

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN LAS  
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAPEL  
KRAFTLINER UTILIZADO PARA HACER CAJAS  
DE CARTÓN

Curso 2019/2020

**Alumno/a:**

Ana Cleia González Alves

**Director/es:**

Dra. María Jesús Ariza Camacho



# **INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAPEL KRAFTLINER UTILIZADO PARA HACER CAJAS DE CARTÓN**

**Realizado por:**

Ana Cleia González Alves.

**Directora:**

María Jesús Ariza Camacho.

Área de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica.

Depto. Química y Física. Universidad de Almería



Trabajo Fin de Grado.

Grado en Ingeniería Mecánica. Curso 2019/2020

Escuela Superior de Ingeniería. Universidad de Almería.

Almería, septiembre 2020.

## Agradecimientos

Este Trabajo Fin de Grado ha sido posible gracias a mi familia y a su apoyo incondicional.

A mis amigos por levantarme cuando estaba débil, en especial a Luis, por entender mejor que nadie esas debilidades.

A mi directora de TFG, María Jesús, por su paciencia y sus conocimientos, que han hecho que este proyecto tenga un sentido.

A Smurfit Kappa Almería, en especial a su encargada de laboratorio Carmen, por permitirme hacer este TFG posible.

Por último, a mi querida comparsa de Martínez Ares por transmitirme su alegría cada año por Carnaval.

## Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se realiza una investigación para estudiar la influencia del gramaje del papel y la humedad ambiental en las propiedades mecánicas a compresión del papel Kraftliner, un papel de fibra usado en la fabricación de cartón corrugado para hacer cajas para envasar y comercializar productos agrícolas.

En el estudio experimental se han usado 5 papeles de gramajes distintos, todos ellos muy utilizados en la industria del papel y cartón para la agricultura. Tras una caracterización básica de estos cinco papeles, se estudia en primer lugar la absorción de agua del papel en función del tiempo que permanece en una atmósfera de humedad relativa elevada. Luego se realizan los ensayos mecánicos de compresión en corto para tres niveles de humedad contenida en el papel, con el objetivo de ver la influencia del agua absorbida en las propiedades mecánicas. Los diferentes ensayos se realizan siguiendo la normativa vigente para papel y cartón.

Los resultados muestran que el papel con condiciones de humedad relativa de 90% y 20 °C se satura en una hora. Cuando está saturado, el papel, independientemente del gramaje, pierde en torno al 50% de su resistencia a la compresión. Como todos los gramajes tienen la misma variación de resistencia mecánica en función de la humedad que contienen, se pueden calcular unos “factores de corrección” para tener en cuenta el efecto de la humedad relativa en los valores de resistencia a compresión en corto según la humedad que haya en el laboratorio cuando que se hacen estos ensayos. Se han obtenido estos factores y se han comparado con los publicados en la bibliografía para otros papeles y condiciones experimentales.

## Abstract

This Degree Final Project deals with the investigation of the influence of the paper grammage and humidity in the compression mechanicals properties of the Kraftliner paper. This paper is a fiber based paper used in the manufacturing of corrugated fiberboard to make cardboard boxes, which are used to package and market agricultural products.

Five papers with different grammages have been used in this experimental study, all of them widely used in the agriculture paper and cardboard industry. After a basic characterization of the five papers, the paper water sorption is studied as a function of how long the paper is in a wet chamber at high relative humidity and constant temperature. In this environment the paper moisture content increases up to a certain saturation level. Once the paper water sorption is studied, standardized Short Compression Test are performed for three paper moisture levels. In this way, the influence of moisture in the paper mechanical properties is studied. All the experiments are conducted using European standards which apply for paper and cardboard.

The results show that the paper is saturated after around one hour at 90% relative humidity and 20 °C. When the paper is moisture saturated, regardless of its grammage, its compressive strength falls around 50%. Since the same variation of the compressive strength with the moisture level is obtained for all the grammages, “correction factors” have been calculated to take into account the laboratory relative humidity in the results of the Short Compression Test. The correction factors obtained in this project are also compared with other factors in the bibliography.

# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Capítulo 1. Interés, objetivos y cronograma.....</b>  | <b>12</b> |
| 1.1 Interés y objetivo.....  | 12        |
| 1.2 Fase de realización y cronograma.....  | 13        |
| <b>Capítulo 2. Competencias adquiridas en el desarrollo del proyecto.....</b>                  | <b>15</b> |
| <b>Capítulo 3. Revisión bibliográfica.....</b>   | <b>19</b> |
| 3.1 Cartón frente a plástico en envases para agricultura .....                                 | 19        |
| 3.2 Estructura del cartón corrugado.....   | 20        |
| 3.3 Fabricación del papel.....   | 23        |
| 3.3.1. Proceso <i>Kraft Cooking</i> .....  | 25        |
| 3.4 Fabricación del cartón.....  | 26        |
| 3.5 Características del papel como material .....  | 28        |
| 3.6 Humedad y propiedades mecánicas .....  | 29        |
| 3.7 Empresas de cartón ondulado para agricultura.....  | 34        |
| <b>Capítulo 4. Materiales y métodos .....</b>  | <b>37</b> |
| 4.1 Materiales usados .....  | 37        |
| 4.2 Métodos usados.....  | 40        |
| 4.2.1. Medición de la humedad del papel.....   | 40        |
| 4.2.2. Medición de la Compresión en Corto del papel.....                                       | 42        |
| 4.2.3. Medición de la porosidad.....   | 45        |
| 4.2.4. Medición del espesor.....   | 46        |
| 4.2.5. Medición del gramaje.....   | 47        |
| 4.2.6. Condiciones de acondicionamiento de las probetas.....                                   | 47        |
| <b>Capítulo 5. Resultados y discusión .....</b>  | <b>49</b> |
| 5.1 Caracterización del papel .....  | 49        |
| 5.2 Estudio de absorción de agua del Kraftliner .....  | 50        |
| 5.2.1 Absorción de agua a tiempos cortos.....  | 53        |
| 5.2.2 Absorción de agua a saturación.....  | 60        |
| 5.3. Estudio de la resistencia a la compresión.....  | 61        |
| 5.3.1 Características mecánica del papel seco .....  | 61        |
| 5.3.2 Medidas de resistencia a tres porcentajes de humedad.....                                | 66        |
| 5.3.3 Factores de corrección por la humedad para la resistencia a la compresión en corto ..... | 68        |
| <b>Capítulo 6. Conclusiones .....</b>  | <b>71</b> |
| <b>Capítulo 7. Bibliografía .....</b>  | <b>73</b> |
| <b>Anexo A. Tabla de datos.....</b>  | <b>75</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| A.1 Caracterización del papel.....   | 75        |
| A.2 Cálculo de la absorción de agua.....                                       | 76        |
| A.3 Medición de la compresión en corto .....                                   | 80        |
| <b>Anexo B. Derivadas del error aplicando La <i>Teoría de Errores</i>.....</b> | <b>82</b> |
| B.1. Error del área.....   | 82        |
| B.2. Error del gramaje.....  | 82        |
| B.3. Error de la masa húmeda en condiciones de laboratorio .....               | 82        |
| B.4. Error de la masa seca .....   | 82        |
| B.5. Error de la masa húmeda de cada punto .....                               | 83        |
| B.6 Error del contenido de agua en el papel .....                              | 83        |
| B.7 Error del área total.....  | 83        |
| B.8 Error de $y_i$ .....   | 83        |
| B.9 Error de $F_{max}$ .....   | 84        |
| B.10 Error de $\sigma_c$ .....   | 84        |
| B.11 Error factor de fuerza .....  | 84        |
| B.12 Error de F/G.....   | 84        |
| B.13 Error de MD/CD.....   | 84        |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Cronograma de la realización de este Trabajo Fin de Grado incluyendo la estimación de horas dedicadas a cada tarea.....   | 14 |
| Tabla 2. Listado de competencias por orden de aparición en el texto con las tareas donde se han desarrollado cada una de ellas.....  | 16 |
| Tabla 3. Valores típicos dados por el fabricante de las características de los cinco tipos de papeles usados en este estudio.....  | 37 |
| Tabla 4. Valores garantizados por el fabricante de las características de los cinco tipos de papeles usados en este estudio.....   | 37 |
| Tabla 5 Condiciones de temperatura y humedad relativa utilizadas para la realización de ensayos de compresión en corto en este trabajo.....  | 48 |
| Tabla 6. Características del papel de los cinco gramajes usados en este TFG. ....  | 49 |
| Tabla 7. Porcentajes de humedad absorbida respecto de su peso seco para los distintos papeles tras permanecer en la cámara de humedad los tiempos que se indican en la primera columna. ....                   | 52 |
| Tabla 8. Valores en gramos de la masa húmeda, $mh, l$ , de los papeles de distintos gramajes en las condiciones de laboratorio.....  | 54 |
| Tabla 9. Valores en gramos de la masa seca, $ms$ , de los distintos papeles. ....  | 55 |
| Tabla 10. Valores en gramos de la masa húmeda, $mh$ , tras permanecer los distintos tipos de papel Kraftliner en las condiciones de cámara durante los tiempos indicados en la primera columna. ....           | 55 |
| Tabla 11. Masa en miligramos de agua absorbida en los papeles para tiempos crecientes en las condiciones de cámara.....  | 56 |
| Tabla 12. Masa de agua absorbida por unidad de superficie expuesta a las condiciones de cámara, $yi$ , en $g/m^2$ para los tiempos ensayados .....   | 57 |
| Tabla 13. Coeficiente de absorción de agua, $Cg$ , obtenido de la parte inicial de la curva de variación de la masa de agua absorbida por unidad de área frente a la raíz cuadrada del tiempo en segundos. ... | 58 |
| Tabla 14. Masa de agua absorbida por las probetas de los distintos tipos de papeles en saturación. ....  | 60 |
| Tabla 15. Valores de resistencia a la compresión en corto (SCT) en kN/m obtenido para los papeles de diferentes gramajes sin humedad absorbida.....  | 62 |
| Tabla 16. Valores de fuerza máxima en N y tensión máxima en MPa con su estimación de errores para los cinco papeles de diferentes gramajes sin humedad absorbida. ....   | 62 |
| Tabla 17. Fuerza máxima a compresión. Unidades en Newton.....  | 66 |
| Tabla 18. Valores de fuerza divididos entre el espesor para las distintas condiciones de humedad y direcciones de ensayo.....  | 67 |
| Tabla 19. Coeficientes de corrección en dirección de máquina.....  | 69 |
| Tabla 20. Coeficientes de corrección en dirección transversal a la máquina .....   | 69 |

Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.

|   |    |
|---|----|
| Tabla A1.1. Masa del papel para gramaje en gramos .....             | 75 |
| TablaA1.2 Porosidad obtenida en segundos Gurley .....               | 75 |
| Tabla A1.3. Espesor obtenido en milímetros .....                    | 76 |
| Tabla A2.1. Humedad del papel en condiciones de laboratorio .....   | 76 |
| Tabla A2.2. Tanteo humedad, en tanto por ciento .....               | 78 |
| Tabla A2.3. Datos de humedad obtenidos en tanto por ciento (%)..... | 79 |
| Tabla A3.1 SCT en dirección de máquina (MD) en kN/m .....           | 80 |
| Tabla A3.2 SCT en dirección de máquina (CD) en kN/m .....           | 81 |



## Índice de gráficas

|  |    |
|--|----|
| Gráfica 1. Relación entre espesor y gramaje determinados para las muestras de papel seleccionadas para hacer este TFG.....   | 50 |
| Gráfica 2. Porcentaje de humedad absorbida por el papel K135 y K275 en función del tiempo en las condiciones de la cámara. Tanteo humedad. ....  | 51 |
| Gráfica 3. Variación de la humedad absorbida por el papel en función del tiempo que permanece en la cámara a 90 %RH y 20 °C.....   | 53 |
| Gráfica 4. Masa de agua absorbida en el papel por unidad de superficie expuesta a las condiciones de cámara en función de la raíz cuadrada del tiempo en segundos (UNE-EN 1925).....   | 57 |
| Gráfica 5. Representación de la zona lineal de los datos de absorción de agua de acuerdo con la norma UNE-EN 1925 .....  | 58 |
| Gráfica 6. Relación entre el coeficiente de absorción de agua en el transitorio inicial y el gramaje. ..   | 59 |
| Gráfica 7. Relación entre el coeficiente de absorción de agua en el transitorio inicial y la porosidad o permeabilidad de los papeles determinada con el método Gurley.....  | 59 |
| Gráfica 8. Masa de agua por unidad de área absorbida por las probetas de los distintos tipos de papeles en función de su gramaje. ....   | 60 |
| Gráfica 9. Masa de agua por unidad de área absorbida por las probetas de los distintos tipos de papeles en función de su porosidad.....  | 61 |
| Gráfica 10. Comparación de la fuerza máxima a compresión de los papeles secos entre ambas direcciones de ensayo. ....  | 63 |
| Gráfica 11. Comparación de dependencia de la fuerza máxima a compresión de los papeles secos con el gramaje para ambas direcciones de ensayo. Los colores oscuros corresponden a los puntos en dirección de máquina y los colores claros a dirección transversal. .... | 64 |
| Gráfica 12. Comparación de la resistencia a compresión de los papeles secos con el gramaje para ambas direcciones de ensayo. Los colores oscuros corresponden a los puntos en MD y los colores claros a CD. ....   | 65 |
| Gráfica 13. Resistencia a compresión de los papeles secos en función de la porosidad para ambas direcciones de ensayo. ....  | 65 |
| Gráfica 14. Variación de la fuerza máxima que resisten los papeles a compresión en la dirección de máquina (MD) en función de su contenido en humedad para los cinco tipos de papeles estudiados.  | 66 |
| Gráfica 15. Variación de la fuerza máxima que resisten los papeles a compresión en la dirección transversal (CD) en función de su contenido en humedad para los cinco tipos de papeles estudiados.   | 67 |
| Gráfica 16. Comparación de la fuerza máxima a compresión entre la dirección de máquina y la dirección transversal para el K135. ....   | 68 |
| Gráfica 17. Comparativa de los factores de corrección obtenidos en este trabajo (puntos) con el ajuste obtenido en el libro Physical Testing of Paper <sup>[17]</sup> en línea continua. ....  | 70 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1. Palé de productos agrícolas en envases de cartón listo para su transporte y comercialización.....  | 12 |
| Figura 3.2. Envases de plástico Pool usado en la comercialización de productos agrícolas.....  | 19 |
| Figura 3.3. Ciclo de vida del cartón. Imagen obtenida de la página web de Vegabaja Packing. <sup>[5]</sup> .....   | 20 |
| Figura 3.4. Nombre de los papeles según su posición en el cartón (izquierda), y tipos de cartón ondulado: de canal simple (izquierda) y de canal doble (derecha) .....   | 20 |
| Figura 3.5. Tipos de onda. del papel ondulado que se utilizan en la fabricación de los distintos tipos de cartón. ....   | 21 |
| Figura 3.6. Papel Kraft. ....  | 21 |
| Figura 3.7. Papel Kraftliner blanco por una cara.....  | 21 |
| Figura 3.8. Bobinas de papel blanco integral. ....   | 22 |
| Figura 3.9. Papel testliner.....   | 22 |
| Figura 3.10. Papel semiquímico de importación.....   | 22 |
| Figura 3.11. Esquema general de la fabricación del papel. Imagen obtenida del libro <i>Handbook of Pulp and Paper</i> . <sup>[20]</sup> .....  | 23 |
| Figura 3.12. Descortezadora de tambor usada en la fabricación de papel.....  | 24 |
| Figura 3.13. Tamiz de alambre con la pulpa con mucha humedad al principio del recorrido y menos humedad al final.....  | 25 |
| Figura 3.14. Esquema de la fabricación de la pulpa. Imagen sacada del libro <i>Pulp and Paper Chemistry and Technology</i> . <sup>[19]</sup> .....   | 26 |
| Figura 3.15. Esquema del proceso de recuperación de los elementos inorgánicos usados en el digestor. Imagen sacada del libro <i>Pulp and Paper Chemistry and Technology</i> . <sup>[19]</sup> .....  | 26 |
| Figura 3.16. Fabricación cartón corrugado simple. ....   | 27 |
| Figura 3.17. Troqueladora rotativa. ....   | 28 |
| Figura 3.18. Estructura principal de la cadena de celulosa formada por unidades de glucosa. Obtenido del artículo <i>Humidity's effect on strength and stiffness of containerboard materials</i> . <sup>[21]</sup> .....   | 28 |
| Figura 3.19. Estructura principal de la cadena de hemiglucosa basada en unidades de glucosa con varios tipos de sustituyentes en la cadena principal. Obtenido del artículo <i>Humidity's effect on strength and stiffness of containerboard materials</i> . <sup>[21]</sup> ..... | 29 |
| Figura 3.20. Diferentes estructuras moleculares que componen la lignina. Obtenido del artículo <i>Humidity's effect on strength and stiffness of containerboard materials</i> . <sup>[21]</sup> .....  | 29 |
| Figura 3.21. Variación de la humedad del papel expresada en porcentaje en peso de agua absorbida según la humedad ambiente. Gráfica obtenida del libro <i>Physical Testing of Paper</i> . <sup>[17]</sup> .....  | 31 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.22. Variación de humedad contenida en un papel cualquiera (%M) que se ha secado y vuelto a humedecer Imagen obtenida del libro <i>Physical Testing of Paper</i> . <sup>[17]</sup> .....  | 31 |
| Figura 3.23. Coeficiente de variación para distintos ensayos mecánicos para el papel con las ecuaciones que definen cada curva y los ensayos a los que corresponde. Datos obtenidos para ellaboratorio de Smurfit Kappa .....                     | 32 |
| Figura 3.24. Coeficiente de variación para distintos papeles. Gráfica obtenida de la revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. <sup>[22]</sup> .....   | 33 |
| Figura 3.25. Coeficiente de corrección de la resistencia a la compresión en corto en función del contenido en humedad del papel Kraft según la referencia [17]. Gráfica obtenida del libro <i>Physical Testing of Paper</i> <sup>[17]</sup> ..... | 34 |
| Figura 3.26. Logotipo de Onduspan. ....   | 34 |
| Figura 3.27. Logotipo de Saica.....   | 35 |
| Figura 3.28. Logotipo de Smurfit Kappa. ....  | 35 |
| Figura 3.29. Operaciones de Smurfit Kappa.....  | 35 |
| Figura 3.30. Logotipo del programa Safety for life.....   | 35 |
| Figura 3.31. Diversidad de operación de Smurfit Kappa. ....   | 36 |
| Figura 4.32. Bobina de papel Kraft parcialmente consumida. Una bobina completa suele ser de aproximadamente de 2 metros de alto y 2,5 toneladas de peso .....   | 38 |
| Figura 4.33. Bobina en la onduladora. La flecha sobre la bobina marca la dirección de máquina.....  | 39 |
| Figura 4.34. Muestra papel con dirección de máquina marcado.....  | 39 |
| Figura 4.35. Guías para cortar muestras cuadradas de 6 cm (izquierda) y de 10 cm (derecha).....   | 40 |
| Figura 4.36. Balanza Radwag abierta preparada para colocar la muestra (izquierda) y funcionando (derecha). ....   | 41 |
| Figura 4.37. Cámara climática Dycometal con cajas para ensayar en su interior. ....   | 41 |
| Figura 4.38. Esquema de las mordazas del compresómetro SCT. Imagen sacada de la norma UNE-ISO 9895:2019. <sup>[9]</sup> .....   | 42 |
| Figura 3.39. Compresómetro SCT con los mecanismos y circuitos al descubierto. ....  | 43 |
| Figura 4.40. Cuchilla doble. La parte superior es el apoyo para poder cortar las muestras. ....   | 43 |
| Figura 4.41. Muestra de SCT para la dirección de máquina.....   | 44 |
| Figura 4.42a. Mordazas sujetando y ensayando una muestra.....   | 44 |
| Figura 4.42b. Muestra de papel ensayada donde se nota la zona de ensayo por el abultamiento debido a la deformación .....   | 44 |
| Figura 4.42c. Display donde muestra los valores obtenidos tras finalizar el ensayo.....   | 44 |
| Figura 4.43. Esquema del aparato Gurley para medida de la permeabilidad al aire de muestras de papel. Imagen sacada de la norma UNE-ISO 5636-5:2015. <sup>[8]</sup> .....   | 45 |

