

Capítulo 5

Experimentación

5.1 Introducción

En este capítulo se explicará el desarrollo de la caracterización y análisis de las fracturas en dos tipos de papel, el papel Couché y el papel BPL21 (que es un papel fabricado en la compañía Copamex de 21 gr/m² y se emplea en la laminación con aluminio en 3 μm de espesor para el empaque interior de cigarrillos).

La caracterización de los dos tipos diferentes de papel se realizó mediante las siguientes pruebas: determinación de la rugosidad, determinación de la permeabilidad al aire, porcentaje de humedad, longitud de las fibras por el método de Bauer–Mc Nett, cenizas, prueba de tensión utilizando un aparato de elongación de razón constante, gramaje, rasgado, espesor y determinación de la dirección máquina.

Las líneas de ruptura se generaron por medio de pruebas de tensión, una vez obtenidas se digitalizaron con un escáner convencional. Por último se efectuó el análisis autoafín de los perfiles digitalizados.

5.2 Caracterización del papel

Las normas más empleadas para pruebas y definiciones con el papel son las TAPPI, y algunas normas españolas por lo que son éstas las que utilizaremos para efectuar la caracterización correspondiente y por lo tanto obtener algunas de las propiedades del papel que serán útiles en la presente investigación.

5.2 1 Determinación de la "rugosidad"

Esta prueba fue realizada bajo la norma Española UNE 57-080-88 parte 2 [60], método Bendtsen, ésta describe el procedimiento que se ha de emplear cuando se utiliza un instrumento conocido como aparato de Bendtsen, se aplica a papeles que tienen una rugosidad Bendtsen entre 10 y 1200 ml /min.

El aparato utilizado es un Bendtsen smoothness and porosity tester model 6 No. 11844 de 0-3000 ml/min. Se ilustra en la figura 5.1.



Figura 5.1 Aparato de Bendtsen y dispositivo para medir la rugosidad

La rugosidad de una hoja de papel o cartón es función del flujo de aire que pasa entre una corona circular y una hoja de papel o cartón, cuando se realiza el ensayo según condiciones especificadas.

Las unidades en que se expresan los resultados dependen del instrumento utilizado pero, en la mayoría de los casos, son ml/min. Para las medidas de rugosidad, un aumento en los valores numéricos indica un aumento en la rugosidad.

Este método es una medida de la uniformidad del papel. La medida del flujo de aire que se escapa, debido a las irregularidades de la superficie del papel, entre la muestra apoyada sobre un vidrio plano y liso y el anillo concéntrico que presiona la cara superior como se muestra en la figura 5.2, es relacionado a la rugosidad.

El procedimiento que se siguió es el siguiente: primero se cortaron las probetas, de las muestras seleccionadas, para este estudio se prepararon diez probetas, donde la medida de cada una fue de 100 mm x 100 mm, se colocan las probetas entre un vidrio plano y liso y el anillo concéntrico que presiona la cara superior, después se suministra aire, a una presión de 1.47 KPa y finalmente en el caudalímetro se mide el flujo de aire que pasa entre la corona y la probeta de papel.

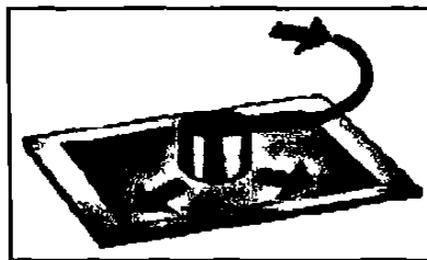


Figura 5.2 Muestra de papel entre vidrio y anillo concéntrico

Cabe señalar que la superficie a ensayar estuvo exenta de pliegues, arrugas, agujeros, marcas de agua o cualquier otro defecto y no se tocó con las manos la superficie de prueba, la prueba se realizó en las dos caras (fieltro y tela) del material debido a que tienen diferente rugosidad.

Nota: Se ha decidido respetar el término "rugosidad" empleado en la industria para designar la propiedad medida mediante el aparato de Bendtsen. Sin embargo no debe confundirse este término con el concepto de rugosidad (topográfica) en el contexto general del presente trabajo.

5.2.2 Determinación de la permeabilidad al aire

Esta prueba fue realizada bajo la norma Española UNE 57-066-86 parte 2 [61], método Bendtsen, esta describe el procedimiento que se ha de emplear cuando se utiliza un instrumento conocido como aparato de Bendtsen, se aplica a papeles cuya permeabilidad al aire esté comprendida entre 0.35 y 15 $\mu\text{m} / \text{Pa.s}$.

El aparato utilizado es un Bendtsen smoothness and porosity tester model 6 No11844 de 0-3000 ml/min., el cual se ilustra en la figura 5.1 y el dispositivo utilizado para medir la permeabilidad al aire se muestra en la figura 5.3.

La permeabilidad al aire es el volumen medio de aire que pasa a través de una unidad de superficie por unidad de diferencia de presión por unidad de tiempo. Se expresa en $\mu\text{m} / \text{Pa.s}$.



Figura 5.3 Dispositivo utilizado para medir la permeabilidad al aire

El método se basa en fijar una probeta entre una junta circular y una superficie plana anular de dimensiones conocidas, con la presión absoluta de aire en una cara de la superficie de ensayo de la probeta, equivalente a la presión atmosférica, manteniendo las diferencias de presión entre las dos caras de la probeta a un valor pequeño, pero sustancialmente constante, durante el ensayo. Luego se determina el caudal de aire que atraviesa la superficie de ensayo en un tiempo especificado

El procedimiento que se siguió fue el siguiente: primero se cortaron las probetas, de las muestras seleccionadas, para este estudio se prepararon diez probetas, donde la medida de cada una fue de 100 mm x 100 mm, se colocaron las probetas entre la junta circular y una superficie plana anular, después se suministró aire manteniendo la diferencia de presión entre las dos caras a un valor pequeño pero constante y finalmente en el caudalímetro se mide el caudal de aire que atraviesa la superficie de ensayo en un tiempo especificado, cabe señalar que la superficie a ensayar estuvo exenta de pliegues, arrugas, agujeros, marcas de agua o cualquier otro defecto.

5.2.3 Determinación de las propiedades de tensión

Esta prueba fue realizada bajo la norma TAPPI T 494 om-96 [62], ésta describe el procedimiento usando una máquina de tensión L&W Tensile Strenght Tester mostrada en la figura 5.4 la cual cuenta con un equipo de rapidez constante de elongación, tiene una velocidad de separación de las mordazas de 25 mm/min., una carga máxima de 500 N. Se emplea para determinar cuatro propiedades de ruptura en tensión: resistencia a la tensión, elongación, energía absorbida y rigidez.



Figura 5.4 Guillotina y máquina de tensión L&W

El procedimiento que se siguió fue el siguiente: primero se cortaron las probetas, las muestras se seleccionaron con ayuda de la guillotina Twin Blade Modelo No 22-34 mostrada en la figura 5.4, diez probetas en dirección máquina, transversal y a 45 grados, donde la medida de cada una fue de 250 mm x 15 mm, se colocaron las probetas entre las mordazas de la máquina, estas deben estar separadas una distancia de 180 mm y tener una velocidad de separación de 25 mm/min., después se da inicio a la prueba y ésta debe durar entre 15 y

30 segundos, finalmente la máquina automáticamente reporta los resultados de las propiedades antes mencionadas, cabe señalar que la superficie a ensayar estuvo exenta de pliegues, arrugas, agujeros, marcas de agua o cualquier otro defecto.

5.2.4 Determinación de la prueba de resistencia al rasgado (método del tipo Elmendorf)

Esta prueba fue realizada bajo la norma TAPPI T 414 om-98 [63], esta describe el procedimiento usando una máquina de rasgado Karl Frank GMBH Messzeug und Prufmaschinenbau WEINHEIM-BIRKENAU tipo 982 mostrada en la figura 5.5.



Figura 5.5 Máquina de rasgado

Este método mide la fuerza perpendicular al plano del papel, requiriendo múltiples hojas a desgarrar, a través de una distancia especificada. Los resultados medidos pueden usarse para calcular la resistencia al rasgado de una sola hoja. El trabajo hecho en el rasgado se mide por la pérdida de energía potencial del péndulo. La escala del instrumento está calibrada para indicar el promedio de la fuerza ejercida cuando se ensaya un cierto número de hojas juntas. Las unidades en las que se representa la resistencia al rasgado son gramos-fuerza. Esta prueba también ayuda a identificar cual es la dirección máquina del material.

