: Medida del grueso o espesor de telas y similares
- ASTM D 1777-60T: Medida del grueso o espesor de los productos textiles
- BS 2544: 1954. Determination of Thickness of textiles fabrics.
- BS 4051:1987, ISO 1765-1986. Method for determination of thickness of textile floor coverings

##### **3.1.2 Definiciones y principios de medida**

Se define como espesor a la distancia entre las dos caras de un tejido, es decir entre el haz y el envés, medida bajo unas condiciones de presión especificadas y aceptadas por las partes interesadas. Se expresa en mm.

Presión es la fuerza o carga por unidad de superficie. Se expresa en  $\text{kg/cm}^2$ .

##### **3.1.3 Principio de medida y equipo necesario**

El espesor o grosor medio de un tejido se determina observando el desplazamiento lineal que experimenta un plano móvil desde una superficie paralela al material textil, bajo una presión especificada. El grosor será por lo tanto la distancia entre el zócalo o base y un pulsador empleado para aplicar sobre el tejido la presión especificada.

El medidor de grosor poseerá las dimensiones apropiadas para el material que se va a ensayar y permitirá la aplicación gradual de la presión especificada con una tolerancia del  $\pm 5\%$ . El zócalo y el pulsador serán planos y paralelos entre sí con una precisión de 0,01 mm y provisto de una escala graduada que indique la distancia entre ambos en 0,02 mm con una precisión mínima de 0,01 mm. La dimensión característica del zócalo (lado, diámetro, etc.) será, como mínimo 50 mm mayor que la equivalente al pulsador, las dimensiones del cual se indicarán con claridad.

Para la preparación de las probetas se recomienda el empleo de un troquel de corte con una dimensión mayor (al menos un 20%) que el pulsador de presión.

Las probetas deben ser representativas del lote a estudiar y no deberán presentar pliegues, arrugas ni deformación alguna. Se tomarán al azar y no se escogerán a una distancia del orillo inferior al 10 % del ancho de la muestra.

Cuando el tejido presente varios niveles de espesor deberán determinarse cada uno de ellos.

Las probetas, una vez acondicionadas, deben manipularse con cuidado al objeto de no alterar el estado natural del material. Una vez graduado el valor cero, se coloca la probeta entre el zócalo del aparato y el pulsador. Se aumenta gradualmente la presión hasta alcanzar el nivel especificado (se recomienda una duración de 5 segundos hasta alcanzar la carga total). Se lee en la escala de espesor en un intervalo de tiempo que deberá indicarse claramente en el informe del ensayo (normalmente 5 segundos). Normalmente se realiza el ensayo en 10 probetas.

En el informe del ensayo se indicará la norma seguida, el diámetro u otra dimensión característica del pulsador, presión aplicada, periodo de carga, medidas individuales del espesor y media aritmética, así como la atmosfera normal empleada.

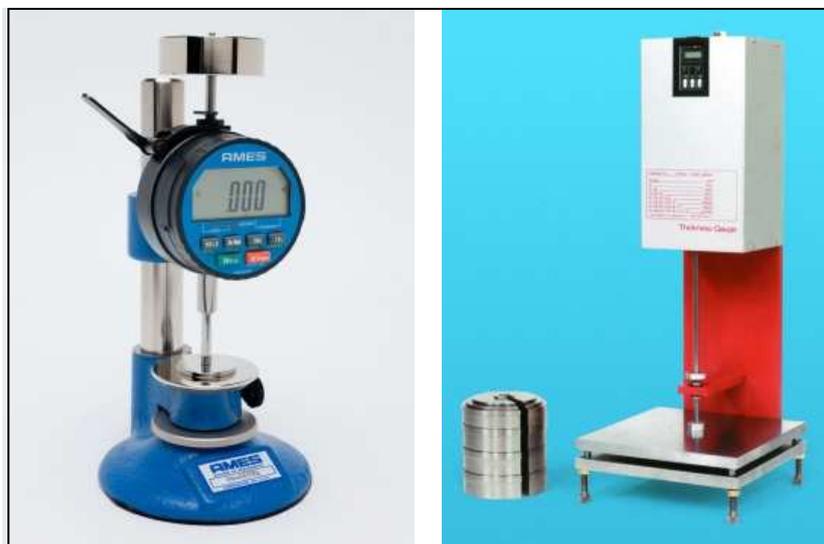


Figura 8. Dos modelos de micrómetros de tejidos. [SDL Atlas](#)

### 3.2 Compresibilidad

En el mercado existen micrómetros, en los que puede variarse tanto la presión aplicada, al ejercerse ésta por acción de unos pesos en lugar de un resorte lo que permite el ensayo a diferentes presiones así como el trazado del diagrama Presión-Grosor y el de

recuperación. En cualquier caso la precisión del aparato debe ser de 0,01 mm, determinada sobre el tejido previamente acondicionado indicando junto al espesor el de la presión aplicada.

Se denomina compresibilidad absoluta  $C_a$  a la diferencia entre dos espesores, midiéndose  $E_{10n}$  a una presión diez veces mayor que el espesor normal  $E_n$ . Se expresa en mm.

$$C_a = E_n - E_{10n}$$

La compresibilidad relativa  $C_r$ , es la compresibilidad absoluta  $C_a$  referida al espesor normal  $E_n$ . Se expresa en mm.

$$C_r = C_a/E_n$$

Puede expresarse también en % siendo entonces:

$$C_r \% = (C_a/E_n) \cdot 100$$

La densidad aparente  $D_{ap}$  es el cociente de masa y el volumen del producto referido al espesor normal  $E_n$ .

$$D_{ap} = M_{lam}/(100 \cdot E_n) \quad \text{se expresa en g/cm}^3$$

Siendo  $M_{lam}$  la masa laminar en  $\text{g/cm}^2$  y  $E_n$  el espesor en mm.

### 3.3 Catálogos de equipos de medida

*Catálogo Digital Thickness Tester K094. SD ATLAS*  
<http://www.sdatlas.com/product/208/Digital-Thickness-Gauge>

*Catálogo Thickness tester CHY C2A. Diamon*  
[http://www.labthink.com/en-us/product/chy-c2a-thickness-tester.html?gclid=CjwKEAiw56moBRD8\\_4-AgoOqhV4SJADWWVCcv2J5Q25SUUVef9IS-VsZq\\_YSNQox61D2u7EP4TwDxoCClrw\\_wcB](http://www.labthink.com/en-us/product/chy-c2a-thickness-tester.html?gclid=CjwKEAiw56moBRD8_4-AgoOqhV4SJADWWVCcv2J5Q25SUUVef9IS-VsZq_YSNQox61D2u7EP4TwDxoCClrw_wcB)

### 3.4 Videos sobre ensayos de Grosor

*E20 Determination of Thickness of Textiles Products*  
<https://www.youtube.com/watch?v=1LLHnTWsAXs>

*CHY-CA Thickness tester-Labthink* <https://www.youtube.com/watch?v=T6izXMI5bYo>

## 4. PARÁMETROS FUNCIONALES

### 4.1 Comportamiento mecánico

Una forma de caracterizar los tejidos, es el estudio de su comportamiento mecánico cuando están sometidos a fuerzas de tracción. Este tipo de ensayos incluyen distintas variantes:

- a) tracción axial
- b) desgarro
- c) resistencia y/o deslizamiento de las costuras
- d) ensayos similares o equivalentes (entretelas fusionadas, velcros, cremalleras, etc.)
- e) resistencia al estallido

Se tratan de ensayos muy utilizados para:

- comprobar que si el tejido se ajusta a las especificaciones
- comprobar la influencia de los cambios estructurales del tejido
- comprobar el efecto de tratamientos químicos, exposición a la luz, agua, lavado, etc.
- prever el comportamiento al uso
- investigar las causas de un defecto
- ayudar al diseño de tejidos para usos particulares

Los resultados obtenidos con estos ensayos dependen del tipo de fibra utilizada, morfología de los hilados componentes (título, torsión, retorsión, sistema de hilatura), estructura del tejido (ligamento, densidad, rizado, etc.), así como del acabado (procesos y productos utilizados).

#### 4.1.1 Carga y alargamiento a la rotura por tracción axial

Para este ensayo se utiliza un dinamómetro convencional con mordazas adecuadas para tejidos. Existen dos métodos de ensayo:

- a) Método de tiras: estudia la carga y alargamiento a la rotura de un ancho específico de tejido. (UNE 40-085-75, Parte I, ISO 13934-1:1999, Part. 1)
- b) Método al agarre: estudia la carga efectiva de un tejido al uso (UNE 40-085-75 Parte II, ISO 13934-2: 1999, Part. 2)

##### 4.1.1.1 Método de tiras (UNE 40-085-75 Parte I)

En este ensayo, el ancho de la probeta es igual a la anchura de las mordazas, de tal manera que todos los hilos del tejido de la probeta rectangular del tejido son pinzados por la mordaza del dinamómetro. Se trata de un ensayo adecuado para estudiar la carga de rotura de un ancho específico de tejido y la influencia del substrato, especialmente de los hilos y pasadas, sobre las propiedades del tejido. De especial interés para comparar la resistencia efectiva de los hilos en el tejido con su resistencia antes del tisaje, pero no recomendable para aquellos tejidos que tengan menos de 20 hilos en el ancho de la probeta.

Para la realización del ensayo se cortaran 5 probetas en sentido urdimbre y otras tantas en sentido trama, que sean representativas de la variabilidad del tejido y como mínimo a

3 m del extremo de la pieza, excluyendo aquellas que presenten pliegues o defectos visibles. Las probetas no contendrán los mismos hilos y/o pasadas y ninguna de las de urdimbre se cortará a una distancia del orillo menor de  $1/10$  del ancho del tejido. Las probetas serán acondicionadas en atmósfera estándar antes de proceder a su ensayo.

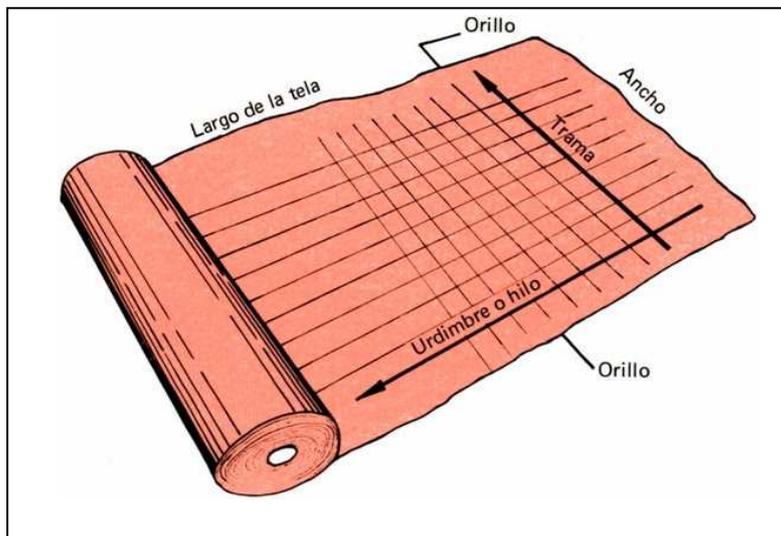


Figura 9. Pieza de tejido

Para evitar cualquier confusión, las probetas se marcarán con tinta indeleble sobre el tejido antes de cortarlas una vez identificados la urdimbre y trama, marcando con una flecha el sentido de la urdimbre en cada una de ellas.

Las probetas se dibujarán sobre el tejido de tal forma que queden perfectamente alineadas con los hilos de urdimbre o trama según sea la orientación de la probeta.

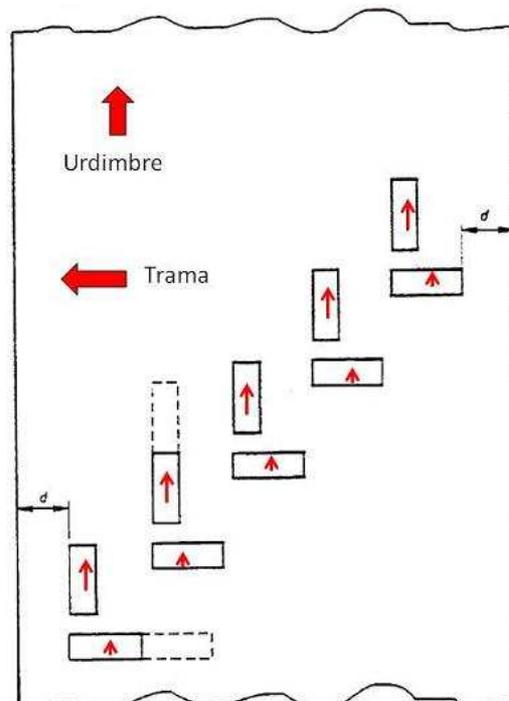


Figura 10. Distribución de las probetas de urdimbre y trama en el tejido

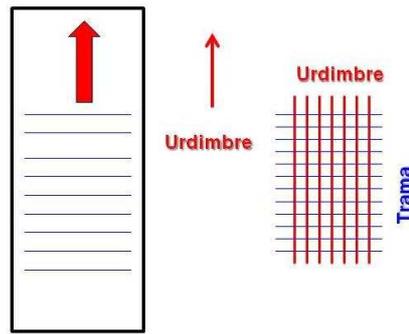


Figura 11. La flecha dibujada sobre la probeta marca el sentido de la urdimbre. Ensayo urdimbre.

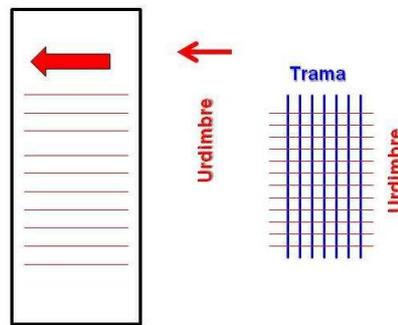


Figura 12. La flecha dibujada en cada probeta marca el sentido de la urdimbre. Ensayo de trama.

El ancho de cada probeta de ensayo (excluyendo los flecos) será de 50 mm y su longitud será tal que permitirá el ensayo de 200 mm de longitud de tejido más el necesario para que sea sujetado por las mordazas del dinamómetro. En tejidos con un alargamiento a la rotura superior al 75% de la longitud nominal de la galga, esta se reducirá a 100 mm.

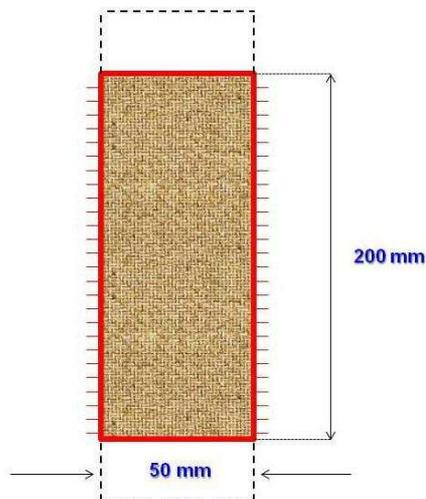


Figura 13. Probeta para el ensayo del método de tiras.

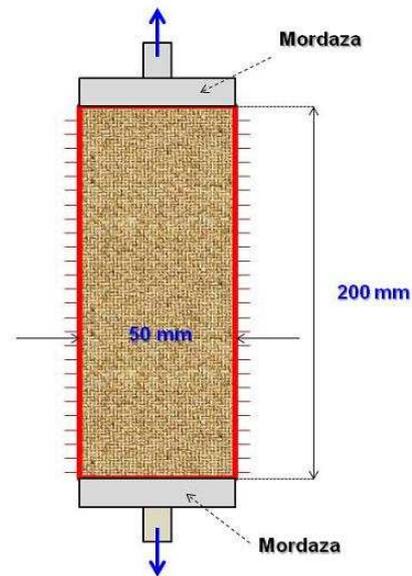


Figura 14. Ensayo método tiras. El ancho de la mordaza es igual al de la probeta



Figura 15. Ensayo método de tiras. Fuentes: Izquierda [Instron](#). Derecha: [Vidal-protection](#)

Al colocar las probetas entre las mordazas del dinamómetro se le aplica una pretensión o tensión previa igual al  $1 \pm 0,25\%$  de la carga de rotura esperada para eliminar cualquier arruga o deformación del tejido.

El ensayo se realiza con un dinamómetro que opera con un gradiente tal que el tiempo de rotura se produzca en  $30 \pm 5$  segundos. Habitualmente se trabaja a una velocidad de bajada de la mordaza de 200 mm/min.

La Carga (F) es la fuerza de tracción que se aplica a la probeta en sentido axial. Se expresa en gramos-fuerza (gf) o en centinewtons (cN). La carga máxima aplicada para romper la probeta se denomina carga de rotura R o bien resistencia a la tracción.

La deformación de la probeta como consecuencia de la aplicación de la carga axial, se denomina Alargamiento ( $\Delta\varphi$ ). Puede expresarse en valor absoluto (mm) o bien en % (la más habitual). El Alargamiento a la rotura es el incremento experimentado por la longitud de la probeta como consecuencia de la aplicación de la carga de rotura.

La curva carga-alargamiento es la expresión gráfica de cómo se deforma axialmente la probeta a medida que aumenta la carga aplicada.

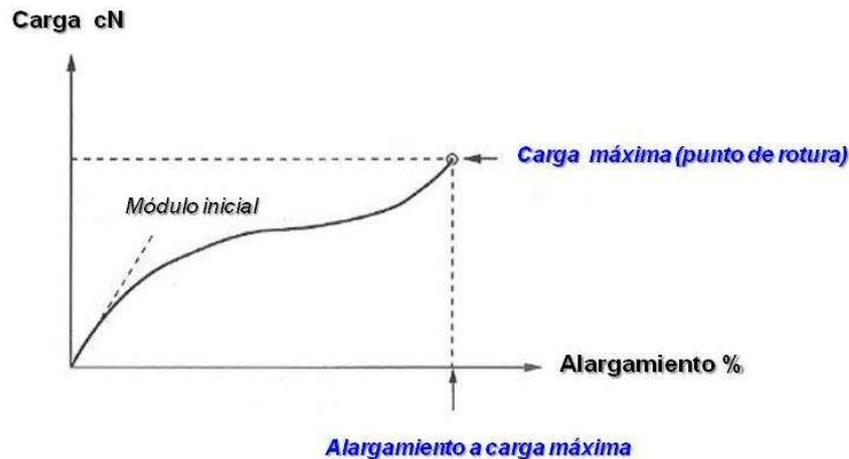


Figura 16. Curva carga-alargamiento.

El módulo de Young o módulo inicial, es la tangente a la curva trazada desde el origen. Indica la medida de la deformación que sufre el tejido cuando se le aplica una pequeña carga inicial. Este parámetro tiene un especial interés para evaluar la mano de los tejidos. Un módulo inicial elevado comporta un tacto rígido y duro mientras que un módulo bajo corresponde a un tacto suave. Un módulo elevado da lugar a tejidos con rigidez a la flexión elevada, un cayente bajo y una capacidad de arrugado baja.

El trabajo de rotura (área situada bajo la curva carga-alargamiento), es la energía absorbida por el material hasta su rotura y se mide en Joules. De interés para evaluar la capacidad de un tejido para absorber repentinas aplicaciones de energía (airbags, paracaídas, paraguas, etc.).



Figura 17. Ensayo resistencia a la tracción. Fuente : [Vidal-Protection](#)

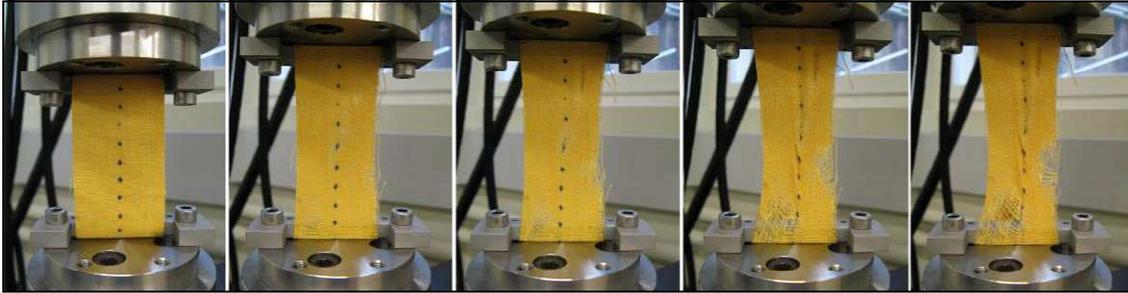


Figura 18. Proceso de rotura de una probeta de tejido en el ensayo de tracción



Figura 19. Zonas de la curva carga-alargamiento de una probeta de tejido

La curva carga-alargamiento de un tejido (cuando se le aplica una tensión en sentido axial), presenta 3 zonas bien diferenciadas (figura 19):

La primera zona está dominada por la fuerza de fricción interfibrilar debido a la flexión de los hilados. La segunda zona constituye una región de bajo módulo, resultante del enderezamiento de los hilados en sentido axial y a la interacción de éstos de forma perpendicular a la dirección del ensayo. La última zona de la curva corresponde a la extensión propiamente dicha de los hilados. Como se reduce el rizado debido a la evolución del ligamento, la magnitud de la fuerza de carga aumenta muy abruptamente, y como resultado, las propias fibras comienzan a extenderse. Corresponde a la región de mayor módulo

Los principales factores que influyen en el resultado de los ensayos de tracción son:

- a) Número de probetas: A mayor número de ellas, más preciso será el ensayo
- b) Longitud de la probeta: La medida de la longitud de la probeta afecta tanto al módulo inicial como a la resistencia y al alargamiento a la rotura. No se pueden

comparar resultados de ensayos realizados con probetas de distintas dimensiones.

- c) Velocidad de avance de las mordazas: Afecta también a los resultados del ensayo, especialmente en el módulo y alargamiento.
- d) Tipología de las mordazas: las características de las mordazas también afecta a los resultados, dado que una excesiva presión de ellas sobre el tejido puede producir un efecto de cizalla y debilitarlo. De hecho los ensayos en que el tejido se rompe en la zona de las mordazas o a 5 mm de ellas, debe rechazarse.

Cuando un tejido se le somete a un proceso de carga cíclico, el tejido se extiende desde el punto de tensión cero a su máxima carga. Una vez finalizada la aplicación de la carga máxima axial, la probeta no recupera totalmente su dimensión original y como consecuencia de ello se observa un alargamiento residual  $\epsilon_0$  puesto que los substratos textiles tienen una naturaleza viscoelástica.

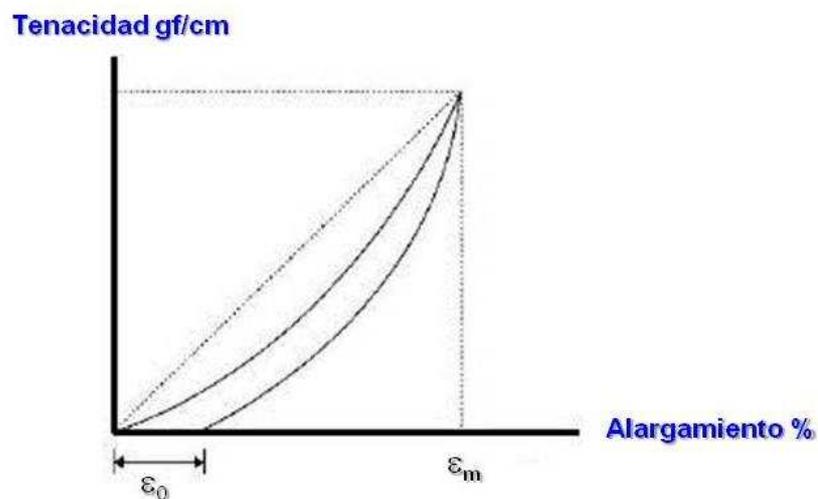


Figura 20. Curva tenacidad-alargamiento de un ciclo de histéresis de tracción en una probeta de tejido

#### 4.1.1.1 Videos sobre el ensayo del método de tiras:

*E25 Determination Of Breaking Strength Of Fabric*  
[https://www.youtube.com/watch?v=GuA\\_GRAHI9Y](https://www.youtube.com/watch?v=GuA_GRAHI9Y)

*Fabric Testing - Tensile Strength Test* <https://www.youtube.com/watch?v=TN6KUrdCywU>

*ASTM D5034 Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics*  
<https://www.youtube.com/watch?v=4NjkeQ2YfK8>

*Geotextiles Standard AS 3706.2 - Method A - Wide Strip Tensile Test Method*  
<https://www.youtube.com/watch?v=ujbNysZYtRA>

#### 4.1.1.2 Método al agarre (UNE 40-085-75, Parte II)

El ancho de la probeta es superior al ancho de la mordaza y por lo tanto no todos los hilos del tejido de la probeta están sujetos por la mordaza del dinamómetro. En la medida que este ensayo es más parecido a lo que sucede durante el uso cuando forma parte de una prenda, se trata de un ensayo adecuado para estudiar el comportamiento al uso de un tejido. La carga de rotura determinada por el método al agarre no refleja la carga de los hilos retenidos entre pinzas y no puede utilizarse para compararlos directamente con las determinaciones de la carga de rotura de los hilos. No existe una relación simple entre los resultados obtenidos por los ensayos al agarre y los ensayos de tiras porque la resistencia adicional viene dada por las características estructurales del tejido (ligamento, densidades, movilidad de los hilos, etc.). El resto del ensayo es igual al del método de tiras.

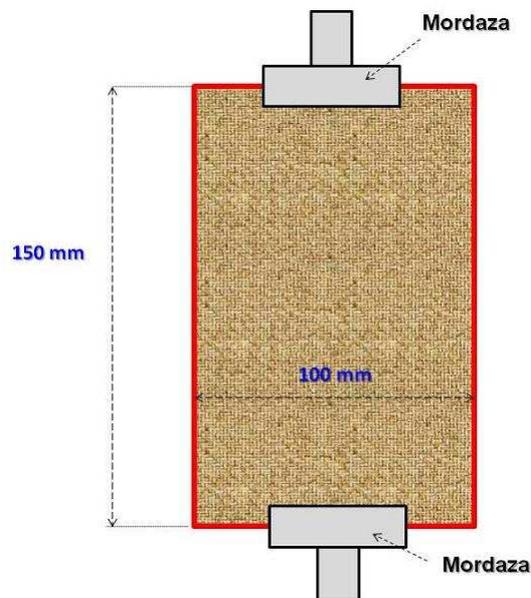


Figura 21. Probeta para el ensayo del método de agarre. El ancho de las mordazas es inferior al de la probeta.

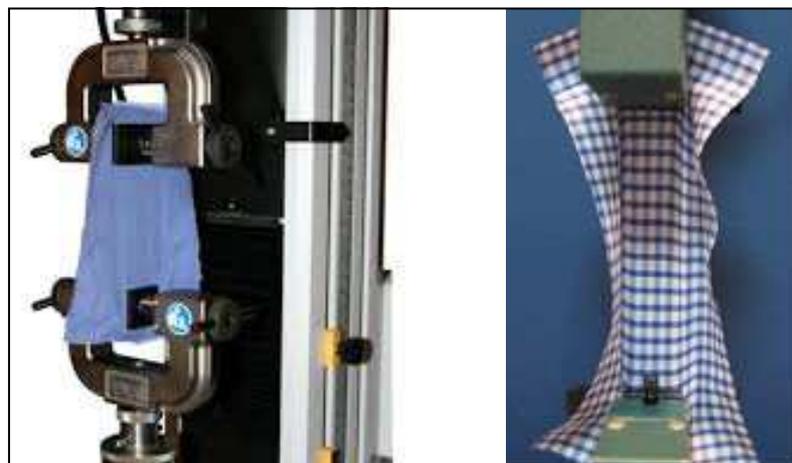


Figura 22. Método agarre. Fuente: Izquierda: [Textile helpline](#), Derecha: [technicaltextiles](#)

En ambos métodos si quiere realizarse el ensayo en seco (acondicionado a 20 °C y 65 ± 2% HR) y a continuación en húmedo (se sumergen la probetas en una solución acuosa que contenga no más de 1g/l de un agente humectante no iónico en lugar de agua sola durante 1 hora y a continuación se enjuagan con agua destilada o desmineralizada y se secan con una toalla) a temperatura ambiente. Las probetas de urdimbre deberán tener los mismos hilos y las de trama las mismas pasadas.

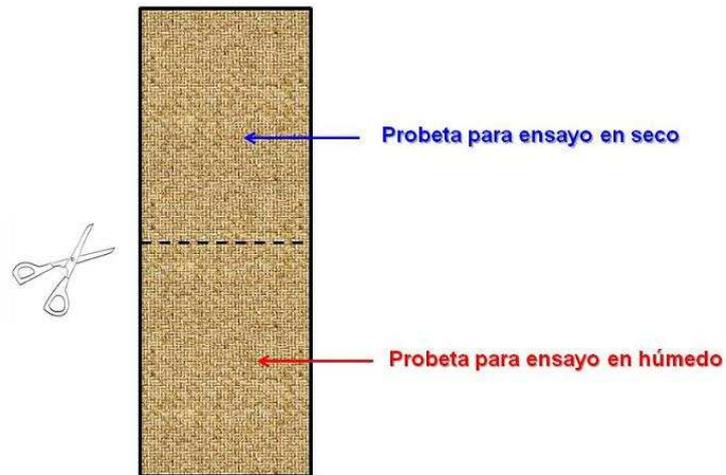


Figura 23. Probeta para el ensayo en húmedo

#### 4.1.2. Resistencia al rasgado (UNE 40-404-79)

En este ensayo se valora mediante un dinamómetro convencional la resistencia que ofrece un tejido a proseguir el rasgado, una vez iniciado, sobre unas probetas, cortadas en sentido urdimbre y trama.

Para la realización del ensayo se cortaran 5 probetas de urdimbre y trama respectivamente. Las probetas tendrán unas medidas brutas de 210 x 60 mm y unas medidas definitivas de 200 x 50 mm. Se realizará un corte longitudinal de 80 mm de longitud, partiendo del centro de uno de los lados de menor dimensión y paralelo al de mayor dimensión.

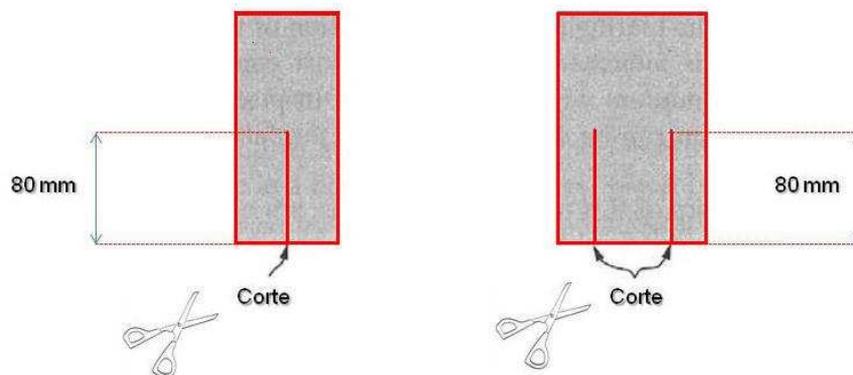


Figura 24. Probeta ensayo resistencia al rasgado

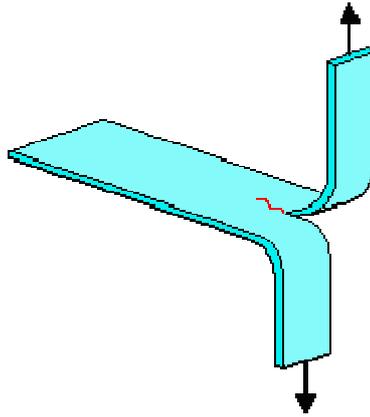


Figura 25. Corte central en la probeta. Fuente: [Prospector](#)

Dado que en el ensayo se pretende valorar la resistencia que ofrecen los hilos perpendiculares al sentido de avance de las mordazas las probetas deberán cortarse de la siguiente manera:

- a) Probetas de urdimbre: el lado pequeño de la probeta será paralelo a los hilos de urdimbre (figura 26).

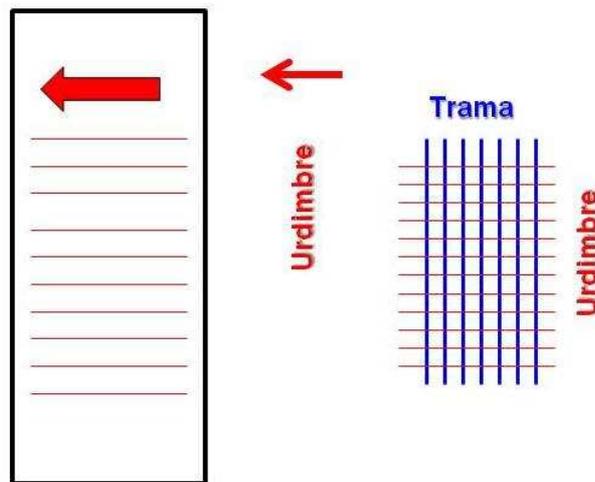


Figura 26. Probeta Urdimbre, ensayo resistencia al rasgado

- b) Probetas de trama: el lado pequeño de la probeta será paralelo a los hilos de trama (figura 27)

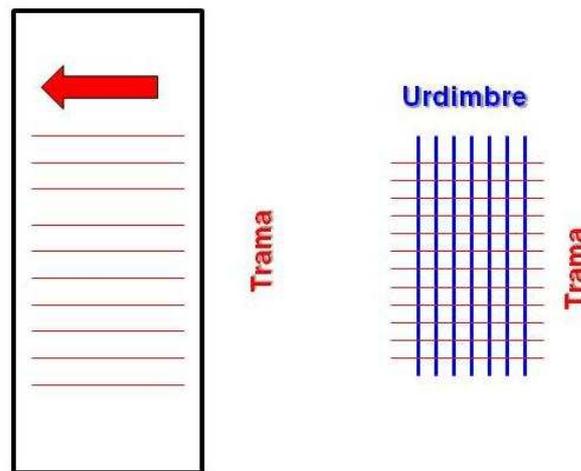


Figura 27. Probeta Trama, ensayo resistencia al rasgado

Se fijan cada una de las tiras que el corte indicado anteriormente ha dividido por un extremo la probeta, en cada una de las mordazas del dinamómetro (el lado no cortado de la probeta queda libre), de forma que la dirección del corte, coincida con la dirección de tracción del dinamómetro y de tal modo que los extremos de la probeta fijados en las mordazas, presenten el haz o el envés sin invertir.

Se pone el dinamómetro en marcha hasta completar totalmente el rasgado de la probeta.

El dinamómetro registra una curva carga-alargamiento que presenta una forma de dientes de sierra, cuyos puntos máximos o picos representan las fuerzas de rasgado de los distintos hilos de la probeta (figura 28).

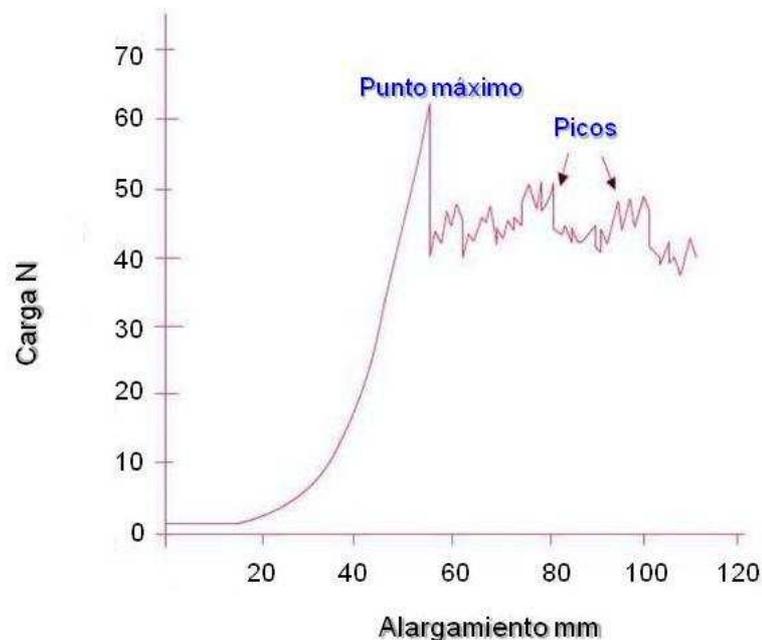


Figura 28. Curva carga-alargamiento del ensayo de resistencia al rasgado

Para cada probeta se tomará como resistencia al rasgado, el promedio de los valores de los puntos máximos o crestas, expresado en daN o kgf. Se dará como resultado final el promedio de los resultados obtenidos en las 5 probetas, por urdimbre y trama separadamente.

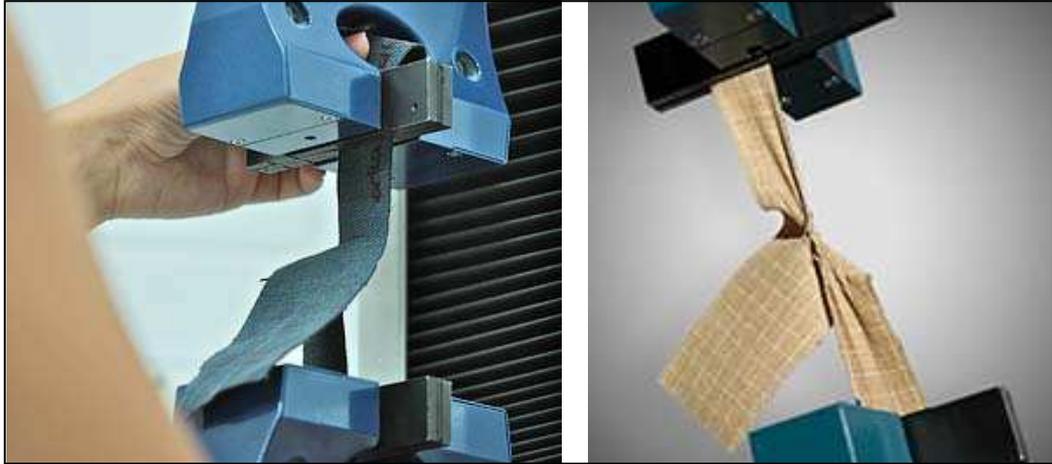


Figura 29. Variante convencional. Izquierda: [Roteks](#). Derecha [Vidal-Protection](#)

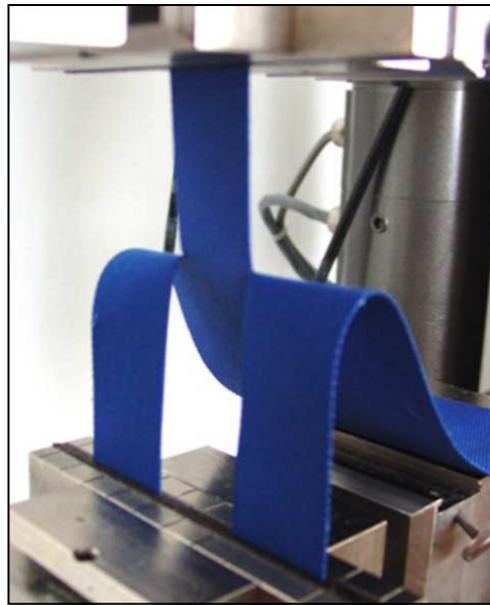


Figura 30. Variante doble lengüeta. Fuente: [STFI](#)



Figura 31. Las dos variantes del ensayo. Fuente: [Instron](#)

La probeta ha de estar acondicionada y el ensayo puede hacerse en seco y en húmedo tal como se ha indicado en los ensayos de resistencia a la tracción por el método de tiras y al agarre.

Sobre la base de la resistencia al rasgado se han desarrollado ensayos similares como la medida de resistencia a la apertura o separación de dos tejidos unidos mediante un sistema velcro (figura 32), o bien a la separación de dos tejidos unidos por colas (entretelas termoadhesivas) o bien el esfuerzo necesario para abrir una cremallera.



Figura 32. Ensayo de apertura de cintas tipo Velcro.

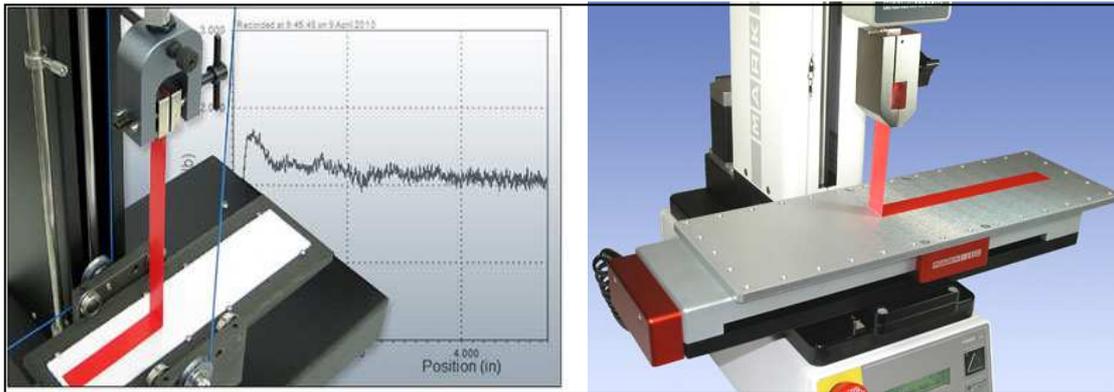


Figura 33. Resistencia a la separación. Izquierda [Admet](#). Derecha [Judge](#)

#### 4.1.2.1 Videos de sobre el ensayo de resistencia al desgarro:

*Maximum tensile strength, tear strength and seam strength of textiles*

<https://www.youtube.com/watch?v=eksd1KKGyyk>

*E28 Determination Of Tear Strength Of Fabric (Single Rip Method)*

<https://www.youtube.com/watch?v=abml7QrFWRk>

*E29 Determination Of Tear Strength Of Fabric (Double Rip Method)*

<https://www.youtube.com/watch?v=jVzEjwnln0Y>

*Fabric Testing - Tear Stength Test* <https://www.youtube.com/watch?v=idwglaOgdZU>

#### 4.1.3 Resistencia al rasgado “Elmendorf”. UNE-EN-ISO 13937-1:2000

##### 4.1.3.1 Objeto y aplicación del ensayo

Otro método de medición de la resistencia de los tejidos al desgarro, es el basado en aparatos de péndulo (tipo Elmendorf) para determinar la fuerza o energía medias necesarias para proseguir el desgarro iniciado por un corte en el tejido.

La norma es aplicable tanto a tejidos tratados como a los sin tratar, incluyendo aquellos con mucho apresto o revestimiento y tratados con resinas, siempre que el tejido no se desgarre, durante el ensayo, en la dirección transversal a la dirección de la fuerza aplicada.

No es aplicable a tejidos de punto, fieltros o telas no tejidas, a menos que, éstas últimas, sean de poco peso y se desgarren en sentido en el cual la máquina produce el esfuerzo.

La fuerza media o energía requerida para prolongar el desgarro de un corte patrón viene determinada por la medición de la energía consumida en el desgarro completo de una longitud fija. El aparato consta de un sector graduado que lleva una mordaza pendular que queda alineada con la fija cuando el péndulo está en su posición más alta (posición inicial con el máximo de energía potencial) ver figura 11. Se sujeta la probeta rectangular en las mordazas y el desgarro se comienza practicando un corte en la probeta, entre las mordazas. Se suelta entonces el péndulo y la probeta se desgarra por la mordaza móvil

al separarse de la fija. La energía consumida en el desgarro de la probeta es la diferencia de la energía potencial entre el principio y el fin de la oscilación. Como la posición inicial del péndulo, es siempre la misma, la energía consumida es función de la posición final de la oscilación. La escala aneja al péndulo está graduada de tal forma que el índice señala el porcentaje de energía potencial consumida en la rotura. La fuerza de rotura y la energía de rotura se calculan a partir de éste valor.

La longitud de desgarro, es la longitud de tejido previamente cortado para continuar el desgarro.

La carga media requerida para efectuar el desgarre se denomina Carga de desgarre y es igual al trabajo realizado para desgarrar la probeta de ensayo, dividido por el doble de la longitud de desgarre.

La energía de desgarre es el trabajo realizado al desgarrar la probeta de ensayo.

Los ensayos de urdimbre son aquellos en los que se desgarran los hilos de urdimbre, mientras que los ensayos de trama son aquellos en los que se desgarran los hilos de trama.

Existe una versión tradicional del equipo con péndulo en forma de segmento circular y resultados en escala analógica o bien la versión electrónica del equipo

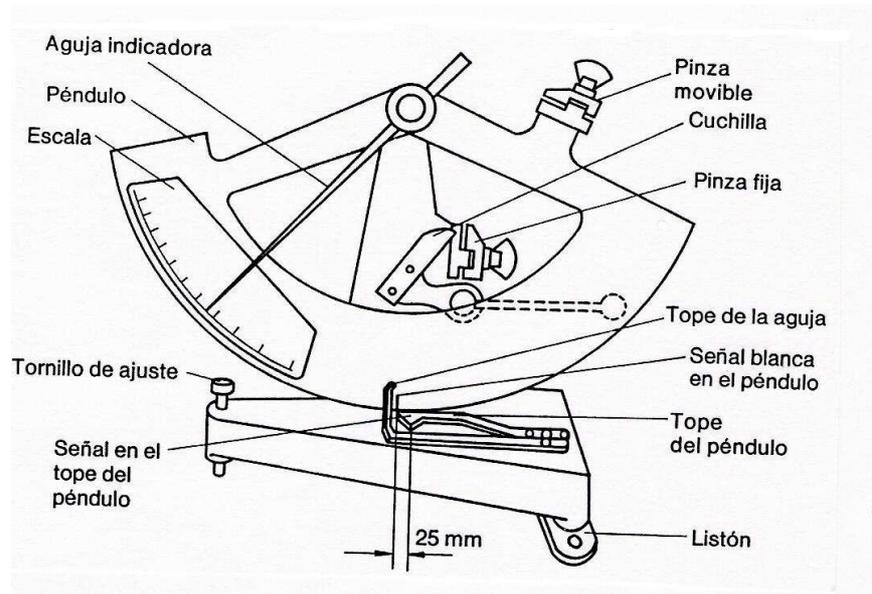


Figura 34. Esquema de funcionamiento del equipo Elmendorf analógico

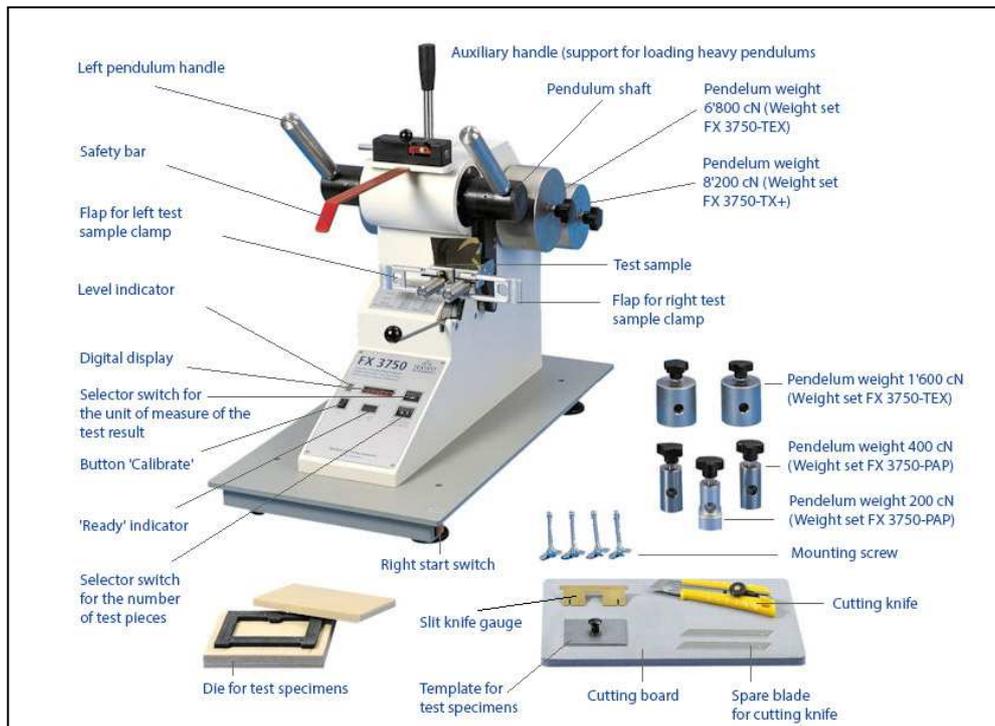


Figura 35. Esquema del equipo Elmendorf digital (Fuente [TexLab](#))

Como mínimo se tomarán 5 probetas de ensayo por urdimbre y otras 5 por trama. Para los ensayos de la urdimbre, se tomarán las probetas que no contengan los mismos hilos de urdimbre. Para los ensayos en el sentido de trama se tomarán las probetas que no contengan los mismos hilos de trama. No deberán tomarse probetas de ensayo a una distancia del orillo menor de la décima parte del ancho del tejido.

Se cortarán las probetas de ensayo con el troquel de la forma y medidas indicadas en la figura 13. Las probetas presentan unas medidas de 102 mm de largo y 63 mm de ancho con un desgarramiento previo de 20 mm, dejando una distancia de exactamente 43 mm entre el final del corte previo y el borde de la probeta.

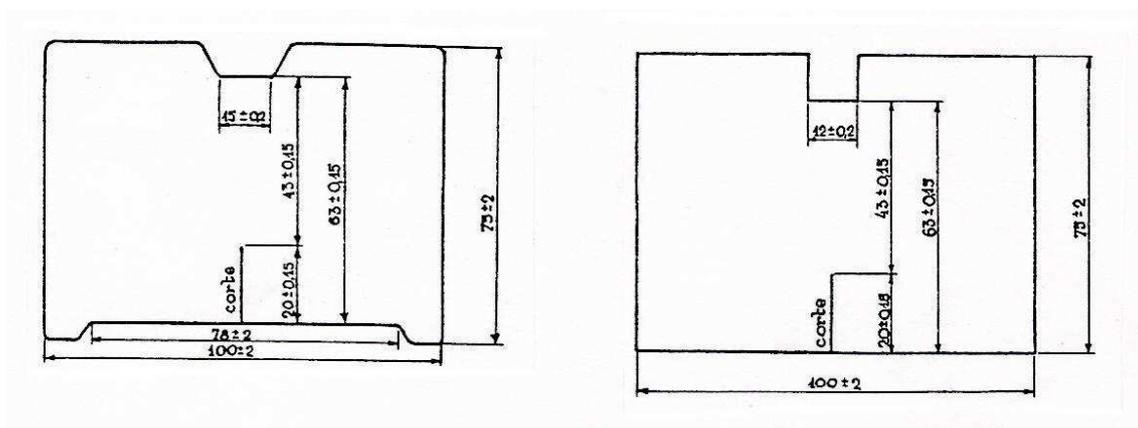


Figura 36. Probetas ensayo Elmendorf.

Tanto las probetas de ensayo por urdimbre como las probetas de ensayo por trama deberán tener la dimensión más corta paralela a los hilos de trama y urdimbre respectivamente. Al cortar las probetas de ensayo, deberá asegurarse que los bordes no se deshilachen y se cuidará de alinear los tejidos de la dimensión más corta paralelamente al troquel de forma que, cuando se corte la ranura, el desgarre subsecuente tenga lugar entre estos hilos y no a través de ellos. Esta precaución será más necesaria cuando se ensayen tejidos arqueados. Será esencial que las probetas de ensayo se corten exactamente a las dimensiones especificadas, ya que la lectura obtenida en la escala del aparato dependerá de la longitud de desgarre.

Cuando la probeta de ensayo se deslice en la mordaza o cuando el desgarre se desvíe más de 6 mm de la proyección de la ranura original, se rechaza en ensayo y se efectúa uno de nuevo. Los resultados de los ensayos defectuosos no se tendrán en cuenta para el cálculo de la resistencia.

Se calculará la carga media requerida para desgarrar las probetas de ensayo en las direcciones de urdimbre y trama y se expresará en gramos.

#### 4.1.3.2 Catálogos de equipos que realizan el ensayo Elmendorf

Catálogo Elmendorf digital tearing tester. SDL-ATLAS

<http://www.sdlatlas.com/product/53/PowerTear-High-Energy-Elmendorf-Tearing-Tester-#>

Catálogo Tearing Tester FX 3750 Elmendorf tester. TEXTTEST. [http://www.texttest.ch/pdf-files\\_en/3750\\_leaflet\\_en.pdf](http://www.texttest.ch/pdf-files_en/3750_leaflet_en.pdf)

#### 4.1.3.3 Videos sobre ensayos por el método Elmendorf

*E27 Determination Of Tear Strength Of Fabrics By The Elmendorf Method*

<https://www.youtube.com/watch?v=ULpaJa1vvg8>

*ASTM D1424 Tearing Strength* <https://www.youtube.com/watch?v=gcYUo90jIhU>

*14/16 - Mesure de la résistance à la déchirure - Test produit fini Dickson Sunbrella*

<https://www.youtube.com/watch?v=CXOk0IPJ2Mg>

*Thwing-Albert ProTear Elmendorf Tear Tester* <https://www.youtube.com/watch?v=Bh-WynuJjJs>

*SLY-S1 Elmendorf Tear Strength Tester - Labthink®*

<https://www.youtube.com/watch?v=OOqfMWIaIXM>

#### 4.1.4 Medida del comportamiento de la costura de los tejidos

La costura es una de las operaciones más importantes del proceso de confección industrial, y consiste en una serie de puntadas para unir dos o más tejidos. Se considera a la puntada como la unidad elemental de entrelazado de los hilos de coser con los tejidos.

Durante el uso de las prendas los puntos de unión de los tejidos mediante la costura sufren una serie de tensiones y desgastes que pueden alterar la estabilidad de la unión, influyendo negativamente tanto en el aspecto externo de la prenda como en las propiedades funcionales de la misma.

El deslizamiento o apertura de las costuras de las prendas depende de diversos factores, como la estructura del tejido, tipo de costura, tipo de hilo de coser y las condiciones en que se han realizado las puntadas.

#### Normativa aplicable

- BS 3320. Determinación del deslizamiento de las costuras en tejidos de calada.
- UNE-EN ISO 13936-1: 2004. Textiles. Determinación de la resistencia al deslizamiento de los hilos de la costura en los tejidos de calada. Parte 1: Método de la apertura de la costura fija (ISO 13936-1:2004).
- UNE-EN ISO 13936-2: 2004. Textiles. Determinación de la resistencia al deslizamiento de los hilos de la costura en los tejidos de calada. Parte 2: Método de la carga fija (ISO 13936-2:2004).
- LEITAT 88.313: Determinación de la resistencia al deslizamiento de los hilos de los tejidos.

Probeta: se cortan 5 muestras rectangulares de 10 x 17,5 cm, en dirección urdimbre y otras 5 en dirección trama de tal forma que sean representativas del lote estudiado (no debe tener los mismos hilos de urdimbre y trama). Se doblan las muestras por la mitad haciendo coincidir los lados más cortos (figura 37). A continuación se cose una costura paralela a estos a una distancia de 15 mm de la doblez. Se realiza una puntada tipo 301 o de pespunte (figura 38). A continuación se procederá a cortar con unas tijeras la doblez del tejido.

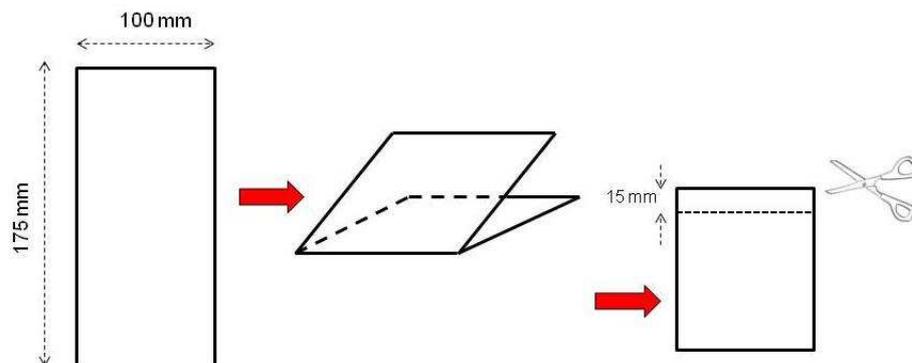


Figura 37. Probetas del ensayo de resistencia a las costuras según norma BS 3320.

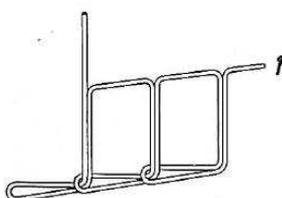


Figura 38. Puntada 301. Fuente. [Dürkopp Adler](#)

Existen dos métodos de ensayo:

- a) Método apertura de costura fija. Consiste en determinar la carga necesaria para producir una apertura de costura de medida fija.
- b) Método carga fija: consiste en determinar la apertura de la costura a una carga de tracción fija.

El procedimiento operatorio de la norma BS3320 (carga fija) es la siguiente:

- a) Se colocan las mordazas del dinamómetro (de gradiente de alargamiento constante) a una distancia de 75 mm.
- b) A continuación se sitúa la muestra simétricamente en las mordazas con la costura bien paralela a los bordes de las mismas.
- c) Aumentar gradualmente la carga en sentido axial a la muestra hasta llegar a 7 kg en tejidos cuyo gramaje no supere los 140 g/m<sup>2</sup>, y hasta 11,5 kg en los iguales o superiores a dicho gramaje.
- d) Determinar el ancho que se abre la costura y la distancia más separada. Medir en ángulos rectos a la costura, desde el borde no distorsionado del tejido a un lado de la costura hasta el borde no deformado del tejido del otro lado, tal como se muestra en la figura siguiente.

Para cada grupo de muestra (urdimbre y trama), calcular con una precisión de 0,5 mm, el valor medio de apertura de las costuras medidas.

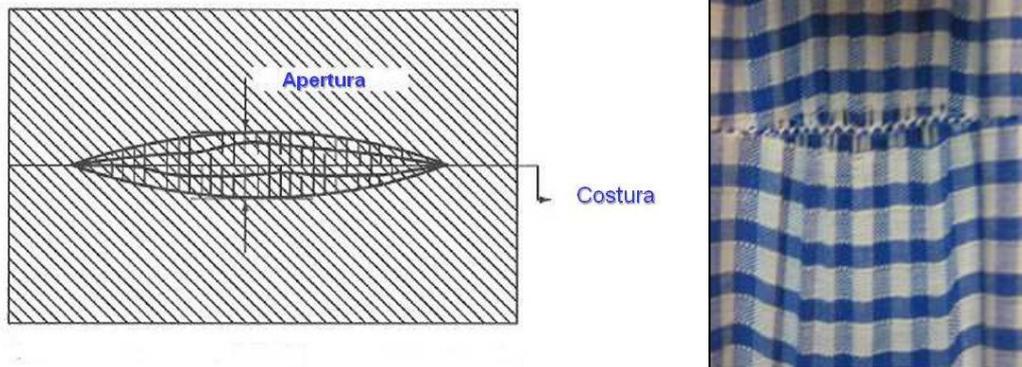


Figura 39. Apertura de las costuras bajo la tensión. Fuente: [SDL Atlas](#)



Figura 40. Medida de la apertura de la costura. Izquierda [SDL Atlas](#). Derecha : [Roteks](#)

#### 4.1.4.1 Videos del ensayo de resistencia a las costuras

*E30 Determination Of Seam Slippage By Use Of Fixed Seam Opening*  
<https://www.youtube.com/watch?v=vjAgcRtvM9A>

*E30 Determination Of Seam Slippage By Use Of Fixed Seam Opening*  
<https://www.youtube.com/watch?v=vjAgcRtvM9A&list=PL385DBFE7F5CA10A8>

*ASTM D1683 Seam Slippage* <https://www.youtube.com/watch?v=JzCQrwrFmMk>

*Sewn Seam Strength Test* <https://www.youtube.com/watch?v=TwQkH6cXuQQ>

#### 4.1.5 Resistencia al estallido

Hasta ahora se han descrito ensayos relacionados con el comportamiento mecánico de los tejidos cuando están sometidos a esfuerzos en sentido axial. Sin embargo durante el uso de los tejidos, éstos están sometidos a tensiones en varias direcciones. El ensayo de resistencia al estallido es adecuado, precisamente para valorar el comportamiento de los tejidos ante tensiones multiaxiales como es el caso de filtros, sacos, bolsas, redes, paracaídas, guantes, air-bags, etc.

La resistencia al estallido es la fuerza que opone una probeta fijada de forma circular a una carga por compresión en aumento de forma unilateral y uniforme hasta estallar.

Existen dos variedades de ensayo:

- a) Ensayo de penetración de la bola (ISO 3303-1990 B): En este ensayo se somete al tejido a la acción de una esfera de acero, que ejerce una carga en sentido perpendicular al plano del tejido. Se realiza mediante un dinamómetro convencional que dispone de unos accesorios formados por una mordaza inferior que sujeta y mantiene la probeta en posición horizontal y un vástago superior que termina en una bola de acero de 1 pulgada de diámetro (el diámetro varía con el

gramaje del tejido analizado), que va descendiendo gradualmente sobre la muestra. La fuerza necesaria para producir el reventado del tejido será la resistencia al estallido.

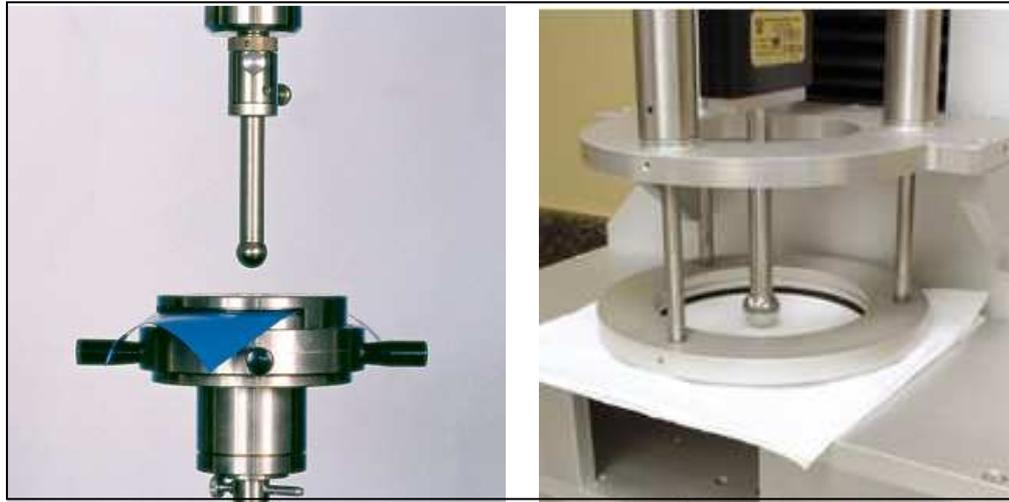


Figura 41. Ensayo de resistencia al estallido por penetración de bola de acero. Izquierda [Zwick](#). Derecha [Thwing Albert](#)

- b) Ensayo hidráulico (ISO 13938-1:1999): El instrumento que se emplea recibe el nombre de eclatómetro y consta esencialmente de un recipiente que por su parte inferior comunica con un depósito o cámara de fluido (glicerina o aire). En su parte superior tiene una abertura circular perfectamente tapada con una fina membrana de caucho con una gran capacidad de expansión. Encima se ajusta hermética y fuertemente una mordaza anular y por el centro superior de ésta pasa una varilla metálica que por su parte inferior se apoya en el centro de la membrana de caucho y por la parte superior comunica con un medidor de altura. En comunicación con la cámara de fluidos hay un manómetro para medir la presión del interior de la cámara. La diferencia entre la presión total requerida para la rotura de la probeta de tejido y la presión requerida para inflar la membrana de caucho se denomina resistencia al estallido. En los eclatómetro hidráulicos se emplea glicerina pura (96%) o bien etilenglicol.

El eclatómetro debe poder producir diferentes velocidades constantes de aumento de volumen por unidad de tiempo entre  $100 \text{ cm}^3/\text{min}$  y  $500 \text{ cm}^3/\text{min}$ ,  $\pm 10\%$ . En los aparatos no equipados con un dispositivo de ajuste del volumen de fluido, puede aplicarse un tiempo de ensayo hasta estallido de  $20 \pm 5$  segundos.

Para la medida de la resistencia al estallido de los tejidos de malla, se utiliza la norma ISO 13938- 1 y 2. En dicha norma una probeta de tejido se fija a una membrana por medio de un anillo de sujeción, eliminando dobleces y pliegues. Una presión creciente de aire comprimido sobre la cara inferior de la membrana provoca la deformación de la misma y del tejido. Se aumenta la presión suavemente hasta el estallido de la probeta (la rotura), de este modo se determina la resistencia y la deformación al estallido. La superficie de ensayo será de  $50 \text{ cm}^2$  (79,8 mm de diámetro). Si no se pudiera hacer esta superficie se ensayarían con superficies de  $100 \text{ cm}^2$ ,  $10 \text{ cm}^2$  o  $7,3 \text{ cm}^2$ . Será necesario hallar la corrección para el descuento posterior, mediante el accionamiento del equipo en

vacío (sin tejido). La presión registrada debe descontarse a todas las presiones totales de los ensayos previos. El resultado de ésta resta constituye la presión necesaria para reventar el tejido. Los resultados del ensayo indican la presión necesaria para romper por estallido la probeta en kPa, los milímetros que se ha deformado la probeta y la duración del ensayo en segundos.

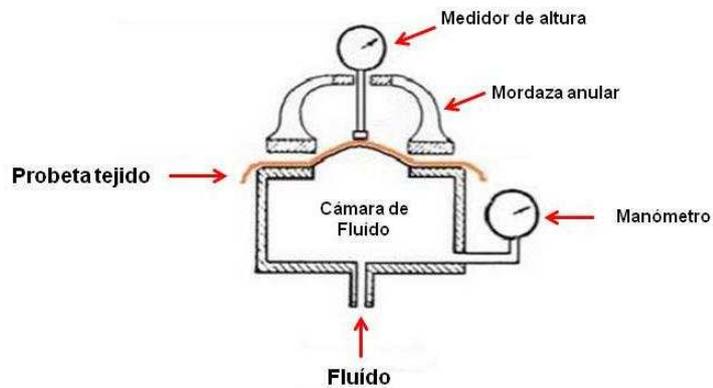


Figura 42. Esquema genérico de un eclatómetro hidráulico.



Figura 43. Eclatómetro analógico hidráulico de glicerina. Fuente [GarmensTech](#)



Figura 44. Eclatómetro digital. Fuente: [James Heal TruBurst](#)

#### 4.1.5.1 Videos del ensayo de resistencia al estallido

*Determination of burst strength (tissue products)*

<https://www.youtube.com/watch?v=WPBmAp0hvwE>

*TruBurst. James Heal.* <https://www.james-heal.co.uk/en/truburst>

*E26. Determination of Busrsting Strength in Fabrics*

<https://www.youtube.com/watch?v=frO4S9WlqMc>

*Digital Bursting Tester* <https://www.youtube.com/watch?v=ThlHCJyj9zq>

*Catálogo Digital Bursting Tester Sodemat.*

<http://www.mat-ing.com/en/instruments/sodemat/textiles/clothing/item/377-digital-bursting-tester>

#### 4.1 6. Fuerza de compresión de los tejidos sobre el cuerpo humano

Una gran cantidad de tejidos, especialmente los de malla, forman parte de prendas que se aplican directamente sobre el cuerpo humano, produciendo un determinado grado de compresión sobre éste. Éstos son los casos de prendas de vestir habituales en el uso diario como calcetines, medias, guantes, bañadores, gorros, etc. También sería el caso de prendas que presentan sistemas sujeción como cinturas elásticas o cinturones. Un caso aparte serian las prendas de uso sanitario como vendas, medias terapéuticas, fajas, etc. En estos casos la determinación del grado de compresión que ejercen sobre el cuerpo tiene un gran interés.



Figura 45. Equipo de medida de la fuerza de compresión de las prendas. Fuente: [SODEMAT](http://www.mat-ing.com)

Para la determinación de esta propiedad, la empresa francesa SODEMAT, ha desarrollado un equipo denominado balanza de compresión consistente en un ensayo no

destruccion, donde una probeta de tejido tubular se introduce en un cabezal formado por dos ejes, uno de fijo y otro de móvil. El móvil está sujeto a un sistema de muelles que indica en una escala graduada, la fuerza de compresión que ejerce la prenda tubular.

De especial interés para evaluar prendas deportivas y sanitarias.

#### 4.1.7 Rigidez a la flexión

Es una propiedad básica de los tejidos puesto que influye tanto en su tacto, mano y cayente, estando también relacionada con la recuperación del arrugado (a más rigidez a la flexión, mayor capacidad de recuperación de la arruga).

Puede definirse como la fuerza que se opone a la flexión de un tejido, al par de fuerzas necesario para provocar una unidad de curvatura del tejido, o bien a la primera derivada de la curva del momento de curvatura (42).

Su evaluación puede realizarse mediante 3 métodos:

- a) Longitud del voladizo. Longitud de tejido necesaria para que el tejido se deforme  $41,5^\circ$  por acción de su propio peso.

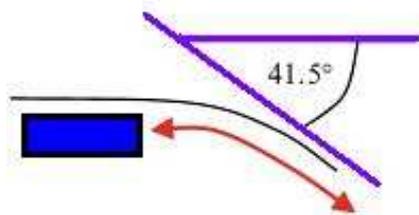


Figura 46. Principio del ensayo del voladizo

- b) Longitud del bucle: Longitud del perfil de una tira de tejido pinzado por sus dos extremos y dejado caer libremente.

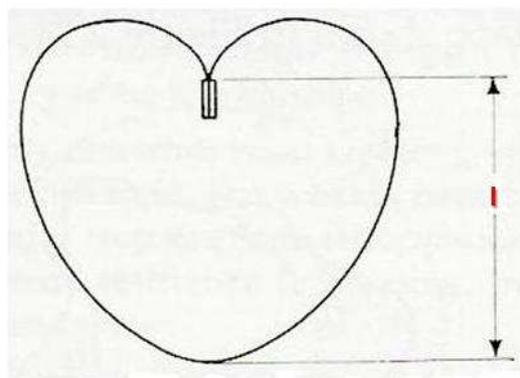


Figura 47. Principio del ensayo del bucle

- c) Ensayo del momento de curvatura: Se determina la flexión pura sin influencia del peso del tejido

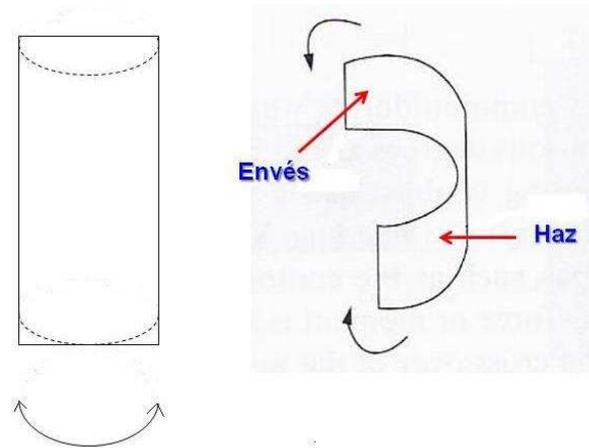


Figura 48. Principio de medida del ensayo del momento de curvatura

#### 4.1.7.1 Longitud del voladizo

El método de longitud del voladizo, fue el primero en ser usado para evaluar indirectamente el cayente de los tejidos al reconocerse que la rigidez a la flexión de éstos tiene una gran influencia en su cayente. En éste método, el tejido simula el voladizo de una viga que al ser cargada por su propio peso se dobla y la secante que define sus extremos define un ángulo con la horizontal (ver figura 49).