Figura 4.44. Permeabilímetro Gurley usado. Se puede ver el sensor con las marcas para iniciar y parar el cronómetro..... 46

Figura 4.45. Micrómetro para cartón JBA. La palanca de la izquierda sirve para levantar el peso muerto..... 46

Figura4.46. Balanza Denver con una muestra de K225 en su interior. .... 47

## Capítulo 1. Interés, objetivos y cronograma.

### 1.1 Interés y objetivo.

Una de las industrias más importantes en la provincia de Almería es la industria agroalimentaria. Esta industria representó en 2018 el 18,19% del PIB de la provincia, y sobre el PIB agrícola nacional Almería representó en 2017 el 7,75%,<sup>[1]</sup> con un nivel de exportación de más de 2 870 toneladas y unos ingresos de 2 895 millones de euros en 2018.<sup>[2]</sup>

En esta industria se usan cajas de cartón ondulado para envasar y transportar los productos. Estas cajas se ven sometidas a condiciones de alta humedad, ya que los productos liberan agua con el tiempo y además se conservan en cámaras frigoríficas. Debido a la gran influencia que tiene la humedad en el papel y, por consiguiente, en el cartón ondulado, es fundamental estudiar la variación de las propiedades mecánicas en función del contenido de humedad del papel. Los mayores esfuerzos que tienen que soportar las cajas son los esfuerzos a compresión, derivados del peso del producto agrícola y del resto de cajas. Esto hace que sea necesario conocer cómo afecta la humedad en la compresión del papel con el que se hace el cartón del que se forman las cajas. El papel más utilizado para este fin es el papel Kraft.



Figura 1.1. Palé de productos agrícolas en envases de cartón listo para su transporte y comercialización.

El objetivo de este trabajo es ver cómo varía la fuerza máxima a compresión que es capaz de soportar el papel Kraftliner en función del porcentaje de agua que tiene absorbida. Esto lo haremos con los cinco gramajes más extendidos en esta industria.

Para ello vamos a realizar los siguientes objetivos parciales:

- Caracterización básica del papel. Determinar el gramaje, la porosidad y el espesor de cada uno de los cinco tipos de papel.

Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.

- Estudio de la absorción de agua en el papel en condiciones de humedad relativa elevada. Determinar el contenido de agua del papel según el tiempo que permanece en una atmósfera con humedad relativa elevada y temperatura controlada (en una cámara climática).
- Estudio de las propiedades mecánicas del papel para distintos contenidos de humedad. Realizar los ensayos normalizados de compresión en corto (SCT) con distintos porcentajes de agua absorbida en el papel.

Una vez realizada la parte experimental de estos tres objetivos parciales, analizaremos los datos obtenidos y estudiaremos como ha influido la humedad en el papel para alcanzar el objetivo principal de este trabajo.

## **1.2 Fase de realización y cronograma.**

Este proyecto se divide en cinco fases:

1. Obtención de muestras (Tarea 2). En esta fase se obtendrá las muestras de las bobinas de papel que llegan a la fábrica. Esto se hará mediante la tarea con el mismo nombre.
2. Caracterización previa de las muestras (Tarea 3). En esta fase tendremos que medir tres características del papel, el gramaje, el espesor y la porosidad. Esto se hará mediante la tarea con el mismo nombre.
3. Estudio de absorción de humedad. Esto se hará en dos tareas:
  - i) Tanteo de los tiempos de exposición (Tarea 4). Como su nombre indica, se realizará un tanteo de los tiempos de exposición del papel a la humedad para seleccionar los valores óptimos de permanencia en la cámara. Esto se estudiará con el papel de menor y mayor gramaje.
  - ii) Determinación de la humedad del papel (Tarea 5). Se determinará la absorción de humedad de todos los papeles en el rango de tiempos seleccionados.
4. Obtención de la fuerza máxima a compresión (Tarea 6). Estos ensayos se realizarán para cada uno de los gramajes seleccionados con muestras de diferentes grados de humedad. Esto se hará mediante la tarea con el mismo nombre.
5. Análisis e interpretación de los resultados y redacción del informe (Tarea 7). Una vez agrupados todos los datos, se analizarán y se plasmará toda la información obtenida en este informe. Esta fase se realiza en dos tareas: La primera será la obtención de conocimientos básicos, y en una segunda tarea se agrupa la interpretación de los resultados y la redacción del informe.

La manera en la que se han realizado las estas tareas se encuentra descrita en los diferentes capítulos de esta memoria.

A continuación, se representa el cronograma con las horas que se han necesitado para realizar las tareas que han permitido llegar a tener el informe completo. Siendo la Tarea 1 la obtención de información, ya que no se puede realizar las tareas anteriores sin un conocimiento básico.

Tabla 1. Cronograma de la realización de este Trabajo Fin de Grado incluyendo la estimación de horas dedicadas a cada tarea

|                        | Tarea 1   | Tarea 2  | Tarea 3  | Tarea 4   | Tarea 5   | Tarea 6   | Tarea7     |            |
|------------------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>Marzo 2019</b>      | 5*        | 3        |          | 18        |           |           | 3          |            |
| <b>Abril 2019</b>      |           |          |          | 15        |           |           |            |            |
| <b>Mayo 2019</b>       |           |          |          |           | 10        |           | 3          |            |
| <b>Junio 2019</b>      |           |          |          |           | 10        |           |            |            |
| <b>Julio 2019</b>      |           |          |          |           | 14        |           |            |            |
| <b>Agosto 2019</b>     |           |          |          |           | 18        |           |            |            |
| <b>Septiembre 2019</b> |           |          |          |           | 19        |           |            |            |
| <b>Octubre 2019</b>    |           |          | 7        |           | 22        | 22        |            |            |
| <b>Noviembre 2019</b>  |           |          | 2        |           |           | 30        | 12         |            |
| <b>Diciembre 2019</b>  | 3         |          |          |           |           |           | 9          |            |
| <b>Enero 2020</b>      | 2         |          |          |           |           |           | 4          |            |
| <b>Febrero 2020</b>    |           |          |          |           |           |           | 5          |            |
| <b>Marzo 2020</b>      |           |          |          |           |           |           | 10         |            |
| <b>Abril 2020</b>      |           |          |          |           |           |           | 14         |            |
| <b>Mayo 2020</b>       |           |          |          |           |           |           | 19         |            |
| <b>Junio 2020</b>      |           |          |          |           |           |           | 21         |            |
| <b>Total</b>           | <b>10</b> | <b>3</b> | <b>9</b> | <b>33</b> | <b>93</b> | <b>52</b> | <b>100</b> | <b>300</b> |

\* Estas horas son una estimación del tiempo dedicado exclusivamente a la realización de este TFG. Los conocimientos para la realización de los ensayos y obtención de muestras se obtuvieron en las prácticas de empresa que se realizaron en Smurfit Kappa y ese tiempo no está contabilizado en esta tarea.

## **Capítulo 2. Competencias adquiridas en el desarrollo del proyecto.**

Este proyecto se ha ejecutado con el objetivo de desarrollar la competencia TFG, mediante la realización de un trabajo de investigación en Smurfit Kappa. Diariamente se presenta el problema planteado como objetivo en este TFG, ya que la resistencia del cartón y, por consiguiente, la del papel, es fundamental para que el producto ofrecido por Smurfit Kappa Almería tenga la calidad óptima para el cliente en las condiciones a las que se somete. En un futuro, este trabajo será defendido ante un tribunal. Con esto se desarrolla la competencia CT5, como se verá a lo largo de esta explicación.

El tema del proyecto fue propuesto por la alumna a la directora, ya que realizando unas prácticas en la empresa Smurfit Kappa Almería, la alumna vio que había una gran variación entre el papel ensayado en condiciones de laboratorio, comparado con las condiciones en cámara (competencia CT4). Se le comunicó a la directora la idea y se planteó como se iba a realizar el proyecto (competencia CB4 y UAL4). Tras conseguir el permiso por parte de la empresa para utilizar sus instalaciones y material para el desarrollo de este trabajo, con las directrices de la directora se fueron realizando los ensayos (competencia UAL9). Para ello, se necesitó hacer una planificación para poder compaginar los ensayos específicos para este proyecto con el trabajo diario en el laboratorio. La cámara de humedad controlada fue la instalación que determinó principalmente los momentos en los que se podían realizar los ensayos para este TFG, ya que si se usaba cuando estaba llena habría una interferencia entre los ensayos que estaba realizando el laboratorio y los ensayos de este TFG (competencia CT9).

Para la realización de este trabajo, nos hemos basado en las normativas vigentes sobre papel y cartón. Esta es una manera de realizar los ensayos de forma estandarizada y con una base fiable (competencia CT6). Estas normativas se usan para el control de calidad del papel en el laboratorio, por lo que ha servido para comprender mejor y reforzar las prácticas que se hicieron en Smurfit Kappa Almería. Con la realización de este trabajo de investigación, se ha podido comprender por qué el papel se deja un tiempo específico en la cámara y lo importante que son las condiciones ambientales del laboratorio. Esto ha reforzado la competencia CT8, en especial, la competencia CTEM8 y UAL1.

También se han tenido que estudiar y afianzar muchos conocimientos para interpretar los resultados y lograr los objetivos finales de este TFG. Se ha aprendido cómo se fabrica el papel con el que se hacen las cajas de cartón (competencia CRI9), puesto que esta información ha ayudado a entender qué es el papel como material. En base a su fabricación, se ha observado las variables que influyen en sus propiedades y como trabaja su microestructura para soportar los esfuerzos. Se ha visto que la dirección de máquina no solo es la dirección en la que están orientadas las fibras, sino que incluye unas tensiones internas. También se ha conseguido responder a la pregunta que se hizo la alumna al empezar este trabajo, ya que se ha podido estudiar como varía la resistencia a compresión del papel variando la cantidad de agua que contiene. Durante el proceso, con ayuda de la directora y sus conocimientos sobre otros materiales, se ha comprendido por qué la absorción de agua se comporta de la manera que se verá en el Capítulo 5. Todo esto ha permitido desarrollar las competencias básicas de la Universidad CB1, CB2, CB3, CB5 y UAL5, y las competencias específicas del Título CB2 CT3, CRI3, CRI8, CTEM4 y CTEM7.

Para el tratamiento de los datos, se han aplicado los conocimientos de matemáticas obtenidos en el graduado, reforzando la competencia CB1. La utilización de hojas de cálculo, como es Excel, permite manejar todos los datos obtenidos con facilidad y claridad. Otros programas usados en el desarrollo de este TFG son el procesador de textos Word para escribir la memoria, y PowerPoint y la plataforma de enseñanza virtual Blackboard Learn para hacer la defensa; la búsqueda de bibliografía relacionada



se ha realizado usando las bases de datos telemáticas disponibles en la Biblioteca de la Universidad. Todo esto abarca la competencia genérica UAL2 y la específica del Título CB3.

Tabla 2. Listado de competencias por orden de aparición en el texto con las tareas donde se han desarrollado cada una de ellas

| <b>Competencia</b> | <b>Descripción</b>   | <b>Tarea donde se desarrolla</b> |
|--------------------|--|----------------------------------|
| TFG                | Ejercicio original a realizar individualmente y presentar y defender ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la Ingeniería Industrial de naturaleza profesional en el que se sinteticen e integren las competencias adquiridas en las enseñanzas | Todas las tareas                 |
| CT5                | Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos   | Todas las tareas                 |
| CT4                | Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial   | Tarea 1 y 7                      |
| CB4                | Capacidad de comunicar y aptitud social  | Tarea 7                          |
| UAL4               | Comunicación oral y escrita en la propia lengua  | Tarea 7                          |
| UAL9               | Capacidad para aprender a trabajar de forma autónoma   | Todas las tareas                 |
| CT9                | Capacidad de organización y planificación en el ámbito de la empresa, y otras instituciones y organizaciones   | Desde la tarea 2 hasta la 6      |
| CT6                | Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento  | Desde la tarea 2 hasta la 6      |
| CT8                | Capacidad para aplicar los principios y métodos de la calidad  | Desde la tarea 3 hasta la 6      |
| CTEM8              | Conocimiento aplicado de sistemas y procesos de fabricación, metrología y control de calidad   | Desde la tarea 2 hasta la 7      |

|       |  |                             |
|-------|--|-----------------------------|
| UAL1  | Conocimientos básicos de la profesión  | Tarea 1 y 7                 |
| CB1   | Poseer y comprender conocimientos  | Tarea 1 y 7                 |
| CB2   | Aplicación de conocimientos  | Desde la tarea 2 hasta la 7 |
| CB3   | Capacidad de emitir juicios  | Tarea 7                     |
| CB5   | Habilidad para el aprendizaje  | Tarea 1 y 7                 |
| UAL5  | Capacidad de crítica y autocrítica   | Tarea 1 y 7                 |
| CB2   | Comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica, termodinámica, campos y ondas y electromagnetismo y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería  | Tarea 1 y 7                 |
| CT3   | Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones  | Tarea 1 y 7                 |
| CRI3  | Conocimientos de los fundamentos de ciencia, tecnología y química de materiales. Comprender la relación entre la microestructura, la síntesis o procesado y las propiedades de los materiales  | Tarea 1 y 7                 |
| CRI8  | Conocimiento y utilización de los principios de la resistencia de materiales   | Todas las tareas            |
| CTEM4 | Conocimientos y capacidades para aplicar los fundamentos de la elasticidad y resistencia de materiales al comportamiento de sólidos reales   | Todas las tareas            |
| CTEM7 | Conocimientos y capacidades para la aplicación de la ingeniería de materiales  | Todas las tareas            |
| CB1   | Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre: álgebra lineal; geometría; geometría diferencial; cálculo diferencial e integral; ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales; métodos numéricos; algorítmica numérica; estadística y optimización | Tarea 7                     |
| UAL2  | Habilidad en el uso de las TIC   | Tarea 1 y 7                 |

Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.

|     |   |             |
|-----|---|-------------|
| CB3 | Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería | Tarea 1 y 7 |
|-----|---|-------------|

## **Capítulo 3. Revisión bibliográfica.**

### **3.1 Cartón frente a plástico en envases para agricultura**

El uso de cajas de cartón frente a las cajas de plástico Pool en la industria agroalimentaria se debe a dos razones:

- Su menor coste: La utilización de envases de cartón supone, al menos, un 17% de ahorro frente a los envases de plástico.<sup>[3]</sup> Un estudio realizado en la región de Murcia en 2015 expone que la utilización de cajas de plástico Pool lleva un sobrecoste de 27,6 millones de euros.<sup>[4]</sup> Para la provincia de Almería este sobrecoste asciende hasta casi 60 millones de euros.<sup>[3]</sup>



Figura 3.2. Envases de plástico Pool usado en la comercialización de productos agrícolas.