El procedimiento para realizar la prueba es el siguiente: primero se cortaron las probetas, diez probetas en dirección máquina y diez en dirección transversal, donde la medida de cada una fue de 63 mm x 76 mm, se colocaron las probetas, las cuales constaron de cuatro hojas en dirección longitudinal y dos hojas en dirección transversal en el papel Couché y para el papel BPL21 constaron de ocho hojas en cada una de las direcciones, entre las mordazas de la máquina, las probetas deben tener una muesca antes de iniciar la prueba, después se da inicio a la prueba soltando el péndulo, finalmente la máquina automáticamente reporta los resultados de la prueba los cuales después se introducen en la ecuación 5.1 para obtener el resultado final de la prueba de resistencia al rasgado. Cabe señalar que la superficie a ensayar estuvo exenta de pliegues, arrugas, agujeros, marcas de agua o cualquier otro defecto.

$$(Lectura \times 16) / \# \text{ de muestras} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

5.2.5 Determinación del espesor del papel

Esta prueba fue realizada bajo la norma TAPPI T 411 om-97 [64], esta describe el procedimiento usando un micrómetro Karl Frank WEINHEIM-BIRKENAU de 0-2.6 mm el cual se muestra en la figura 5.6.



Figura 5.6 Micrómetro Karl Frank

Este método describe el procedimiento para la medida del espesor de una simple hoja de papel y las variaciones del espesor en esta, usando un micrómetro operado automáticamente cuando es aplicada una carga estática en un mínimo tiempo especificado, el espesor es una propiedad importante del papel y las variaciones en este son de especial importancia para papeles y cartones usados para propósitos mecánicos, el espesor es una de las importantes características que afecta la rigidez (*flexural stiffness*).

El procedimiento que se siguió para realizar la prueba se describe a continuación: primero se cortaron las probetas, diez probetas de acuerdo a la norma, se colocaron las probetas entre la máquina como se observa en la figura 5.6, finalmente la máquina automáticamente reporta los resultados de la prueba y se reporta el promedio y el espesor máximo y mínimo encontrado. Cabe señalar que la superficie a ensayar estuvo exenta de pliegues, arrugas, agujeros, marcas de agua o cualquier otro defecto.

5.2.6 Determinación del gramaje del papel

Esta prueba fue realizada bajo la norma TAPPI T 410 om-98 [65], esta describe el procedimiento para determinar el gramaje del papel usando una máquina de pesar Explorer OHAVS, capacidad máxima de 210 gramos ITEM No E12140 la cual se muestra en la figura 5.7, en la industria papelera el peso del papel es expresado en gramos por metro cuadrado y son las unidades preferidas por las normas TAPPI.



Figura 5.7 Dispositivo de corte de probetas y báscula

El procedimiento para realizar la prueba es el siguiente: primero se cortaron las probetas según la norma con la ayuda del dispositivo mostrado en la figura 5.7, después se colocaron las probetas en la báscula, finalmente la báscula reporta los resultados de los pesos y por medio de la ecuación 5.2 determinamos el gramaje. Cabe señalar que la superficie a ensayar estuvo exenta de pliegues, arrugas, agujeros, marcas de agua o cualquier otro defecto.

$$\text{Peso} \times 100 = \text{gramaje} \left(\text{gr} / \text{m}^2 \right) \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Donde 100 es un factor de conversión.

5.2.7 Determinación del contenido de cenizas en el papel

Esta prueba fue realizada bajo la norma TAPPI T 211 om-93 [66], ésta describe el procedimiento para determinar el porcentaje de cenizas utilizando crisoles de 50 a 100 ml, campana y mechero, ver figura 5.8 y una mufla VULCAN 3-550 NEY de 0-900 °C ilustrada en la figura 5.9.

Las cenizas contenidas en una muestra puede consistir de: varios residuos de químicos usados en su manufactura, material metálico de la maquinaria, materia mineral en la pulpa de la cual el papel fue hecho, recubrimientos, rellenos, pigmentos y otros materiales adheridos. La cantidad y composición de las cenizas es función de la presencia o ausencia de cualquiera de estos materiales u otros solos o en combinación.

El procedimiento para realizar la prueba es el siguiente: primero se cortaron las probetas, enseguida se desgarraron y se introdujeron en los crisoles, una vez puestos en estos se calentaron a 100 °C aproximadamente por medio de un mechero, hasta que el papel se quemó por completo. Después se introdujo en una mufla a 525 °C en un tiempo de 60 minutos y se dejó enfriar en un desecador aproximadamente 5 horas. Finalmente se pesaron las cenizas junto con los crisoles, después se pesaron los crisoles vacíos y se obtuvo el peso de las cenizas y por medio de la ecuación 5.3 se obtuvo el porcentaje de cenizas.

$$\% \text{ cenizas} = \frac{A}{B} * 100 \quad (\text{Ec. 5.3})$$

A = peso de cenizas, g.

B = peso del espécimen de prueba libre de humedad, g.



Figura 5.8 Mechero y campana, empleadas en la determinación del % de cenizas



Figura 5.9 Mufla VULCAN 3 –550 NEY de 0 –900 °C, empleada en la prueba de determinación del % de cenizas.

5.2.8 Determinación del porcentaje de humedad en el papel

Esta prueba fue realizada bajo la norma TAPPI T 412 om–94 [67], esta describe el procedimiento para determinar el porcentaje de humedad presente en el papel utilizando un Horno TERLAB con capacidad de 105-500 °C mostrado en la figura 5.10, desecador, una cortadora de probetas y báscula ilustrada en la figura 5.7.

El procedimiento fué el siguiente, primero se cortaron las probetas según la norma y enseguida se procedió a tomar la lectura del peso en la báscula, una vez obtenido se introdujeron las muestras en la estufa a 105 °C por 2 horas, esto se hizo con el fin de liberarlas de la humedad, después se dejaron en un desecador por 30 minutos y se volvió a obtener su peso libre de humedad y finalmente se calcula el porcentaje de humedad por medio de la ecuación 5.4 proporcionada en la norma antes mencionada.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100 \quad (\text{Ec. 5.4})$$

W_1 = Peso inicial del espécimen, g. y W_2 es peso libre de humedad, g.

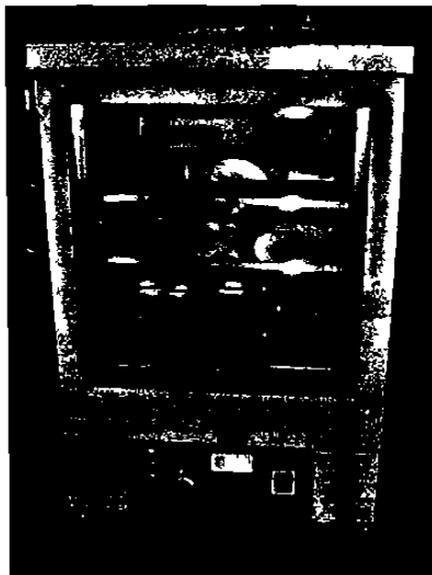


Figura 5.10 Horno TERLAB 105°C-500°C, empleado en la prueba de determinación del % de humedad.

5.2.9 Determinación de la dirección máquina en el papel

Esta prueba fué realizada bajo la norma TAPPI T 409 om-98 [68], ésta describe varios métodos para determinar la dirección máquina del papel, solo se utilizaron una máquina de tensión, figura 5.4 y una máquina de rasgado, figura 5.5.

El procedimiento fué el siguiente se cortaron las probetas según la norma TAPPI T 414 om-98 y TAPPI T 494 om-96 y siguiendo esas normas se realizaron las pruebas correspondientes de rasgado y de tensión explicadas anteriormente. Por último según la norma se determinó la dirección máquina del papel con ayuda los resultados obtenidos de las pruebas antes mencionadas.

5.2.10 Determinación de la longitud de fibras por medio del clasificador Bauer Mc Nett

Esta prueba fue realizada bajo la norma TAPPI T 233 om-95 [69], este método es apto para determinar la distribución de fibras por tamaño. El equipo utilizado es un clasificador de fibras tipo Bauer Mc Nett el cual se ilustra en la figura 5.11 y un desintegrador de fibras Frank Prufen+Messen, 220 V, 1.73 A, 2800 V/min., Georgii Kobold, D-7022 Lenfelden, W. Germany; Kod 524 Dad mostrado en la figura 5.11.