Siendo “ $l$ ” la longitud de la muestra (voladizo), la longitud de curvatura “ $c$ ” se define como una función del ángulo de la secante:

$$c = l \cdot f(\theta)$$

Y esta función del ángulo puede definirse como:

$$f(\theta) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\operatorname{tg} \theta}}$$

La rigidez a la flexión o curvatura se calcula mediante la siguiente expresión:

$$B = P \cdot c^3$$

donde:

$B$  = es la rigidez a la flexión ( $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ )  
 $P$  = masa superficial del material ( $\text{g}/\text{m}^2$ )  
 $c$  = longitud de curvatura (m)

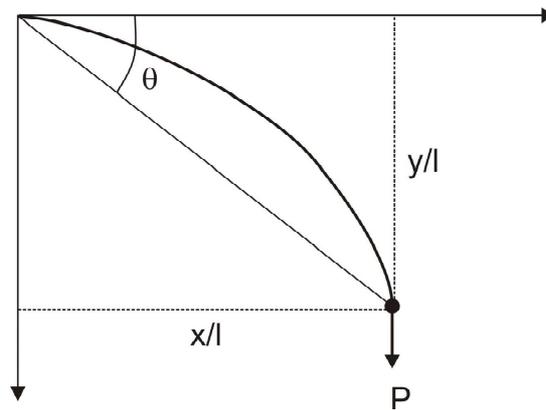


Figura 49. Principio físico del método de la longitud del voladizo (44)

A partir de éste método, se han desarrollado diversos equipos basados en la longitud del voladizo como el “Shirley Stiffness Tester” (figuras 51 y 52), que mide la longitud de voladizo “l” necesaria para que la probeta alcance una deformación correspondiente a un ángulo de la secante de  $41,5^\circ$ . La elección de éste ángulo está basada en que la longitud de curvatura es la mitad de la longitud del voladizo:

$$\frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\operatorname{tg} \theta} = 1,05 \cong 1 \quad , \quad B = P \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3$$

Y entonces la longitud de curvatura es una cierta medida de la rigidez a la flexión.

$$c = \left(\frac{B}{P}\right)^3$$

El equipo Shirley descrito a continuación es el que se utiliza en la norma UNE 40-392-79 para la determinación de la rigidez a la flexión de un tejido que no posea deformaciones permanentes o presente una marcada tendencia a arrollarse por su extremo libre.

El fundamento de este ensayo consiste en retener una tira de tejido por un extremo, en posición horizontal, y se deja libre o en voladizo por el otro. Como consecuencia del peso del propio tejido, éste se flexa o dobla, aumentando dicho doblado al aumentar la longitud del voladizo. El procedimiento consiste en determinar la longitud de tejido en voladizo necesaria para que la flexión o doblado del extremo libre forme un ángulo fijo, con respecto a un plano horizontal.

Para la realización del ensayo se cortan como mínimo 4 tiras de 25 mm x 150 mm, en su sentido urdimbre y trama, respectivamente (figura 50).

Las probetas se mantienen 24 horas sobre una superficie plana horizontal, en atmósfera normal ( $20^\circ \text{C} \pm 2^\circ$  y  $65 \% \pm 2 \%$  de humedad relativa).

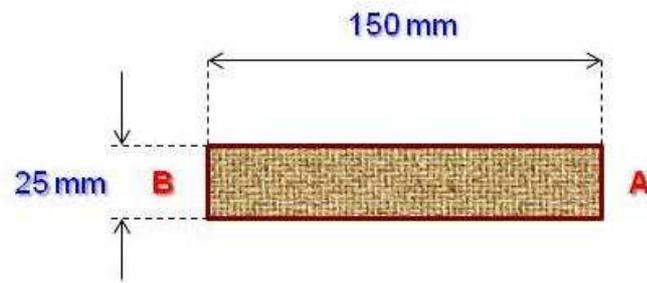


Figura 50. Medidas de las probetas del ensayo del voladizo

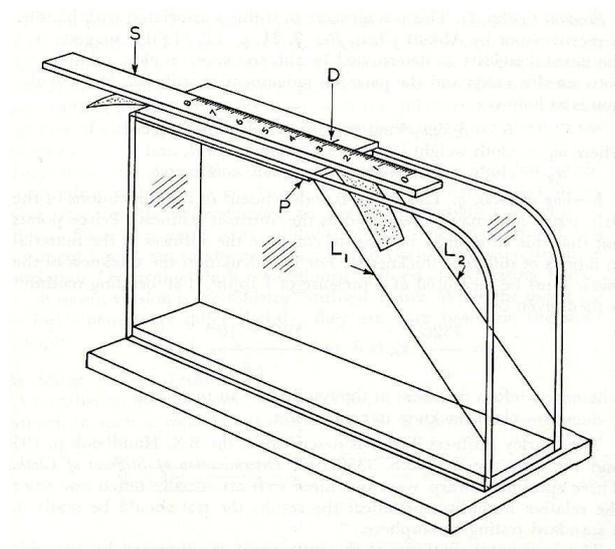


Figura 51. Esquema del Shirley Stiffness Tester (44)



Figura 52. Imágenes del medidor de rigidez. Izquierda: [B-tex](#) Derecha: [Wealth Town](#)

Se coloca la probeta sobre la plataforma D del aparato descrito anteriormente (figura 51), de forma que el extremo de la probeta coincida con el extremo de la plataforma D y de la regla graduada S.

Se hace deslizar hacia la derecha, la regla y el tejido sobre la plataforma D. Al quedar en voladizo el tejido se dobla por acción de su propio peso. Cuando el extremo de la probeta coincide con las líneas paralelas  $L_1$  ó  $L_2$ , se lee sobre la regla S la longitud del voladizo. El ensayo se repetirá para cada probeta colocada en las cuatro posiciones posibles (cada uno de sus extremos -A y B- por el haz y por el envés, tal como se muestra en la figura 53).

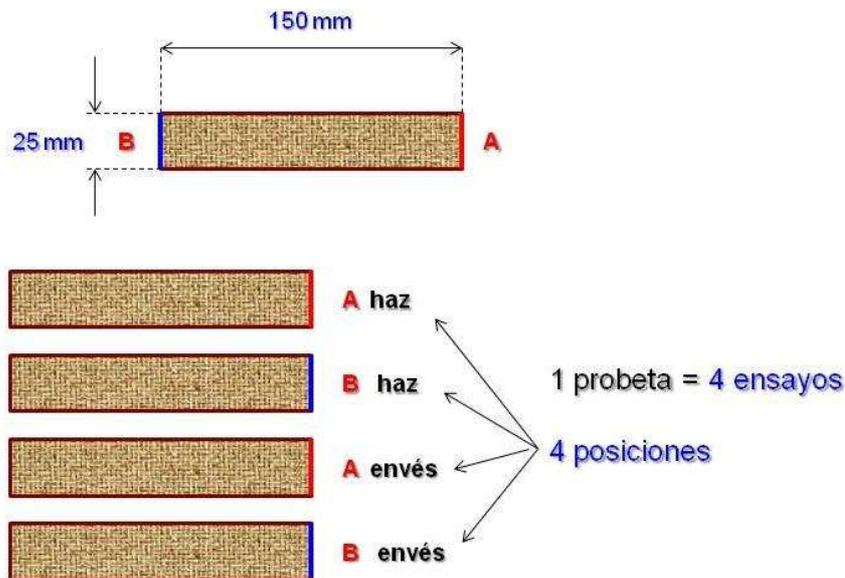


Figura 53. Las cuatro posiciones de ensayo de cada probeta del voladizo

Se determinan los siguientes parámetros:

a) Longitud de curvatura  $c$ ,  $c = \frac{l}{2}$

b) Rigidez a la flexión  $R$ ,  $R = 0,1 \cdot c^3 \cdot P$

donde,

$l$  = longitud de voladizo expresado de regla y tejido desplazados (valor medio de las mediciones llevadas a cabo) (cm)

$P$  = Peso por metro cuadrado del tejido ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

$g$  = Grosor o espesor del tejido (mm)

$c$  = Longitud de curvatura en (cm)

$R$  = Rigidez a la flexión ( $\text{mg} \cdot \text{cm}$ )

Puede obtenerse el valor medio total de la rigidez a la flexión  $R_G$  como la media geométrica de la Rigidez a la flexión por urdimbre  $R_V$  y la Rigidez a la flexión por trama  $R_T$ .

$$R_G = \sqrt{R_V \cdot R_T}$$

Se puede calcular asimismo el Módulo de curvatura “q”, expresado en kg/cm<sup>2</sup> mediante la siguiente fórmula:

$$q = \frac{12}{10^6} \cdot \frac{R}{g^3}$$

Como ya se ha indicado anteriormente el método del voladizo ha sido usado para la valoración indirecta y objetiva del cayente, no obstante se trata de una medida bidimensional que no refleja la naturaleza real del cayente que implica deformaciones en tres dimensiones y deformaciones de doble curvatura.

En el año 1980 la empresa FRL Machines Inc., afirmó que su instrumento de medición de la flexión por el método del voladizo era capaz de determinar tanto la rigidez a la flexión de una hoja delgada como de tejidos textiles y otros materiales incluidos las alfombras. A partir de estos equipos se han hecho diversos desarrollos en términos de automatización.

El sistema FAST (*Fabric Assurance by Simple Testing*) desarrollado por el centro australiano CSIRO para la evaluación de la confeccionabilidad de los tejidos de calada de lana y mezclas utiliza un equipo llamado FAST-2 consistente en un medidor de la rigidez a la flexión por el método de la longitud del voladizo. El principio es muy similar al equipo Shirley antes descrito en el cual la probeta de tejido se flexiona por acción de su propio peso alcanzando una deformación de un ángulo de 41.5° respecto a la horizontal. La medida de las probetas (2,45 x 50 mm) es algo distinta que el Shirley y el sistema de medición de la deformación del tejido es totalmente electrónico. La probeta se desliza horizontalmente por un voladizo de tal forma que el tejido sobresaliente entra en una cavidad debiendo parar el avance del tejido cuando una señal luminosa nos indica que el tejido ha interceptado un haz de luz infrarroja inclinado a 41.5° respecto a la horizontal. Debajo de la probeta el tejido roza con un disco que mide el avance del tejido y por lo tanto la longitud del voladizo. Esta longitud (mm) se muestra en una pequeña pantalla y su valor numérico es enviado a un ordenador central que registra, en línea, todas las medidas realizadas por los distintos aparatos del equipo FAST (figura 54). Para más detalles de este equipo véase el capítulo específico de este equipo.

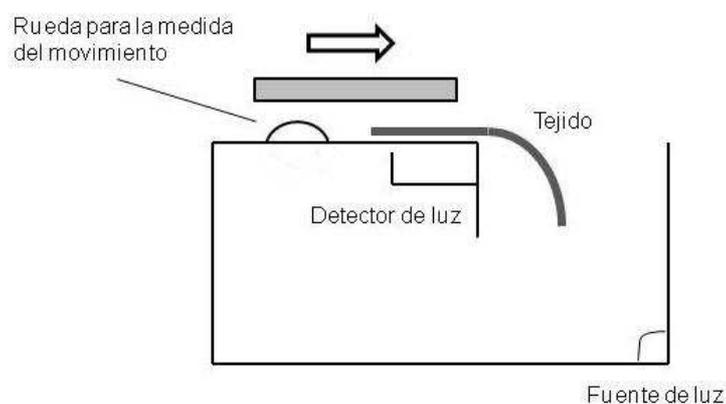


Figura 54. Esquema de funcionamiento del FAST-2. Fuente (44).

#### 4.1.7.1.1 Videos del ensayo de rigidez a la flexión por el método de longitud del voladizo

*Fabric Stiffness Tester. Paramount* <https://www.youtube.com/watch?v=LnUXrwfNjhY>

*E23 Determination Of Bending Strength Of Fabric. Shirley test*  
<https://www.youtube.com/watch?v=0VJ5djFt9Oc>

#### 4.1.7.2. Ensayo Kawabata (KES-F)

La principal diferencia del método de ensayo de longitud del voladizo y el método Kawabata (KES-F), es que en el primero la rigidez a la flexión la produce la acción del propio peso del tejido cuando se deja caer libremente, mientras que el segundo determina el momento de flexión cuando se dobla (flexiona) un tejido sin la influencia de su gramaje. Si bien existe una elevada correlación de los valores de flexión obtenidos por ambos métodos, conviene tener presente que los principios de ensayo son totalmente distintos. Para más detalles de este ensayo consultar el capítulo 8.3.

#### 4.1.8. Determinación del cayente estático de los tejidos

##### 4.1.8.1 Objetivo del ensayo

El cayente es el grado en que un tejido se deforma cuando se deja colgar libremente por acción de su propio peso.

El cayente, junto con la mano de los tejidos, es una propiedad que los consumidores evalúan de forma subjetiva a través de las sensaciones que perciben cuando observan o bien tocan los tejidos. En la medida que su apreciación puede llegar a ser un factor determinante en el criterio de compra de determinados tejidos, su medición, adquiere una especial importancia industrial, económica y comercial. Sin embargo a pesar de que esta propiedad textil se determina de forma visual, se evalúa -en cambio- de forma subjetiva en base a patrones socioculturales e históricos variables en el tiempo (moda) y en el espacio (latitud geográfica).

##### 4.1.8.2 Principio del ensayo

El principio de funcionamiento de este equipo consiste esencialmente en lo siguiente: una probeta circular de tejido se deposita horizontalmente encima de un disco metálico de diámetro inferior a la probeta. La parte del tejido que no descansa sobre este disco rígido vuela libremente en función de su cayente. Justo debajo del centro de la probeta circular se encuentra una bombilla que proyecta un haz de luz hacia abajo. Este haz de luz se proyecta hacia un espejo cóncavo que devuelve la luz hacia arriba y al interceptar la probeta de tejido circular proyecta la sombra de su cayente sobre un papel anular situado en un plano paralelo al tejido y encima de éste (ver figuras 55, 56, 57, 58 y 59).

El índice de cayente DR se define como la fracción del área del anillo anular cubierta por la proyección del voleo de la muestra.

$$DR = \frac{\text{Area de la sombra proyectada por la muestra} - \text{Area del disco de soporte}}{\text{Area de la probeta} - \text{Area del disco de soporte}}$$

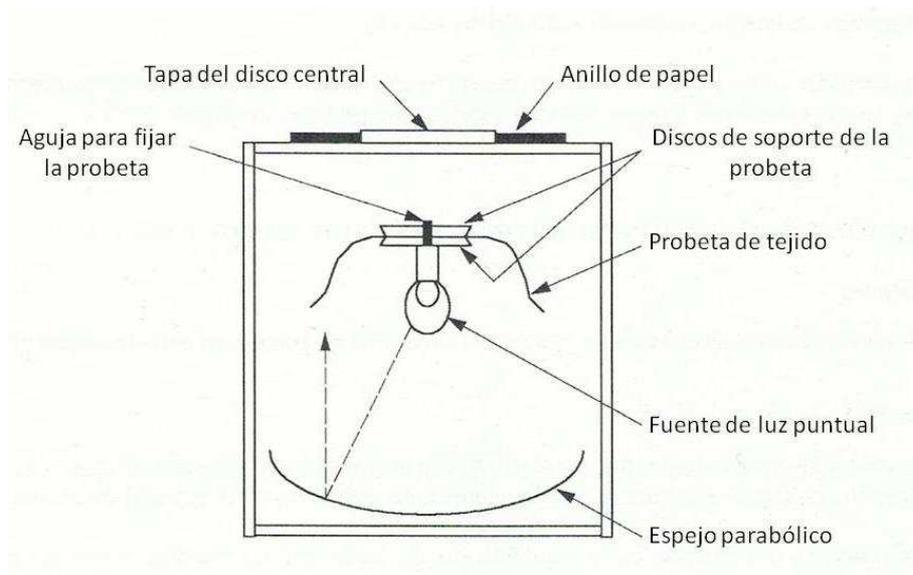


Figura 55. Esquema del funcionamiento del drapómetro Cusick (44)



Figura 56. Vista superior de la versión actual del drapómetro Cusick comercializado por SDL Atlas.  
Fuente: (44)

En definitiva una pieza circular del papel, de radio  $R$ , se coloca en el centro del aparato. El perímetro de la sombra proyectada del tejido caído se dibuja sobre el papel. A continuación se recorta el papel por la línea marcada anteriormente y se obtiene la zona "A" de la figura 64. Esta área de papel se pesa obteniendo  $W_1$ . A continuación se pesan

conjuntamente los trozos de papel de las partes “A” y “C”, obteniendo el peso  $W_2$ . El DR (drape ratio en inglés) es el cociente entre ambos pesos:

$$DR = \frac{W_1}{W_2}$$



Figura 57. Vista inferior de la versión actual del drapómetro Cusick. (44)



Figura 58. Perfil de la sombra proyectada del cayente del tejido en la drapómetro Cusick. (44)

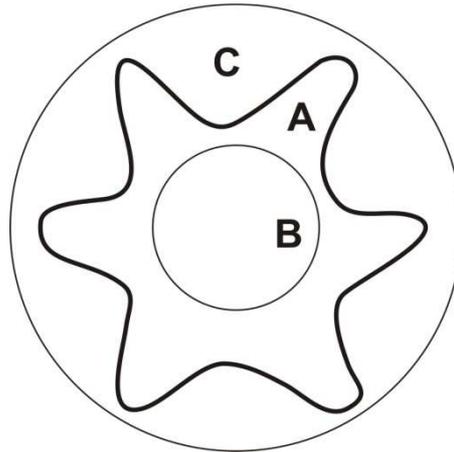


Figura 59. Perfil de la sombra proyectada del cayente del tejido en el drapómetro Cusick. La zona “C” corresponde al área de la sombra proyectada por el tejido. (44)

Los ensayos se realizan por el haz y por el envés de cada probeta y se obtiene media de las dos determinaciones de 4 probetas.

El DR, expresado en % (DR%), nos suministra una descripción objetiva de la deformación del tejido aunque no de una forma totalmente completa. Un índice de cayente bajo nos indica que el tejido se deforma con facilidad mientras que uno de alto indica una baja deformación (figura 60).

DR%	25,072	45,013	55,90	73,334

Figura 60. Aspecto del perfil del cayente de 4 tejidos con DR% distintos (44)

Sin embargo este índice es insuficiente para explicar el complejo fenómeno tridimensional del cayente, puesto que dos tejidos que tengan el mismo DR% pueden presentar formas de cayente notablemente distintas (ver figura 61). No hemos de olvidar que este método de ensayo se basa en analizar una realidad tridimensional -el cayente- y reducirla a una de bidimensional -la sombra del cayente proyectada en un plano-.

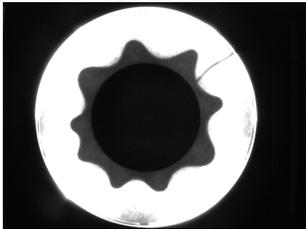
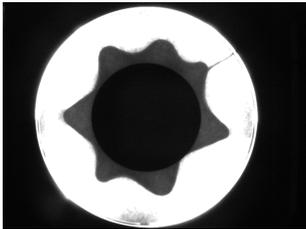
Ref	A	B
Imagen		
DR%	39,518	39,698
FN	9	7

Figura 61. Dos tejidos con el mismo valor DR% pueden presentar perfiles de cayente distintos (44)

Cusick demostró que el cayente del tejido implica una deformación de éste con una curvatura en más de una dirección y ésta deformación depende tanto de la rigidez a la cizalladura como de la rigidez a la flexión. A partir de ello formuló una ecuación que relacionaba DR% con rigidez a la flexión (medida mediante la longitud del voladizo) y la rigidez a la cizalladura. Para más información sobre el cayente de los tejidos puede consultarse la referencia bibliográfica 44.

Tanto en la norma BS 5058 1973 como la ISO 9073-9, utilizan un disco de soporte de 18 cm y una probeta circular de 24, 30 ó 36 cm en función del rango del índice de cayente DR%.

Normativa aplicable:

- UNE 40-383-79: Determinación del cayente de telas no tejidas
- ISO 9073-9 Textiles. Test methods for nonwovens. Part 9: Determination of drapability including drape coefficient.
- BS- 5058-1973: Methods for the Assessment of Drape Fabrics
- DIN 54306: Testing Textiles for Determination of the Drape Fabrics
- JIS R 3418: Textile Glass Fabric for Curtains for Casement and Drapery

#### 4.1.8.3 Catálogos de drapómetros:

SDL Atlas. <http://www.sdlatlas.com/product/69/Fabric-Drape-Tester>

James Heal. <https://www.james-heal.co.uk/en/drape-tester>

ATI. Drape Tester 665. [http://www.aticorporation.com/files/Drape\\_Tester\\_665.pdf](http://www.aticorporation.com/files/Drape_Tester_665.pdf)

#### 4.1.8.4 Drapómetros digitales

En los últimos veinticinco años se ha producido un notable desarrollo en el área de la medida del cayente de los tejidos debido al uso de las nuevas técnicas de análisis de

imagen en este ensayo. La innovación consiste en colocar una cámara digital encima del drapómetro para capturar de la imagen de la sombra proyectada por el cayente del tejido. Esta imagen se envía a un ordenador que la analiza con un software específico (figura 62).

Se ha demostrado que, con ésta técnica, no existen diferencias significativas entre el índice de cayente DR% calculado por el método tradicional y el método digital.

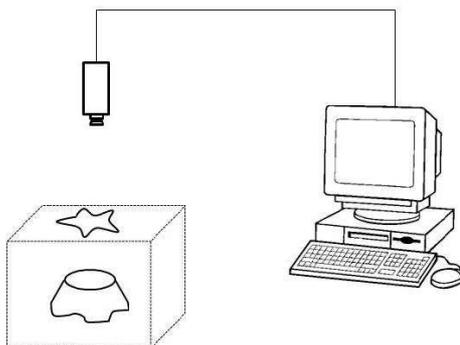


Figura 62. Drapómetro digital (44)

Posteriormente se integraron el principio del drapómetro Cusick con las técnicas de análisis de imagen para la medida del DR%, el cual se calcula a partir del número de píxeles que ocupa el área proyectada por los tejidos sujetos a su caída.

Este es en la actualidad, el método más utilizado para el estudio del fenómeno del cayente si bien existen pequeñas diferencias entre ellos en función del programa de análisis de imagen utilizado.

#### 4.1.8.4.1 Drapómetro digital UPC

Con motivo de la elaboración de una investigación sobre el cayente de los tejidos de calada, en el la Laboratorio de física textil del Departamento de Ingeniería Textil y Papelera de la UPC, se ha procedió a desarrollar un drapómetro digital propio, denominado “drapómetro digital UPC” (44). El equipo está formado por drapómetro convencional Cusick SDL ATLAS, que lleva incorporado en su parte superior de una cámara digital CCD modelo Guppy F33B AVT monocromo. La cámara va conectada a un ordenador que recoge la señal y la procesa mediante el programa de análisis de imágenes (figura 63).

La Guppy F-033B/C es una cámara VGA de visión ultra compacta con un sensor CCD, Sony ICX424. Las características técnicas se describen en la tabla 4.

Antes de realizar los ensayos mediante este equipo, se procedió a calibrar la cámara, de acuerdo con las instrucciones del fabricante, con el fin determinar el número de píxeles por centímetro de las imágenes capturadas, y corregir las distorsiones tanto ópticas como de alineamiento de la cámara y en base a ello proceder a realizar diversos cálculos geométricos mediante el software de análisis de imágenes, (figura 64).



Figura 63. Izquierda: Drapómetro digital UPC. Derecha: Cámara Guppy F-033. (44)

Interface	IEEE 1394a - 400 Mb/s, 1 port
Resolución	656 x 494
Sensor	Sony ICX424
Tipo de sensor	CCD Progresivo
Tamaño del sensor	Type 1/3
Tamaño de la célula	7.4 $\mu\text{m}$
Lente montada	C
Frecuencia a máxima resolución	58 fps
A/D	10 bits
Profundidad de bits	8 bits
Modos de Mono	Mono8
Modos Raw	Raw8
TTL I/Os	1 entrada y 3 salidas
RS-232	1
Requerimientos de potencia	8 V - 36 V
Consumo (12 v)	< 2 W
Peso	50 g
Longitud x Anchura x Altura, en mm)	48,2 x 30 x 30 mm

Tabla 4. Especificaciones técnicas de la Cámara Guppy F-033. Allied Vision Technologies, 2013.

Las imágenes obtenidas se han tratado mediante el software Sherlock™, comercializado por la empresa española INFAIMON, S.L. especializada en análisis de imágenes. El software tiene un lenguaje propio de programación que permite definir las instrucciones para la realización de las mediciones y cálculos necesarios. En la figura 62 se muestra la secuencia del proceso para la determinación de los parámetros de la geometría del cayente mediante el drapómetro digital UPC. En primer lugar se realiza la foto digital de la sombra proyectada por el cayente. A continuación la imagen captada, inicialmente en escala de grises, se transforma en imagen monocroma o binaria por filtración del ruido en el umbral. Posteriormente, con la imagen preparada, el software de análisis de imagen sigue las instrucciones del programa y procede a determinar los correspondientes parámetros de la geometría de la imagen. La figura 65 muestra tres fases de este proceso.

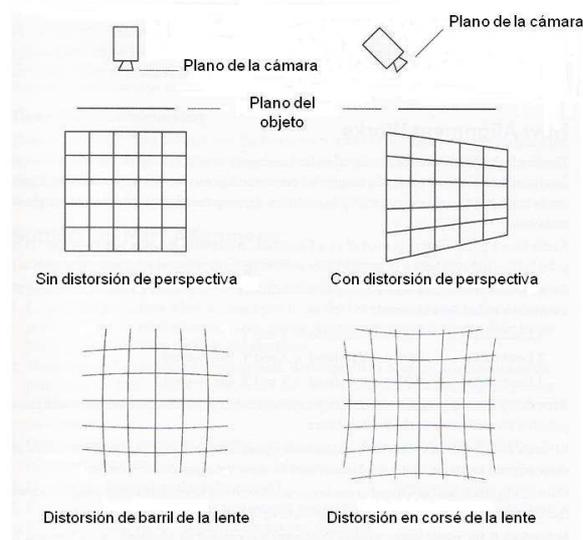


Figura 64. Distorsiones ópticas y de alineamiento de la cámara consideradas en el ajuste y calibrado de la cámara del Drapómetro digital UPC. (44)

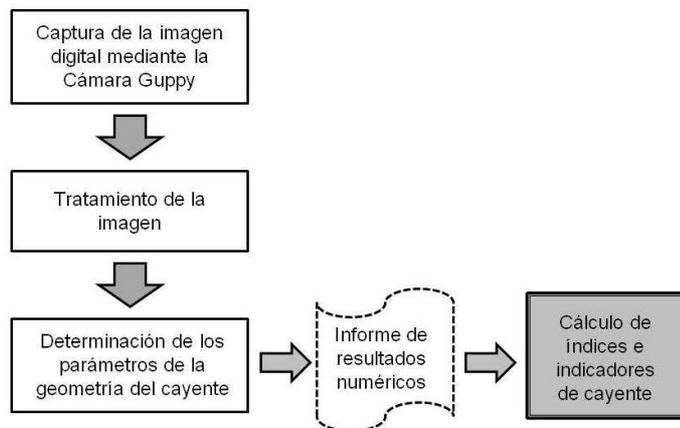


Figura 65. Proceso seguido para la determinación de los parámetros de la geometría del cayente (44)

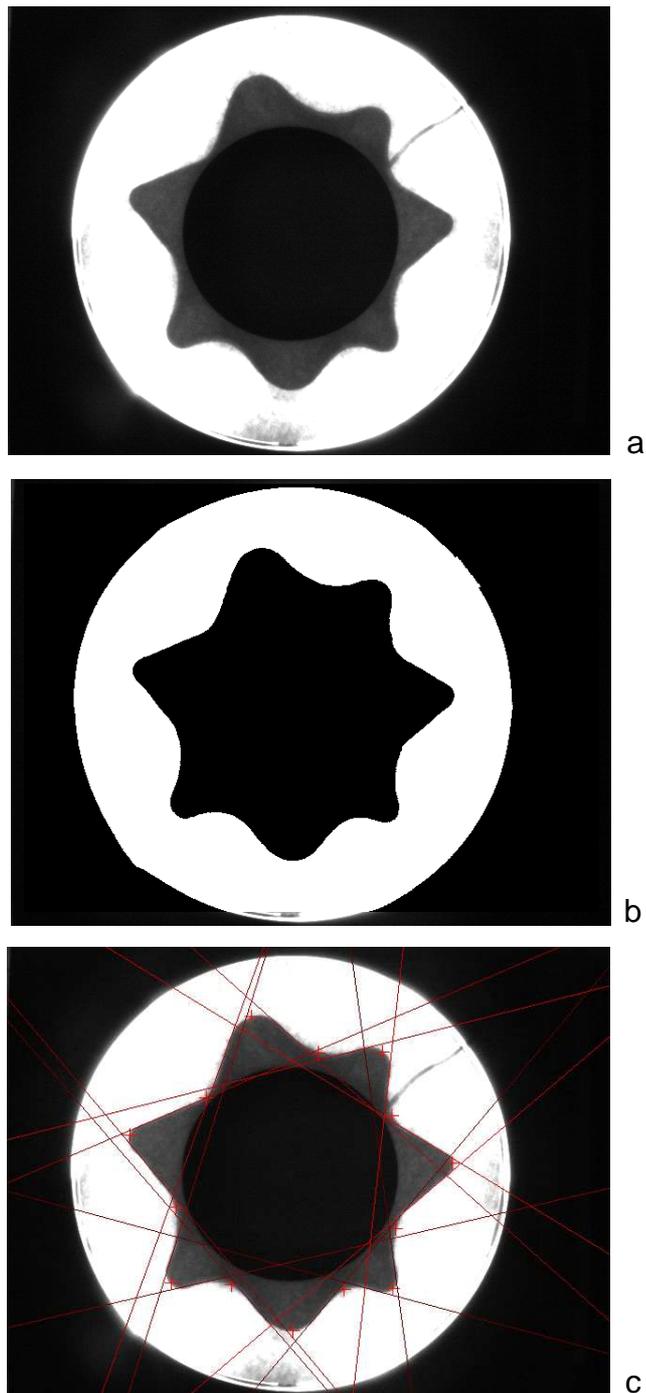


Figura 66. Imagen obtenida en el Drapómetro digital UPC. a) Obtenida con la cámara Guppy, b) imagen anterior una vez filtrado el ruido en el umbral, c) tratada con el software de análisis de imagen donde se muestran con una cruz la posición de cada Pico y Valle así como de las tangentes al perfil para el cálculo de los ángulos entre pliegues consecutivos (44)

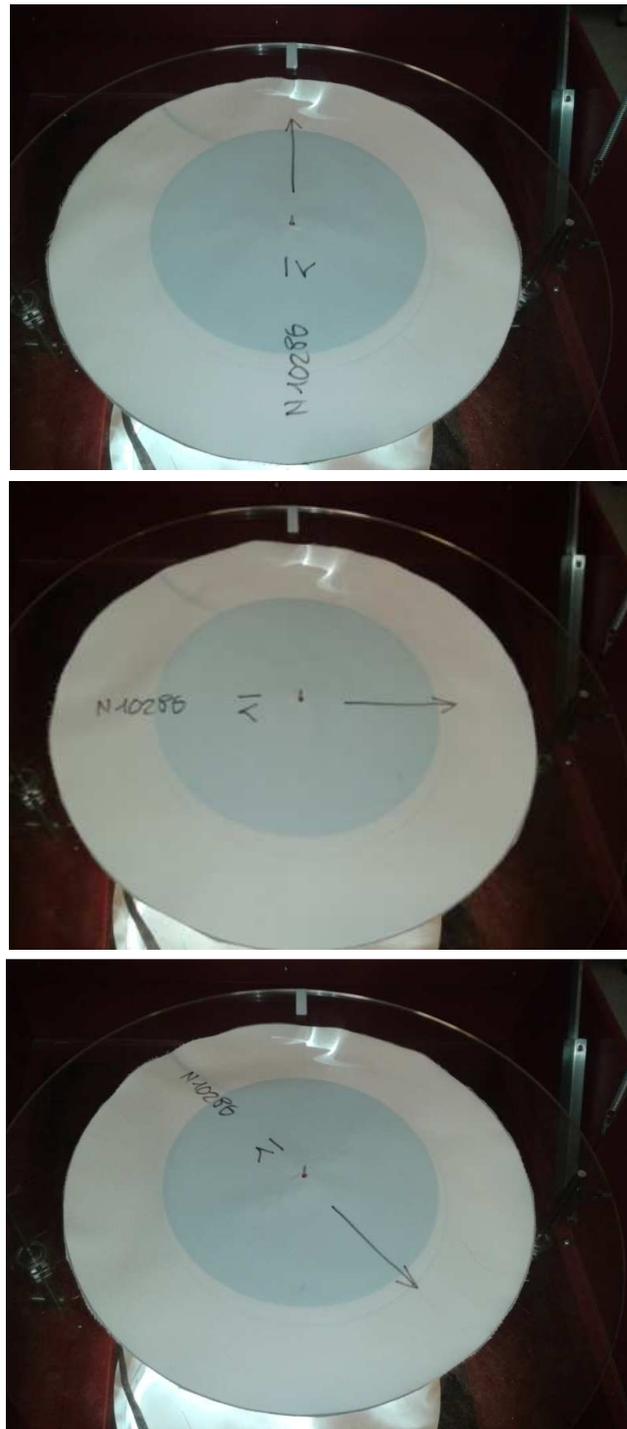


Figura 67. Posicionamiento de las probetas en el ensayo de cayente con el drapómetro digital UPC. Imagen de arriba: posición 1 ( $0^{\circ}$ ). Imagen del centro: posición 2 ( $90^{\circ}$ ). Imagen de abajo: posición 3 ( $135^{\circ}$ ). (44)

En cuanto al muestreo cabe indicar que de cada tejido se ha extraído al azar un total de 4 probetas de 300 mm de diámetro para someterlas al ensayo del drapómetro digital UPC. Las determinaciones se realizan en tres posiciones distintas de la probeta. En la primera posición denominada “Giro 0°” se hace coincidir una marca del disco de soporte del drapómetro con el sentido de la urdimbre de la probeta que descansa sobre él. En la segunda posición se hace un giro de 90° respecto a la posición primera y finalmente la tercera posición se hace un giro de 45 ° respecto a la segunda posición (y 135 ° respecto a la posición inicial) tal como se muestra en la figura 67. De cada probeta se realizan 6 determinaciones (3 por haz y otras 3 por el envés).

El resultado de cada índice o indicador de cayente obtenido, es, por lo tanto, el promedio de 24 determinaciones distintas.

En la tabla 5 se muestran las distintas variables geométricas obtenidas directamente en el ensayo del drapómetro digital UPC y en la figura 68 el significado de cada una de ellas.

Parámetro	Unidades
Área de la sombra proyectada. A	mm <sup>2</sup>
Número de nodos. FN	n
Longitud de cada Pico. FPR	mm
Longitud media de los Picos FaPR	mm
Longitud de cada Valle. VFR	mm
Longitud media de los Valles. VaFR	mm
Anchura de cada nodo. FW	mm
Altura de cada nodo. FH	mm
Ángulo entre cada nodo consecutivo. $\alpha$	(°)
Radios (1-720). Ri Distancia entre el centro de la probeta y el extremo de la sombra proyectada por el tejido caído determinada cada 0,5 °, obteniendo por lo tanto 720 determinaciones de radio.	mm
Perímetro de la sombra proyectada por la probeta. P	mm

Tabla 5. Determinaciones de los parámetros de la geometría del cayente de cada probeta, realizadas mediante el software Sherlock™ (44)

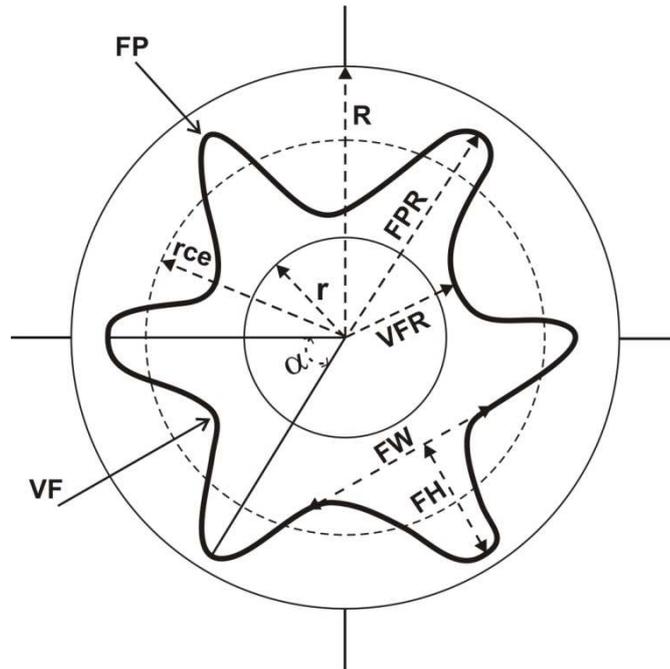


Figura 68. FP = Pico, VF = Valle, FPR = Radio del Pico, VFR = Radio del Valle, FW = Anchura del nodo, FH= Altura del nodo, r = Radio del disco de soporte, R = Radio de la probeta, rce = Radio de la circunferencia,  $\alpha$  = Angulo entre nodos consecutivos (44)

#### 4.1.8.5 Aproximación conceptual al estudio analítico del cayente

Desde que a mediados del siglo XX se diseñara el primer equipo para la evaluación del cayente de los tejidos (45), los investigadores textiles han propuesto una gran cantidad de índices e indicadores descriptores del fenómeno. La mayoría de éstas propuestas se han quedado en aportaciones aisladas que no han implicado un cambio substancial del paradigma conceptual en la evaluación del cayente. El desarrollo de la electrónica digital, sin embargo, ha permitido substituir el ojo humano por cámaras digitales que captan la sombra proyectada por el cayente en los drapómetros de tipo Cusick. Esta información ha podido tratarse mediante software de análisis de imagen lo cual ha significado un avance cualitativo muy notable en el estudio del fenómeno puesto que ha podido estudiarse la geometría de la proyección del cayente mediante herramientas matemáticas mucho más potentes. Cada uno de los indicadores propuestos, se corresponden con los distintos enfoques o aproximaciones que se han realizado para estudiar, describir, evaluar o bien simular el cayente y pueden agruparse en cuatro categorías:

- Áreas y Perímetros:** El cayente se estudia mediante el cálculo del área proyectada por la sombra de la probeta, ya sea mediante su medición directa o bien indirecta (círculo equivalente a partir de radios y/o longitud perimetral que encierra a dicha área).
- Radios:** El cayente se estudia a partir de la medida de los radios de las diversas partes de la sombra proyectada por el cayente como por ejemplo el radio medio, del radio de la circunferencia equivalente, de la relación porcentual de distancias radiales o bien su varianza. Mediante la información obtenida de los radios puede obtenerse información sobre el grado de circularidad de la forma del cayente.

- c) Nodos: Estudio de las características de los Nodos como puede ser su número, profundidad, dimensiones (Anchura, Altura, etc.) o bien su distribución y regularidad.
- d) Perfil: Estudio de la forma (severidad, esbeltez y simetría) de la curva del cayente mediante herramientas matemáticas apropiadas como son las series de Fourier, las curvas Spline o bien los fractales.
- e) Simulación 3D: El interés, tanto de los diseñadores como de los investigadores del ámbito de la computación gráfica, para simular el cayente de los tejidos en 3D ha hecho necesario determinar algunos parámetros de la geometría del cayente (como por ejemplo el ángulo de caída) que contribuyen de una forma notable a imaginar el aspecto tridimensional del cayente.

En este libro, no se utilizarán las expresiones “variables o parámetros” tal como se hace habitualmente para describir determinadas magnitudes de la geometría del cayente sino la expresión “indicadores”, más propia de los ámbitos de la economía, medio ambiente, sostenibilidad y ciencias sociales, puesto que si bien son magnitudes que describen aspectos de la geometría del cayente tienen la voluntad de explicar algo más que su propia magnitud y por lo tanto adquieren una dimensión interpretativa que conviene reconocer. Con el fin de simplificar la redacción se utilizará la expresión indicador para describir tanto a los indicadores propiamente dichos (variables como puede ser el número de nodos) como a los indicadores agregados que en sentido estricto deberían denominarse “índices” como es el caso del DR% que es una expresión numérica de la relación entre dos cantidades.

#### 4.1.8.6 Indicadores de cayente

A continuación se describen las distintas propuestas realizadas hasta la fecha por los investigadores textiles para la evaluación del cayente de los tejidos.

a) Índice de cayente, DR% (46). Explicado anteriormente. Se trata del primer índice utilizado para la evaluación tridimensional del cayente. Para ello utiliza el Drapómetro descrito anteriormente (figura 55). El índice de cayente (Drape Ratio, en inglés) se define como la fracción del área del anillo anular cubierta por la proyección del voleo de la muestra y se expresa en %. Los resultados obtenidos con este ensayo están acotados en 0 (máximo cayente) y 100 (mínimo cayente).

El DR% nos suministra una descripción objetiva del cayente del tejido aunque no de una forma totalmente completa. Un DR% bajo indica que el tejido se deforma con facilidad y por lo tanto que su cayente será elevado mientras que un DR% alto indica una baja deformación y por lo tanto un cayente también bajo

De acuerdo con la figura 59:

$$DR\% = \left( \frac{A - B}{C - B} \right) \cdot 100$$

En el fondo el DR% es un cociente entre áreas (entre la de la sombra proyectada por el cayente del tejido y la sombra proyectada por el tejido sin caer). Esta área puede obtenerse de varias formas distintas:

- Sistema Cusick: Pesando la zona del papel que proyecta la sombra del cayente del tejido y deduciendo, en función del gramaje del papel, su área en mm<sup>2</sup>.

- Sistema digital: El software de análisis de imagen calcula la superficie de la sombra proyectada por el cayente a partir de la determinación de los píxeles que ocupa la sombra.
- Sistema Radio medio: El software de análisis de imagen del drapómetro-UPC determina el radio del tejido cada  $0,5^\circ$  y el promedio de estas 720 determinaciones permite obtener el radio medio ( $R_{avg}$ ) que matemáticamente es lo mismo que el radio de la circunferencia equivalente (rce), es decir el radio de una circunferencia que tenga la misma superficie que la sombra proyectada por el cayente. A partir de este radio se obtiene el área mediante:  $A = \pi \cdot R_{avg}^2$ .
- Sistema trigonométrico: Este método (47) se propone calcular el área de la sombra proyectada por el cayente del tejido a partir de:

$$A = \pi \left( p^2 + \frac{q^2}{2} \right)$$

siendo:

$$p = \frac{FaPr + VaFR}{2}$$

$$q = \frac{FaPr - VaFR}{2}$$

b) Número de Nodos, FN (48). Determinación visual del número de nodos de la probeta en el ensayo con el drapómetro Cusick. Un nodo es un punto máximo en el perfil proyectado en un plano. Adopta una forma más o menos triangular siendo su base la dimensión FW y la altura FH (figura 68). Los tres vértices son un pico (FP) y dos valles adyacentes (VF).

c) Índice de forma, SF (49). Dada la dificultad que en los años 60 del siglo XX había para calcular, de forma sencilla y repetitiva, la forma de los nodos, los autores de éste índice proponen una simplificación del cálculo asumiendo que todos los nodos de la probeta son iguales y no presentan ninguna asimetría (figura 69). El Índice de forma (*Shape Factor*, en inglés), es el cociente entre la amplitud y la longitud de la onda formada por los nodos, asumiendo que todos ellos son iguales (en nuestro caso será el cociente entre la longitud media de los Picos -*FaPR*- y la longitud de onda  $l$ . Se expresa en mm. Matemáticamente se calcula mediante la fórmula siguiente, de acuerdo con las figuras 68 y 69 y en base al teorema del coseno.

$$l = \sqrt[2]{FPR1^2 + FPR2^2 - 2 \cdot FPR1 \cdot FPR2 \cdot \cos \alpha}$$

como  $FPR1 = FPR2$

$$SF = \frac{FPR1}{l} = \frac{FPR1}{\sqrt[2]{2 FPR1^2 (1 - \cos \alpha)}}$$

$$SF = \frac{FPR_1}{\sqrt{2 FPR_1^2 (1 - \cos \alpha)}}$$

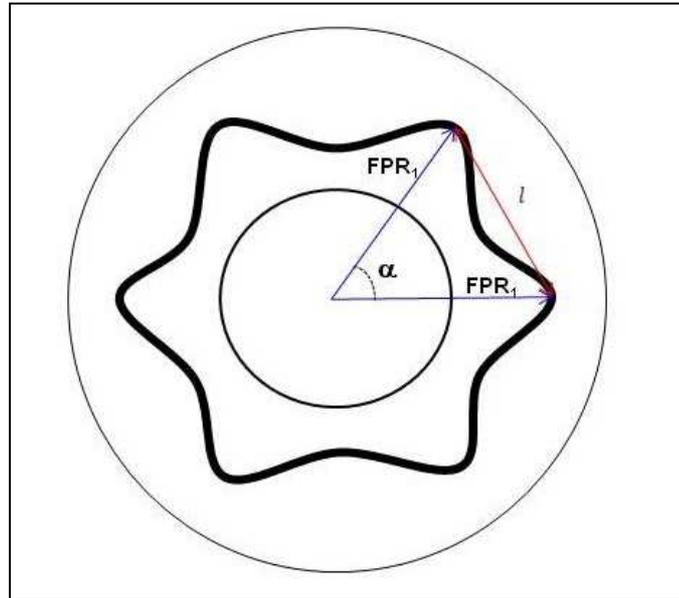


Figura 69. Principio trigonométrico del cálculo del Shape Factor (44)

El ángulo  $\alpha$  se obtiene dividiendo  $360^\circ$  y el número de nodos dado que se supone que presentan una distribución simétrica. Se supone también que al ser la imagen simétrica, todos los Picos tienen el mismo radio y corresponde al radio medio de los Picos (FaPR).

d) Longitud media de los Picos, FaPR (49). Media aritmética de la longitud (o radio) de los Picos, medidos desde el centro de la probeta. Se expresa en mm. Y está acotado entre 90 y 150 mm.

$$FaPR = \sum_{i=1}^n \frac{FPR_i}{n}$$

e) Longitud media de los Valles, VaFR (49). Media aritmética de la longitud (o radio) de los Valles, medidos desde el centro de la probeta. Se expresa en mm y está acotado entre 90 y 150 mm.

$$VaFR = \sum_{i=1}^n \frac{VFR_i}{n}$$

f) Ángulo de caída del Pico,  $\alpha FPR$  (49). Ángulo formado por la tangente al tejido en cada Pico y su perpendicular ( $\alpha FPR$ ) (ver figura 70). Se expresa en grados ( $^{\circ}$ ) y está acotado entre 0 y  $90^{\circ}$ . Se trata de un indicador que ayuda a intuir la magnitud del cayente.

$$\alpha FPR = \text{sen}^{-1} \left( \frac{FPR - r}{P} \right)$$

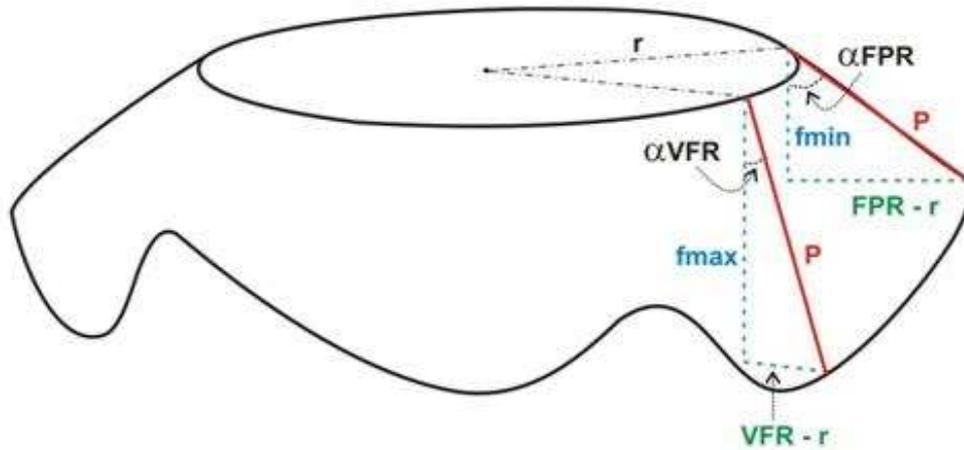


Figura 70. Elementos utilizados en el cálculo del ángulo de caída de Picos y Valles (44)

g) Ángulo de caída del Valle,  $\alpha VFR$  (49). Ángulo formado por la tangente al tejido en cada Valle y su perpendicular ( $\alpha VFR$ ) (ver figura 70). Se expresa en grados ( $^{\circ}$ ) y está acotado entre 0 y  $90^{\circ}$ . Se trata de un indicador que ayuda a intuir la magnitud del cayente.

$$\alpha VFR = \text{sen}^{-1} \left( \frac{VFR - r}{P} \right)$$

h) Índice de profundidad de los pliegues,  $FDI De$  (49 y 50). Cociente entre la diferencia de Picos y Valles medios y la diferencia entre el Radio de la probeta sin caer y el disco de soporte. Se expresa en mm.

$$FDI De = \frac{FaPR - VaPR}{R - r}$$

i) Radio medio,  $R_{avg}$  (51). Media aritmética de los radios del cayente, es decir la distancia entre el centro de la probeta y el extremo del tejido caído. En el estudio rewalizado por el autor de este libro (44), se ha determinado el radio cada 0,5 grados y por tanto se han obtenido 720 determinaciones y calculado su media aritmética de ellos. Se expresa en mm y está acotado entre 90 y 150 mm.

$$R_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{720} Ri}{n}$$

j) Relación porcentual de distancias radiales,  $DDR\%$  (51). Cociente entre la diferencia del Radio de la probeta sin caer y el radio medio partido por la diferencia entre el Radio de la probeta sin caer y el radio del disco de soporte. La diferencia de radios del numerador corresponde a la diferencia entre el radio de la muestra original y el promedio de radios que definen el perfil de la muestra caída y cuanto más pequeña sea, menos deformaciones sufrirá el tejido.

$$DDR\% = \left( \frac{R - R_{avg}}{R - r} \right) \cdot 100$$

k) Radio de la circunferencia equivalente,  $r_{ce}$  (51). Radio de la circunferencia equivalente que tenga la misma área de la sombra proyectada por el cayente. Se expresa en mm, y está acotado entre 90 y 150 mm.

$$r_{ce} = \sqrt[2]{A/\pi}$$

l) Varianza de los Picos,  $FPVar$  (49). Se obtiene determinando la varianza entre los radios de los picos de cada probeta. Es un indicador que explica la irregularidad y asimetría de la distribución de los picos dentro de una misma probeta.

$$FPvar = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ FPRi - \left( \frac{1}{n} \sum FPRi \right) \right]^2$$

m) Varianza de los radios,  $VRi$ . Indicador propio, adaptado a partir de la propuesta de (51). Se obtiene determinando la varianza entre las 720 determinaciones del radio de la probeta medidos cada  $0,5^\circ$ . Se trata de un indicador que explica la variabilidad de la forma del cayente.

$$VRi = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{720} \left[ Ri - \left( \frac{1}{n} \sum Ri \right) \right]^2$$

n) Circularidad,  $CIRC$  (52). Se calcula mediante la fórmula que se indica a continuación, donde  $A_o$  es el área de la sombra proyectada por el cayente y  $P$  su perímetro. El valor obtenido puede variar entre 0 y 1 siendo 1 el círculo perfecto, es decir con cayente nulo, mientras que el próximo a 0 corresponde a perfiles complejos. El  $CIRC$  es una relación de áreas proyectadas, el área del numerador se calcula según el medidor que se utilice, y el denominador se calcula a partir del perímetro de su perfil, de esta forma se tiene en cuenta la forma de los pliegues (a mayor perímetro, mayor número y/o profundidad de los nodos).

$$P = 2 \pi r \quad , \quad r = \frac{P}{2 \pi}$$

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \left( \frac{P}{2\pi} \right)^2 = \frac{P^2}{4\pi}$$

$$CIRC = \frac{Ao}{\frac{P^2}{4\pi}} = 4\pi \frac{Ao}{P^2}$$

o) Severidad media de los nodos. MNS (52). Estos autores proponen transformar el perfil nodal del cayente en un eje de coordenadas donde en “y” se representan los radios (en mm) y en el eje “x” los grados o bien el perímetro de la probeta sin caer.

La severidad media del nodo es la media aritmética del cociente entre la altura de cada nodo “h” y la anchura del mismo “b” (figura 71). Se trata de un índice similar al factor de forma SF, si bien calculado de una forma mucho más real. Se expresa en mm.

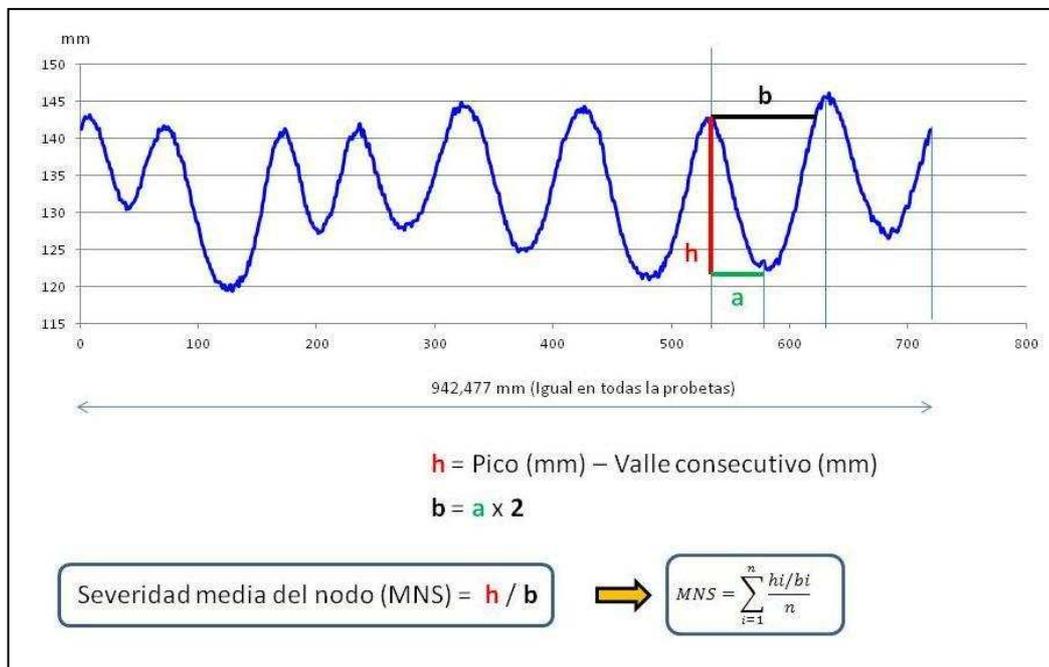


Figura 71. Forma de cálculo del MNS (44)

p) Variabilidad de la severidad de los nodos. VS (52). Desviación standard de la severidad de los nodos de una misma probeta. Se trata de un indicador de la irregularidad de la forma y severidad de los nodos. Explica la regularidad de los nodos en una misma probeta pero no su forma.

$$VS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MNS_i - \overline{MNS})^2}{n - 1}}$$

q) Anchura media de los nodos. FW (53). Anchura media de los nodos, medida desde los valles adyacentes. (ver Figura 68). Se expresa en mm.

$$FW = \sum_{i=1}^n \frac{FW_i}{n}$$

Lógicamente, a mayor anchura de los nodos el número de estos disminuirá y también lo hará el cayente.

r) Altura media de los nodos FH (53). Altura media de los nodos, medida desde la línea utilizada para medir FW. (ver figura 68). Se expresa en mm.

$$FH = \sum_{i=1}^n \frac{FH_i}{n}$$

s) Distribución de los nodos Gp% (54). Coeficiente de variación de la longitud de los Picos (FPR) en cada probeta. Este indicador explica la variación de la forma de los nodos y su grado de simetría en cada probeta. Se expresa en %.

$$Gp\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (FPR_i - \overline{FPR})^2}{n-1}}}{\overline{FPR}} \cdot 100$$

t) Profundidad media de los nodos. dga (54). Diferencia entre la longitud media de los Picos y los Valles. A mayor diferencia, mayor profundidad de los nodos o pliegues y por lo tanto mayor sensación visual de severidad en el cayente. Se expresa en mm.

$$dga = FaPR - VaFR$$

u) Cayente máximo. fmax (54). Seno del ángulo de cayente del valle  $\alpha$ VFR. Ver figura 70.

$$fmax = \sqrt[2]{(R-r)^2 - (r - VaFR)^2}$$

v) Cayente mínimo. fmin (54). Seno del ángulo de cayente del pico  $\alpha$ FPR. Ver figura 70.

$$fmin = \sqrt[2]{(R-r)^2 - (r - FaPR)^2}$$

w) Amplitud de la onda dominante. WA (55). En 1807, Fourier, establece que cualquier señal periódica puede ser representada por una serie de sumas trigonométricas en senos y cosenos relacionadas armónicamente. Asimismo para señales no periódicas, Fourier obtuvo una gráfica, no como suma de senoides relacionadas armónicamente, sino como integrales de senoides, las cuales no todas están relacionadas armónicamente. Al igual que las series de Fourier, la integral de Fourier, llamada "Transformada de Fourier", es una de las herramientas más poderosas para el análisis de sistemas lineales invariantes en el tiempo.

La transformada de Fourier es básicamente el espectro de frecuencias de una función que converge puntualmente a una función periódica y continua que puede descomponerse en una suma infinita de funciones senoidales mucho más simples (como combinación de senos y cosenos con frecuencias enteras). Esta descomposición incluye una función senoidal dominante y otras varias secundarias, la suma de las cuales da lugar a la función estudiada inicialmente (figura 72).

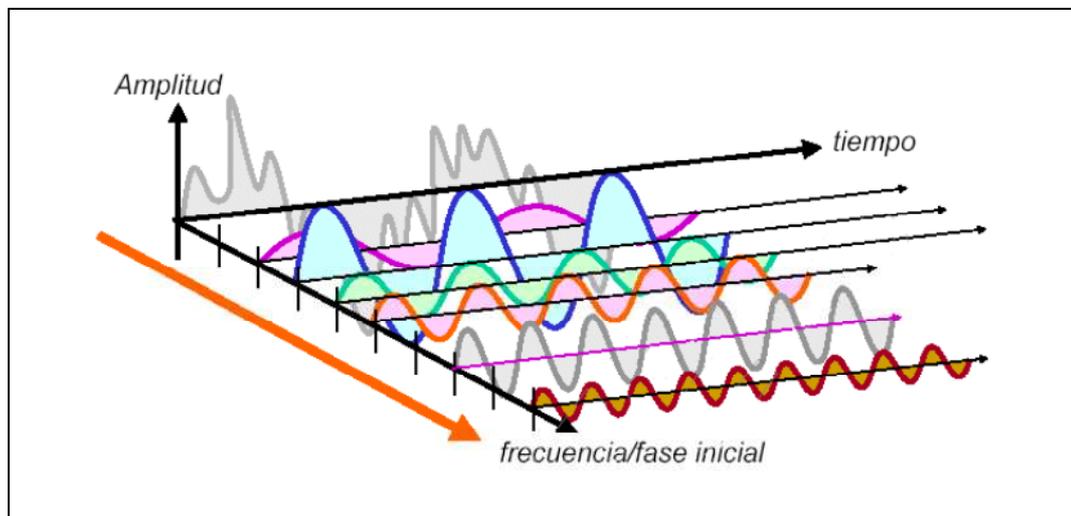


Figura 72. Uno de los métodos de representar la señal  $x(t)$  es bajo la forma de suma de componentes de distintas frecuencias, cada una de ellas con una amplitud y una fase inicial (56)

Los autores que proponen este indicador, consideran que el perfil del cayente de un tejido no es más que una función periódica que puede descomponerse mediante la transformada de Fourier. Con esta herramienta matemática se obtiene la onda de la frecuencia de onda dominante. Dado que en esta tesis se han realizado 720 lecturas del radio (cada  $0,5^\circ$ ) de la sombra proyectada por el tejido caído, se ha obtenido con ello el dibujo del perfil del cayente en un plano cartesiano donde las ordenadas ( $y$ ) son los radios y en el eje de abscisas ( $x$ ) los grados (de  $0$  a  $360^\circ$ ). Con esta información se ha calculado la transformada de Fourier mediante un programa en MATLAB así como la longitud de la onda dominante en mm.

x) Índice de esbeltez o de Isotropía geométrica.  $D/O$  (55). En la misma línea que el indicador anterior, los autores proponen éste índice como el cociente entre el área circunscrita por la curva de la onda dominante de la transformada de Fourier y el área original de la sombra proyectada por el cayente. Si el cociente es próximo a 1, quiere decir que la curva original se parece mucho a la curva de la onda dominante, que es una senoidal perfecta. En este caso la curva original dará lugar a un cayente con un aspecto muy regular, simétrico y de formas muy iguales (periodicidad y regularidad). En realidad el índice  $D/O$  explica la regularidad de la forma y simetría, en definitiva de su isotropía geométrica. Cuando  $D/O$  se aleje de 1, menos isotrópica será la forma del cayente, o lo que es lo mismo, más anisotrópica será. El índice  $D/O$  oscilará entre 0 (isotropía geométrica mínima) y 1 (isotropía geométrica máxima).

y) Índice de amplitud de los radios medios.  $A/r$  (57). El índice  $A/r$  es la relación de la amplitud media de los pliegues al radio de un círculo ficticio que tiene la misma área que la proyectada ( $rce$ ). Cuando  $rce$  se aproxima al radio de la muestra, el tejido apenas se deforma y la amplitud de los pliegues es pequeña y, por tanto, el parámetro  $A/r$  da un valor alto, y cuando  $r$  disminuye el tejido se deforma más, la amplitud es mayor, y el parámetro  $A/r$  da un valor bajo. El resultado de este índice se expresa en mm.

$$\frac{A}{r} = \frac{\frac{dga}{2}}{rce}$$

z) Factor R.  $R$  Factor (58). Índice propuesto para determinar la “simplicidad” del cayente.

$$R \text{ Factor} = \frac{\sqrt[2]{(ri - rce)^2}}{rce - R}$$

Donde  $\overline{(ri - rce)^2}$  es el promedio de  $(ri - rce)^2$  a lo largo del contorno del perfil del cayente y  $ri, rce, R$ , son las coordenadas radiales de la proyección del cayente, el radio de la circunferencia equivalente y el radio de la probeta respectivamente. El Factor R expresa la simplicidad o irregularidad del cayente. Cuando mayor sea el factor R, menor será la simplicidad de la forma del cayente. Según los autores, este índice puede servir para discriminar la forma del cayente ante tejidos que presenten un mismo valor de DR%. Se expresa en mm.

aa) Ángulo entre nodos consecutivos.  $\alpha^\circ$  (59). Media aritmética del ángulo entre los nodos consecutivos de una probeta. El ángulo entre los nodos consecutivos de una misma probeta pueda variar bastante en función de la asimetría de la misma. Sin embargo cuando se realiza la media aritmética del ángulo entre nodos consecutivos de una misma probeta, los resultados se compensan de tal manera que se obtiene una cifra muy próxima al cociente entre  $360^\circ$  y el número de nodos. Siendo, por tanto, un indicador de poco interés. El resultado se expresa en grados.

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{n}$$

ab) Índice porcentual de profundidad de pliegues.  $FDI De\%$  (59). Cociente entre la profundidad de los pliegues y la diferencia entre el radio de la probeta y del disco de soporte multiplicado por 100. Se expresa en %.

$$FDI De\% = \left( \frac{dga}{R - r} \right) \cdot 100$$

ac) Semi amplitud de los radios.  $ARR$  (59). Mitad de la profundidad media de los nodos. Se expresa en mm.

$$ARR = \frac{dga}{2}$$

ad). Dimensión fractal.  $D$  (60). Dimensión fractal del perfil del cayente calculada por el método "Box-Counting".

A partir de un segmento, un cuadrado o un cubo de longitud 1 se pueden escalar por  $\varepsilon$  y cubrir estas figuras geométricas por  $N(\varepsilon)$  figuras similares de acuerdo con la ley de potencias siguiente:

$$N(\varepsilon) = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^D$$

El exponente  $D$  es la dimensión de la figura estudiada: 1, en el caso del segmento, 2 en el cuadrado y 3 en el cubo. Por lo tanto, las figuras geométricas clásicas tienen dimensiones enteras.

La ley anterior puede aplicarse a figuras de estructuras auto-similares, es decir, aquellas que se generan por repetición de un patrón ó modelo arquitectónico y, en consecuencia, tienen la misma representación al aumentar ó reducir la escala. Estas figuras se denominan fractales (matemáticos), y el coeficiente  $D$  es su dimensión fractal, que, según la ley de potencias, vale:

$$D = \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)}$$

La dimensión fractal es una dimensión decimal. Al estar situada entre dos números enteros, los fractales no pueden tratarse como formas "normales".

Los fractales naturales no son estrictamente auto-similares y la ley de potencias puede validarse para valores de  $\varepsilon$  muy pequeños:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left( \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)} \right)$$

El método más extendido en la literatura científica para estimar la dimensión fractal es el de Box counting (60), que se sintetiza como sigue: se superpone a la figura una cuadrícula de longitud de lado de la celda  $\varepsilon$ , y se contabilizan el número de ellas que contienen a la figura original; repitiéndose el conteo para otros tamaños de celda  $\varepsilon$ .

Entonces, la pendiente de la ecuación de regresión entre  $\ln \cdot N(\varepsilon)$  y  $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)$  coincide con la dimensión  $D$ :

$$\ln \cdot N(\varepsilon) = \ln \cdot K + D \cdot \ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)$$

Además de la dimensión Box counting existen otras dimensiones: la dimensión de correlación (que juntamente con la de Box counting son las más usadas por su fácil implementación), la dimensión de Hausdorff (desde el punto de vista teórico es la más importante), la dimensión Rényi, la dimensión de información, etc. Atendiendo a esta diversidad, la dimensión fractal de Box counting se identifica en la literatura científica por  $D_C$ . (en todo el texto se ha omitido el subíndice porque sólo se utiliza el método de Box counting).

ae) Irregularidad del cayente.  $DU\%$  (61). Coeficiente de variación del ángulo entre nodos consecutivos. Es un índice que explica la simetría del cayente de cada muestra pero no, en cambio, la forma del cayente. Se expresa en % y oscila entre 0 (simetría máxima) y 100 (simetría mínima).

$$DU\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{n-1}}}{\bar{\alpha}} \cdot 100$$

af) Elevación de los nodos.  $H$  (62). Semisuma de la longitud media de Picos y Valles. Se expresa en mm.

$$H = \frac{FaPR + VaPR}{2}$$

ag) Amplitud.  $WAM$  (62). Cociente entre  $ARR$  (semiamplitud de los radios) y  $H$  (elevación de los nodos). Se expresa en mm.

$$WAM = \frac{ARR}{H}$$

ah) Relación altura-grados.  $R H/\alpha$ . (62). Cociente entre la elevación de los nodos y el ángulo entre ellos. Indica la longitud de curva del perfil del cayente que entra en un grado.

$$R H/\alpha = \frac{H}{\alpha}$$

ai) Relación área-perímetro.  $A/P$  (62). Cociente entre el área y el perímetro del cayente.

$$\frac{A}{P} = \frac{\text{Área de la sombra proyectada por el cayente}}{\text{Perímetro del perfil del cayente}}$$

ah) Perfil del nodo.  $Fsp$  (44). Diferencia entre la anchura y la altura del nodo. Se trata de un indicador de la forma y severidad del nodo, de fácil determinación. Se expresa en mm.

$$Fsp = FW - FH$$

Núm.	Índice o indicador	Descripción
1	Índice de cayente <b>DR</b> (%)	$DR\% = \left( \frac{A - B}{C - B} \right) \cdot 100$
2	Número de nodos <b>FN</b>	$FN = num\ FP$
3	Factor de forma <b>SF</b> (mm)	$SF = \frac{FaPR}{\sqrt[2]{2 FaPR^2 (1 - \cos \alpha)}}$
4	Pico medio <b>FaPR</b> (mm)	$FaPR = \sum_{i=1}^n \frac{FPRi}{n}$
5	Valle medio <b>VaFR</b> (mm)	$VaFR = \sum_{i=1}^n \frac{VFRi}{n}$
6	Ángulo de cayente del Pico <b>aFPR</b> (°)	$aFPR = \text{sen}^{-1} \left( \frac{r - FPR}{R - r} \right)$
7	Ángulo de cayente del valle <b>aVFR</b> (°)	$aVFR = \text{sen}^{-1} \left( \frac{r - VFR}{R - r} \right)$
8	Varianza de los Picos <b>FPvar</b>	$FPvar = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n \left[ FPRi - \left( \frac{1}{n} \sum FPRi \right) \right]^2$
9	Radio medio <b>Ravg</b> (mm)	$Ravg = \frac{\sum_{i=1}^{720} Ri}{720}$
10	Relación de distancias del cayente <b>DDR</b> (%)	$DDR\% = \left( \frac{R - Ravg}{R - r} \right) \cdot 100$
11	Índice de anchura de los pliegues <b>FDI De</b> (mm)	$FDI\ De = \frac{FaPR - VaPR}{R - r}$
12	Varianza de los Radios <b>VRi</b>	$VRi = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^{720} \left[ Ri - \left( \frac{1}{n} \sum Ri \right) \right]^2$ Varianza de 720 medidas de Radio Ri
13	Circularidad <b>CIRC</b> (mm)	$CIRC = 4 \pi \frac{A}{p^2}$ p = perímetro sombra del cayente
14	Severidad media del nodo <b>MNS</b> (mm)	$MNS = \sum_{i=1}^n \left( \frac{hi}{bi} \right)$

15	Variabilidad de la severidad de nodos <b>VS</b> (mm)	$VS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MNS_i - \overline{MNS})^2}{n-1}}$
16	Anchura media del nodo <b>FW</b> (mm)	$FW = \sum_{i=1}^n \frac{FW_i}{n}$
17	Altura medio del nodo <b>FH</b> (mm)	$FH = \sum_{i=1}^n \frac{FH_i}{n}$
18	Variación de la longitud de los Picos <b>Gp</b> (%)	$Gp\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (FPR_i - \overline{FPR})^2}{n-1}}}{\overline{FPR}} \cdot 100$
19	Profundidad de los pliegues <b>dga</b> (mm).	$dga = FaPR - VaFR$
20	Altura del Pico <b>fmax</b> (mm)	$fmax = \sqrt{(R-r)^2 - (r - VaFR)^2}$
21	Altura del Valle <b>fmin</b> (mm)	$fmin = \sqrt{(R-r)^2 - (r - FaPR)^2}$
22	Amplitud onda dominante <b>WA</b> (mm)	Amplitud de la frecuencia de la onda dominante (obtenida mediante la transformada de Fourier FFT)
23	Índice de simetría <b>D/O</b> (mm <sup>2</sup> )	$\frac{D}{O} = \frac{\text{Área perfil dominante FFT}}{\text{Área perfil original proyección}}$
24	Amplitud radial <b>A/r</b> (mm)	$\frac{A}{r} = \frac{dga}{Ravg}$
25	Radio de la circunferencia equivalente <b>rce</b> (mm)	$rce = \sqrt{A/\pi}$ Radio de la circunferencia que tenga la misma área de la sombra proyectada por el cayente
26	<b>R Factor</b> (mm)	$R Factor = \frac{\sqrt{(ri - rce)^2}}{rce - R}$
27	Ángulo entre nodos <b>α</b> (°)	$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{n}$
28	Índice porcentual de anchura de nodos <b>FDIDe%</b>	$FDIDe\% = \left(\frac{dga}{R-r}\right) \cdot 100$
29	Semiprofundidad de nodos <b>ARR</b> (mm)	$ARR = \frac{dga}{2}$

30	Dimensión fractal $D$	$\ln \cdot N(\varepsilon) = \ln \cdot K + D \cdot \ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)$
31	Índice de irregularidad del cayente $DU\%$ (%)	$DU\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{n-1}} \cdot \frac{1}{\bar{\alpha}} \cdot 100$
32	Altura $H$ (mm)	$H = \frac{FaPR + VaPR}{2}$
33	Amplitud $WAM$ (mm)	$WAM = \frac{ARR}{H}$
34	Relación altura/grados $RH/\alpha$ (mm/°)	$RH/\alpha = \frac{H}{\alpha}$
35	$A/P$ (mm)	$A/P = \text{Área de la sombra proyectada por el cayente} / \text{Perímetro del perfil del cayente}$
36	Perfil del nodo $Fsp$ (mm)	$Fsp = FW - FH$

Tabla 6. Relación cronológica de indicadores e índices del cayente propuestos hasta la fecha por diferentes investigadores (44)

#### 4.1.9 Fricción

Se define como fuerza de rozamiento o fuerza de fricción, entre dos superficies en contacto, a aquella que se opone al movimiento relativo entre ambas superficies de contacto (fuerza de fricción dinámica) o a la fuerza que se opone al inicio del deslizamiento (fuerza de fricción estática). Se genera debido a las imperfecciones, mayormente microscópicas, entre las superficies en contacto. Estas imperfecciones hacen que la fuerza perpendicular  $R$  entre ambas superficies no lo sea perfectamente, sino que forme un ángulo  $\varphi$  con la *normal*  $N$  (el ángulo de rozamiento). Por tanto, la fuerza resultante se compone de la fuerza normal  $N$  (perpendicular a las superficies en contacto) y de la fuerza de rozamiento  $F$ , paralela a las superficies en contacto.