- Su menor impacto medioambiental: Desde la materia prima hasta su reciclaje, el cartón tiene una menor huella de carbono que el plástico. Las plantaciones de árboles para papel almacenan 1,3 toneladas por cada tonelada de CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera.<sup>[5]</sup> Su facilidad de reciclaje y su biodegradabilidad frente a la reutilización del plástico supone un menor impacto, empezando en las mismas fábricas de papel y cartón porque en ellas se prepara el desperdicio para su reciclaje. Mientras que la reutilización de las cajas de plástico supone un alquiler para las cooperativas agrícolas y su reciclaje es mucho más contaminante y complicado que el papel.<sup>[6]</sup> En la Figura 3.3 se puede ver un diagrama de flujo del ciclo de vida completo del cartón y papel.



Figura 3.3. Ciclo de vida del cartón. Imagen obtenida de la página web de Vegabaja Packing. [5]

### 3.2 Estructura del cartón corrugado.

El cartón corrugado u ondulado se compone de una combinación de diferentes tipos de papeles, colocados en una determinada manera y ondulado a una cierta altura. Este conjunto de parámetros se le conoce como **calidad del cartón**.

Según la posición del papel en el cartón recibe un nombre. Las caras que no están onduladas se les conoce como **papel de línea** o *liner*. Al papel que se ondula se le conoce como canal, **papel ondulado**, tripa o *flutting*. Estos papeles se ven representados en la figura 3.4.

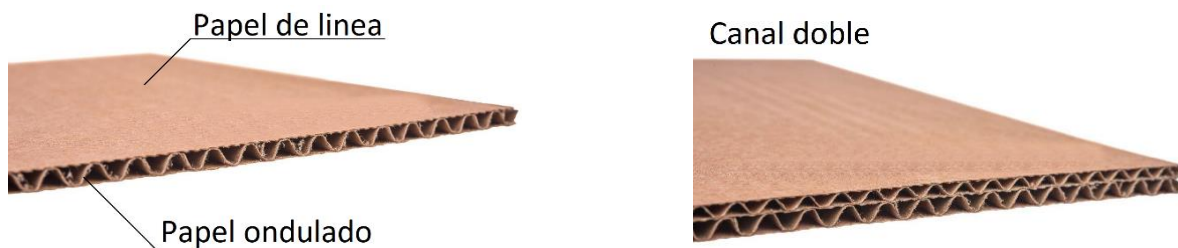


Figura 3.4. Nombre de los papeles según su posición en el cartón (izquierda), y tipos de cartón ondulado: de canal simple (izquierda) y de canal doble (derecha)

Según la cantidad de capas de papel ondulado que tiene el cartón puede ser:

- De canal simple (Figura 3.3 izquierda). Se compone de un papel exterior, un papel ondulado y un papel interior, con un total de 3 papeles.
- De canal doble (Figura 3.3 derecha). Se compone de 5 papeles, intercalando papel de línea con papel ondulado. Este es el más usado en la agricultura.

También hay varios tipos de ondas que se clasifican en función de su altura, como se puede ver en la Figura 3.4. Cuanto más alta es la onda más resiste el cartón, pero eso implica un mayor consumo de papel. En el canal doble se suele combinar distintos tipos de ondas para ajustar la resistencia del cartón, como vemos en los cartones de doble pared de la Figura 3.4b.

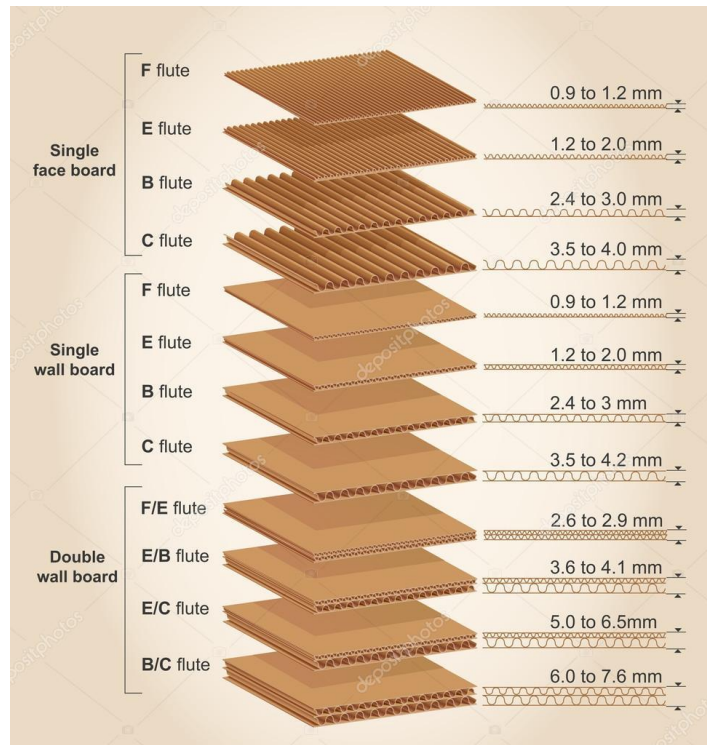


Figura 3.5. Tipos de onda. del papel ondulado que se utilizan en la fabricación de los distintos tipos de cartón.

En la industria agroalimentaria los cartones más usados son de doble canal, en concreto los que se denominan E/B, B/C y E/C en la Figura 3.5. Estos cartones se hacen con los siguientes tipos de papeles que veremos según su posición en la estructura del cartón:

- Cara exterior. Esta es la cara más visible de la caja y, por tanto, es donde se imprime. Este papel debe tener un buen acabado y poseer una buena recepción de tintas. En esta cara se usan:
  - Kraftliner o Kraft (K). Es un papel de fibra que se obtiene de la madera tratada la que se añade una pequeña parte de papel reciclado derivado del propio proceso de fabricación y manipulación



Figura 3.6. Papel Kraft.

El Kraftliner tiene dos variantes:

- i) Kraftliner blanco (KWT o KW2). Es el papel anterior con una cara tratada para que sea blanca (Figura 3.7).



Figura 3.7. Papel Kraftliner blanco por una cara.

- ii) Kraftliner estucado. Es el papel Kraftliner blanco con un barniz en la cara tratada. Se usa para imprimir en alta calidad o digital. Se diferencia del anterior porque la cara que tiene aplicado el barniz brilla.
- Blanco integral (BL. INT). Es un papel realizado con fibra y blanqueado totalmente (Figura 3.8). Además, puede llevar un barniz en una de sus caras o no.



Figura 3.8. Bobinas de papel blanco integral.

- Testliner (T1). Es el papel reciclado (Figura 3.9). Se diferencia del Kraftliner en que, al ser reciclado, se ve el papel como punteado o "sucio". Este papel, al igual que el Kraft, tiene las variantes con una cara blanca y estucado.



Figura 3.9. Papel testliner.

- Papel de tripa: Este es el papel que se ondula para hacer el canal ondulado. Principalmente se usan dos tipos:
  - Semicuímico de importación (SF). Es el papel realizado con fibra y tratado para que se pueda ondular con facilidad. Se caracteriza por su color anaranjado. Este, al igual que el Kraft, lleva una pequeña cantidad de papel reciclado. A diferencia del Kraft, sí se distingue según la cantidad de reciclado que SF1 con menos y SF2 con más porcentaje de reciclado).



Figura 3.10. Papel semiquímico de importación.

- Semicuímico reciclado o nacional (RFHP1 y RFHP2). Es un papel de ondular obtenido con papel reciclado. Según el gramaje se diferencia entre RFHP1, que es para gramajes altos, y RFHP2, que es para gramajes bajos. Ambos tienen un tono marrón y el punteado que caracteriza a los reciclados (Figura 3.10).

- Cara intermedia o interliner. Puede estar formada por:
  - Kraftliner.
  - Semiquímico reciclado.
  - Bicolor (TSL). Este es un papel reciclado con diferente color en sus caras, por eso se le denomina bicolor. Es el que peores prestaciones tiene de los papeles que se usan en agricultura.
- Cara interior. Es la cara que está en contacto con el producto. Los papeles más usados son el Kraftliner y el Testliner. En contadas ocasiones se usa la versión con cara blanca, ya que no suele ser habitual que el cliente haga esta petición expresa, ya que el producto agrícola es normal que contenga tierra o mancha y en la cara blanca se nota más esta suciedad. Nunca se usan los estucados en esta posición.

### 3.3 Fabricación del papel.

En la Figura 3.11 se puede ver un esquema de los pasos que hay que dar para la fabricación de papel. El proceso empieza con los troncos de madera obtenidos de los bosques plantados para este fin. Se usan dos tipos de madera: las maderas blandas, que se componen de fibras más largas y flexibles capaces de resistir mayores esfuerzos como la madera de pino, y las maderas duras, que se caracterizan por tener fibras más cortas y soportar peor los esfuerzos como la madera de roble. Las maderas duras producen un papel más suave, opaco y con mejores características para poder imprimir sobre él.<sup>[20]</sup>

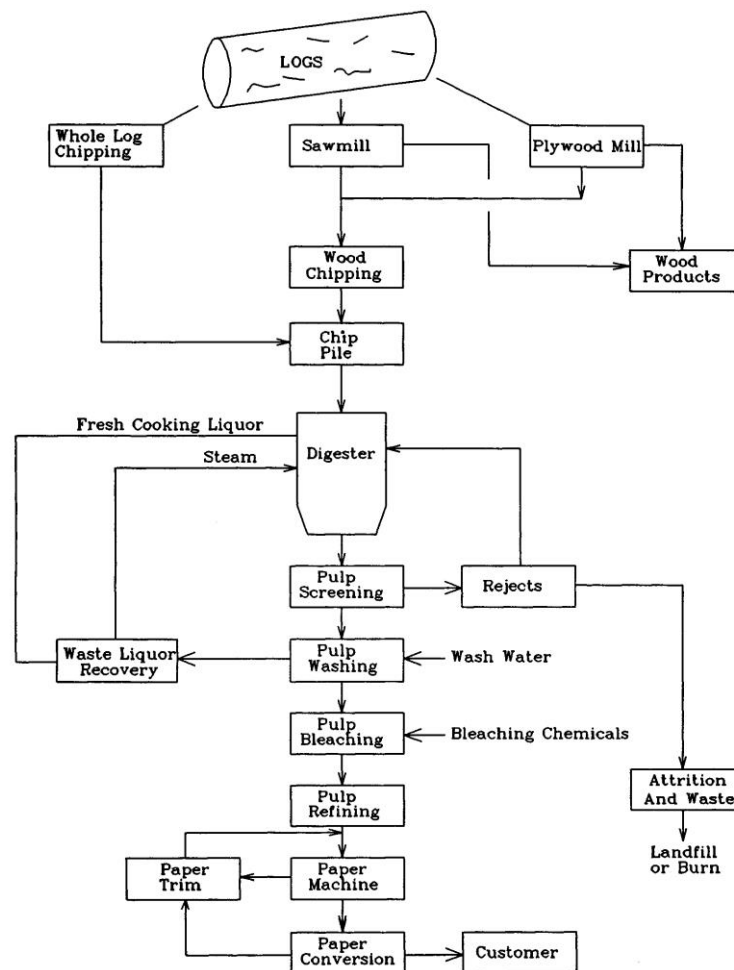


Figura 3.11. Esquema general de la fabricación del papel. Imagen obtenida del libro *Handbook of Pulp and Paper*.<sup>[20]</sup>



Los troncos se pasan por un tambor giratorio que elimina la corteza del tronco por fricción. La corteza eliminada cae por unas rendijas que contiene el tambor y se almacena para usarse como biomasa.



Figura 3.12. Descortezadora de tambor usada en la fabricación de papel.

Los troncos descortezados se transportan a una astilladora que los corta en virutas uniformes. El tamaño y la uniformidad de estas virutas influirá en las características del papel, por lo que tiene que ser un proceso controlado. Una vez hecha astillas la madera, estas se guarda en silos.

De las astillas se obtiene la pulpa mediante la separación de las fibras contenidas en la matriz de la madera. Este proceso se puede hacer de dos formas:

- **Mecánica:** Se muelen las astillas hasta obtener la pasta. En el proceso se pierde parte de la pulpa (hasta un 10%) por disolución de carbohidratos y extractos que contiene. Las fibras se mantienen rígidas y apenas deformadas. En la pulpa, a parte de las cadenas de fibras rotas, quedan pequeñas porciones de las paredes ricas en lignina que recubren las fibras en la estructura de la madera. Estas pequeñas porciones dan buenas propiedades ópticas y mecánicas al papel. Este proceso mecánico tiene el inconveniente de poder dañar las fibras, lo que se puede evitar calentando las astillas con vapor antes de refinarlas. Para la realización de este proceso es necesario el consumo de mucha energía., por lo que no es muy usado en la industria.
- **Química:** Es el proceso más usado por ser el más rentable, y además hace que las fibras finalmente sean más flexibles que con el proceso mecánico. El objetivo de este proceso es eliminar la lignina que mantiene las fibras unidas mediante un tratamiento químico. Los restos de lignina y los productos químicos utilizados se extraen mediante un lavado. El inconveniente de este proceso es que la disolución de la lignina también destruye la mitad de las fibras. El tratamiento químico más usado es el conocido como *Kraft cooking*, ya que es el que deja las fibras con mayor resistencia.<sup>[19]</sup>

Una vez que ha terminado el procesado de la pulpa se pasa a la fabricación del papel. Comienza con unas refinadoras que homogeneizan la pulpa y la mezcla con los aditivos y rellenos para mejorar sus propiedades. Una vez se ha realizado la mezcla, se bombea a la máquina que produce el papel. Esta máquina se compone de:

- Bombas que vierten la pulpa en el tamiz. Regulando el caudal que se vierte se controla el gramaje del papel. La presión del chorro debe ser constante para evitar las fluctuaciones que provocan discontinuidades y pueden romper las fibras.
- Tamiz de alambre. En él la pulpa comienza a perder humedad dejando caer el agua que contiene para la formación del papel. Esto se va realizando con un vacío cada vez mayor a lo largo del tamiz y cuenta con materiales que absorben el agua. Además de usarse para eliminar

el agua, el tamiz vibra en la dirección transversal a la dirección de máquina para alinear las fibras en sentido de máquina. En la Figura 3.13 se puede ver un tamiz de alambre de una industria papelera.

- Rodillos de presión. El agua sobrante que queda en el papel se elimina pasándolo por estos rodillos. Estos rodillos también sirven para suavizar y comprimir el papel y mejorar los enlaces entre fibras.
- Rodillos de secado. Son otro conjunto de rodillos que trabajan a altas temperaturas. Los rodillos de secado hacen que el papel se encoja en dirección transversal a la máquina. Cuanto más encoja el papel mayor resistencia tendrá. Para aumentar la resistencia en dirección de máquina se hace pasar por unos rodillos que arrastran la capa superficial del papel, reduciendo la velocidad de este. Cuanto menor sea la velocidad de la capa más superficial mayor resistencia tendrá el papel.
- Embobinadora Una vez seco el papel se va liando en una bobina. La embobinadora cuenta con sensores para medir la humedad y el gramaje del papel que va saliendo del proceso de fabricación.<sup>[7]</sup>



Figura 3.13. Tamiz de alambre con la pulpa con mucha humedad al principio del recorrido y menos humedad al final.

### 3.3.1. Proceso Kraft Cooking

En este proceso se usa hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) y sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) disueltos en agua para eliminar la lignina y dejar libre las fibras de la madera que sirven para hacer el papel. Los iones  $\text{OH}^-$  y  $\text{HS}^-$  que generan estos compuestos químicos atrapan la lignina y la dejan en la disolución. El esquema del proceso de fabricación *Kraft Cooking* se puede ver en la Figura 3.14. A continuación se detallan los principales pasos de este proceso.

- Contenedor de astillas: Las astillas que hay en los silos se introduce en el proceso por el contenedor.
- Cámara de vapor: Las astillas se tratan con vapor de agua para que las fibras sean más fáciles de separar.

- Digestor continuo: Aquí es donde comienza la cocción de las astillas con la sosa y el sulfito para la eliminación de la lignina y la madera pasa a ser una pulpa. Se puede comparar con una gran olla a presión por las condiciones a las que se le somete.
- Etapa de lavado: La pulpa que sale del digestor es impregnada con un líquido de limpieza que separa la fibra de la mezcla de los disolventes con la lignina. Esta mezcla se extrae y se llama líquido negro. Luego el líquido negro pasa por un proceso de recuperación para poder reutilizar los compuestos inorgánicos. En este proceso se evapora el agua de la disolución y después se pulveriza la mezcla en un horno para quemar los compuestos orgánicos y recuperar la sosa y el sulfito. y. Una vez sacado del horno, se vuelve usar para hacer la disolución que se usa en el digestor. <sup>[19]</sup> En la Figura 3.14 podemos ver un esquema del proceso de recuperación que se ha descrito.