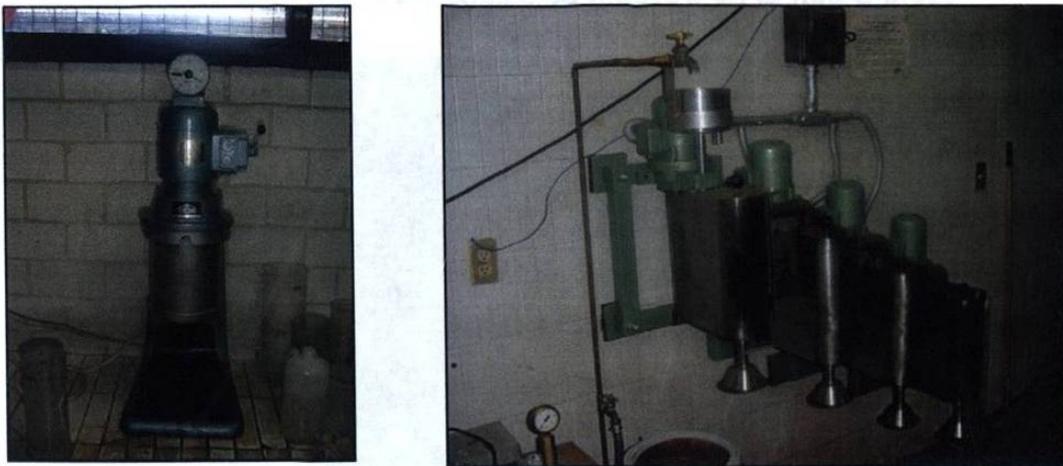


Figura 5.11 Desintegrador y clasificador de fibras tipo Bauer Mc Nett

El clasificador de fibras Bauer Mc Nett tiene por objeto determinar la distribución de fibras por tamaño, la clasificación de fibras se define como la distribución de

fibras que existen en una suspensión de pasta en agua en fracciones de diferente longitud de fibra.

El método consiste en fraccionar una porción de pasta suspendida en agua y en agitación, por tamizado, en el que se utilizan tamices verticales de número de mallas creciente. Los tamices se montan en cubetas dispuestas en cascadas.

Se determina el peso de las fibras retenidas por cada tamiz, así como el de las que pasan por todos los tamices, y los resultados se expresan como porcentaje del peso de la muestra original, referida al seco absoluto.

5.2.11 Microscopía óptica

Las observaciones de la microestructura del papel se efectuaron en un analizador de imágenes Leica Q550 Imaging Workstation, image processing and analysis system utilizando un software Leica Qwin, el cual digitaliza una imagen de 736 x 574 píxeles a color, este equipo se muestra en la figura 5.12.

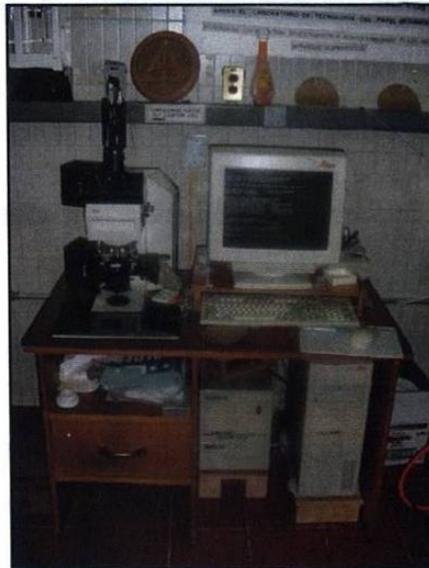


Figura 5.12 Analizador de Imágenes Leica Q550

El procedimiento para la adquisición de imágenes fue el siguiente, primero se desintegró el papel en el desintegrador, ver figura 5.11, después se saca material desintegrado en un vaso pequeño y se ubica entre un portaobjetos y el cubreobjetos y se observan las fibras individuales, también se observó el papel tal como es, se colocó la muestra como se muestra en la figura 5.14 para que la muestra estuviera completamente plana y se pudiera observar sin ninguna dificultad el material de estudio, se utilizó luz transmitida, cabe señalar que el papel couche no se pudo analizar debido a que es muy cerrado y no deja pasar la luz, se extrajeron algunas imágenes las cuales se mostrarán en el capítulo 6.



Figura 5.13 Portamuestra

5.2.12 Microscopía Electrónica de Barrido (M.E.B.)

También se realizaron observaciones del papel por M.E.B. utilizando un microscopio electrónico de barrido LEICA S440, este equipo se muestra en la figura 5.14, el cual alcanza una máxima resolución de 3.5 nanómetros utilizando un detector de electrones secundarios y de 4 nanómetros utilizando retrodispersados. La imagen que se observa en los monitores es digitalizada, con una dimensión de 1024 x 768 píxeles. Para obtener las imágenes fue necesario recubrir las muestras con oro.



Figura 5.14 Microscopio electrónico de barrido LEICA S440

5.3 Líneas de ruptura

Se llevaron a cabo los experimentos de ruptura en las hojas de papel Couché y BPL21, con el fin de analizar la morfología de las líneas de ruptura desde el punto de vista de geometría de fractales y elucidar si existe una posible relación entre la estructura del papel y los parámetros autoafines de la trayectorias de ruptura. Se empleó una máquina de tensión L&W, ilustrada en la figura 5.4, usando muestras según la norma TAPPI T 494 om-96 [62], las cuales miden 250 mm x 15 mm, la velocidad de separación de las mordazas fue de 25 mm/min y se obtuvo una propagación de la grieta a través de las muestras muy rápida que se encontraba entre los 15 y 30 segundos, cuando el tiempo fue mayor a los 30 segundos se rechazaron esas pruebas, ya que así lo marca la norma antes mencionada. Se rechazaron también las pruebas en que la ruptura no sucedía a la distancia entre las mordazas establecida por la norma. Las líneas de ruptura fueron digitalizadas a 2400 dpi en un escáner y posteriormente analizadas.

5.4 Análisis de Autoafinidad

El análisis autoafín se llevó a cabo de la siguiente manera, una vez obtenidas las líneas de ruptura por medio de pruebas de tensión, se digitalizaron con la ayuda de un escáner cama plana a 2400 dpi de resolución, ver figura 5.15 y 5.16.

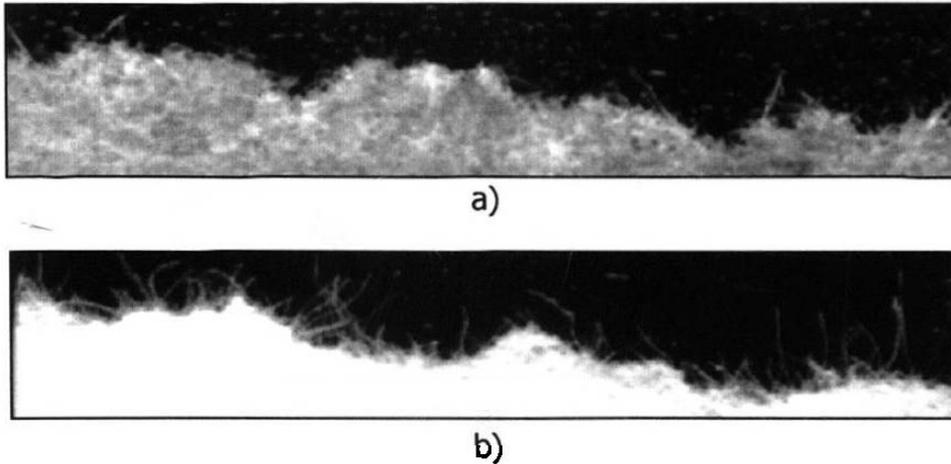


Figura 5.15 Imágenes obtenidas por medio del escáner de las líneas de ruptura; a) papel BPL21; b) papel Couché.

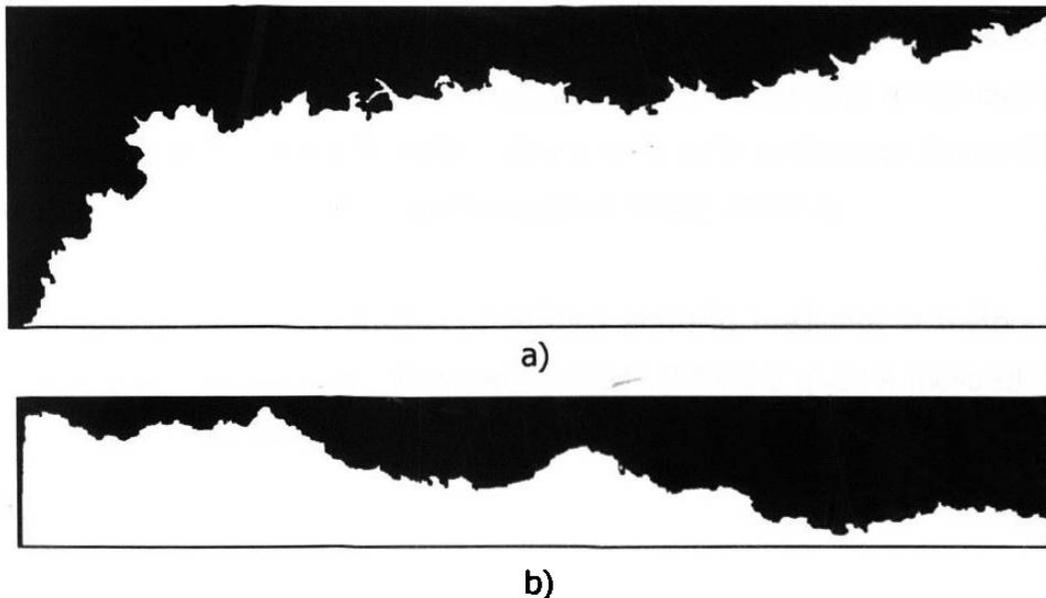


Figura 5.16 La cual muestra líneas de ruptura obtenidas por medio de un escáner de cama plana convertidas a blanco y negro; a) de un papel BPL21; b) papel Couché.