En definitiva, la fricción es la fuerza que se opone al deslizamiento entre dos cuerpos o superficies en contacto.

Existen dos tipos de rozamiento o fricción, la fricción estática ( $F_e$ ) y la fricción dinámica ( $F_d$ ). El primero es la resistencia que debe superarse para poner en movimiento un cuerpo con respecto a otro que se encuentra en contacto. El segundo, es la resistencia, de magnitud considerada constante, que se opone al movimiento pero una vez que éste ya comenzó. En resumen, lo que diferencia a un roce con el otro, es que el estático actúa cuando los cuerpos están en reposo relativo en tanto que el dinámico lo hace cuando ya están en movimiento.

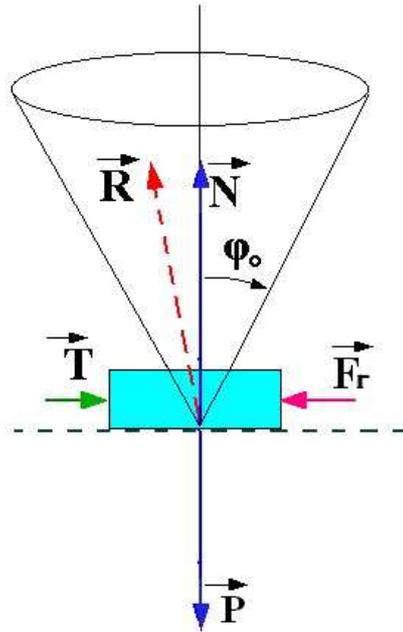


Figura 68. Fricción estática: no se inicia el movimiento si la fuerza tangencial aplicada **T** hace que el ángulo sea menor a  $\phi_0$  (no supera a **Fr**). Fuente: [Wikipedia](https://es.wikipedia.org/wiki/Frcci3n)

Por ejemplo, si queremos empujar un armario muy grande y hacemos una fuerza pequeña, el armario no se moverá. Esto es debido a la fuerza de rozamiento estática que se opone al movimiento. Si aumentamos la fuerza con la que empujamos, llegará un momento en que superemos esta fuerza de rozamiento y será entonces cuando el armario se pueda mover. Una vez que el cuerpo empieza a moverse, hablamos de fuerza de rozamiento dinámica. Esta fuerza de rozamiento dinámica es menor que la fuerza de rozamiento estática.

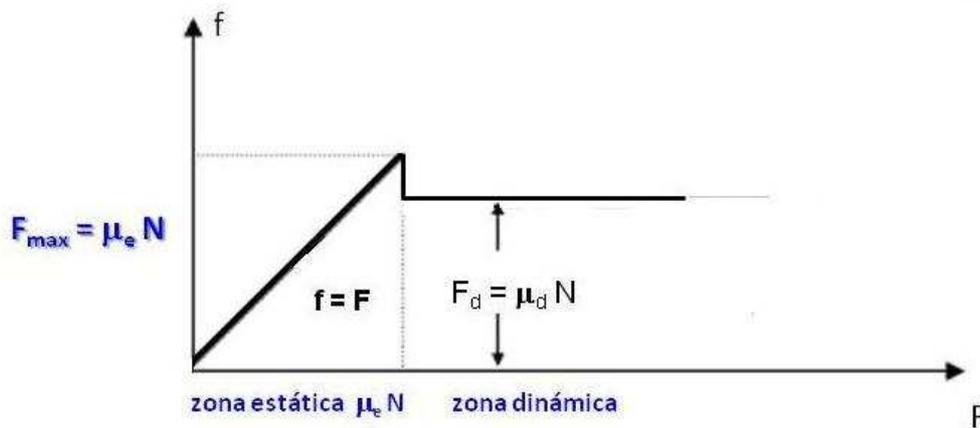


Figura 69. El coeficiente de fricción estático ( $\mu_e$ ) es superior al dinámico ( $\mu_d$ )

La experiencia nos muestra que:

- la fuerza de rozamiento entre dos cuerpos no depende del tamaño de la superficie de contacto entre los dos cuerpos, pero sí depende de cuál sea la naturaleza de esa superficie de contacto, es decir, de que materiales la formen y si es más o menos rugosa.
- la magnitud de la fuerza de rozamiento entre dos cuerpos en contacto es proporcional a la normal entre los dos cuerpos, es decir:

$$F = \mu \cdot N$$

Donde  $\mu$  es lo que conocemos como coeficiente de rozamiento o fricción.

La medida de la fricción de los tejidos se lleva a cabo mediante diversos métodos. El más conocido y clásico consiste en un accesorio fabricado a medida que puede ser montado sobre un dinamómetro convencional.

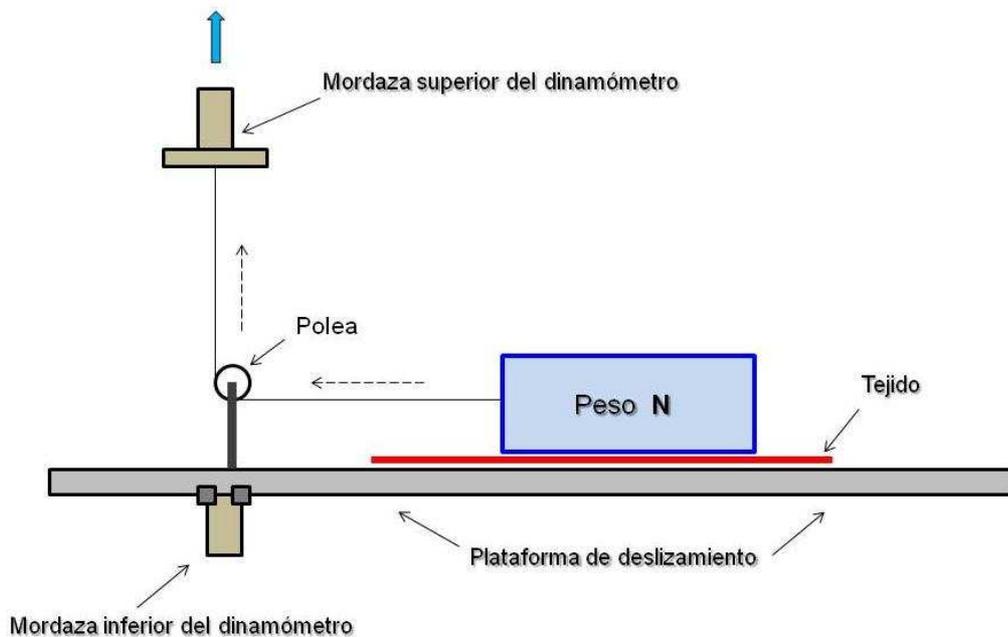


Figura 70. Dispositivo para estudiar la fricción de tejidos

La mordaza superior del dinamómetro que va conectada a la célula de carga sujeta un filamento que retiene un paralelepípedo de masa  $N$ . Dicha masa se desliza por una plataforma de deslizamiento sujeta por la mordaza inferior del dinamómetro. En dicha plataforma situamos el tejido a ensayar. Cuando la mordaza inferior se desplaza hacia abajo el cable pinzado por la mordaza superior arrastra la masa  $N$  hacia la izquierda, produciéndose un rozamiento entre la masa  $N$  y el tejido (figura 70). La célula de carga del dinamómetro mide la resistencia  $F$  (fuerza de fricción) que ofrece la masa  $N$  al deslizamiento por la plataforma recubierta de tejido. La masa  $N$  puede estar también recubierta de tejido lo cual permite estudiar el coeficiente de fricción tejido contra tejido (figura 71 y 72). Según sea la orientación del tejido se puede estudiar la fricción urdimbre-

urdimbre, urdimbre-trama, haz-envés, etc. Si la masa  $N$  es de metal, cerámica, vidrio, etc., podrá estudiarse la fricción tejido-metal, tejido-cerámica, tejido-vidrio, etc.

El equipo KES-F, determina también la fricción de los tejidos. Para mayor detalle consultar el apartado correspondiente.

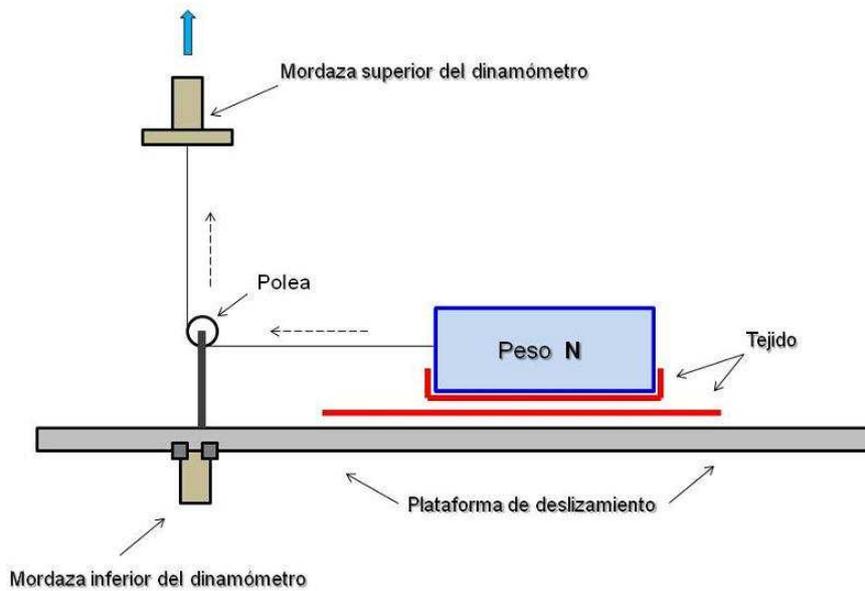


Figura 71. Dispositivo para estudiar el coeficiente de fricción tejido-tejido

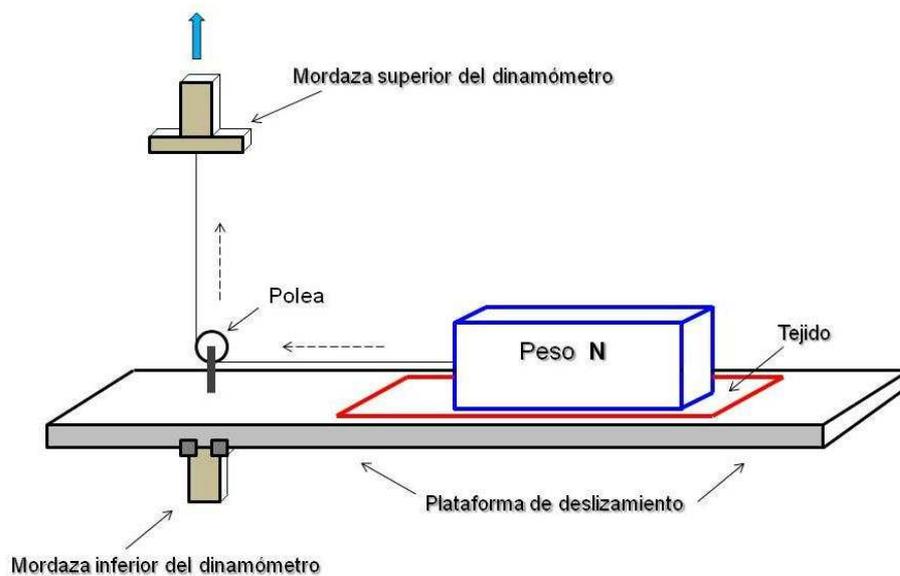


Figura 72. Visión tridimensional del dispositivo para estudiar el coeficiente de fricción de tejidos

#### 4.1.9.1 Videos sobre ensayos de fricción

Coefficient of friction <https://www.youtube.com/watch?v=uEGxfRoEq64>

Lecture 8 Static Friction Blocks Incline Problem  
<https://www.youtube.com/watch?v=Oagnr0cMLIU>

Determine the Coefficient of Kinetic Friction in Two Dimensions  
<https://www.youtube.com/watch?v=JZSGxbaaiSM>

Finding the Coefficient of Static Friction on an Incline  
[https://www.youtube.com/watch?v=G\\_cZIN\\_zGBI](https://www.youtube.com/watch?v=G_cZIN_zGBI)

32-25 Coefficient of Friction Tester  
[https://www.youtube.com/watch?annotation\\_id=annotation\\_2428996161&feature=iv&src\\_vid=0ttiB9qCpDq&v=yVdiWN6rHjs](https://www.youtube.com/watch?annotation_id=annotation_2428996161&feature=iv&src_vid=0ttiB9qCpDq&v=yVdiWN6rHjs)

32-07 Slip and Friction Tester <https://www.youtube.com/watch?v=Q3wimomi0zM>

Thwing-Albert COF Fixture for EJA Vantage Universal Testing Machine  
[https://www.youtube.com/watch?v=sOOE5bY\\_w9U](https://www.youtube.com/watch?v=sOOE5bY_w9U)

Thwing-Albert FP-2260 Friction/Peel Tester  
<https://www.youtube.com/watch?v=p0a8QqeKgAU>

Coefficient of Friction Tester "BRAVO" <https://www.youtube.com/watch?v=LxFVT8dyx34>

## 5. COMPORTAMIENTO ANTE FLUIDOS

### 5.1 Permeabilidad al aire (ISO 9237:1995)

Debido a la forma en que los hilos y los tejidos están contruidos estructuralmente, una gran cantidad del volumen ocupado por los tejidos en realidad es aire. Esta característica tiene una notable importancia en algunas propiedades de uso como el aislamiento térmico, la protección contra el viento y la lluvia, propiedades relacionadas con el confort de las prendas de vestir. Sin embargo el estudio de la permeabilidad al aire de los tejidos también tiene un especial interés en aplicaciones particulares como los air-bags, paracaídas, parapente, velas de barco, tiendas de campaña o bien en aplicaciones para filtros.

Se entiende por permeabilidad al aire, la velocidad del flujo de aire que pasa perpendicularmente a través de una probeta, en las condiciones especificadas por la norma sobre superficie de ensayo, caída de presión y tiempo.

El equipo utilizado para este ensayo, mide el caudal del flujo de aire que pasa perpendicularmente a través de la superficie de ensayo de una probeta de tejido, con una diferencia de presión definida y durante un tiempo determinado.

De las muestras extraídas del lote a analizar se comprueba que no presentan zonas arrugadas o presentan un defecto visible.

El equipo de medida dispondrá de:

- a) un porta-probetas circular con un orificio que permita realizar el ensayo sobre una superficie de 5 cm<sup>2</sup>, 20 cm<sup>2</sup>, 50 cm<sup>2</sup> y 100 cm<sup>2</sup>.
- b) medios de fijación (dispositivo con anillo de bloqueo) que permitan asegurar la probeta de forma sólida y sin deformación durante el ensayo.
- c) Indicador de presión o manómetro, que deberá estar unido al cabezal de ensayo y que permita indicar una caída de presión a través de la superficie de ensayo de 50 Pa, 100 Pa, 200 Pa ó 500 Pa, con una precisión mínima del 2%.
- d) medios que permitan hacer pasar un flujo e aire estable a una humedad y temperatura controlada a través del porta-probetas y que permitan regular la velocidad, con el fin de producir una caída de presión a través de la probeta comprendida entre 50 Pa y 500 Pa.
- e) Medidor de flujo (fluxómetro), contador volumétrico o diafragma de medida que indique el caudal del flujo de aire en decímetros cúbicos por minuto (litros por minuto) con una precisión mínima de  $\pm 2\%$ .

Una vez las muestras están acondicionadas se realiza el ensayo con un área de superficie de ensayo de 20 cm<sup>2</sup>, una caída de presión de 100 Pa para tejidos destinados a vestuario y 200 Pa para tejidos industriales. En el supuesto en que no puedan cumplirse estas condiciones puede utilizarse una caída de presión de 50 Pa o 500 Pa y escogerse superficies de ensayo de 5 cm<sup>2</sup>, 50 cm<sup>2</sup> o 100 cm<sup>2</sup>, si las partes están de acuerdo.



Figura 73. Digital Air Permeability Tester M021A. Fuente: [SDL Atlas](#)

Para la realización del ensayo se monta la probeta sobre el porta-probetas, con una tensión suficiente para evitar arrugas. En los tejidos en que la permeabilidad al aire pueda ser diferente entre las dos caras se especificaran en el informe final, los resultados por separado.

Se pone en marcha el ventilador de aspiración para forzar el paso del aire a través de la probeta y se regula el flujo de aire de forma progresiva hasta obtener una caída de presión de acuerdo con las anteriores recomendaciones, a través de la superficie de ensayo de la probeta. Se anota el flujo después de por lo menos 1 minuto, o hasta lograr la estabilización de las condiciones de ensayo. Se repite el ensayo en diferentes lugares de la muestra, por lo menos 10 veces.



Figura 74. Air Tronic 900 PA. Fuente: [MESDAN](#)

La permeabilidad al aire será:

$$R = \frac{\bar{q}v}{A} \cdot 167$$

donde :

$\bar{q}v$  = media aritmética del caudal de flujo de aire, en decímetros cúbicos por minuto (litros por minuto)

A = área del tejido ensayado, en cm<sup>2</sup>

167 = es el factor de conversión desde decímetros cúbicos (litros) por minuto por centímetro cuadrado a milímetros por segundo

En el informe final deberá indicarse.

- la referencia a la norma utilizada
- datos para identificar la muestra y sentido del flujo de aire a través del tejido
- área de la superficie de ensayo utilizada en cm<sup>2</sup>
- caída de presión utilizada en Pa
- atmósferas de acondicionamiento y ensayo utilizadas
- cualquier desviación respecto a la norma

El resultado indicará.

- permeabilidad media en mm por segundo o m por segundo según el caso
- CV%
- intervalo de confianza del 95% en mm por segundo o m por segundo

La permeabilidad al aire de un tejido depende, entre otras, del poder de cobertura de los tejidos. Cuando más abierto sea el tejido mayor permeabilidad tendrá y viceversa (63), ver figura 75. Por otra parte si los hilos presentan una mayor torsión la compacidad de éstos aumenta, afectando también a la permeabilidad al aire de los tejidos (64), ver figura 75 derecha.

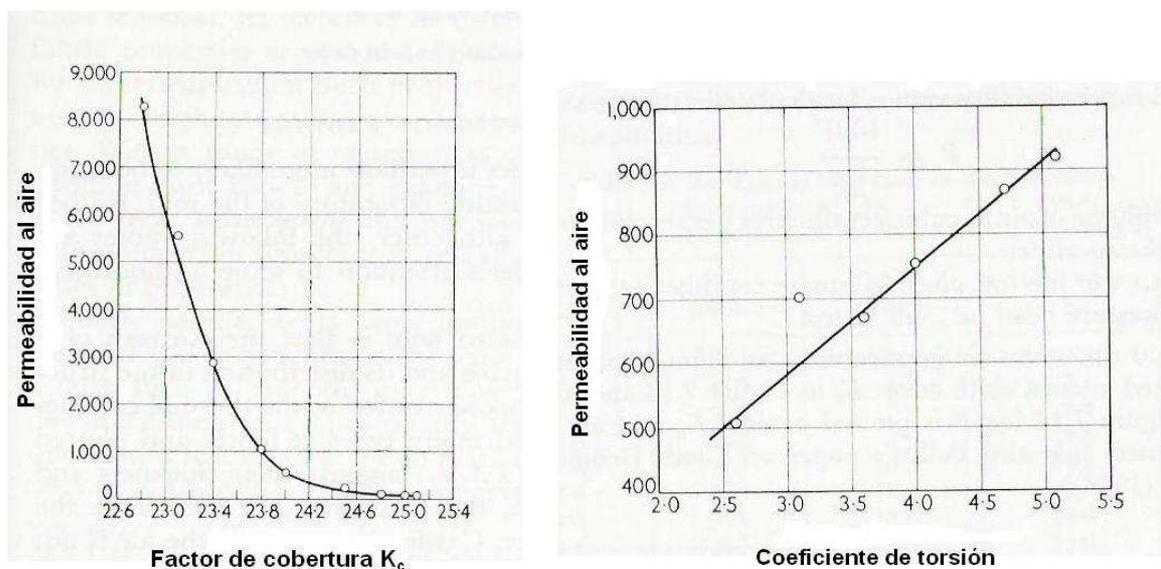


Figura 75. Influencia del factor de cobertura de los tejidos y el coeficiente de torsión de los hilos en la permeabilidad al aire de los tejidos (45)

### 5.1.1 Videos sobre los ensayos de permeabilidad al aire

*E24 Measuring Air Permeability Of Textile Products*

[https://www.youtube.com/watch?v=KFsQb9ws\\_CU](https://www.youtube.com/watch?v=KFsQb9ws_CU)

*Air Permeability Tester* <https://www.youtube.com/watch?v=eP-va3vvGOQ>

Catálogo Air Permeability Tester , FX 3300 LABOTESTER III. TexTest

[http://www.bstnc.co.kr/product/3300-III\\_leaflet\\_en.pdf](http://www.bstnc.co.kr/product/3300-III_leaflet_en.pdf)

## 5.2 Comportamiento al agua

### 5.2.1 Resistencia a la penetración del agua (ensayo bajo presión hidrostática). UNE EN 20811

Muchos tejidos se utilizan como elementos de protección y/o barrera para evitar el paso del agua a través suyo. Este ensayo se realiza para determinar la resistencia de los tejidos a la penetración del agua. Normalmente este tipo de ensayo se realiza en tejidos tupidos, lonas o artículos de tapicería.

Una medida de la resistencia que ofrece un tejido al paso del agua a través suyo nos la da la presión hidrostática soportada. Para ello una probeta de tejido se somete, en condiciones normalizadas, a una presión de agua uniformemente creciente sobre una de sus caras, hasta que se produzca la penetración del agua en tres puntos del tejido.

La presión se anota en el momento preciso en que el agua penetre en el tejido por un tercer punto. La presión de agua puede aplicarse desde la parte superior o desde la parte inferior de la probeta de ensayo. En el informe del ensayo debe de indicarse la alternativa utilizada.

Este ensayo está correlacionado con el comportamiento de esta clase de tejidos a la presión de agua durante periodos de tiempo moderados.

El equipo utilizado para este ensayo deberá fijar la probeta de tal forma que:

- la probeta quede horizontal y sin posibilidad alguna de pandeo
- una superficie de tejido de 100 cm<sup>2</sup>, quede sometida a una presión de agua uniformemente creciente desde la parte superior o bien inferior de la probeta.
- no se produzca ninguna fuga en los bordes de la mordaza en contacto con la probeta durante el ensayo.
- la probeta no se deslice en los bordes de la mordaza
- se reduzca al mínimo la tendencia del agua a filtrarse cerca del borde de la presión de la probeta y mordaza.

El agua en contacto con la probeta debe ser destilada y totalmente desionizada manteniéndose a una temperatura de 20°C ± 2°C ó de 27°C ± 2°C, la temperatura escogida debe de indicarse en el informe final del ensayo (el agua a temperatura más alta dará lugar a presiones hidrostáticas más bajas).

La velocidad de aumento de presión del agua deberá ser de 10 ±0,5 ó 60 ±3 cm H<sub>2</sub>O/min.

El equipo dispondrá de un manómetro conectado a la cubeta utilizada en el ensayo de modo que permita leer las presiones con una precisión de 0,5 cm de H<sub>2</sub>O.

Las probetas deben acondicionarse y se procurará manipularlas lo mínimo posible sin arrollarlas, doblarlas, plancharlas ni darles otro tipo de tratamiento. Se tomarán al menos cinco probetas de tejido en diferentes partes de modo que sean representativas del lote a analizar.

Para cada probeta que se ensaya se debe cambiar el agua destilada. Antes de realizar el ensayo se seca el agua o humedad de la superficie de las mordazas. La probeta acondicionada se coloca en las mordazas del aparato sobre la cubeta de ensayo, de tal manera que el agua no pase a través de la probeta antes de iniciar el ensayo y someter inmediatamente la probeta a una presión de agua uniformemente creciente. Debe de vigilarse ininterrumpidamente para observar la posible penetración del agua.

Se anota la presión en centímetros de columna de agua convencionales, en el momento en que aparece la tercera gota de agua pasando a través de la probeta.

La precisión de la medida de la presión registrada debe de ser:

- hasta 1 m de H<sub>2</sub>O : 0m,5 cm
- mayor de 1 m de H<sub>2</sub>O hasta 2 m H<sub>2</sub>O : 1 cm
- mayor de 2 m H<sub>2</sub>O: 2 cm



Figura 76. Equipo de medida Hydrostatic Head Tester M018. Fuente: [SDL Atlas](http://SDLAtlas.com)

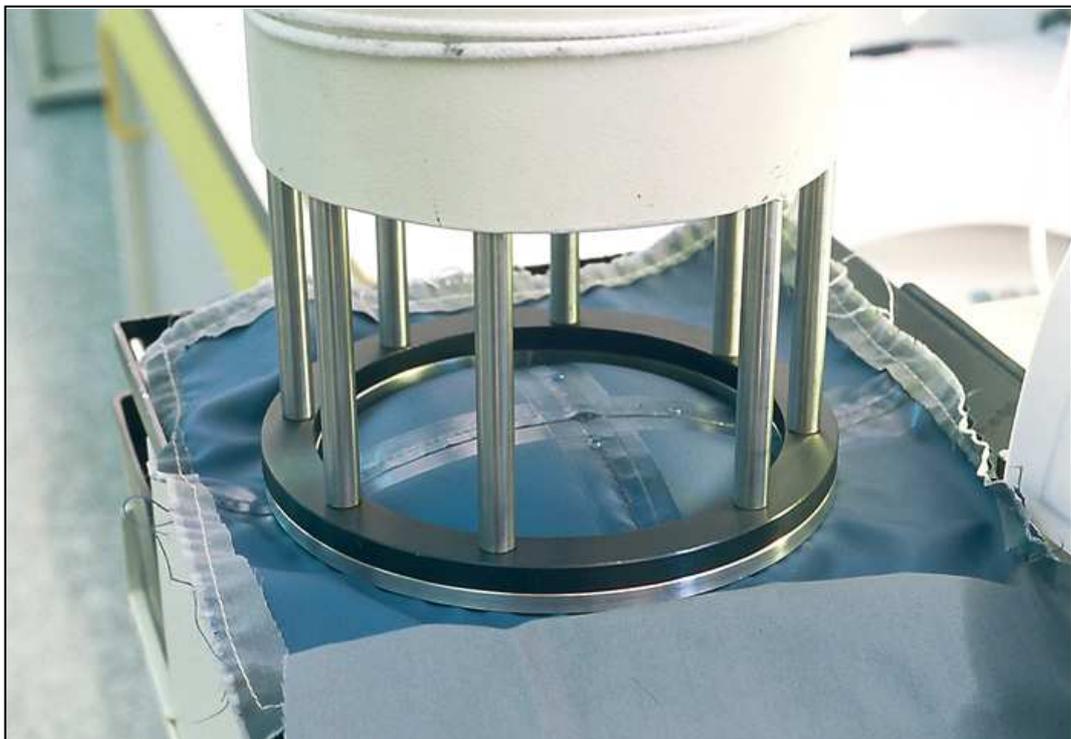


Figura 77. Ensayo de resistencia a la penetración del agua. Fuente: [fecsa.net](http://fecsa.net)

No hay que tener en cuenta las gotas muy finas cuyo volumen no aumente después de su primera formación. No se cuentan las gotas sucesivas que se forman y penetran a través del mismo punto del tejido. Se anota si el paso del agua en el tercer punto del tejido se produce sobre el borde de la mordaza y se rechaza como no satisfactorio cualquier ensayo en que la penetración en la zona citada se produzca con una presión menor que la presión más baja registrada por las otras probetas de la misma muestra de tejido. Se prosigue el ensayo con nuevas probetas hasta que se consiga el número necesario de resultados satisfactorios.

En el informe del ensayo se especificará:

- la referencia a la norma EN 20811.1992
- atmósfera utilizada
- la temperatura del agua
- si la presión del agua se ha aplicado desde debajo o encima de la probeta
- la velocidad de aumento de la presión de agua
- la cara de la probeta sometida a ensayo
- cualquier variación en forma y dimensiones de la probeta
- resultados individuales y media aritmética

### 5.2.1.1 Videos sobre el ensayo de resistencia a la penetración de agua

*Fabric Testing - Hydrostatic Head Test* <https://www.youtube.com/watch?v=09elg5Z1kLE>

*Hydrostatic Pressure Test - Hydrohead - IPS Testing*  
<https://www.youtube.com/watch?v=HwQA4tq99ds>

*Mesure de la colonne d'eau (Schmerber)*  
<https://www.youtube.com/watch?v=ZcL9Fwfov0k>

### 5.2.2 Resistencia al mojado. Spray test (UNE 40-393-84)

Se trata de un ensayo para determinar la repelencia o resistencia al mojado externo de los tejidos. Es aplicable a toda clase de tejidos, pero especialmente a los impermeable e hidrófugos, así como en papeles.

El ensayo consiste en verter sobre un tejido colocado con una inclinación de 45°, una determinada cantidad de agua en forma de lluvia (figura 78). Al finalizar el ensayo, la superficie mojada del tejido se compara con una serie de patrones fotográficos normalizados con distintos grados de mojado. Se trata de un ensayo para valorar el poder perlante de los tejidos hidrófugos y consiste en un ensayo poco exigente para los tejidos.

Para realizar el ensayo se cortan 3 discos de tejido de 178 mm de diámetro, no deben utilizarse las zonas próximas a los orillos (100 mm) y final de la pieza (50 mm), así como zonas defectuosas, dobladas o manoseadas del tejido.

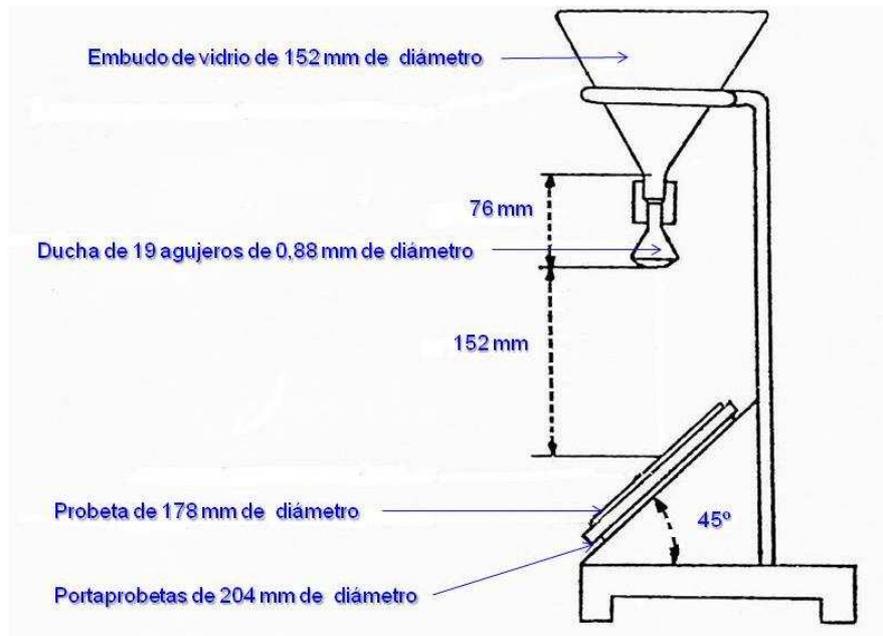
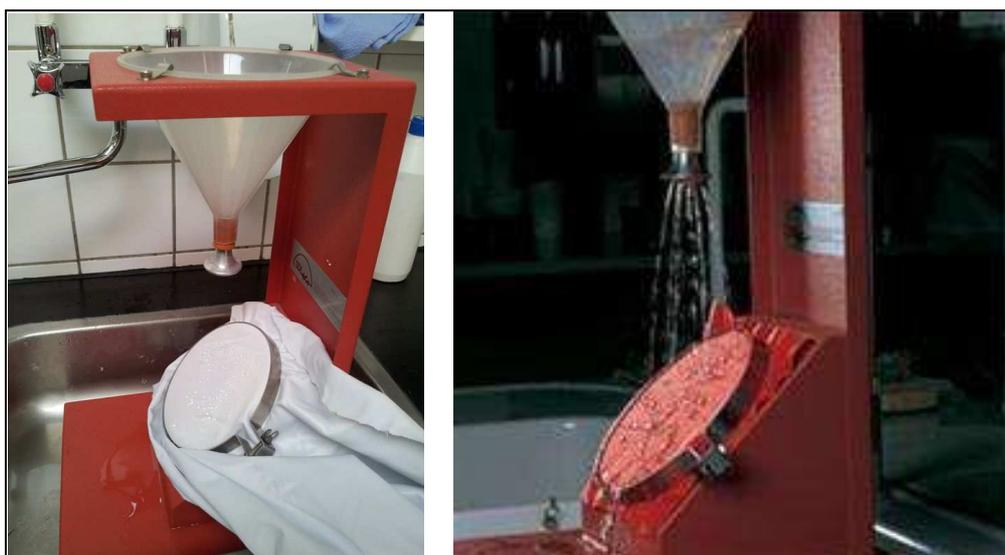


Figura 78. Detalles del equipo Spray test

Una vez acondicionadas se colocan las probetas con el haz del tejido encima, de forma que la caída del agua siga la dirección de la urdimbre. En el caso de tejidos acanalados, los canales deben colocarse en diagonal al camino del agua.

Se vierte en el embudo una cantidad de 250 cm<sup>3</sup> de agua y se deja caer sobre la probeta durante 25-30 segundos. Terminado el periodo de caída del agua, se coge el tambor por un lado y con la cara del tejido boca abajo, se sacude el otro lado vivamente contra un cuerpo sólido, girando posteriormente el tambor 180°, cogiéndolo por el lado opuesto y repetir la sacudida.

Figura 79. Izquierda Spray Tester [SDL ATLAS](#). Derecha mismo equipo durante el rociado [Baleno](#)

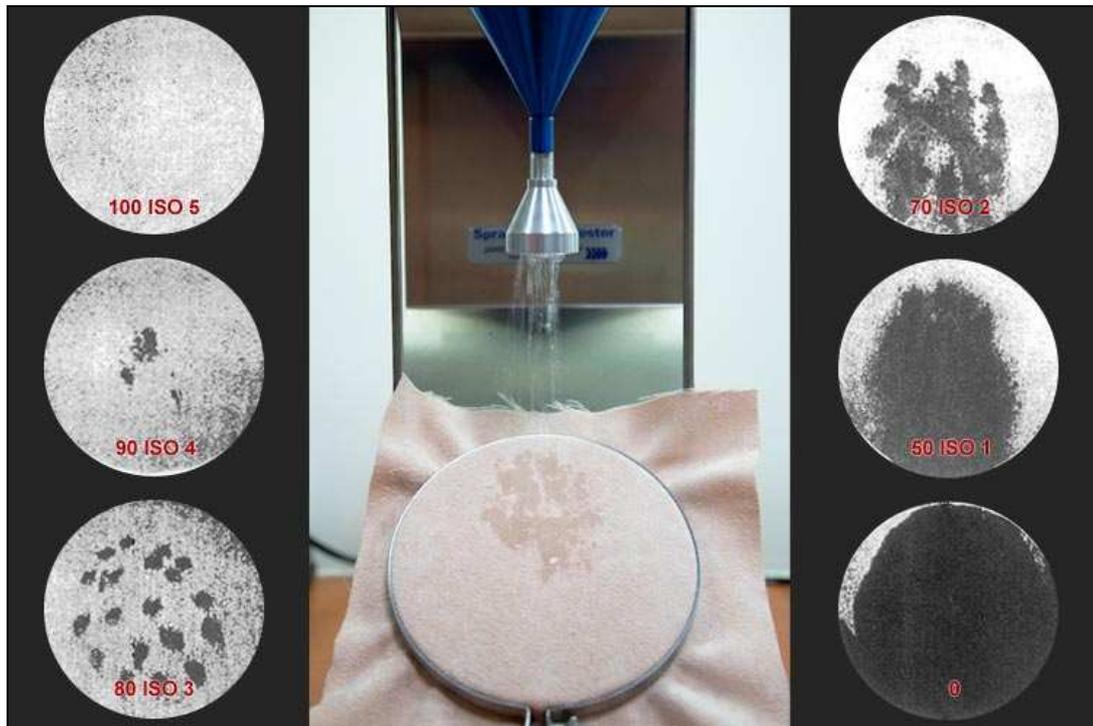


Figura 80. Patrones fotográficos de repelencia al agua. Fuente. [Borshe.com](http://Borshe.com)

Una vez realizada esta operación se procede a comparar el aspecto de la probeta rociada con los 6 patrones fotográficos que corresponden a la clasificación de la tabla 5.

100 %	No mojado ni traspasado
90%	Una pequeña zona mojada
80%	Mojado de superficie en los puntos de caída del agua
70%	Mojado parcial de alguna parte de la superficie
50%	Completamente mojada la superficie superior y seca la inferior
0%	Completamente mojada la parte superior e inferior

Tabla 5. Patrón de repelencia del agua de la norma UNE 40-393-84

### 5.2.2.1 Videos sobre el ensayo Spray test

*Spray AATCC 22 water repellency* <https://www.youtube.com/watch?v=QGruocFmbQs>

*Advantex* <https://www.youtube.com/watch?v=XzjyX4RK7g8>

### 5.2.3 Impermeabilidad de tejidos por el ensayo de ducha Bundesman (UNE EN 29865)

Cuando conviene tener una información más completa sobre el comportamiento de un tejido a la lluvia y los efectos que este fenómeno meteorológico produce sobre la prenda durante su uso, es necesario realizar un ensayo más completo y exigente, como el que se describe a continuación.

Esta norma describe un método para la determinación de la impermeabilidad de los tejidos textiles mediante una ducha que simula la lluvia. El ensayo se utiliza para valorar la efectividad de los procesos de acabado que proporcionan propiedades de impermeabilidad a los tejidos.

Se entiende por repelencia al agua, la resistencia que los tejidos textiles presentan a absorber agua de una ducha que simula la lluvia artificial. El criterio está basado en la cantidad de agua absorbida tras los efectos de una ducha que simula una lluvia artificial durante un tiempo determinado. Además, se puede comprobar la cantidad de agua que penetra (retenida) en los tejidos y la cantidad de agua que traspasa el tejido.

Las probetas de ensayo de tejidos textiles se montan sobre unas cubetas y posteriormente se exponen a una ducha que simula la lluvia artificial bajo condiciones definidas. La repelencia al agua es valorada por comparación visual con probetas mojadas recogidas en unas fotos de referencia. Se pesa el agua absorbida por las probetas durante el ensayo y se recoge en las cubetas el agua que ha penetrado a través de las muestras y se registra.

El equipo de medida tiene distintas partes (65):

- a) Ducha: Consta de un sistema con 300 boquillas o chorros para formar la gota, igualmente distribuidos sobre una superficie horizontal circular de 406 mm de diámetro y un área equivalente de 1.300 cm<sup>2</sup> (figura 81).  
El diámetro aproximado de la gota producida por cada dispositivo es de 4 mm y un volumen de gota de 0,07ml.  
El flujo de agua del equipo de ducha puede modificarse en función del tiempo prescrito para el ensayo. La altura de caída de la gota (distancia vertical entre las boquillas y el centro de la superficie de la probeta) es de 1.500 mm. El agua utilizada en el ensayo es la del grifo, previo paso por un filtro para eliminar contaminantes de grano grueso. La temperatura del agua debe de ser de 20°C ±3°C o 27°C ±2°C (esta última para países tropicales). La temperatura del agua, dureza y pH deben incluirse en el informe final.
- b) Dispositivo de sujeción de la probeta: Tiene forma de cubeta para permitir que el agua que pase a través de la probeta sea recogida y medida. La parte superior de la cubeta mantiene la probeta en su lugar mediante un anillo de sujeción. La superficie expuesta de la probeta instalada en el dispositivo de sujeción de la cubeta deberá ser de 80 cm<sup>2</sup> y el diámetro exterior de la cubeta será de 100 mm. Para asegurar que el agua fluya a través de la probeta, la línea central de la cubeta está inclinada 15° sobre la vertical. Además en cada cubeta se dispone de un dispositivo en forma de cruceta (de acero inoxidable ligeramente curvada) que durante el ensayo roza sobre el envés de la probeta con una fuerza de 250 cN realizando 20 movimientos circulatorios por minuto con un ángulo de 100° aproximadamente. Cada cubeta dispone de una válvula de aire de 7 ± 1 mm de diámetro, a través de la cual puede circular el aire.



Figura 81. Ducha Bundesman con las boquillas de lluvia artificial. Fuente: Fuente: [kod.tul.cz](http://kod.tul.cz)



Figura 82. Dispositivo de sujeción de las probetas, cubetas y grifo para la descarga del agua que ha atravesado la probeta. Fuente: [kod.tul.cz](http://kod.tul.cz)



Figura 83. Imagen de las probetas montadas sobre las cubetas y fijadas mediante el anillo de sujeción. Fuente: [kod.tul.cz](http://kod.tul.cz)

Se corta o troquela la muestra para obtener una probeta circular de 140 mm de diámetro, libre de arrugas y pliegues, al menos de cuatro zonas diferentes, cada una distanciada como mínimo 100 mm del borde de la muestra. Se recomienda no extraer probetas directamente de los extremos de la pieza de tejido ya que la experiencia demuestra que la masa por unidad de superficie y el acabado pueden ser diferentes a los de la mayor parte de la pieza de tejido. Las probetas posteriormente han de ser acondicionadas.

- c) Centrífuga: Consta de un disco con una superficie montada horizontalmente de 175 mm de diámetro que gira a 700 rpm. El tiempo necesario para alcanzar estas revoluciones desde 0 y viceversa está comprendido entre 1 s y 2 s. La superficie del disco está formada aproximadamente por 50 varillas, cada una de 1 mm de altura, dispuestas radialmente sobre la superficie del disco. Las varillas están uniformemente separadas alrededor del disco de modo que las probetas mojadas no se adhieran a la superficie.



Figura 84. Disco de la centrífuga. Fuente: [kod.tul.cz](http://kod.tul.cz)

El procedimiento operatorio a seguir para la realización de este ensayo empieza con el ajuste del flujo de agua prescrito en función del tiempo, advirtiendo que la ducha no deberá desconectarse hasta que se hayan realizado todos los ensayos. A continuación se pesan las probetas acondicionadas con una precisión de 0,01 g. Se identifica la cara a ensayar y se coloca hacia arriba sobre las cubetas sin ninguna tensión particular, simplemente aplicando un alisado manual.

Se exponen las probetas a la acción de la ducha durante 10 minutos.

Se valora la repelencia al agua o poder perlante por comparación visual de las probetas mojadas al final del ensayo de la ducha con respecto a las fotografías de referencia y de acuerdo con las cinco clases siguientes descritas en la tabla 6 y en la figura 85. La repelencia al agua puede igualmente ser valorada al cabo de 1 minuto y 5 minutos.

Clase A	Descarga rápida de pequeñas gotas
Clase B	Formación de grandes gotas
Clase C	Gotas adheridas a partes de la probeta
Clase D	Probeta parcialmente mojada
Clase E	Probeta mojada en toda la superficie

Tabla 6. Categorías de referencia para valorar la repelencia al agua

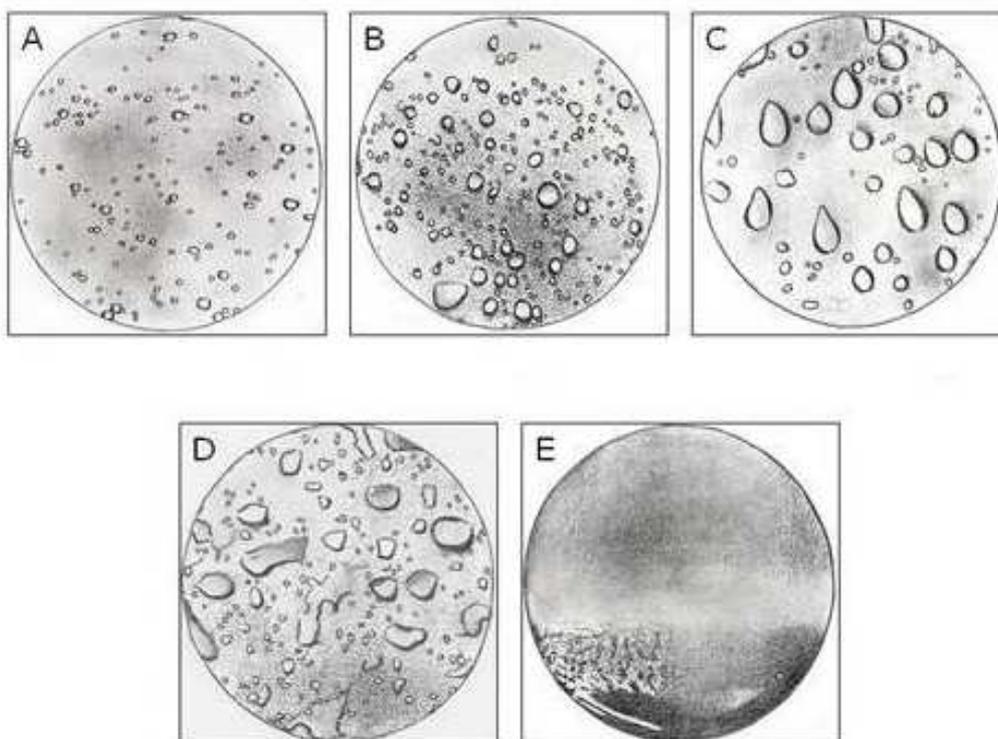


Figura 85. Patrones fotográficos para la evaluación del poder perlante. Fuente: [kod.tul.cz](http://kod.tul.cz)

A continuación se centrifuga la probeta durante 15 segundos. Inmediatamente después, se pesa la probeta con una precisión de 0,01 g y se registra como masa húmeda  $m_2$ . Además del agua absorbida por las probetas en el ensayo de la ducha, se recoge en las cubetas toda el agua que ha traspasado las probetas y se determina su volumen en milímetros.

Se calcula la absorción de agua  $W_{H_2O}$ , expresada como porcentaje en masa, a partir de la siguiente ecuación:

$$W_{H_2O} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100$$

donde:

$m_1$  es la masa, en gramos, de la probeta antes del ensayo

$m_2$  es la masa, en gramos, de la probeta después del ensayo



Figura 86. Las probetas durante el ensayo de exposición a la lluvia artificial. Fuente: [honestein](http://honestein.com)

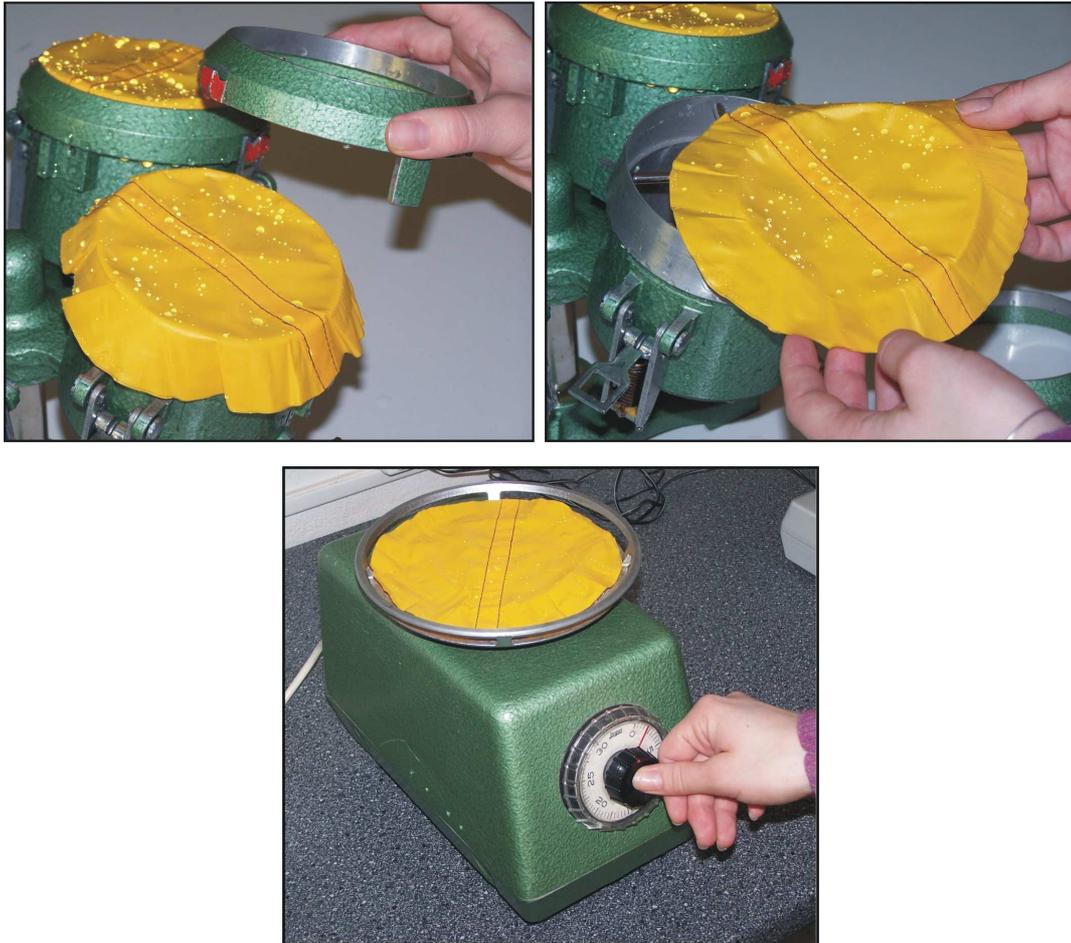


Figura 87. Extracción de la probeta y centrifugado. Fuente: [kod.tul.cz](http://kod.tul.cz)



Figura 88. Izquierda, pesado de la probeta centrifugada. Derecha, medición del volumen de agua que ha traspasado el tejido. Fuente: [kod.tul.cz](http://kod.tul.cz)



Figura 89. Aspecto general del equipo Bundesman. Fuente: [Labtexcontrol](http://Labtexcontrol)

### 5.2.3 Permeabilidad al vapor de agua

La medida de la permeabilidad del vapor de agua de los tejidos, es decir su capacidad para permitir que la humedad los atraviese, tiene una gran importancia puesto que está relacionado con la capacidad de los tejidos para permitir el paso del sudor a través suyo, propiedad fundamental en el confort termofisiológico del cuerpo humano.

La permeabilidad o difusividad del vapor de agua a través de un tejido textil  $d_v$ , es la cantidad de vapor que pasa a través de la unidad de superficie de material de espesor unidad cuando la diferencia de presión de vapor entre sus caras es la unidad.

Unidades:

Se expresa normalmente en g cm/mmHg m<sup>2</sup> día.

En unidades S.I. se expresa en g m/MN s (gramo metro por meganewton segundo).

La equivalencia es:

$$1 \text{ g cm/mmHg m}^2 \text{ día} = 0,868 \cdot 10^{-3} \text{ g m/MN s.}$$

$$1 \text{ g m/MN s} = 11,52 \cdot 10^2 \text{ g cm/mmHg m}^2 \text{ día.}$$



Figura 90. La permeabilidad al vapor de agua de un tejido es una propiedad básica para evaluar su confort. Fuente: [goreprotectivefabrics](http://goreprotectivefabrics)

La resistividad al vapor  $r_v$  es el inverso de la permeabilidad al vapor  $d_v$

Se expresa normalmente en mmHg m<sup>2</sup> día/g cm.

En unidades S.I. se expresa en MN s/g m (meganewton segundo por gramo metro).

La equivalencia es:

$$1 \text{ mmHg m}^2 \text{ día/g cm} = 11,52 \cdot 10^2 \text{ MN s/g m.}$$

$$1 \text{ MN s/g m} = 0,868 \cdot 10^{-3} \text{ mmHg m}^2 \text{ día/g cm.}$$

La resistencia al vapor de agua  $R_v$  es el valor de la resistencia total de un material de espesor  $e$  o combinación de varios, a la difusión del vapor de agua. Es decir:

$$R_v = (e/d_v) = e \cdot r_v$$

En un cerramiento formado por varias capas su resistencia al paso del vapor será la suma de las resistencias de cada una de las capas, despreciándose las resistencias superficiales.

$$R_v \text{ total} = \sum R_{vi} = \sum e_i \cdot r_{vi}$$

Hay una gran cantidad de normas aprobadas para la medida de la permeabilidad al vapor de agua de los tejidos:

- *ASTM E96* Standard test methods for water vapor transmission of materials
- *ISO 15496* Textiles. Measurement of water vapor permeability of textiles for the purpose of quality control
- *BS 7209* Specification for water vapor permeable apparel fabrics
- *JIS L1099* Testing methods for water vapour permeability of textiles
- *ISO 2528* Sheet materials. Determination of water vapour transmission rate – Gravimetric (dish) method
- *ISO 11092 (EN 31092)* Textiles – Physiological effects – Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions
- *ASTM 1868* Standard test method for thermal and evaporative resistance of clothing materials using a sweating hot plate.
- *UNE-EN ISO 15496:2004/AC:2006* Textiles. Medición de la permeabilidad al vapor de agua de textiles con fines de control de calidad.

Los diferentes métodos pueden clasificarse en dos grupos:

- a) Métodos gravimétricos
- b) Métodos de placa caliente

### 5.2.3.1 Métodos gravimétricos

Son los más simples y se denominan también método de la taza o plato. Las normas que siguen este principio son: ASTM E96; ISO 2528, ISO 15496; BS 7209; JIS L 1099.

Tal como se indica en la norma ASTM E96, el método de la taza puede realizarse de tres formas distintas:

- a) Método secante: El vapor de agua del exterior de la taza atraviesa el tejido y es capturado por un producto secante, normalmente sal de sílice que hay en el interior de la taza (imagen izquierda de la figura 91). Un incremento de masa del producto secante nos indicará la cantidad de agua que ha atravesado el tejido.
- b) Método agua: En el interior de la taza se introduce agua, que es cubierta por el tejido a analizar. Si al finalizar el ensayo el peso de la taza ha disminuido indicará que el agua de la copa se ha evaporado y ha atravesado el tejido. (imagen central de la figura 91)
- c) Método agua invertido: Similar al anterior pero con la taza invertida de tal manera que el tejido está en contacto con el agua (imagen de la derecha de la figura 91).

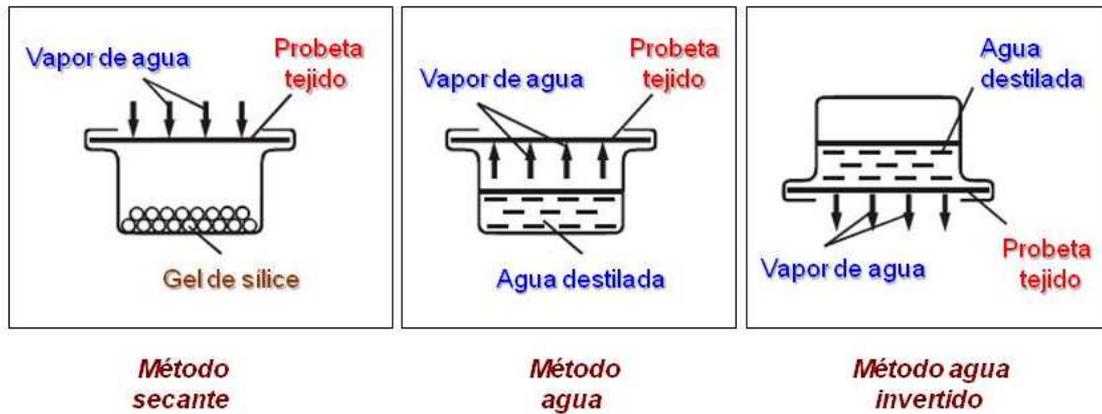


Figura 91. Esquema de los tres métodos que se pueden seguir en el ensayo de la taza.

Esta norma tiene 6 procedimientos posibles y su duración oscila entre 1 y 24 horas (la más habitual) y se utilizan 8 probetas.

Método	Procedimiento	Temperatura ambiente °C	Humedad relativa dentro de la taza %	Humedad relativa fuera de la taza %
Método secante	A	23,0	0	50
	C	32,2	0	50
	E	37,8	0	90
Método agua	B	23,0	100	50
	D	32,2	100	50
M. agua invertido	BW	23,0	100	50

Tabla 7: Características de los procedimientos para medir la permeabilidad al vapor de agua de acuerdo con la norma ASTM E96

Lógicamente en los tres métodos, el tejido está firmemente sujeto y sellado en el perfil de la taza de ensayo con el fin que la humedad no se escape por este punto.

Tanto el método secante como el método agua son adecuados para evaluar el nivel de confort en situaciones de baja actividad física y nivel de sudoración puesto que no nos indican si hay, o no, condensación en la superficie del tejido. La permeabilidad al vapor de agua medida por estos métodos no sólo depende de las propiedades del tejido sino también del espesor de la capa de aire que linda con el tejido (el espesor del tejido es mucho menor que el de la capa de aire). Para artículos con acabados hidrófugos se recomienda utilizar método del agua invertido, ASTM E96, procedimiento BW. La taza se llena con agua destilada y a continuación se cubre con la probeta de tejido teniendo la precaución de sellar convenientemente sus extremos. La taza se gira y el tejido está en contacto con el agua, en las condiciones ambientales que se indican en la tabla. Una vez finalizado el tiempo de ensayo se comparan los pesos de la taza al inicio y a la finalización del ensayo.



Figura 92. Water vapor permeability tester. Ensayo de la taza. Fuente. [SDL-Atlas](#)

En la norma ISO 15496 "método de copa" se lleva a cabo por el "método desecante invertida". La copa se llena con una solución secante de acetato de potasio y se cubre mediante una membrana de Politetrafluoroetileno (PTFE) que es impermeable pero transpirable. Encima de la membrana se coloca la probeta de tejido y se sella por los extremos. La taza se gira y el ensayo determina la penetración del vapor de agua a través de la membrana de PTFE y el tejido. Este tipo de ensayo es adecuado para valorar el confort a un nivel de alta actividad física y nivel de sudoración puesto que elimina la influencia de la capa de aire. Este método gravimétrico es el precursor del método de ensayo de la placa caliente,

### 5.2.3.2 Métodos de placa caliente

Estos métodos siguen las normas ISO 11092 (EN 31092) y ASTM 1868) constituyen la nueva generación de métodos para la determinación de la permeabilidad al vapor de textil.

La transpiración es el proceso de pérdida de calor del cuerpo debido a la evaporación de la humedad desde la piel hasta el medio ambiente. En este caso, la transpiración es el vapor transportado a través de los espacios de aire que hay en la estructura del tejido. Si la permeabilidad al vapor de agua es alta, el transporte de vapor de agua a través del tejido también lo será. Este fenómeno tiene una gran importancia en ambientes calurosos puesto que los tejidos deben permitir la transferencia de vapor de agua de la piel al medio ambiente.

La difusión del vapor de agua (sudor), se produce siempre desde la zona de alta concentración de humedad a la de baja concentración hasta que finalmente se equilibran

La difusión  $\frac{dm}{dt}$  a través de una superficie A y gradiente de concentración  $\frac{\partial c}{\partial c}$  se explica mediante la ecuación de Fick:

$$\frac{dm}{dt} = -DA \frac{\partial c}{\partial x}$$

donde  $D$  es el coeficiente de difusión ( $m^2 / s$ ).

La ley de Fick describe la transferencia de vapor de agua y también podría ser presentado como la ecuación:

$$U = \frac{W}{t \cdot A}$$

donde  $U$  es la transferencia de vapor de agua,  $g / m^2h$ ,  $A$  es el área de la muestra,  $m^2$ ,  $W$  es el cambio de peso,  $g$ , y  $t$  es el tiempo,  $h$ .

La resistencia a la difusión del vapor de agua es el recíproco de la permeabilidad al vapor de agua y se da también con la ley Fick.

$$Rt = \frac{\Delta C}{m}$$

donde  $Rt$  es la resistencia total difusión de vapor de agua, en  $g/m$ ,  $\Delta C$  es la diferencia de concentración de vapor de agua través de la tela,  $g/m^2$ ,  $m$  es la tasa de difusión de la masa de vapor de agua por unidad de área a través de la muestra.

En el método de la placa caliente, la probeta de tejido de 300 x 300 mm se coloca sobre una superficie formada por una placa calentada que está cubierta por una membrana de celofán permeable al vapor de agua. Este principio simula la sudoración de la piel humana. La temperatura de la placa es igual a la temperatura del aire y es de 35°C; la humedad relativa del aire es del 40% y la velocidad del aire de 1 m/s. Durante el ensayo la temperatura de la placa se mantiene en un nivel constante. Poco a poco el agua, que pasa a través de la placa y la membrana, se evapora. La energía consumida en el mantenimiento de la temperatura de la placa a un nivel constante constituye la resistencia al vapor de agua. El ensayo dura de una a dos horas.

Una variante del ensayo anterior es el PERMETEST (figura 93). Una superficie porosa ligeramente curvada se humedece de forma continua bajo demanda y se expone a un flujo paralelo de aire a una velocidad de 1,5 o bien 3,0 m / s. La probeta se encuentra a una distancia de 1,0-1,5 mm del área humedecida de 80 mm de diámetro y se caracteriza por una alta conductividad térmica. El flujo de calor se genera por la evaporación del agua de la superficie de medición y se mide con un sensor especial de flujo de calor integrado en la capa porosa. El tiempo de medición es de 2 minutos. Este instrumento proporciona la permeabilidad relativa al vapor de agua en la condición isotérmica estado estacionario:

La Permeabilidad Relativa de Vapor de Agua, RWVP, es la proporción de calor perdido cuando el tejido se coloca en el cabezal de medición de pérdida de calor desde el cabezal de medición desnudo. La unidad es [%].

$$RWVP = \frac{\text{Pérdida de calor cuando el tejido se situa en el cabezal de medida}}{\text{Pérdida de calor con el cabezal de medida desnudo}}$$



Figura 93. Permetest: [Fuente Svet Outdooru](#)

## 5.2.4 Control y gestión de la humedad líquida

### 5.2.4.1 Velocidad de difusión del agua. Ensayo de empapado vertical

La velocidad de difusión del agua en un tejido tiene un gran interés tanto para valorar la cinética de los procesos tintóreos como para deducir la capacidad que tiene para captar el sudor de la piel con mayor o menor velocidad.

Para la determinación de esta propiedad se realiza el ensayo de absorción vertical. El ensayo consiste en introducir el extremo inferior de una tira de tejido de dimensiones normalizadas en un recipiente lleno de agua destilada. La probeta se mantiene en posición vertical puesto que el extremo superior está retenido por una varilla que lo retiene en esta posición. La altura (en cm) que alcanza el agua transportada por el tejido se mide a intervalos de 1, 5 y 10 minutos. Cuanto mayor sea la longitud alcanzada por el agua mayor será la capacidad del tejido para transportar agua a través suyo. Cuando la altura del agua no puede determinarse debido a la dificultad de observarlo a simple vista, puede utilizarse técnicas termográficas (figura 94).

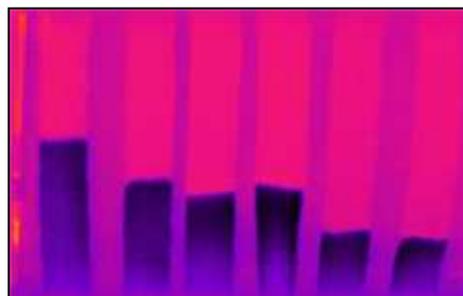


Figura 94. Ensayo de empapado vertical mediante imagen térmica. Fuente: [NCSU](#)

### 5.2.4.2 Velocidad de difusión del agua. Ensayo de absorción gravimétrico

Este ensayo nos indica la capacidad lateral de una tira de un tejido, o la capacidad del material para llevar el líquido de forma espontánea en la dirección de la perpendicular a su plano, es decir la demanda humectabilidad. La demanda humectabilidad se mide por la cantidad de agua extraída de un recipiente lleno de agua a través de un tubo conectado a una placa de vidrio poroso, sinterizado diseñado para imitar la sudoración de la piel. El recipiente de ensayo se autoajusta para mantener un diferencial de cero presión hidrostática en relación con el recipiente de agua; El agua se introduce en el tejido de ensayo a través de la acción capilar (figura 95).

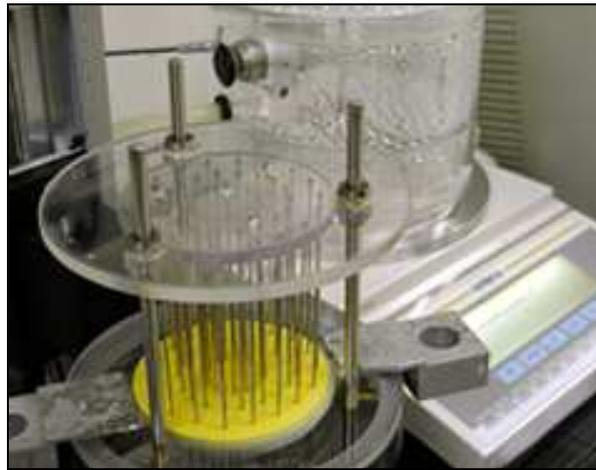


Figura 95. Instrumentación del ensayo gravimétrico. . Fuente [NCSU](#)

En este ensayo se mide:

Wd: peso seco de la muestra acondicionada (g)

Ww: peso húmedo de la muestra al final de la prueba (g)

V: cantidad de agua que circula a través del recipiente durante 1000 segundos (g)

T: tiempo, minutos. Este es el punto donde las áreas de absorción y evaporación extrapolada de la curva se cruzan.

Los parámetros de absorción calculados a partir de las mediciones anteriores son:

C: capacidad de absorción (g). Cantidad de agua contenida en la muestra al final de la prueba. Los valores más altos indican indicación mayor absorción de humedad.

Q: velocidad de absorción (g / min). Indicado por la elevada pendiente en la etapa inicial de la prueba. Valores elevados indican mayor rapidez en la absorción de humedad.

EP: porcentaje de evaporación. Relación entre la humedad evaporada respecto a la humedad absorbida. Valores altos indican mayor humedad evaporada

### 5.2.4.3 Velocidad de difusión del agua. Ensayo del tiempo de secado

Para determinar la velocidad de secado, se mide el tiempo transcurrido entre que el tejido está saturado de humedad hasta que está seco. Para ello se pesa la probeta de tejido saturado y se realizan lecturas consecutivas hasta que el peso del tejido se ha estabilizado y no pierde más peso por evaporación del agua (figura 96). Por regla general una velocidad rápida de secado mejora la sensación de confort.



Figura 96. Instrumentación para el ensayo del tiempo de secado. Fuente: [NCSU](#)

### 5.2.4.4 Medida de la difusión de la humedad (Moisture Management Tester)

Este método de ensayo es adecuado para medir, evaluar y clasificar las propiedades de control y gestión de la humedad líquida de tejidos de calada, tejidos de malla y no tejidos.

Los resultados obtenidos con este ensayo son consecuencia de la resistencia, repelencia y absorción de agua de los tejidos estudiados así como de sus propiedades estructurales.

El control de las propiedades de difusión de humedad líquida en los tejidos textiles se realiza colocando la probeta de tejido entre dos sensores eléctricos (uno superior y otro de inferior) formados por 7 pins concéntricos. Se deja caer en el centro de la cara superior de la probeta una cantidad predeterminada de “solución de ensayo” que sirve para medir los cambios de conductividad eléctrica que sufre la probeta. Dicha solución se mueve libremente en las tres direcciones, difusión radial en la superficie superior y exterior, movimiento a través del tejido desde la superficie superior a la inferior y difusión radial en la parte inferior de la probeta, midiéndose los cambios de la resistencia eléctrica experimentados por la probeta (figura 97).

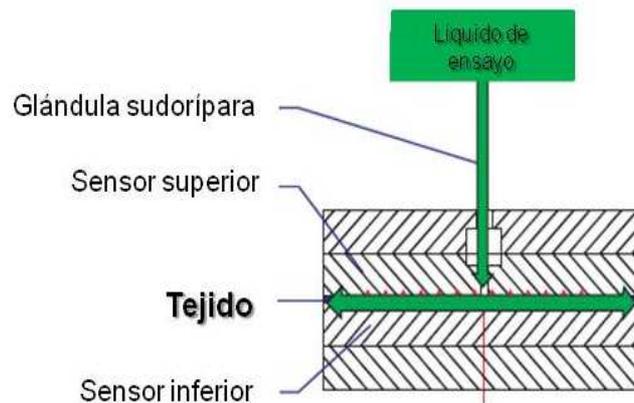


Figura 97. Principio de funcionamiento del cabezal del MMT. Fuente: [SDL-ATLAS](#)

Las lecturas de los valores de resistencia eléctrica de la probeta sirven para calcular los cambios de contenido de la humedad líquida del tejido y el comportamiento de la dinámica del transporte de humedad de líquida en múltiples direcciones. Los resultados obtenidos con este ensayo sirven para evaluar las propiedades de difusión de la humedad líquida en los tejidos por comparación con unos índices determinados.

La terminología utilizada en este ensayo es la siguiente:

Tasa de absorción (ART) (superficie superior) y (ARB) (superficie inferior): Velocidad media de absorción de humedad líquida para las superficies superior e inferior de la probeta durante el cambio inicial del contenido de agua.

Capacidad de transporte acumulativo unidireccional (R): Diferencia entre el área del contenido de humedad líquida de las superficies superior e inferior de la probeta con respecto al tiempo.

Superficie inferior (B). Para la realización del ensayo, se considera que el lado de la probeta colocado hacia abajo en contacto con el sensor eléctrico inferior correspondería el lado exterior del tejido expuesta al uso.

Radio máximo de humectación (MWRT) y (MWRB) (mm). Radio máximo del anillo medido tanto en la parte superior como inferior de la probeta.

Capacidad de difusión global de la humedad líquida (OMMC). Se trata de un índice de la capacidad general de un tejido para transportar la humedad líquida a través suyo. Se calcula mediante la combinación de tres factores: la tasa de absorción de la humedad líquida de la superficie inferior de la probeta (ARB), la capacidad de transporte de la humedad líquida en una dirección (R) y la velocidad máxima de propagación de la humedad líquida en la parte inferior de la probeta (SSB).