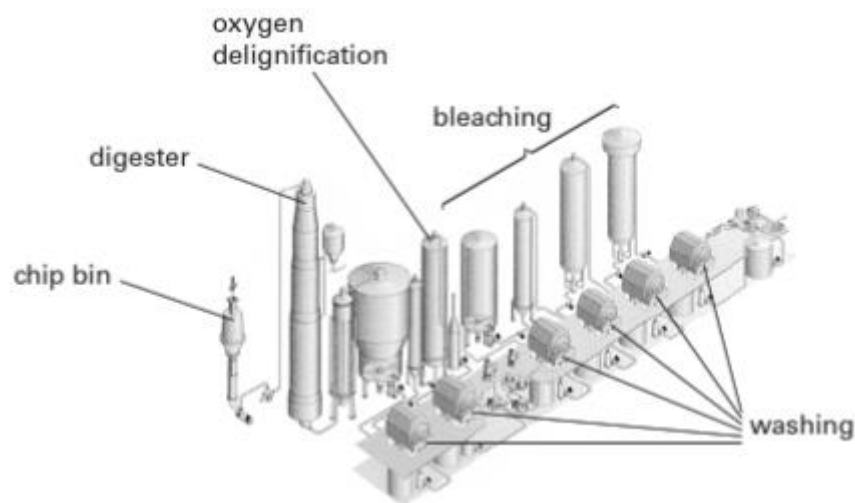


Figura 3.14. Esquema de la fabricación de la pulpa. Imagen sacada del libro *Pulp and Paper Chemistry and Technology*. <sup>[19]</sup>

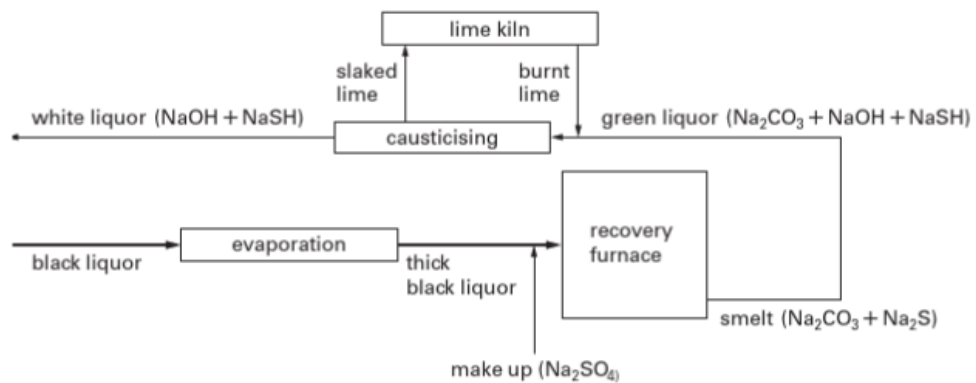


Figura 3.15. Esquema del proceso de recuperación de los elementos inorgánicos usados en el digestor. Imagen sacada del libro *Pulp and Paper Chemistry and Technology*. <sup>[19]</sup>

### **3.4 Fabricación del cartón.**

La fabricación de las cajas de cartón ondulado consta de dos procesos muy bien diferenciados.

- Fabricación de la plancha. En este proceso se usa una máquina llamada onduladora cuyo esquema de funcionamiento podemos ver en la Figura 3.16. Esta máquina se encarga de:
  - Ondular y pegar el papel. Para ondular el papel se hace pasar por los acanaladores, que son como engranajes de dientes cortos que se encuentran a altas temperaturas y humedad con

la intención de que el papel sea más maleable. Una vez ondulado el papel se le hace pasar por unos rodillos impregnados en cola, la cual con el contacto se introduce en los poros del papel. Tras esta operación otro rodillo pone en contacto el papel ondulado con algunas de las caras. Debido a las altas temperaturas el almidón presente en la cola estalla y se vuelve un gel que agarra el papel. Una vez pegados los papeles pasan a la mesa en la que se elimina parte de la humedad del cartón.

- Cortar y apilar las planchas. Una vez formado, el cartón se corta mediante cuchillas según el largo y ancho deseados, y las planchas se dejan caer sobre un apilador.
- Curado de las planchas. En este proceso se sigue eliminando el exceso de humedad que ha cogido el papel durante su fabricación.



Figura 3.16. Fabricación cartón corrugado simple.

- Troquelado e impresión de la caja. Una vez se ha curado la plancha de cartón, ésta pasa por una máquina que la corta e imprime. Se introduce la plancha en la máquina y mediante un cliché, que es lo que contiene el molde de lo que se quiere imprimir, se hace pasar la tinta por unos canales que tiene para realizar la impresión. Una vez impresa pasa a una troqueladora que mediante gomas y cuchillas corta y realiza los hendidos de la caja. Los hendidos sirven para poder doblar el cartón en el lugar correspondiente cuando se monte la caja. La troqueladora puede ser plana o cilíndrica. Las cilíndricas (Figura 3.17) son más rápidas porque no necesita parar para cortar, pero la parte final es más larga que la inicial en el sentido de conversión debido a que la plancha coge velocidad al pasar por el cilindro. Además, presentan el problema de que no pueden troquelar cartón con canales pequeños o con calidad muy baja, ya que este tipo de planchas se queda enganchada al troquel. La troqueladora plana no presenta estos problemas, pero es más lenta que la rotativa.

Una vez formada la caja, ésta pasa por un partidor que tiene la función de separar unas cajas de otras. Finalmente, estas preformas de las cajas de cartón se apilan en palés y se embalan con una película de plástico para llevarselas al cliente.



Figura 3.17. Troqueladora rotativa.

### **3.5 Características del papel como material**

Como hemos visto, el papel es un material procedente de la madera, que es un material compuesto de origen natural. Las fibras extraídas de la madera son el principal componente del papel, aunque no el único, y como hemos visto en el proceso de fabricación del papel estas fibras quedan principalmente alineadas en la dirección de máquina, lo que hace al papel un material anisótropo, es decir, que sus propiedades dependen de la dirección en la que se midan. Además, las fibras dejan poros o espacios vacíos en la estructura del papel que también van a ser importantes para sus propiedades y su gramaje, que recordemos que es el peso por unidad de superficie de la hoja. Por tanto, su estructura y composición hacen que el papel sea un material complejo en cuanto a sus propiedades.

A nivel molecular, las fibras se componen principalmente de tres tipos de compuestos químicos:

- Celulosa. Son cadenas largas de glucosa (Figura 3.17). Estas cadenas poliméricas constituyen entre el 40% y el 50% de la masa seca de la fibra, y son el núcleo que le da la rigidez y fuerza. Estas cadenas pueden cristalizar por puentes de hidrógeno.<sup>[21]</sup>

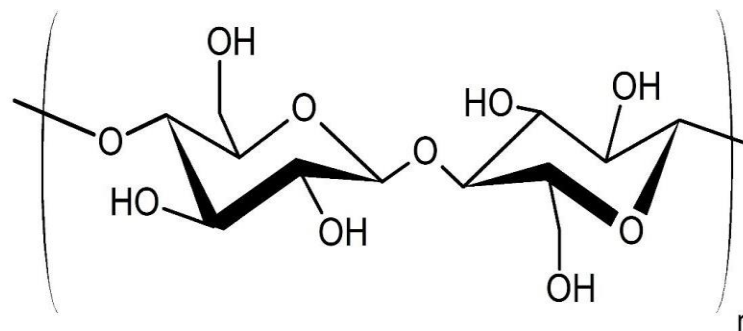


Figura 3.18. Estructura principal de la cadena de celulosa formada por unidades de glucosa. Obtenido del artículo *Humidity's effect on strength and stiffness of containerboard materials*.<sup>[21]</sup>

- Hemicelulosa. Basada también en la unidad polimérica de la glucosa, se diferencia de la celulosa en que tiene más grupos sustituyentes y por tanto tiene menos capacidad de cristalización. Debido a esto, solo puede formar estructuras semicristalinas sin puentes de hidrógeno. Estos compuestos rodean las microfibras de celulosa haciendo de pared y se enlazan a la lignina. Dependiendo del tipo de madera, estas cadenas de hemicelulosa están compuestas por diferentes porcentajes de los grupos que la forman. Estos compuestos

atrapan mejor las moléculas de agua y refuerzan las paredes de la fibra, contribuyendo a mantener la porosidad del papel y regulando su contenido de humedad.<sup>[21]</sup>

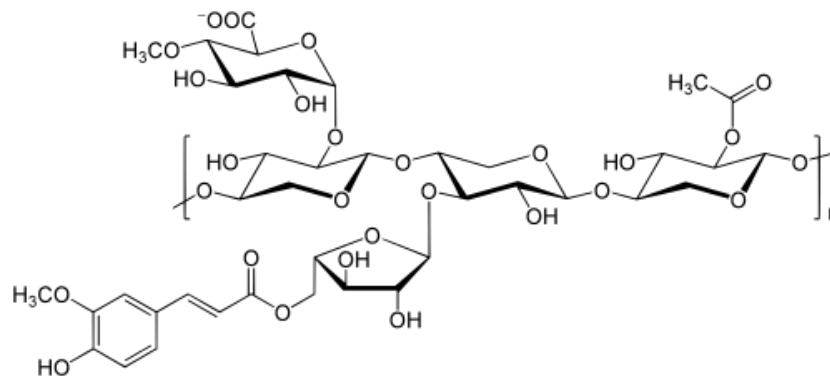


Figura 3.19. Estructura principal de la cadena de hemiglucosa basada en unidades de glucosa con varios tipos de sustituyentes en la cadena principal. Obtenido del artículo *Humidity's effect on strength and stiffness of containerboard materials*.<sup>[21]</sup>

- Lignina. Es el pegamento que mantiene unida la celulosa con la hemicelulosa, permitiendo una mejor red de enlaces en este polímero natural. Gracias a su capacidad hidrofóbica evita que las paredes de las fibras se hinchen y sirve como protección de los microorganismos. Son estructuras complejas formadas por bloques de enlaces carbono-carbono al azar,<sup>[21]</sup> con grupos ácidos y alcoholes como las que se pueden ver en la Figura 3.20.

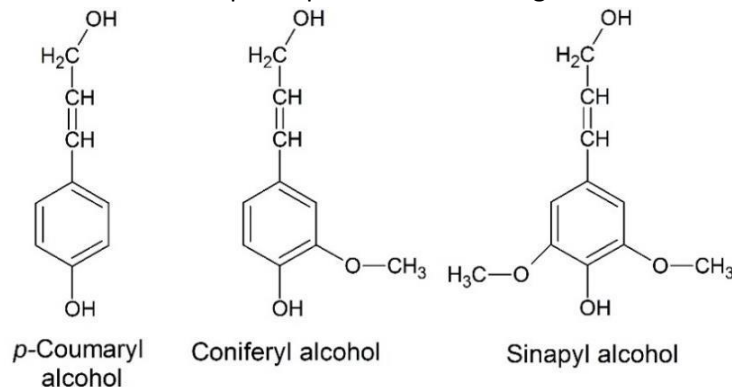


Figura 3.20. Diferentes estructuras moleculares que componen la lignina. Obtenido del artículo *Humidity's effect on strength and stiffness of containerboard materials*.<sup>[21]</sup>

Con esta estructura y composición química las propiedades del papel son complejas, y dependen mucho de las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad. Para este proyecto nos interesa sobre todo el efecto de la humedad en sus propiedades, y por la bibliografía ya sabemos que el comportamiento no es sencillo, como veremos en el siguiente apartado.

### **3.6 Humedad y propiedades mecánicas**

En la bibliografía consultada hemos encontrado diversos estudios de la variación de las propiedades mecánicas del papel con las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad. Como iremos viendo en este trabajo, hay varios ensayos normalizados dedicados a estudiar las propiedades mecánicas del papel. Entre ellos hemos elegido el ensayo a compresión en corto que describiremos en el siguiente capítulo por ser uno de los que más se utiliza en la industria para el control de calidad del papel y con el que todavía no se ha hecho un estudio detallado de la influencia de la humedad

ambiental en la medida de esta propiedad. Por este motivo este trabajo ha resultado de interés también para la empresa que nos deja usar sus instalaciones.

La humedad relativa normalmente expresada en porcentaje (%HR) es la cantidad de vapor de agua (moléculas de agua en estado gaseoso) que hay en el aire en unas determinadas condiciones ambientales. Este vapor de agua se absorbe en el papel, a través de la superficie y penetrando por los poros, y provoca el hinchamiento de las fibras de celulosa, que a su vez provoca la variación en las propiedades mecánicas. Como veremos en los siguientes capítulos, el agua absorbida en el papel (%M) se mide como un porcentaje de ganancia en peso entre el papel seco y el papel saturado de agua en unas determinadas condiciones ambientales.

Por tanto, la porosidad del papel es clave para la absorción de agua. En el papel este parámetro se puede estimar midiendo la permeabilidad al aire mediante el método Gurley, que consiste en medir la cantidad de aire que el papel deja pasar a su través, como veremos en el Capítulo 4. La permeabilidad del papel, por lo general, disminuye con el gramaje, pero esto solo se cumple hasta 60 g/m<sup>2</sup>. Para gramajes más elevados la permeabilidad permanece aproximadamente constante. Como veremos en el siguiente capítulo en las características del papel que ofrece el fabricante, tanto la porosidad como la absorción de agua son constantes para todos los gramajes comercializados, aunque todos estos parámetros guardan relación entre ellos, como ya hemos comentado.

Pero condensarse en los poros no es la única manera que tiene el agua de introducirse en el papel. Al tratarse de un material polimérico como la celulosa, éste tiene una gran capacidad para hincharse, y debido a las fuerzas que provocan las moléculas de agua entre las cadenas de celulosa disminuye la fuerza máxima que puede resistir el papel. A pesar de las diversas investigaciones realizadas y conocimientos que se tienen, no hay todavía una explicación clara de cómo el agua se introduce en la compleja estructura del papel, en la que no solo hay que tener en cuenta la relación entre la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, sino también el grado de cristalinidad de las fibras <sup>[16]</sup>.

En la literatura encontramos algunas relaciones interesantes para nuestro trabajo. En la Figura 3.21 se puede ver la relación entre la humedad relativa del ambiente y la humedad absorbida en el papel. Como se puede observar en la gráfica hay dos tipos de puntos que se ajustan a dos líneas de variación entre la humedad del papel y la humedad ambiente. Esto se debe a que dependiendo de si el papel se expone primero a una atmósfera con humedad baja (20%RH) y luego se sube al 50%RH (puntos de fondo claro) el papel absorberá una cantidad de agua menor (M = 7%) que si se somete primero a condiciones altas de humedad (80%RH) y luego se baja hasta el 50%RH (puntos negros), absorbiendo en este caso un 8% de humedad. Esto se conoce como histéresis del papel y se produce debido a que el papel tiene varios mecanismos para absorber humedad dependiendo de la humedad ambiente. Por un lado, el papel retiene moléculas de agua por puentes de hidrógeno con el OH<sup>-</sup> que contiene la celulosa, provocando el hinchamiento del polímero. Con humedad relativa baja el porcentaje de agua absorbida y de hinchamiento es bajo, y cuando aumenta la humedad se retiene más agua y aumenta el hinchamiento.<sup>[18]</sup> Pero el papel también es un material poroso, y el agua puede condensarse y rellenar esos poros o espacios vacíos sin que llegue a entrar en la estructura del polímero, y la porosidad depende también del grado de hinchamiento, con lo que el comportamiento es muy complejo, como se ve en estos datos. Por lo general, las zonas que más agua retienen son las partes cristalinas de la estructura del polímero que forma el papel. <sup>[17]</sup>

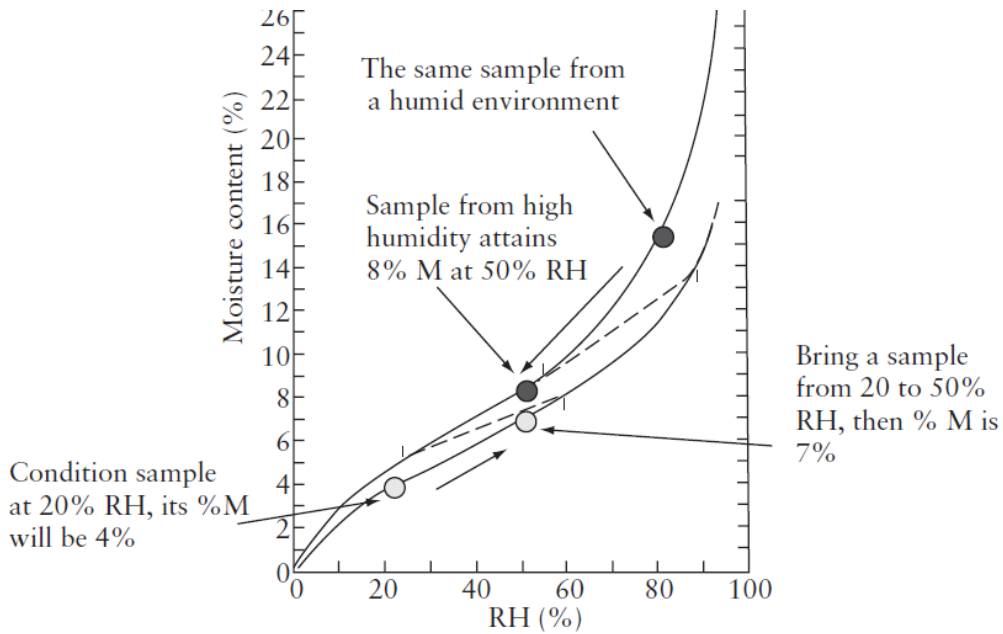


Figura 3.21. Variación de la humedad del papel expresada en porcentaje en peso de agua absorbida según la humedad ambiente. Gráfica obtenida del libro *Physical Testing of Paper*.<sup>[17]</sup>

Por tanto, la humedad que tenga el papel depende de la humedad ambiental a la que haya estado expuesto durante su vida, y las propiedades del papel dependen del grado de humedad que contenga.<sup>[17]</sup> Esto es muy importante para los resultados de los ensayos mecánicos que se le hacen al papel, al cartón y a las cajas de cartón, y esto es lo que ha motivado la realización de este trabajo. En concreto, una vez fabricado el papel las bobinas pueden haber realizado un trayecto en barco, estando expuestas a una elevada humedad. Después estas bobinas se conservan en almacenes que pueden tener una humedad muy variable según su localización geográfica y la época del año. Al final, cuando se van a hacer los ensayos en el laboratorio de control de calidad se acondicionan las muestras en cámaras de humedad controlada, pero el grado de humedad del papel depende de los distintos ambientes en los que se haya encontrado, lo que puede afectar a sus propiedades mecánicas.