Enseguida se convirtieron las imágenes a blanco y negro, ver figura 5.16, y por último se realizó la extracción del perfil de la línea de ruptura para el análisis correspondiente, ver figura 5.17.

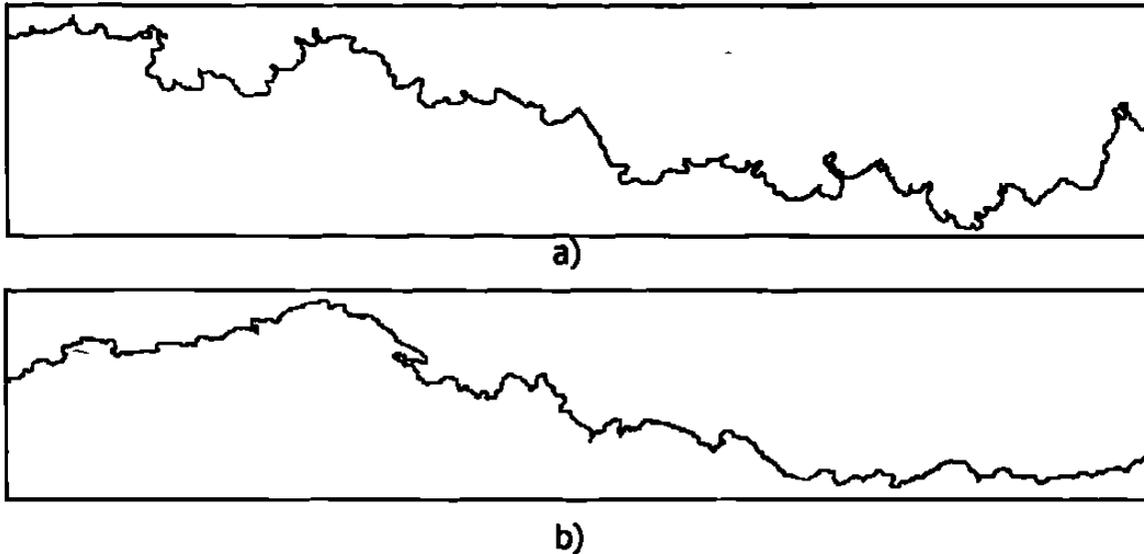


Figura 5.17 Líneas de ruptura extraídas de las pruebas de tensión; a) papel BPL21; b) papel Couché.

Las imágenes anteriormente mostradas de las líneas de ruptura obtenidas con la ayuda del escáner cama plana se introdujeron en un programa computacional, el cual elimina la tendencia de inclinación a través de la sustracción de una línea de ajuste que se obtiene por el método de mínimos cuadrados.

Este programa efectúa el análisis estadístico autoafín mediante el método de banda de ancho variable. Se utiliza este método debido a que ha mostrado ser el más exacto y confiable para este tipo de análisis [45].

Capítulo 6

Resultados y discusión

6.1 Introducción

En este capítulo se proporcionarán los resultados obtenidos de la caracterización, la generación de líneas de ruptura y su análisis autoafín del papel Couché y el papel BPL21.

Los resultados que se presentarán a continuación corresponden a las pruebas realizadas a los dos tipos diferentes de papel: determinación de la rugosidad, determinación de la permeabilidad al aire, prueba de porcentaje de humedad, longitud de las fibras por el método de Bauer–Mc Nett, cenizas, prueba de tensión utilizando un aparato de elongación de razón constante, gramaje, rasgado, espesor y determinación de la dirección máquina. Además se presentarán imágenes obtenidas con ayuda del analizador de imágenes, del microscopio electrónico de barrido y se analizarán las líneas de ruptura del papel por métodos para determinar el exponente de Hurst. Se discutirá la hipótesis planteada en función de los resultados obtenidos.

6.2 Rugosidad.

En la tabla 6.1 se indica la media aritmética de las lecturas efectuadas sobre cada probeta, expresando el resultado en ml/min., con tres cifras significativas y se calcula también la desviación típica o el coeficiente de variación, con dos cifras significativas, para cada cara del papel.

Tabla 6.1 Resultados de rugosidad

Tipo de Papel	Rugosidad (ml/min.)		
	Cara del Papel	Media Aritmética	Desviación Típica
BPL21	Tela	168.750	54.47
	Filtro	164.583	53.20
Couché	Tela	26.230	6.42
	Filtro	10.384	4.17

Como observamos en la tabla 6.1, con respecto al papel Couché se nota la gran diferencia, aproximadamente en un 60%, en los resultados de rugosidad entre el lado tela y el lado fieltro. Esto es debido a que en la mayoría de los papeles de espesor alto, como lo es en este caso, se manifiesta generalmente una preponderancia de fibras largas en el lado tela y de fibras cortas y finos en el lado fieltro. Otra cosa que sucede es que en el lado fieltro se encuentra una mayor concentración de cargas, pigmentos y finos, en la prueba de cenizas se nota que el papel Couché cuenta con un porcentaje de cenizas mayor, por lo que resulta una diferencia en las propiedades entre sus dos superficies que afectan durante el uso del papel, una de ellas es la receptibilidad de las tintas durante la impresión ya que los dos lados se comportan diferente, por lo que es importante identificarlos antes de iniciar un trabajo.

Por otro lado tenemos el papel BPL21, en el que no se observa gran diferencia, aproximadamente del 3%, en los resultados observados en la tabla 6.1, esto se debe a que el material casi no tiene pigmentos, cargas, aditivos u otros productos químicos, su composición es casi pura celulosa, como se ilustra en los

resultados en la prueba de cenizas, por lo que no afecta en las propiedades de las caras y hace que casi sean idénticas, esa diferencia es debida también a la perdida de finos en el lado tela por el arrastre de estos.

6.3 Permeabilidad al aire.

En la tabla 6.2 se indican los resultados obtenidos de la permeabilidad al aire "P" de cada probeta, en micrómetros por pascal segundo, por medio de la fórmula: $P = 0.0113q$ en la que "q" es el flujo de aire, expresado en ml/min., que pasa a través de la superficie de ensayo. Se calcula la media aritmética de los valores de la permeabilidad al aire, en micrómetros por pascal segundo, con tres cifras significativas y también la desviación típica o el coeficiente de variación de la permeabilidad al aire para todos los resultados, con dos cifras significativas.

Tabla 6.2 Resultados de permeabilidad del papel

Permeabilidad del Papel BPL21	
Media aritmética	5.111 $\mu\text{m}/\text{Pa}\cdot\text{s}$
Desviación típica	0.10

Como observamos en la tabla 6.2, el resultado que se presenta es del papel BPL21 y realizando una comparación en microscopía óptica con el papel Couché deducimos que el papel BPL21 es más poroso que el Couché, esto se puede deber a que el papel tenga una leve mala formación debida a que se tiene zonas con mayor número de fibras aglomeradas, como se observan en las micrografías ilustradas posteriormente, lo que resulta de zonas con densidades diferentes de unas áreas a otras y unas extremadamente delgadas que propician los poros en la red de fibras.

Con lo que respecta al papel Couché, no se le realizó esta prueba debido a que es un papel muy cerrado, es decir con poca porosidad y no contábamos con el equipo apropiado para realizar esta prueba a ese tipo de papel.

6.4 Propiedades de tensión.

En la tabla 6.3 se indica el promedio y la desviación estándar, de la resistencia de tensión y elongación, para cada una de las direcciones del material de trabajo.