Velocidad de propagación (SSI). Velocidad de propagación de la humedad superficial desde el centro de la probeta, donde se ha dejado caer la solución de ensayo, hasta el radio máximo de humectación

Superficie superior (T). Es el lado de la probeta que cuando está situada en el sensor eléctrico inferior, toca con el sensor superior. Este es el lado del tejido que durante su uso como prenda de vestir está en contacto con la piel.

Contenido total de agua (U) (%). Es la suma del porcentaje de contenido de agua de las superficies superior e inferior. En el sentido estricto este parámetro debería denominarse "contenido de agua superficial total", especialmente en tejidos de base celulósica. El contenido total de agua implica que se está midiendo la totalidad de agua de la probeta, cosa que sucede en algunos tejidos. Sin embargo, al ensayar fibras celulósicas, la humedad atrapada en el interior de la fibra (por ejemplo, en el lumen del algodón) no se incluye en este ensayo.

Tiempo de humectación (WTT) (superficie superior) y (WTB) (superficie inferior). Es el tiempo transcurrido (en segundos) desde el inicio de la prueba hasta que las superficies superior e inferior de la muestra comienzan a ser humectadas.



Figura 98. Equipo de medida de la difusión de la humedad líquida. Fuente: [SDL-ATLAS](#)

Este método de ensayo se centra en el estudio del comportamiento de la difusión de la humedad líquida en los tejidos en posición horizontal. El ensayo puede servir para la evaluación de tejidos destinados a prendas de vestir puesto que están expuestos a la humedad líquida generada por la transpiración de la piel humana.

Debido a que la percepción humana de confort está influenciada por las diversas propiedades del líquido en movimiento, así como de la ergonomía y ajuste de las prendas de vestir, el uso de una información como la proporcionada por este tipo de ensayo o cualquier podría dar lugar a interpretaciones engañosas. Por lo tanto con este ensayo por sí sólo no se podrá evaluar la comodidad de una prenda o producto textil. Para ello debería correlacionarse de forma combinada la absorción de humedad, su capilaridad así

como el movimiento de vapor en función de las características ambientales externas así como el ajuste de la prenda.

La utilización de éste método de ensayo presenta limitaciones cuando se analizan tejidos con acabados superficiales repelentes. Este método no es aplicable, tampoco, en artículos que presentan una elevada capacidad absorbente global, como es el caso de las toallas o tejidos de punto gruesos. Las características singulares de los tejidos muy gruesos y altamente absorbentes pueden dificultar la difusión de la humedad líquida y por lo tanto este método de ensayo que utiliza una solución líquida de ensayo no sería adecuado para estos casos.

Este método de prueba no mide la eficiencia des secado de forma directa. Este se deduce a partir de la propagación de la zona de humedad líquida.

Antes de cortar las probetas debe lavarse la muestra de tejido de acuerdo con la norma pactada entre las partes. Hay que tener presente que la eliminación de encolantes como la estabilidad dimensional de la muestra puede afectar a la capacidad de difusión de la humedad líquida.

Cortar cinco probetas de 8 × 8 cm, tomadas diagonalmente en el ancho del tejido para asegurar que las probetas no contienen los mismos hilos y/o pasadas. Se colocan las probetas en una superficie lisa, horizontal y se procede a acondicionarlas de acuerdo con la norma.

Preparar la “solución de ensayo” disolviendo 9 g de NaCl en 1 litro de agua destilada y ajustar su conductividad eléctrica  $16 \pm 0,2$  mili Siemens (MS) a 25 ° C añadiendo el cloruro de sodio o agua destilada necesaria.

Se pone en marcha el instrumento de acuerdo con las instrucciones del fabricante para iniciar el instrumento y se introduce la “solución de ensayo”.

Se levanta el sensor superior desde su posición de bloqueo y se coloca una toallita de papel en el sensor inferior. Se pulsa el botón "bombeo" durante 1 ó 2 minutos hasta que salen 0,22 cc de la “solución de prueba” del recipiente y gotea sobre la toalla de papel observando que no hay burbujas de aire en el interior del tubo. En este momento puede retirarse la toallita de papel.

Se coloca la probeta acondicionada en el sensor inferior de tal forma que su superficie exterior toque con el sensor superior del equipo la probeta. Se baja el sensor superior hasta descansa libremente en la probeta y se cierra la compuerta protectora del cabezal de medición. Se bombea la “solución de ensayo” durante 20 segundo para asegurar que 0,22 cc de solución cae sobre la probeta. En el inicio del ensayo el % de contenido de humedad de cada probeta debe indicar 0. Al cabo de 120 segundos de iniciar la prueba el el software del equipo detendrá automáticamente el ensayo y calculará los diferentes índices.

Después de realizar el ensayo el equipo nos suministrará la siguiente información de cada probeta:

- a) Tiempo de humectación (WTT) (superficie superior) y (WTB) (superficie inferior)
- b) Tasa de absorción (ART) (superficie superior) y (ARB) (superficie inferior)
- c) Radio máximo de humectación de la superficie exterior (MWRT) y de la superficie inferior (MWRB)

- d) Velocidad de propagación de la superficie superior o exterior (SST) y de la superficie inferior (SSB).
- e) Capacidad de transporte acumulativo unidireccional (R)
- f) Capacidad de difusión global de la humedad líquida (OMMC)

El informe final del ensayo se indicaran la media aritmética y la desviación estándar de los anteriores parámetros y se le asignará un grado de acuerdo con lo indicado en la tablas 8 y 9.

Índice		Grado				
		1	2	3	4	5
Tiempo de humectación (s)	Superior	≥ 120	20 - 119	5 - 19	3 - 5	< 3
	Inferior	≥ 120	20 - 119	5 - 19	3 - 5	< 3
Índice de absorción (%/s)	Superior	0 - 9	10 - 29	30 - 49	50 - 100	> 100
	Inferior	0 - 9	10 - 29	30 - 49	50 - 100	> 100
Radio máx. humectación (mm)	Superior	0 - 7	8 - 12	13 - 17	18 - 22	> 22
	Inferior	0 - 7	8 - 12	13 - 17	18 - 22	> 22
Velocidad propagación (mm/s)	Superior	0.0 - 0.9	1.0 - 1.9	2.0 - 2.9	3.0 - 4.0	> 4.0
	Inferior	0.0 - 0.9	1.0 - 1.9	2.0 - 2.9	3.0 - 4.0	> 4.0
Capacidad de transporte unidireccional (R)		< 50	50 - 99	100 - 199	200 - 400	> 400
Capacidad difusión global (OMMC)		0.00 - 0.19	0.20 - 0.39	0.40 - 0.59	0.60 - 0.80	> 0.80

Tabla 8. Clasificación por grados de todos los índices

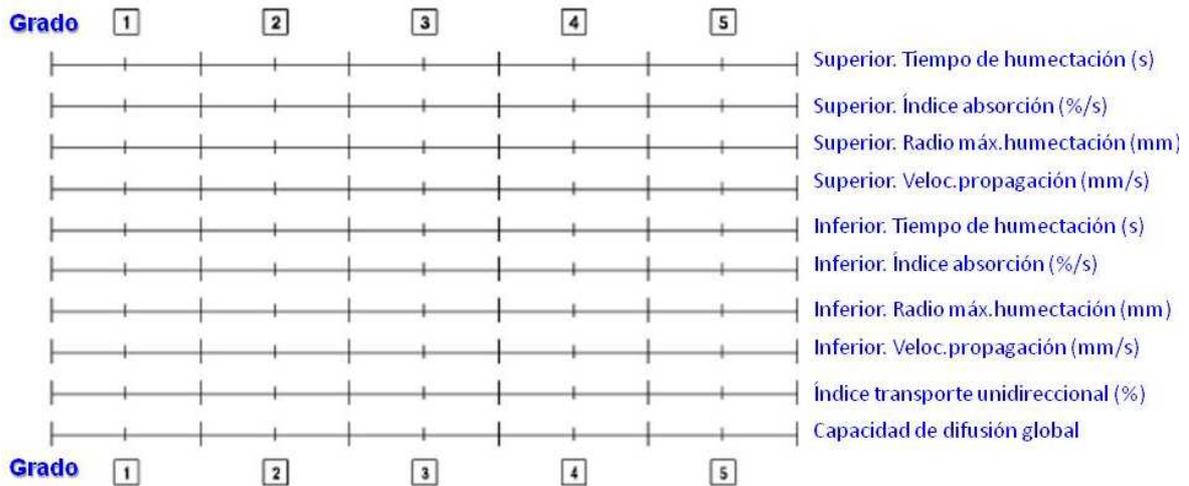


Tabla 9. Tabla resumen de la clasificación por grados

## 6 COMPORTAMIENTO AL USO

### 6.1 Pilling

El llamado efecto “pilling”, es un fenómeno que se conoce desde hace tiempo en el campo textil. Se presenta en los tejidos, especialmente si dichos artículos contienen fibras químicas de polímero sintético.

El pilling se manifiesta sobre la superficie del tejido en forma de unas bolitas de dimensiones variables producidas como consecuencia del proceso físico-mecánico a que se someten las prendas confeccionadas durante su uso, en especial como consecuencia del rozamiento de determinadas zonas del tejido consigo mismo y/o con elementos externos. Estos amasijos de fibras quedan retenidas en el tejido por las fibras de anclaje, dando al tejido un aspecto desagradable que constituye el primer síntoma de envejecimiento y desgaste de la prenda.



Figura 99. Aspecto de tejidos con Pilling. Fuentes, izquierda: [artofmanliness](#), derecha: [NHBG](#)



Figura 100. Calcetín con pilling. Fuente: [sicklines](#)

El pilling se desarrolla en las siguientes etapas:

- a) lento afloramiento de las fibras a la superficie del tejido y formación de pelusilla
- b) aumento de fibrillas sueltas e inicio del enmarañamiento (se rompen fibrillas que pasan al interior de la bolita que adopta una forma esférica)

- c) formación de la bola por apelsonamiento y entrelazamiento de los extremos de las fibras emergentes.
- d) La bola de fibras puede desaparecer o no debido a las fuerzas de rozamiento. Si en un momento dado la suma de fuerzas exteriores sobrepasa la resistencia total de rotura de las fibras de anclaje, que mantiene la bola adherida, el defecto se elimina (66). Por el contrario, si las fuerzas exteriores son siempre inferiores a la resistencia de las fibras de anclaje, el defecto aumenta (típico de algunas fibras de poliéster y poliamida).

## 6.1.1 Influencia de la fibra

### 6.1.1.1 Naturaleza de la fibra

No todas las fibras tienen la misma tendencia a la formación de pilling. La mayor tenacidad y rigidez a la flexión de las fibras químicas de polímero sintético producen una persistencia más prolongada de las bolitas que en el caso de las fibras naturales.

Las bolitas que se forman sobre la lana y las fibras celulósicas se eliminan pronto por abrasión durante el uso debido a la resistencia relativamente baja de éstas fibras. En las fibras de poliéster de elevada resistencia es mucho más molesto. La superficie lisa de la fibra y su sección circular favorecen su afloramiento a la superficie del tejido.

Las elevadas resistencia a la rotura, flexión y abrasión de las fibras de poliéster son en sí muy favorables por cuanto prolongan el uso de las prendas confeccionadas; por el contrario, como ya se ha indicado, estas propiedades impiden que las bolitas se desprendan del tejido durante el uso. Ello ha motivado que las productoras de fibras desarrollaran tipos especiales de bajo pilling.

### 6.1.1.2 Masa lineal de la fibra

Para una misma masa lineal del hilo, la tendencia al pilling disminuye al aumentar la masa lineal de la fibra. Esta es una de las razones por las cuales los hilos con mezcla de fibras de distinta finura tienden a producir una mayor tendencia al pilling. En un estudio (67) se han medido las fibras de un hilo de un tejido de punto de lana cuya finura media era de 22 micras, encontrando que para las fibras contenidas en las bolitas, el valor medio era de 18,6 micras. Éste fenómeno ha sido ratificado por otros investigadores, quienes encontraron que las fibras presentes en la bolita tiene un diámetro inferior en 5 ó 7 micras respecto a las del hilo original (68).

Finura dtex	nº bolitas/dm <sup>2</sup>
2	76
4	55
5	40

Tabla 10. Influencia de la finura de la fibra en el desarrollo del pilling (Random Tumble Pilling Tester, tejido de malla 100 % poliéster, 100 ciclos) (69)

### 6.1.1.3 Longitud de la fibra

Un hilado formado por fibras largas tendrá menor cantidad de fibras emergentes por unidad de longitud, que un hilado formado por fibras cortas y, a consecuencia de ello, el hilado resultante será menos vellosos y, por lo tanto, tendrá menor tendencia a formar pilling.

El pilling disminuye al aumentar la longitud de las fibras, dado que las fibras largas, al quedar más retenidas en el hilo, tiene una menor migración a la superficie que las cortas.

Se cumple la siguiente relación (48):

$$N = A / (L \cdot d^2)$$

donde:

N = número de fibras por unidad de paso del tejido

A = constante

L = longitud media de la fibra

D = diámetro de la fibra

Longitud mm	nº bolitas/dm <sup>2</sup>
60	90
80	64
120	42

Tabla 11. Influencia de la longitud de la fibra en el desarrollo del pilling (Random Tumble Pilling Tester, tejido de malla 100 % poliéster, 100 ciclos) (69)

### 6.1.1.4 Rizado de la fibra

En la lana, la finura y el rizado son dos parámetros correlacionados positivamente. El rizado aumenta el número de puntos de contacto entre fibras y, por lo tanto, su fricción interfibrilar. Teóricamente, por lo tanto, debería de producirse una disminución de la tendencia al pilling. Sin embargo, la disminución de la masa lineal de la fibra, como se ha visto anteriormente produce un incremento del pilling. Así pues, para el caso de la lana, finura y rizado tienen un efecto contradictorio respecto al pilling.

En el caso de las fibras químicas de polímero sintético, cuya sección transversal es generalmente circular, el rizado aumenta el coeficiente de fricción interfibrilar y contribuye a la disminución del pilling. Este es especialmente notable en hilados con poca torsión, donde la tendencia al pilling disminuye con el rizado de la fibra debido a la mayor dificultad que tiene las fibras a migrar al exterior.

### 6.1.1.5 Resistencia a la tracción

Cuando mayor es la resistencia a la tracción, mayor será la permanencia de la bolita de fibras en la superficie del tejido debido a la mayor resistencia de las fibras de anclaje.

Se ha demostrado que, reduciendo aproximadamente un 30% la resistencia a la tracción, se consigue una disminución de la resistencia a la flexión en un 90%, reduciéndose por lo tanto la tendencia a la formación de pilling (68). El empleo de poliésteres de bajo peso molecular reduce bastante la tendencia al pilling; por el contrario, la transformación del polímero en fibras resulta bastante complejo, dado que la disminución de la viscosidad del polímero fundido dificulta la continuidad de la línea de hilatura.

Se pueden alterar efectivamente las propiedades mecánicas y otras propiedades de las fibras modificando la composición química de los polímeros que las forman. De las muchas posibles modificaciones, la más significativa ha sido hasta ahora la copoliesterificación, en la que una parte de los monómeros esenciales (ácido tereftálico y etilenglicol) son reemplazados por otro componente. Actualmente la mayoría de fibras de bajo pilling son copoliésteres.

La tenacidad de las fibras de bajo pilling es notablemente inferior a los tipos de alto módulo (hasta un 50% menos) y ello obliga a procesarlas en condiciones especiales en hilatura, tisaje y ennoblecimiento.

La capacidad de absorción de colorante de las fibras de bajo pilling es mayor que las de alto módulo. Gracias a ello es posible conseguir un buen rendimiento de color aplicando temperaturas de tinción más bajas o bien reduciendo la cantidad de carrier. Sin embargo el poder de compensación migratoria de los colorantes acostumbra a ser menor en éstas fibras. La solidez a la luz de las tinturas realizadas con colorante dispersos en las fibras modificadas de poliéster es en muchos casos menor a la que se obtiene con fibras de alto módulo. Por lo que concierne a las demás solidez, las diferencias, son inapreciables.

#### **6.1.1.6 Flexibilidad y módulo de elasticidad de la fibra**

Para que las fibras emergentes de los hilados puedan formar bolitas las fibras han de tener tanto una baja flexibilidad como baja rigidez a la flexión que favorezca su enmarañamiento. Por otra parte la migración de las fibras disminuye cuando su flexibilidad aumenta.

El valor del módulo de elasticidad tiene, en realidad, dos efectos contrapuestos. Por una parte la tenacidad de la fibra aumenta con éste, aumentando con ello la duración de las bolitas y por tanto el pilling. Por otra parte, la rigidez de las fibras aumenta con el módulo de elasticidad, lo cual disminuye la facilidad para enmarañarse. Parece ser, sin embargo, que la influencia de la tenacidad es predominante (68).

#### **6.1.1.7 Sección transversal de la fibra**

La superficie lisa y sección circular que tiene la mayoría de fibras químicas de polímero sintético, favorece su migración a la superficie del hilado, aumentando por lo tanto la tendencia al pilling.

#### **6.1.1.8 Fricción interfibrilar**

Al aumentar el coeficiente de fricción fibra7fibra, disminuye la tendencia a este defecto. Así pues, superficies de fibras rugosas, secciones irregulares, ensimaje cohesionantes, número de rizos y grado de rizado contribuirán a la reducción del pilling.

## 6.1.2. Parámetros del hilado

### 6.1.2.1 Título del hilado

El aumento del título del hilo provoca una mayor presencia de fibras emergentes y, por lo tanto, una mayor tendencia al pilling. Sin embargo, como se verá más adelante, el aumento del gramaje de los tejidos disminuye la tendencia al pilling. Es por lo tanto casi imposible analizar aisladamente la influencia del título del hilo sobre el pilling sin tener presente las consecuencias que comporta sobre los tejidos.

### 6.1.2.2 Torsión del hilado

La tendencia al pilling disminuye al aumentar la torsión. Existe, sin embargo, un máximo por encima del cual el defecto no disminuye. En la práctica, este máximo no tiene un valor comercial aceptable. Conviene recordar que el aumento de la torsión afecta negativamente al tacto de los tejidos.

### 6.1.2.3 Vellosidad del hilado

El pilling disminuye al hacerlo la pilosidad del hilado o del tejido. La longitud de las fibras que forman la pilosidad es muy importante. Disminuye el pilling al decrecer ésta.

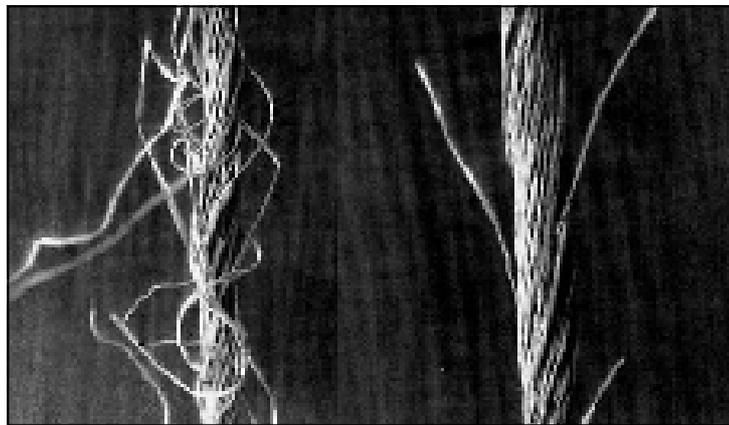


Figura 101. Hilos con distinta vellosidad. Fuente: [textileworld](http://textileworld)

## 6.1.3 Parámetros del tejido

### 6.1.3.1 Ligamento y gramaje

Los tejidos producidos con ligamentos que presentan bastas largas tienen una mayor tendencia a formar pilling, dado que tienen una mayor superficie de hilo expuesta al rozamiento. Asimismo, los tejidos más tupidos y con mayor gramaje tienen una menor tendencia al pilling.

### **6.1.3.2 Tisaje y tricotado**

Si en las operaciones de tisaje de calada o bien de tricotado, el hilado trabaja a una gran tensión y rozamiento con órganos de los telares, puede producirse un incremento de la vellosidad del hilado y, por lo tanto, favorecer la tendencia al pilling. En el caso de los tejidos de malla, tiene una gran importancia controlar las bastas, la densidad del ligamento, tipo de galga, estado de relajación del tricot y la cantidad de hilo absorbido por la malla, dado que todos estos aspectos influyen sobre el pilling.

### **6.1.4. Operaciones de acabado que reducen el pilling**

#### **6.1.4.1 Termofijado**

Este proceso fija la posición y torsión de las fibras, impidiendo que sobresalgan del conjunto y en definitiva contribuye positivamente a la disminución del pilling.

#### **6.1.4.2 Chamuscado**

Mediante esta operación, se consigue suprimir los extremos de las fibras de la superficie del tejido. En el caso de las fibras químicas de polímero sintético, hay que tener presente que sus extremos fundidos absorben una mayor cantidad de colorante (al tener una estructura más amorfa) que el resto de la fibra y se tiñen, por lo tanto, con un tono más intenso. La operación de chamuscado se deberá efectuar, por lo general, después de la tintura a excepción de cuando se emplee el procedimiento termosol.

#### **6.1.4.3 Calandrado en caliente**

Produce un aplastamiento compactado y un alisamiento de la superficie del tejido, así como un efecto de fijación de las fibras, disminuyendo su migración a la superficie del tejido y por lo tanto también la tendencia al pilling.

#### **6.1.4.4 Tundido**

Proceso en el cual se recortan las fibrillas que sobresalen del tejido, dificultando de esta manera su posibilidad de enmarañamiento.

#### **6.1.4.5 Aprestos**

Existen varios tratamientos, los más importantes son:

- a) Aplicación de resinas que aprisionan las fibras, evitando su migración a la superficie del tejido
- b) Aplicación de siliconas que disminuyen la abrasión de la superficie del tejido, retrasando la formación de bolitas.

### 6.1.5 Medida y evaluación del pilling

Existe una notable cantidad de equipos de laboratorio que simulan a escala, el proceso de desgaste que sufren los tejidos durante su uso y reproducen la formación de bolitas.

La mayoría de ellos someten a las probetas de tejido a un rozamiento y desgaste acelerado ya sea con el propio tejido o bien con elementos externos.

Dichos equipos pueden clasificarse en dos categorías o tipologías:

- a) Método contenedores: Probablemente son los que mejor simulan el comportamiento real de un tejido durante su uso. Estos equipos utilizan básicamente diferentes contenedores que están recubiertos en su pared interna con superficies moderadamente abrasivas (habitualmente corcho). Las probetas, preparadas de diferente manera, se introducen en los contenedores donde permanecen un largo periodo de tiempo (horas), durante el cual rozan entre sí y con las paredes como consecuencia del giro de los contenedores a baja velocidad (60 revoluciones por minuto en el equipo ICI Pilling tester) o bien a alta velocidad (1.200 revoluciones por minuto en el Random Tumble Pilling Tester).
- b) Método probetas planas y desgaste: Las probetas de tejido se sitúan en una posición plana y entran en contacto con otro tejido o superficie situado en un plano paralelo. Ambas superficies rozan entre sí un número determinado de ciclos y están sometidos a la acción perpendicular de un peso. El equipo más utilizado que utiliza este principio es el Martindale.

En ambos principios de ensayo la evaluación de los resultados del ensayo se realiza por comparación con patrones fotográficos que presentan distintos niveles de número de bolitas por unidad de superficie. También puede evaluarse la tendencia al pilling pesando la probeta antes y después del ensayo para determinar la pérdida de fibras, si bien es poco utilizado.

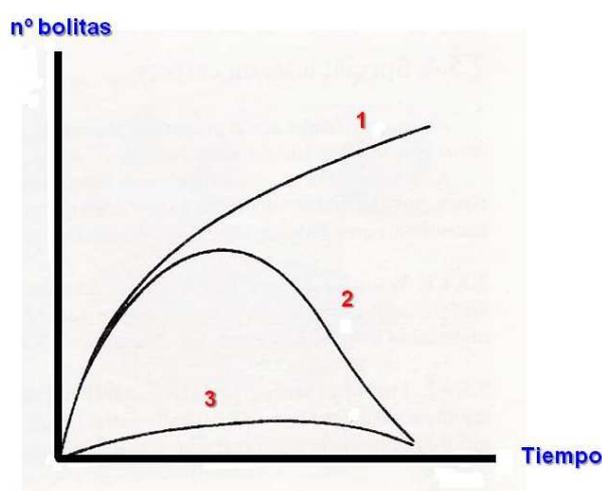


Figura 102. Relación entre el tiempo de duración del ensayo y la formación del pilling en varias fibras (69)

Uno de los problemas de la evaluación del pilling es que en cada tejido la velocidad de aparición y caída de las bolitas puede ser distinto. Por lo tanto si el ensayo finaliza justo antes que las bolitas caigan, la superficie presentará un mal aspecto, pero si el ensayo finaliza justo cuando han caído, el aspecto del tejido será muy bueno. Por este motivo la evaluación por comparación con patrones fotográficos es ciertamente interesante pero la determinación de la variación del peso de las probetas puede ser un ensayo complementario de gran utilidad para entender la evolución del fenómeno estudiado.

La figura 102 muestra la relación entre el tiempo de duración del ensayo y la intensidad del pilling (medido en número de bolitas por unidad de superficie del tejido). La curva 1 muestra el comportamiento típico de la Poliamida, donde a medida que para el tiempo el defecto se agrava, La curva 2 corresponde a un tejido de lana donde se observa un rápido crecimiento en la formación de bolitas pero su posterior rotura y por lo tanto disminución en la superficie del tejido. La curva 3 corresponde a un artículo diseñado para minimizar el fenómeno del pilling, formado de lana peinada (fibras largas), alta torsión del hilado y un tratamiento de chamuscado.

### 6.1.5.1 Método contenedores

#### 6.1.5.1.1 Random Tumble Pilling Tester. ISO 12945-3

El equipo está formado por una cámara cilíndrica recubierta de corcho o bien neopreno de 3,2 mm de espesor. En el interior de la cámara existe una hélice de acero dos palas que gira a una velocidad y durante un tiempo regulados. Las probetas de tejido tienen unas dimensiones de 10 x 10 cm. Con el fin de evitar que los extremos libres del tejido se desfibran y afecten al ensayo se cosen los bordes con una overlock o bien se pegan con cola. Se introducen 3 probetas en el interior de la cámara y se pone en marcha el cabezal que gira a una velocidad constante de 1.200 revoluciones por minuto. Para favorecer la formación de las bolitas se introduce también de 25 a 50 mg de fibras de algodón de 5 mm de longitud. Las probetas de tejido son sometidas a un proceso de rozamiento aleatorio de ellas consigo mismo, con las palas del hélice y con la pared interior de la cámara, fenómeno que se ve inducido también por el aire comprimido que se introduce en cada cabezal de ensayo, simulando el proceso de rozamiento y desgaste que se produce durante el uso de los tejidos.



Figura 103. Random Tumble Pilling Tester. Fuente: [SDL-ATLAS](#)

Al finalizar el ensayo, se extraen las probetas y se compra su aspecto con una escala de patrones fotográficos. El equipo puede tener de 2 a 6 cámaras para realizar ensayos simultáneos (figura 103). El ensayo presenta una buena correlación con el desgaste de los tejidos durante su uso.

#### 6.1.5.1.1.1 Videos ensayo Random trumble Pilling tester

*Fabric pill test. Random Tumble Pilling Tester*

<https://www.youtube.com/watch?v=tHVem8l4BLw>

#### 6.1.5.1.1.2 ICI/M&S Pilling and Snagging Tester

Equipo formado por 2 ó 4 contenedores cúbicos de 22,8 cm de lado, recubiertos internamente de una pared de corcho de 3,2 mm de espesor, que giran a una velocidad constante de 60 revoluciones por minuto (si bien puede programarse para que gire a 20, 30, 40, 45, 50,60, 65 y 70 rpm). En el interior del cada cubo se introducen 4 tubos de 180 mm de longitud y 32 mm de diámetro cuyo peso es de 80 gramos. Dichos tubos están recubiertos de la probeta de tejido. El giro de los cubos provoca el rozamiento de las probetas entre sí y con las paredes internas de los contenedores (figuras 99 y 100). Al cabo de 5 horas finaliza el ensayo (según la norma la duración puede variar) y las probetas se comparan con patrones fotográficos (figura 104).

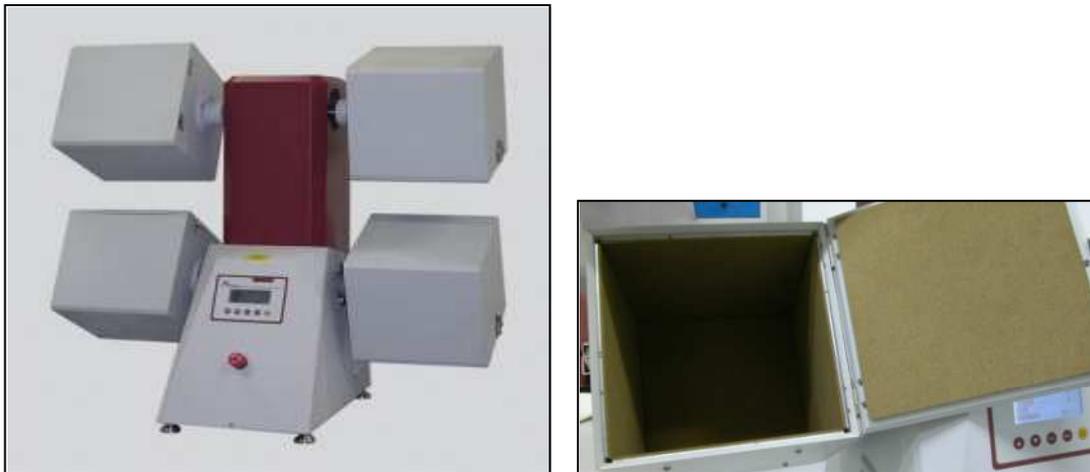


Figura 104. ICI/M&S Pilling and Snagging Tester. Fuente: [SDL-ATLAS](#)

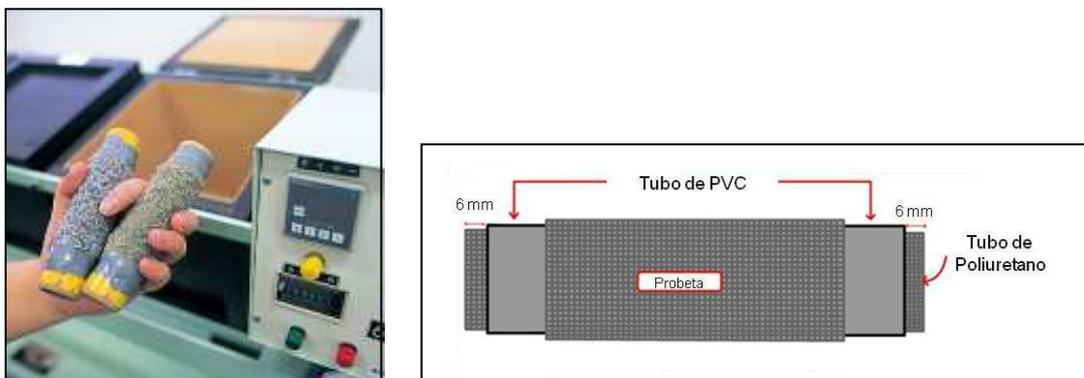


Figura 105. Probeta del ensayo ICI Pilling tester. Fuente: [NPTEL](#)



Figura 106. Unidad para comparar las probetas del ensayo pilling con patrones fotográficos.  
Fuente: [SDL-ATLAS](https://www.sdl-atlas.com/)

#### 6.1.5.1.1.2.1 Videos ensayo ICI/M&S Pilling and Snagging Tester

*E34 Determination Of Fabric Propensity To Surface Fuzzing And To Pilling (ICI Box Method)* <https://www.youtube.com/watch?v=TwILOP8FDms>

*MAG AutoPill 4BX - ICI Pilling Tester* <https://www.youtube.com/watch?v=EAu5h1ssEA8>

*ICI Pilling Test* <https://www.youtube.com/watch?v=cxU4KQXad9A>

### 6.1.5.2 Método probetas planas y desgaste

#### 6.1.5.2.1 Ensayo Martindale

Equipo diseñado tanto para evaluar el desgaste de los tejidos por frotamiento o rozamiento consigo mismo o elementos externos, como para la tendencia al pilling.

El principio del método es básicamente el siguiente. Una probeta circular de tejido se somete, mediante el aparato Martindale, a una carga definida por la norma, a la acción de frotamiento de un elemento abrasivo normalizado según un movimiento de traslación que forma una curva de [Lissajous](https://www.youtube.com/watch?v=cxU4KQXad9A). Al mismo tiempo, el porta probetas, provisto bien de la probeta del tejido a analizar, o bien de un elemento abrasivo normalizado, gira libremente alrededor de su propio eje, perpendicularmente al plano horizontal. El aparato de ensayo está compuesto de una placa de soporte fija que lleva los platos abrasivos y el mecanismo de transmisión que permite a la placa-guía del porta probetas formar una curva de Lissajous (la placa guía del porta-probetas se desplaza horizontalmente por el mecanismo de transmisión de manera que cada punto de la placa-guía describa la misma curva).

La probeta de ensayo está sometida a una carga axial normalizada de  $795 \pm 7$  g o bien  $595 \pm 7$  g y permiten ejercer una presión nominal de 12 kPa y 9 kPa sobre la probeta durante el ensayo (ver figura 107).

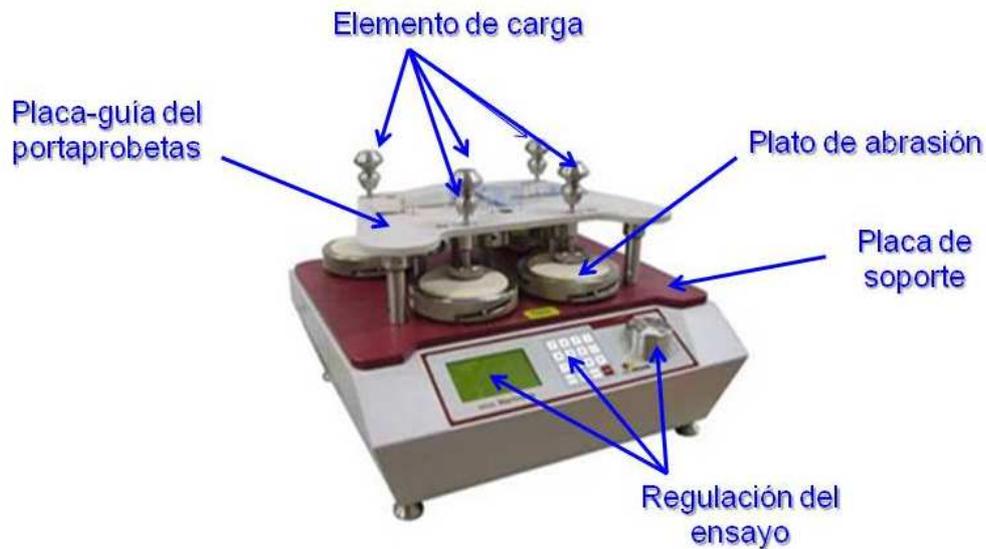


Figura 107. Martindale Abrasion & Pilling Tester. Fuente: [SDL-ATLAS](#)

En el principio del método de ensayo que utiliza el equipo Martindale para determinar la tendencia a la formación de pelusilla y de bolitas (ISO 12945-2) una probeta circular sobre una superficie de frotamiento formada por el mismo tejido o bien de un tejido abrasivo de lana, se somete a la fuerza definida describiendo una [curva de Lissajous](#) con la probeta, capaz de girar fácilmente alrededor de un eje que pasa por su centro, perpendicular al plano de la probeta. La formación de pelusilla y bolitas se evalúa visualmente después de las diferentes etapas definidas en el ensayo. La variante del equipo Martindale adecuada para la evaluación del pilling (ISO 12945-2) consiste en una placa base que lleva los platos para la formación de bolitas y el mecanismo de accionamiento. Éste consiste en elementos externos y uno de interno que permiten al dispositivo de guía del porta-probetas trazar una figura de Lissajous. El movimiento de Lissajous empieza por un círculo, a continuación elipses cada vez más estrechas hasta trazar una línea recta, a partir de la cual las elipses se forman cada vez más anchas en la diagonal de la dirección opuesta, antes de repetir de nuevo el dibujo.

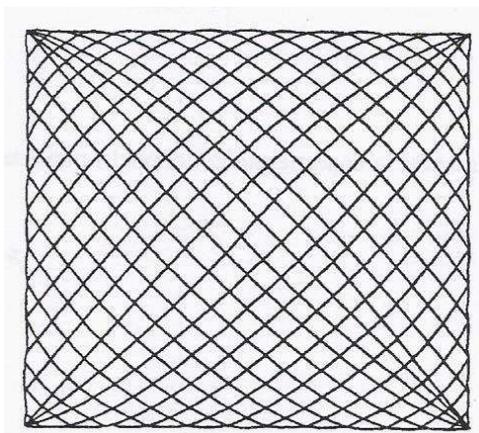


Figura 108. Curva de [Lissajous](#)

La placa guía del porta-probetas está provista de soportes para los cojinetes de baja fricción, que llevan los vástagos guía del porta-probetas. El extremo inferior de cada vástago del porta-probetas se inserta dentro del armazón correspondiente de éste último (figura 109). El porta-probetas está compuesto de un armazón, un anillo soporte de la probeta, y un elemento de carga opcional.

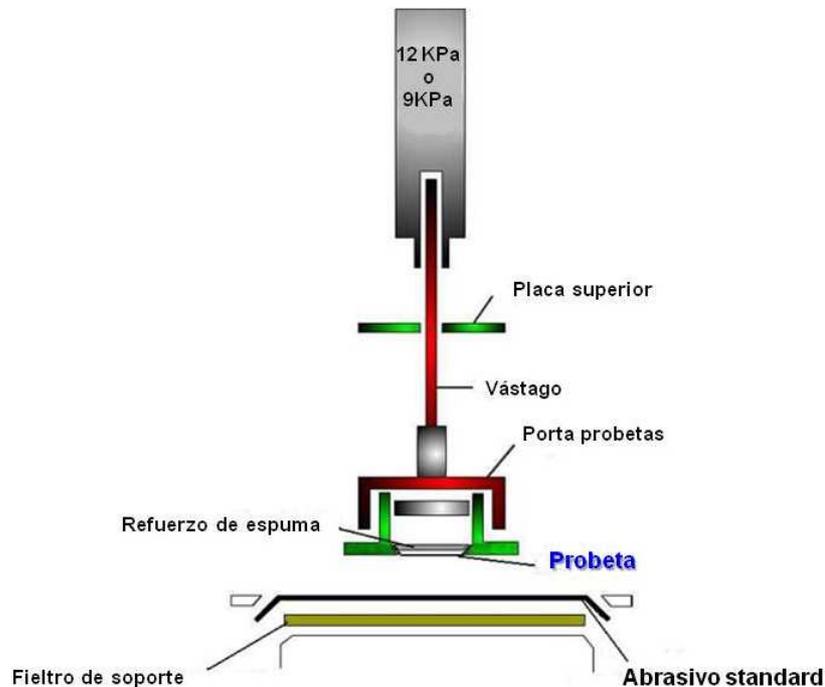


Figura 109. Cabezal del equipo Martindale. Fuente: [NPTEL](#)

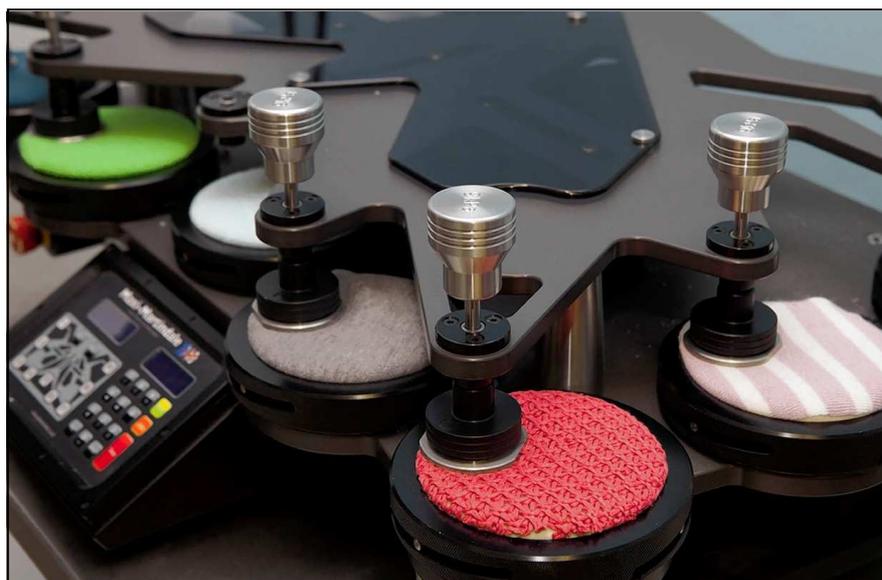


Figura 110. Ensayo de pilling tejido contra tejido mediante el equipo Martindale. Fuente: [WSJ](#)

El aparato está provisto de un dispositivo contador de selección previa que mide cada una de las rotaciones de uno de los elementos de rotación externos. Cada rotación se considera como un frotamiento para la formación de bolitas y 16 rotaciones constituyen una figura de Lissajous completa.

El tejido de frotamiento, contra el que frota la probeta, en general, es el mismo tejido que el sometido a ensayo. En ciertos casos, como es el caso de los tejidos destinados a mobiliario, se utiliza un tejido abrasivo de lana especificado en la norma ISO 12947-1. La elección del tejido utilizado para el frotamiento debe indicarse en el informe del ensayo.

Para la realización del ensayo las probetas han de estar acondicionadas. Salvo acuerdo específico, se efectúa un lavado o limpieza en seco de la muestra a analizar utilizando un método acordado por las partes.

Las probetas se extraerán de forma aleatoria de manera que ninguna tenga los mismos hilos de urdimbre y trama. Las probetas colocadas en el porta-probetas tendrán un diámetro de 145 mm. Se tomará un mínimo de tres probetas.

Se efectúa el ensayo hasta el final de la primera etapa de formación de bolitas. Se realiza la primera evaluación sin quitar la probeta del porta-probetas y sin eliminar las partículas procedentes de la superficie para la evaluación.

Para la evaluación de las probetas, éstas se colocan en una cabina de observación normalizada en cuanto a iluminación, inclinación de la probeta, distancia respecto al evaluador, etc.

Clase	Descripción
5	Ningún cambio
4	Ligera formación de pelusilla en la superficie y/o formación parcial de bolitas
3	Formación de pelusilla moderada en la superficie y/o formación de bolitas. Bolitas de varios tamaños y densidades que cubren parcialmente la superficie de la probeta
2	Formación acentuada de pelusilla en la superficie y/o marcada formación de bolitas. Bolitas de varios tamaños y densidades que cubren una gran parte de la superficie de la probeta
1	Formación de pelusilla densa en la superficie y/o formación de bolitas severa. Bolitas de varios tamaños y densidades que cubren la totalidad de la superficie de la probeta.

Tabla 12. Clasificación del nivel de pilling por examen visual

Se anotan las clases atribuidas a cada probeta y se calcula la media resultante de todas las evaluaciones efectuadas. Si el resultado medio no es un número entero, se redondea el resultado a la clase media más próxima. Es conveniente que la variación del resultado de la media obtenida para las probetas no exceda de una clase media. Si la variación es superior a una clase media, debe anotarse la clase atribuidas a cada probeta.



Figura 111. Probetas una vez finalizado el ensayo. Fuente: [WSJ](#)

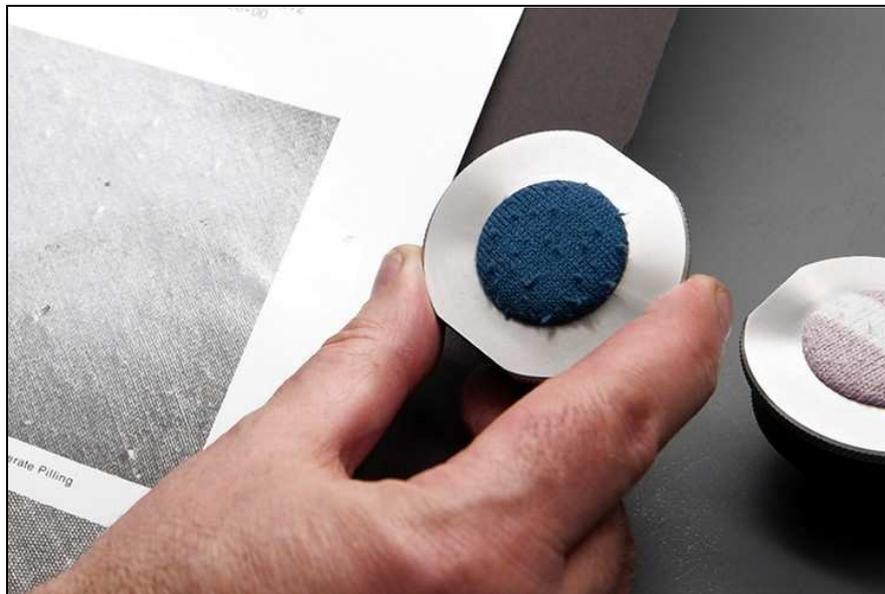


Figura 112. Evaluación visual de la formación de bolitas. Fuente: [WSJ](#)

Categoría	Tipo de textil	Tipo de textil de frotamiento	Masa de los elementos de carga g	Etapas de evaluación	Número de frotamientos
1	Mobiliario	Tejido de lana	415 ±2	1 2 3 4	500 1.000 2.000 5.000
2 <sup>a</sup>	Tejidos de calada (excepto los de mobiliario)	Tejido de calada ensayado (cara/cara) o tejido de lana	415 ±2	1 2 3 4 5 6	125 500 1.000 2.000 5.000 7.000
3 <sup>a</sup>	Tejidos de punto (excepto los de mobiliario)	Tejido de punto ensayado (cara/cara) o tejido de lana	155 ±1	1 2 3 4 5 6	125 500 1.000 2.000 5.000 7.000

Tabla 13. categoría del ensayo de formación de bolitas. Para las categorías 2 y 3 la duración mínima del ensayo es de 2.000 frotamientos. Puede terminarse el ensayo antes de alcanzar 7.000 frotamientos si se observa una clase mínima de 4-5 e una etapa de evaluación acordada. Se ha demostrado que existe una mejor correlación entre el ensayo y el comportamiento al uso continuado con un número de frotamientos de 7.000, ya que las bolitas presentes a 2.000 frotamientos pueden ser eliminadas a los 7.000 frotamientos.

En el informe del ensayo figurará:

- Referencia a la norma ISO 12945-2
- Descripción de la muestra de laboratorio
- Tratamiento previo de la muestra de laboratorio (si lo hubiere)
- Número de probetas y observadores
- Tejido de frotamiento utilizado
- Masa de los elementos de carga
- Número de frotamientos y grado de formación de bolitas en cada etapa
- Fecha del ensayo
- La clase final evaluada y si se trata de formación de pelusilla, de volutas, o de ambas
- Los detalles de cualquier desviación respecto al procedimiento operatorio.

#### 6.1.5.2.1.1 Videos de ensayo de pilling mediante el equipo Martindale

E35 Determination Of Fabric Propensity To Surface Fuzzing And To Pilling (Martindale Method) [https://www.youtube.com/watch?v=9jg\\_iTohPjw](https://www.youtube.com/watch?v=9jg_iTohPjw)

*Test Boulochage sur Martindale selon la norme ISO 12945-2*

[https://www.youtube.com/watch?v=xBMLj\\_2vXnE](https://www.youtube.com/watch?v=xBMLj_2vXnE)

*Martindale serie 1300 - Abrasion et boulochage des textiles*

<https://www.youtube.com/watch?v=BP5UYCKEoCE&list=PLC-JnLE1ZLtuTc0SSoXsb65uku4WM9e9I>

*Courbe de Lissajou sur Martindale - Verson Vlies Courcier VVC*

<https://www.youtube.com/watch?v=FHyj2iQTn20&index=4&list=PLC-JnLE1ZLtuTc0SSoXsb65uku4WM9e9I>

*Martindale equiptex*

<https://www.youtube.com/watch?v=2VhcfbIFgX8&index=2&list=PL7C3747F11ECB0BCF>

## 6.2 Resistencia a la abrasión

Durante su uso y mantenimiento los tejidos frotan ya sea consigo mismo o con elementos externos. Dicho rozamiento provoca la aparición de pelusilla, bolitas de fibras y en caso extremo el desgaste o rotura del tejido debido a la fuerte abrasión. En las prendas de vestir el mayor desgaste se produce en las zonas de frecuente e intenso rozamiento como es el caso de la entrepierna de los pantalones, axilas, codos, etc. Este fenómeno tiene una especial incidencia en los tejidos destinados a tapicería debido al fuerte rozamiento que se produce entre dichos tejidos y los de la indumentaria de las personas que se sientan en sillas, sofás, etc.

La resistencia a la abrasión de los tejidos depende de muchos factores como el tipo de fibra, dimensiones y sus propiedades mecánicas, estructura de los hilados, ligamento y grosor de los tejidos, así como el tipo de acabado superficial aplicado tanto a fibras, hilos como tejidos.

Así por ejemplo las fibras con elevado alargamiento, recuperación elástica y trabajo de rotura están mejor preparadas para soportar las distorsiones repetidas y por lo tanto presentan una mejor resistencia a la abrasión. Las fibras de Poliamida son las que presentan una mayor resistencia a la abrasión, seguidas del Poliéster, Polipropileno, Lana, Algodón y Acrílicas. Si un tejido está formado por hilos con fibras largas, presentará una mejor resistencia a la abrasión que uno formado por fibras cortas puesto que será más difícil que éstas se suelten del tejido. El tafetán es el ligamento que presenta mejor resistencia a la abrasión debido a que su estructura es más cerrada y no presenta bastas que ofrezcan mayor superficie de rozamiento y desgaste. Finalmente la aplicación de cualquier tipo de acabado sobre fibras, hilos o tejidos que aumente o disminuya el coeficiente de fricción de los tejidos con elementos externos, puede contribuir de forma muy notable a las propiedades de resistencia a la abrasión de los tejidos.

Existe una gran diversidad de equipos de laboratorio que someten el tejido a diversos niveles de desgaste por rozamiento con el fin de simular las condiciones de uso y con ello evaluar su resistencia a la abrasión.



Figura 113. Desgaste por rozamiento en la entrepierna de un pantalón. Fuente: [Red facilisimo](#)

Los principales principios de medición son los siguientes.

- a) Abrasímetro de diafragma inflado (ASTM D 3886): La probeta se sitúa encima de un cabezal de caucho circular que se curva ligeramente por la acción de una presión de aire comprimido. La probeta ligeramente curvada y bajo una presión axial controlada es sometida al rozamiento e una o varias direcciones con un abrasivo controlado.



Figura 114. Abrasímetro de diafragma inflado. Fuente: Izquierda: [xhinstruments](#). Derecha: [CSI](#)

- b) Abrasímetro de flexión (ASTM D3885): La probeta se somete, a lo largo de una de sus dimensiones, a una alternancia de flexión y frotación contra una placa abrasiva, en condiciones dadas de presión y la tensión longitudinal. De gran interés para la evaluación de pantalones



Figura 115. Abrasímetro de flexión. Fuente: Izquierda: [SDL-ATLAS](#)

Los resultados de este ensayo se expresan mediante:

- Número de ciclos necesarios para producir la rotura de la probeta (en sentido urdimbre y trama).
  - Resistencia a la tracción (por urdimbre y por trama) después de un número determinado de ciclos de abrasión.
  - Porcentaje de pérdida de resistencia a la tracción (por urdimbre y por trama) respecto a la probeta sin tratar, después de un número determinado de ciclos.
- c) Abrasivo de plataforma giratoria –[Taber](#)-, ASTM 3389. La muestra se monta sobre una placa horizontal de rotación por encima del cual giran dos piedras de moler con un gran poder abrasivo. El equipo fue desarrollado en la década de 1930 y desde entonces ha sido un instrumento muy utilizado para evaluar la abrasión y resistencia al desgaste. Se utiliza para evaluar un amplio espectro de materiales como: plásticos, recubrimientos, laminados, cuero, papel, cerámica, alfombras, cristales de seguridad, etc.

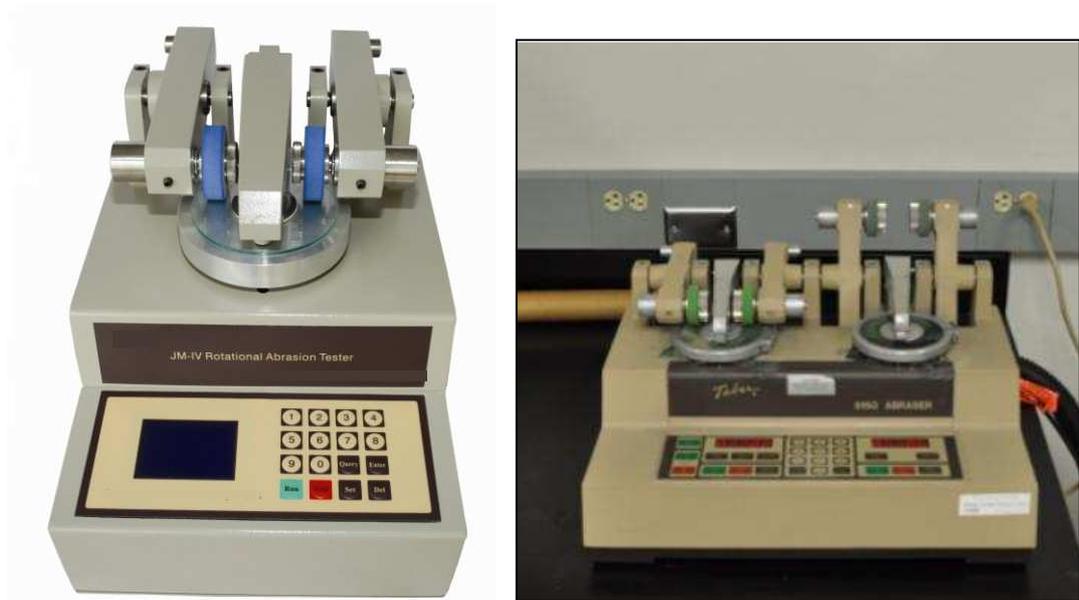


Figura 116. Abrasímetro Taber. Fuente: [NC State University](http://www.ncsu.edu)

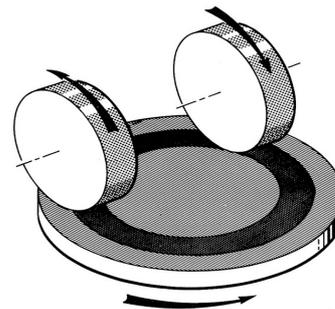
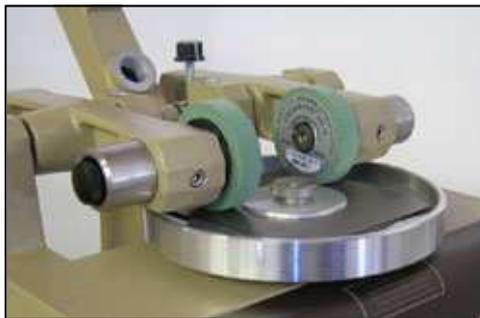


Figura 117. Detalle del cabezal de los elementos abrasivos. Fuente. [TABER](http://www.taberabrasives.com)

Videos del ensayo Taber: <https://www.youtube.com/watch?v=idJGrLcaDIQ>

- d) Abrasímetro de acción uniforme -Martindale-, ISO 12947 3 y 4. Se utilizan dos superficies planas de tejido que están en contacto. La inferior (más pequeña) está cubierta del tejido a ensayar, mientras que la superior puede estar cubierta con el mismo tejido o bien una superficie abrasiva. Ambas superficies se someten a un movimiento de rotación en la misma dirección con velocidades angulares ligeramente diferentes, pero alrededor de dos ejes paralelos que no son coaxiales. De esta manera, el movimiento relativo hace que la probeta al entrar en contacto con diferentes partes del abrasivo en cada revolución se desgasta de manera uniforme. El equipo más conocido que sigue este principio es el abrasímetro Martindale descrito en el capítulo del Pilling. El principio de funcionamiento es exactamente igual. En este caso el ensayo consiste en determinar el número de ciclos necesarios para producir la rotura –por desgaste- del tejido, o bien la pérdida de peso sufrida por la probeta después de un número determinado de ciclos de abrasión. La presión de ensayo a que están

sometidas las probetas y la superficie de rozamiento (tejido contra el mismo tejido o con una superficie abrasiva conocida) son las variables del ensayo.

e)



Figura 118. Abrasímetro Martindale. Fuente: [Indiamart](http://Indiamart)

Num. ciclos	A	B	C
<b>Inicio</b>			
<b>50.000</b>			
<b>100.000</b>			

Figura 119. Comparación del ensayo Martindale de tres tejidos distintos.

### 6.2.1 Videos del ensayo de resistencia a la abrasión Martindale

*Test Abrasion sur Martindale selon la norme ISO 12947*

<https://www.youtube.com/watch?v=oxFyYEFtWjY>

*E31 Determination Of Abrasion Resistance Of Fabric By Using The Martindale Method*

*Specimen Break-Off* <https://www.youtube.com/watch?v=l9YJU8LaRNs>

*G29 Determination Of Abrasion Resistance Of Fabric By Using The Martindale Method*

*Specimen Break-Off* <https://www.youtube.com/watch?v=tc4Y9qIFn2I>

*Martindale Test – Abrasion* [https://www.youtube.com/watch?v=KpNj\\_iO99xE](https://www.youtube.com/watch?v=KpNj_iO99xE)

*Martindale euiptex* <https://www.youtube.com/watch?v=2VhcfblFgX8>

*Abrasion resistance part 1* <https://www.youtube.com/watch?v=rDikoOISERY>

*Polartec Fabric Testing - Martindale Abrasion Test*  
<https://www.youtube.com/watch?v=pvb7vPmutgl&index=4&list=PL7C3747F11ECB0BCF>

### 6.2.2 AATCC Accelerotor

Equipo de laboratorio para estudiar tanto el fenómeno de la abrasión como el pilling de los tejidos. Está formado por un solo recipiente contenedor consistente en una cámara cilíndrica recubierta de una superficie abrasiva intercambiable. En el interior se encuentra una hélice en forma de S con una velocidad de giro variable. Se coloca una probeta de tejido en el interior de la cámara de ensayo y las variables a regular son: la superficie abrasiva del interior de las paredes, las revoluciones de giro de la hélice y la duración del ensayo.



Figura 120. AATCC Accelerotor. Fuente [SDL-ATLAS](https://www.sdl-atlas.com)

### 6.3 Resistencia al enganchón. Snag test.

Una gran cantidad de tejidos destinados a indumentaria deportiva están sujetos están sometidos a la acción de rozaduras con elementos ligeramente punzantes (vegetación diversa, zarzas, piedras, etc.). Si estos tejidos están formados por filamentos continuos están rozaduras pueden producir la rotura de alguna de las fibras de estos filamentos dando lugar a una superficie de tejido con la presencia de enganchones que dan al tejido un aspecto desagradable.



Figura 121. En determinados deportes la ropa está sometida a fuertes rozaduras con elementos punzantes. Izquierda: [lmhernandez](#), Derecha: [patagonica](#)

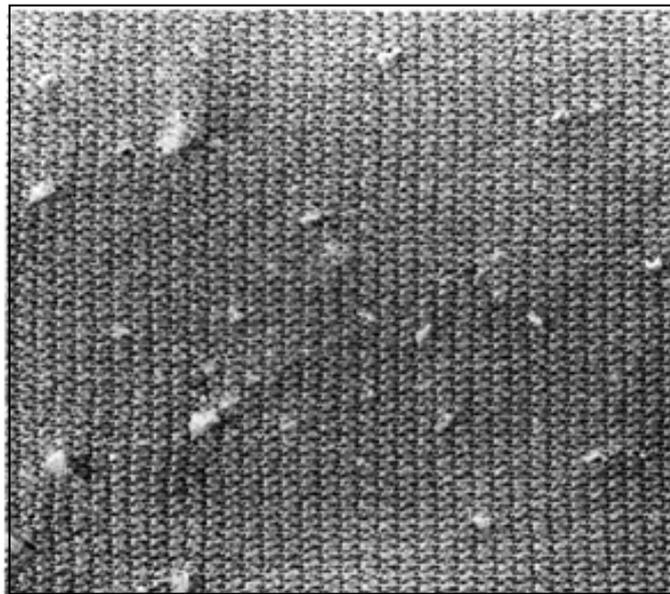


Figura 122. Tejido con enganchones. Fuente: [drycleaningtips](#)

La forma más utilizada actualmente para medir la tendencia al enganchón es el Snag test de bolas con espinos. El equipo está formado por 4 cilindros que giran sobre su propio eje. Las probetas se colocan de forma que recubren los cilindros de forma bien ajustada y sin formar arrugas o pliegues. Cuando el equipo se pone en marcha los cilindros empiezan a girar a una velocidad constante, encima de los cuales unas bolas de peso conocido recubiertas con puntas de carburo de tungsteno rozan sobre el tejido imitando la acción de las zarzas o elementos punzantes. El ensayo consiste en valorar el aspecto visual de las probetas de tejidos después de haber sufrido el rozamiento con las bolas punzantes durante un número determinado de ciclos.



Figura 123. ICI Mace Snag Tester. Fuente: [textileinstruments](#)

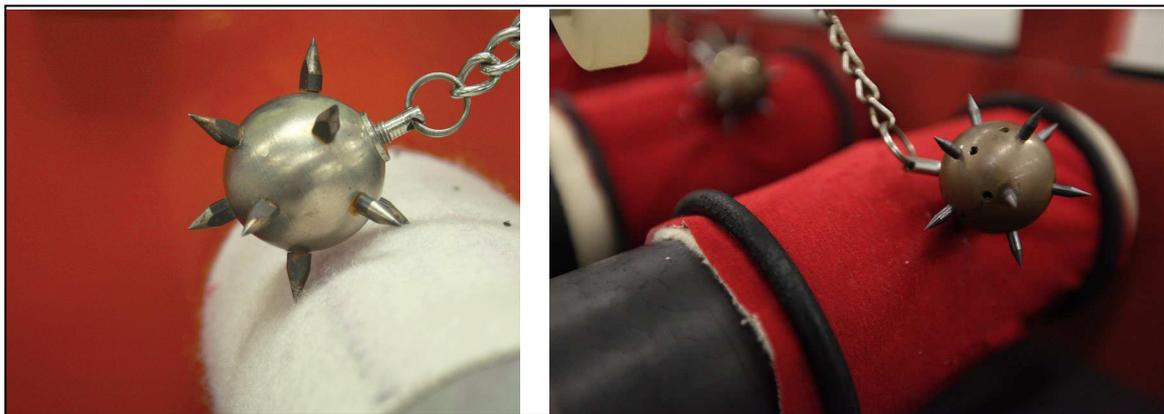


Figura 124. Detalle de las bolas con puntas de carburo de tungsteno. Fuente: [Applied textiles](#)



Figura 125. Detalle del equipo Snag tester. Fuente: [bulwark](#)

Existe otra forma de evaluar la tendencia al enganchón que es el ensayo SnagPod. Consiste en una cámara o caja de forma octogonal que en su interior incorpora cuatro barras recubiertas de unas púas metálicas inclinadas en la dirección de giro de la caja. La caja se monta sobre una unidad que la hace girar como si fuera una unidad de medida del pilling por el método ICI pilling tester. La caja gira a 60 rpm y el ensayo dura 2.000 revoluciones (unos 30 minutos). En el interior de la caja se colocan simultáneamente cuatro probetas montadas en tubos recubiertos. Al finalizar el ensayo el aspecto de las probetas se compara con unos patrones fotográficos.



Figura 126. Orbitor<sup>2</sup> Pilling & Snagging tester. Fuente: [James Heal](#)



Figura 127. Detalles del interior de la caja y probetas. Fuente: [James Heal](#)

### 6.3.1 Videos del ensayo Snag tester

*Lafgo by Lafayette: Snagging* <https://www.youtube.com/watch?v=rt1DVaYp0kc>

*Snag tester* <https://www.youtube.com/watch?v=GDD-1s4vuU4>

*ICI Snag Box ASTM D3939* <https://www.youtube.com/watch?v=q0C-kTg6Tyk>

### 6.4 Tendencia al arrugado

Durante su uso y manipulación los tejidos sufren deformaciones multiaxiales que generan arrugas más o menos permanentes. Las arrugas son pequeños pliegues -más ó menos marcados- que se distribuyen aleatoriamente sobre una superficie textil, alterando su lisura. Aparecen durante la manipulación de los tejidos y en el uso de las prendas de vestir, y son causadas por esfuerzos de presión y flexión. Generalmente tienen connotaciones negativas por el cambio que comporta en el aspecto de las prendas, mientras que en otros casos tiene connotaciones positivas ya que pone de manifiesto la presencia de determinadas fibras (algodón, lino, viscosa) ó bien la arruga es un fenómeno provocado con finalidades estéticas (moda).



Figura 128. Aspecto de una camisa arrugada. Fuente: [elamigodelgorrionviudo](http://elamigodelgorrionviudo)

Para estudiar la tendencia o propensión al arrugado de los tejidos, existen diversos métodos de ensayo. Básicamente los podemos dividir en dos grupos:

- a) Capacidad de recuperar las arrugas provocadas
- b) Aspecto que adoptan los tejidos después de ser sometidos a un arrugado

El primero de ellos es el más extendido.

### 6.4.1 Determinación de la capacidad de desarrugado (UNE EN 22313)

Si a un tejido se le somete a una deformación o arrugado en unas condiciones conocidas y controladas, su capacidad para recuperar la deformación provocada, estará relacionada con su tendencia al arrugado. Entendiendo que la arruga sería la deformación más o menos permanente de la superficie plana y elástica que constituye el tejido.

La capacidad de recuperación de la arruga de un tejido depende de la rigidez a la flexión y módulo de elasticidad de las fibras componentes. A mayor rigidez menor tendencia al arrugado debido a su mayor capacidad de recuperación de la deformación. Normalmente, también, a mayor módulo de elasticidad de las fibras, menor tendencia al arrugado tendrá el tejido. Por lo tanto el tipo de fibra y porcentaje de mezcla influye notablemente.

El ligamento también tiene una clara influencia en el arrugado; esta influencia viene marcada por los coeficientes de ligadura y por la posición relativa de los hilos en la estructura. Con unos coeficientes máximos (tafetán) se obtienen un mayor grado de recuperación de la arruga que con coeficientes menores. Los ligamentos cuyos ejes coincidan con la dirección del doblado (teletón) darán una menor recuperación de la arruga y los ligamentos cuyos ejes no coincidan con la dirección del doblado (sarga) darán lugar a tejido con una mayor capacidad de recuperación de la arruga. Las velocidades de estabilización del ángulo de arrugado, siguen un modelo lineal multiplicativo.

El equipo utilizado está constituido por la prensa-probeta y el instrumento para medir el ángulo remanente de la arruga. Básicamente, el método seguido consiste en plegar una probeta rectangular de 40 mm de largo por 15 mm de ancho, mediante un prensa-probetas que aplica una carga de 10 N sobre una superficie de 15 x 15 mm de la probeta doblada y se mantiene en este estado durante un periodo de tiempo especificado, de corta duración, y bajo una carga indicada. Se elimina la carga que produce el arrugado, se permite la recuperación de la probeta, durante un tiempo determinado, y se mide el ángulo remanente de la arruga. Este ángulo es el formado entre los dos planos de una tira de tejido, previamente arrugado durante un tiempo y después de eliminar la carga.

Deberán analizarse 20 probetas (10 de urdimbre y otras 10 de trama). Se dobla un extremo de la probeta sobre el otro y se mantiene en esta posición, sujetando con pinzas como máximo a 5 mm de los extremos. Si se produce una cierta adherencia entre los extremos, se coloca una hoja de papel o manilla metálica de 18 x 15 mm entre los extremos de la probeta (ver figura 129), Seguidamente se colocan las probetas en la superficie marcada de la placa inferior del sistema de prensado y se aplica la carga con suavidad. La mitad de las probetas se pliegan haz con haz y la otra mitad envés con envés. Se aplica la carga durante 5 minutos. Después se deja de aplicar rápidamente en un tiempo que no sobrepase 1 s. Mediante las pinzas, se transporta directamente la probeta sobre el porta probetas del aparato de medida. Se efectúa la lectura del ángulo remanente 5 minutos después de haber dejado de aplicar la carga y haber sacado la hoja de papel o de metal de la probeta plegada. Si el extremo libre se tuerce o enrolla ligeramente, se toma como base de lectura del ángulo remanente un plano vertical que pase por el centro del extremo y por el eje del cuadrante.

El instrumento de medida del ángulo consiste en un cuadrante circular dividido en grados que permita la medida del ángulo de arrugado al retener un extremo de la probeta rectangular mediante una pinza y dejando el otro extremo libre. Se gira el cuadrante hasta hacer coincidir el extremo libre de la probeta con la marca que hay en la base donde se sujeta el cuadrante de tal forma que la orientación de la probeta y la marca quedan perfectamente alineadas. En este momento se lee en el cuadrante la indicación analógica del grado de arrugado.

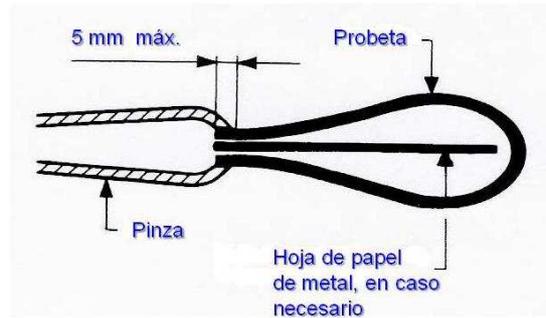


Figura 129. Probetas ensayo de recuperación de la arruga

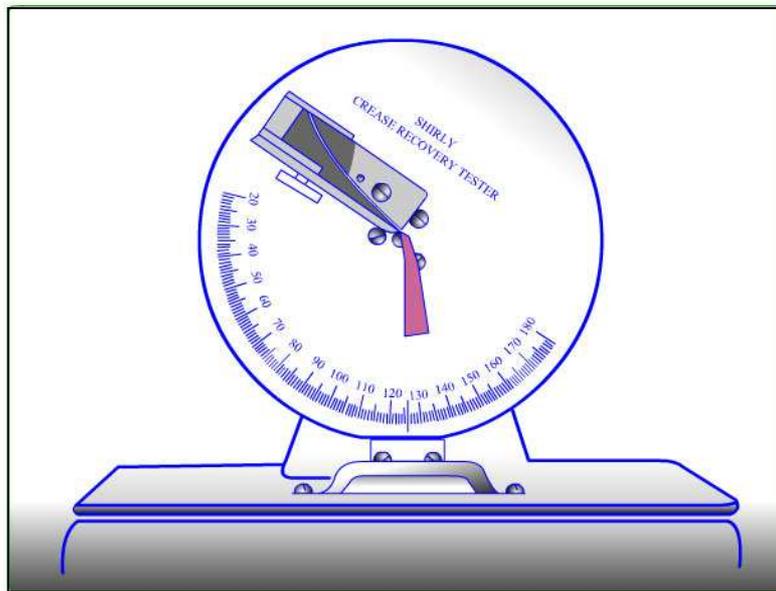


Figura 130. Medición del ángulo de arrugado. Fuente: [NPTEL](#)



Figura 131. Equipo de medida de la capacidad de desarrugado de un tejido. Fuente: [SDL-Atlas](#)

#### 6.4.1.2 Videos del ensayo de recuperación de la arruga:

M003A SHIRLEY CREASE RECOVERY TESTER & LOADING DEVICE  
<https://www.youtube.com/watch?v=2dw4Px4wg3I>

Crease recovery. <https://www.youtube.com/watch?v=SsTrdOIRDsQ>

#### 6.4.2 Medidor de la recuperación de las arrugas AATCC

Este equipo se utiliza para determinar la capacidad de un tejido para recuperarse después de haber sufrido un arrugado bajo una carga y durante un periodo de tiempo determinado. Se basa en determinar su apariencia una vez sufrida la deformación y compararla con unos patrones fotográficos.