En el libro *Physical Testing of Paper* determinan que un papel se acondiciona con valores de humedad relativa de 90% HR en el ambiente llegan a su valor de equilibrio a los 15 min y se saturan por completo a las 2 horas. En cambio, si primero se seca el papel y después se expone a las condiciones de humedad previamente comentadas, el papel tardará en llegar a su valor de equilibrio 1 hora. En cambio, si el papel se encuentra formando cartón corrugado, éste tarda al menos 5 horas en saturarse de humedad. El comportamiento que suelen presentar es el que se ve en la Figura 3.22 que se muestra a continuación.<sup>[17]</sup>

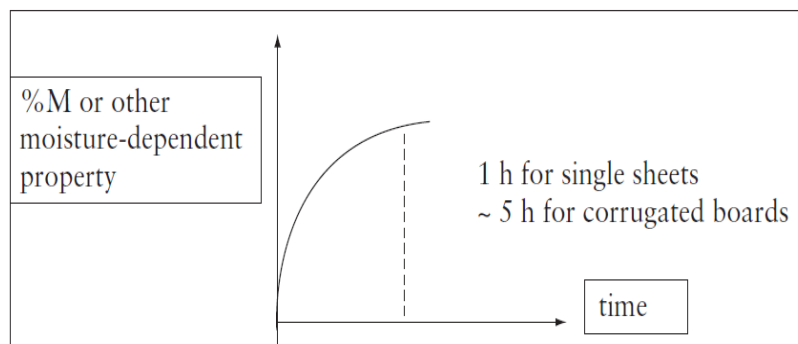


Figura 3.22. Variación de humedad contenida en un papel cualquiera (%M) que se ha secado y vuelto a humedecer Imagen obtenida del libro *Physical Testing of Paper*.<sup>[17]</sup>



Esto significa que, por el simple hecho de estar en unas condiciones ambientales determinadas, pueden variar las propiedades mecánicas del papel. Dicho de otro modo, las propiedades mecánicas dependen de las condiciones de temperatura y humedad en el laboratorio concreto donde se midan, lo cual no es aceptable para realizar los controles de calidad necesarios en toda fábrica de cajas de cartón.

Por este motivo, en los laboratorios se disponen de gráficas que correlacionan la humedad del papel con las principales propiedades, como la de la Figura 3.23. Esta gráfica fue proporcionada por Venco S.A. a Smurfit Kappa para su uso en el laboratorio de calidad. En ella se representa un coeficiente de variación o factor de corrección, que se define como el porcentaje que aumenta o disminuye la propiedad medida a unas condiciones de humedad determinadas respecto de la propiedad medida a unas condiciones de referencia, en función de la humedad relativa a la que se realiza el ensayo. En esta gráfica se ha tomado como condiciones de referencia las del 65 %HR, y el factor de corrección que se representa en el eje y es el porcentaje de variación de la propiedad respecto al valor de la propiedad a dichas condiciones de referencia. Esta gráfica es muy completa porque incluye muchas propiedades mecánicas del papel, como son la resistencia y el alargamiento a tracción y la resistencia al plegado en la dirección de máquina y en la dirección transversal, y la resistencia al estallido y al desgarro. Sin embargo, no incluye ningún parámetro medido a compresión como es la compresión en corto.

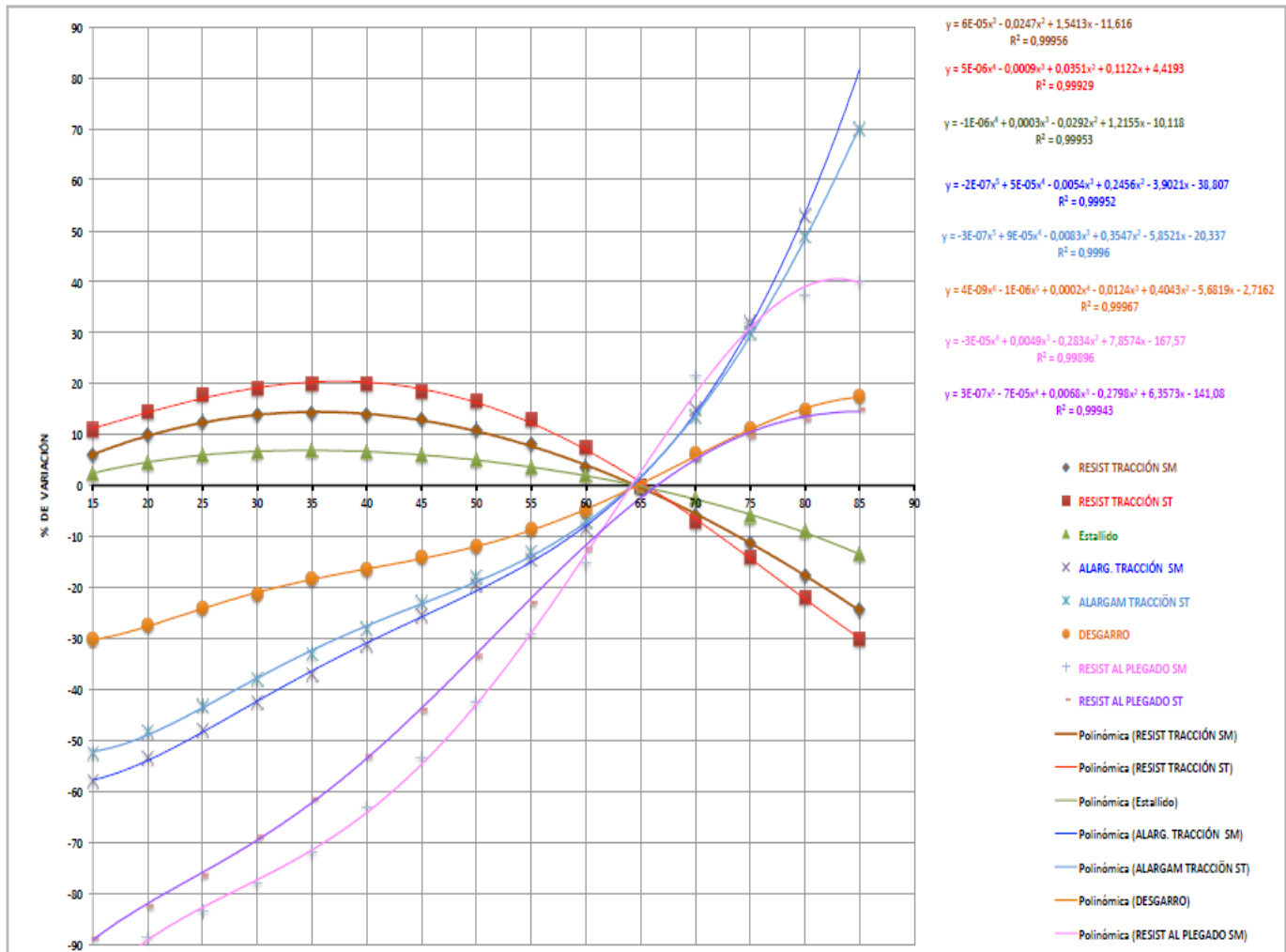


Figura 3.23. Coeficiente de variación para distintos ensayos mecánicos para el papel con las ecuaciones que definen cada curva y los ensayos a los que corresponde. Datos obtenidos para el laboratorio de Smurfit Kappa.

En la bibliografía hemos encontrado una referencia que estudia la variación con la humedad de una propiedad medida a compresión.<sup>[22]</sup> Han realizado el ensayo normalizado de compresión en anillo, (UNE-ISO 12192:2017), que consiste en un disco con una ranura que soporta la probeta de forma tangencial y se comprime el canto. La resistencia medida es la fuerza media entre la longitud de las probetas. En la Figura 3.24 se pueden ver los coeficientes de variación que obtienen en función de la humedad relativa para dos papeles distintos. Se puede ver que las variaciones que se producen son prácticamente las mismas para los dos papeles.

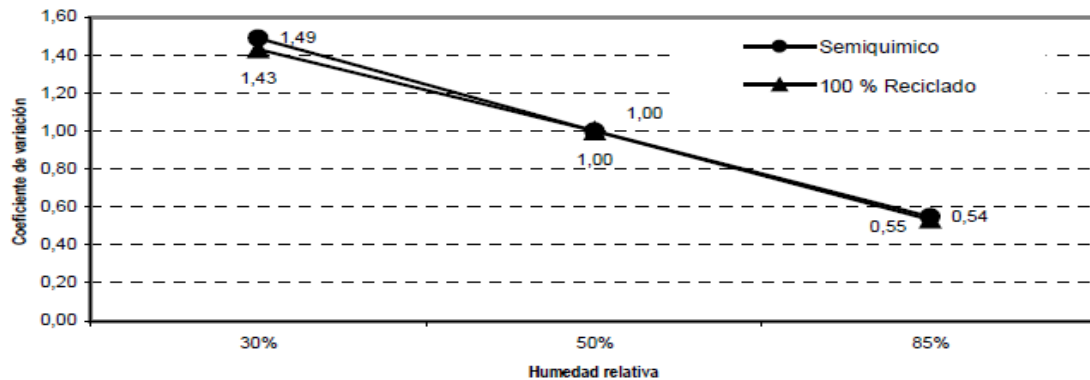


Figura 3.24. Coeficiente de variación para distintos papeles. Gráfica obtenida de la revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.<sup>[22]</sup>

En el libro *Physical Testing of Paper (2017)* aparece un estudio de la resistencia a la compresión en corto (SCT) frente al contenido en humedad para el papel Kraftliner como podemos ver en la Figura 3.24. Las medidas de la resistencia SCT se realizan después de equilibrar las muestras en ambientes con distintas humedades relativas entre el 20 y el 80%. Como referencia se toma el valor de la propiedad al 50 %HR, para la que el papel absorbe aproximadamente un 6,2 % en peso de humedad. Sin embargo, podemos ver que esta figura presenta una errata, ya que para estos valores de humedad absorbida debe ocurrir que la propiedad mecánica disminuya para contenidos en humedad creciente, de modo que si se define el factor de corrección como el SCT a %M dividido entre el SCT a 50 %HR, como la ecuación que se escribe sobre la propia gráfica, este factor debería tener también una tendencia decreciente con la humedad, cuando se ve que la tendencia es creciente. Con la información que encontramos en el texto de esta referencia hemos llegado a la conclusión de que el factor de corrección en realidad está definido al revés, como  $SCT_{50\%RH}/SCT_{\%M}$ .

Como esta propiedad mecánica es justo la que vamos a medir en este trabajo en función de la humedad, en el Capítulo 5 volveremos sobre estos resultados de la bibliografía para comparar nuestros datos. Nos será muy útil la ecuación del ajuste que hacen de sus datos, que tras corregir la errata detectada es la siguiente:

$$\frac{SCT_{50\%RH}}{SCT_{\%M}} = 0,531 e^{0,089\%M}$$

Los propios autores también linealizan esta ecuación del siguiente modo:

$$SCT_{\%M} = SCT_{50\%RH} \cdot (\%M \cdot 0,07 + 0,47)$$

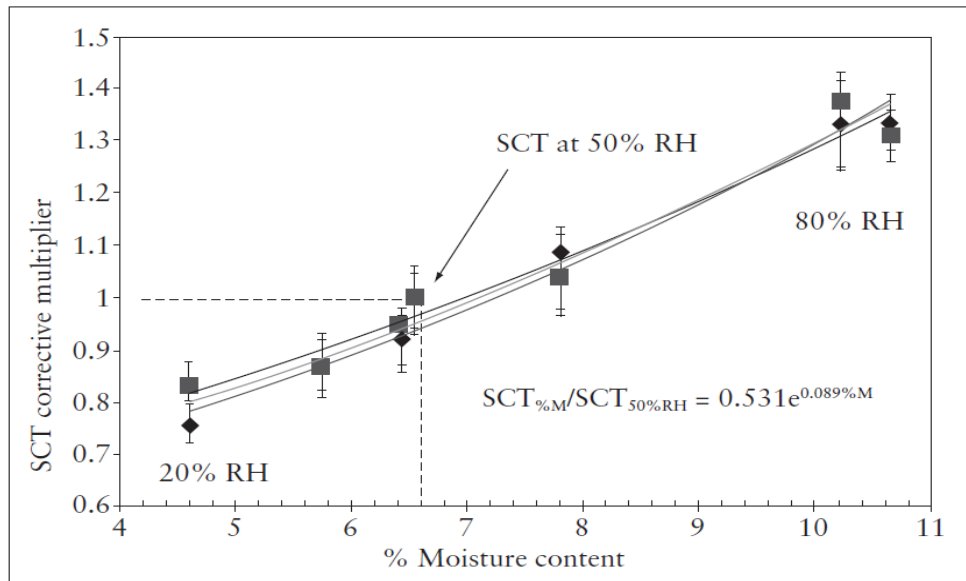


Figura 3.25. Coeficiente de corrección de la resistencia a la compresión en corto en función del contenido en humedad del papel Kraft según la referencia [17]. Gráfica obtenida del libro *Physical Testing of Paper* [17]

### **3.7 Empresas de cartón ondulado para agricultura.**

En la provincia de Almería la industria agraria utiliza envases de cartón procedentes principalmente de tres compañías dentro de la industria del papel y cartón. A continuación, vamos a ver cuáles son, la primera de ellas es una empresa de la provincia, la segunda es una competidora suya a nivel nacional, y la tercera es una multinacional:

- Onduspan: Es una empresa nacida en Níjar en 1989, especializada en la realización de cartón ondulado. Su gran crecimiento se produce gracias a la agricultura presente en la provincia de Almería. Su experiencia en este sector ha hecho que crezca y se vuelva una empresa de referencia en la provincia, siendo hoy día uno de los fuertes competidores en la industria del cartón en toda España con su marca registrada *Green Box*.<sup>[8]</sup>



Figura 3.26. Logotipo de Onduspan.

- Saica: Es una empresa creada en Zaragoza en 1943. Esta empresa es conocida en el sector por su compromiso medioambiental. Todos los papeles que fabrica son reciclados y los de mejores prestaciones. También el cartón que fabrica está compuesto preferentemente por papel reciclado. Es el ejemplo del compromiso de una industria con el medioambiente, ya que, apuesta por una economía circular, por el reciclaje de plásticos, papel y cartón; por el uso de biomasa que se produce en la fabricación del papel, para usarlo en las plantas o venderlo y por la gestión de residuos de otras industrias.<sup>[9]</sup>



Figura 3.27. Logotipo de Saica.

- *El Grupo Smurfit Kappa*: Es una de las mayores compañías del sector. Creada en 1934 en Irlanda. Adquirida por Jefferson Smurfit en 1938, muy pronto pasó a ser un negocio dinámico y con visión de futuro, cotizando en la Bolsa de Valores Irlandesa en 1964. En 2005, Jefferson Smurfit se fusionó con Kappa Packaging, hasta entonces el fabricante más grande de Europa en embalaje, para formar Smurfit Kappa.



**Smurfit Kappa**

Figura 3.28. Logotipo de Smurfit Kappa.

Actualmente abarca toda la producción de papel y cartón, desde la materia prima hasta su reciclaje. Cuenta con más de 350 plantas en 35 países, alrededor del mundo.



Figura 3.29. Operaciones de Smurfit Kappa.

Es una empresa que apuesta por la seguridad y la formación. Esto lo realiza con campañas como *Safety First*, que promueve la seguridad de los empleados antes que la producción.