Tabla 6.3 Resultados de las propiedades de tensión

Propiedades de tensión				
Tipo de papel	Dirección		RT (MPa)	E (%)
BPL21	Máquina	\bar{x}	49.108	0.956
		σ	3.166	0.1038
	Transversal	\bar{x}	29.122	4.990
		σ	1.209	0.690
	45°	\bar{x}	36.369	1.800
		σ	2.376	0.163
Couché	Máquina	\bar{x}	44.269	1.958
		σ	1.429	0.1059
	Transversal	\bar{x}	22.255	5.203
		σ	0.7536	0.5828
	45°	\bar{x}	31.454	2.651
		σ	2.671	0.284

RT → Resistencia a la tensión

E → Elongación

Hemos encontrado que el papel BPL21 es 40% más resistente en la dirección máquina y el papel couche es 50% más resistente en la dirección máquina, como se observan en la tabla 6.3 estos resultados eran de esperarse ya que en

la literatura se menciona que por lo general los resultados en resistencia en tensión son de 1.5 a 2 veces mayores en la dirección máquina que en la dirección transversal, esto se presenta debido a que una mayor cantidad de fibras quedan orientadas en dirección máquina lo que proporciona su mayor resistencia en esta dirección. A su vez entre estos diferentes tipos de papel, el BPL21 es más resistente que el Couché, como se observa en la tabla 6.3, a pesar de que el papel BPL21 es más delgado. Esto se debe a que las fibras largas generan en los papeles una red de uniones más resistentes que las fibras cortas, esto se comprueba con los resultados mostrados de la determinación de la longitud de las fibras, ver punto 6.12, y el hecho de que tengamos fibras largas o cortas es consecuencia del tipo de árbol del cual son extraídas esas fibras ya que desde la selección del árbol se saben las propiedades que se van a obtener.

6.5 Resistencia al rasgado

En la tabla 6.4 se indica el promedio de la resistencia al rasgado tanto en dirección máquina como transversal.

En lo que se refiere a esta prueba se observa en la tabla 6.4 una diferencia en los resultados entre la dirección máquina y la dirección transversal, los resultados son mayores en la dirección transversal aproximadamente del 20% para el papel Couché y para el papel BPL21 aproximadamente del 5.5%, tal como lo marca la literatura siempre existirá un valor mas alto en esta dirección debido a que en esta prueba la dirección en que se aplica la fuerza y la ruptura van en la misma dirección, contrario a lo que sucede en la prueba de tensión. También se muestra una diferencia mínima en los resultados en las dos direcciones en el papel BPL21 esto se debe a que el papel esta compuesto casi de pura celulosa y no tiene ningún almidón o algún polímero sintético para dar una mejor adhesión de las fibras así la fuerza que se aplica en las dos

direcciones es casi idéntica porque no tiene tantos obstáculos para iniciar la ruptura. También se muestra en esta tabla que el papel Couché tiene una mayor resistencia al rasgado que el papel BPL21 esto se debe a que el papel esta compuesto también de cargas minerales, productos químicos y aditivos que proporcionan una mejor adhesión de las fibras por lo que se requiere una mayor fuerza que en el papel BPL21. Es decir la ruptura se lleva con mas dificultad ya que para empezar existe una cantidad mayor de material (mayor espesor) que la fuerza tiene que vencer.

Tabla 6.4 Resultados de la resistencia al rasgado

Tipo de papel	Resistencia al rasgado (gramos – fuerza)	
	Dirección	
	Máquina	Transversal
BPL21	17	18
Couché	223	255.5

6.6 Espesor.

En la tabla 6.5 se reportan los resultados de la medición del espesor para ambos tipos de papeles. Como observamos, el papel Couché es 9 veces más grueso que el papel BPL21.

Tabla 6.5 Resultados del espesor

Tipo de papel	Espesor (μm)	
	Resultados	
	Promedio	Desviación Estándar
BPL21	30.375	2.628
Couché	270.125	2.883

6.7 Gramaje.

En la tabla 6.6 se indica el promedio y la desviación estándar del gramaje.

Tabla 6.6 Resultados del gramaje

Tipo de papel	Gramaje (gr/m ²)	
	Promedio	Desviación Estándar
BPL21	21.12	0.190
Couché	250.8	1.635

Como observamos el papel Couché es 12 veces más pesado que el papel BPL21. Se determinó el gramaje ya que es una de las características o propiedades usadas en la industria y el comercio del papel. El gramaje siempre es expresado en gramos por metro cuadrado y son las unidades preferidas por las normas TAPPI.

6.8 Densidad.

En la tabla 6.7 se indica la densidad para los dos tipos de papel calculada por medio de la siguiente fórmula: $(\text{Gramaje} / 1000) / \text{espesor} = \text{gr/cm}^3$.

Tabla 6.7 Resultados de la densidad

Tipo de papel	Densidad (gr/cm ³)
	Resultados
BPL21	0.697
Couché	0.928

Los resultados de la densidad muestran que el papel Couché es más denso que el papel BPL21, es decir que tiene más peso en fibras por unidad de volumen. Se determinó la densidad ya que es una característica estructural y un parámetro primordial en la determinación de las propiedades mecánicas.

6.9 Cenizas.

En la tabla 6.8 se indica el porcentaje de cenizas para los dos tipos de papel.

Tabla 6.8 Resultados del porcentaje de cenizas

% de cenizas	
Tipo de papel	Resultados
BPL21	1.43
Couché	32.51

Como observamos en esta tabla el papel BPL21 tiene un bajo contenido de cenizas, esperando por lo tanto propiedades muy semejantes en ambas caras, por su parte el papel Couché tiene alrededor de 23 veces más cenizas que el BPL21, lo que está de acuerdo con el hecho de que los papeles gruesos contienen altas cantidades de aditivos que resulta en acumulaciones en una de sus caras produciendo diferencias considerables en las propiedades de ambas caras.

6.10 Porcentaje de humedad.

En la tabla 6.9 se indica el porcentaje de humedad para los dos tipos de papel.

Tabla 6.9 Resultados del % de humedad

% de humedad	
Tipo de papel	Resultados
BPL21	5.30
Couché	3.74

Observamos que hay una variación entre los dos papeles aproximadamente del 30%, las propiedades de un papel dependen en un alto grado de su contenido de humedad, ya que el papel es un material higroscópico y el agua absorbida entra en equilibrio con la humedad del ambiente que lo rodea. Al observar los

resultados concluimos que el papel Couché tiene una mejor estabilidad dimensional que el BPL21, esto le permite mantener sus dimensiones originales al variar las condiciones ambientales, porque posee menor cantidad de humedad.

6.11 Dirección máquina

La dirección máquina se determinó por medio de dos pruebas: la prueba de resistencia al rasgado (método del tipo Elmendorf) y la prueba de tensión.

Una vez obtenidos los resultados de la prueba de resistencia al rasgado se comparan entre las dos direcciones principales y se sabe que en esta prueba la dirección que presenta una mayor resistencia al rasgado es la dirección transversal.

Por su parte en la prueba de tensión se realiza la misma comparación que en la prueba de rasgado, pero con la diferencia de que en esta prueba en la dirección máquina se presenta mayor resistencia a la tensión que en dirección transversal.

6.12 Longitud de fibras por medio del clasificador Bauer Mc Nett.

En la tabla 6.10 se indica la distribución de fibras por tamaño, se determinó el peso de las fibras retenidas por cada tamiz, así como el de las que pasan por todos los tamices, se expresan los resultados en porcentaje del peso de la muestra original.

Tabla 6.10 Resultados de la clasificación de longitud de fibras.

Clasificación de la longitud de las fibras Bauer Mc Nett						
Tipo de Papel		Malla 30 (0.595mm)	Malla 50 (0.297mm)	Malla 100 (0.148mm)	Malla 200 (0.074mm)	Finos
BPL21	%	45.72	11.27	14.49	5.28	23.24
Couché	%	32.96	17.32	10.99	6.56	32.19

En la figura 6.1 se muestran los resultados de la tabla 6.10 en forma gráfica, en esta se observa que el papel BPL21 está conformado de más fibras largas que el papel Couché por lo que el papel BPL21 es más resistente a la tensión que el Couché (tabla 6.3). Esto se debe a que las fibras largas generan en los papeles una red de uniones más resistentes que las fibras cortas.