Figura 132. AATCC Wrinkle recovery tester. Fuente: [James H. Heal](#)

Se corta una tira de tejido (calada o malla) de un ancho determinado. Se unen los extremos de la probeta formando una probeta tubular. Se introduce en el equipo de ensayo formado por un eje vertical sobre el cual se sitúa un muelle tubular. En la parte superior del eje y del muelle se coloca un disco circular de peso conocido que provoca una arruga sobre el tejido. Las variables son la masa del disco, el tiempo de ensayo (de aplicación de la arruga) y el tiempo de relajación de la probeta. Una vez extraída la probeta del equipo se compara con patrones fotográficos de diferentes niveles de arrugado del 1 al 5 (figura 133).

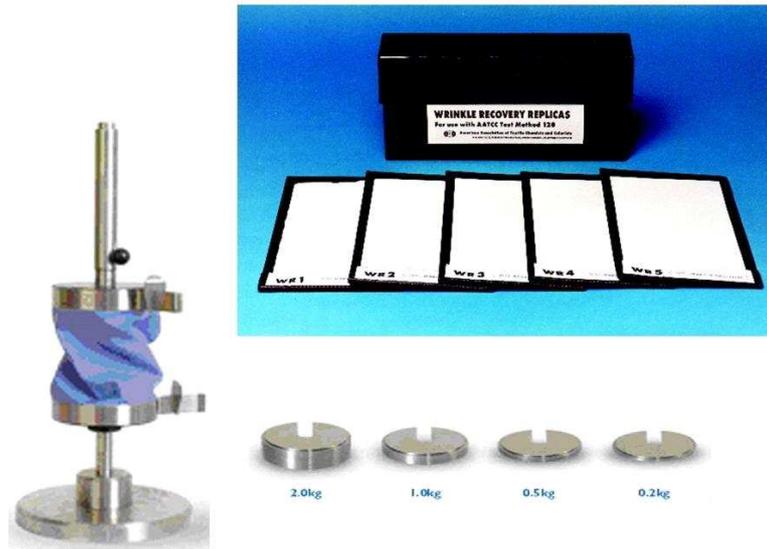


Figura 133. AATCC Wrinkle Recovery Tester. Fuente: [Tony International Co](http://www.tonyinternational.com)

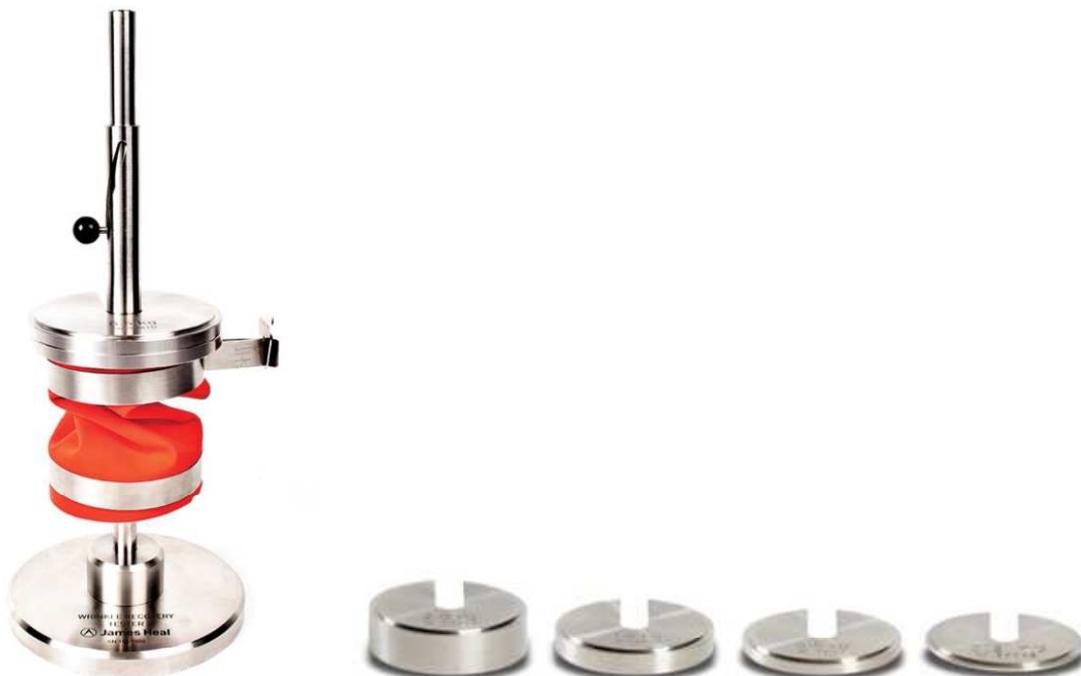


Figura 134. Medidor AATTCC. Fuente: [James Heal](http://www.jamesheal.com)

## 6.5. Estabilidad dimensional

Es la capacidad que tiene un tejido para resistir el cambio de sus dimensiones. Los principales motivos que provocan el cambio de las dimensiones (expansión o encogimiento) de un tejido son:

- Lavado

- Secado
- Vaporizado
- Planchado con presión

El resultado de estas acciones puede ser:

- a) Encogimiento por relajación: se trata de un encogimiento irreversible producido como consecuencia de la relajación de las tensiones sufridas por fibras, hilos y el propio tejido durante el largo proceso textil (hilatura, urdido, encolado, tisaje, tricotado, ennoblecimiento)
- b) Encogimiento progresivo: Debido a los procesos de lavado repetidos durante su uso y mantenimiento doméstico
- c) Encogimiento térmico: Propiedad limitada a tejidos formados por fibras químicas termoplásticas, cuando están sometidas a la acción de calor y como consecuencia de las variaciones internas en las fibras.
- d) Expansión higral: Cambio reversible de las dimensiones de un tejido como consecuencia de variaciones en su contenido de humedad, especialmente en lana y pelos (ver ensayo FAST).

Existen centenares de normas que regulan la forma de realizar los ensayos de estabilidad dimensional de los tejidos. Esta gran variabilidad es debida a también elevada variabilidad de situaciones a las que pueden estar sometidos los tejidos durante su uso, pero básicamente el patrón de ensayo es el siguiente: se recortan al azar 4 probetas cuadradas de tejido, de unas dimensiones determinadas (variable según norma entre 25 y 50 cm). En dicha probeta se marca 9 puntos sitados a una distancia equidistante entre ellos (L cm) de tal forma que puedan realizarse 3 mediciones de dicha distancia en sentido urdimbre y otras 3 en sentido trama (ver figura 135). Se somete el tejido al tratamiento previsto por la norma (lavado, secado, planchado, etc.) durante un tiempo determinado. Una vez finalizado el ensayo se vuelve a medir la distancia entre los puntos marcados en la probeta observándose los cambios dimensionales producidos. El encogimiento será:

$$E \% = \frac{100 \cdot (B - A)}{A}$$

donde:

$A$  = El promedio de las 3 mediciones de la distancia  $L$  entre los puntos de la probeta original sin tratar

$B$  = El promedio de las 3 mediciones de la distancia  $L$  entre los puntos de la probeta tratada.

Los resultados se dan por separado, es decir, encogimiento por urdimbre y encogimiento por trama en %.

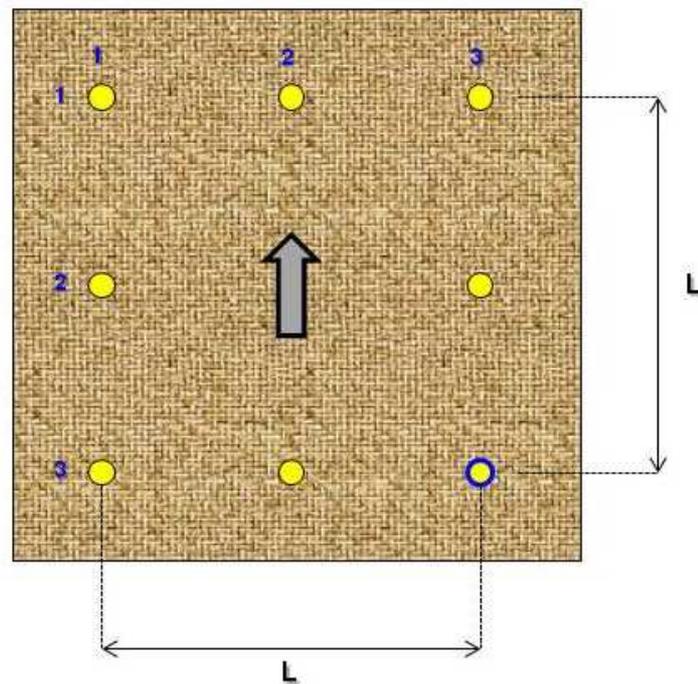


Figura 135. Esquema de la probeta del ensayo de estabilidad dimensional

## 6.6 Conductividad térmica de los tejidos

Una de las funciones más importantes de las prendas de vestir, es asegurar la estabilidad térmica del cuerpo humano. La ropa crea una barrera entre la superficie de la piel y su entorno inmediato. Esta barrera no sólo influye en el intercambio de calor por convección y radiación, sino también en el intercambio de calor por la evaporación del sudor generado por el cuerpo humano. La influencia de la naturaleza y estructura de las prendas de vestir en el intercambio de calor entre el cuerpo humano y su entorno es un fenómeno ciertamente complejo. Depende de muchos factores relacionados con el medio ambiente (temperatura, movimiento y humedad del aire). No menos importante es el papel que juega tanto la materia prima propiamente dicha como su micro y macroestructura.

Para mantener la temperatura corporal estable en condiciones invernales, en primer lugar el cuerpo humano no debe mojarse. Para ello, la ropa debe transportar la humedad del cuerpo lejos de la piel, mantener seco y cálido aire cerca del cuerpo, y evitar el contacto con la lluvia y la nieve.

En definitiva, la capacidad que presentan los tejidos que forman parte de una prenda para permitir el paso del calor y humedad a través suyo afecta a una propiedad determinante de las prendas de vestir como es su confort.

En el estudio del comportamiento térmico de los tejidos se determinan distintas propiedades de ellos que son:

- a) Coeficiente de conductividad térmica ( $\lambda$ ): Es la cantidad de calor transmitido a través de una unidad de espesor en una dirección normal a una superficie de área unitaria, debido a un gradiente de temperatura de una unidad bajo condiciones de

estado estacionario, y cuando la transferencia de calor sólo depende de la temperatura. Se define mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{Q}{A \frac{\Delta t}{h}}, \quad W \, m^{-1} \, K^{-1}$$

donde:

$Q$  = Cantidad de calor conducido

$A$  = Área a través de la cual se conduce el calor

$\Delta t$  = incremento de temperatura

$h$  = grosor del tejido

- b) Resistividad térmica: Es una cantidad específica de cada material que determina el flujo de calor seco que atraviesa un área dada en respuesta a un gradiente de temperatura constante aplicada. Expresa la diferencia de temperatura a través de una unidad de área de un material de una unidad de grosor cuando una unidad de energía calorífica fluye a través ella en una unidad de tiempo. Cuanto menor sea la conductividad térmica, mayor es su resistencia térmica. La resistencia térmica de un tejido está relacionado con su grosor mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{h}{\lambda}, \quad m^2 \, K \, W^{-1}$$

donde:

$h$  = grosor del tejido

$\lambda$  = conductividad térmica

- c) Difusión térmica: Es una capacidad relacionada con el flujo de calor que atraviesa el aire que se encuentra en la estructura del tejido. Se trata de la característica térmica transitoria de los textiles. Se define mediante la siguiente ecuación:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}, \quad m^2 \, s^{-1}$$

donde:

$a$  = Difusión térmica

$\lambda$  = conductividad térmica

$\rho$  = densidad del tejido

$c$  = calor específico del tejido

- d) Absorción térmica: Propio de las sensaciones de frescor y calor. Representa la cantidad de calor absorbida por una diferencia en las temperaturas de 1 K sobre una unidad de área por unidad de tiempo. Se expresa mediante la ecuación:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}, W s^{1/2} m^{-2} K^{-1}$$

donde:

$\lambda$  = conductividad térmica

$\rho$  = densidad del tejido

$c$  = calor específico del tejido

### 6.6.1 Ensayo Tog meter. ISO 5085-1

Esta norma se utiliza para determinar la resistencia térmica de tejidos de pañería y artículos cuya resistencia térmica sea igual o inferior a 0,2 m<sup>2</sup>·K/W y su grosor sea inferior a 20 mm.

Se entiende por resistencia térmica,  $R$ , el cociente entre la diferencia de temperatura entre dos caras de una probeta y el flujo térmico por unidad de superficie perpendicular a estas dos caras. Es equivalente a la resistencia eléctrica en el caso de un flujo eléctrico a través de un condensador.

La conductividad térmica,  $k$ , es la cantidad de calor que pasa por unidad de tiempo a través de una unidad de superficie de una placa de dimensión no finita y de una unidad de espesor o grosor cuando existe una diferencia de temperatura de una unidad entre las dos caras. Para un material plano que tenga dos caras paralelas

$$R = \frac{d}{k}$$

donde  $d$  es el grosor.

La conductividad térmica es el inverso de la resistencia térmica por unidad de grosor

En la medida en que un tejido está formado por fibras con una distribución heterogénea y aire, el término conductividad térmica aquí no tiene su significado usual, puesto que además de la conducción, el calor puede transmitirse a través de un tejido por radiación y posiblemente por convección.

La unidad SI de resistencia térmica es el metro cuadrado Kelvin por watio (m<sup>2</sup>·K/W). Sin embargo la unidad usualmente utilizada en el sector textil y de la indumentaria es el "tog" donde:

$$1 \text{ tog} = 0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

La unidad SI de la conductividad térmica es el Watio por metro y grado Kelvin [W/(m·K)]

El principio del método es el siguiente. Se mide la caída de temperatura (de un material de resistencia térmica conocida) a través de la probeta de ensayo conectada en serie. A partir de los resultados obtenidos se determina la resistencia térmica de la probeta.

El principio de funcionamiento del equipo es el siguiente: para los materiales conductores montados en serie y teniendo en cuenta el sentido del flujo de calor, el cociente entre la caída de temperatura a través del material conductor es igual al cociente de su resistencia térmica. Así, si se mide la caída de temperatura a través del material de una resistencia térmica conocida (patrón) y la caída de temperatura a través de la probeta montada en serie puede evaluarse la resistencia térmica. La probeta se sitúa siempre en un plano horizontal.

El equipo está formado por (figura 136):

- a) Disco de acero dulce (A), de 330 mm de diámetro y 6 mm de espesor que ha sido tratado para reducir las contracciones internas.
- b) Dos placas calefactoras anulares eléctricas ( $B_1$  y  $B_2$ ) de 75 W y 125 W respectivamente, fijadas a la parte inferior del disco (A) y conectadas en paralelo
- c) Disco de material aislante (C) cuya resistencia está comprendida entre  $0,075 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  y  $0,125 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  y un espesor entre 5 y 15 mm. El disco ha de tener un diámetro de 330 mm y estar en contacto con la placa calefactora del equipo.
- d) Placa fría (D), de 330 mm de diámetro, que permite aplicar una presión de  $6,9 \text{ Pa}$  para todo el conjunto de la superficie de  $855 \text{ cm}^2$ .
- e) Aislamiento (E), para reducir las pérdidas de calor

Las superficies del disco y la placa deben de estar lisas y paralelas

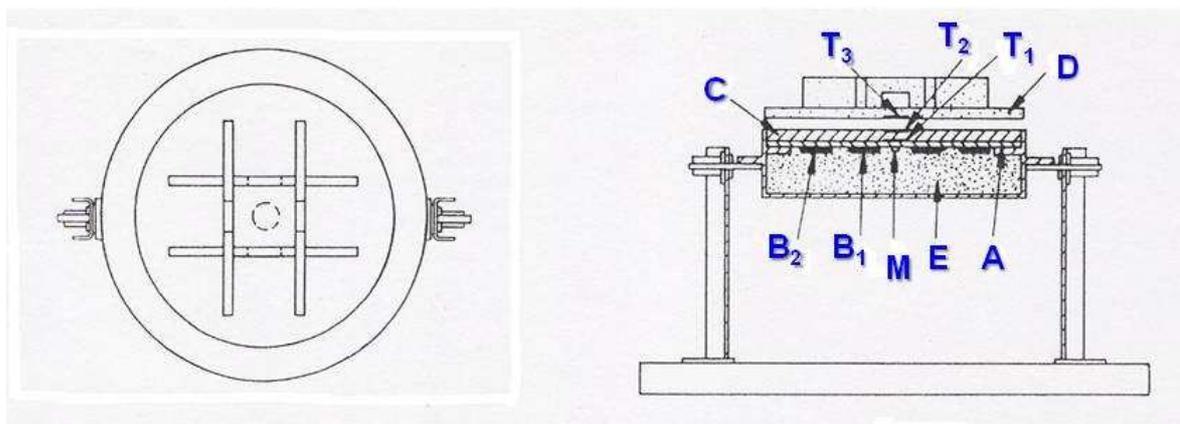


Figura 136. Esquema del equipo TOG METER.

$T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ , son las sondas de temperatura situadas en las partes indicadas en la figura 129. Se trata de termopares de cobre de un diámetro comprendido entre 0,20 y 0,315 mm calibrado a 0,01K o sondas de la misma precisión y dimensiones. Las sondas de temperatura están unidas permanentemente (en buen contacto térmico) con discos de cobre de diámetro 25 mm y 0,1 mm de espesor, separados los unos de los otros, dichos

discos están fijados con una resina de epoxi o un adhesivo similar en unas pequeñas estrías situadas en la superficie del disco (C) y de la placa fría (D). Los discos de aluminio de 0,006 mm de espesor 140 mm de diámetro se colocan en el medio y por encima de las sondas  $T_2$  y  $T_3$ . El conjunto de las caras expuestas C y D se recubren con una laca mate negra para asegurar una emisividad próxima a 1.

El control de la temperatura se efectúa mediante un sensor de temperatura (M) integrado en el sistema de control.

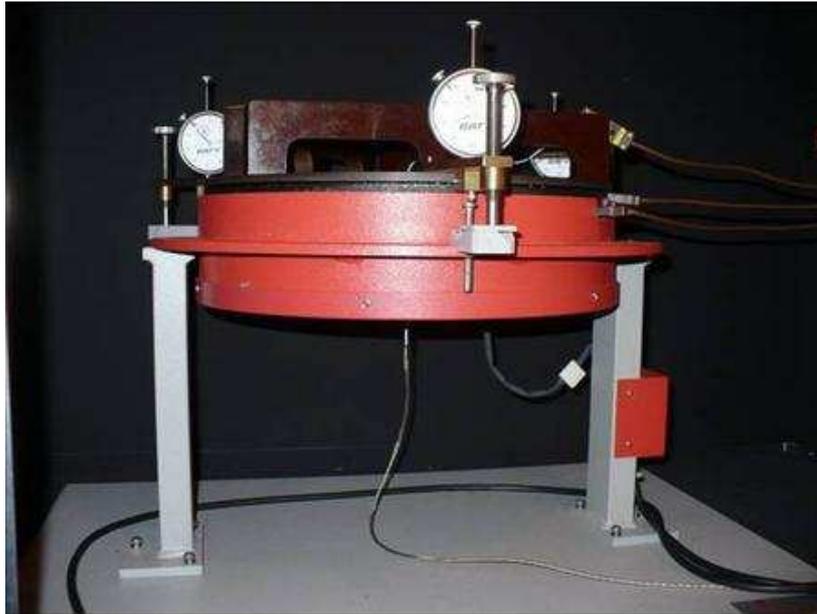


Figura 137. Vista del cabezal de medición del equipo TOG METER. Fuente: [Spræk](#)



Figura 138. El equipo TOG METER se encuentra ubicado en una cabina de ensayo protegida del ambiente exterior. Laboratorio de física textil. Universidade do Minho, Guimaraes (Portugal).

La calibración debe de realizarse por algunos de los dos métodos siguientes:

- a) Efectuar los ensayos con probetas de resistencia térmica conocida y considerando la resistencia térmica patrón como si fuera desconocida, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente
- b) Utilizar un equipo de placa calefactora graduada de acuerdo con la norma ISO 8302 para medir el flujo térmico, siendo la temperatura media de la resistencia térmica patrón comprendida entre 309 K y 313 K.

Teniendo en cuenta la dimensión limitada de los sensores de temperatura, entre  $T_2$  y  $T_3$  cuando las placas caliente y fría entran en contacto. Esto indica la existencia de una resistencia térmica de contacto que hay que tener presente en la evaluación de la resistencia térmica de la probeta.

El equipo se encuentra ubicado en una cabina de ensayo para evitar la influencia del ambiente externo y dispone de un extractor que hace circular el aire a través del equipo a una velocidad comprendida entre 0,25 y 1 m/s.

El ensayo se realiza en atmosfera estándar ( $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  o  $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y  $65\% \pm 2\%$ ), las probetas deben estar acondicionadas. El ensayo se realiza sobre 3 probetas para cada muestra con unas medidas de 330 mm de diámetro.

Existen dos métodos de ensayo:

- a) Método de dos placas: Adecuado para evaluar tejidos que en su utilización, están protegidos del aire ambiente, como por ejemplo la cubierta de una colcha. Éste es el método más utilizado teniendo presente la precisión y reproductibilidad. Se utiliza para la mayoría de artículos. Se coloca la probeta acondicionada encima de la placa caliente y colocar suavemente la placa fría encima teniendo cuidado de no apretar demasiado la superficie de la muestra. Conviene evitar que el aire entre por los bordes del cabezal de medida protegiéndolo con una cinta. Conectar los dispositivos de calefacción eléctrica y ajustar el regulador de temperatura para que  $T_2$  registre una temperatura de entre 304 K y 308 K. Mantener estable de esta temperatura en cada una de los termopares  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$  durante al menos 30 minutos antes de terminar el ensayo, garantizando que durante este periodo las variaciones de temperatura de cada sonda no supera  $\pm 0,1$  K. Para los tejidos que presenten una baja masa volumétrica (como las mantas) la duración del ensayo desde que se ponen en marcha los dispositivos de calefacción, incluido el periodo de estabilización será de aproximadamente 2 horas, si bien será más largo para tejidos más grueso (3 horas). Anotar las temperatura registradas por  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ , con dos decimales.

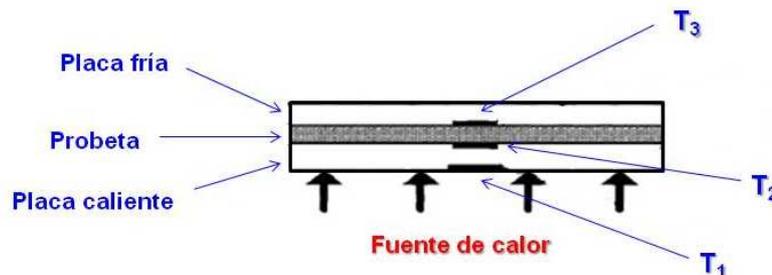


Figura 139. Ensayo Tog-meter. Método dos placas

- b) Método de placa única: Adecuado para evaluar tejidos que su cara externa está expuesta al aire ambiente, una colcha o indumentaria para el exterior. De la misma forma que el anterior método, colocar la probeta acondicionada sobre la placa caliente (protegiendo los bordes) pero dejando la cara externa del tejido descubierta y colocar la placa fría debajo del equipo. Colocar un soporte debajo de la placa fría, tres tapas por ejemplo, para permitir la circulación del aire y recubrir con un trozo de cartón o de una hoja de metal circular cubierta de aluminio para protegerla del calor radiante emitida por el equipo. La sonda  $T_3$  se utilizará en este caso para medir la temperatura del aire. Anotar las temperatura registradas por  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ , con dos decimales. Debe repetirse el ensayo sin probeta.

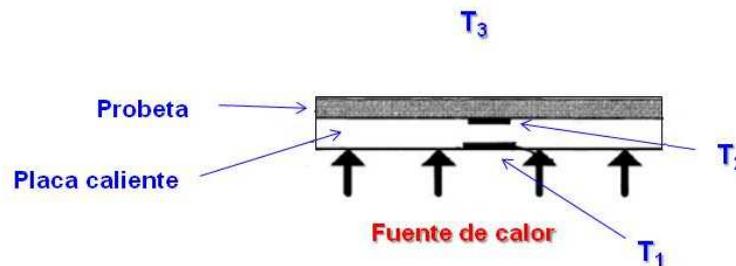


Figura 140. Ensayo Tog-meter. Método una placa

En cuanto a los cálculos serán los siguientes:

- a) Resistencia de contacto: Cuando las placas caliente y fría del aparato están en contacto y no se ha producido estabilización, la Resistencia de contacto  $R_c$  viene dada por la ecuación:

$$\frac{R_c}{R_s} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{\theta_1 - \theta_2}$$

donde:

$R_s$  = resistencia térmica patrón

$\theta_1$  = temperatura registrada por  $T_1$

$\theta_2$  = temperatura registrada por  $T_2$

$\theta_3$  = temperatura registrada por  $T_3$

- b) Resistencia térmica de la probeta mediante el método de las dos placas: Cuando hay estabilización, la resistencia térmica  $R_f$  de la probeta viene dada por esta ecuación:

$$\frac{R_f + R_c}{R_s} = \frac{\theta'2 - \theta'3}{\theta'1 - \theta'2}$$

donde:

$R_c$  = resistencia de contacto

$R_s$  = resistencia térmica patrón

$\theta'1$  = temperatura registrada por  $T_1$

$\theta'2$  = temperatura registrada por  $T_2$

$\theta'3$  = temperatura registrada por  $T_3$

como:

$$\frac{R_f}{R_s} = \frac{R_f + R_c}{R_s} - \frac{R_c}{R_s}$$

entonces:

$$\frac{R_f}{R_s} = \frac{\theta'2 - \theta'3}{\theta'1 - \theta'2} - \frac{\theta2 - \theta3}{\theta1 - \theta2}$$

Si conocemos  $R_s$  es posible calcular  $R_f$

- c) Resistencia térmica de la probeta por el método de placa única: En este caso se calcula la suma de las dos resistencias térmicas en serie, es decir la de la probeta y la del aire ambiente, esta última también se denomina resistencia de la superficie de la cara expuesta a la probeta. Cuando hay estabilización:

$$\frac{R_f + R_c + R_a}{R_s} = \frac{\theta''2 - \theta_a}{\theta''1 - \theta''2}$$

$R_a$  = resistencia térmica del aire ambiente

$R_c, R_s, R_f$  tiene el mismo significado que el método anterior

$\theta''1$  = temperatura registrada por  $T_1$

$\theta''2$  = temperatura registrada por  $T_2$

$\theta_a$  = temperatura registrada por  $T_3$  (es decir el aire ambiente)

Cuando se repite el ensayo sin probeta y cuando hay estabilización,

$$\frac{R_c + R_a}{R_s} = \frac{\theta'''2 - \theta_a}{\theta'''1 - \theta'''2}$$

donde:

$\theta''1$  = temperatura registrada por  $T_1$

$\theta''2$  = temperatura registrada por  $T_2$

$\theta a$  = temperatura registrada por  $T_3$

Una vez conocido  $R_s$ , se puede calcular  $R_f$

Para evaluar la conductividad térmica  $k$  de una probeta es necesario conocer su grosor en las condiciones en que se realiza el ensayo para la determinación de la resistencia térmica, es decir, a una presión de 6,9 Pa.

Sea  $d$  el grosor, en milímetros de la probeta a una presión de 6,9 Pa

entonces

$$k = \frac{d \text{ (mm)} \cdot 10^{-3}}{R_f \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)}} \quad \text{W/(m}\cdot\text{k)}$$

o bien:

$$k = \frac{d \text{ (mm)} \cdot 10^2}{R_f \text{ (togs)}} \quad \text{W/(m}\cdot\text{K)}$$

En el informe final del ensayo debe mencionarse:

- Que el método aplicado ha seguido la norma ISO 5085
- Si el método seguido ha sido el de las dos placas o bien el de la placa única
- La resistencia térmica de cada probeta sometida a ensayo y la media aritmética
- Atmósfera de ensayo utilizada

<b>Materia</b>	<b>Grosor (mm)</b>	<b>Gramaje (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia térmica R (m<sup>2</sup>·K/W)</b>	<b>Conductividad térmica k W/(m·K)</b>
Popelin de Algodón	0,43	105	0,009	0,0048 0
Chaqueta de punto	2,21	328	0,055	0,040 3
Chaqueta de algodón	4,45	180	0,089	0,049 8
Melton	3,43	662	0,078	0,044 0
Velours	6,10	645	0,153	0,039 8
Manta de lana	8,03	617	0,218	0,036 8
Muselina de algodón	5,31	285	0,131	0,040 5

Tabla 14. Valores numéricos de algunos artículos textiles obtenidos por el método de las dos placas

### 6.6.1.1 Videos del ensayo TOG METER

*Fabric Testing - Insulating Properties - Tog Meter test*  
<https://www.youtube.com/watch?v=TD0ttcfdwuE>

### 6.6.2 Conductímetro térmico Mathis TC-30

El sistema de TCi mide la conductividad térmica y la efusividad de materiales directamente, basado en el método fuente plana transitoria.

El sistema se compone de un sensor, la electrónica de control del equipo y el software de cálculo del ordenador vinculado al equipo de medición. El sensor tiene un elemento calefactor/sensor central en la forma de una espiral rodeado por un anillo de protección. El anillo de protección genera calor, además del calentador de espiral. La caída de tensión en el calentador de espiral se mide antes y durante el ensayo. Los datos de tensión permiten obtener la efusividad del material ensayado. La conductividad se calcula a partir de los datos de voltaje por método interactivo patentado por C-Therm.

La efusividad se define como la raíz cuadrada del producto de la conductividad térmica  $k$  ( $W \cdot m/K$ ), la densidad  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) capacidad específica de calor  $C_p$  ( $J/kg \cdot K$ )

$$Efusividad = \sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p}$$

Y tiene las unidades  $\frac{W \sqrt{s}}{m^2 K}$

El equipo TCi mide la efusividad directamente y determina conductividad. El sistema compensa automáticamente las variaciones en la temperatura del sensor, lo que permite mediciones fiables en un amplio rango de temperaturas ( $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $+200 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



Figura 141. Equipo Mathis TCi y cabezal de medida. Fuente: [ndt](#)

### 6.6.2.1 Videos ensayo Mathis TCi

*Mathis TC-30 Thermal Conductivity Instrument*  
[https://www.youtube.com/watch?v=XB\\_O233rrZI](https://www.youtube.com/watch?v=XB_O233rrZI)

*Thermal Conductivity & Effusivity Characterization of Fabrics and Textiles*  
<https://www.youtube.com/watch?v=LZRW-48ipnU>

### 6.6.3 Medidor del poder adiatérmico SODEMAT

Equipo para medir la resistencia térmica de los tejidos. En este ensayo el cabezal de ensayo está formado por un tubo en cuyo interior se encuentra una resistencia eléctrica que emite calor, la cual está conectada un sistema que es capaz de regular la temperatura generada. Una vez alcanzada la temperatura de ensayo, el cabezal se cubre con una probeta de tejido de 160 x 220 mm. El equipo mide la energía necesaria para mantener el cabezal de medida a una temperatura constante. Si el tejido es un buen conductor del calor el consumo eléctrico será elevado mientras que si es un mal conductor de calor con un aporte bajo de energía el cabezal se mantendrá a una temperatura constante. La ventaja de este sistema es que la medida de la energía eléctrica necesaria para mantener constante la temperatura del cabezal es mucho más fácil y exacta que la medida del calor.



Figura 142. Medidor del poder adiatérmico. Fuente: [SODEMAT](#)

### 6.6.4 Equipo Alambeta

Desarrollado en la Universidad Técnica Liberec (República Checa) utiliza un nuevo principio en la medición propiedades termofisiológica de tejidos textiles basado en el

comportamiento de la piel humana. Evalúa la primera sensación de tacto “frío o cálido” que sentimos los humanos cuando nuestra piel entra en contacto con un tejido textil.

El instrumento mide el flujo de calor que atraviesa un tejido debido a la diferencia de temperatura entre la placa de medición inferior (que se encuentra a temperatura ambiente) y la medición del cabezal superior que se encuentra a 40 °C. La capacidad de absorción térmica de un tejido es una medida de la cantidad de calor que se transporta lejos de la superficie del tejido por unidad de tiempo.

Un tejido mal conductor del calor nos produce una sensación de tacto cálido cuando nuestra piel lo toca mientras que el buen conductor del calor nos produce una sensación de tacto frío

El equipo Alambeta, mide la resistencia térmica, conductividad térmica, difusión térmica y absorción térmica, además de su grosor.

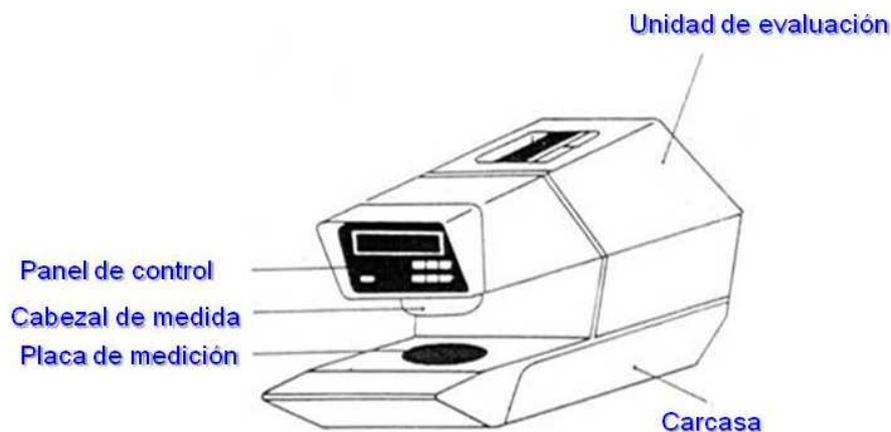


Figure 143. Esquema del equipo Alambeta.

### 6.6.5 KES F-T Thermo Labo IIb

El equipo Kawabata Thermo Labo mide la conductividad térmica. El instrumento está formado por un cabezal con una fuente de calor y un baño de agua mantenido a temperatura ambiente que actúa como un disipador de calor. La probeta de tejido se somete a una compresión de 6 gf/cm<sup>2</sup> y se sitúa entre la fuente de calor y el disipador con una diferencia de temperatura entre ellos de 10°C. Se mide la energía requerida en estado estacionario y se determina la conductancia térmica como el flujo de calor por diferencia de temperatura por unidad de área. La conductividad térmica global se calcula como el producto de la conductancia y el grosor del tejido.

El equipo Thermo Labo II, puede evaluar los siguientes parámetros:

- a) Sensación de tacto cálido-frío mediante la determinación del q max (tiempo: 1 minuto)
- b) Conductividad térmica y difusión calorífica (tiempo: de 2 a 3 minutos)
- c) Retención de calor (tiempo: de 2 a 5 minutos)



Figura 144. KES F7 Thermolabo. Fuente: [keskato](#)

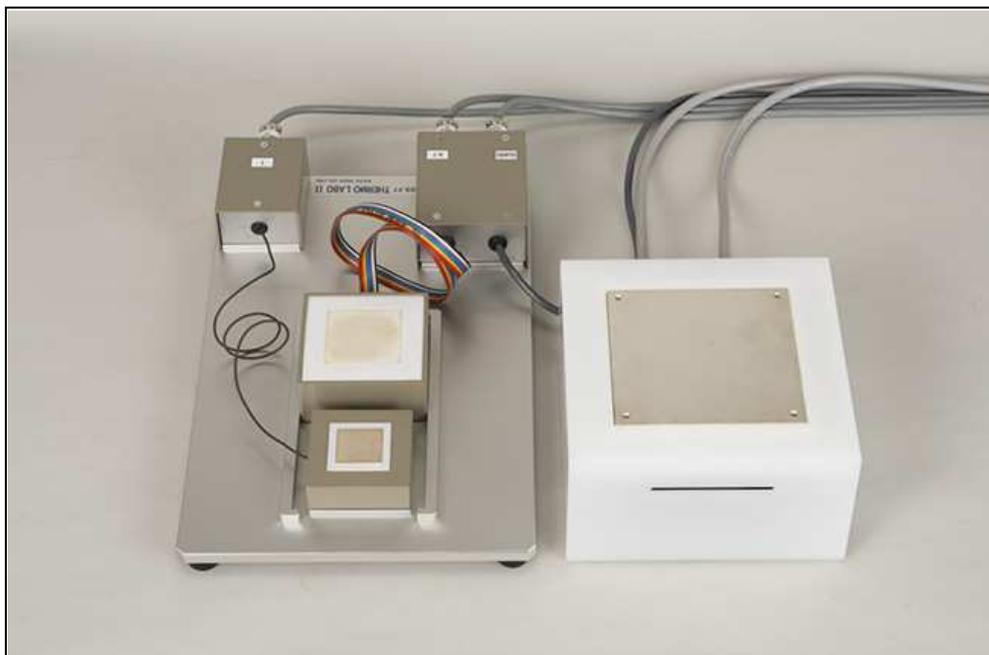


Figura 145. Cabezal de medición del Thermo Labo. Fuente: [keskato](#)

Está formado por los siguientes componentes:

- T . Box (para detectar el calor y su retención)
- B. T. Box (placa calefactora)
- Water Box (recipiente de agua para mantener la temperatura constante)

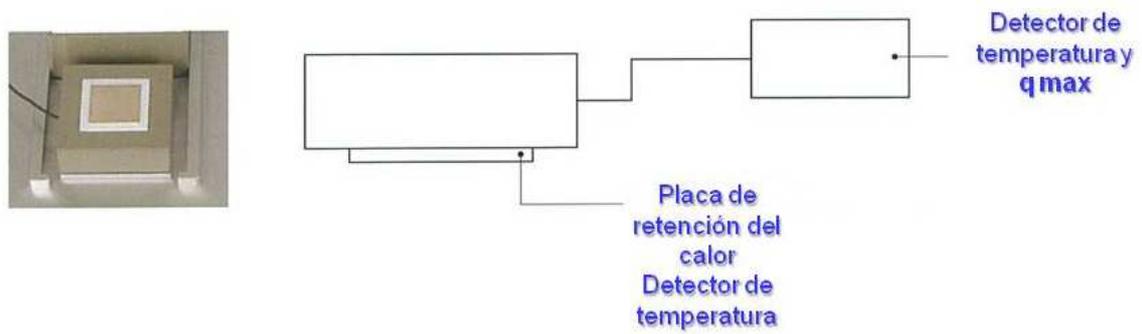


Figura 146. T. Box del Thermo Labo

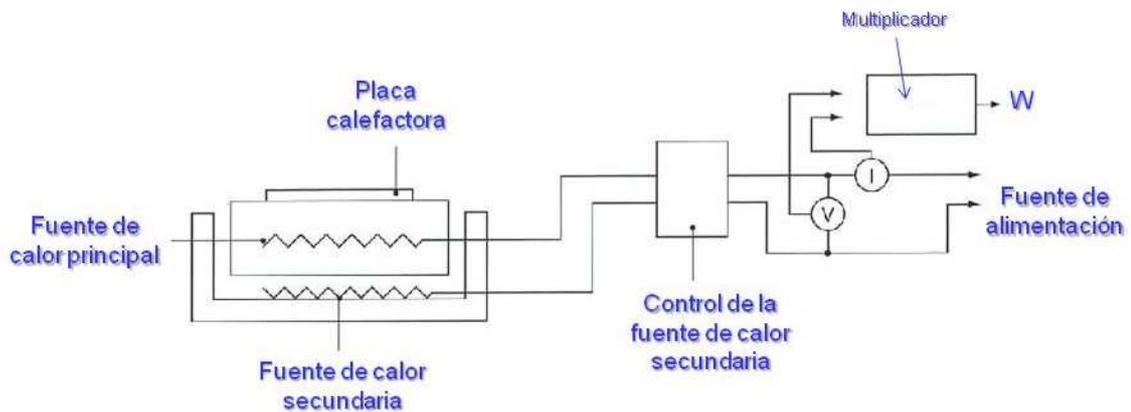


Figura 147. B.T. Box del Thermo Labo

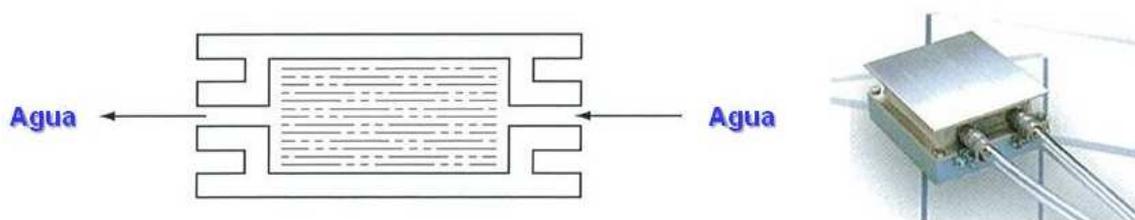


Figura 148. Water Box del Thermo Labo

La medida del q-max para determinar la sensación de tacto cálido-frío se realiza de la siguiente manera: el calor se genera y acumula en una placa de cobre (capacidad calorífica de  $4,186 \times 10^3 \text{ JK}^{-1} \text{ m}^2$  ( $4,186 \times 10^3 \text{ J/K} \cdot \text{m}^2$ ) con una superficie de  $9 \text{ cm}^2$  y una masa de  $9,79 \text{ g}$ . Cuando la placa de cobre toca la superficie superior de la probeta, el calor retenido se transfiere a la muestra, la cual se encuentra a una temperatura más baja (figura 141). El valor de pico de calor transferido, que se alcanza a los  $0,2$  segundos de

contacto, es  $q$ -máx. Este ensayo simula la conducción de calor producido cuando la piel humana toca un objeto y con la sensación de tacto cálido o frío.

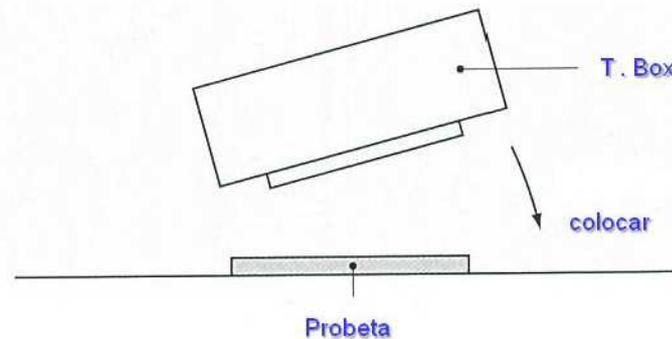


Figura 149. Medida del  $q$ -max del Thermo Labo

Los valores de  $q$ -max producen una sensación de tacto frío, mientras que valores más bajos están relacionados con sensación de tacto cálido. Así  $q$ -max es proporcional a  $\Delta T$ , que es la diferencia entre la temperatura inicial  $T_0$  de la placa de y la temperatura de la probeta  $T_s$ . si bien estos valores también están relacionados con la presión ejercida sobre la probeta (que es de  $10 \text{ gf/cm}^2$  para la prueba estándar). El peso de la T.Box es  $90 \text{ g}$  y el área es de  $9 \text{ cm}^2$ .

Para la medida de la conductividad térmica se realiza la siguiente operación:

- Se ajusta la temperatura del recipiente de agua (Water Box) a la temperatura ambiente del laboratorio. Se coloca la probeta de  $5 \times 5 \text{ cm.}$ , encima de la Water Box y encima de ella se coloca la B.T Box.
- Una vez alcanzado un valor estable, se lee la pérdida de flujo de calor en  $W$  (vatios) de (B.T. Box) en el panel de control. Unidades:  $\text{mW}$  o  $W$ .
- Flujo de calor constante perdido será:

$$W = K \cdot \frac{A \cdot \Delta T}{D}$$

donde:

$D$  = grosor de la probeta en  $\text{cm}$

$A$  = área de la placa calefactora del B.T.Box en  $\text{cm}^2$

$\Delta T$  = diferencia de temperatura en  $^\circ\text{C}$

$K$  = conductividad térmica

- La conductividad térmica  $K$  es:

$$K = \frac{W \cdot D}{A \Delta T} \quad (\text{W/cm}^\circ\text{C})$$

- cuando se mide con la B.T.Box la presión aplicada puede ajustarse de forma variable. Valor normal es  $6 \text{ g/cm}^2$ .
- La temperatura de la placa de la B.T.Box se controla de tal forma que el error no supere los  $0,1^\circ\text{C}$ .

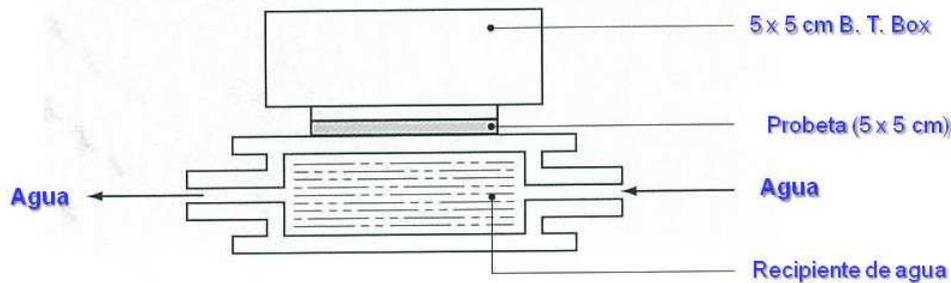


Figura 150. Medida de la conductividad térmica del Thermo Labo

Para la medida de las propiedades de retención del calor se realizan los siguientes pasos:

- Colocar la probeta (mayor que  $10 \times 10 \text{ cm}$ . Pero no más de  $20 \times 20 \text{ cm}$ ) y el marco de montaje en B.T. Box y comenzar la medición (figura 150). Aunque la temperatura de la placa de calor BT sea la misma que la de la columna de viento, que por lo general es  $10^\circ\text{C}$  más alta que la temperatura ambiente, esta diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ), se puede ajustar según el propósito.
- Cuando la temperatura de la placa calefactora del B.T. Box y el valor del flujo de calor,  $W$ , se estabilizan, se lee el valor de flujo de calor,  $W$ , en el medidor digital. El valor de flujo de calor  $\bar{W}$  integrado, se lee entre los 60 y 180 segundos. Los valores de  $W$  y  $\bar{W}$  se muestran en unidades de  $W$  o  $\text{mW}$ .
- Una variación constante de los valores  $W$  puede indicar una señal de tensión de la terminal de salida de flujo de calor. Idealmente, la medición debe llevarse a cabo cuando se alcanza un equilibrio. La medida debe completarse en un par de minutos.

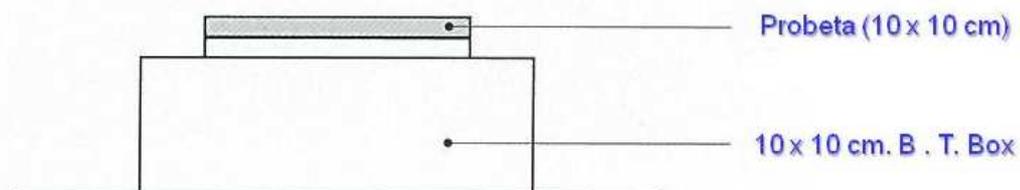


Figura 151. Medida de las propiedades de retención de calor del Thermo Labo



Figura 152. Columna de viento del Thermo Labo. Fuente: [keskato](http://www.keskato.co.jp/products/kes-f7.html)

#### 6.6.5.1 Video ensayo KES F7 Thermo Labo

*KES FT Thermo Labo* <http://www.keskato.co.jp/products/kes-f7.html>

### 6.7 Conductividad eléctrica de los tejidos

Cuando los materiales textiles no metálicos se sitúan en un campo eléctrico, se comportan como aislantes, puesto que la mayor parte de ellos están formados de carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, teniendo electrones como portadores de carga unidos al núcleo del átomo. En esta línea la mayoría de fibras químicas de polímero sintético son malas conductoras de la electricidad.

Durante las diferentes etapas del proceso textil, dichas fibras están sujetas a diferentes fenómenos de rozamiento y separación entre ellas generando una notable cantidad de cargas eléctricas que se transmiten con dificultad. La electricidad estática genera una gran cantidad de dificultades puesto que provoca tanto la atracción como rechazo entre las fibras entre sí, la atracción del polvo y la suciedad, la generación de chispas que pueden provocar explosiones en ambientes con productos volátiles e inflamables.

Para evitar estos desagradables fenómenos durante el proceso textil se acostumbra a aplicar productos químicos tensoactivos (ensimajes) que recubren las fibras con el fin de reducir por una parte el coeficiente de fricción entre ellas y por otra a aumentar la conductividad eléctrica superficial.

Por otra parte el estudio de la conductividad eléctrica de los materiales textiles, tiene en la actualidad un gran interés por su elevado potencial aplicación en la indumentaria,

aplicaciones médicas y militares, como sensores, actuadores, electrónica flexible, apantallamiento electromagnético, etc.

### 6.7.1 Conductividad y resistencia eléctrica

La conductividad eléctrica de un tejido depende del número de electrones móviles libres. Para el movimiento de los electrones es necesaria alguna fuente de energía como la energía térmica. La humedad contenida en la fibra aumenta significativamente su conductividad.

La conductividad específica  $\sigma_E$  de las fibras poliméricas de longitud  $l_v$  (m) y sección transversal  $S_v$  (m) es la relación de la surface current density  $I/S_v$  y la electric field strength  $U/l_v$

$$\sigma_E = \frac{I \cdot l_v}{U \cdot S_v} = \frac{G \cdot l_v}{S_v} \quad (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$$

donde:

$l_v$  = longitud de fibra

$S_v$  = sección transversal de la fibra

$U$  = Tensión eléctrica (V)

$I$  = Intensidad de corriente (A)

$R$  = resistencia (V/A)

$G$  (conductividad) ( $S = A/V$ )

El valor recíproco de la conductividad específica es una resistencia eléctrica específica, propiedad que varía según el tipo de material como consecuencia de su naturaleza y estructura.

$$R_E = \frac{1}{\sigma_E} \quad (\text{S}^{-1} \cdot \text{m} = \Omega \cdot \text{m})$$

Los materiales pueden clasificarse en función de su resistencia eléctrica en:

a) Conductores:  $R_E = 10^{-8} \cdot 10^{-2} \quad (\Omega \cdot \text{m})$

b) Semiconductores:  $R_E = 10^{-2} \cdot 10^0 \quad (\Omega \cdot \text{m})$

c) Aislantes:  $R_E = 10^0 \cdot 10^{16} \quad (\Omega \cdot \text{m})$

La resistencia eléctrica de las fibras textiles se indica en la tabla 15.

La evaluación de las propiedades eléctricas de los tejidos se determina mediante el estudio de su resistividad eléctrica superficial. El cabezal del equipo de medida se muestra en la figura 153 y consta de tres electrodos circulares

Resistividad superficial  $\rho_s$  ( $\Omega$ ):  $\rho_s = R_s \cdot O/l$

donde:

$R_s$  = Resistencia superficial

O = circunferencia media de los electrodos (m)

l = distancia entre electrodos (m)

Tipo de fibra textil	Resistencia eléctrica $R_E$ ( $\Omega \cdot m$ )
de polímero sintético	$R_E = 10^{12} \cdot 10^{14}$
Antiestáticas	$R_E = 10^6 \cdot 10^{10}$
Conductoras	$R_E = 10^{-5}$

Tabla 15. Resistencia eléctrica de las fibras textiles. Fuente: (52)

La resistividad superficial se mide entre los electrodos 1 y 2 (figura 154). Para la medida de resistividad superficial de un tejido es necesario conocer el valor de la circunferencia media de los electrodos y la distancia entre electrodos.



Figura 153. Cabezal de medición de la resistividad eléctrica superficial. (70)

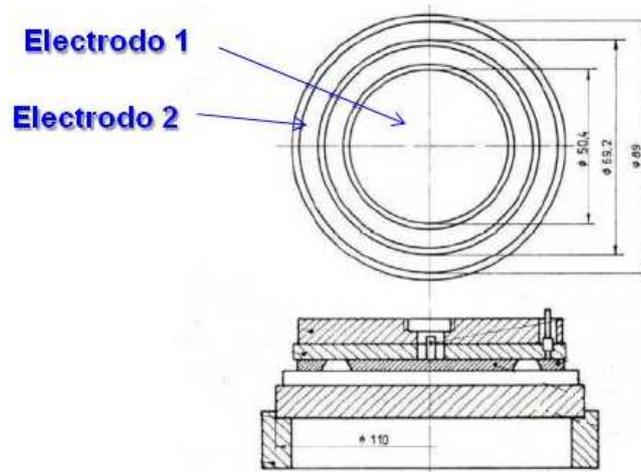


Figura 154. Detalle de los electrodos del cabezal de medición. Fuente (52)

### 6.7.2 Static Voltmeter (Rothschild)

Una forma rápida y sencilla de evaluar la conductividad eléctrica de un material textil es medir la facilidad o dificultad que ofrece este material a que la electricidad fluya a través suyo. Cuanto mayor sea la conductividad eléctrica de un material, menor tendencia tendrá a generar fenómenos de electricidad estática. El equipo Static Voltmeter de Rothschild (figura 155), utiliza un condensador de láminas de vibración. Cuyo dieléctrico es el aire, que cambia su capacidad a una frecuencia específica. La amplitud de la tensión alterna generada cambia por las variaciones de carga en la entrada del sistema de medición. Después de la amplificación y procesar la tensión los resultados obtenidos pueden leerse en el galvanómetro. Este sistema de medición tiene una resistencia de entrada muy alta de  $10 \times 16$  ohmios que permite la medición de todo tipo de cargas electrostáticas.



Figura 155. Static Voltmeter. Fuente: [Rothschild](#)

Para la realización del ensayo, la probeta acondicionada se coloca encima del cabezal-electrodo adecuado para tejidos capaz de mantener la probeta plana, firme y sin holguras con el fin de evitar fugas de cargas electrostáticas. El equipo mide el llamado tiempo de semidescarga, es decir el tiempo necesario para que la carga aplicada sobre el material textil se reduzca a la mitad. Cuanto mayor sea el tiempo de semidescarga mayor será la tendencia a generar fenómenos de electricidad estática. El resultado del ensayo indicará el tiempo de semidescarga en segundos de un total de 10 ensayos.

## 7. CONFECCIONABILIDAD

Se entiende por confeccionabilidad, la facilidad o dificultad que ofrece un tejido a superar con éxito las operaciones de confección industrial (extendido, corte, costura y plancha) (71). La confeccionabilidad no es pues una propiedad relacionada con la calidad de uso del producto final como prenda de vestir sino una propiedad de convertibilidad del tejido en un proceso industrial. Un tejido con una mala confeccionabilidad no impedirá su conversión en prenda de vestir, simplemente la dificultará (será más delicado de confeccionar: cortar, coser y planchar) y por lo tanto el proceso industrial será más lento y caro.

Para el confeccionista los problemas asociados con las propiedades de los tejidos pueden dividirse en dos grupos:

- a) aquellos que pueden ocasionar dificultades durante el proceso de confección industrial de la prenda de vestir.
- b) aquellos defectos latentes que sólo ocasionan problemas cuando la prenda ya está hecha.

Los problemas que aparecen durante el proceso de confección no impiden, por lo general, que los tejidos puedan confeccionarse. Un tejido puede tener una confección difícil o delicada pero por su estilo, tacto, cayente, etc., el confeccionista puede estar interesado usarlo igualmente, aun conociendo el coste adicional debido al tiempo empleado.

Los problemas, latentes, sin embargo, preocupan mucho más al confeccionista, ya que cuando se hacen evidentes la confección ya ha tenido lugar. Entre estos defectos cabe destacar una inadecuada estabilidad dimensional.

Con el fin de prever el comportamiento de los tejidos antes de entrar en el proceso de confección se han desarrollado dos equipos para medir la confeccionabilidad de los tejidos. Dichos equipos son:

- a) Equipo FAST
- b) Equipo Kawabata (diseñado inicialmente para medir la mano pero que suministra información suficiente para prever también su confeccionabilidad).

### 7.1 Equipo FAST

Las iniciales FAST corresponden a la abreviación del término “**F**abric **A**ssurance by **S**imple **T**esting” y corresponde al nombre comercial del equipo desarrollado por la división lanera del CSIRO (Australia).

Dicho equipo fue especialmente diseñado para el uso por parte de tejedores, acabadores y confeccionistas, con el fin de predecir la confeccionabilidad de los tejidos de calada de lana y mezclas.

Este sistema mide las propiedades mecánicas de los tejidos cuando están sometidos a pequeñas cargas, que son las que sufren durante el proceso de confección industrial. Consta de tres instrumentos y un método de ensayo. Los instrumentos miden las deformaciones a pequeñas cargas y el método de ensayo la estabilidad dimensional del tejido.

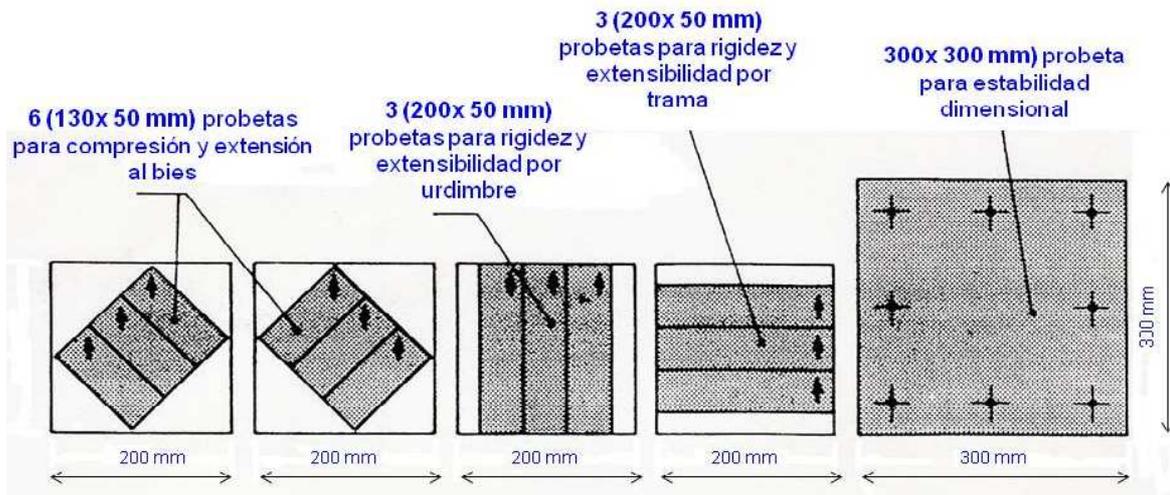


Figura 156. Medidas de las probetas para el ensayo FAST (71)

### 7.1.1 FAST-1

Mide el grosor del tejido cuando está sometido a dos tipos de cargas de compresión. En la primera medición se emplea una carga de 2 g/cm<sup>2</sup>, a continuación mide el grosor bajo una carga de 100 g/cm<sup>2</sup>. La diferencia de ambos valores es el grosor de la capa superficial, denominado también por otros autores como compresibilidad absoluta.

$$\text{Grosor de la capa superficial} = \text{Grosor}_2 - \text{Grosor}_{100}$$

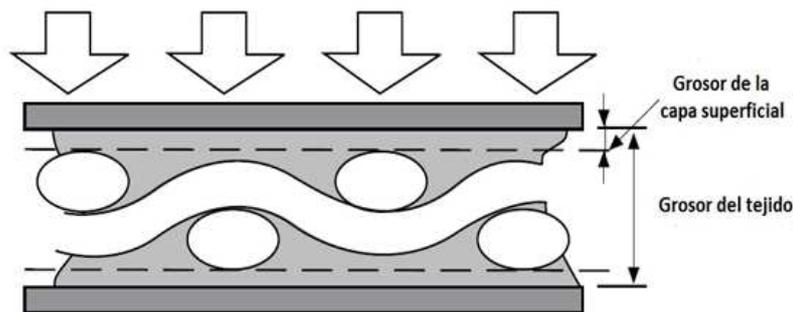


Figura 157. Principio de medición del grosor de la capa superficial mediante el FAST-1. (71)

Se coloca la probeta de tejido sobre la platina de medición y debajo del disco de presión. Aplicamos el peso sobre el tejido y leemos el valor del grosor en un indicador digital. Primero se realiza el ensayo a una presión de 2 g/cm<sup>2</sup> y a continuación el de 100 g/cm<sup>2</sup>.

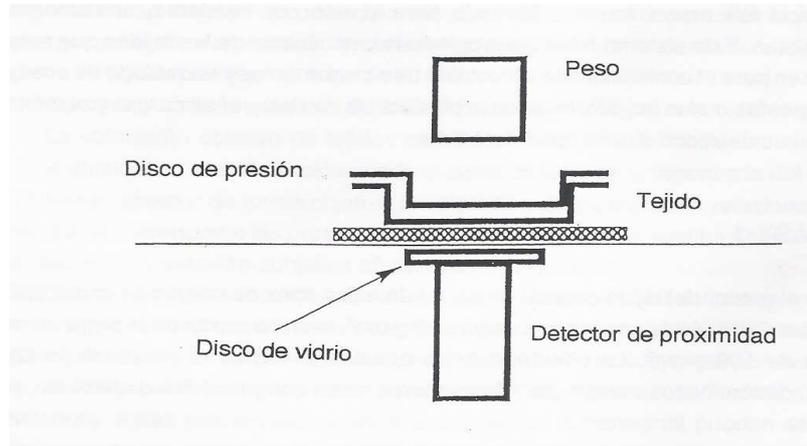


Figura 158. Esquema de funcionamiento del medidor de grosor FAST-1. (71)

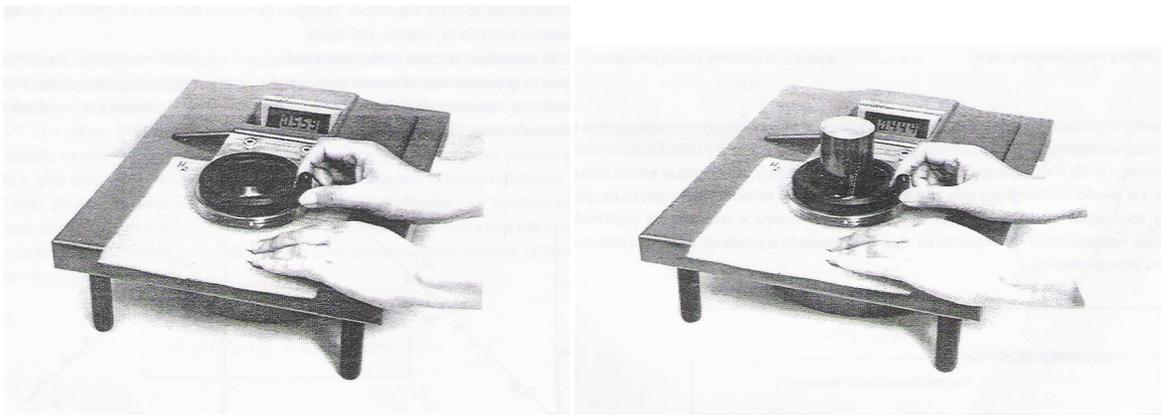


Figura 159. Medida del grosor a 2 g/cm<sup>2</sup> (izquierda) y 100 g/cm<sup>2</sup> (derecha). (71)

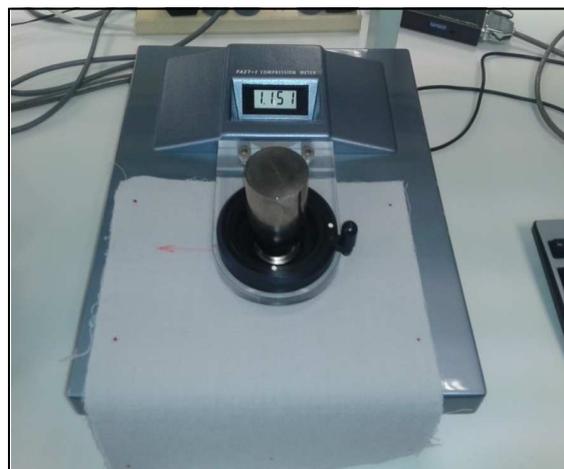


Figura 160. Medida del grosor a 100 g/cm<sup>2</sup>. Laboratorio de Física textil. Departamento de Ingeniería Textil y Papelera (Universitat Politècnica de Catalunya)

El grosor de la capa superficial del tejido, tiene una notable influencia en el aspecto y evaluación de la mano del tejido. Éste parámetro, medido físicamente de forma objetiva, ha demostrado tener una gran correlación con la evaluación subjetiva realizada visualmente. Por otra parte muestra también una gran correlación con la evaluación hecha por un observador que determina subjetivamente la lisura de un tejido.

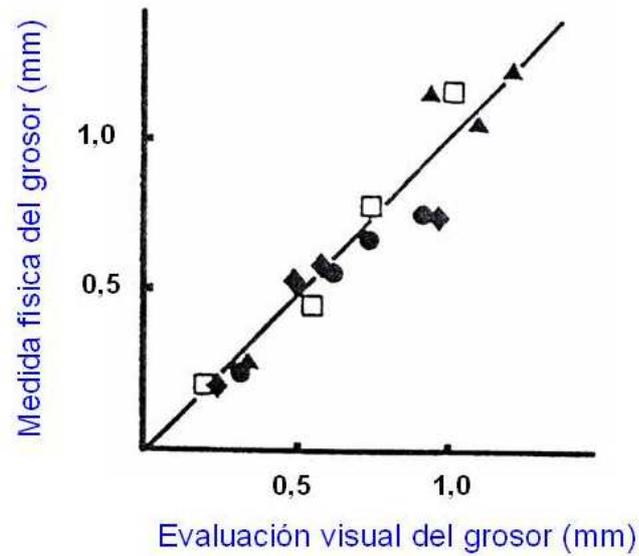


Figura 161. Correlación entre la evaluación visual del grosor y su medida física (71)

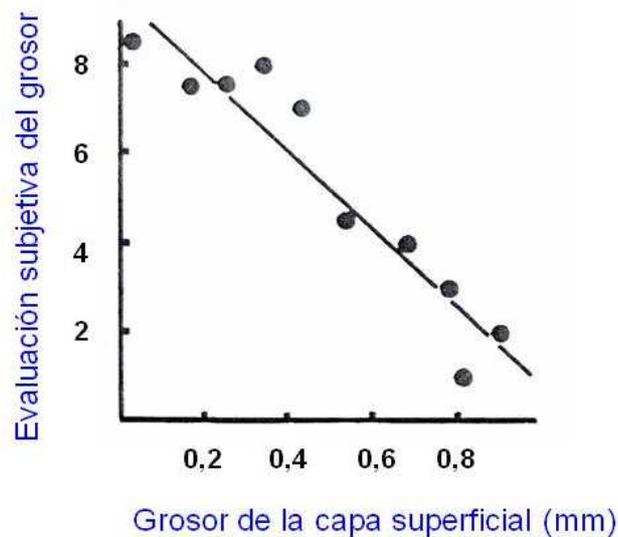


Figura 162. Correlación entre la evaluación subjetiva del grosor y el grosor de la capa superficial (71)

Cuando algunos tejidos se someten a la acción directa de una prensa de vapor, puede suceder que el tejido se relaje incrementando su grosor y ocasionando como consecuencia un cambio de aspecto entre la parte prensada y la parte que está fuera de la prensa. La medición del grosor de la capa superficial del tejido antes y después de la relajación con vapor directo, nos permite deducir un nuevo e interesante parámetro denominado “estabilidad del acabado” que nos ayudará a predecir la probabilidad de que ocurra este problema.

$$\text{Estabilidad del acabado (\%)} = \frac{\text{Grosor capa superficial antes de vaporizar}}{\text{Grosor capa superficial después de vaporizar}} \cdot 100$$

### 7.1.2 FAST-2

Este equipo mide la rigidez a la flexión (por urdimbre y por trama) por el método de la longitud del voladizo, es decir, la longitud de tejido que debe sobresalir de un voladizo para que por acción de su propio peso alcance una deformación por flexión de 41,5°.

El medidor FAST-2 es muy parecido al flexómetro clásico descrito en el apartado 4.1.7.1. Una tira rectangular de tejido se desliza horizontalmente en una plataforma plana que termina en un voladizo. Cuando el tejido alcanza una deformación 41,5° intercepta un haz de luz infrarroja y una señal luminosa avisa al operador para que finalice el deslizamiento horizontal. Debajo de la plataforma plana por la que se desliza la probeta se encuentra un pequeño disco que roza con la probeta de tejido girando hacia la derecha y calculando mediante su desarrollo la longitud del voladizo. Esta información se envía al ordenador que gestiona el ensayo y junto con la masa laminar del tejido calcula la rigidez a la flexión mediante la siguiente fórmula:

$$RF = W \cdot C^3 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6}$$

donde:

$RF =$  Rigidez a la flexión en  $\mu N \cdot m$

$C =$  Longitud de comba en mm

$W =$  Peso por metro cuadrado de tejido ( $\frac{g}{m^2}$ )

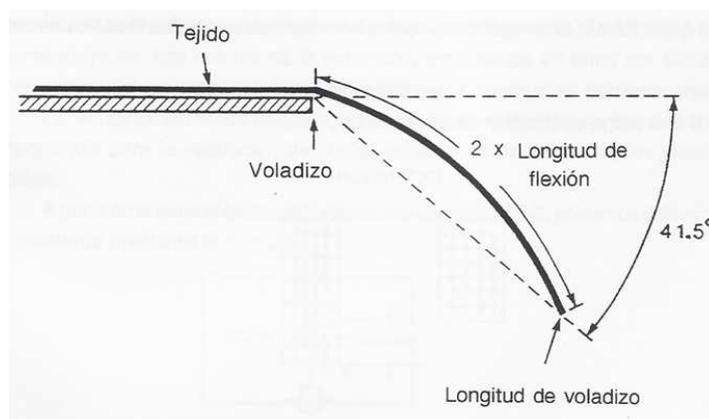


Figura 163. Principio de medición de la Rigidez a la flexión por el método de la longitud del voladizo del FAST-2 (71)



Figura 164. FAST-2. Laboratorio de Física textil. Departamento de Ingeniería Textil y Papelera (Universitat Politècnica de Catalunya)

Para la realización de este ensayo se utilizan 3 probetas de 200 x 50 mm de urdimbre y otras 3 por trama. Al igual que el ensayo convencional de cada probeta se analizará la longitud del voladizo por cada uno de los dos extremos de la probeta tanto por el haz como por el envés. En definitiva de cada probeta se realizan 4 ensayos.

La rigidez a la flexión es una de las propiedades físicas más importantes de los tejidos y es una medida de la fuerza necesaria para doblar un tejido a una curvatura determinada. Cuanto mayor sea la rigidez a la flexión, menor será su cayente, más duro será su tacto. Este parámetro tiene mucha importancia tanto en el proceso de confección como en el aspecto de la prenda.

### 7.1.3 FAST-3

Este equipo mide la extensibilidad del tejido por urdimbre y por trama bajo tres cargas de 5, 20 y 100 g/cm. Se determina también la extensibilidad al bias pero en este caso sólo se aplica una carga de 5 g/cm.