Figura 3.30. Logotipo del programa Safety for life.

Esta estructura de trabajo ha hecho que en 2019 Smurfit Kappa facturase 9 billones de euros. En la actualidad esta empresa tiene diversificada su inversión en distintos sectores relacionados con la producción de papel y cartón, como se puede ver en la Figura 3.31.<sup>[10]</sup>

Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.



Figura 3.31. Diversidad de operación de Smurfit Kappa.

En Smurfit Kappa Almería, situado en Vúcar, tienen un gran compromiso por la formación de los futuros graduados. Esto lo demuestran con su continua contratación y formación de estudiantes universitarios mediante las Prácticas Extracurriculares y Curriculares que organiza la Universidad de Almería. Como ya se ha dicho, la idea de realizar este TFG surgió de una de estas prácticas, y el trabajo se ha realizado en las instalaciones de la empresa con el permiso de sus responsables.

## Capítulo 4. Materiales y métodos

### 4.1 Materiales usados

Los papeles Kraft que se han usado ha sido los de gramaje 135, 170, 200, 225 y 275 g/m<sup>2</sup>. Todos los papeles se han cogido del mismo proveedor (Smurfit Kappa Cellulose du Pin) para que las variaciones en el proceso de fabricación no influyesen demasiado. Las especificaciones que da el proveedor sobre estos papeles se encuentran en la Tabla 2 y 3. En la primera de ellas se pueden ver los valores típicos, es decir los valores medios más habituales, y en la Tabla 3 son los valores límite que garantiza el fabricante para toda su producción de este tipo de papeles. Estos valores se miden normalmente en las condiciones de laboratorio, que según las normas deben ser de 23 °C y 50%RH, aunque no siempre se puede mantener todo el laboratorio a estas condiciones. Más adelante veremos el significado de la mayoría de estos parámetros con los que se caracterizan los papeles para hacer cartón ondulado.

Tabla 3. Valores típicos dados por el fabricante de las características de los cinco tipos de papeles usados en este estudio

| <b>Propiedad</b>                 | <b>Método usado</b> | <b>K135</b> | <b>K170</b> | <b>K200</b> | <b>K225</b> | <b>K275</b> |
|----------------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>Gramaje (g/m<sup>2</sup>)</i> | ISO 536             | 135         | 170         | 200         | 225         | 275         |
| <i>Estallido (kPa)</i>           | ISO 2758            | 605         | 735         | 830         | 940         | 1070        |
| <i>SCT cd (kN/m)</i>             | ISO 9895            | 2.55        | 3.20        | 3.80        | 4.20        | 5.00        |
| <i>Humedad (%)</i>               | ISO 287             | 8.0         |             |             |             |             |

Tabla 4. Valores garantizados por el fabricante de las características de los cinco tipos de papeles usados en este estudio

| <b>Propiedad</b>                                 | <b>Método usado</b> | <b>K135</b> | <b>K170</b> | <b>K200</b> | <b>K225</b> | <b>K275</b> |
|--|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>Gramaje (g/m<sup>2</sup>)</i>                 | ISO 536 (Máximo)    | 139.1       | 175.1       | 206.0       | 234.0       | 286.0       |
|  | ISO 536 (Mínimo)    | 131.0       | 164.9       | 194.0       | 216.0       | 264.0       |
| <i>Estallido (kPa)</i>                           | ISO 2758            | 555         | 680         | 770         | 840         | 980         |
| <i>SCT cd (kN/m)</i>                             | ISO 9895            | 2.30        | 2.90        | 3.40        | 3.70        | 4.50        |
| <i>Humedad (%)</i>                               | ISO 287 (Máximo)    | 9.5         |             |             |             |             |
|  | ISO 287 (Mínimo)    | 6.5         |             |             |             |             |
| <i>COBB60 Cara exterior (g/m<sup>2</sup>)</i>    | ISO 535 (Máximo)    | 40          |             |             |             |             |
|  | ISO 535 (Mínimo)    | 20          |             |             |             |             |
| <i>COBB1800 Cara exterior (g/m<sup>2</sup>)</i>  | ISO 535             | <155        |             |             |             |             |
| <i>Porosidad Gurley cara exterior (s Gurley)</i> | ISO 5636            | 20-150      |             |             |             |             |

Para obtener las muestras, se ha realizado de la siguiente manera:

- Selección y obtención de muestras de papel de la bobina: Para sacar muestras de una bobina (Figura 4.32), primero tenemos que seleccionar qué bobina queremos ensayar. Se ha escogido como proveedor del papel a Smurfit Kappa Cellulose du Pin por ser la que mayor variedad de gramajes da. De las distintas bobinas que se encontraban disponibles en la fábrica, se han escogido al azar cinco bobinas, una de cada gramaje.

Tras seleccionar las bobinas, se tienen que quitar las cintas que las mantiene cerradas mediante un cúter. Se desenrolla una o dos capas de papel la bobina y se corta dejando ese trozo para eliminar desperfectos que pueda tener del transporte y manipulación. El trozo de papel desechado se deja en el suelo para usarlo como protección.

Luego desenrollamos y cortamos la cantidad de papel que consideremos oportuno. Aproximadamente se han cortado 2 metros de papel de cada bobina para hacer este TFG. La muestra cortada se deja inicialmente en el suelo sobre el papel que se ha desechado al principio, colocando la cara que estaba en el interior de la bobina bocarriba (ver Figura 4.28). Enrollamos la muestra en el sentido de la dirección de máquina. De este modo el papel se queda enrollado como estaba en la bobina y mantenemos siempre localizadas la cara interior de la bobina y la dirección de máquina. Una vez enrollado lo sujetamos con una goma elástica. No se pueden usar cintas adhesivas para no estropear con el adhesivo parte de la muestra tomada.

Para cerrar la bobina tras extraer la muestra tenemos que irnos al extremo, tensarlo y sujetarlo tenso con cintas adhesivas. Si no se tensa bien las pinzas de la máquina que transporta la bobina para meterla en máquina la romperían.

Este procedimiento se tiene que hacer para los cinco gramajes.



Figura 4.32. Bobina de papel Kraft parcialmente consumida. Una bobina completa suele ser de aproximadamente de 2 metros de alto y 2,5 toneladas de peso

- Climatización de las muestras: Una vez se han obtenido las muestras, la normativa UNE-EN 20187:1994 determina que pasen al menos 24 horas en las condiciones del laboratorio para poder realizar los ensayos pertinentes.<sup>[13]</sup> Según esta norma, el laboratorio tiene que estar a  $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$  y  $(50 \pm 2) \% \text{HR}$ .<sup>[13]</sup> Estas condiciones de laboratorio se mantienen mediante un climatizador Stulz.
- Obtención de probetas: Cuando las muestras se han aclimatado se procede a cortarlas. Para ello quitamos el elástico que las sujeta y cortamos un trozo. La medida de este trozo tiene que ser suficiente para poder cortar las probetas más anchas, que será la que se usa para el gramaje. Por lo tanto, con tiras de 20 cm o 30 cm de ancho es suficiente. El corte se hace desde la parte superior de la muestra hasta la inferior, paralelo al corte que hemos realizado en la bobina. Una vez cortada la tira volvemos a colocar el elástico en el papel restante y procedemos a cortar los trozos más pequeños que nos hagan falta.

En todos los trozos cortados hay que tener localizado en todo momento la cara interior de la bobina, que normalmente se coloca mirando hacia arriba, y la dirección de máquina. Para los técnicos especializados es fácil distinguir la cara interior y la exterior del papel Kraftliner, ya que la cara exterior suele ser más suave y uniforme, con menos poros entre las fibras que la cara interior.<sup>[17]</sup>

Para determinar la dirección de máquina tenemos que saber cuáles son los extremos laterales de la bobina (Figura 4.33), así que una vez cortadas las probetas es difícil saber cuál es. Por eso se corta y enrolla el papel cortado de la manera descrita previamente. Y una vez en el laboratorio con una regla haremos una línea perpendicular a la dirección de máquina para tenerla de referencia a la hora de cortar las probetas para los ensayos, y una vez cortadas estas muestras más pequeñas se hace una flecha sobre cada una de ellas indicando la dirección de máquina, como se puede ver en la Figura 4.34.



Figura 4.33. Bobina en la onduladora. La flecha sobre la bobina marca la dirección de máquina.

Las probetas que requieren los diferentes ensayos son normalmente cuadradas. En el laboratorio disponemos de guías de diferentes tamaños, como las que se muestran en la Figura 4.35, para facilitar el corte con el cúter de las probetas. Este proceso de corte de las probetas lo repetiremos varias veces según vayamos necesitando muestras del tamaño adecuado para los diferentes ensayos.



Figura 4.34. Muestra papel con dirección de máquina marcado.



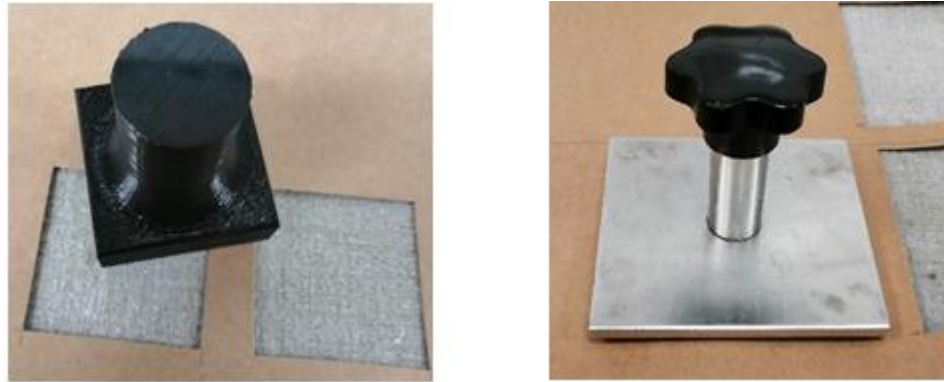


Figura 4.35. Guías para cortar muestras cuadradas de 6 cm (izquierda) y de 10 cm (derecha).

Como la termobalanza tiene un área muy limitada, el tamaño de las muestras para los ensayos de humedad y SCT será de 6 cm. Para el espesor, gramaje y porosidad utilizaremos la guía de 10 cm. Para estos ensayos no necesitamos conservar la dirección de máquina, pero si debemos tener en cuenta cuál es la cara exterior y la interior.

#### **4.2 Métodos usados.**

Como ya se ha indicado, para la realización de este trabajo vamos a realizar los ensayos normalizados que habitualmente se utilizan en el laboratorio de control de calidad de la empresa Smurfit Kappa Almería. A continuación, vamos a describir brevemente los ensayos que realizaremos.

##### **4.2.1. Medición de la humedad del papel.**

La determinación de la humedad contenida en los diferentes tipos de papel se realiza con el ensayo descrito en la norma UNE-EN ISO 287:2018. Las probetas son cuadradas de 6 cm de lado, y el ensayo completo consta de tres pasos:

- El primer paso consiste en eliminar todo el contenido de agua que se pudiese de la muestra. Para ello usamos la termobalanza Radwag, que es una balanza recubierta de papel de aluminio con una resistencia en su parte superior que ya está programada para hacer estos ensayos (ver figura 4.36). Cuando se coloca la muestra en la termobalanza primero se realiza una pesada, después se enciende la resistencia subiendo la temperatura de la muestra hasta 102 °C para evaporar el agua contenida, y se van realizando pesadas constantemente hasta que la masa llega a un valor estable. Una vez alcanzado ese valor, la propia termobalanza resta el valor inicial de masa ( $m_h$ ) menos el valor final ( $m_s$ ) y lo divide por el valor inicial para sacar el porcentaje de agua absorbida en el papel.

$$w_{muestra} (\%) = \frac{m_h - m_s}{m_h} \cdot 100$$

Cuando la diferencia de masa es menor del 0,01% la termobalanza considera que se ha alcanzado un valor estable de la masa seca del papel y proporciona el valor final de humedad de la muestra.

De este modo se obtiene la humedad del papel en las condiciones ambientales del laboratorio. Como a pesar del climatizador las condiciones ambientales del laboratorio pueden variar, se ha usado un termohigrómetro Testo para medirlas y anotarlas antes de meter el papel en la termobalanza. Además, esta es solo la primera parte del ensayo completo.

Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.



Figura 4.36. Balanza Radwag abierta preparada para colocar la muestra (izquierda) y funcionando (derecha).

- En el segundo paso se acondicionan las probetas en unas condiciones de temperatura y humedad bien controladas. Para ello metemos la muestra ya seca por la termobalanza en la cámara climática Dycometal (ver figura 4.37), siguiendo la norma UNE-EN ISO 2233:2015, en la que establece como una de las condiciones ambientales  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  y  $(90 \pm 5) \% \text{HR}$ .<sup>[12]</sup> Con un cronómetro, para tiempos cortos, o con un temporizador se mide cuanto tiempo estaba en cámara. Se comienza a contar el tiempo cuando se cierra la cámara por completo.



Figura 4.37. Cámara climática Dycometal con cajas para ensayar en su interior.

- Por último, se determina la humedad de las muestras tras acondicionarlas en estas condiciones normalizadas. Para ello, una vez ha pasado el tiempo necesario en la cámara, se saca la muestra y se coloca en la termobalanza para la obtención de la humedad del papel. La termobalanza, como se ha comentado, era automática, por lo que solo había que iniciarla. La termobalanza se detenía cuando la diferencia de humedad.

En este Trabajo Fin de Grado se ha seguido la norma UNE-EN ISO 287:2018, modificando únicamente la cantidad de muestras con la que se obtiene el valor ya que, aunque la normativa determina que el valor de humedad se obtiene del promedio de 10 muestras ensayadas, en este proyecto se ha reducido el número de muestras a la mitad, ya que la reproducibilidad de los valores fue muy alta y se vio que era suficiente con ensayar 5 muestras. La estimación del error de la humedad de las muestras se realiza con el *Error Cuadrático Medio*, que se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N \cdot (N - 1)}\right)}$$

Donde  $N$  es el número total de medidas realizadas,  $x_i$  es cada uno de los valores medidos desde  $i = 1$  hasta 5, y  $\bar{x}$  es el valor medio de todos los valores medidos.

#### 4.2.2. Medición de la Compresión en Corto del papel.

La medición de la fuerza máxima a compresión que soporta el papel se realiza según la normativa UNE-ISO 9895:2019, usando un compresómetro SCT cuyo funcionamiento se describe en dicha norma. Para sujetar la tira de papel el equipo tiene dos mordazas, teniendo cada mordaza una parte móvil (pinza móvil en el esquema de la Figura 4.38) y otra fija (pinza fija). Las dimensiones de estas mordazas y la anchura de la tira de papel se pueden ver en la Figura 4.38. En la figura 4.39 se muestra el mecanismo interior del compresómetro.

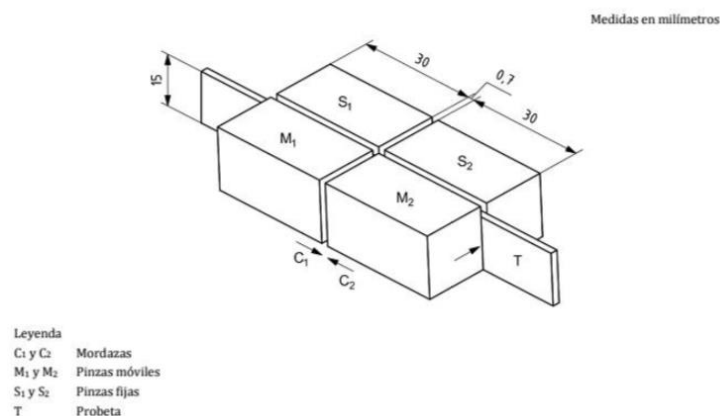


Figura 4.38. Esquema de las mordazas del compresómetro SCT. Imagen sacada de la norma UNE-ISO 9895:2019. [9]

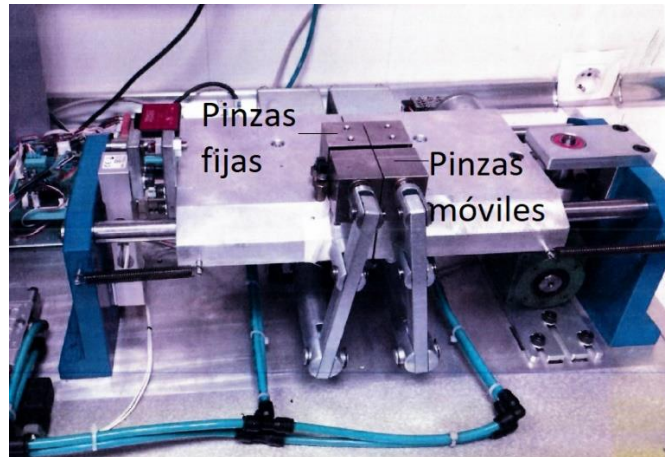


Figura 3.39. Compresómetro SCT con los mecanismos y circuitos al descubierto.

Aunque se utiliza un equipo que cumple la norma y se sigue el procedimiento que indica la norma, se ha modificado la longitud total de las probetas debido a las limitaciones de tamaño que tiene la termobalanza. Así, aunque la norma determina que las probetas tienen que ser de al menos 7 cm de longitud, vamos a usar muestras de 6 cm de longitud ya que éste es el diámetro del plato de la termobalanza.