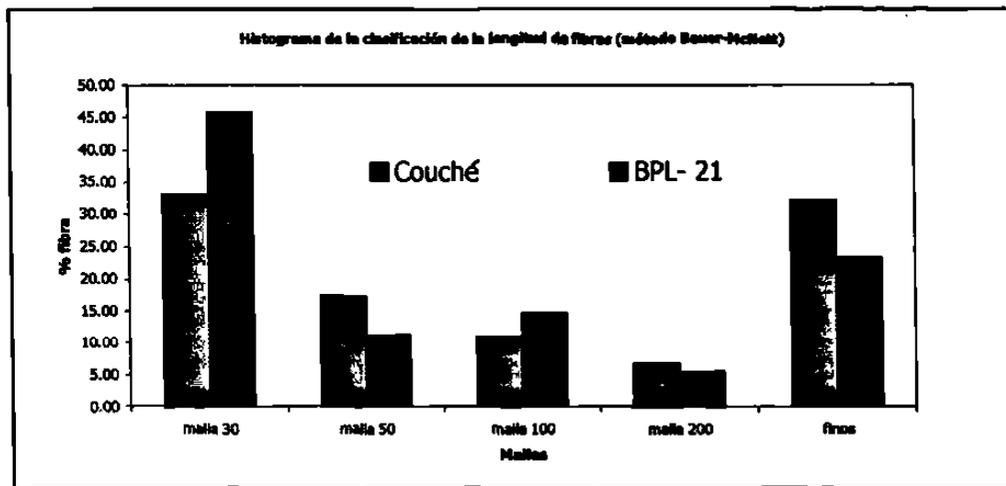


Figura 6.1 Histograma de la longitud de fibra (método de Bauer-Mc Nett).

6.13 Imágenes de microscopía óptica.

En las micrografías ilustradas en la figura 6.2 se observa que a esta escala el papel presenta isotropía estructural, es decir las fibras están al azar y no se presenta una dirección preferencial, es por eso que se cuenta con otras técnicas para hacer distinción entre las direcciones. En el inciso a) se observa una micrografía a 25X del papel BPL21 el cual muestra que el papel es una red de fibras de celulosa individuales adheridas unas a otras, también observamos algunos poros dentro de la red. La figura en el inciso b) muestra una micrografía a 100X del mismo tipo de papel, en la cual muestra una zona en que la red de fibras es muy porosa, la medida aproximada de estos poros está entre los $95.57 \mu\text{m}$ de ancho y de $39.88 \mu\text{m}$ alto para el poro ubicado en la parte inferior derecha (1) y de 45.48 de ancho y de alto 21.81 para el poro ubicado en la parte inferior izquierda (2). En el inciso c) se observa una micrografía a 100X de esta misma muestra, en la que se observan las fibras individuales de este papel, aproximadamente de $37.5 \mu\text{m}$ de diámetro para la fibra vertical y también observamos una red de microfibrillas en la parte izquierda de la micrografía. En el inciso d) se observa una micrografía a 200X en la que se observan los poros a una mayor amplificación.

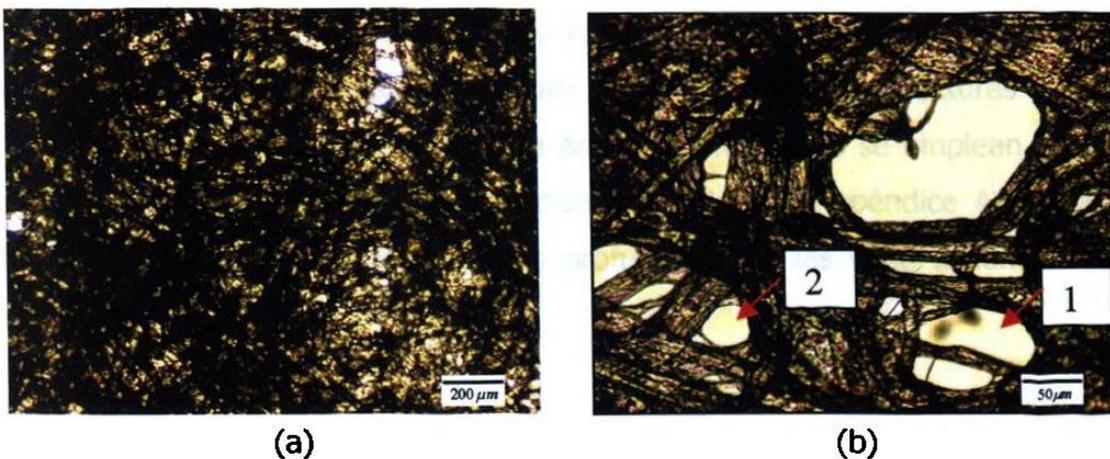
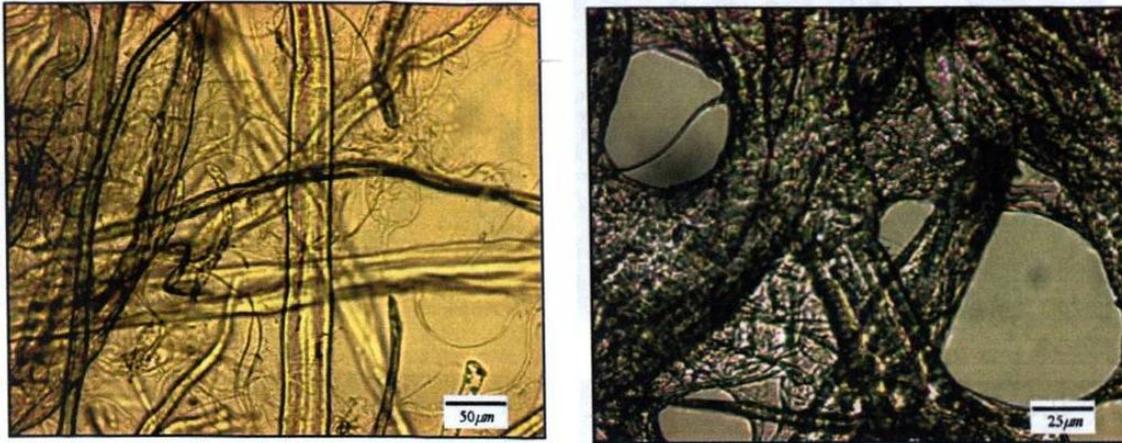


Figura 6.2 a) Micrografía a 25X del papel BPL21; b) Micrografía a 100X del papel BPL21; continua.



(c)

(d)

Figura 6.2 c) Micrografía a 100X del papel BPL21; d) Micrografía a 200X del papel BPL21

En las micrografías del papel Couché, figura 6.3, En la figura del inciso a) se observa una micrografía a 25X la cual muestra las fibras de celulosa individuales. En los incisos b) y c) se observa una red de fibras no muy bien definidas debido a que es un papel muy cerrado, contrario al otro y por lo tanto no deja pasar mucha luz, lo que nos conduce a deducir que no es poroso. En el inciso d) se muestra una estructura de vaso, la cual es la causante de que el papel pueda absorber el agua o cualquier otro líquido, estas estructuras crecen en la fibra y las proveen cierto tipo de árboles, estas fibras se emplean en los papeles donde se requiere alta absorción de líquidos. El apéndice A muestra más imágenes donde se detallan más profundamente las observaciones aquí consignadas.