La extensibilidad es la medida del alargamiento que sufre un tejido cuando es sometido a una carga de tracción en sentido axial.

La mayoría de confeccionistas están familiarizados con los ensayos de resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura empleados normalmente en el control de calidad de los tejidos, sin embargo en los estudios de la confeccionabilidad, las cargas empleadas son mucho más bajas puesto que se simulan las condiciones a las que se encuentran los tejidos durante el proceso de confección industrial.

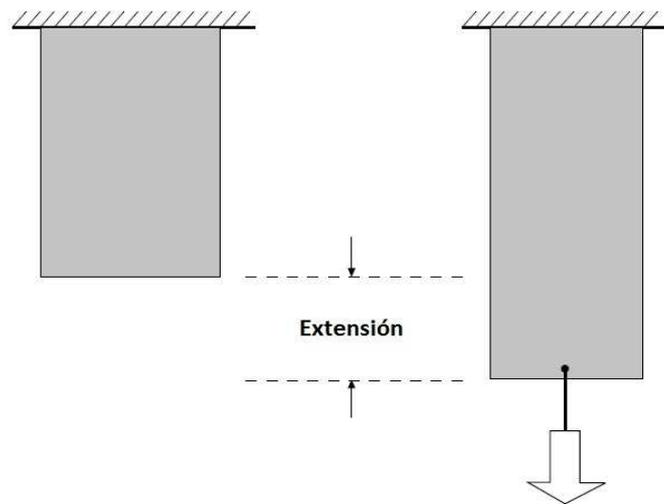


Figura 165. Ensayo de extensibilidad realizado en el FAST-3 (71)

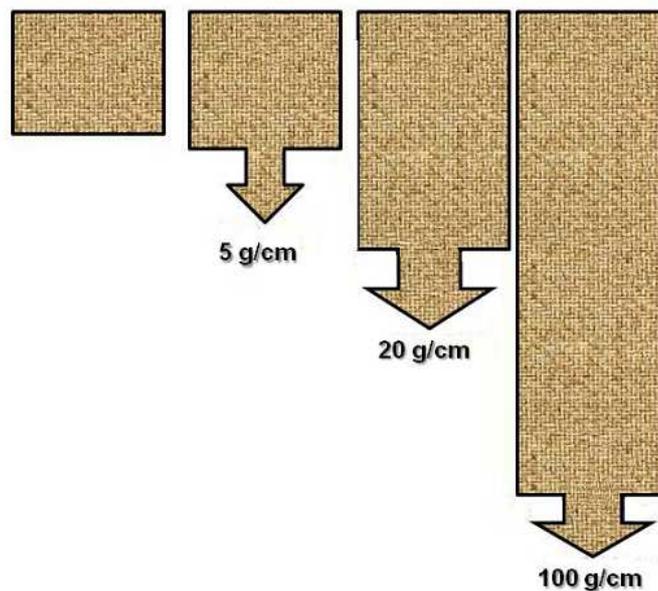


Figura 166. En el ensayo FAST-3 se someten las probetas a una tensión axial creciente de 5, 20 y 100 g/cm.

El equipo está formado por una mordaza superior fija que sujeta la parte superior de la probeta y una mordaza inferior móvil situados a una distancia fija. La mordaza inferior, que retiene la parte inferior de la probeta, está vinculada a un sistema formado por un brazo de palanca inverso.

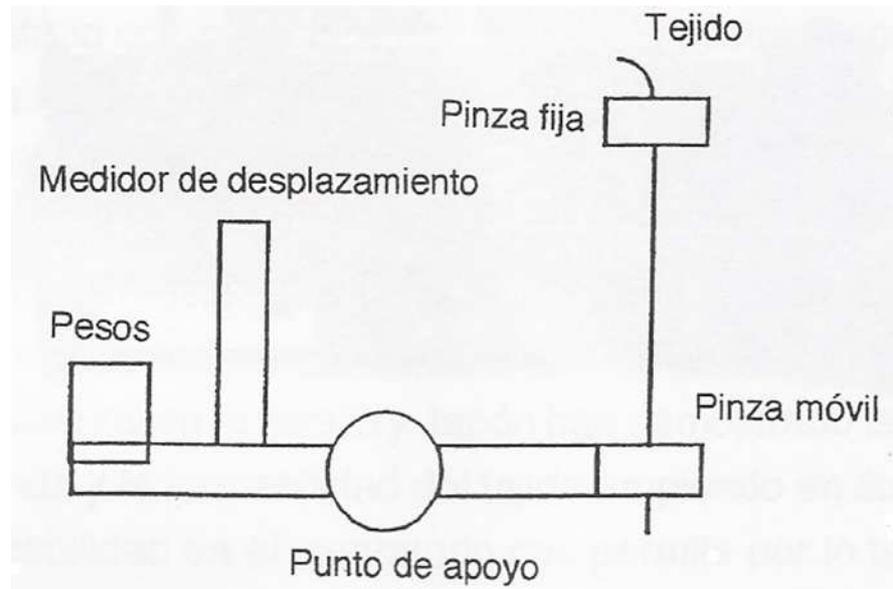


Figura 167. Esquema del principio de funcionamiento del FAST-3 (71)



Figura 168. FAST-3. Laboratorio de Física textil. Departamento de Ingeniería Textil y Papelera (Universitat Politècnica de Catalunya)

Se cortan las probetas a ensayar en las direcciones urdimbre, trama y al bias, sujetándose entre las dos mordazas del instrumento. El equipo, cuyo esquema se muestra en la figura 165, funciona como una palanca inversa. Cuanto mayor sea el peso situado en el platillo de la balanza, menor será la tensión axial a la que se verá sometido el tejido. Eliminando los pesos del platillo se somete al tejido a cargas progresivamente

mayores. Los valores de extensión, expresados en tanto por ciento, se leen directamente en el indicador digital del instrumento (ver figura 168).

A partir de de la extensibilidad al bias medida con el FAST-3, se puede deducir la “rigidez a la cizalladura” mediante la fórmula:

—

donde:

La deformación por cizalladura de un tejido es una distorsión lateral. La obtenida por este método es prácticamente idéntica a la obtenida mediante instrumentos más complejos.

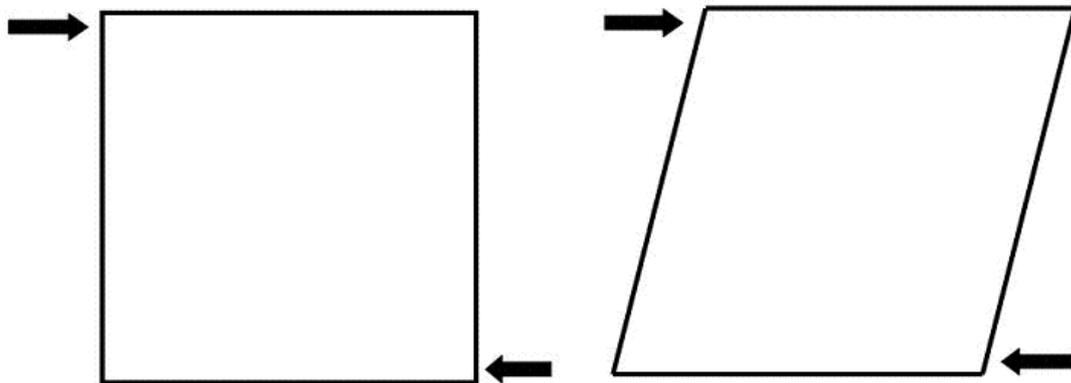


Figura 169. La rigidez a la cizalladura es una medida de la distorsión lateral.

Mediante la rigidez a la flexión y la extensibilidad a bajas cargas se puede deducir un nuevo parámetro de gran interés en confeccionabilidad como es la “formabilidad”.

La formabilidad es un concepto derivado de un trabajo realizado en los años 60 del siglo XX en Suecia. Si un objeto plano se comprime longitudinalmente en su propio plano, se irá comprimiendo hasta que se doble o encorve (figura 168). Se define como formabilidad, por lo tanto, a la amplitud que un tejido puede comprimirse longitudinalmente antes de que se doble o encorve.

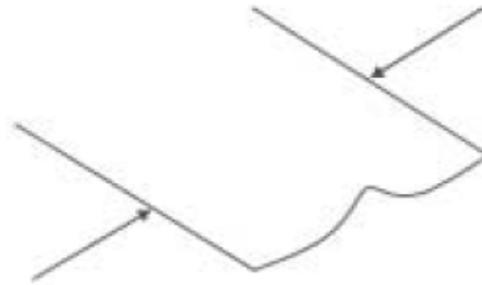


Figura 170. Cuando un tejido se comprime longitudinalmente se dobla o encorva

Cuando se cose una costura, el hilo de coser comprime al tejido, si la formabilidad es alta, el tejido acepta la compresión sin doblarse y la costura tendrá un buen aspecto. Debido a que la compresibilidad de los tejidos en su propio plano es tan difícil de medir, se ha desarrollado una alternativa. Diversos estudios demuestran que la medida de la extensibilidad empleando cargas bajas, está relacionada con la compresibilidad longitudinal, debido a lo cual se usa la extensibilidad para calcular la formabilidad

$$F = \frac{(E_{20} - E_5) \cdot RF}{14,7}$$

donde:

$F = \text{Formabilidad en } mm^2$

$E_{20} = \text{Extensibilidad a } 20 \frac{gf}{cm}, \text{ en } \%$

$E_5 = \text{Extensibilidad a } 5 \frac{gf}{cm}, \text{ en } \%$

$RF = \text{Rigidez a la flexión en } \mu N \cdot m$

Estudios realizados en Australia y Japón han demostrado la gran correlación entre el aspecto de la prenda y la formabilidad del tejido empleado en su confección. La determinación de la Formabilidad en el laboratorio nos permite predecir antes de realizar el proceso de confección industrial cual será el aspecto de la prenda, valorada visualmente por un grupo de observadores. En la figura 171 se ilustra la correlación, en donde cada punto representa un tejido diferente teniendo como coordenadas la Formabilidad media por urdimbre y por trama. Puede verse claramente dos zonas bien diferenciadas de buen y mal aspecto (de las costuras). Estos ensayos se hicieron en la misma empresa utilizando las mismas técnicas de confección y de manipulación de los tejidos (sobrealimentación).

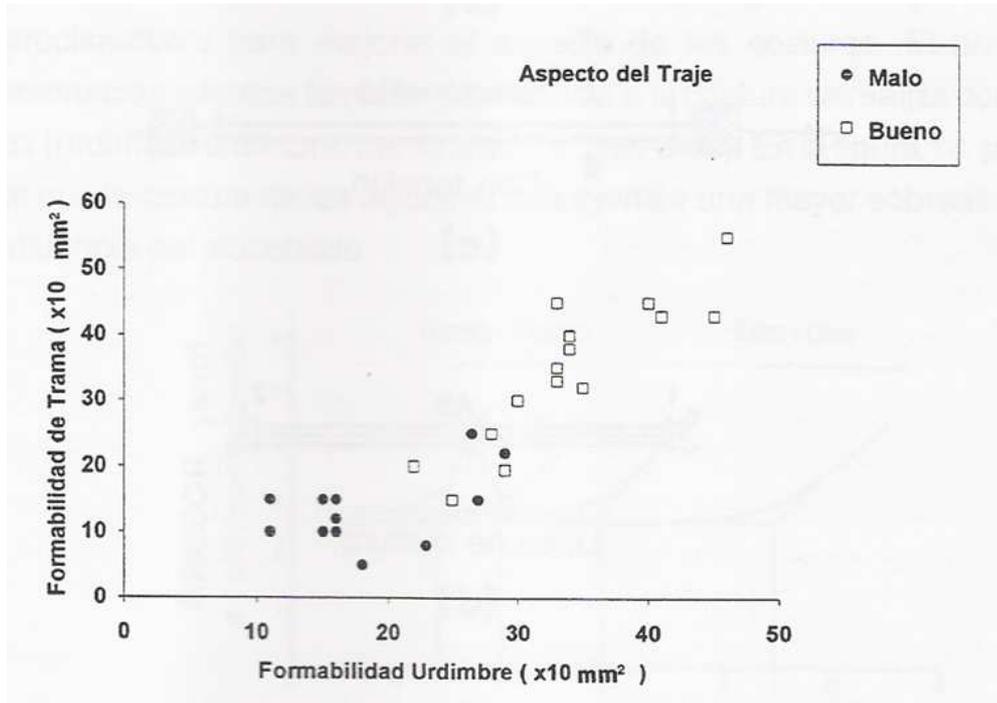


Figura 171. Predicción del aspecto de un traje en base a la medida de la Formabilidad (71)

Durante la costura, los tejidos acostumbran a estar sometidos a fenómenos de sobrealimentación, lo cual produce una compresión longitudinal y su correspondiente arqueado y deformación. Conocer el límite que separa la zona de compresión longitudinal y la deformación en forma de arruga o bucle es evidentemente una información muy importante para el proceso de confección. En la figura 172 se muestra un estudio experimental sobre esta cuestión (sobrealimentación). Dos muestras de tejido de referencias A y B de diferentes longitudes  $A_{12}$  y  $B_{12}$  respectivamente, son pinzadas por dos mordazas que las retienen por sus extremos de tal manera que la más corta está apenas tensa y la más larga sufre una arruga debido a la sobrealimentación sobre la más corta para que ocupe la misma longitud entre mordazas. La sobrealimentación expresada en % será:

$$D (\%) = \frac{A - B}{A} \cdot 100$$

A continuación se aplica una extensión a las mordazas de manera que el tejido A queda plano, sin arruga ni tensión, mientras que el B se alarga como consecuencia de la extensión aplicada. En este estado se cosen los dos tejidos y a continuación se elimina la extensión entre mordazas. Finalizada esta operación, se mide el grosor del tejido en la línea de la costura para determinar si debido a la formabilidad del tejido se ha producido un arrugado de la costura. En estas condiciones el inicio del encorvamiento del tejido implica un incremento del grosor (arruga) y nos permite obtener el límite a partir del cual la sobrealimentación provoca una arruga en la costura.

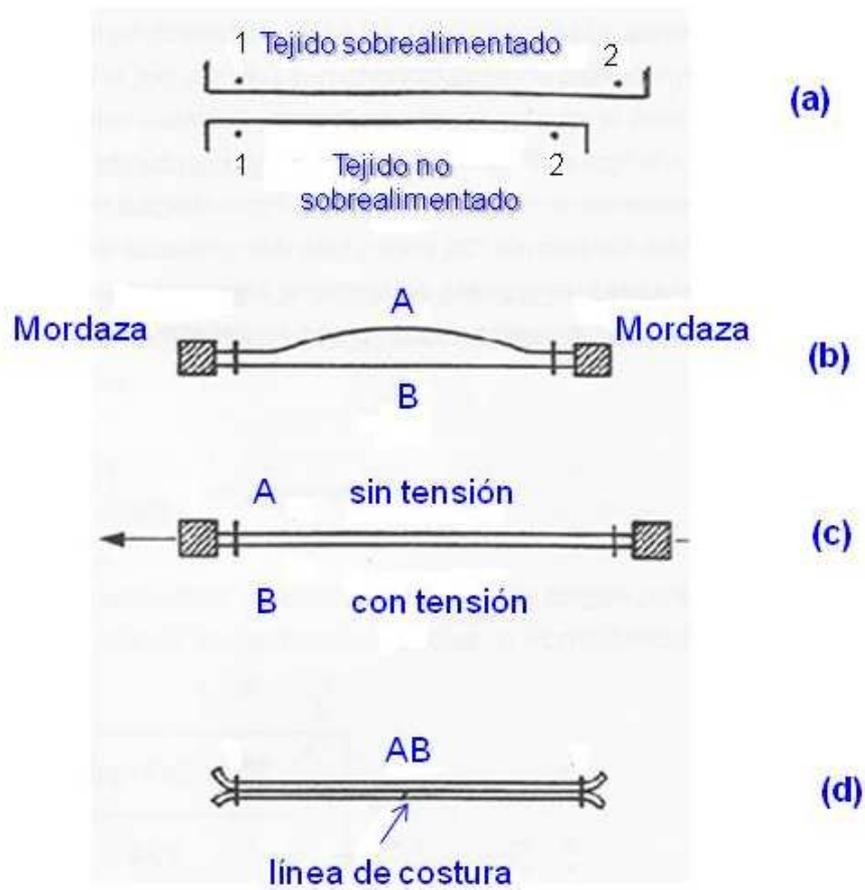


Figura 172. Experimento práctico en el que se estudian las relaciones de sobrealimentación, compresión longitudinal y arrugado de las costuras (71)

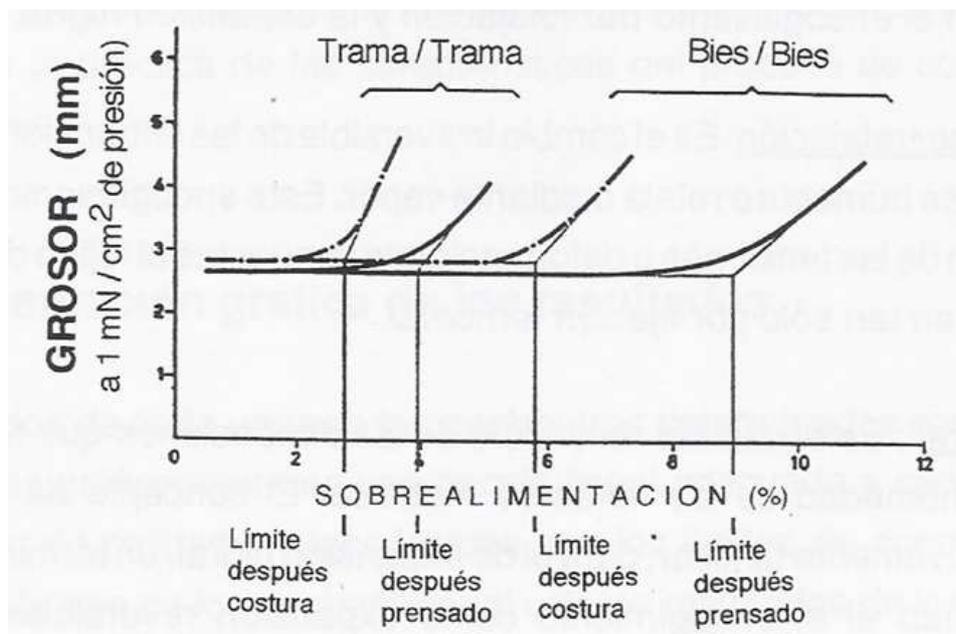


Figura 173. Relación entre el grosor de la costura y sobrealimentación (71)

El límite de sobrealimentación problemática es considerablemente más alto si la medida se realiza después del planchado con vapor, lo cual es lógico dado que esta operación se realiza precisamente para mejorar el aspecto de las costuras. El nivel máximo de sobrealimentación tolerada también depende de si la costura se realiza con orientación de los tejidos (urdimbre-urdimbre, trama-trama o bias-bias). En la figura 173 puede verse por una parte que la costura de los tejidos al bias permite una mayor sobrealimentación y por otra la influencia del planchado.

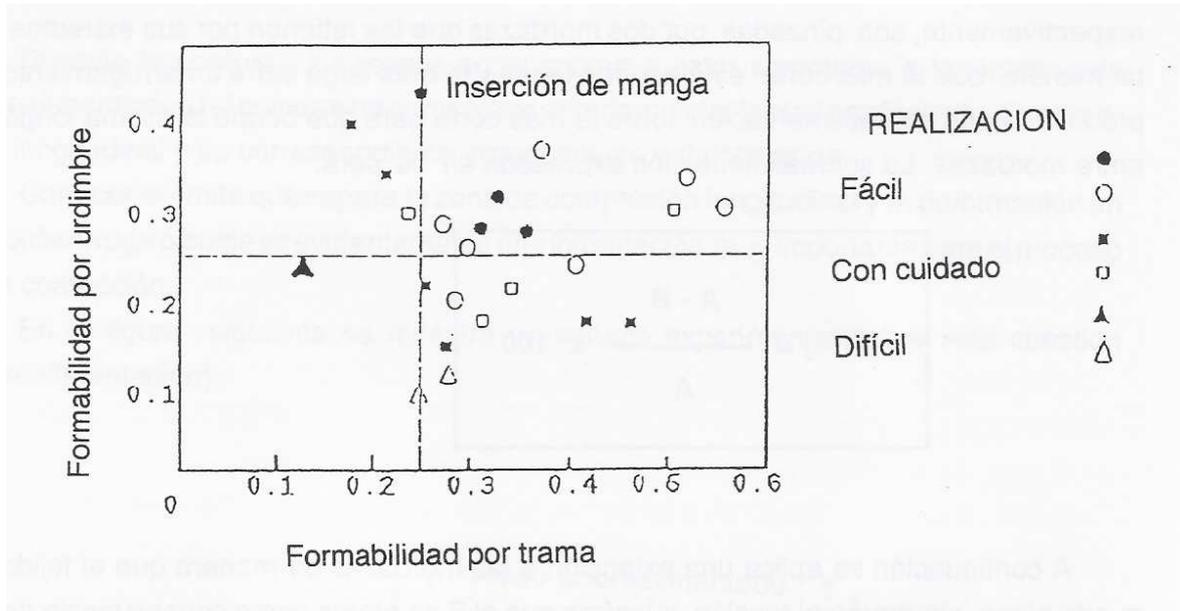


Figura 174. Confeccionabilidad de un tejido en función de su Formabilidad por urdimbre y trama (71)

### 7.1.3 FAST-4

El FAST-4 no requiere instrumentos especiales, sólo un método de ensayo. Requiere tan sólo un equipo convencional de laboratorio como es una estufa y regla. Mediante este método se determinan las dimensiones de las marca realizadas en las probetas de tejido en seco y en húmedo. A partir de estos valores pueden calcularse el encogimiento por relajación y la expansión higral.

Se entiende por encogimiento por relajación (ER) al cambio irreversible de las dimensiones que tiene lugar cuando un tejido se humecta o relaja mediante vapor. Este encogimiento es la consecuencia de la relajación de las tensiones o deformaciones impuestas al tejido durante el acabado y que se mantiene tan sólo por fijación temporal.

La expansión higral (EH) es el cambio reversible de las dimensiones que tiene lugar cuando el contenido de humedad de las fibras se modifica.

El peso específico con que ambos componentes de la estabilidad dimensional contribuyen a los problemas durante la confección y al aspecto de las prendas durante el uso, depende en la práctica de las características del proceso de confección o de las condiciones de uso.

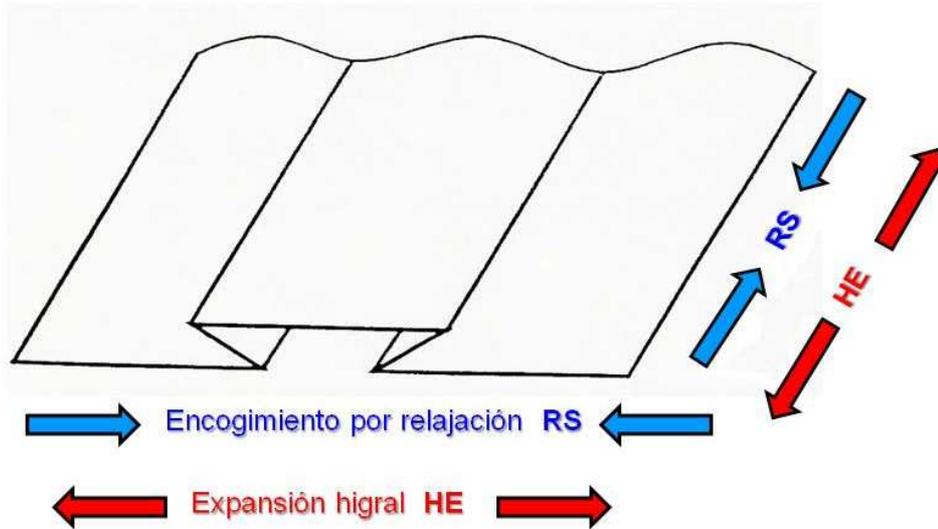


Figura 175. Encogimiento por relajación y expansión higral

En este ensayo se somete la probeta a un proceso de secado en una estufa convencional a 105°C durante 1 hora. A continuación se extrae la probeta de la estufa y se procede a leer la distancia entre las marcas de la probeta (por urdimbre y por trama), obteniendo las primeras lecturas del ensayo L1. A continuación se sumerge la probeta en agua destilada a temperatura ambiente durante 30 minutos. Al agua se la añade unas gotas de un tensoactivo humectante para facilitar la penetración del agua en el tejido. Al cabo de 30 minutos se extrae la probeta, se seca con unas toallas y se procede a realizar una segunda lectura de las marcas de la probeta obteniendo las lecturas L2. Finalmente la misma probeta se introduce en una estufa de secado y se mantiene durante 1 hora a 105°C. Finalizado este tiempo se extrae la probeta de la estufa y se mide las distancias entre las marcas obteniendo las lecturas L3. A partir de esta información se calcula el encogimiento por relajación (ER) y la expansión higral (EH), ver figura 176).

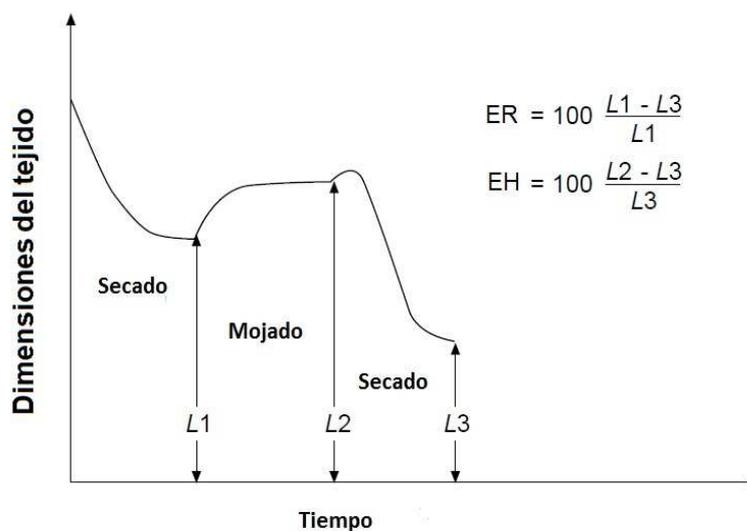


Figura 176. Diagrama esquemático del procedimiento de ensayo de la estabilidad dimensional del FAST-4 (71)

### 7.1.4 Representación gráfica de los resultados

Los resultados de cada uno de los parámetros determinados con el equipo FAST, son representadas gráficamente en carta de control formada por una escala lineal adecuada a cada parámetro. Al unir los resultados de los valores hallados de los diferentes parámetros se obtiene una línea quebrada que es distinta para tipo de tejido. Las zonas tramadas situadas en los márgenes derecho e izquierdo de cada parámetro marcan los límites de confeccionabilidad. Si los resultados se encuentran en el interior de éstas zonas tramadas nos indica que la confeccionabilidad de aquel tejido no es aceptable en aquel parámetro. Estas zonas se han obtenido al confeccionar centenares de tejidos analizados con el equipo FAST en procesos industriales de confección.

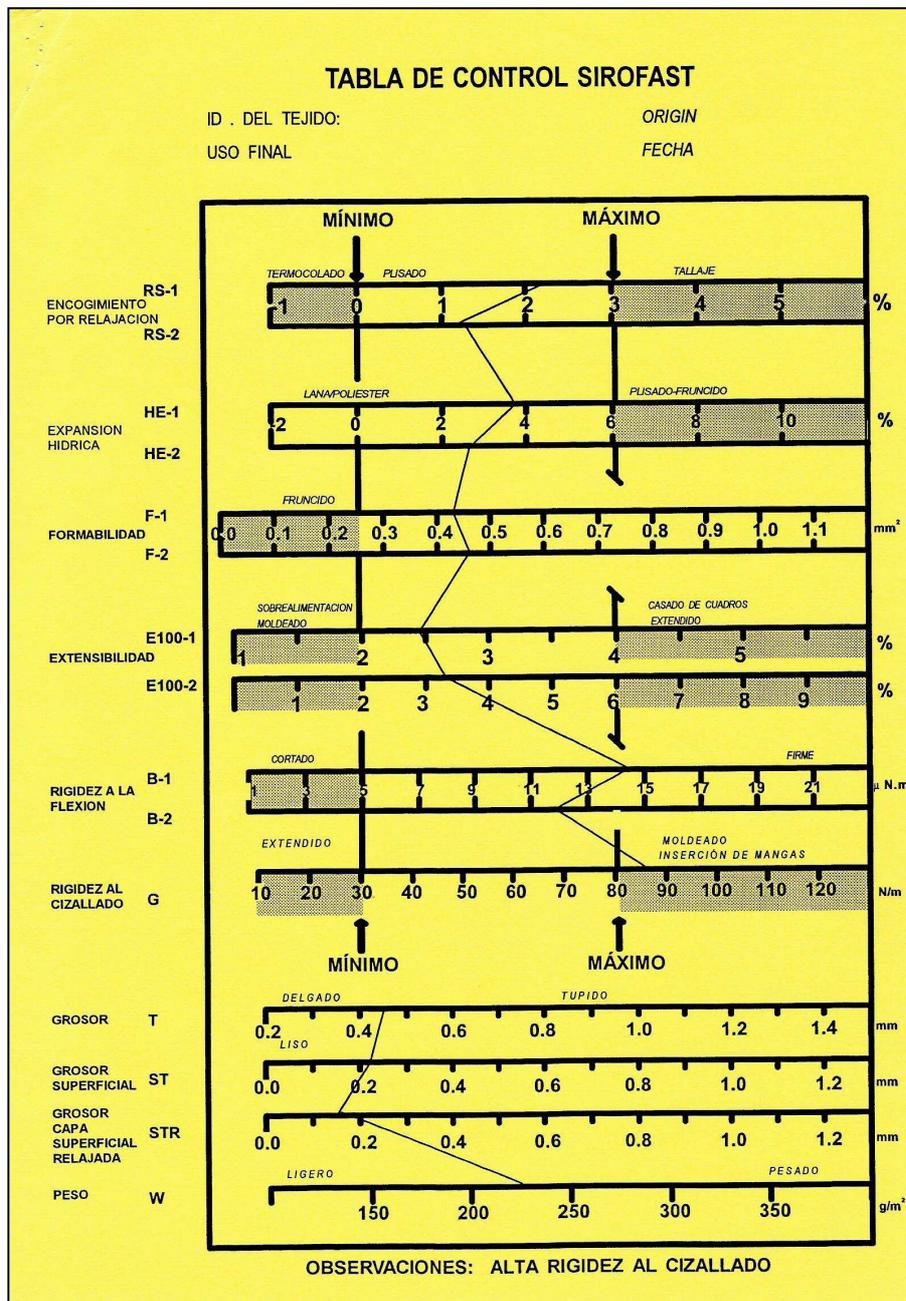


Figura 177. Informe del ensayo FAST

Excepto en el caso del ER y EH, si los resultados de un parámetro se encuentran dentro de las zonas tramadas no quiere decir que el tejido no pueda confeccionarse sino que simplemente la confeccionabilidad será delicada y requerirá mayor atención, delicadeza, habilidad y tiempo de manipulación. En este sentido una mala confeccionabilidad comporta un mayor coste de producción.

Los equipos FAST-1, FAST-2 y FAST-3 están conectados a un servidor y este a su vez a un ordenador que recoge de forma automática los resultados de cada ensayo sin necesidad de introducirlos manualmente (excepto los del ensayo FAST-4 que han de introducirse manualmente). Un software específico realiza los cálculos correspondientes a los diferentes parámetros indicados anteriormente y genera el informe final del ensayo.

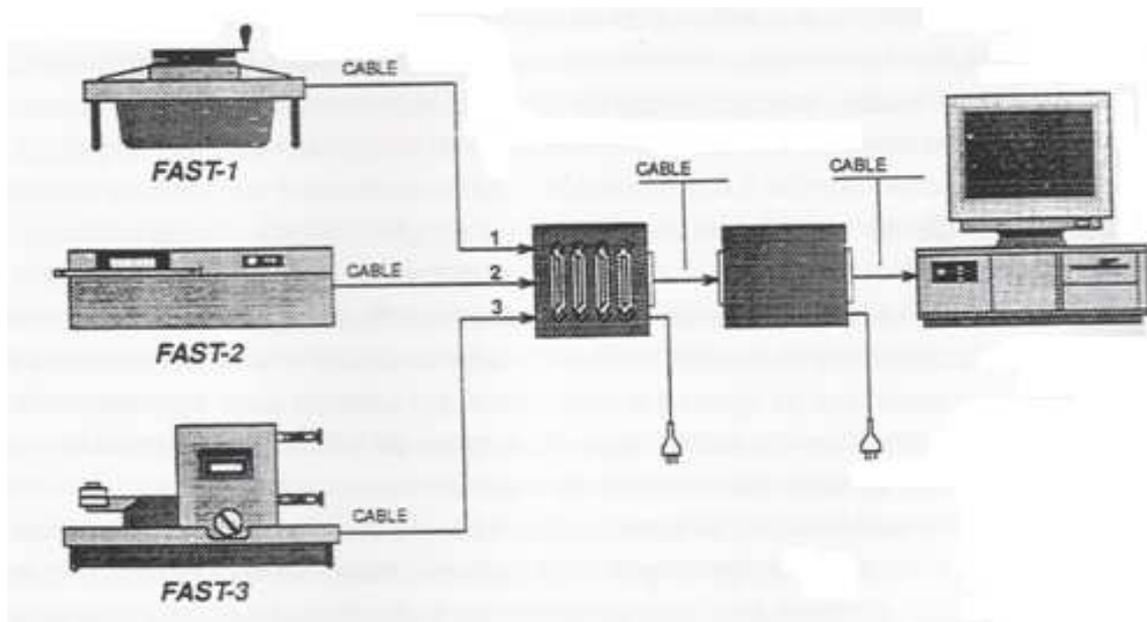


Figura 178. Esquema de la conexión de los diferentes aparatos FAST y el sistema informático (71)

## 7.1.5 Interpretación de los resultados FAST

### 7.1.5.1 Extendido

Si durante la operación de extendido del tejido para proceder a su corte, nos encontramos con un tejido que tiene una elevada extensibilidad o alargamiento por urdimbre, corremos el riesgo que una vez cortados los patrones el tejido recuperen la deformación en sentido urdimbre y los patrones encojan. El control de la tensión de desplegado del tejido durante el extendido por lo tanto tiene una importancia muy notable.

Por otra parte si la rigidez al cizallado del tejido es baja, el tejido puede arquearse o sesgarse durante el extendido dando lugar a piezas mal alineadas.



Figura 179. Operación de extendido. Fuente: [trazoycorteind](http://trazoycorteind)

### 7.1.5.2 Corte

La rigidez a la flexión del tejido ha de ser elevada para que el tejido pueda soportar las deformaciones provocadas por el vaivén de la cuchilla. Los que presenten una baja rigidez pueden ser muy difíciles de cortar. Esto puede solventarse, en parte, mediante mesas de corte con un sistema de vacío que provoque la aspiración del tejido y por lo tanto permitirá el corte del tejido como si fuera un bloque sólido.



Figura 180. Patrones cortados

Por otra parte el coeficiente de fricción tejido contra tejido (propiedad que no mide el equipo FAST) no ha de ser muy bajo para evitar el deslizamiento de las capas de tejido durante el corte. En este caso nos veríamos obligados a reducir la altura del “matelàs” reduciendo el rendimiento de la operación de corte.

### 7.1.5.3 Costura

Durante esta operación el tejido está controlado manualmente por el operario y por otra retenido ligeramente por la máquina de coser, en estas circunstancias es necesario un cierto grado de estabilidad del tejido cuando es comprimido en un mismo plano (alta formabilidad), unos adecuados niveles de rigidez a la flexión cizalladura un nivel elevado de fricción tejido-metal para evitar la distorsión del tejido.

La incorporación del hilo de coser en la estructura del tejido, provoca una reorientación de los hilos en el interior del tejido con el fin de mantener el tejido en posición plana. Con el fin de que no se produzcan arrugas en la zona de costura, su rigidez a la cizalladura ha de ser baja para permitir que los hilos que atraviesan los tejidos giren para acomodarse a la costura. Por otra parte la rigidez a la flexión debería ser alta para contrarrestar las fuerzas internas del tejido que tienden a doblarlo. La resistencia de las costuras dependerá finalmente también de la rigidez a la cizalladura del tejido.



Figura 181. Operación de costura. Fuente: [articulosweb](#)

Un tejido con baja extensibilidad y rigidez al cizallado con una elevada deformación cuando está sometido a compresión longitudinal en su propio plano (baja formabilidad), ocasionará, sin lugar a dudas graves problemas durante las operaciones de costura, en especial, en aquellas operaciones que se produzca cualquier sobrealimentación. La sobrealimentación se produce cuando se junta una pieza larga de tejido con otra de más corta (embebido de costuras). Éste fenómeno aparece casi siempre que se intenta conseguir una forma tridimensional que tiene que ser lisa y llena. Por otra parte una extensibilidad baja y rigidez al cizallado alta de los tejidos comportará dificultades de moldeado tridimensional de las formas.

Durante la confección de una prenda, como por ejemplo una americana, han de coserse una gran cantidad de costuras. La mayor parte de éstas se cosen en la dirección de la urdimbre y normalmente se juntan dos piezas de la misma longitud. Los problemas pueden presentarse cuando dos tejidos son muy extensibles o poco extensibles. Los tejidos muy extensibles o los que tienen una rigidez al cizallado baja, pueden deformarse durante el cosido, y si se trata de tejidos con dibujos, pueden presentarse problemas de alineamiento (casado). Por una parte si el tejido es poco extensible, no será capaz de acomodar el hilo de coser en la costura y se formaran arrugas.

Las costuras del hombro y de la sisa implican un cierto grado de sobrealimentación, de hecho cuando se unen dos piezas de tejido de diferente longitud, la parte más larga ha de embeberse la más corta. Éste fenómeno se produce en la inserción de la manga en la sisa, ya que la longitud correspondiente a la manga es mayor que la de la sisa. Esa diferencia de longitudes puede alcanzar hasta un 20% a favor de la manga.

Para soportar sin alteraciones una buena sobrealimentación es necesario que el tejido tenga una buena formabilidad, es decir que pueda resistir la compresión longitudinal sin que se doble o encorve.

Cuando se cose una costura, el hilo de coser comprime el tejido, si la formabilidad es alta, el tejido aceptará la compresión sin doblarse y la costura tendrá un buen aspecto.

#### 7.1.5.4 Plancha

El objetivo del planchado es eliminar las distorsiones de la superficie del tejido como por ejemplo las arrugas en la zona de costura, lo cual dependerá del nervio del tejido es decir de su rigidez a la flexión.

Por otra parte la presión máxima a la cual puede ser sometida un tejido está limitada por la necesidad de mantener inalterada la apariencia de la superficie del tejido. En este caso las propiedades mecánicas más importantes son la compresibilidad y resiliencia (capacidad de adaptarse a los cambios).



Figura 182. Sección de planca

Cuando a un tejido se le aplica una entretela por termofusión, sus propiedades cambian. El objetivo de la termofusión de entretelas es la de proporcionar mayor cuerpo a un tejido o mantener su forma, por lo que debe esperarse que se produzca un cambio en sus propiedades mecánicas. Variaciones de la estabilidad dimensional de los tejidos pueden originar graves problemas. Si el tejido tiene una expansión higral elevada y al realizar la termofusión se encuentra seco, cuando la humedad relativa cambie, el tejido absorberá la humedad y se expandirá. Un tejido de pañería que esté termofundido de forma irregular sobre una entretela, producirá una ondulación alrededor del borde de las partes termofusionadas.

El nivel de deformación del tejido dependerá del valor de la expansión higral que tenga. Cuando el tejido con entretela termofundida se cosa con otro sin entretela termofundida, pueden aparecer problemas debido a la diferente expansión higral a lo largo de la costura. En los casos más extremos, debido a la expansión se formarán arrugas o abombamientos en los tejidos con entretela termofusionada, imposibles de eliminar por planchado. Si nos fijamos en las zonas donde se localizan las deformaciones del tejido, veremos que tiene lugar en los bordes de tejidos que se superponen, como por ejemplo en la apertura central de la espalda. También se forman arrugas en las costuras ya que el tejido se expande y la costura no.



Figura 183. Efecto visual producido cuando el tejido y el hilo de coser presentan diferentes niveles de encogimiento.

En el plisado de un tejido para faldas, las dobleces de la falda se plisan manteniendo el tejido entre dos capas de papel de plisar, posteriormente se enrollan y se fijan en autoclave. Esto último reaccaba el tejido, fijando los pliegues. Si durante este proceso, el tejido se expande en lugar de encoger, el excesivo alargamiento del tejido provocará irregularidades a lo largo de los pliegues. En éste caso simultáneamente con los pliegues deseados se fijan también horribles deformaciones. Para lograr un buen plisado de los tejidos de lana, éstos han de tener un nivel mínimo de encogimiento por relajación que contrarreste la expansión higral que puede producirse y que asegure la conservación de la forma plana durante el proceso de plisado.

### 7.1.6 Aplicaciones del equipo FAST

El equipo FAST se diseñó inicialmente para cumplir dos objetivos:

- a) Predecir el comportamiento de los tejidos durante el proceso de confección industrial, ayudando de esta forma al confeccionista en el proceso de compra y selección de tejidos.
- b) Colaborar con el tejedor y acabador en la producción de artículos adecuados para su confección y transformarlos en prendas de vestir de calidad

Sin embargo esta tecnología se ha empleado con una gama de aplicaciones más amplia que incluyen:

- Estudio del efecto de los hilados fabricados con diferentes sistemas de hilatura sobre las propiedades de los tejidos
- Desarrollo de tejidos para prendas de alta calidad
- Comparación de los efectos de nuevos productos de acabado con los ya existentes
- Optimización de los procesos de acabado
- Evaluación de la eficacia de la maquinaria de acabado
- Planificación y diseño de acabados especiales
- Control de compra de tejidos
- Control de calidad rutinario

### 7.1.7 Videos sobre el ensayo FAST

*FAST - Fabric Assurance by Simple Testing.* Heriot Watt University  
<https://www.youtube.com/watch?v=f6LMOT6r9VA>

## 8. MANO DE LOS TEJIDOS

### 8.1 Concepto

Los humanos percibimos la realidad a través de nuestros sentidos y la interpretamos mediante patrones socioculturales que varían con el espacio y el tiempo. Ello explicaría como una misma realidad puede ser apreciada de forma muy distinta en las diferentes latitudes del planeta y aceptada o rechazada en función del momento histórico en que se plantea.

Un ejemplo paradigmático de este fenómeno es la denominada “mano” de los tejidos, es decir la valoración subjetiva que se realiza después de tocarlos y apreciar propiedades como la rigidez, suavidad, esponjosidad, calidez, etc. (71) Además del tacto, en la apreciación subjetiva de la calidad de un tejido se utiliza también el sentido de la vista que permite considerar su aspecto externo como el color, brillo o el cayente. Finalmente la decisión de compra será la suma ponderada de percepciones sensoriales descritas anteriormente, temporales (moda-cultura) y económicas (precio).

Según el profesor Mario Bona, *“la mano es algo desconocido que se esconde tras las propiedades medibles del tejido, siendo éstas su apariencia externa”*. (69, 71)

En la medida que la “mano” es al resultado de la interacción entre las diferentes propiedades físico-mecánicas, y por lo tanto objetivas, de los tejidos y de la percepción subjetiva que tenemos los humanos cuando evaluamos sensorial y culturalmente los tejidos, probablemente deberíamos abordar el estudio de éste fenómeno desde el paradigma de los fenómenos complejos y por tanto lejos del tradicional paradigma lineal y newtoniano de relación lineal causa-efecto. En este sentido el concepto de la “mano” en los tejidos se situaría territorio de las propiedades emergentes de los fenómenos complejos.

### 8.2 Formas de evaluación

La variación geográfica en la apreciación de la mano de los tejidos constituye una auténtica dificultad en una sociedad global donde habitualmente el diseño, la producción y el consumo de las prendas de vestir se encuentran muy distanciados territorialmente. En este contexto cualquier intento de objetivar evaluaciones subjetivas de las propiedades de los textiles es especialmente bienvenido. En las últimas décadas una notable cantidad de investigadores han centrado sus esfuerzos en desarrollar equipos y técnicas de medida de la mano basadas en dos métodos de evaluación: los indirectos y los directos. La principal diferencia entre ambos reside en los parámetros utilizados y las interpretaciones asociadas a la explicación del fenómeno (72).

Los métodos indirectos utilizan equipos que miden propiedades como la rigidez a la flexión, rugosidad o compresibilidad de los tejidos y posteriormente determinan sus correlaciones cruzadas con una evaluación subjetiva paralela. Los equipos más utilizados y conocidos son el Kawabata Evaluating System for Fabrics (KES-F) (18) y el Fabric Assurance by Simple Testing (FAST) (71).

Los métodos directos, en cambio, utilizan técnicas creativas e ingeniosas que intentan simular el comportamiento tradicional de los humanos al tocar los tejidos y determinar cuantitativamente aspectos de esta evaluación que han sido denominados como fuerza o

módulo de la mano (hand force or hand modulus). Estos métodos incluyen los ensayos del anillo (ring test) y el de la rendija (slot method).

### 8.3 El método Kawabata (KES-FB)

#### 8.3.1 Introducción

A través del tacto, el usuario efectúa una primera valoración sobre la confortabilidad que nos proporcionaría un tejido si se empleara como prenda de vestir. No obstante, esta determinación subjetiva, puede variar mucho en función de la sensibilidad, gustos, cultura y experiencia de quien lo valora. Esta problemática planteó la necesidad de disponer de una herramienta que permitiera valorar objetivamente los parámetros hasta entonces subjetivos de un tejido, de manera que pudieran utilizarse elementos de conexión entre la tecnología o proceso de fabricación de un determinado artículo y las prestaciones resultantes del producto (71).

En 1972, el Comité japonés para la Estandarización y Evaluación de la “mano” de los tejidos (HESC) desarrolló una metodología propia para la medición objetiva de éste parámetro. El comité estaba auspiciado por la Sociedad de Maquinaria Textil del Japón, y presidido por el Dr. [Sueo Kawabata](#).

La necesidad que tenían los ingenieros textiles japoneses de correlacionar las medidas subjetivas con otras de objetivas, siempre y cuando la medición de éstas fuera fácil de lograr, contribuyó de forma definitiva al desarrollo del equipo de medición objetiva de la mano de los tejidos KES-F.

Las iniciales KES-F, corresponden a “*Kawabata’s Evaluating System for Fabrics*”, equipo de medición objetiva de tejidos desarrollado por el ingeniero japonés Sueo Kawabata, después de casi 30 años de investigación (figura 184).

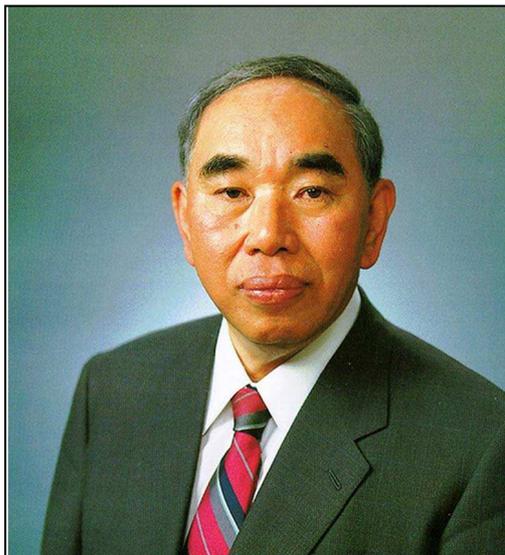


Figura 184. Imagen del profesor [Sueo Kawabata](#)

### 8.3.2. Objetivos del método KES-F

Originalmente, el objetivo del trabajo de Kawabata fue la evaluación objetiva de la “mano” del tejido (18), posteriormente se desarrolló un objetivo complementario no menos importante que consistía en poner a punto una técnica que relacionara las propiedades del tejido con la apariencia de la prenda confeccionada.

En forma resumida, el trabajo de Kawabata tenía los siguientes propósitos:

- Para un tejido con un uso final específico, decidir que términos descriptivos son los que mejor representan los aspectos cualitativos de la mano.
- Definir cada uno de éstos términos descriptivos.
- Hacer una colección de muestras estándar que represente éstas expresiones para la mano del tejido, dotándola de un rango de intensidades.

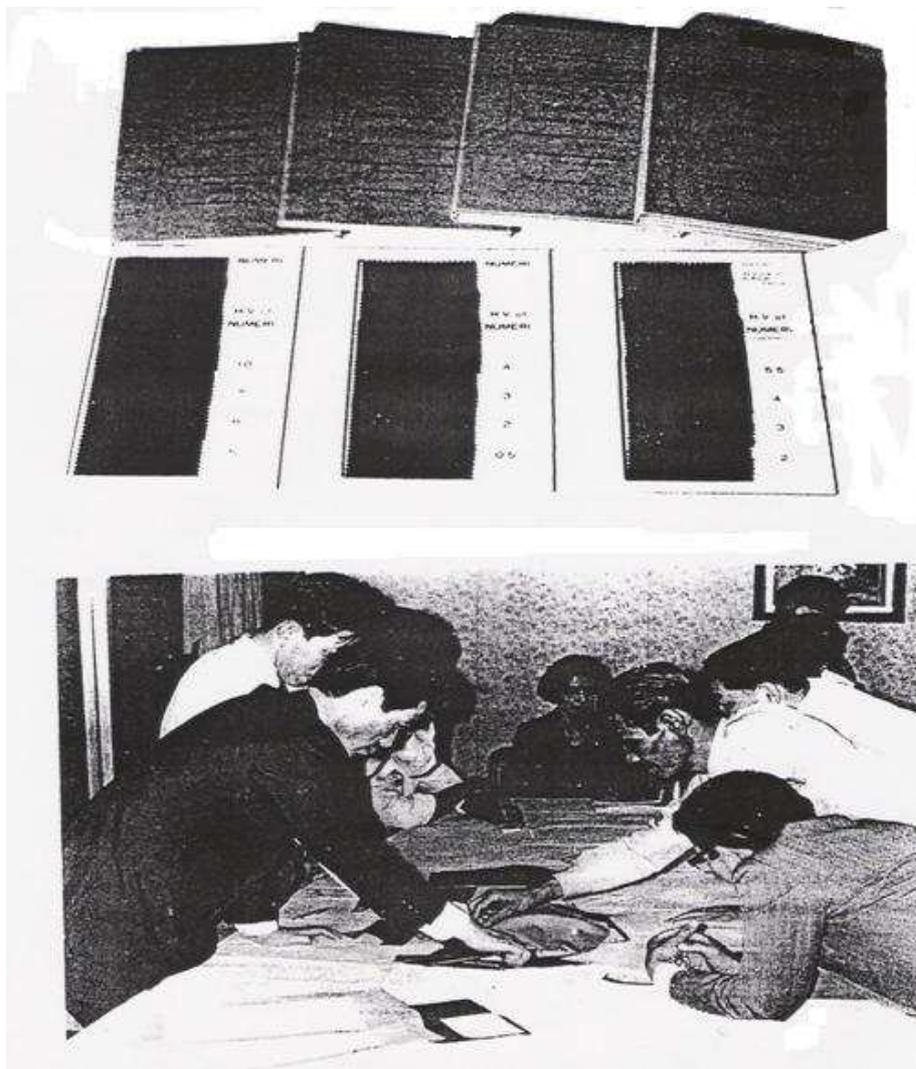


Figura 185. Evaluación de la mano primaria de tejidos por parte de expertos, mediante patrones

En los trajes de caballero, se hizo una diferenciación de las expresiones de mano primaria elegidas, distinguiendo si se trataba de una prenda de invierno o de verano. Los tejidos de mujer también tuvieron expresiones propias.

Los términos descriptivos que se consideraron apropiados para los tejidos destinados a trajes de invierno para caballero, fueron, por orden de importancia:

- NUMERI (lisura)
- KOSHI (rigidez)
- FUKURAMI (voluminosidad y suavidad)

y para los trajes de verano, en el mismo orden:

- SHARI (frescura)
- KOSHI (rigidez)
- HARI (rigidez anticaída)
- FUKURAMI (voluminosidad y suavidad)

y para la mujer, además:

- KISHIMI (sensación de crujiente)
- SHINAYAKASA (sensación de suavidad y flexibilidad)

La definición de cada uno de éstos términos la hicieron partiendo de la respuesta dada a las dos preguntas siguientes, formuladas para cada uno de ellos:

- ¿qué tipo de sensaciones están relacionadas con los términos descriptivos?
- ¿qué propiedades del tejido están relacionadas con la evaluación de la sensación?

Está claro que la definición de los términos descriptivos implicaba la necesaria vinculación con las propiedades mecánicas de los tejidos.

Después de hacer la definición de los términos, el comité formó muestras de tejidos que representaban valores de las expresiones o términos de mano en una escala de 0 a 10. Las calificaciones que recibía una muestra de tejido al compararse con los estándares, se consideraron valores de mano primaria (HV).

Las muestras se clasificaron en tres grupos (A, B y C) dependiendo de la intensidad de la expresión de la mano. Posteriormente, las muestras de cada una de las clasificaciones principales, son vueltas a clasificar en tres grupos nuevamente. Además de las 9 clasificaciones que son posibles de esta manera, se asignan dos más. Una, XH, a la izquierda de la de la mayor intensidad posible; y otra, XL, colocada a la derecha de la clasificación de la menor intensidad.

De 20 muestras analizadas por tantos expertos, se calcularon la media y la desviación estándar.

El conocimiento de los estadísticos muestrales permite que el análisis de los valores de mano (HV), se pueda hacer en una escala normalizada.

A partir de las expresiones de mano primaria HV, fué necesario definir una nueva expresión que las relacione. Kawabata llamó mano total (THV) a esta expresión sumaria. Con esta nueva expresión, se podría hablar de dos posibles calificativos: “buena” o “mala”. El calificativo de mano “buena” se expresa mediante el valor total de la mano (THV).

A partir de la información recogida de 214 tejidos de invierno y 156 de verano, sometidos a la evaluación anteriormente descrita, el grupo de Kawabata obtuvo las siguientes fórmulas de equivalencia entre la mano primaria HV y la mano total THV:

Para tejidos de invierno:

$$THV = 1,2293 + 0,5904 y_1 + 0,0441 y_1^2 - 0,0517 y_2^2 + 0,6317 y_3 + 0,0506 y_3^2$$

siendo:

$$y_1 = \text{HV de KOSHI}$$

$$y_2 = \text{HV de NUMERI}$$

$$y_3 = \text{HV de FUKURAMI}$$

y para tejidos de verano:

$$THV = -1,3788 - 0,0004 y_1 + 0,0006 y_1^2 + 0,7501 y_2 - 0,0361 y_2^2 + 0,5190 y_3 - 0,0369 y_4 + 0,2555 y_4 - 0,0352 y_4^2$$

siendo:

$$y_1 = \text{HV de KOSHI – verano}$$

$$y_2 = \text{HV de SHARI – verano}$$

$$y_3 = \text{HV de FUKURAMI – verano}$$

$$y_4 = \text{HV de HARI – verano}$$

Este par de ecuaciones sólo expresan la contribución que cada valor de mano primaria HV tiene sobre el valor de la mano total THV; aún no se había definido la forma en que se expresa la relación de los valores de mano primaria HV con las mediciones de las propiedades mecánicas de los tejidos.

### 8.3.3 Medición de las propiedades mecánicas del tejido

Después de un largo trabajo de investigación, Kawabata seleccionó un conjunto de propiedades mecánicas que se asocian a las deformaciones del tejido (ver figura 185), pensando ya en las condiciones de medición, dividiéndolas en los siguientes grupos:

Grupo 1 = Tracción

Grupo 2 = Flexión

Grupo 3 = Superficie

Grupo 4 = Cizalladura

Grupo 5 = Compresión

Grupo 6 = Masa lineal y Grosor

A pesar de que el Grupo 3 y 6 no representan propiedades mecánicas sino físicas, éstas están directamente relacionadas con las propiedades mecánicas. Cada una de estas propiedades se expresa por un parámetro característico, tal como puede verse en la tabla 16.

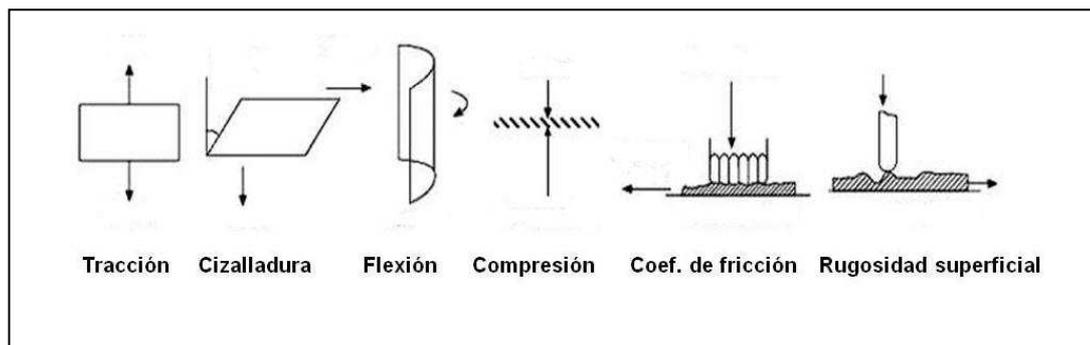


Figura 186. Grupos de ensayo KES-F (53)



Figura 187. Equipo KES-F del Laboratorio de física textil del Departamento de Ingeniería Textil de la Universidade do Minho en Guimeraes (Portugal)

Propiedades	Símbolo	Parámetro característico	Unidad
Tracción	LT	Linealidad	--
Tracción	WT	Energía de tracción	g·cm/cm <sup>2</sup>
Tracción	RT	Resiliencia	%
Flexión	B	Rigidez a la flexión	g·cm <sup>2</sup> /cm
Flexión	2HB	Histéresis	g·cm <sup>2</sup> /cm
Cizalladura	G	Rigidez a la cizalladura	g/cm·grado
Cizalladura	2HG	Histéresis en $\varnothing = 0,5^\circ$	g/cm
Cizalladura	2HG5	Histéresis en $\varnothing = 5^\circ$	g/cm
Compresión	LC	Linealidad	--
Compresión	WC	Energía compresional	g·cm/cm <sup>2</sup>
Compresión	RC	Resiliencia	%
Superficie	MIU	Coefficiente de fricción	--
Superficie	MMD	Desviación media de MIU	--
Superficie	SMD	Aspereza geométrica	Micra
Peso y Grosor	W	Peso por unidad de área	mg/cm <sup>2</sup>
Peso y Grosor	T	Grosor a 0,5 gf/cm <sup>2</sup>	mm

Tabla 16. Propiedades mecánicas medidas por el equipo Kawabata, simbología utilizada, parámetros y unidades (53)

### 8.3.3.1 Tracción

Mide la energía empleada al someter la probeta rectangular de tejido (5 cm de largo y 20 cm de ancho, figura 188) a una tensión axial de pequeña intensidad (500 g) tanto en sentido urdimbre como de trama. La deformación tensil se aplica en sentido longitudinal. La tensión a lo ancho de la probeta es aproximadamente cero debido a la forma rectangular de la probeta. La probeta es sometida a un gradiente de tensión constante de  $4,0 \times 10^{-3}$  segundos. Una vez alcanzada la tensión de 500 gf/cm se mide el proceso de recuperación, obteniéndose habitualmente una curva como la de la figura 189.

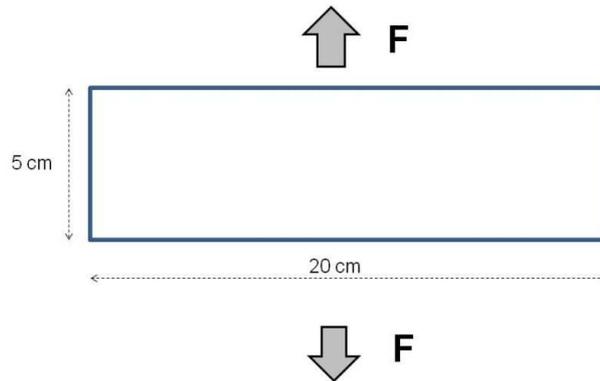


Figura 188. Dimensiones de la probeta del ensayo de tracción en el equipo KES-F (53)

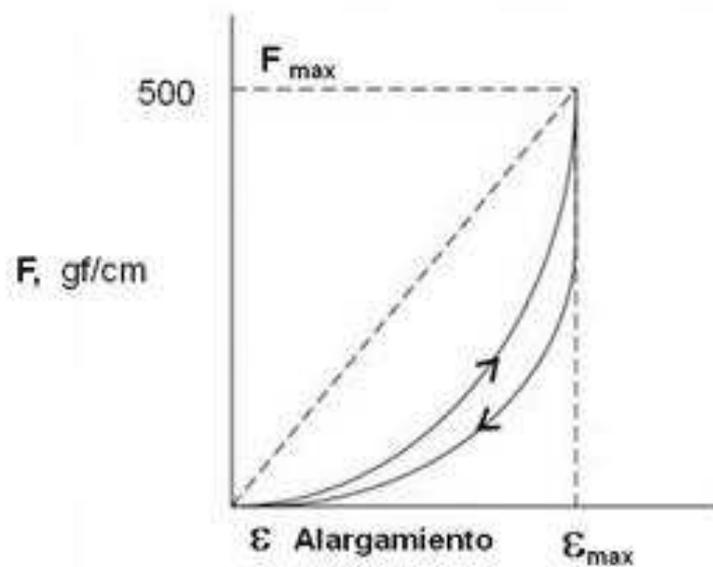


Figura 189. Curva tensión-alargamiento del ensayo de tracción del equipo KES-F.(71)

Los parámetros característicos de este ensayo son:

$LT$  = Linealidad (sin unidades)

$WT$  = Energía tensil por unidad de área ( $\text{g}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$ )

$RT$  = Resiliencia (%)

Y estos parámetros característicos se definen como:

$$LT = WT/WOT$$

$$WT = \int_0^{\varepsilon_m} F \cdot d\varepsilon \text{ (g}\cdot\text{cm/cm}^2\text{)}$$

$$RT = \frac{WT'}{WT} \cdot 100$$

donde:

$$WOT = \frac{F_m \cdot \varepsilon_m}{2} \text{ (área rodeada por la línea punteada)}$$

$F$  = Fuerza de tracción por unidad de ancho (g/cm)

$\varepsilon$  = Alargamiento correspondiente a la carga aplicada, no se expresa en %

$F_m$  y  $\varepsilon_m$  = valores máximos de  $F$  y  $\varepsilon$  respectivamente

$$W'T = \int_0^{\varepsilon_m} F' \cdot d\varepsilon \text{ (energía recuperada por unidad de área)}$$

$F'$  = Fuerza tensil en el proceso de recuperación (g/cm)

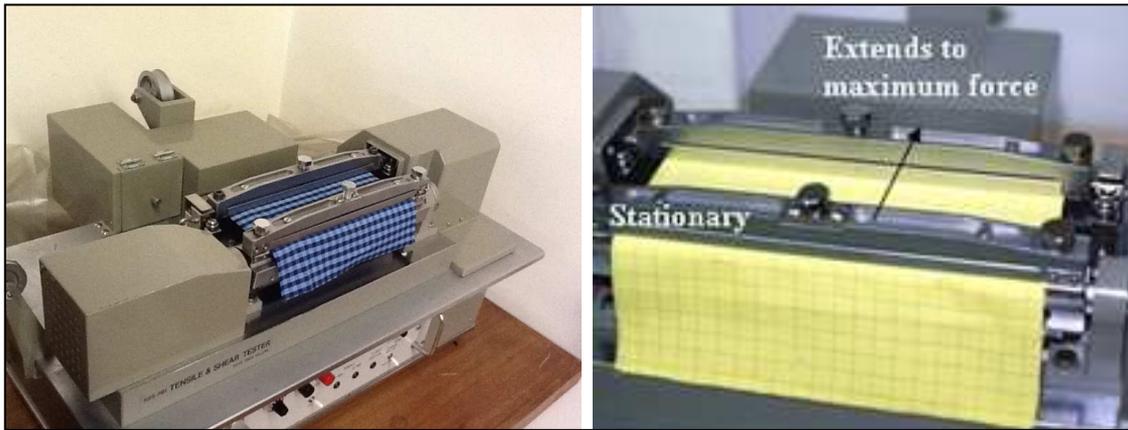


Figura 190. Izquierda: Unidad de medida de la tracción y cizalladura del equipo KES-FB del Laboratorio de física textil de la Universidade do Minho en Gumaraes (Portugal). Derecha: movimiento de las mordazas planas en el ensayo de tracción (fuente: [NC State University](#))

Si la tensión se aplica en el sentido de la urdimbre, los parámetros característicos se reconocen por el subíndice 1 y si es en sentido trama por el subíndice 2 ( $WT_1$ ,  $RT_1$ ,  $WT_2$ ,  $RT_2$  ...). Para el cálculo de la mano se utilizará el promedio entre los valores de urdimbre y trama.

$\varepsilon_m$  se utiliza con frecuencia y usualmente  $\varepsilon_{m1}$  y  $\varepsilon_{m2}$  se expresan de forma abreviada como  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  respectivamente. Esta es la relación entre ellos de tal manera que:

$$\varepsilon_m = \frac{2(WT)}{(LT) \cdot F_m} = \frac{(WT)}{250(LT)}$$

La figura 190, muestra el aspecto del módulo KES FB-1. La probeta es pinzada por dos mordazas de 20 cm de largo. Una de las mordazas es móvil y está montada sobre una base deslizante, la cual tensiona el tejido en sentido contrario. La tensión generada por este movimiento se detecta midiendo el momento de torsión del tambor y el alargamiento mediante el desplazamiento de la base deslizante, tal como puede verse en la figura 191. La deformación aplicada es aproximadamente biaxial.

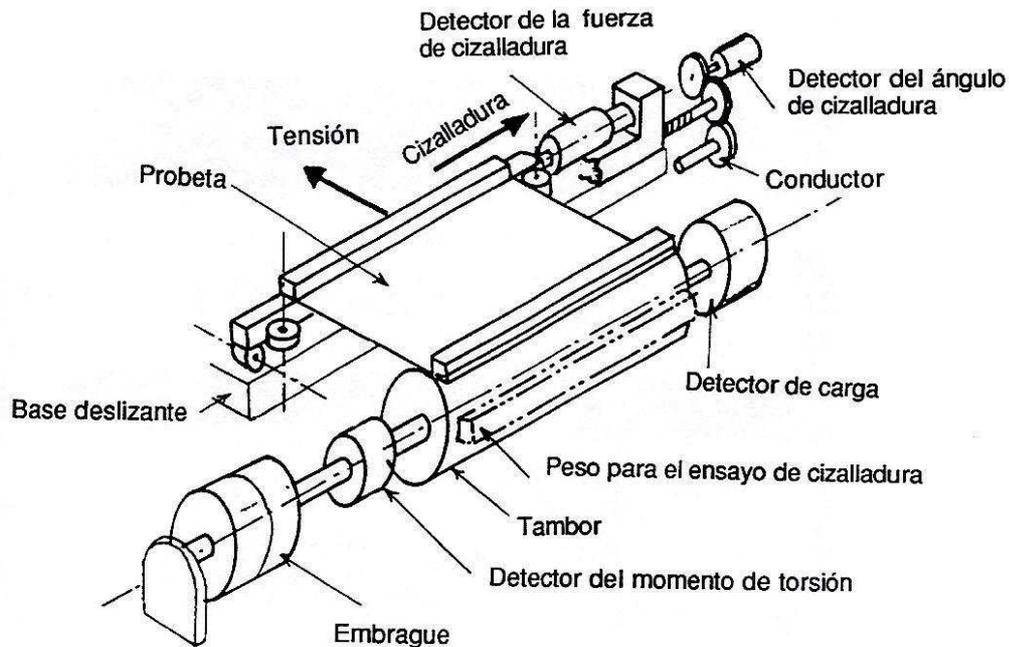


Figura 191. Principio de funcionamiento de la unidad de medida de la tensión y cizalladura del KES FB1. (71)

### 8.3.3.2 Flexión

A diferencia del equipo FAST, el ensayo de flexión del método KES-FB no utiliza el principio del voladizo, donde el tejido se deforma (flexiona) por acción de su propio peso, sino que mide la energía empleada al flexionar un tejido verticalmente y sin influencia del peso del tejido (flexión pura). Para realizar el ensayo de flexión pura, la probeta se flexionará tal como se muestra en la figura 192, donde uno de los extremos de la probeta se fija en el punto cero, y el otro se mueve formando distintos arcos que siguen las ecuaciones mostradas a continuación.

$$X = \frac{1 - \cos K}{K}$$

$$Y = \frac{\text{sen } K}{K}$$

$$\phi = \frac{\pi}{2} - K$$

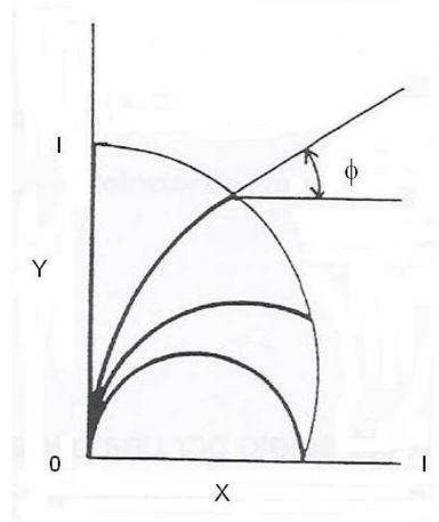


Figura 192. Centro del punto móvil de la probeta y el ángulo tangencial necesario para conseguir una deformación por doblado cuando la longitud ensayada es de 1 cm (71)

El movimiento del extremo móvil de la probeta se realiza mediante el mecanismo de cigüeñal mostrado en la figura 193.