Los ensayos SCT se han realizado para cada uno de los cinco gramajes seleccionados y para tres condiciones de humedad: cuando el papel estaba totalmente seco al salir de la termobalanza, en las condiciones de laboratorio, y cuando estaba saturado de humedad tras estar el tiempo suficiente en la cámara húmeda.

El procedimiento completo seguido para la medición de la resistencia a la compresión con distinto contenido de humedad es el siguiente:

1. Se acondiciona el papel en las condiciones de humedad deseadas. Las muestras libres de humedad se secan con la termobalanza, las saturadas de humedad se meten en la cámara durante una hora (tiempo que se vio que era suficiente para que las muestras alcanzaran la saturación en esas condiciones como se puede ver en el capítulo 3), y también se miden las muestras que están acondicionadas en las condiciones de laboratorio.
2. Se cortan las muestras con una cuchilla doble separadas por 15 mm y con una base de apoyo para poder colocar el papel de forma perpendicular a las cuchillas (ver figura 4.40). Esto nos sirve para mantener lo mejor posible la dirección de máquina a lo largo de la dirección principal de las probetas, que miden  $1,5 \times 6 \text{ cm}^2$  (ver figura 4.41).



Figura 4.40. Cuchilla doble. La parte superior es el apoyo para poder cortar las muestras.



Figura 4.41. Muestra de SCT para la dirección de máquina.

3. Se coloca la muestra en el compresómetro y se inicia el ensayo. La norma determina que primero las pinzas tienen que cerrar y sujetar la probeta a presión. Después tiene que ejercer el esfuerzo a compresión en el papel aproximando las mordazas en la dirección C1 y C2 que se indica en la Figura 4.38 a una velocidad de  $(3 \pm 1)$  mm/min (ver figura 4.42a). El ensayo termina cuando el papel falla (ver figura 4.42b). El compresómetro da el valor de SCT (ver figura 4.42c), que es la fuerza máxima dividida entre el ancho de la probeta en kN/m. Para obtener la fuerza máxima se tiene que multiplicar el valor de SCT por el ancho de la probeta, que será siempre 15 mm. Desde que se saca el papel de la cámara hasta que la máquina termina de ensayar el papel no pasan más de 30 segundos.

$$F_{max}[N] = \sigma_c^b \left[ \frac{kN}{m} \right] \cdot 15 [mm] \cdot 10^3 \left[ \frac{N}{kN} \right] \cdot 10^{-3} \left[ \frac{m}{mm} \right] = 15 \sigma_c^b$$



Figura 4.42a. Mordazas sujetando y ensayando una muestra.



Figura 4.42b. Muestra de papel ensayada donde se nota la zona de ensayo por el abultamiento debido a la deformación



Figura 4.42c. Display donde muestra los valores obtenidos tras finalizar el ensayo.

Para cada valor SCT obtenido para este proyecto se han realizado 20 ensayos, como determina la norma. El error se calcula mediante el *Error Cuadrático Medio* de los valores de la fuerza que se sacan

a partir del valor de SCT, siendo el error de cada valor de resistencia a la compresión la incertidumbre que da el fabricante de la máquina, que es un 3% del valor medido.

#### 4.2.3. Medición de la porosidad.

La medición de la porosidad se ha realizado según la norma UNE-ISO 5636-5:2015 usando un permeabilímetro Gurley. Este aparato tiene dos cilindros concéntricos montados sobre un tubo de alimentación central como se ve en la Figura 4.43. El cilindro exterior está parcialmente lleno con un fluido de sellado y el cilindro interior de masa conocida se introduce en el exterior por la parte de arriba hasta que queda introducido en el líquido de sellado. El cilindro interior se puede deslizar hacia arriba y hacia abajo según la presión de aire que se introduce por un orificio circular. Las placas de sujeción para la probeta de papel están en la base del aparato, y el tubo de alimentación central hace que la columna de aire se encuentre soportada por el papel.

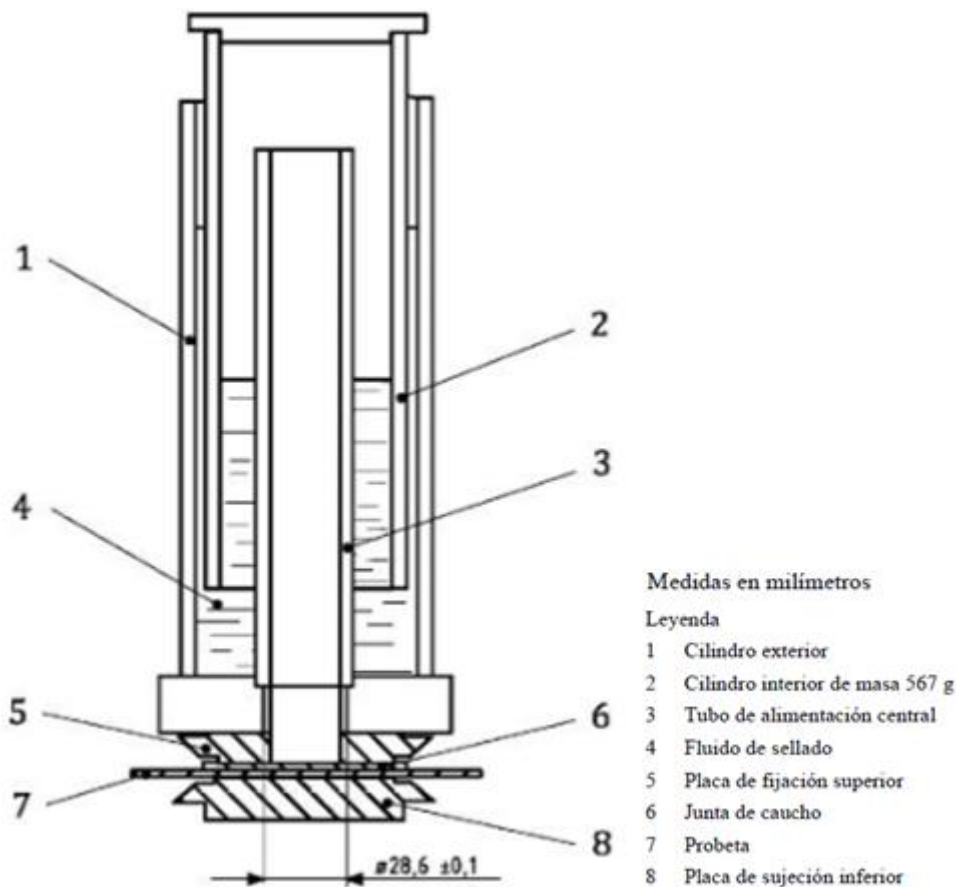


Figura 4.43. Esquema del aparato Gurley para medida de la permeabilidad al aire de muestras de papel. Imagen sacada de la norma UNE-ISO 5636-5:2015. [8]

Para realizar el ensayo en primer lugar se coloca la probeta de papel con la cara a ensayar hacia arriba. La zona de ensayo se delimita con unas mordazas, y la muestra está correctamente colocada cuando al tirar un poco del papel éste no se mueve. Luego se deja caer el cilindro superior para que empuje el aire forzándolo a pasar a través del papel. Mediante un sensor se mide el tiempo que tarda en atravesar el papel un volumen de aire especificado en la norma. A este tiempo se le conoce como segundos Gurley (ver figura 4.44).



Figura 4.44. Permeabilímetro Gurley usado. Se puede ver el sensor con las marcas para iniciar y parar el cronómetro.

De este ensayo se realizan un mínimo de 20 probetas para cada tipo de papel, haciendo 10 ensayos por cada cara del papel, y en caso de que la dispersión de resultados sea elevada o que no se ajuste a las especificaciones del fabricante, se hacen incluso más repeticiones, como ocurrió en este TFG para el papel K135. El error se ha obtenido mediante la incertidumbre del dispositivo, que el fabricante estima en un 5% del valor medido.

#### 4.2.4. Medición del espesor.

El espesor del papel se determina según la norma UNE-EN ISO 534:2012 mediante un micrómetro para cartón JBA (ver figura 4.45). Este instrumento es un micrómetro de peso muerto dotado de dos contactos paralelos de superficie circular que ejercen una presión de  $(100 \pm 10)$  kPa. Los dos contactos deben ser parte integral del micrómetro, de tal manera que un contacto sea fijo y el otro se pueda mover de forma perpendicular al plano del fijo.



Figura 4.45. Micrómetro para cartón JBA. La palanca de la izquierda sirve para levantar el peso muerto.

Como determina la norma, se han realizado 20 ensayos para cada gramaje de papel. Dada la alta reproducibilidad de las medidas, el error de este parámetro se estima que viene dado por la incertidumbre del micrómetro, que es de  $\pm 0,05$  mm.

#### 4.2.5. Medición del gramaje.

Como ya se ha dicho, el gramaje del papel es la masa por unidad de superficie, y se determina según la norma UNE-EN ISO 536:2013. La masa de las probetas se determina con una balanza Denver de 0,001 g de sensibilidad (ver figura 4.46) colocada en un habitáculo sobre una mesa antivibraciones. Una vez obtenida la masa,  $m$ , de la muestra se divide entre el área del papel. Por simplicidad se selecciona el tamaño de las probetas para que el área sea  $1 \text{ dm}^2$ , y entonces el gramaje se calcula como:

$$G \left[ \frac{g}{m^2} \right] = \frac{m [g]}{1 [dm^2]} \cdot 100 \left[ \frac{dm^2}{m^2} \right] = 100 m$$

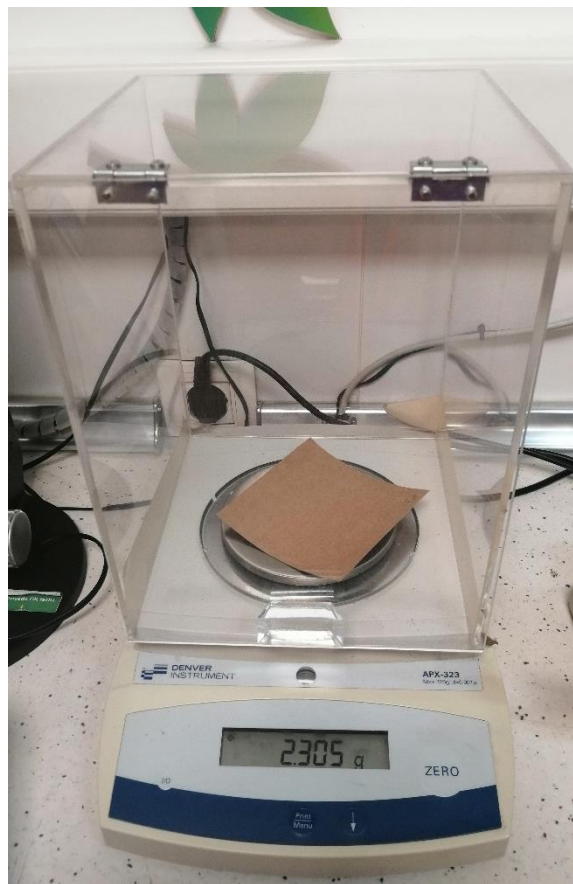


Figura4.46. Balanza Denver con una muestra de K225 en su interior.

El error máximo que se comete al cortar las muestras es de  $\pm 3$  mm por cada lado debido a la inclinación que se puede dar al cúter a la hora de cortar, por lo que consideraremos ese error para todas las muestras que se cortan del mismo tamaño. El error del gramaje se estima por propagación de errores mediante la *Teoría de Medidas*, sacando el error de la masa de las muestras mediante el *Error Cuadrático Medio*.

#### 4.2.6. Condiciones de acondicionamiento de las probetas.

En este trabajo las características del papel y los diferentes ensayos se realizan tras acondicionar los diferentes papeles en ambientes con diferentes humedades. Estas condiciones se resumen en la Tabla 5 para las medidas realizadas con el papel completamente seco tras realizarle el experimento en la



Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.

termobalanza, con el papel acondicionado en las condiciones de laboratorio, y con el papel acondicionado en cámara.

Tabla 5 Condiciones de temperatura y humedad relativa utilizadas para la realización de ensayos de compresión en corto en este trabajo.

| <b>Condiciones</b> | <b>Temperatura</b> | <b>Humedad relativa</b> |
|--------------------|--------------------|-------------------------|
| <i>Seco</i>        | 102 °C             | ≈0%                     |
| <i>Laboratorio</i> | 23 °C              | 50%                     |
| <i>Cámara</i>      | 20 °C              | 90%                     |

En las condiciones de papel seco se miden las propiedades del papel justo al sacarlo de la termobalanza, cuando su peso seco se ha estabilizado. Vamos a considerar que el contenido en humedad del papel en estas condiciones es del 0%, aunque el papel comenzará a absorber humedad en el mismo momento en el que se saque del horno sabemos que al realizar los ensayos mecánicos el contenido en humedad debe ser bastante bajo por lo rápido que se realiza este ensayo.

## Capítulo 5. Resultados y discusión

En este capítulo vamos a presentar los datos obtenidos de los ensayos y los discutiremos con el objetivo de estudiar el comportamiento del papel en función de su contenido en humedad. Para facilitar el entendimiento de las gráficas y poder conocer en todo momento de qué gramaje es el dato, se ha establecido un código de colores para cada uno de los tipos de papel:

- K135: **Morado.**
- K170: **Azul.**
- K200: **Verde.**
- K225: **Rojo.**
- K275: **Amarillo.**

Este código de color se utiliza en las tablas de datos coloreando del mismo color las columnas o filas que sean de un mismo gramaje, y también en las gráficas. Aunque se utilice este código de color, cada tabla y gráfica tendrá también su lista de encabezado o su leyenda donde se identificará el tipo de papel al que corresponden los datos. La intensidad de estos colores puede variar para facilitar la legibilidad del texto o gráfica.

### 5.1 Caracterización del papel

En la Tabla 6 se pueden ver los resultados de gramaje, espesor, porosidad, resistencia a la compresión y humedad en las condiciones de laboratorio obtenidos en el desarrollo de este trabajo para cada uno de los cinco gramajes seleccionados.

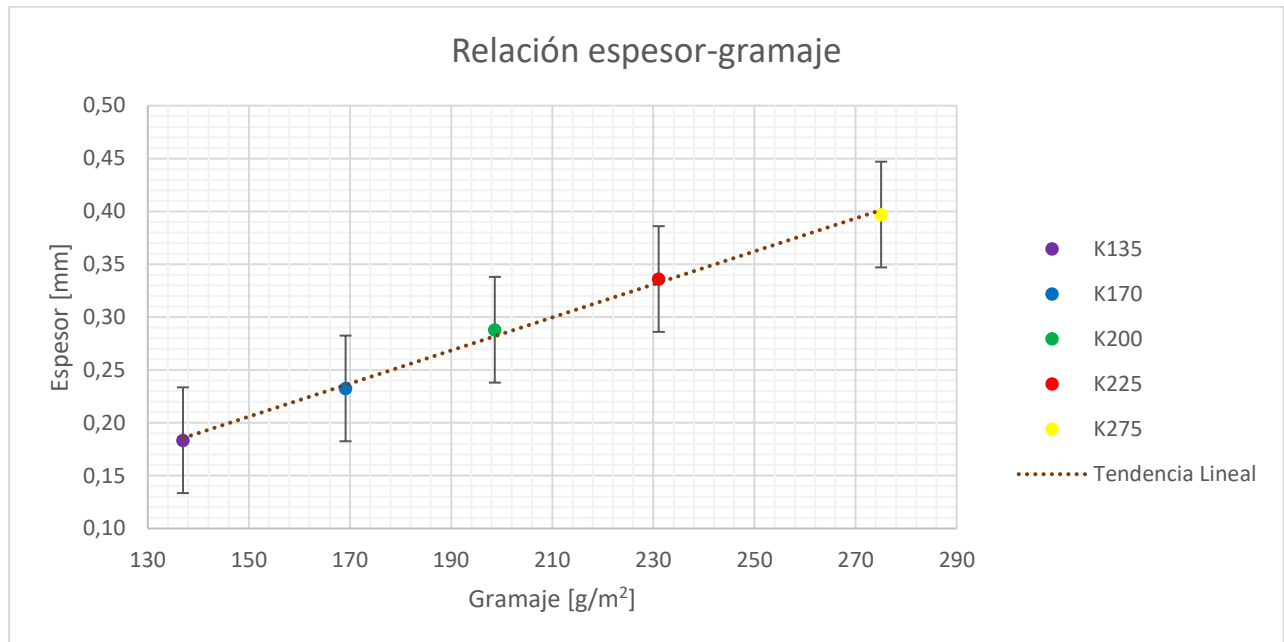
Tabla 6. Características del papel de los cinco gramajes usados en este TFG.

|                                    | <b>K135</b>    | <b>K170</b> | <b>K200</b>      | <b>K225</b>      | <b>K275</b> |
|------------------------------------|----------------|-------------|------------------|------------------|-------------|
| Gramaje [g/m <sup>2</sup> ]        | 137,0±0,1      | 169,1±0,1   | 198,7±0,1        | 231,1±0,2        | 275,1±0,2   |
| Espesor [mm]                       | 0,18 ± 0,5     | 0,23 ± 0,5  | 0,29 ± 0,5       | 0,34 ± 0,5       | 0,40 ± 0,5  |
| Porosidad cara exterior [s Gurley] | <b>157 ± 8</b> | 77 ± 4      | 49,2 ± 2,5       | 36,5 ± 1,8       | 56 ± 3      |
| Porosidad cara interior [s Gurley] | 151 ± 8        | 80 ± 4      | 50,1 ± 2,5       | 37,2 ± 1,9       | 54 ± 3      |
| SCT CD [KN/m]                      | 2,39±0,07      | 2,98±0,09   | <b>3,32±0,10</b> | <b>3,60±0,11</b> | 4,51±0,14   |
| Humedad papel a 50% HR y 23 °C [%] | 9,04±0,08      | 8,54±0,06   | 7,91±0,03        | 7,99±0,02        | 7,70±0,02   |

Si comparamos estos valores con los que da el fabricante, que vimos en la Tabla 2 y 3, vemos que la mayoría de los parámetros se encuentran dentro del rango que especifica el fabricante. Como discrepancias observamos únicamente que para el papel K135 la porosidad se encuentra por encima del valor garantizado. Para asegurarnos de que dicho valor es realmente alto y no se trata de un problema localizado en este papel se realizaron 10 ensayos más por cada cara (40 ensayos en total) para determinar el valor de la porosidad. Una mayor porosidad puede afectar a la absorción de agua, por lo que sería conveniente hacer un estudio más profundo para este gramaje, por ejemplo, haciendo también ensayos de absorción de agua (ensayo COBB) que por limitaciones de tiempo no se han considerado en este TFG. Por la experiencia ganada en el laboratorio sabemos que, aunque la

porosidad obtenida con el ensayo Gurley no se encuentre en el rango de valores garantizado, la absorción de agua sí sale dentro del margen establecido. Como se ha comentado en el capítulo 3, la permeabilidad del papel no debería de depender del gramaje, ya que a partir de 60 g/m<sup>2</sup> la permeabilidad no decrece con este. Estas variaciones tienen que deberse al proceso de fabricación del papel.<sup>[16]</sup>

En cuanto a la resistencia a la compresión también se ven algunos valores SCT justo en el límite, dentro de los errores estimado, del valor mínimo que da el fabricante, como ocurre para el papel K200 y K225. Esto muestra que las bobinas seleccionadas para hacer este estudio vienen con estas propiedades muy justas, normalmente debido a que la fabricación no ha sido del todo correcta.