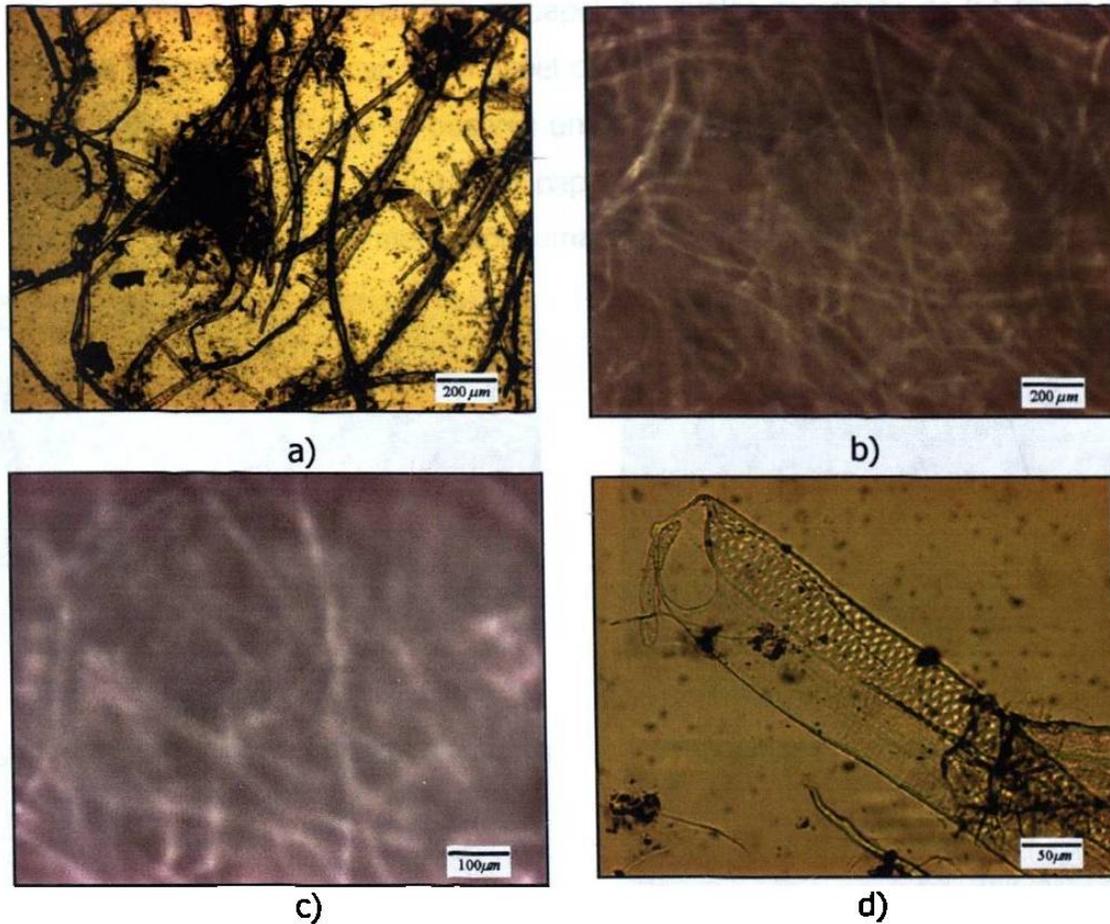


Figura 6.3 a) y b) Micrografía a 25X del papel Couché; c) Micrografía a 50X; d) Micrografía a 100X;

6.14 Imágenes de microscopía electrónica de barrido.

En las micrografía ilustradas en la figura 6.4, en el inciso a) obtenida del MEB a 500X, se observa una panorámica muy general de la microestructura que posee el papel BPL21. Al igual que en las imágenes mostradas anteriormente, se observan poros en la red de fibras. En el inciso b) se observa una micrografía a 2.5KX la cual muestra un poro, de esta micrografía podemos deducir que el material posee heterogeneidades considerables las cuales pueden ser las guías de las trayectorias que pueden tomar las grietas al aplicar una fuerza sobre el papel.

En el inciso c) se observa una micrografía a 5KX la cual muestra un enmarañamiento de fibrillas de este papel, las cuales son parte de las fibras de celulosa y estas se conocen en el papel como finos, o sea elementos no fibra en la celulosa. En el inciso d) se observa una micrografía obtenida a 7.5 KX la cual muestra unas fibras de celulosa del papel BPL21 con sus detalles, se muestra una fibra de 14 μm de diámetro aproximadamente.

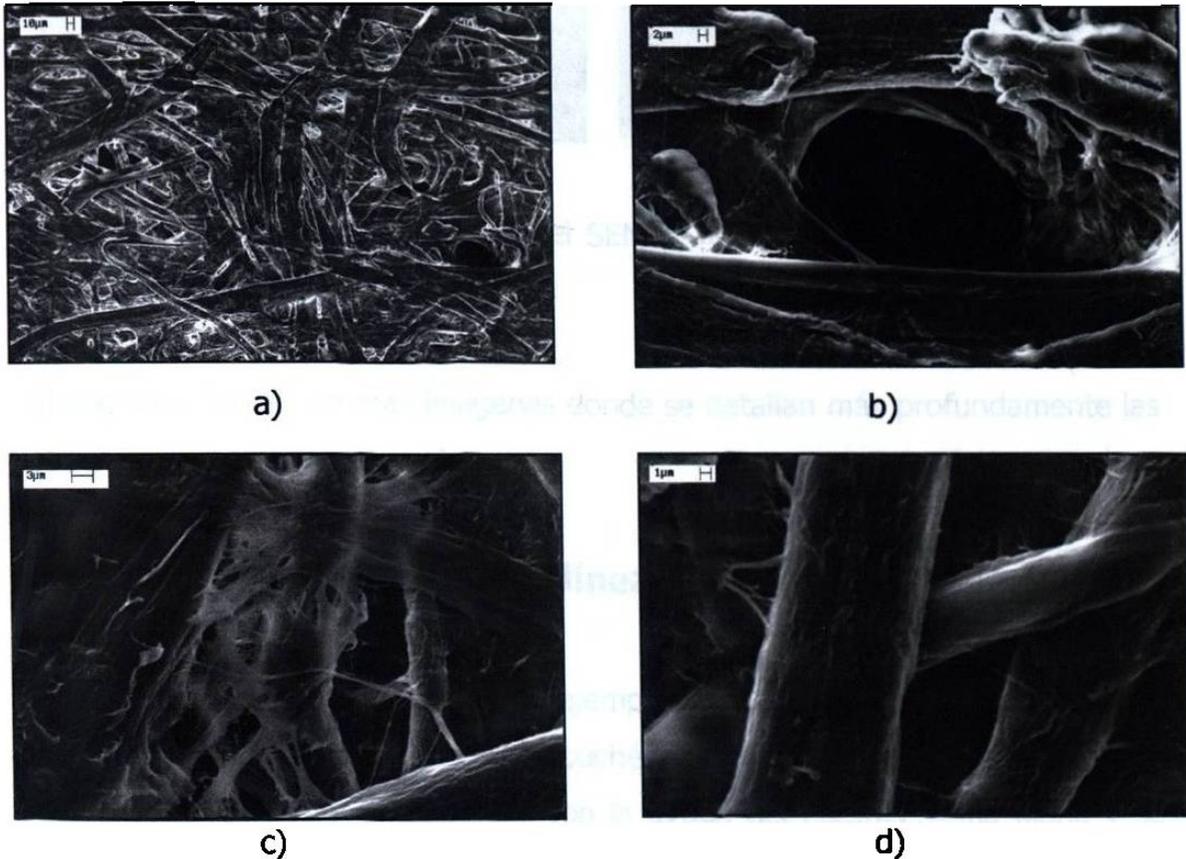


Figura 6.4 a) Micrografía obtenida del MEB a 500X; b) Micrografía obtenida a 3KX; c) Micrografía obtenida a 5KX; d) Micrografía obtenida a 7.5KX;

Las imágenes obtenidas del microscopio electrónico de barrido ilustradas en la figura 6.5, fueron obtenidas a 2KX y 5KX respectivamente, en estas se observa una panorámica muy general de la microestructura que posee el papel Couché. A diferencia de las imágenes mostradas anteriormente no se observan poros en la red de fibras y no se observaron a mayor magnificación debido a que la resolución ya no era de gran calidad.

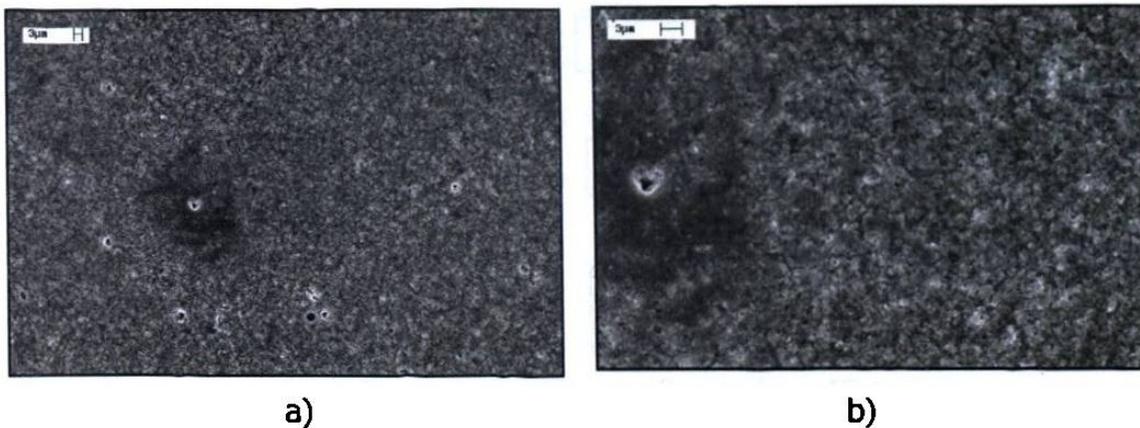


Figura 6.5 a) Micrografía obtenida del SEM a 2KX; b) Micrografía obtenida del SEM a 5KX

El apéndice B muestra más imágenes donde se detallan más profundamente las observaciones aquí consignadas.