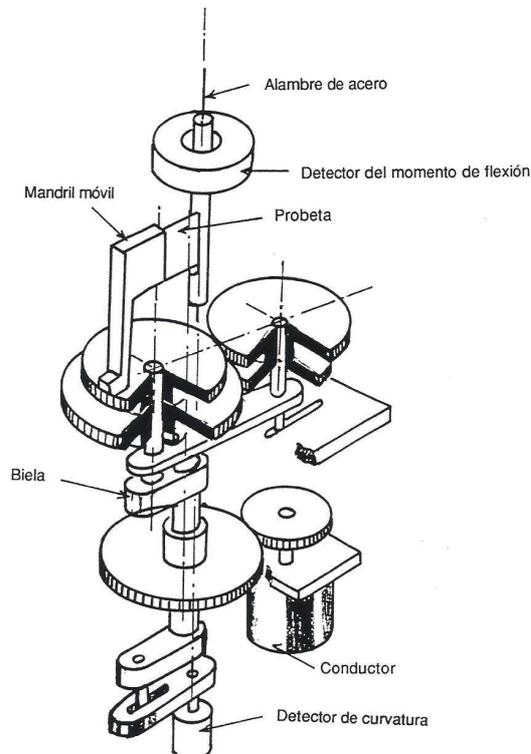


Figura 193. Principio de funcionamiento del medidor de flexión pura del KES FB-2 (71)

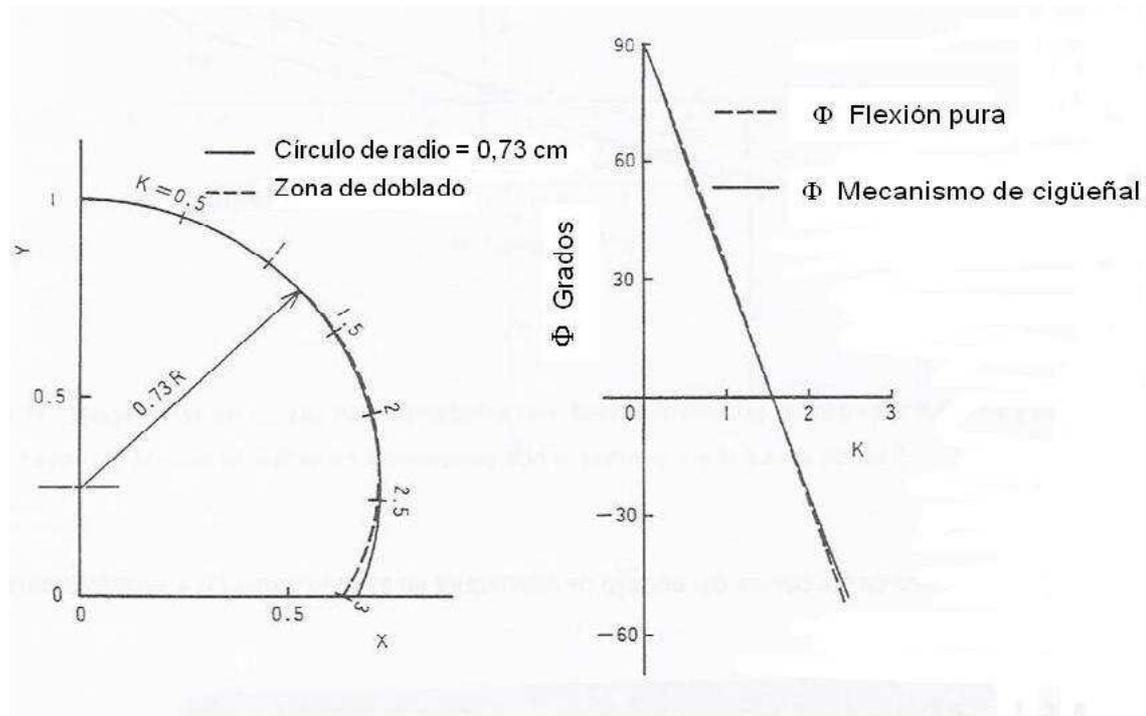


Figura 194. El centro del punto móvil y ángulo tangencial de la probeta KES FB2 mostrado mediante una línea discontinua y comparado con los valores requeridos mostrado en línea continúa. La línea continúa está muy cerca de la línea ideal requerida para la flexión pura en el rango  $-2,5 < K < 2,5$ . (71)

La probeta tiene unas dimensiones efectivas de 2,5 cm de largo por 1 cm de ancho. La flexión pura entre las curvas  $K = -2,5$  y  $2,5$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) con un incremento constante del cambio de curvatura. Este incremento es de  $0,5$  ( $\text{cm}^{-1}$ )/segundo. La probeta se coloca de forma vertical tal como se indica en la figura 192 para evitar el efecto de la fuerza de la gravedad.

Los parámetros característicos son:

$$B = \text{Rigidez a la flexión por unidad de longitud (g}\cdot\text{cm}^2/\text{cm)}$$

$$2HB = \text{Momento de histéresis por unidad de longitud (g}\cdot\text{cm/cm)}$$

$B$  es la pendiente de la curva  $M - K$  donde  $M$  es el momento de flexión por unidad de longitud de la probeta. En este caso se ha vuelto a definir  $B$  y  $HB$  para estandarizar la medición:

$B$  se define como la pendiente entre  $K = 0,5$  para  $B_f$  y  $K = -0,5$ , y  $-1,5$  para  $B_b$  respectivamente.

Por otra parte  $B_f$ ,  $B_b$ ,  $B_1$  y  $B_2$  de acuerdo con la figura 191 se definen como:

$B_f$  = valor de la rigidez a la flexión del haz del tejido.

$B_b$  = valor de la rigidez a la flexión del envés del tejido

$B_1$  = valor de la rigidez a la flexión de la urdimbre

$B_2$  = valor de la rigidez a la flexión por trama

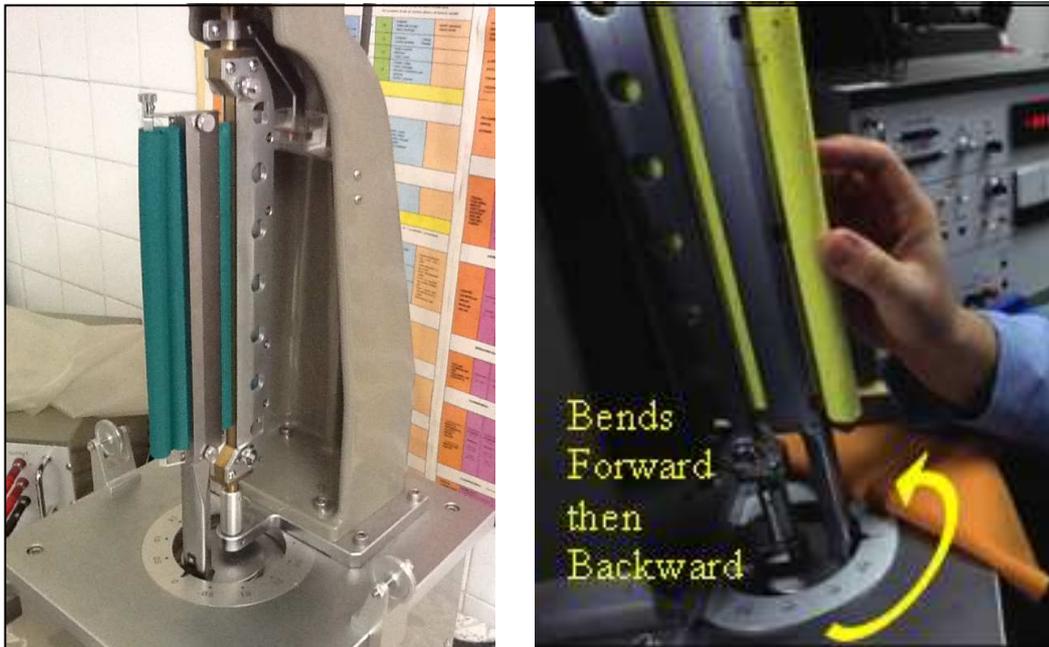


Figura 195. Izquierda: Unidad de medida de la flexión en el equipo KES-FB del Laboratorio de parametría física textil. Instituto de Investigación Textil y de Cooperación Industrial de Terrassa. Universitat Politècnica de Catalunya. Derecha: movimiento del cabezal para determinar el comportamiento a la flexión (fuente: [NC State University](#))

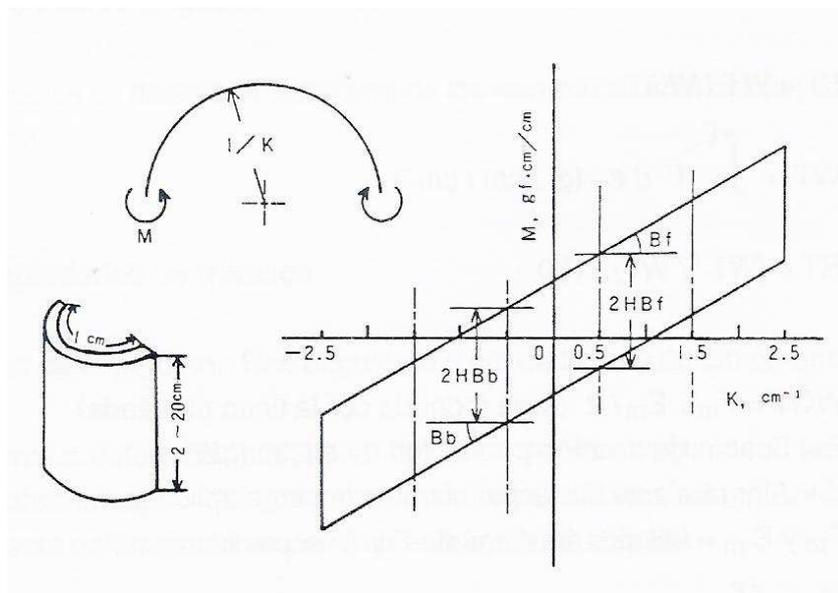


Figura 196. Forma de flexionar la probeta del ensayo de flexión y representación gráfica de los resultados del ensayo en el equipo KES-F. (71).

Definimos también como curvatura positiva la flexión por el haz y curva negativa la flexión por el envés. Si la curva obtenida es como la de la figura 194, tanto la rigidez a la flexión el haz como del envés pueden ser medidas al mismo tiempo.  $2HB$  significa el doble del valor  $HB$  y puede medirse como la amplitud de la histéresis.

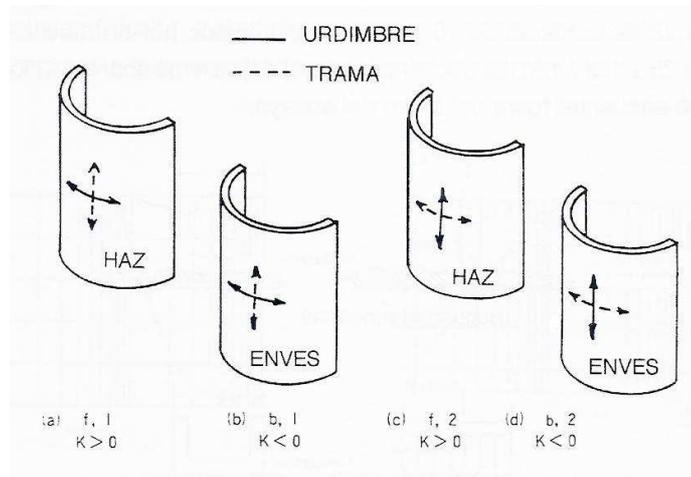


Figura 197. Forma de flexionar la probeta del ensayo de flexión con el equipo KES-FB,  $f$  = haz,  $b$  = envés. (71)

En este caso definiremos los siguientes conceptos:

$2HB$  es el valor medio de la amplitud de la histéresis comprendida entre  $K = 0,5$  y  $1,5$  para  $2HB_f$  y  $K = -0,5$  y  $-1,5$  para  $2HB_b$ . Al mismo tiempo tendremos también  $2HB_f$ ,  $2HB_b$ ,  $2HB_1$  y  $2HB_2$ .

Para el cálculo de la mano primaria (HV) se utilizará la media de los valores correspondientes a  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $b_1$  y  $b_2$ . Sin embargo si es necesario pueden utilizarse separadamente en función de la propiedad que queremos valorar.

### 8.3.3.3 Cizalladura

Mide la energía empleada en el proceso de distorsión lateral de la probeta, es decir en la cizalla de la probeta. Las dimensiones de la probeta (20 x 5 cm) se muestran en la figura 195, donde puede verse la deformación de cizalladura (o distorsión lateral) que sufre el tejido durante este ensayo.

Tal como puede verse en la figura 196, la tensión  $W$  (constante) se aplica en el sentido ortogonal a la fuerza de cizalladura. Esta deformación se produce cuando se solapa la deformación biaxial y la cizalladura. La velocidad de cizallado es de 0,417 mm/segundo y el recorrido realizado por la tensión de cizalladura es de 0,00834/segundo.

Las propiedades de cizalladura se miden en el mismo módulo que la tensión axial (figura 190). El embrague de la base móvil se mueve en sentido paralelo al eje del tambor y aplica la deformación de cizalladura a la probeta. La fuerza de cizalladura se detecta mediante el transductor acoplado al final del embrague móvil. Durante la medición, la conexión entre el tambor y su eje fijo, se desconecta después de haber colocado la muestra y el peso muerto aplicado sobre la superficie del tambor para conseguir un giro constante del mismo. Este momento se aplica un esfuerzo constante  $W$  a la probeta

durante el ensayo de cizalladura. En la figura 196, puede verse el aspecto de la probeta durante el ensayo y en la 197 la correspondiente curva de deformación.

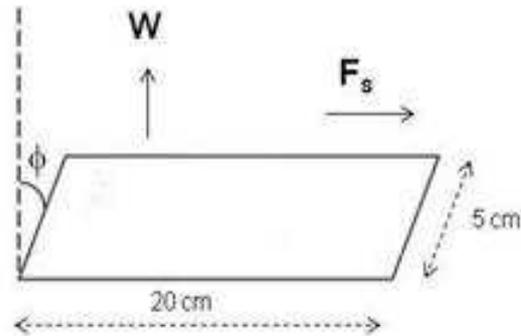


Figura 198. Dimensiones de la probeta y distorsión lateral del tejido en el KES-FB (71)

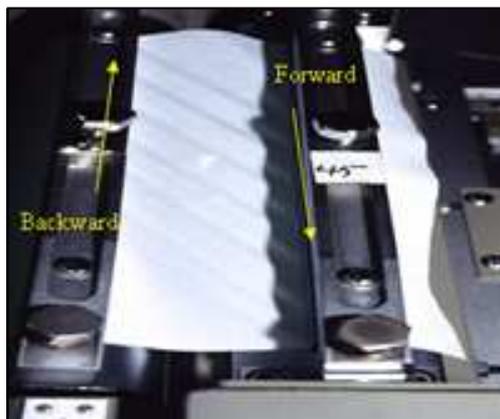


Figura 199. El ensayo de cizalladura realizado con el mismo equipo de medida de la tracción pero con el desplazamiento lateral de una de las mordazas. (fuente: [NC State University](#))

Los parámetros característicos de este ensayo son:

$G$  = Rigidez a la cizalladura (g/cm·grados)

$2HG$  = Histéresis a un ángulo de deformación de cizallado  $\phi = 0,5$  grados (g/cm)

$2HG5$  = Histéresis a un ángulo  $\phi = 5$  grados (g/cm)

Nótese que  $G$  no es el módulo de rigidez. En este caso  $G$ , se define como (fuerza de cizalladura por unidad de longitud/ángulo de cizalladura). En la figura 194 puede verse como la pendiente de  $F\phi$  es igual a  $G$ . En las mediciones estándar, la pendiente se mide entre  $\phi = 0,5^\circ$  y  $5^\circ$ . Si la curva no fuera lineal en esta zona, se debe tener en consideración el valor medio de la pendiente.

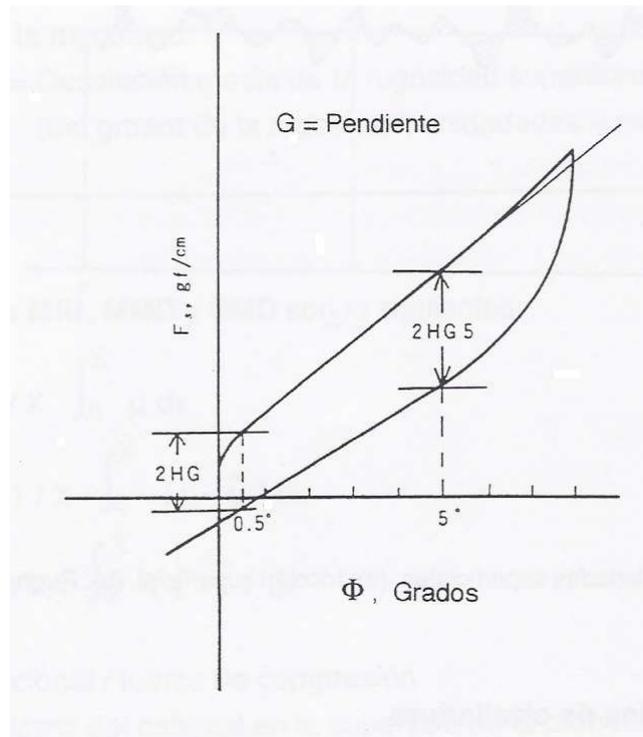


Figura 200. Gráfico del ensayo de la cizalladura y su histéresis (71)

En las mediciones estándar, se mide mediante  $G_f$ . Siendo  $G_f$  el valor de  $G$  cuando la cara de la probeta es el haz de la muestra. Si consideramos la fuerza de la cizalladura en lugar del ángulo para definir el parámetro  $G$ , entonces este valor es igual al módulo de cizallado y es definido (fuerza de cizalladura  $F_s$  (g/cm) / (fuerza de cizalladura =  $\tan \phi$ ). Las unidades son g/cm, la relación entre los dos valores de  $G$  definidos por  $\tan \phi$  y por los grados es:

$$G (\tan \phi) = 57,30 G (\text{grados } \phi)$$

En probetas que no tengan una estructura de tejido simétrica, la curva de deformación de cizalladura será diferente entre la zona positiva y negativa. En este caso concreto, es necesario realizar la medida de ambas regiones, utilizándose la media para los ensayos estándar.

### 8.3.3.4 Compresión

Mide la energía consumida en el proceso de compresión transversal de la probeta. En la figura 198 se muestra el esquema del principio de funcionamiento de este aparato.

Dado que el área de compresión es un círculo de  $2 \text{ cm}^2$ , la probeta ha de ser un rectángulo de 2,5 cm de largo y 2 cm de ancho, tomadas en sentido urdimbre o trama.

La probeta de tejido se comprime entre dos placas circulares de acero de  $2 \text{ cm}^2$ . La velocidad de compresión es de 20 micras/segundo y la presión alcanza un nivel de  $50 \text{ g/cm}^2$ . El proceso de recuperación se mide a la misma velocidad. Para tejidos delgados (ligeros) de caballero, la velocidad de medida de éste parámetro se reduce a 6,66 micras/segundo.

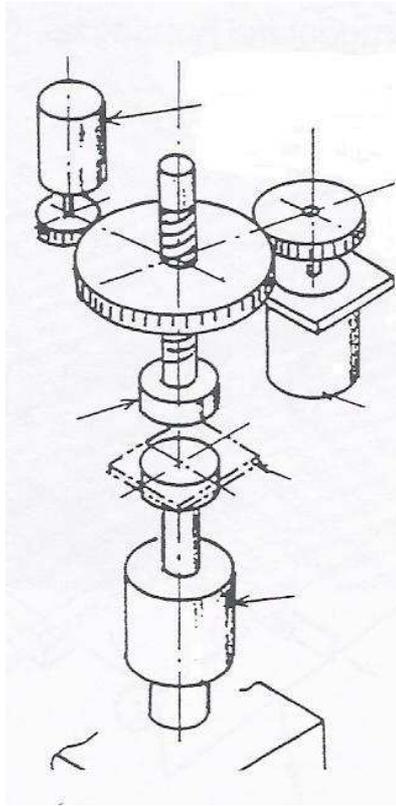


Figura 201. Principio de funcionamiento del medidor KES FB3 (71)

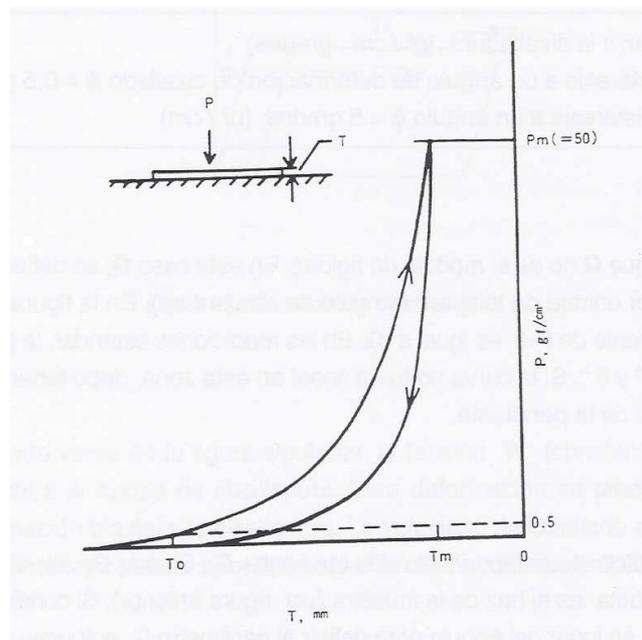


Figura 202. Izquierda: Unidad de medida del grosor en el equipo KES-FB del Laboratorio de parametría física textil. Instituto de Investigación Textil y Cooperación Industrial de Terrassa. Universitat Politècnica de Catalunya. Derecha: Expresión gráfica de los resultados del ensayo de compresión (53)

Los parámetros característicos de este ensayo son:

$LC$  = Linealidad (sin unidades)

$WC$  = Energía necesaria para la compresión (g-cm/cm<sup>2</sup>)

$RC$  = Resiliencia (%)

siendo:

$$LC = WC / WOC$$

$$WC = \int_{T_m}^{T_0} P dT$$

$$RC = WC' / WC$$

donde:

$T$  = grosor de la probeta

$T_0$  = Grosor de la probeta a la presión de 0,5 g/cm<sup>2</sup>·cm

$T_m$  = Grosor de la probeta a la presión  $P_m = 50$  g/cm

$$WOC = P_m (T_0 - T_m) / 2$$

$WC'$  = Energía recuperada en el proceso de recuperación  $P'$

$$WC' = \int_{T_m}^{T_0} P' dt$$

### 8.3.3.5 Superficie

Mide tanto el coeficiente de fricción como la rugosidad superficial de la probeta de tejido al rozar con un cabezal de medida a baja velocidad (figura 203). El tamaño de la probeta será de 20 cm de largo y 3,5 cm de ancho, sin embargo esta medida es sólo nominal dado que en el ensayo se utilizará una superficie de medida de 2 cm de largo por 0,5 cm de ancho.

La medición de la fricción superficial y la rugosidad se realiza de la manera siguiente: el cabezal para la medida de la rugosidad superficial está hecho de cuerda de piano de acero de un diámetro de 0,5 mm. La forma de la cuerda se indica en la figura 204 y trabaja con una fuerza de contacto de 10 g ( $\pm 0,5$  g), activada por un muelle-resorte de una constante de  $25 \pm 1$  g/mm. La frecuencia natural del sistema sobrepasa los 30 Hz cuando el cabezal se encuentra fuera del límite del ensayo.

La fricción superficial se mide mediante un cabezal formado por la unión de 10 piezas de cuerda de piano (figura 204), del mismo tipo que el usado en el cabezal de la rugosidad, dispuestas de tal manera que rocen con la superficie del tejido con una fuerza de compresión de 50 g de peso muerto.

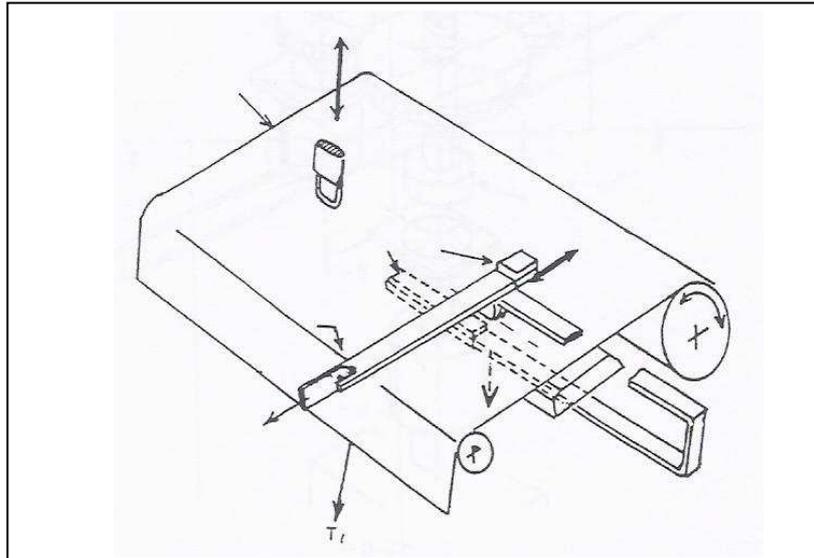


Figura 203. Principio de medición de las propiedades superficiales del tejido en el KES FB4 (71)

Tanto en la medida de la rugosidad como de la fricción superficial, la probeta se desplaza un intervalo de 2 cm a una velocidad constante de 0,1 cm/segundo sobre una placa de acero plana colocada horizontalmente, que somete a la probeta a una tensión de 20 g/cm.

Los parámetros característicos son:

Medida de la fricción:

$MIU$  = Valor medio del coeficiente de fricción (sin unidades)

$MMD$  = Desviación media del coeficiente de fricción (sin unidades)

Medida de la rugosidad:

$SMD$  = Desviación media de la rugosidad superficial (del grosor de la rugosidad, en micras)

Las definiciones de  $MIU$ ,  $MMD$  y  $SMD$  son las siguientes:

$$MIU = \frac{1}{X} \int_0^X \mu \, dx$$

$$MMD = \frac{1}{X} \int_0^X |\mu - \bar{\mu}| \, dx$$

$$SMD = \frac{1}{X} \int_0^X |T - \bar{T}| \, dx$$

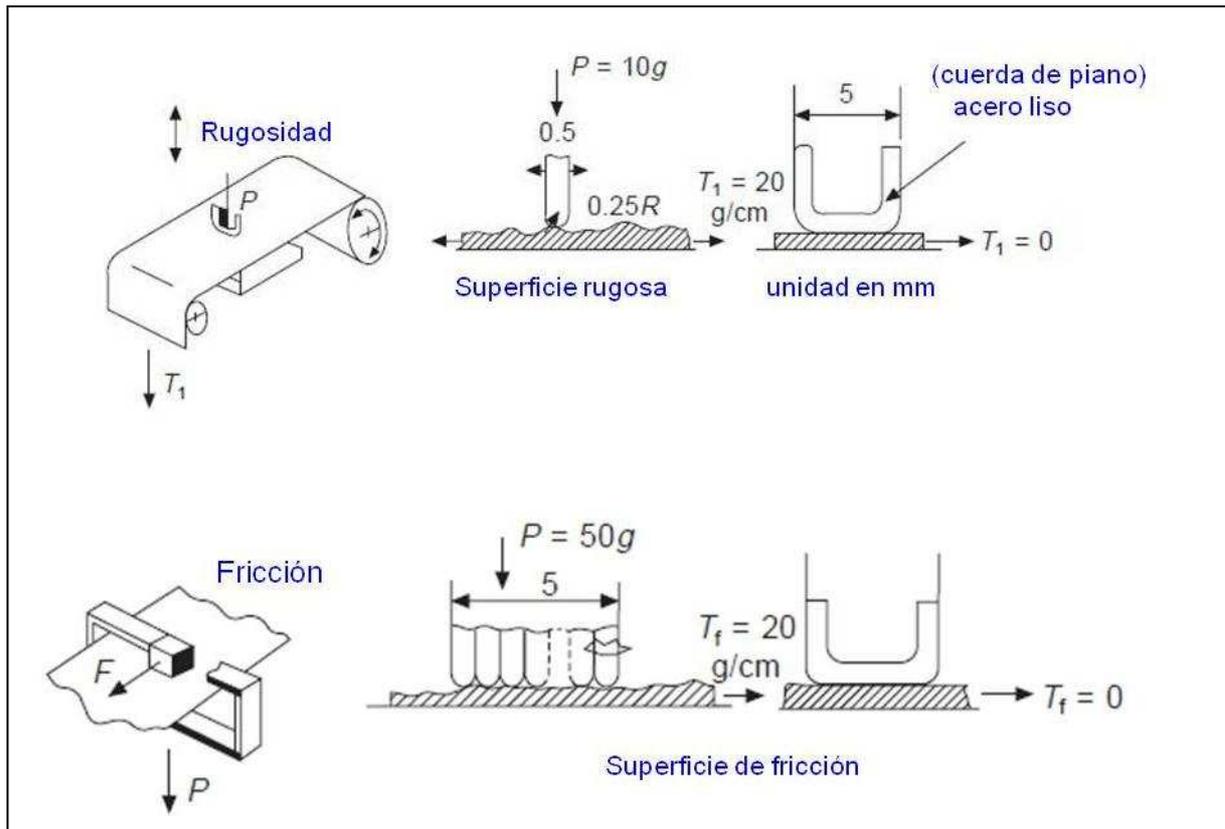


Figura 204. Cabezales de medición de las propiedades superficiales del KES-FB. Imagen de arriba: medida de la microrugosidad superficial. Imagen de abajo: medida de la fricción. (73)

donde:

$\mu$  = Fuerza friccional / fuerza de compresión

$x$  = desplazamiento del cabezal en la superficie de la probeta

$X$  = 2 cm tomado para la medición estándar

$T$  = Grosor de la probeta en la posición  $x$ , el grosor es medido por este cabezal

$\bar{T}$  = Valor medio de  $T$

$MIU$ ,  $MMD$  y  $SMD$  pueden darse en sentido urdimbre (1), trama (2), haz y envés. Al igual que en los ensayos de flexión estos se identificarán como  $MIU_{f1}$ ,  $MIU_{f2}$ ,  $MIU_{b2}$ , etc.

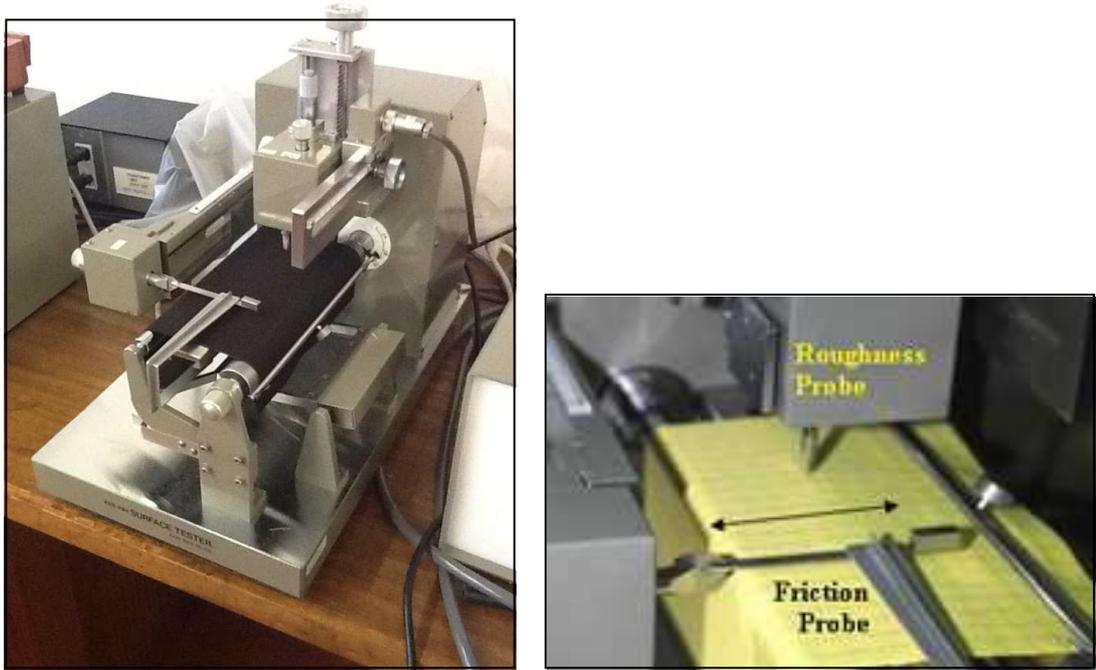


Figura 205. Izquierda: Unidad de medida de las propiedades superficiales del equipo KES-FB del Laboratorio de física textil de la Universidade do Minho en Guimaraes (Portugal). Derecha: Indicación de los cabezales para la medición. (fuente [NC University State](#))

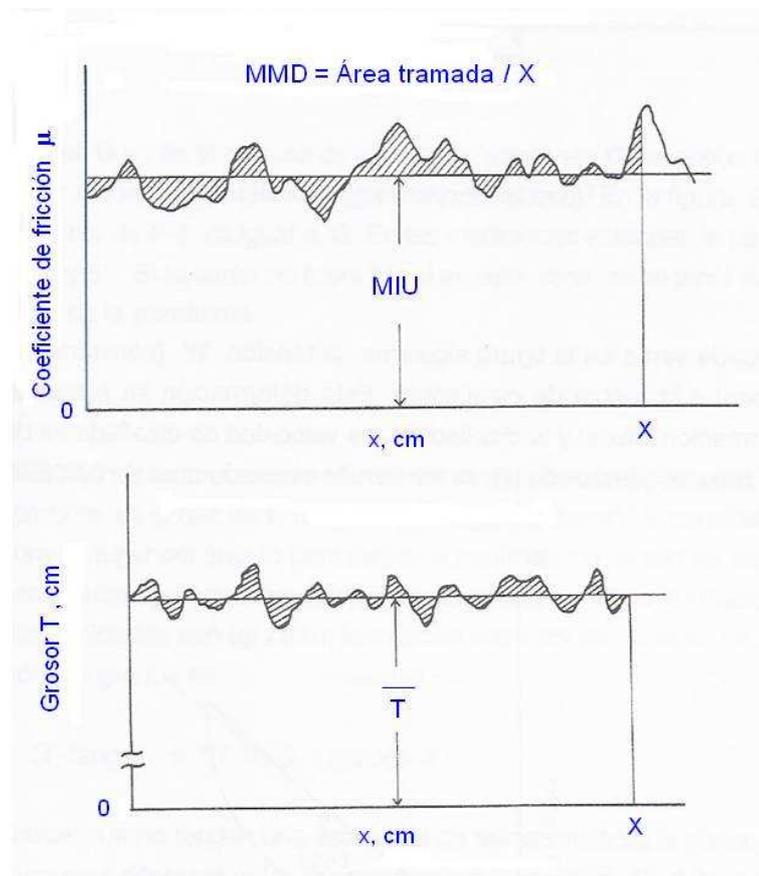


Figura 206. Expresión gráfica de las propiedades superficiales. (a): fricción superficial, (b): rugosidad superficial, en el equipo KES FB4 (71).

### 8.3.3.6 Grosor y gramaje

Durante el ensayo de las propiedades de compresión del tejido, se mide su grosor  $T$  a una presión  $P = 0,5 \text{ g/cm}^2$ , y el resultado se expresa en mm. El gramaje se expresa en peso por unidad de superficie de la probeta.

Los parámetros característicos son:

$$T = \text{grosor a la presión de } 0,5 \text{ g/cm}^2 \text{ (mm)}$$

$$W = \text{peso por unidad de superficie (mg/cm}^2\text{)}$$

### 8.3.3.7 Muestreo

Las probetas se cortan de acuerdo con las dimensiones descritas anteriormente y el número de muestras analizadas en cada ensayo se indican en la tabla 17.

Ensayo	Probetas ensayadas	Ensayo	Probetas ensayadas
Tracción	5 urdimbre 5 trama	Compresión	3
Flexión	5 urdimbre 5 trama	Superficie	5 urdimbre 5 trama
Cizalladura	5 urdimbre 5 trama	Gramaje	5
		Grosor	5

Tabla 17. Número de probetas ensayadas en cada apartado del ensayo KES-FB

### 8.3.3.8 Relación entre los parámetros objetivos y subjetivos

Una vez efectuada la evaluación de los parámetros subjetivos y los objetivos (propiedades físico-mecánicas) se emprendió la tarea de relacionar los parámetros objetivos con los valores de mano asignados por los expertos.

Para ello se seleccionaron los valores de mano con los resultados objetivos empleando el procedimiento de regresión por etapas en bloques, estableciendo las relaciones matemáticas entre los grupos de propiedades estimadas objetivamente y los parámetros subjetivos.

Así se llegó a una serie de ecuaciones que traducían los resultados objetivos en los tres valores de mano primaria (HV) y a partir de éstos la mano total (THV), substituyendo por completo el procedimiento de valoración subjetiva. En definitiva, a partir de la medición de las propiedades físico-mecánicas de tejidos de Ina de verano e invierno de caballero puede obtenerse la misma evaluación de la “mano” que realizarían un grupo de expertos evaluadores en base a su experiencia.

Con este sistema se dota a los distintos sectores del proceso textil de un lenguaje común para discutir características técnicas y comerciales de los tejidos, pudiendo así valorar la oportunidad de efectuar determinados procesos de acabado para mejorar la capacidad de confección de un artículo, o dotarles de mejores características de confort.

### 8.3.3.9. Videos sobre el ensayo KES FB

Heriot Watt University. <https://www.youtube.com/watch?v=XJwO9z9Ocel>

## 8.4 El método del anillo y sus diversas evoluciones

Los percusores de éste método y sus evoluciones, afirman que se trata de un ensayo sencillo y rápido que simula de forma eficaz la tradicional forma de pasar el tejido por el interior de la mano semicerrada. Así se ha percibido tradicionalmente tanto la suavidad del tejido al rozar con la piel como su rigidez a la deformación multiaxial. De hecho, en la edad media, las mujeres evaluaban la suavidad de los tejidos de seda, haciéndolos pasar por el interior de sus anillos (74)

El método consiste en hacer pasar una probeta circular de tejido por el interior de un anillo metálico de dimensiones predeterminadas y determinar el esfuerzo necesario para extraer el tejido. A finales de los años 70 del siglo XX, se registró una patente en Estados Unidos sobre un método de ensayo y un aparato para medir cuantitativamente la mano de los tejidos y otros materiales flexibles (75). El método media la fuerza de extracción necesaria para que una probeta de tejido atravesara un orificio de forma cónica de un grosor y diámetro determinados. Posteriormente, se desarrolló un método de ensayo basado en el principio del anillo cuyos resultados presentaban una buena relación con la evaluación subjetiva de la mano (76, 77), realizándose una primera interpretación detallada de las curvas fuerza-extracción que presentaban los tejidos al atravesar el anillo (78).

Desde entonces, varios investigadores han desarrollado adaptaciones de éste ensayo con diversas variaciones en relación a la forma y diámetro del anillo. Mediante un dinamómetro tipo INSTRON, se determinó la fuerza necesaria para extraer una probeta circular de tejido de 25 cm de diámetro por el interior de un anillo metálico de acabado pulido de 2 cm de diámetro por otros 2 cm de altura, obteniendo la fuerza máxima de extracción de diferentes tejidos que se denominó fuerza de la mano (handle force) obteniendo correlaciones notables con los parámetros KES de estos tejidos (74). Otros autores utilizaron el mismo método descrito anteriormente para determinar la mano de tejidos tratados con distintos tipos de acabados concluyendo que el método era adecuado tanto para la determinación de la mano total como para los cambios derivados de la estructura de los tejidos, acabados o humedad de los mismos (79).



Figura 207. Trevor Mahar investigador del Australian Wool Testing Authority (AWTA), mostrando la forma tradicional de determinación de la mano de los tejidos de alta calidad al hacerlos pasar por el interior de la mano semicerrada (80).



Figura 208. Ensayo convencional del anillo (81)

En el marco de un amplio estudio sobre el confort de los tejidos, se desarrolló el “*El Mogahzy-Kilinc hand metod*” basado en el ensayo del anillo descrito anteriormente pero con unas pequeñas modificaciones que lo mejoran notablemente (82 y 83). La principal diferencia de éste método con los anteriores reside en el cabezal por donde pasa el tejido el cual está formado por un pequeño tubo de material flexible terminado en un semicono invertido o embudo del mismo material. El cabezal de análisis está montado en un analizador mecánico de pequeñas deformaciones equipado con control digital y un software específico (84 y 85). El equipo obtiene la curva fuerza de extracción-tiempo denominada Perfil de la mano (*hand profile*). Al final del ensayo el equipo calcula la energía necesaria para extraer la totalidad del tejido, parámetro denominado Mano Total Objetiva (OHT- *Objective Total Hand*).

Este tipo de ensayos, sin embargo, presentan una alta variación en los resultados de la fuerza de extracción debido a la alta variabilidad en la configuración del plegado de las probetas. Con el fin de reducir esta variabilidad y controlar mejor la formación de pliegues durante la extracción de la probeta, a partir del año 2000 se desarrollaron nuevas técnicas de ensayo que conservando el mismo principio que el ensayo del anillo introducían un mayor control de la probeta. En éste método, el tejido se hace pasar por un orificio circular de radio variable, quedando la probeta retenida por dos discos paralelos a una distancia ajustable entre ellos (86, 87 y 88). El ajuste y aplicación de este método de ensayo para la evaluación de la mano, ha producido una abundante literatura tanto para tejidos de calada y tejidos de punto como para membranas diversas (89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98).

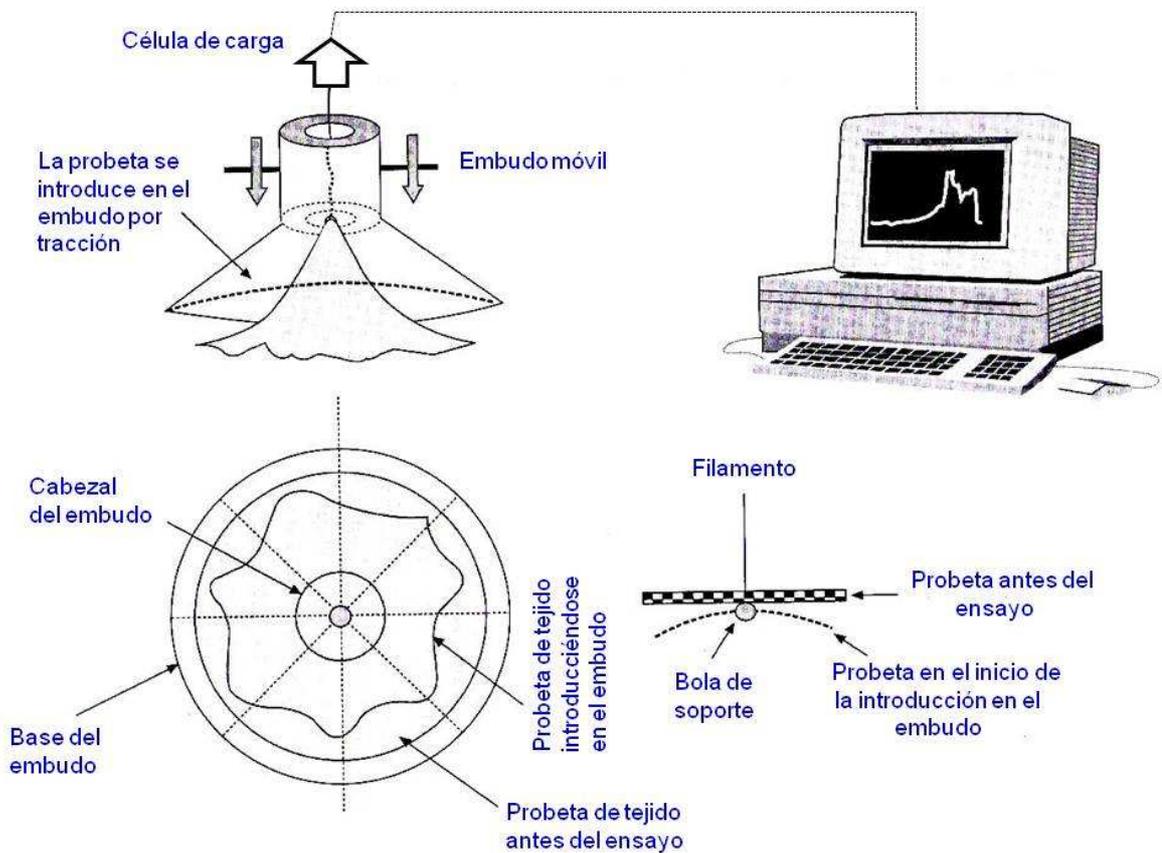


Figura 209. El método Mogahzy-Killinc (72)

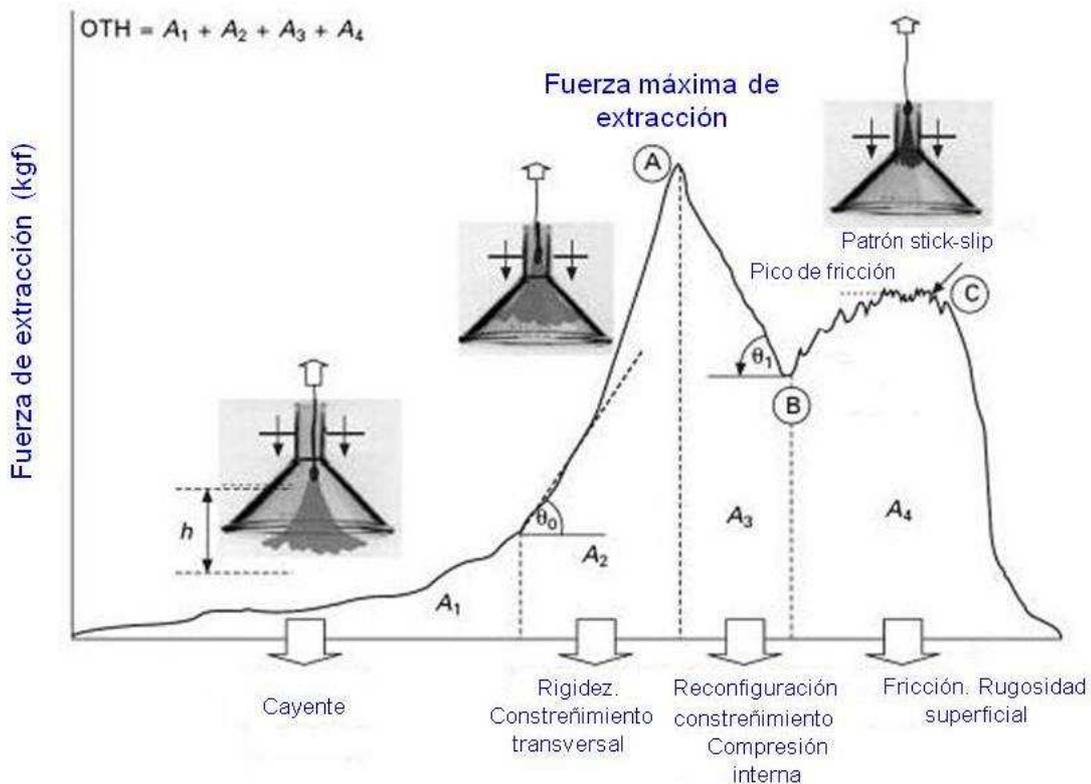


Figura 210. Perfil del la mano del ensayo de extracción Mogahzy-Kilinc (72)

Durante el ensayo de introducción de la probeta circular de tejido en el interior del embudo del método Mogahzy-Kilinc (72) se determina la fuerza de extracción de la probeta a través del embudo dando lugar a una gráfica denominada perfil de la mano "hand profile". La mayoría de tejidos presentan una curva similar a la mostrada en la figura 210. La curva puede dividirse en cuatro zonas. A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>2</sub> y A<sub>4</sub>. El área situada debajo de las anteriores cuatro zonas se denomina Mano Total Objetiva (OTH) y se corresponde con la energía consumida en el proceso de extracción total.

La zona A<sub>1</sub>, la probeta se deforma por la acción de su propio peso, adoptando el cayente propio del tejido. Desde el inicio del ensayo hasta que el tejido toca la pared interior del embudo transcurre un cierto tiempo o lo que es lo mismo se recorre una cierta distancia cuyo valor es "h" y está relacionado con el cayente del tejido. A menor cayente menor será el valor "h". la pendiente de la curva estaría relacionada con la irregularidad o asimetría del cayente. En definitiva, esta parte de la curva nos informa sobre aspectos relacionados con el cayente del tejido estudiado.

En la zona A<sub>2</sub>, la probeta ya se introduce en el embudo y se inicia el constreñimiento transversal del tejido hasta alcanzar la fuerza máxima de extracción con una pendiente  $\theta_0$  característica determinada. Esta zona constituye un reflejo de la interacción de diversos fenómenos como la tensión axial, la rigidez a la flexión del tejido, la compresión transversal, la cizalla y el rozamiento de los pliegues de la probeta consigo misma.

La zona A<sub>3</sub>, se produce una reconfiguración dinámica de la probeta. La forma de la curva (pendiente y  $\theta_1$ ), está relacionada con esta modificación, es decir con la flexibilidad, alineamiento de los pliegues y desviación lateral de los mismos.

La zona A4, está relacionada con el comportamiento que ofrece el tejido cuando roza activamente con la pared interior del embudo, produciéndose las típicas irregularidades del fenómeno stick-slip. En esta parte de la curva se observa también el punto de fricción máxima que se corresponde con un pico en el esfuerzo de extracción. La rugosidad superficial del tejido juega un papel importante en la forma de esta zona. Un tejido rígido y rugoso dará lugar a una elevada presión lateral y elevada fricción. Un tejido flexible y suave producirá una baja presión lateral y baja fricción. La diferencia entre la fuerza máxima de extracción  $P_{max}$  de la zona A con la fuerza máxima de rozamiento  $F_{max}$  de la zona C es un interesante parámetro para caracterizar la manipulabilidad global del tejido. Una diferencia positiva indica que se trata de un tejido rígido pero suave, mientras que una diferencia negativa indica que se trata de un tejido flexible pero áspero.

#### 8.4.1 Ensayo anillo-UPC

Con el fin de minimizar la influencia de la fricción del anillo sobre el tejido y maximizar la comprensión de los fenómenos de compresión transversal y multiaxial de la probeta de tejido, el autor de este libro, realizó una adaptación del método clásico del anillo que denominó ensayo anillo-UPC (99). El objetivo de esta modificación era encontrar las posibles relaciones existentes entre esta variante del ensayo con parámetros de cayente y confeccionabilidad. Si los resultados fueran positivos podría utilizarse este ensayo para obtener información suficientemente significativa y relevante sobre algunos aspectos de la mano, confeccionabilidad o cayente de los tejidos que permita substituir, parcialmente los equipos de evaluación indirecta de la mano utilizados hasta ahora y que resultan sofisticados, lentos y caros.

En esta variante, el cabezal de ensayo es un anillo de acero inoxidable pulido de sección circular y un grosor de 4 mm que está sujeto a una estructura externa que lo mantiene fijo. El anillo, está firmemente sujeto, tanto a la mesa de trabajo donde se encuentra el dinamómetro, como a la estructura de éste, lo cual garantiza la estabilidad geométrica del sistema de ensayo. Por otra parte, al finalizar cada ensayo, la mordaza superior del dinamómetro regresa automáticamente a la posición inicial, reduciendo la necesidad de verificar el calibrado de la geometría del ensayo, que sin embargo, se realiza igualmente al iniciar una nueva serie de ensayos de un tipo de tejido distinto. El anillo se sitúa bajo la vertical de la mordaza superior del dinamómetro convencional, posición que previamente se ha calibrado. Se han utilizado probetas de tejido circulares de 30 cm de diámetro.

A partir de esta dimensión de probeta, se ha buscado un diámetro del anillo universal que permitiera la extracción del tejido a través suyo sin forzar excesivamente la probeta para un amplio espectro de tejidos comerciales. Dado que el objetivo principal de la modificación del ensayo del anillo propuesta en este estudio, no era estudiar detalladamente la parte de la curva carga-deformación que explica el fenómeno del cayente, la flexión, el coeficiente de fricción estático y dinámico del tejido cuando roza con elementos externos o bien la fricción interna durante el ensayo, sino la fuerza máxima de extracción, se utilizó un anillo formado por una varilla de sección circular. Este diseño, a diferencia de otros métodos descritos anteriormente, minimiza la influencia de las propiedades del tejido que no están relacionadas con su deformación multiaxial.

En el ensayo, se atraviesa la probeta circular, por su centro geométrico mediante una aguja metálica rígida de 80 mm de longitud y 2 mm de grosor. En su extremo inferior una pieza en forma de "T" invertida retiene la probeta. La aguja metálica es sujeta por la mordaza superior del dinamómetro tal como puede verse en la (figura 211 izquierda) donde se muestra la probeta al inicio del ensayo. Se pone en marcha el dinamómetro y la mordaza superior realiza un movimiento ascendente a una velocidad de 100 mm/min.

Dado que el tejido todavía no roza con el anillo, la curva fuerza de extracción-desplazamiento de la mordaza no presenta ninguna pendiente. Cuando la probeta empieza a rozar el anillo (figura 213, imagen 3) la curva empieza a subir con una pendiente que es función de la fuerza de extracción (figura 212). El ensayo finaliza con la extracción total de la probeta del anillo.



Figura 211. Ensayo del anillo-UPC. Izquierda: inicio del ensayo. Derecha: durante el ensayo) (44)

El dinamómetro registra la curva fuerza de extracción-desplazamiento (o tiempo) de la probeta que permite determinar la distancia entre el inicio del ensayo y el momento en el que empieza a rozar la probeta con el anillo (figura 212). Este punto del registrador corresponde a la distancia (h) de la figura 213 (imagen 3), y está relacionada con el cayente del tejido. Asimismo puede determinarse la fuerza máxima de extracción y el tiempo transcurrido hasta alcanzar este valor.

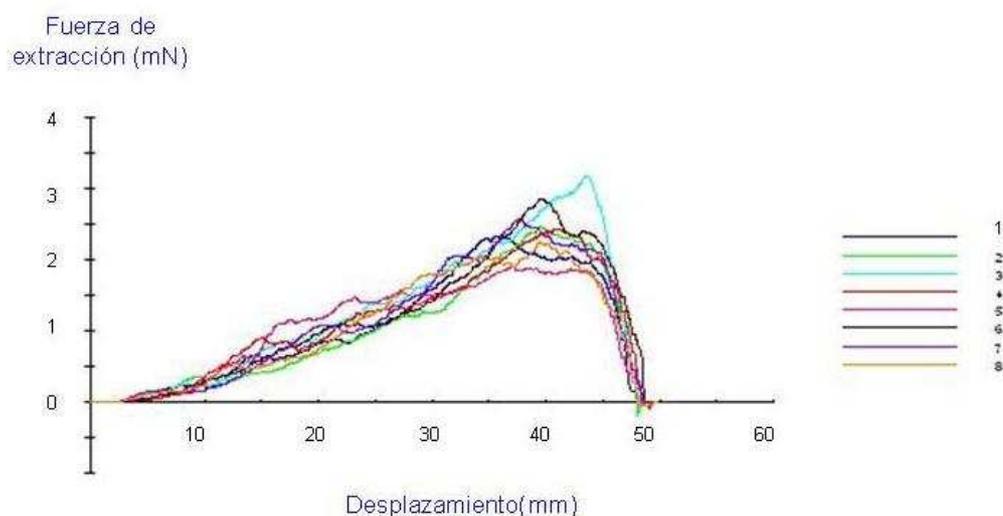


Figura 212. Curva Fuerza de extracción-desplazamiento del ensayo anillo-upc (44)

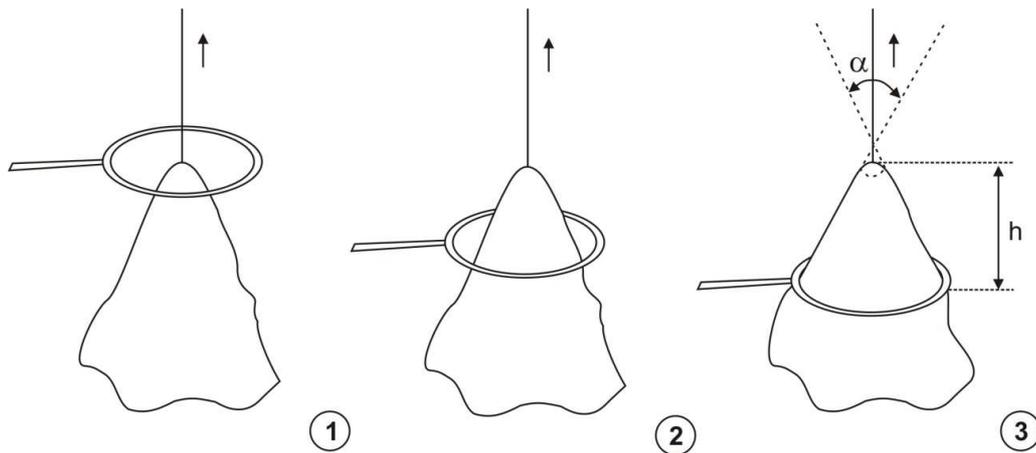


Figura 213. Diversas fases del ensayo del anillo-UPC (44, 99)

En este método se analizan, para cada tejido, un total de 4 probetas circulares de 30 cm de diámetro, tanto por el haz como por el envés, calculando los valores medios de los 8 ensayos y determinando:

- la fuerza máxima de extracción  $F_{\max}$ , (mN)
- desplazamiento necesario para alcanzarla  $DF_{\max}$ , (mm)
- la distancia ( $h$ ) en mm, entre el inicio del ensayo y el punto donde la probeta toca el aro (Figura 211, imagen 3),
- el cociente entre la distancia  $h$  y el radio del anillo ( $h/r$ )
- ángulo de contacto  $\alpha$  ( $^{\circ}$ ) (figura 213, imagen 3). Calculado trigonométricamente a partir de la altura global e contacto ( $h$ ) y el radio del anillo ( $r$ ).

#### 8.4.1.1 Relaciones entre el ensayo anillo-UPC y el ensayo FAST

En este estudio se compararon los resultados del ensayo FAST con los del ensayo anillo-UPC de una muestra de 37 tejidos de calada comerciales de un amplio espectro de composiciones y gramajes, estableciéndose las ecuaciones de regresión entre los principales parámetros de ambos métodos de medición según correlaciones canónicas. Los resultados obtenidos permitieron predecir una parte de los parámetros FAST mediante un método de ensayo mucho más universal, sencillo y económico (44 y 99).

Este estudio exploratorio permitió relacionar el sistema FAST con el ensayo del anillo-UPC a través de la correlación entre sus parámetros. Del estudio se desprende:

- La formabilidad ( $F$ ), la rigidez a la flexión ( $RF$ ), la fuerza máxima de extracción ( $F_{\max}$ ) y el tiempo necesario para alcanzar este punto ( $DF_{\max}$ ) son los parámetros que más contribuyen a la correlación entre el sistema FAST y el ensayo del anillo-UPC. La relación canónica de éstas variables es del 0,95.

- Las extensibilidades al 100% (EU y ET), la distancia desde el inicio del ensayo hasta que la probeta toca el aro (h) y el cociente entre este valor y el radio del anillo (h/r) presentan una correlación canónica del 0,64.
- Las correlaciones anteriores explican que el moldeado tridimensional de los tejidos está correlacionado con la mano, y las extensibilidades con el cayente.
- Se han establecido unas ecuaciones de regresión entre los principales parámetros FAST (según correlaciones canónicas) y los principales parámetros del ensayo del anillo-UPC (según correlaciones canónicas). La  $F_{max}$  y la  $DF_{max}$  explican el 95,75% de la variabilidad de la Formabilidad (F); la  $F_{max}$  y la  $DF_{max}$  explican el 66,79% de la rigidez a la flexión (RF); la h y h/r explican el 28,94 % de la extensibilidad urdimbre al 100 % (EU) y la h y la h/r explican el 23,43% de la extensibilidad por trama al 100 % (ET).
- Los resultados obtenidos en este estudio permiten predecir una parte de los parámetros FAST mediante un método de ensayo del anillo más universal, sencillo y económico.

Mediante el método de ensayo anillo-UPC, puede determinarse, una propiedad de la confeccionabilidad tan importante como es la Formabilidad (F) que hasta ahora sólo podía obtenerse mediante el equipo FAST.

#### 8.4.1.2 Relaciones entre el ensayo anillo-UPC y el ensayo Kawabata

Una vez estudiadas, en un trabajo previo, las relaciones entre el ensayo anillo-UPC y las propiedades físico-mecánicas de una muestra de tejidos comerciales de calada medidas con el equipo FAST (diseñado para el estudio de la confeccionabilidad de los tejidos), el objetivo de este nuevo trabajo fué estudiar las relaciones entre el ensayo anillo-UPC, con las propiedades físico-mecánicas de estos tejidos con el KES-FB (diseñado para el estudio de la mano de los tejidos mediante principios de medida ligeramente distintos y a través básicamente de la energía consumida en las pequeñas deformaciones sufridas por los tejidos).

Desde el punto de vista conceptual no existe relación alguna entre los parámetros KES-F de compresión LC (linealidad de la curva de compresión), WC (energía de compresión), RC (resiliencia de compresión),  $T_o$  (grosor a una presión de 0,5 gf/cm<sup>2</sup>) y  $T_m$  (grosor a una presión de 50 gf/cm<sup>2</sup>) y los parámetros medidos en el método anillo-UPC. También puede decirse lo mismo respecto el parámetro de superficie SMD (rugosidad geométrica).

Parametro	Grover et al (74)	Carrera (44)
Tejidos analizados	6	37
B	0.85	0.72
2HB	0.91	0.78
W	0.98	0.76

Tabla 18. Coeficientes de correlacion lineal entre  $F_{max}$  (ensayo del anillo) con cada parámetro Kawabata (44)

Apenas existen estudios que relacionen los resultados del ensayo del anillo con mediciones realizadas mediante el método KES-FB. El único precedente se limita a determinar la Fuerza máxima de extracción  $F_{max}$  de 6 muestras de tejidos de calada algodóneros y relacionarlo con los distintos parámetros del ensayo KES-F (74). En el estudio realizado por el autor de este libro, en cambio, se valoran 37 tejidos de calada de composiciones, ligamentos y gramajes mucho más amplio y representativo de los tejidos comerciales (44). Ambos estudios coinciden en que la Rigidez a la flexión (B), la histéresis de la flexión (2HB) y el gramaje de los tejidos (W), están altamente correlacionados con la  $F_{max}$ .

En este trabajo se evaluaron las propiedades mecánicas de 37 tejidos comerciales de calada de un amplio espectro y tipología de composiciones y gramajes (entre lo 50 y 447 g/m<sup>2</sup>) que representan el ámbito de los tejidos comerciales de pañería, camisería y forrería. mediante dos sistemas de evaluación objetiva: KES-FB y anillo-UPC.

Se relacionaron ambos métodos a través de la correlación entre sus parámetros, estableciéndose las ecuaciones de regresión que permitían predecir algunos parámetros KES-FB a partir del método del anillo.

Concluyendo que:

- Existen dos variables (con p-valor 0,0000) que relacionan, por una parte, los parámetros KES-F (LT, WT, EMT, B, 2HB, F) con parámetros del ensayo del anillo-UPC ( $F_{max}$  y  $DF_{max}$ ), mediante una correlación canónica de 0,97 y ,por otra, los parámetros KES-F (LT,WT, EMT, B, 2HB) con parámetros del ensayo del anillo-UPC (h y h/r) mediante una correlación canónica de 0,94.

De esta correlación de parámetros se desprende que:

- Simplificando la anterior correlación se puede aproximar la naturaleza de dicha relación como sigue: las variables de alargamiento bajo carga axial (EMT y F) (aunque en el cálculo de F también interviene la rigidez de flexión) del KES-F están relacionadas con los parámetros del esfuerzo necesario para extraer la probeta y recorrido ( $F_{max}$  y  $DF_{max}$ ) realizado del método anillo-UPC y por otra parte los parámetros de rigidez a la flexión (B y 2HB) del KES-F están relacionadas con las variables geométricas del anillo-UPC (h y h/r).
- Se han establecido unas ecuaciones de regresión entre los principales parámetros KES-F (según correlaciones canónicas) y los principales parámetros del ensayo del anillo-UPC (según correlaciones canónicas). La h y  $DF_{max}$  explican el 61 % de la variabilidad de la linealidad de la tracción (LT); la  $F_{max}$  explica el 47 % de la energía de tracción (WT); la h y  $DF_{max}$  explican el 57 % del alargamiento a tensión máxima (EMT), la  $F_{max}$  y la h/r explican el 70 % de la rigidez a la flexión (B), la  $F_{max}$  y h/r explican el 71 % de la histéresis de la rigidez a la flexión (2HB) y la  $F_{max}$  y la  $DF_{max}$  explican el 68 % de la Formabilidad.

En definitiva, La modificación del ensayo del anillo denominada anillo-UPC, puede ser una alternativa más sencilla, universal y económica que los clásicos sistemas evaluación objetiva de los tejidos (FAST y KES-F).

### 8.4.1.3 Relaciones entre el ensayo del anillo-UPC y el cayente

El autor de este libro, también realizó un estudio para comprobar si puede utilizarse el método de ensayo del anillo-upc como método alternativo al drapómetro Cusick, para controlar, a nivel industrial, las principales características del cayente de los tejidos. Este método se usaría, únicamente, para el control de calidad del proceso de acabado de tejidos de pañería y su principal ventaja consiste en que requiere únicamente el uso de un dinamómetro convencional, de uso habitual en la industria textil, así como un pequeño aro metálico que puede fabricarse en cualquier taller mecánico (44). Para ello se estudiaron 15 tejidos comerciales de pañería.

Para el estudio del cayente se utilizaron los siguientes indicadores:

- a) Índice de cayente,  $DR\%$
- b) Número de Nodos,  $FN$
- c) Altura media de los nodos  $FH$
- d) Variabilidad de la severidad de los nodos  $VS$
- e) Irregularidad del cayente.  $DU\%$
- f) Distribución de los nodos  $Gp\%$

El significado geométrico y forma de cálculo de dichos indicadores puede verse en el apartado 4.1.8.4. Estos 7 indicadores se han escogido para cuantificar aspectos distintos del cayente:  $DR\%$  y  $FN$  explican la intensidad del cayente,  $FH$  y  $VS$  explican parte de su forma, severidad o profundidad de los nodos, en definitiva la rugosidad de su perfil, mientras que  $DU\%$ ,  $Gp\%$  y  $D/O$  explican la isometría geométrica y la irregularidad que adopta su perfil.

Se ha procedido a estudiar las correlaciones lineales de los indicadores de cayente por una parte y de los parámetros del método del anillo por otra (ver tablas 19 y 20).

Se consideran dos grupos de variables con correlaciones internas menores de 0,7, con el fin de evitar la multicolinealidad en el análisis que dificultaría la interpretación de los coeficientes. El primer grupo está formado por cuatro indicadores del cayente ( $DR\%$ ,  $DU\%$ ,  $Gp\%$ ,  $VS$ ) de los tejidos de pañería y el segundo por dos parámetros del método del anillo-UPC ( $h$  y  $F_{max}$ ).

A través del análisis de las correlaciones canónicas se busca una combinación de variables en cada grupo –variables canónicas- tal que dichas combinaciones presenten un porcentaje elevado de la varianza compartida -coeficiente de determinación-.

La tabla 21 muestra las dos primeras correlaciones canónicas, pero sólo la primera tiene una correlación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95,0%.

<b>FN</b>	<b>FH</b>	<b>DU%</b>	<b>Gp%</b>	<b>VS</b>	<b>D/O</b>	
- 0,888 0,000	-0,041 0,885	0,052 0,853	-0,586 0,022	0,183 0,514	0,595 0,019	<b>DR%</b>
	-0,041 0,885	-0,313 0,256	0,244 0,381	-0,340 0,215	-0,236 0,398	<b>FN</b>
		0,708 0,003	0,700 0,004	0,448 0,094	-0,692 0,004	<b>FH</b>
			0,539 0,038	0,587 0,021	-0,623 0,013	<b>DU%</b>
				0,192 0,492	-0,826 0,000	<b>Gp%</b>
					-0,225 0,420	<b>VS</b>

Tabla 19. Matriz de correlaciones de los indicadores de cayente. La primera cifra de cada recuadro corresponde a R y la situada debajo al p-valor (44)

<b><math>\alpha</math></b>	<b>F<sub>max</sub></b>	<b>DF<sub>max</sub></b>	
-0,998 0,000	-0,685 0,005	-0,098 0,727	<b>h</b>
	0,705 0,003	0,127 0,652	<b><math>\alpha</math></b>
		0,738 0,002	<b>F<sub>max</sub></b>

Tabla 20. Matriz de correlaciones de los parámetros del ensayo del anillo-UPC. La primera cifra de cada recuadro corresponde a R y la situada debajo al p-valor (44)

Núm.	R <sup>2</sup>	Correlación	Lambda	Chi-Cuadrado	Grados libertad	Valor-p
1	0,905	0,951	0,0622	29,151	8	0,000
2	0,343	0,586	0,656	4,420	3	0,219

Tabla 21 Correlaciones Canónicas (44)

Los coeficientes del primer par de variables canónicas  $U_1$  ,  $V_1$  son:

$$U_1 = -0,901 DR\% - 0,166 DU\% + 0,162 Gp\% + 0,064 VS$$

y

$$V_1 = -0,929 h - 0,099 Fmax$$

dónde las variables fueron estandarizadas restándoles, primero sus medias, y luego dividiéndolas entre sus desviaciones estándar. La representación de los valores de los dos grupos de variables -cayente, anillo- a partir de las variables canónicas  $U_1$  y  $V_1$  se presenta en la figura 214, donde se visualiza la intensidad de la relación (0,95) entre las variables canónicas.

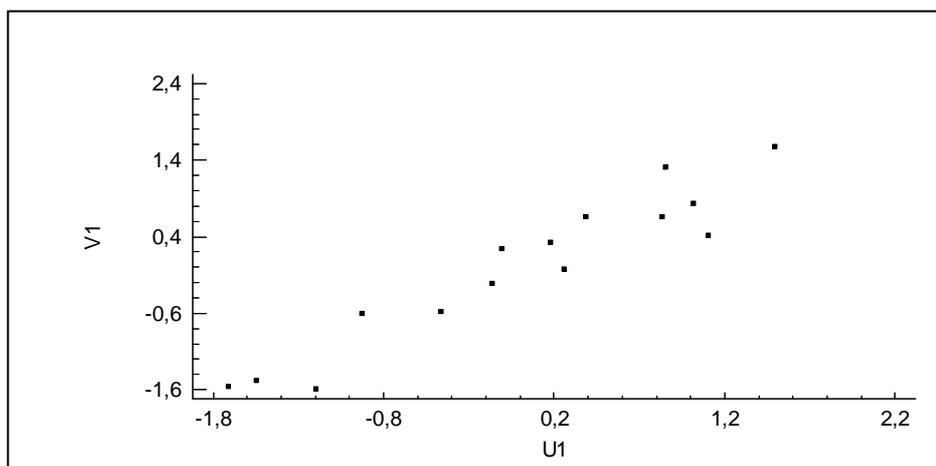


Figura 214. Puntuaciones de las variables originales

Las magnitudes de los coeficientes de las ecuaciones anteriores (ponderaciones canónicas) representan las contribuciones relativas de las variables naturales a las variables canónicas: en  $U_1$ , el indicador DR% presenta un valor muy superior a los otros,

y en  $V_1$  el parámetro  $h$  presenta un valor muy superior a  $F_{max}$ . Por tanto  $U_1$  se explica básicamente a partir de  $DR\%$  y  $V_2$  a partir de  $h$ .

Estas ecuaciones pueden ser empleadas con fines predictivos pero resulta más práctico y potente estadísticamente, encontrar la ecuación de la regresión de  $DR\%$  versus  $h$ .

La ecuación del modelo ajustado es:

$$DR\% = \sqrt[2]{(7.499,13 - 2.439,85 \cdot \ln(h))}$$

y se visualiza en la figura 215.