6.15 Análisis autoafín de las líneas de ruptura.

En la figura 6.6 se muestran algunos ejemplos de la extracción de perfiles de las líneas de ruptura del papel BPL21 y Couché para el análisis correspondiente. Las líneas de ruptura fueron obtenidas con la ayuda del escáner cama plana y se introdujeron en un programa computacional para el análisis estadístico autoafín.

En las figuras 6.7 y 6.8 se muestra el promedio (10 perfiles en cada dirección) de los resultados obtenidos del análisis autoafín mediante el método de banda de ancho variable, Z_{max} y covarianza en los dos tipos de papel, BPL21 y Couché, en su dirección máquina, transversal y a 45 grados. Las curvas de autoafinidad de perfiles individuales se incluyen en el apéndice C.

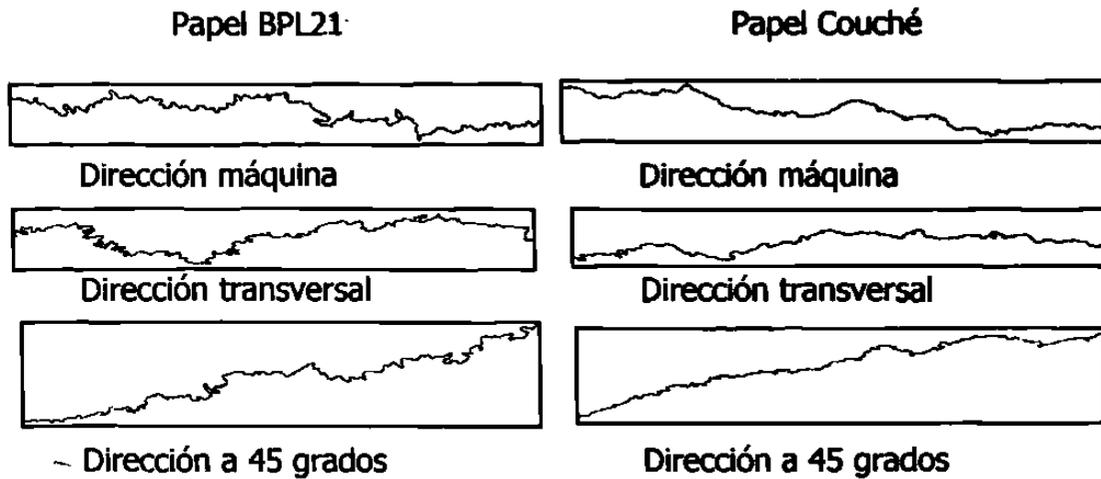


Figura 6.6 Extracción de perfiles de las líneas de ruptura del papel BPL21 y Couché para el análisis correspondiente.

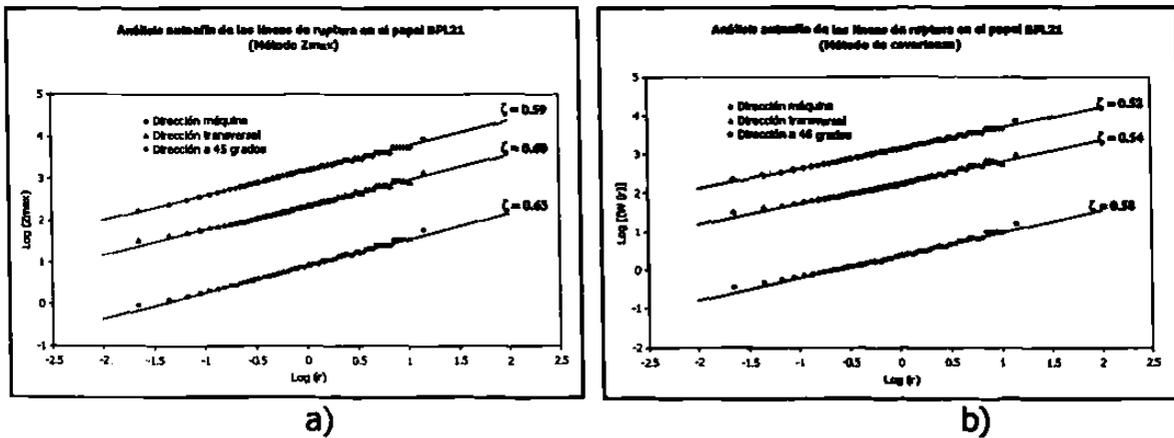


Figura 6.7 Análisis autoafín, utilizando el método de banda de ancho variable, Zmax y covarianza, efectuado sobre las líneas de ruptura obtenidas mediante un escáner cama plana en el papel BPL21.

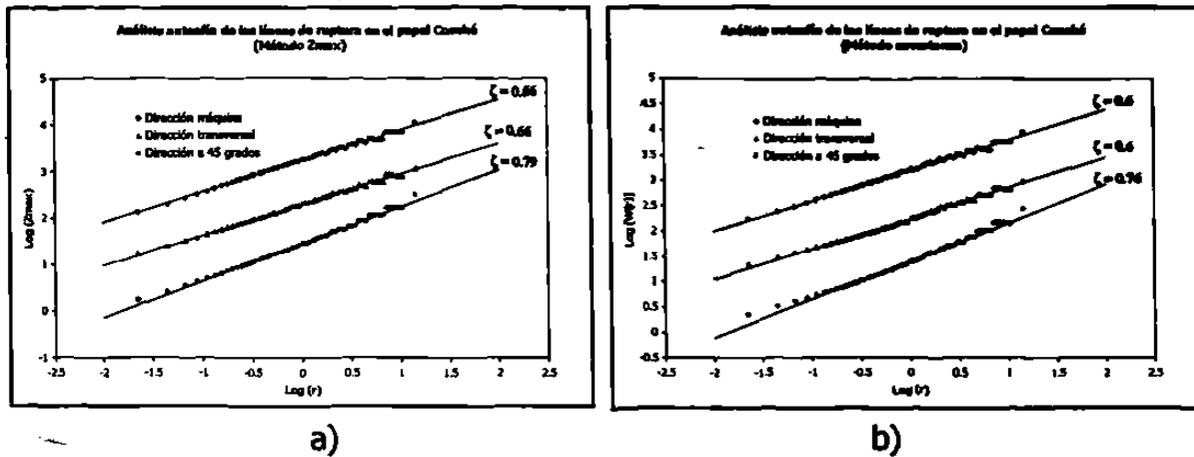


Figura 6.8 Análisis autoafín, utilizando el método de banda de ancho variable, Zmax y covarianza, efectuado sobre las líneas de ruptura obtenidas mediante un escáner cama plana en el papel Couché.

Tabla 6.11 Comparación de resultados de exponentes de rugosidad usando el método de Zmax.

Papel	Método Zmax		
	Máquina	Transversal	45 Grados
BPL21	0.59	0.6	0.63
Couche	0.66	0.66	0.79

Tabla 6.12 Comparación de resultados de exponentes de rugosidad usando el método de covarianza.

Papel	Método de covarianza		
	Máquina	Transversal	45 Grados
BPL21	0.52	0.54	0.58
Couche	0.6	0.6	0.76

Si resumimos los resultados del análisis autoafín del papel BPL21 y Couché, ver tabla 6.11 y 6.12, observamos que se presenta una diferencia en los valores obtenidos mediante el método de Z_{max} y covarianza. Ahora bien el valor teórico es de $2/3$ [52], el valor experimental para el papel Couché es aproximado a $2/3$ para la dirección máquina y transversal pero no a 45 grados. Lo interesante en este punto es que siempre en el papel Couché el exponente es mayor en comparación con el BPL21. En el BPL21, ζ siempre es cercano a $2/3$ aún a 45 grados, en el Couché no es así, ζ es cercano a $2/3$ en la dirección máquina y transversal pero a 45 grados el valor es el mismo que en tres dimensiones ($\zeta \sim 0.8$), ¿que nos esta diciendo esto?. Aparte, el papel Couché es más grueso, por lo tanto el comportamiento se aproxima al tridimensional, es decir puede existir una cierta razón para pensar que el exponente va ser mayor, va a tender a acercarse al tridimensional. Podemos pensar que este valor es un *atractor* hacia el cual tiende el exponente al cambiar las condiciones de medio quiasibidimensional a tridimensional y/o al ocurrir la propagación en direcciones diferentes a la dirección máquina o transversal, por el efecto anisotrópico. A medida que se le añaden dificultades al frente de grieta el valor tiende al tridimensional y aquí la dificultad para propagarse. No hay mucho problema que la grieta se propague en la dirección máquina ni en la dirección transversal pero si en la dirección oblicua (a 45 grados) porque tiene que zigzaguear más y por eso se obtiene un valor de ζ más alto. El método de Z_{max} arroja resultados más cercanos a los esperados teóricamente que el método de covarianza.