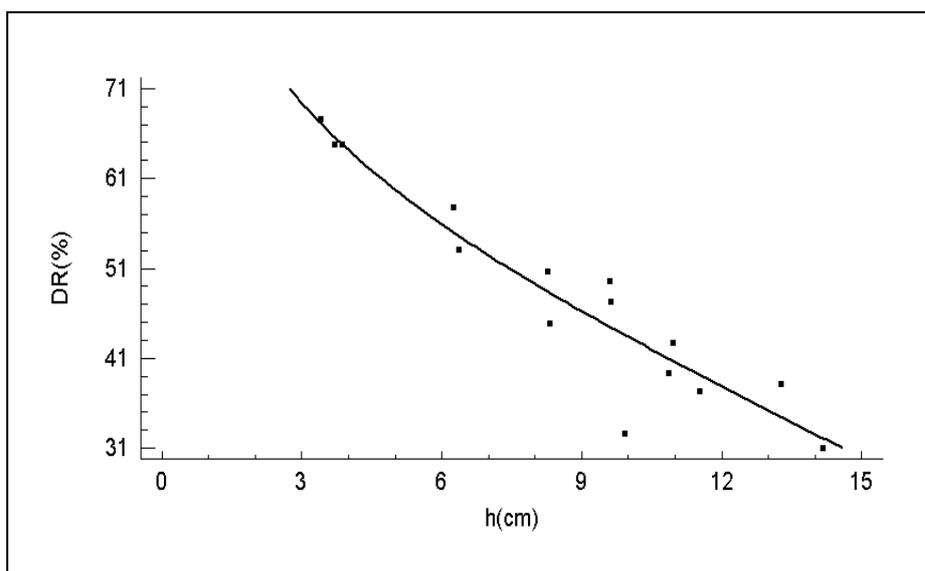


Figura 215. Ecuación de regresión  $DR\%$  versus  $h$  (44)

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados libertad	Cuadrado Medio	F-Fisher	Valor-p
Modelo	1,78121E7	1	1,78121E7	160,470	0,000
Residuo	1,44298E6	13	110998,000		
Total (Corr.)	1,92551E7	14			

Tabla 22. Análisis de la varianza (44)

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA (tabla 22) es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre DR% y h con un nivel de confianza del 95,0%.

$$R = -0,961$$

$$R^2 = 92,506 \%$$

$$R^2 \text{ (ajustado)} = 91,929 \%$$

$$\text{Estadístico Durbin-Watson} = 1,728 \text{ (} P=0,2820 \text{)}$$

$$\text{Autocorrelación de residuos en retraso } 1 = 0,054$$

El estadístico  $R^2$  indica que el modelo ajustado explica 92,506% de la variabilidad en DR%. El coeficiente de correlación R es igual a -0,961, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El estadístico de Durbin-Watson examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos.

Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

Concluyendo, se ha encontrado la ecuación de regresión que relaciona el DR% con el parámetro “h” del ensayo del anillo-UPC. Este método de ensayo del puede ser utilizado a nivel industrial como herramienta para el control rutinario del cayente en los procesos de acabado de tejidos de pañería sin la necesidad de un equipo adicional específico para la determinación del cayente.

## 8.5 Phabrometer

Basándose en las investigaciones de diversos equipos (100 y 101) la empresa americana Nu Cybertek Inc, ha desarrollado el PhabrOmeter, equipo que realiza de forma automática el ensayo de extracción (o del anillo) de una probeta circular de tejido de 100 cm<sup>2</sup> de superficie, basándose en el principio del anillo, obteniendo la curva extracción-tiempo. Durante el ensayo, se somete a la probeta a un conjunto de deformaciones de baja intensidad: tensión axial, cizalladura, flexión y fricción de forma similar a las deformaciones que sufre la probeta cuando se evalúa la mano de un tejido de forma manual al hacer pasar un tejido por la parte interior de la mano semicerrada. Como consecuencia de ello, toda la información sobre la mano de un tejido se encuentra reflejada en la curva fuerza de extracción-desplazamiento (o tiempo) que se muestra en la figura siguiente.

La probeta se introduce a través del cabezal de medición que es un anillo de un determinado diámetro y grosor tal como se indica en la figura 216. El sistema registra (5 veces por segundo) las diferentes tensiones a las que está sometida la probeta durante en todo el tiempo que dura el ensayo (22 segundos). Para el estudio de la información de la curva fuerza de extracción-tiempo, se utiliza el [teorema de Karhunen-Loève](#). El indicador “mano relativa” (RHV) se obtiene tras analizar la distancia euclidiana ponderada entre un tejido patrón y el tejido analizado.

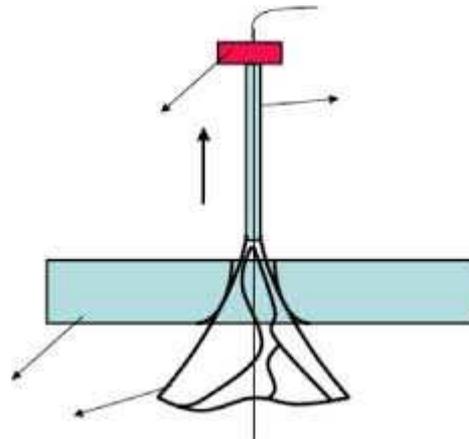


Figura 216. Principio de medición del Phabrometer (102)

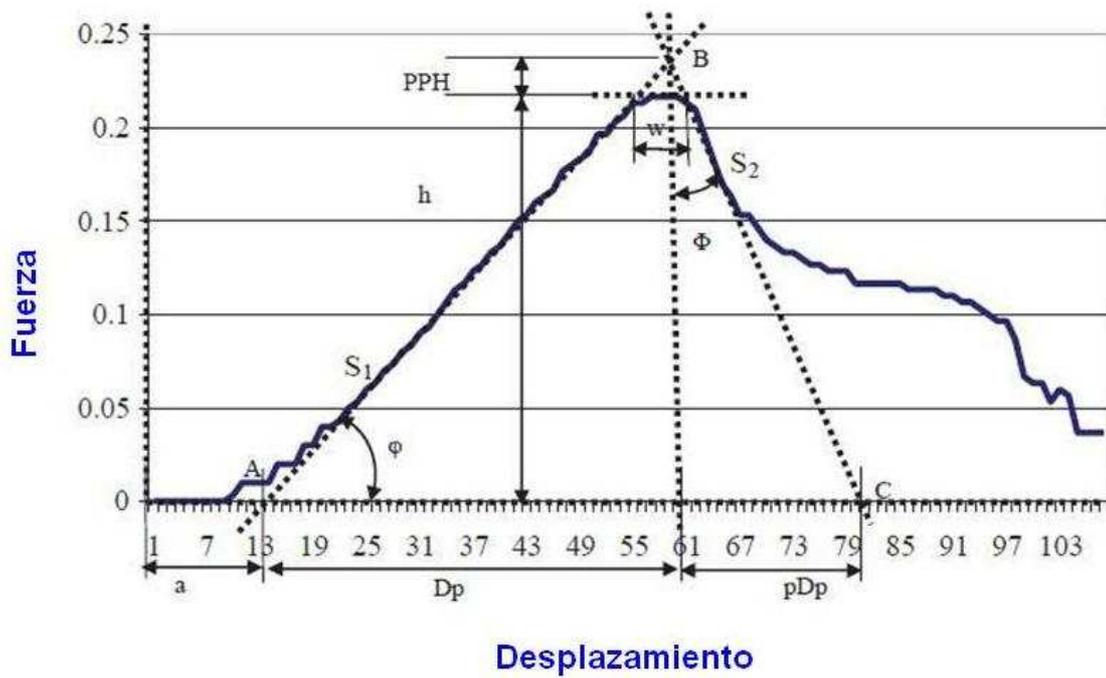


Figura 217. Gráfico de la curva de extracción obtenida en del equipo PhabrOmeter (103)



Figura 218. Equipo Phabrometer (103)



Figura 219. Aspecto del equipo Phabrometer. Fuente: [suzhoufengbao](http://suzhoufengbao.com)



Figura 220. Aspecto del cabezal de medición del Phabrometer. Fuente [sheepcrc](http://sheepcrc.com)

De la curva (figura 217) se obtiene los siguientes parámetros:

a: Adaptación de la probeta al pasar a través del cabezal o embudo de medición

$S_1$ : Pendiente de la curva de extracción (tangente del ángulo  $\phi$ )

h: Altura del punto máximo de la curva (pico). Corresponde a la fuerza máxima de extracción

$D_p$ : Distancia recorrida (tiempo) desde el inicio del triángulo hasta el punto de fuerza máxima de extracción (del triángulo de proyección).

PPH. Distancia en entre el punto de fuerza máxima de extracción y el vértice del triángulo de proyección)

w: Anchura del pico (delimitada por el triángulo de proyección).

$S_2$ . Pendiente de la curva de bajada (tangente de  $\phi$ )

$pD_p$ : Base del triángulo rectángulo formado por el vértice B y la hipotenusa B-C.

W: Área situada bajo la curva del triángulo A-B-C. se trata de la energía consumida en el proceso de extracción.

El equipo suministra los siguientes indicadores:

- a) *Mano relativa (RHV)*: valor global de la mano del tejido estudiado en relación con un tejido normal de referencia (ver norma AATCC TM202 relativo valor de la mano de Textiles: Método Instrumental).
- b) *Rigidez*: dificultad que ofrece el tejido a ser doblado con los dedos.
- c) *Compresibilidad*: sensación obtenida al comprimir transversalmente el tejido
- d) *Suavidad*: resistencia que ofrece el tejido al deslizamiento de un dedo por la superficie del tejido (relacionado con el coeficiente de fricción)
- e) *Recuperación de las arrugas*. Indicador sobre la capacidad del tejido de recuperar las arrugas provocadas.
- f) *Indicador de cayente*: Aspecto del cayente estático de un tejido.

## 8.6 Handle-O-Meter

Existe otro método similar al ensayo del anillo pero consistente en determinar el esfuerzo necesario, no para extraer sino para introducir un tejido, papel o film de plástico a través de una rendija o anillo. Este tipo de ensayo se utiliza básicamente para determinar la blandura (*softness*) de papeles sanitarios. El equipo más conocido es el Handle-O-Meter (104 y 105), para ensayos de papel y el Handmeter para textiles (89) si bien éste último apenas se ha utilizado.

### 8.6.1 Videos ensayo Handle-O-Meter

Handle-O-meter HOM <https://www.youtube.com/watch?v=PzK7vV71rql>

Thwing-Albert FP-2260 Friction/Peel Tester  
<https://www.youtube.com/watch?v=p0a8QgeKgAU>

### 8.7 Fabric Touch Tester FTT

Equipo desarrollado conjuntamente entre el profesor Li Yi de la Hong Kong Polytechnic University (HKPU) y SDL Atlas, con el patrocinio del Hong Kong Research Institute for Textiles and Apparel (HKRITA) (106). Se trata de un equipo diseñado para la evaluación del confort basado en comportamiento de los receptores sensoriales de nuestra piel cuando toca un tejido textil. Los estímulos recibidos cuando los humanos tocamos un tejido textil, conllevan a una interpretación subjetiva de las sensaciones mediante un sistema de información neuronal codificada.

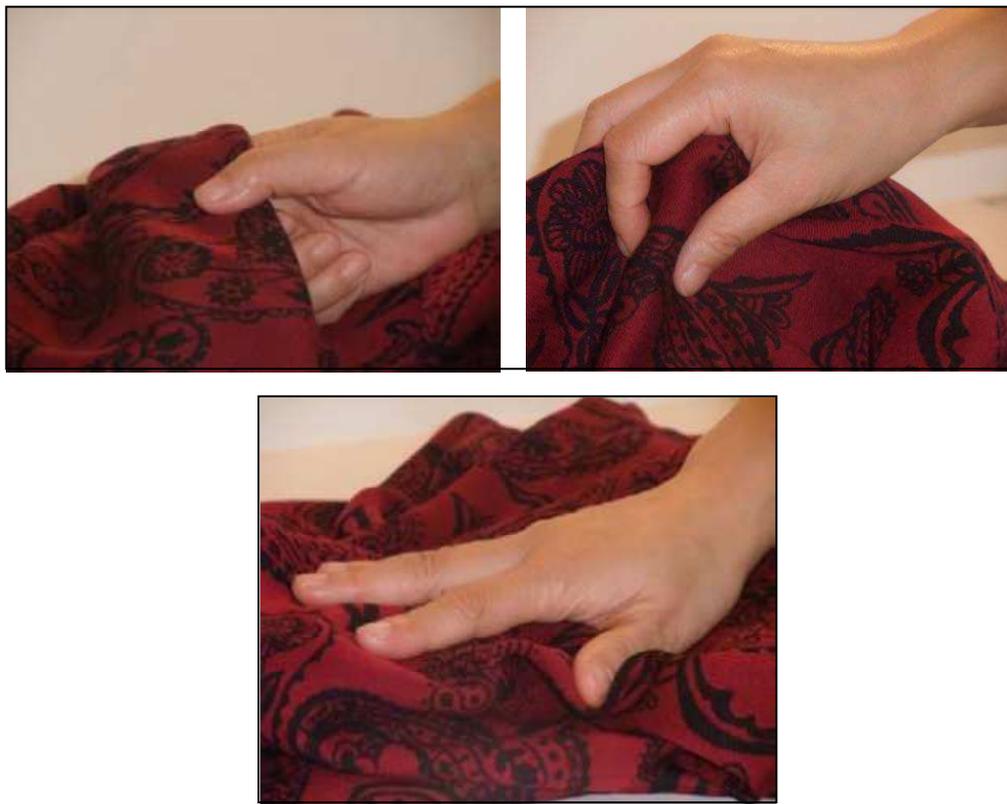


Figura 221. Proceso manual para la detrmínación de la mano y confort de un tejido. Fuente: [rycobel group](http://rycobelgroup.com)

El equipo utiliza 5 tipos de sensores:

- Flujo de calor

- Temperatura
- Presión
- Fricción
- Desplazamiento

La piel humana es capaz de detectar diferentes fenómenos ambientales cuando entra en contacto con los materiales textiles. Estos fenómenos estimulan los llamados receptores nerviosos (107). Dichos receptores transforman los estímulos en señales nerviosas y las transmiten al sistema somatosensorial. Estas señales finalmente llegan a las áreas funcionales del cerebro humano que generan la sensación de tacto y confort (mano). El recorrido de esta percepción empieza en el dedo, pasa a continuación por el núcleo espinal, y termina en el tálamo. Las señales neuronales estimulan tanto la corteza somatosensorial primaria como secundaria.

Algunos aspectos de la medición física de la sensación de tacto y confort (mano) pueden definirse teóricamente en base a los conocimientos que tenemos de la neurociencia. En esta línea podemos decir que existen cuatro tipos de estímulos táctiles:

- a) estímulo térmico (temperatura relativa alta o baja del objeto tocado)
- b) estímulo cutáneo (forma y textura de los objetos)
- c) estímulo propioceptivo (posición, fuerza y/o movimiento)
- d) estímulo irritante o doloroso

Una evaluación completa de las sensaciones que se perciben al tocar un tejido, por ejemplo, ha de incluir todos los estímulos citados anteriormente y las propiedades físicas relacionadas son tanto las térmicas, como las de la textura y deformación (longitudinal y transversal) del tejido.



Figura 222. Aspecto del Fabric Touch Tester. Fuente: [Fuentes: rycobel group](http://www.rycobelgroup.com)

Diversos estudios han demostrado la influencia de la temperatura en las respuestas neuronales de estímulos táctiles. En otras palabras, el estímulo térmico podría tanto estimular receptores térmicos como a la sensibilidad de los otros tres receptores táctiles. En definitiva la profundización en el estudio de la neurociencia y de

las interacciones existentes entre receptores permitirá conocer mejor el fenómeno de la mano de los tejidos.

### 8.7.1 Principio de medida

El FTT está formado por cuatro módulos de medición que trabajan de forma simultánea y registran las respuestas dinámicas de las muestras. Dichos módulos analizan las siguientes propiedades: compresión (b), térmicas (c), flexión (d) y superficiales (E), tal como se muestra en la figura 223.

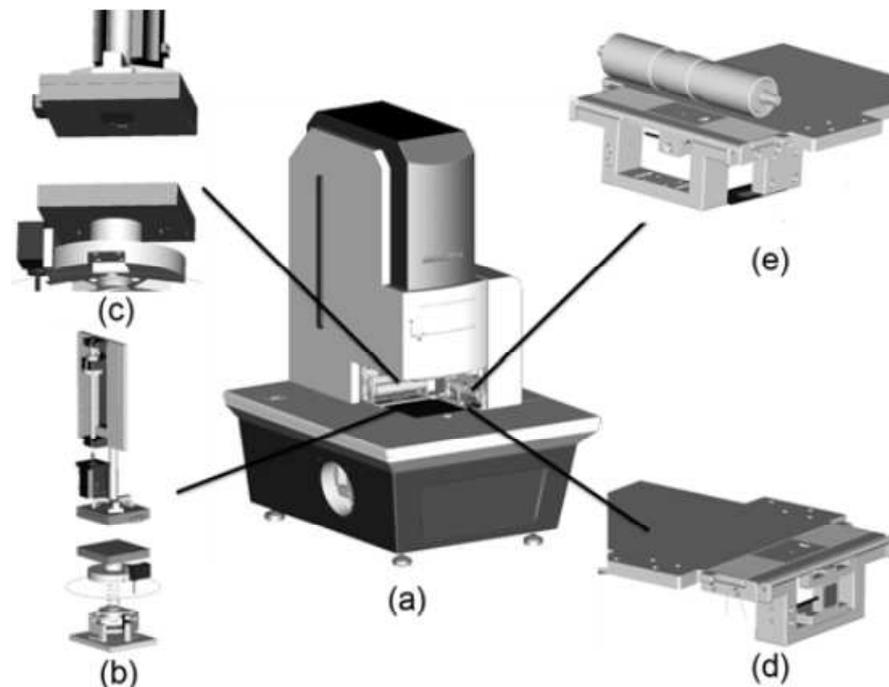


Figura 223. Diseño mecánico del FTT. Incluye estructura general (a), módulo de compresión (b), el módulo térmico (c), el módulo de flexión (d), y el módulo de superficie €. (106)

El equipo aplica un método de movimiento único de las muestras durante el ensayo. Las probetas se cortan en forma de L tal como se muestra en la Figura 224.

La probeta se coloca encima de la placa inferior con los brazos laterales apoyados en las plataformas adyacentes. La parte central, cuadrada, de la probeta se arrastra produciendo un movimiento horizontal de los dos brazos de la misma. Los módulos de compresión y propiedades térmicas miden la parte central de la probeta, mientras los módulos de flexión y superficie lo hacen en los brazos. La orientación de la probeta (brazos laterales) permite realizar el ensayo de flexión y superficie tanto en sentido urdimbre como trama sin necesidad de cambiar la probeta.

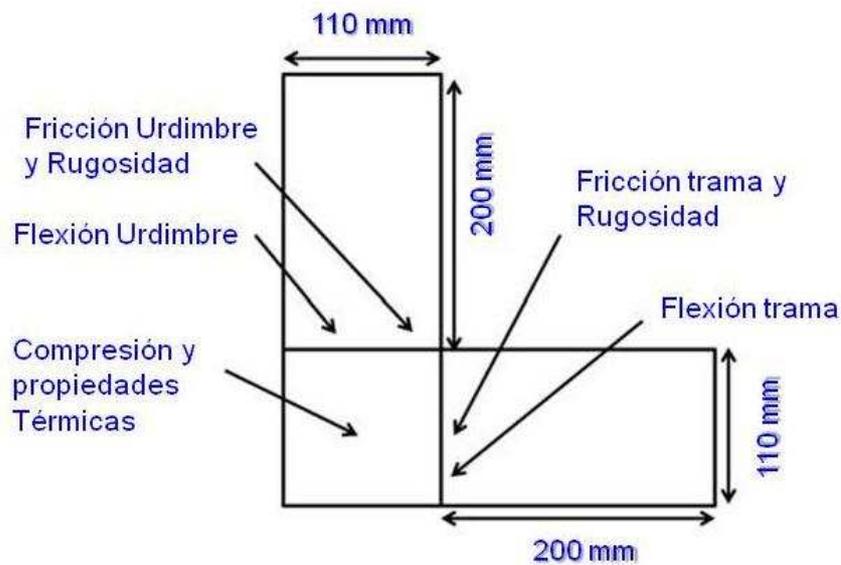


Figura 224. Ilustración de la probeta de tejido en forma de L con el centro formado por un cuadrado de 110 mm de lado y dos extensiones rectangulares de 200 mm a lo largo. Fuente: article (106)



Figura 225. Fabric Touch Tester (FTT). Fuente: [HKRITA](#)

### 8.7.2 Módulo de Compresión

Las propiedades de compresión se utilizan habitualmente para describir la voluminosidad de los tejidos. Cuando comprimimos transversalmente un tejido mediante los dedos de la mano, notamos una reacción basada en la tercera ley de

Newton (cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre un segundo cuerpo, el segundo cuerpo ejerce simultáneamente una fuerza igual en magnitud y opuesta en dirección sobre el primer cuerpo), esta sensación de tacto mullido está relacionada con la sensación de confort. Para su determinación, el equipo FTT presiona la muestra de tejido entre dos placas paralelas (ver figura 226). La placa superior "1" de la figura 226 se mueve hacia abajo, aplicando una fuerza normal creciente y continua de 0 a 70 gf / cm<sup>2</sup>. La placa inferior está conectada a tres sensores de fuerza "4" utilizados para registrar dinámicamente las fuerzas de compresión transmitidas de la placa inferior. Un sensor de distancia láser "5" registra la distancia entre las dos placas paralelas "1" y "3". Las fuerzas de compresión se convierten en presión gf/mm<sup>2</sup>, mientras que las distancias se convierten en el grosor de la muestra.

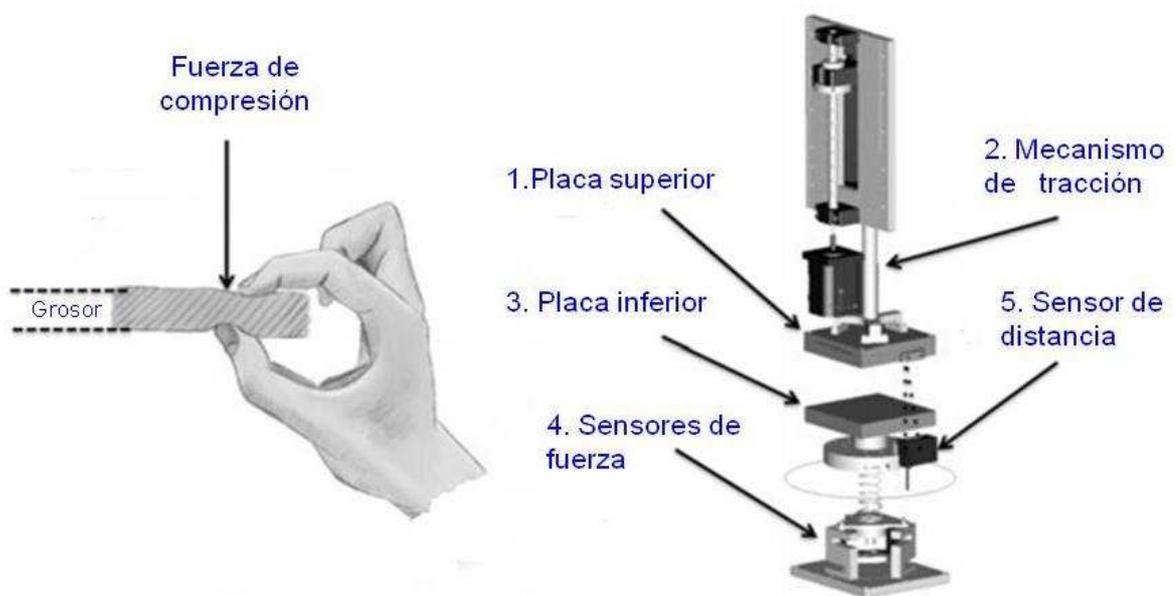


Figura 226. Módulo de compresión del FTT y diseño mecánico (106)

De acuerdo con la figura 227 b, se definen cuatro índices. Dos curvas reflejan el proceso de compresión y recuperación respectivamente. Se calcula también la integral de cada curva. El trabajo de compresión (CW) definido como la integral de la curva de compresión mientras que la tasa de recuperación (CRR) se expresa como el área de zona sombreada (entre las curvas de compresión y recuperación) dividido por el trabajo de compresión. Estos dos índices indican energía total consumida durante el proceso de medición.

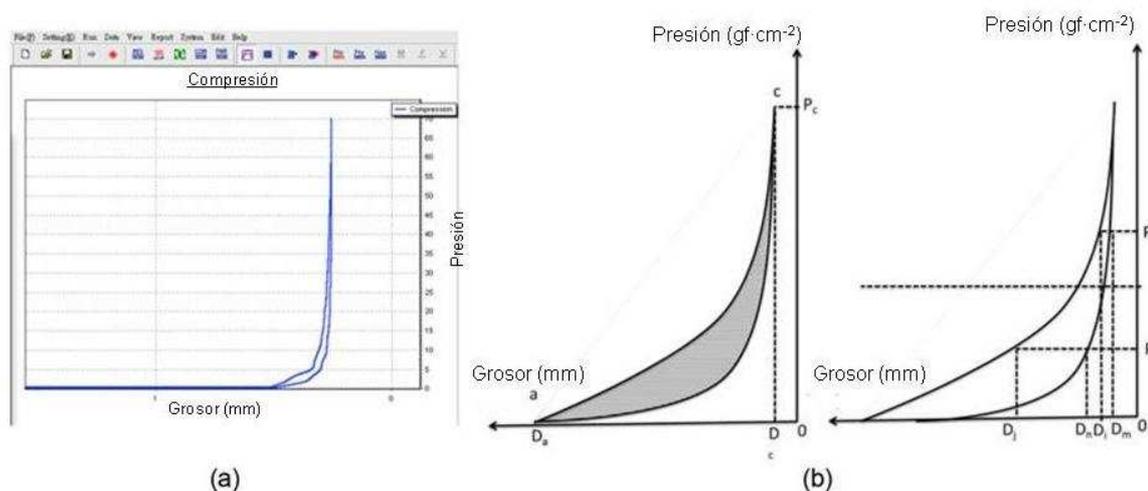


Figura 227. Diagramas de cálculo de índices de compresión; (a) curva de medición típico de FTT y (b) los diagramas de cálculo de los índices, la izquierda ilustra los cálculos de CW y CRR mientras que uno derecha ilustra cálculos de CAR y RAR. (106)

$$CW = \int_{D_a}^{D_c} P dD$$

$$CRR = \frac{\int_{D_a}^{D_c} P dD - \int_{D_c}^{D_a} P' dD'}{\int_{D_c}^{D_a} P dD}$$

donde  $D_a$  es el espesor inicial sin presión,  $D_c$  es el espesor a la máxima presión,  $P$  es la presión medida y  $D$  es el espesor medido con compresión.  $P'$  y  $D'$  corresponden a la recuperación.

Se calcula también la pendiente de cada curva. Se determinó el Centro de 60%, de acuerdo con las curvas de presión. Se calcula también la Rigidez media a la Compresión (CAR) y la Recuperación de la Rigidez media (RAR) respectivamente. Estos dos índices describen la tasa de variación de la presión durante la compresión y la recuperación. Fueron índices dinámicos interpretados como la presión media necesaria para variar 1 mm de espesor de la muestra.

$$CAR = (P_i - P_j) / (D_j - D_i)$$

$$RAR = (P_i - P_j) / (D_m - D_n)$$

Donde de  $i$  a  $j$  son los límites del centro 60% de la curva de compresión.  $P_i$  y  $P_j$  son las fuerzas de presión registraron mientras  $D_i$  y  $D_j$  son los grosores registrados. De  $m$  a  $n$  son los límites del centro 60% de la curva de recuperación.  $P_m$  y  $P_n$  son las fuerzas de presión realizadas mientras  $D_m$  y  $D_n$  son los espesores registrados.

### 8.7.3 Módulo térmico

La transferencia de calor entre los tejidos y la piel humana se percibe más bien como una sensación de frío. El estímulo térmico se desencadena por la diferencia de temperatura entre la piel humana y el tejido textil, tal como se muestra en figura 228. La temperatura de la piel del cuerpo humano se encuentra normalmente alrededor de 32 a 35 °C, mientras que la temperatura en el interior de una habitación normal es de alrededor de 20 °C. En la medida que los tejidos adoptan la temperatura del ambiente de la habitación, existe una diferencia de temperatura entre la piel humana y los tejidos textiles de alrededor de 10 °C.

Como se ilustra en la Figura 228, el flujo de calor empieza justo cuando tocamos el tejido. La temperatura de la placa superior del equipo se encuentra 10 °C por encima de la temperatura de la placa inferior que se encuentra a temperatura ambiente. Un sensor comercial de flujo de calor se coloca en el centro de la placa superior. A continuación se registra de forma dinámica el flujo de calor a través de la probeta de tejido durante el proceso de compresión.

La figura 229a muestra la típica curva del flujo de calor en relación al grosor del tejido. Se definen tres índices para mostrar las propiedades térmicas de la probeta. Los cálculos se muestran en 7b. la presión estándar utilizada fue de 41 gf/cm<sup>2</sup>.

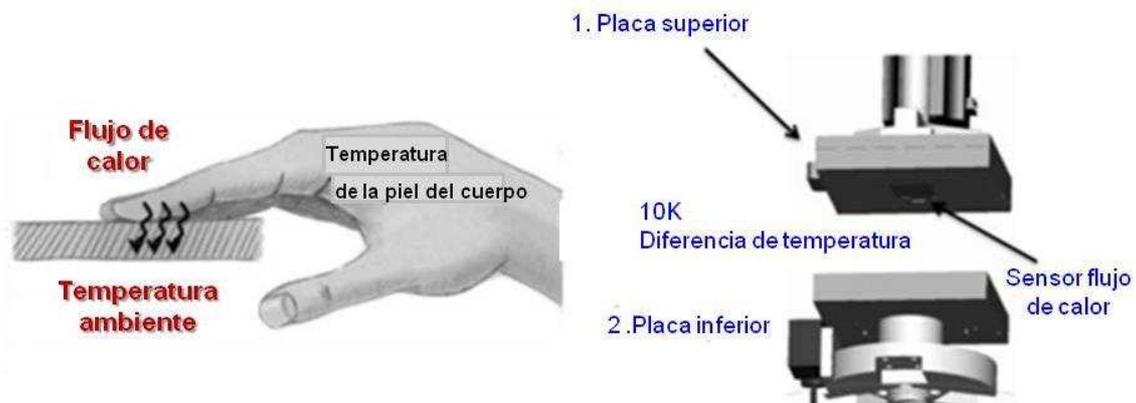


Figura 228. Descripción del módulo térmico del FTT. Transferencia de calor, y diseño mecánico (106)

La conductividad térmica se calcula con compresión y recuperación (TCC y TCR respectivamente) teniendo en cuenta el efecto del grosor del tejido. Otro índice llamado Flujo Máximo Térmico (TMF) se define como el flujo térmico máximo durante el proceso de medición. Este valor de flujo de calor instantánea está relacionado con la sensación de tacto frío.

$$TCC = (H_i \cdot D_i) / C$$

$$TCR = (H_j \cdot D_j) / C$$

$$TMF = \max (H)$$

Donde  $D_i$  y  $D_j$  son el grosor de la muestra bajo presión de 41 gf/cm<sup>2</sup> durante la compresión y recuperación, respectivamente,  $H_p$  y  $H_q$  son el flujo de calor cuando el espesor de la muestra es  $D_i$  y  $D_j$  respectivamente.  $C$  es la diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de la probeta.

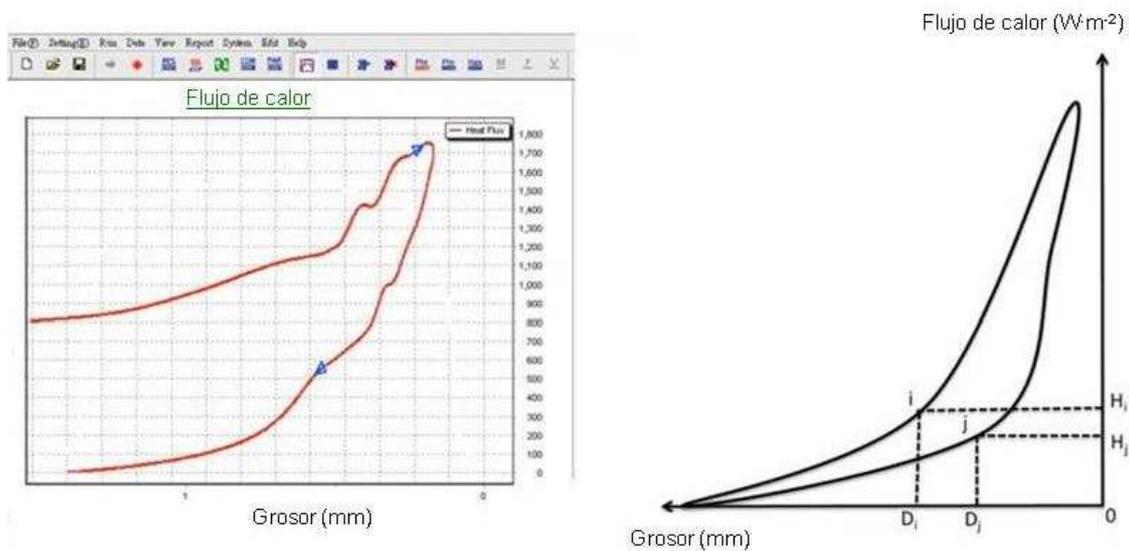


Figura 229. Diagramas de cálculo de los índices térmicos. Izquierda: curva de medición típica del FTT. Derecha: diagrama de cálculo de los índices de la CTP, TCR y TMF.(106)

### 8.7.4 Módulo de flexión

Cuando se intenta deformar un tejido, habitualmente se utilizan fuerzas de flexión. De hecho los tejidos que nos dan una sensación de tacto rígido presentan una rigidez a la flexión elevada y se corresponde con la percepción de la piel humana en operaciones tan simples como doblado de un tejido mediante los dedos tal como muestra la figura 230. La unidad de flexión del FTT retiene un extremo de la probeta y flexiona la otra simulando simulando el proceso descrito anteriormente con los dedos. Dos módulos de flexión idénticos se encuentran instalados de forma adyacente a la placa inferior. Las barras de flexión se encuentran al mismo nivel de la placa inferior. Dichas barras pueden moverse hacia abajo para ejercer una fuerza de flexión durante el ensayo. Debajo de de las barras se colocan unos minisensores que registran las fuerzas de flexión dinámicas.

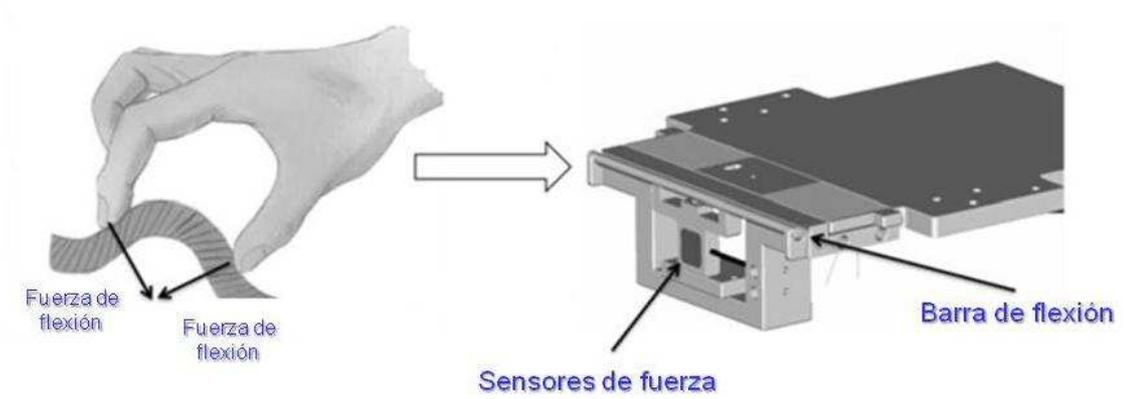


Figura 230. Módulo de flexión del FTT y principio de medida. (106)

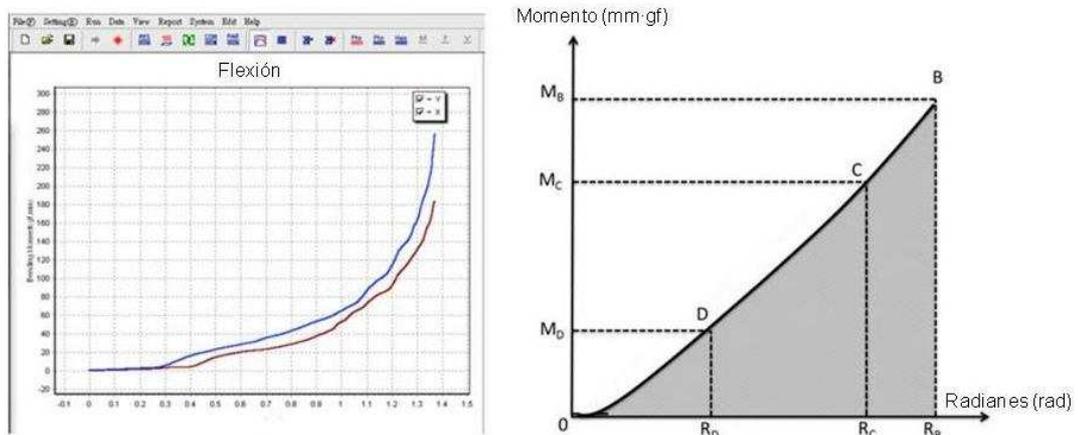


Figura 231. Diagrama del ensayo de flexión FTT y cálculo de los índices BAR y BW. (106)

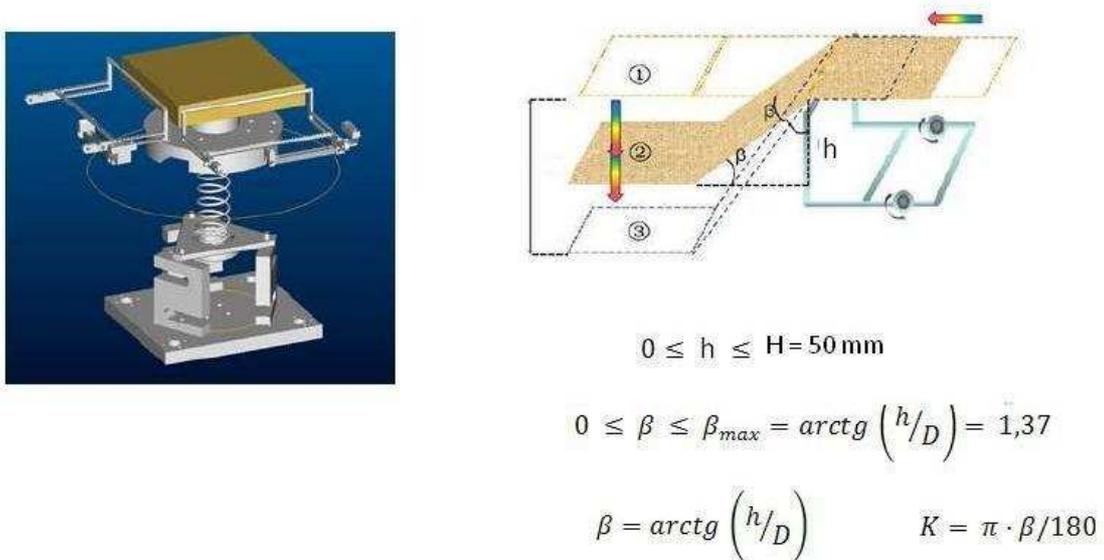


Figura 232. Módulo de evaluación de la flexión. Fuente SDL Atlas

Con éste módulo se obtienen índices similares al módulo de compresión. La figura 231 muestra la típica curva de FTT. La fuerza de flexión registrada se convierte en momento de flexión y la distancia recorrida por la probeta también de movimiento de la muestra también se convirtió. Muestra, también, dos índices, la rigidez a la flexion media (BAR) y el trabajo de flexión (BW).

$$BAR = (M_D - M_C) / (R_D - R_C)$$

$$BW = \int_1^B M dR$$

donde  $D$  y  $C$  indican los límites del centro 60% de la curva de flexión.  $M_D$  y  $M_C$  son el momento de flexión registrado mientras que  $R_D$  y  $R_C$  son el radián registrado.

### 8.7.5 Módulo de superficie

Las propiedades superficiales de los tejidos estan relacionadas con las respuestas sensoriales cutáneas que percibimos los humanos cuando deslizamos nuestros dedos o otra parte de nuestra piel sobre los tejidos percibiendo su textura y suavidad. Las irregularidades superficiales pueden provocar en algunos casos muy concretos, irritaciones cutáneas o incluso dolor (ver figura 233).

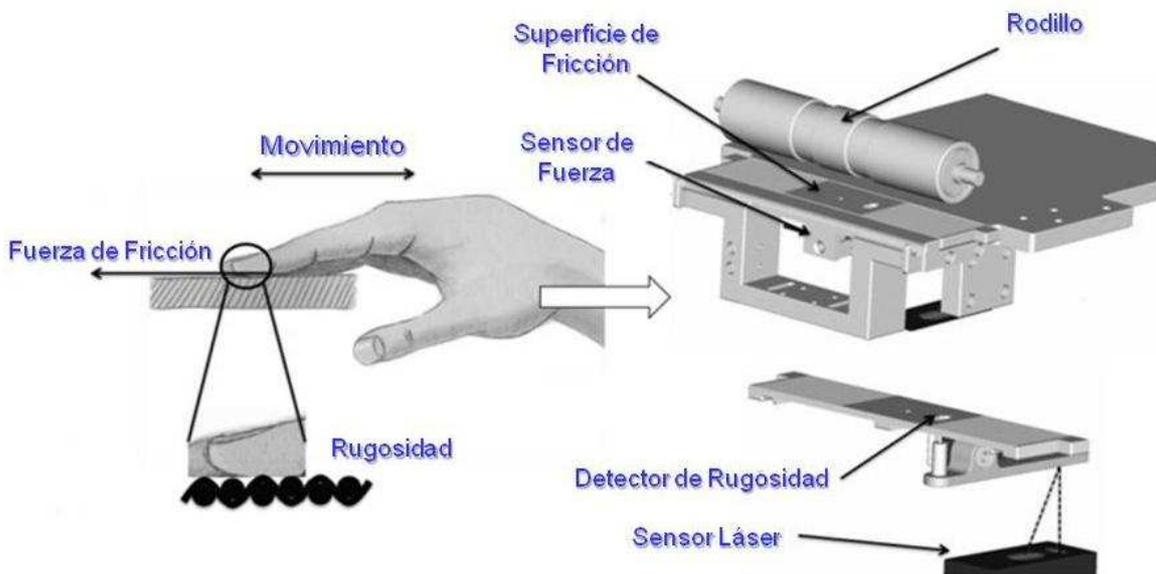


Figura 233. Módulo de superficie del equip FTT. Principio de ensayo y diseño mecánico. (106)

El módulo de superficie del FTT, mide tanto la fuerza que opone el tejido al desplazamiento del dedo por encima suyo (es decir su fricción) como la microrugosidad superficial. Este módulo se encuentra justo al lado del módulo de flexión. Las muestras se

colocan horizontalmente sobre una plataforma plana. Para la medida de la fricción superficial, se utiliza un detector móvil recubierto con una superficie metálica estandarizada. La fuerza de fricción dinámica se produce entre la superficie del detector y la superficie de la probeta. El sensor de fuerza en forma de célula de carga permite estudiar este fenómeno.

La superficie de fricción, empuja el sensor de fuerza. Se coloca un cilindro en la parte superior de la probeta proporcionando una fuerza normal de  $140 \pm 5$  gf. Un sensor en forma de aguja mide la irregularidad de la rugosidad superficial del tejido. El movimiento de estos sensores se puede completar con un sensor láser situado en el módulo de compresión. El movimiento de estos detectores durante el ensayo se corresponden con las variaciones geométricas de la superficie de la probeta.

Una gráfica típica de fricción generada durante el ensayo se muestra en la Figura 11 (a). Coeficiente de fricción superficial (SFC) se define como el valor medio de las fuerzas de fricción dinámicaa medidos dividido por fuerza normal constante, que muestra en la Figura 11 (b).

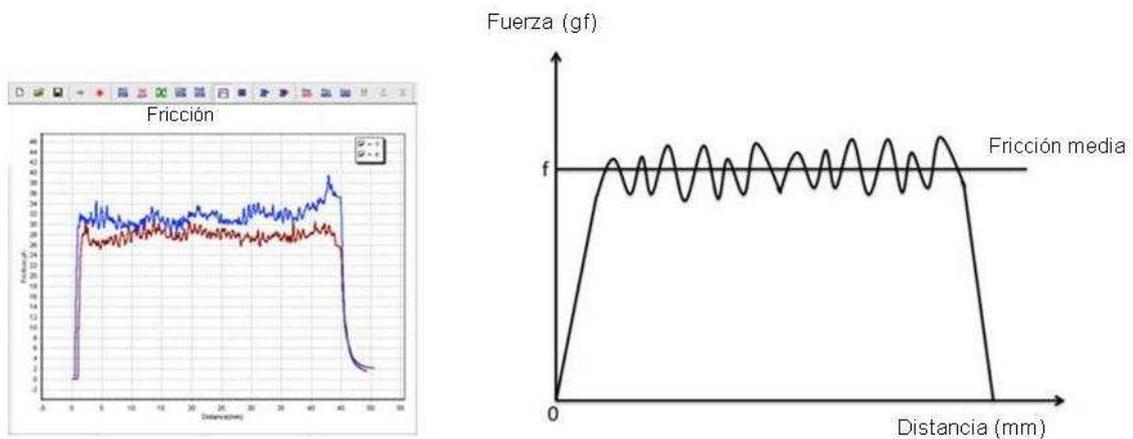


Figura 234. Diagramas de cálculo de los índice superficiales de fricción. A la izquierda la típica gráfica del FTT y a la derecha el diagrama de cálculo del índice. (106)

$$SFC = f/N = \frac{1}{N(b-c)} \int_c^b F dx$$

Donde  $N$  es la fuerza normal aplicada,  $c$  indica el inicio de la fricción dinámica,  $b$  indica el final de la fricción dinámica,  $F$  es la fuerza de fricción medida cuando la probeta se desplaza una distancia  $x$ .

En cuanto a la medidad de la rugosidad superficial cabe notar que el gráfico muestra unas curvas en forma de ondas. En la gráfica se rpresentan los valores máximo y mínimos de la amplitud del recorrido experimentado por el sensor de rugosidad así como la amplitud media en mm. En este ensayo se definen dos índices denominados Amplitud

de la Rugosidad Superficial (SRA) y Longitud de Onda de la Rugosidad (SRW) de acuerdo con lo que se muestra en la figura 236.

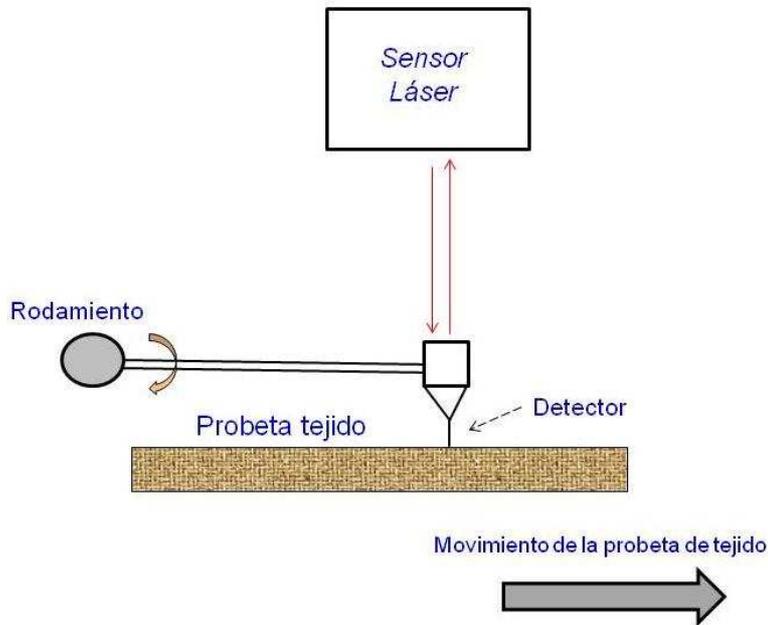


Figura 235. Sensor de la rugosidad superficial

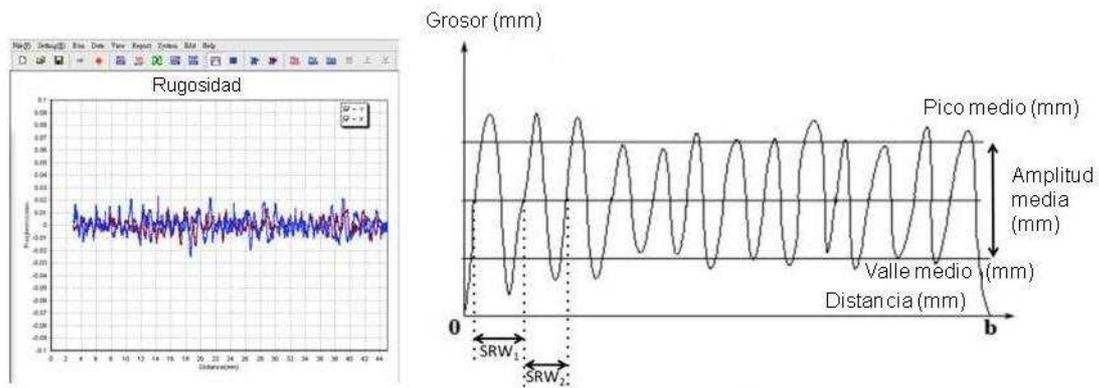


Figura 236. Diagramas de la rugosidad superficial y cálculo de los índices correspondiente. (106)

$$SRA = \bar{R}_p - \bar{R}_t = = \frac{1}{b} \sum_{x=1}^b R_{px} - \frac{1}{b} \sum_{x=1}^b R_{tx}$$

$$SRW = \frac{1}{M} \sum_{x=1}^M |X_{pn} - X_{tn}|$$

Donde  $R_{px}$  y  $R_{tx}$  son los valores medido de Picos y Valles de la onda de rugosidad cuando la probeta se desplaza una distancia  $x$ , y  $b$  es la máxima distancia recorrida durante el ensayo.  $X_{pn}$  y  $X_{tn}$  son las distancias recorridas cuando se determina el pico y el valle.  $M$  es el total de grupos de tres intersecciones sucesivas.

Índice	Descripción	Unidades
CW	Trabajo de compresión	gf x mm/mm <sup>2</sup>
CRR	Tasa de recuperación	nul (gf x mm x gf <sup>-1</sup> x mm <sup>-1</sup> )
CAR	Rigidez media a la Compresión	gf x mm <sup>-3</sup>
RAR	Recuperación de la Rigidez media	gf x mm <sup>-3</sup>
TCC	Conductividad térmica durante la compresión	W x m <sup>-1</sup> x K <sup>-1</sup>
TCR	Conductividad térmica durante la recuperación	W x m <sup>-1</sup> x K <sup>-1</sup>
TMF	Flujo térmico máximo	W x m <sup>-2</sup>
BAR	Rigidex a la flexión media	gf x mm x rad <sup>-1</sup>
BW	Trabajo de flexión	gf x mm x rad
SFC	Coefficiente de fricción superficial	nul ( gf x gf <sup>-1</sup> )
SRA	Amplitud de la rugosidad superficial	mm
SRW	Longitud de onda de la rugosidad	mm

Tabla 18. Índices medidos y calculados por el Fabric Touch Tester (FTT)

### 8.7.6 Video ensayo FTT

Video FTT <https://www.youtube.com/watch?v=wY8CKmqK9Ws>

## 9. BIBLIOGRAFIA

- (1). Hearle, J. W. S.; Amirbayat, J. Anyalysis of Drape by Means of Dimensionless Groups. *Textile Research Journal*, 1986, vol. 56, no. 12, pp. 727-733.
- (2). Chen, B. J.; Govindaraj, M. A Physically-Based Model of Fabric Drape using Flexible Shell Theory. *Textile Research Journal*, 1995, vol. 65, no. 6, pp. 324-330.
- (3). Chen, B.; Govindaraj, M. A Parametric Study of Fabric Drape. *Textile Research Journal*, 1996, vol. 66, no. 1, pp. 17-24.
- (4). Collier, J. R., Collier, B.; O'Toole, G.; Sargand, S. Drape Prediction using Finite Element Analysis. *Journal of Textile Institute*, 1991b, vol. 82, pp. 96-107.
- (5). Fisher, P., Krzywinski, H.; Rodel, A.S.; Ulbright, V.. Simulating the Drape Behavior of Fabrics. *Textile Research Journal*, 1999, vol. 69, no. 5, pp. 331-334.
- (6). Gan, L.; Ly, N. G.; Steven, G. P. A Study of Fabric Deformation using Nonlinear Finite-Elements. *Textile Research Journal*, 1995, vol. 65, no. 11, pp. 660-668.
- (7). Lo, W. M.; Hu, J. L.; Li, L. K. Modelling a Fabric Drape Profile. *Textile Research Journal*, 2002, vol. 72, no. 5, pp. 454-463.
- (8). Postle, J. R.; Postle, R. The Dynamics of Fabric Drape. *Textile Research Journal*, 1999, vol. 69, no. 9, pp. 623-629.
- (9). Stylios, G.; Wan, T. R. Modelling the Dynamic Drape of Fabrics on Sybthetic Humans: A Physical, Lumped-Parameter Model. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 1995, vol. 7, no. 5, pp. 10-25.
- (10). Stylios, G.; Wan, T. R. A New Collision Detection Algorithm for Garment Animation. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 1998, vol. 10, no. 1, pp. 38-49.
- (11). Chen, B.; Govindaraj, M. A Parametric Study of Fabric Drape. *Textile Research Journal*, 1996, vol. 66, no. 1, pp. 17-24.
- (12). Stump, D. M.; Fraser, W. B. A Simplified Model of Fabric Drape Based on Ring Theory. *Textile Research Journal*, 1996, vol. 66, no. 8, pp. 506-514.
- (13). Pierce, F. T. Geometry of Cloth Structure. *Journal of Textile Institute*, 1937, vol. 28.
- (14). Postle, J. R. The Mechanics of Woven and Knitted Fabric. *Textile Asia*, 1998, vol. 29, no. 8, pp. 35-36.
- (15). Hearle, J. W. S.; Grosberg, P.; Backer, S. *Structural Mechanics of Fibers, Yarns and Fabrics*. . Wiley Interscience ed., New York: Wiley Interscience, 1969.
- (16). Hearle, J. W. S.; Thwaites, J. J.; Amirbayat, J. *Mechanics of Flexible Fiber Assemblies*. NATO Advanced Study Institute Series: E, Applied Sciences. Nº 38 ed. The Netherlands: Sijthoff & Noordhoff, Alpen aan den Rijn, 1980.

- (17). Naik, A.; Carrera, E. *Medición Objetiva De Tejidos*. . A.N & E.C. ed., Terrassa: Universitat Politècnica de Catalunya, 1996. ISBN 84-605-4953-4.
- (18). Kawabata, S. *Standardization and Analysis of Hand Evaluation*. . The Textile Machinery Society of Japan ed., 2nd ed. Osaka: The Textile Machinery Society of Japan, 1980.
- (19). Hearle, J. W. S.; Konopasek, M.; Newton, A. On some General Features of a Computer-Based System for Calculation of the Mechanics of Textiles Structures. *Textile Research Journal*, 1972, vol. 10, pp. 613-626.
- (20). Hu, J. L.; Teng, J. G. Computational Fabric Mechanics: Present Status and Future Trends. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1996, vol. 21, pp. 225-237.
- (21). Konopasek, M. *Procedures for Calculating the Mechanical Properties of Textile Structures*. University of Manchester. Institute of Science and Technology, 1972.
- (22). Brown, P. R. III; Buchanan, D. R.; Clapp, T. G. Large Deflection Bending of Woven Fabric for Automated Material-Handling. *Journal of Textile Institute*, 1990, vol. 81, pp. 1-14.
- (23). Lloyd, D. W.; Hearle, J. W. S.; Thwaites, J. J.; Amirbayat, J. eds., *Mechanics of Flexible Fiber Assemblies*. NATO Sciences Series E. Springer, 1980. ISBN-10: 902860720X
- (24). Kim, J. H. *Fabric Mechanic Analysis using Large Deformation Orthotropic Shell Theory*. North Carolina State University, 1991.
- (25). Hu, J. L. *Structure and Low-Stress Mechanics of Woven Fabrics*. The Textile Institute. Woodhead Publishing Limited. Cambridge, 1994.
- (26). Grosberg, P.; Kedia, S. The Mechanical Properties of Woven Fabrics. Part 1: The Initial Load-Extension Modulus of Woven Fabrics. *Textile Research Journal*, 1966, vol. 38, pp. 71-79.
- (27). Anandjiwala, R. D. *Large Scale Extension of Woven Fabrics*. University of Leeds, 1984.
- (28). Postle, R.; Carnby, G. A.; Jong, S. *The Mechanics of Wool Structures*. United Kingdom: Ellis Horwood Ltd, 1988. ISBN 146132.
- (29). Hearle, J. W. S.; Shanahan, W. J. A Energy Method for Calculations in Fabric Mechanics. Part 1: Principles of the Method. *Journal of Textile Institute*, 1978, vol. 69, pp. 81-91.
- (30). Shanahan, W. J.; Hearle, J. W. S. A Energy Method for Calculations in Fabric Mechanics. Part 2: Examples of Application of the Method To Woven Fabrics. *Journal of Textile Institute*, 1978, vol. 69, pp. 92-100.
- (31). Ghosh, T. K.; Bartra, S. K.; Barker, R. L. Bending Behaviour of Plain Woven Fabrics: A Critical Review. *Journal of Textile Institute*, 1990, vol. 81, pp. 245-287.

- (32). Leech, C. M.; Abood, S. M. *Modelling of the Dynamics of Woven Constructions*. New York ed. ASME, 1991.
- (33). Weil, J. The Synthesis of Cloth Objects. *ACT SIGGRAPH Computer Graphics*, 1986, vol. 20, no. 4, pp. 49-54. ISSN 0097-8930.
- (34). Van West, R. B.; Pipesl, R. B.; Keefe, M. A Simulation of the Draping of Bidirectional Fabrics Over Arbitrary Surfaces. *Journal of Textile Institute*, 1990, vol. 81, no. 4, pp. 448-460.
- (35). Breen, D. E.; House, D. H.; Wozny, M. J. A Particle Based-Model for Simulating the Drape Behaviour of Woven Cloth. *Textile Research Journal*, 1994, vol. 64, no. 11, pp. 663-685.
- (36). Sidabraite, V.; Masteikaite, V. Effect of Woven Fabric Anisotropy on Drape Behaviour. *Materials Science*, 2003, vol. 9, no. 1, pp. 111-115.
- (37). Pierce, F. T. The Handle of Cloth as a Measurable Quantity. *Journal of the Textile Institute*, 1930, vol. 21, pp. 377-419.
- (38). Go, Y.; Shinohara, A.; Matsushashi, F. Viscoelastic Studies of Textile Fabrics. Part 6: Anisotropy of the Stiffness of Textile Fabrics. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, 1958, vol. 14, pp. 170-174.
- (39). Go, Y.; Shinohara, A. Anisotropy of the Crease Recovery of Textile Fabrics. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, 1962, vol. 8, pp. 33-38.
- (40). Cooper, D. N. E. The Stiffness of Woven Textiles. *Journal of Textile Institute*, 1960, vol. 51, no. 8, pp. 317-335.
- (41). Shinohara, H, A.; Shinohara, F.; Sakaebara, K. Theoretical Study on Anisotropy of Bending Rigidity of Woven Fabrics. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, 1980, vol. 26, pp. 75-79.
- (42). Hu, J. *Structure and mechanics of woven fabrics*. Woodhead Publishing limited. Cambridge. 2004.
- (43). Capdevila, F.X., Comas, R., Pares, F. Resistencia al arrugado de tejidos para camisería. *Boletín INTEXTER (UPC)*, 2008, vol. 134, pp. 5-17. <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/9051/1/1resistencia.pdf>
- (44). Carrera, E. *Nuevas perspectivas sobre la evaluación del cayente de los tejidos de calada*. Tesis doctoral. UPC, 2014. <http://upcommons.upc.edu/handle/10803/144659> consultado el 10 de febrero de 2015.
- (45). Chu, C. C.; Cummings, C. L., Teixeira, N. A. Mechanics of Elastic Performance of Textile Materials. Part V: A Study of the Factors Affecting the Drape of Fabrics. the Development of a Drape Meter. *Textile Research Journal*, 1950, vol. 20, pp. 539-548.
- (46). Cusick, G. E. The Measurement of Fabric Drape. *Journal of the Textile Institute*, 1968, vol. 59, no. 6, pp. 253-260.

- (47). Lo, W. M.; Hu, J. L.; Li, L. K. Modelling a Fabric Drape Profile. *Textile Research Journal*, 2002, vol. 72, no. 5, pp. 454-463.
- (48). Chu, C. C., Milton, M. P., Hamburger, W. J. Investigation of the Factors Affecting the Drapeability of Fabrics. *Textile Research Journal*, 1960, vol. 20, pp. 66-67.
- (49) Stylios, G. K., Zhu, R. The Characterisation of the Static and Dynamic Drape of Fabrics. *Journal of the Textile Institute*, 1997, vol. 88, no. 4, pp. 465-475.
- (50). Stylios, G; Wan, N, T. R. A New Collision Detection Algorithm for Garment Animation. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 1998, vol. 10, no. 1, pp. 38-49.
- (51). Jeong, Y. J. A Study of Fabric-Drape Behaviour with Image Analysis Part I: Measurement, Characterisation, and Instability. *Journal of the Textile Institute*, 1998, vol. 89, no. 1, pp. 59-69.
- (52). Robson, D., Long, C. C. Drape Analysis using Image Techniques. *Clothing and Textiles Research Journal*, 2000, vol. 18, no. 1, pp. 1-8.
- (53). May-Plumlee, T., Eischen, J., Kenkare, N., Pandurangan, P. *Evaluating 3D Drape Simulations: Methods and Metrics*. Edinburgh ed. 22-24 September 2003.
- (54). Jevsnik, S. Gersak, J. Modelling the Fused Panel for a Numeric Simulation of Drape. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2004, vol. 12, pp. 47.
- (55). Park, C.K., Kim, S., Yu, W.R. Quantitative Fabric Drape Evaluation System Using Image Processing Technology (Part 1: Measurement System and Geometric Model). *Journal of Testing Evaluation*, 2004, Vol 32 (2), pp- 131-137
- (56). UAM. "Procesamiento digital de señal. Análisis de Fourier en tiempo continuo". <http://arantxa.ii.uam.es/~taao1/teoria/tema4/tema4.pdf>. Consultado el 21 de mayo de 2013.
- (57). Sharma, K.S., Behera, B.K., Roedel, H., Schenk, A. Effect of sewing and fusing of interlining on drape behaviour of suiting fabrics. *International Journal of Clothing Science and Technology*. Vol 17 (2), 2005, pp:75-90.
- (58) Mizutani, C., Amano, T., Sakaguchi, Y. A New Apparatus for the Study of Fabric Drape. *Textile Research Journal*, 2005, vol. 75, no. 1, pp. 81-87.
- (59). Jevsnik, S., Zunic-Lojen, D. Drape Behaviour of Seamed Fabrics. *Fibers and Polymers*, 2007, vol. 8, no. 5, pp. 550-557.
- (60). Payvandy, P. *Evaluation of Fabric Drape Using Image Processing and Fractal Dimension*. MVIP, 2011. The 7<sup>th</sup> Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing. Iran University of Science and Technology. 16-17 november 2011.
- (61). Al-Gaadi, B., Göktepe, F., Halász, M. A new method in fabric drape measurement and analysis of the drape formation process. *Textile Research Journal*, 2012, vol. 82 (5), pp. 502-512.

- (62). Sanad, R., Cassidy, T., Cheung, V., Evans, E. Fabric and Garment Drape Measurement –Part 2. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 2013, 6(1):1-22.
- (63). Pollit, J. The geometry of cloth structure. *Journal of the Textile Institute proceedings*. Vol 40, Issue 1. 1949.
- (64). Robertson, A.F. Air porosity of Open-weave Fabrics. Part I. Metallic Meshes. *Textile Research Journal*. 1950, vol 20, pp. 838-844.
- (65). Determination of the waterproofness of the fabric by the Bundesmann rain test [http://www.kod.tul.cz/info\\_predmety/Om/frvs2025/en/Bundesman/Bundesman\\_AJ.html](http://www.kod.tul.cz/info_predmety/Om/frvs2025/en/Bundesman/Bundesman_AJ.html)  
Consultado el 15 de abril de 2015.
- (66). Bigorra, P. *Diccionario de defectos en el proceso textil de la lana (pañería y lanería)*. Agrupaciones profesionales Narcís Giralt. Sabadell, 1973.
- (67). Westenberg. Enkele metingen en beschouwingen betreffende het pillen. *Vezelinstitut T.N.O*, 1963, 118: 1-36.
- (68). Carrera, E. Consideraciones en torno al fenómeno del pilling. *Técnica Textil Internacional*. 1987 (4): 21-24.
- (69). Bona, M. *Textile quality. Physical methods of product and process control*. TEXILIA. Biela. 1992.
- (70). Legerská, J., Lizák, P., Drobný, M., Ligas, J. Electrical properties of the textile fabrics. *University Review*, 2012. 6 (2): 52-57.
- (71). Naik, A., Carrera, E. *Medición objetiva de tejidos*. UPC. Terrassa, 1996
- (72). Mogahzy, Y.E., Kilinc, F.S., Hassan, H. Developments in measurement and evaluation of fabric hand. pp 45-65. In: "Behery H.M. *Effect of mechanical and physical properties on fabric hand*". Woodhead publishing in textiles. Cambridge 2005.
- (73). Ju, J. *Structure and mechanics of woven fabrics*. Woodhead Publishing Limited. Cambridge. 2004
- (74). Grover, G., Sultan, M.A., Spivak, S.M. A screen technique for fabric handle. *Journal of Textile Institute*, 84 (3). 1993, pp.1-9.
- (75). Alley, V.L., McHatton, A.D. Nozzle Extraction Process and Handmeter for Measuring Handle. *United States Patent 4,103,550*. August 1, 1978.
- (76). Soliman, H.A., Sultan, M.A., Sheta, A.M. *The Bulletin of Faculty of Engineering*. 23: 115. 1984. Alexandria University.
- (77). Sultan, M. Sheta, A. Predicting fabric hand acceptance for a specific end-use. *Textile Information Bulletin*, 36 (4). 1994.
- (78). Pan, N., Yen, K.C., Zhao, S.J., Yang, S.R. A new approach to the objective evaluation of fabric hand from mechanical properties. Part II: Objective measure for total handle. *Textile Research Journal*, 58. 1988, pp. 438-444.
- (79). Kim, J., Slaten, B.L. Objective Assessment of Fabric Handle in Fabric Treated with Flame Retardants. *Journal of Testing and Evaluation*, 24, 1999, pp. 223-228.

- (80). Weekly times now. "Ancient luxury test returns". [http://www.weeklytimesnow.com.au/article/2010/11/02/251051\\_wool.html](http://www.weeklytimesnow.com.au/article/2010/11/02/251051_wool.html). Consultado el 5 de abril de 2013.
- (81). Burchett, M.M. *Development of confort measurement matrix*. North Carolina State University. May 12 2007. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/197>. Consultado el 5 de abril de 2013.
- (82). Killinc, F.S. *A Study of the Nature of Fabric Comfort: Design-oriented Fabric Comfort Model*. Ph.D.Thesis. Auburn University. USA. 2004.
- (83). Hassan, M. *Computer-based System for Evaluation and Recognition of the Structural and Surface Characteristics of Fabrics*. Ph.D.Thesis. Al Mansoura University. Egypt. 2004.
- (84). El Mogahzy, Y.E., Broughton, R., Wang, Q. The friction profile of cotton fibers and its importance in determining fiber performance in the nonwoven process. Part I: Fundamental aspects of fibre friction and lubrication. *Int. Nonwoven, J.* 6 (4), 1995, pp. 35-42.
- (85). Mogahzy, Y.E., Broughton, R., Wang, Q. The friction profile of cotton fibers and its importance in determining fiber performance in the nonwoven process. Part II: Experimental observations. *Int. Nonwoven J.* 7(1), 1995, pp. 26-33.
- (86). Hennrich, L., Seidel, A., Reider, O. Griffprüfung au Maschenwaren. *Maschen Industrie*, 7, 1999, p.46-47.
- (87). Seidel, A. Griffgewertung von Strumpfwaren mit dem ITV-Griff-Tester. *Melliand Textilberichte*, 6, 2001, p.491-494.
- (88). Martisiutè, G., Gutauskas, M. A new approach to evaluation of fabric handle. *Materials Science*. Vol. 7 No 3, 2001, pp.186-190.
- (89). Strazdiene, E., Gutauskas, M. New Method for the Objective Evaluation of Textile Hand. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. Vol. 13 No. 2, 2005, pp. 35-38.
- (90). Strazdiene, E., Ben Saïd, S., Gutauskas, M., Schacher, L., Adolphe, D.C. The evaluation of fabric treatment by Griff tester and sensory analysis. *International Journal of Clothing Science and Technology*. Vol. 18, No. 5, 2006, pp. 326-334.
- (91). Daukantiene, V., Papreckiene, L., Gutauskas, M. Simulation and Application of the Behaviour of the Textile Fabric while Pulling through a Round Hole. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. Vol 11, no 2 (41), 2003, pp.37-41.
- (92). Strazdiene, E., Martisiutè, G., Gutauskas, M., Papreckiene, L. Textile Hand: A New Method for Textile Objective Evaluation. *Journal of The Textile Institute*, 94, Part 1, No. 3-4, 2003, pp.245-255.
- (93). Grineviciute, D., Gutauskas, M The Comparison of Methods for the Evaluation of Woven Fabric Hand. *Materials Science*, Vol.10, No.1, 2004, pp.97-100.
- (94). Juodsnukyte, D., Gutauskas, M, Krauledas, S. Influence of Fabric Softners on Performance Stability of Textile Materials. *Materials Science*. Vol. 11, No. 2, 2005, pp.179-182.
- (95). Grineviciute, D., Daukantienè, V., Gutauskas, M. Textile Hand: Comparison of Two Evaluation Methods. *Materials Science*, Vol. 11, No. 1, 2005, pp. 57-63.

- (96). Truncyte, D., Papreckiene, L., Gutauskas, M. Behaviour of Textile Membranes while Being Pulling Through a Hole by the Constrained Method. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 15, No, 1, 2007, pp.50-54.
- (97) Hasani, H., Planck, H. Analysis of the Physical Fundamentals of an Objective Integral Measuring System for the Determination of the Handle of Knitted Fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 17, No. 6, 2009, pp.70-75.
- (98). Hasani, H. Novel Method to Evaluate the Low-Stress Shearing Behaviour of Knitted Fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 18, No. 2, 2010, pp.70-72.
- (99) Carrera-Gallissà, E., Capdevila, X., Valldeperas, J. Correlation Analysis between a Modified Ring Method and the FAST System. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 13. Vol. 9, No. 1, 2014, pp.131-140.
- (100). Pan, N., Zeronian, S.H., Ryu, H.S. An alternative approach to the objective measurement of fabrics. *Textile Research Journal*, 63, 1993, pp.33-43.
- (101). Pan, N. Quantification and evaluation of human tactile sense towards fabrics. *International Journal of Design & Nature*, Vol. 1, No.1, 2007, pp. 48-60
- (102). Nu Cybertek Inc. <http://www.nucybertek.com> consultada el 20 de agosto de 2012.
- (103). Wang, H., Mahar, T.J. Prediction of the handle characteristics of lightweight next-to-skin knitted fabrics using a fabric extraction technique. *The Journal of The Textile Institute*. Vol. 103, No. 7, July 2012, 691-697
- (104). Thwing-Albert Instrument Company. Clupak Fabricometer. Philadelphia, P.A. Trade literature. 1970.
- (105). Thwing-Albert Instrument Company. Información técnica del Handle-O-Meter. <http://www.thwingalbert.com/handle-o-meter.html>. Consultada el 22 de agosto de 2012.
- (106). Liao, X., Li, Y., Hu, J., Wu, X., Li, Q. A Simultaneous Measurement Method to Characterize Touch Properties of Textile Materials. *Fibers and Polymers* 2014, Vol.15, No.7, 1548-1559.
- (107). Chaudhuri, A. *Fundamentals of Sensory Perception*. Oxford University Press, Don Mills, Ontario, 2011. pp10-14