Gráfica 1. Relación entre espesor y gramaje determinados para las muestras de papel seleccionadas para hacer este TFG.

Si representamos el espesor en función del gramaje vemos un comportamiento lineal. Si por *Mínimos Cuadrados* sacamos la ecuación de la recta obtenemos un coeficiente de linealidad  $R^2 = 0,9971$  y la ecuación:

$$e[mm] = (156 \pm 15) \cdot 10^{-5} \cdot G \left[ \frac{g}{m^2} \right] - (0,03 \pm 0,01)$$

Para que las unidades concuerden, la pendiente se expresa en  $\frac{mm \cdot m^2}{g}$  y la ordenada en el origen en mm.

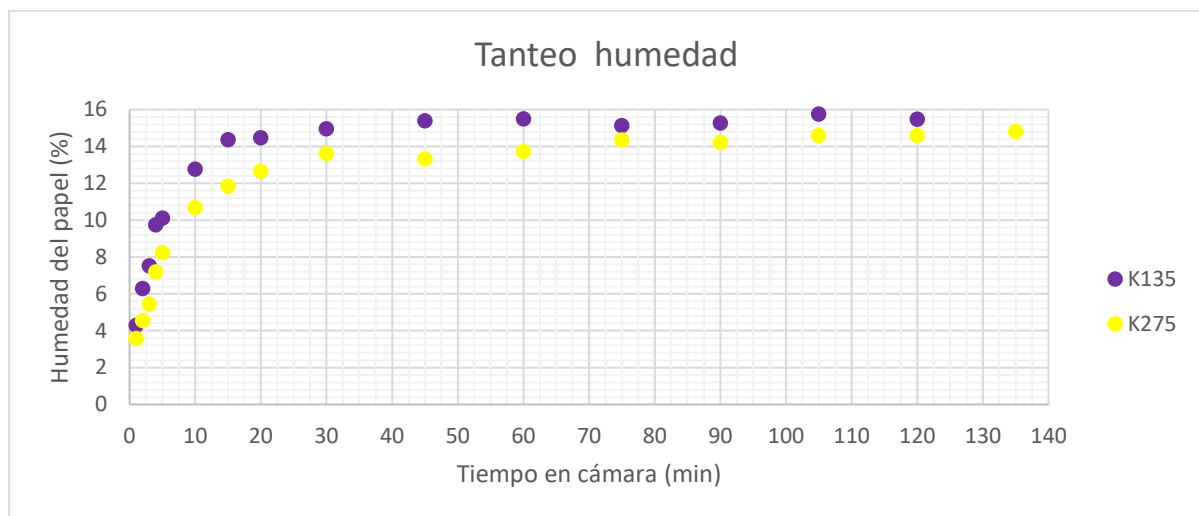
Si pensamos en cómo se produce el papel, colocando capas de fibras con aditivos apiladas entre sí, el espesor del papel dependerá de la cantidad de capas que se pongan. Sabiendo que el espesor de cada capa está entre 5 y 8  $\mu m$ ,<sup>[18]</sup> la pendiente de esta recta nos dice la cantidad de capas que se tienen que colocar para tener un papel de un determinado gramaje, y la ordenada en el origen es un factor de corrección.

## 5.2 Estudio de absorción de agua del Kraftliner

Ya que nuestro objetivo es ver la influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel, tenemos que conocer como absorbe humedad el papel con el tiempo, y determinar el tiempo que

tarda el papel en saturarse de humedad en unas condiciones ambientales dadas. Para ello hemos realizado medidas del porcentaje de humedad que contiene el papel en función del tiempo que las probetas permanecen en la cámara húmeda (20 °C y 90% HR). Primero se hizo un tanteo con algunas muestras seleccionadas y luego se realizaron ya los ensayos definitivos para todos los tipos de papel ensayado.

El tanteo se realiza con el K135 y el K275, los dos gramajes extremos. En la Gráfica 2 se pueden ver los resultados obtenidos en estos experimentos preliminares. Estos resultados muestran que el papel al principio absorbe humedad rápidamente, y entre los 15 y los 30 minutos ya tiene un porcentaje de humedad muy elevado, que luego se mantiene aproximadamente constante con el tiempo. Podemos ver que 120 minutos es un tiempo más que suficiente para que los papeles de menor (K135) y mayor espesor (K275) estén saturados de humedad. Además, el papel de menor espesor es capaz de absorber un porcentaje de humedad más elevado con relación a su peso.



Gráfica 2. Porcentaje de humedad absorbida por el papel K135 y K275 en función del tiempo en las condiciones de la cámara. Tanteo humedad.

Nuestros resultados preliminares coinciden con lo que ya sabíamos de la bibliografía, ya que en la página 12 del libro *Physical Testing of Paper* se indica que en condiciones de 90% HR el papel Kraftliner llega a una masa final estable en 15 minutos, y se satura completamente en 1 hora.<sup>[17]</sup> Los papeles que se han secado y después se han expuesto a unas condiciones de humedad dadas suelen presentar el tipo de gráfica que se mostró en la Figura 3.31, y para saturarlos es suficiente con 60 minutos.<sup>[17]</sup>

Tras los primeros resultados del tanteo seleccionamos un tiempo de máximo para hacer los ensayos de humedad de 120 minutos, ya que consideramos que es un tiempo suficiente para alcanzar la saturación en las condiciones de trabajo que tenemos. También seleccionamos los intervalos temporales a los que vamos a realizar las medidas de humedad. Lo haremos de forma que podamos estudiar el transitorio inicial de absorción de agua, que se produce desde el instante inicial hasta los 15 o 30 minutos, y también que dispongamos de varias medidas cerca de la saturación, para comprobar que se ha alcanzado dicho estado saturado. A la vista de los resultados del tanteo se eligieron los tiempos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 75, 90 105 y 120 minutos para la realización de todas las medidas de absorción de agua de forma sistemática para todos los papeles. El procedimiento para realizar las medidas es el descrito para los ensayos de humedad en el apartado 4.2.1 con la termobalanza.

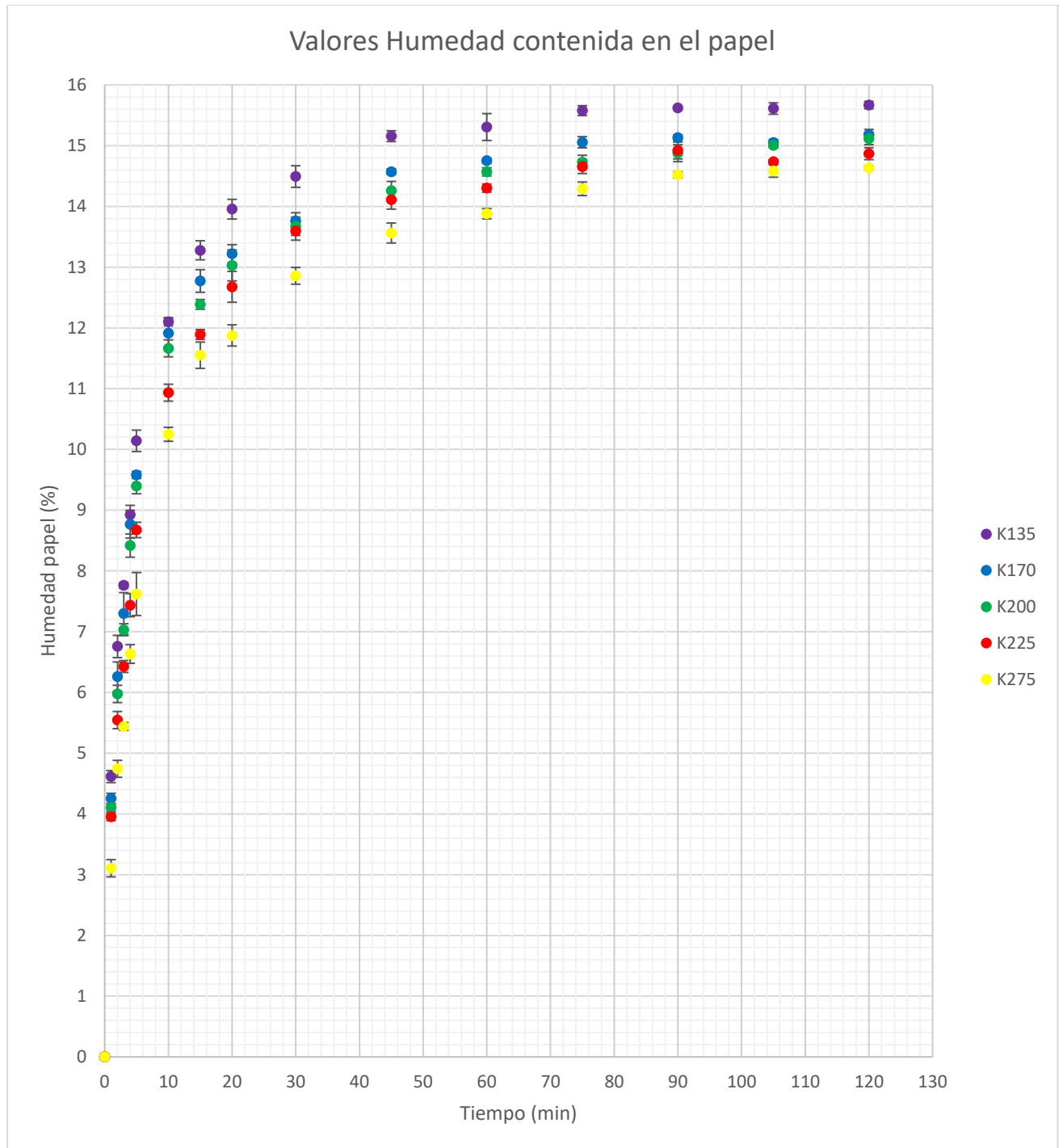
Los resultados con sus correspondientes *Errores Cuadráticos Medios* se indican en la Tabla 7 y se representan en la Gráfica 3 para los cinco tipos de papeles. Se puede ver que los valores de humedad se han determinado con una precisión como poco del orden del 5%, lo que significa que este parámetro

experimental está determinado correctamente. Vamos a realizar un análisis más detallado de estos datos para sacar información en primer lugar sobre el transitorio inicial en el que el papel está muy lejos de la saturación, y en segundo lugar sobre el estado saturado.

En los primeros instantes la absorción de agua estará limitada por la velocidad de difusión de las moléculas de agua en el papel, que depende de las características hidrofóbicas o hidrofílicas de las fibras y otros componentes del papel, y también de la porosidad y el tamaño de poro del papel, así como del estado inicial de la superficie. A tiempos largos la absorción de agua ya ha llegado a saturarse, todo el volumen de papel está lleno de agua y deja de ser tan importante la velocidad de difusión del agua en el material pasando a depender más de la estructura (porosidad y tamaño de poro) y la hidrofobicidad del material. Vamos a estudiar esto en los siguientes subapartados.

Tabla 7. Porcentajes de humedad absorbida respecto de su peso seco para los distintos papeles tras permanecer en la cámara de humedad los tiempos que se indican en la primera columna.

|                | K135       | K170       | K200       | K225       | K275       |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>0 min</b>   | 0,00±0,01  | 0,00±0,01  | 0,00±0,01  | 0,00±0,01  | 0,00±0,01  |
| <b>1 min</b>   | 4,61±0,10  | 4,25±0,08  | 4,10±0,09  | 3,95±0,06  | 3,11±0,14  |
| <b>2 min</b>   | 6,76±0,18  | 6,26±0,24  | 5,97±0,15  | 5,54±0,14  | 4,74±0,14  |
| <b>3 min</b>   | 7,76±0,05  | 7,3±0,45   | 7,03±0,15  | 6,43±0,10  | 5,44±0,07  |
| <b>4 min</b>   | 8,92±0,16  | 8,77±0,23  | 8,42±0,20  | 7,44±0,19  | 6,63±0,15  |
| <b>5 min</b>   | 10,14±0,18 | 9,58±0,05  | 9,40±0,04  | 8,67±0,13  | 7,62±0,35  |
| <b>10 min</b>  | 12,10±0,07 | 11,9±0,36  | 11,7±0,3   | 10,93±0,14 | 10,25±0,11 |
| <b>15 min</b>  | 13,28±0,16 | 12,77±0,19 | 12,39±0,10 | 11,89±0,08 | 11,55±0,22 |
| <b>20 min</b>  | 13,95±0,16 | 13,22±0,15 | 13,03±0,17 | 12,68±0,25 | 11,88±0,17 |
| <b>30 min</b>  | 14,49±0,18 | 13,76±0,13 | 13,67±0,08 | 13,59±0,15 | 12,86±0,14 |
| <b>45 min</b>  | 15,16±0,09 | 14,57±0,05 | 14,26±0,10 | 14,11±0,16 | 13,56±0,16 |
| <b>60 min</b>  | 15,31±0,22 | 14,75±0,04 | 14,57±0,07 | 14,30±0,07 | 13,88±0,08 |
| <b>75 min</b>  | 15,58±0,08 | 15,06±0,09 | 14,73±0,03 | 14,66±0,11 | 14,29±0,11 |
| <b>90 min</b>  | 15,62±0,03 | 15,13±0,05 | 14,88±0,10 | 14,92±0,14 | 14,52±0,05 |
| <b>105 min</b> | 15,61±0,09 | 15,05±0,05 | 15,00±0,05 | 14,73±0,04 | 14,58±0,10 |
| <b>120 min</b> | 15,67±0,06 | 15,18±0,09 | 15,12±0,12 | 14,87±0,10 | 14,63±0,04 |



Gráfica 3. Variación de la humedad absorbida por el papel en función del tiempo que permanece en la cámara a 90 %RH y 20 °C

### 5.2.1 Absorción de agua a tiempos cortos.

Para estudiar el transitorio inicial de la absorción de agua en los papeles vamos a calcular un *coeficiente de absorción de agua* para cada uno de los gramajes estudiados. Dado que no tenemos una norma para papel y cartón que calcule este coeficiente, nos vamos a apoyar en la normativa UNE-EN 1925:1999 *Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad* desarrollada para piedra natural. Esta aproximación será válida si el papel absorbe el agua por capilaridad a través de sus poros. Como hemos dicho en el Capítulo 3, al ser el papel un material formado por polímeros la absorción de agua también se va a producir entre las cadenas de celulosa de la fibra, pero también

sabemos que es un material poroso y la parte debida a capilaridad puede ser importante. Vamos a ver que nos dicen los resultados.

En esta norma se nos dice que la masa de agua por unidad de superficie que absorbe un material ( $y_i$ ) en función del tiempo ( $t_i$ ) es:

$$y_i = a \cdot (1 - e^{-b \cdot \sqrt{t_i}})$$

donde a y b son constantes. Esta función se puede aproximar a:

$$y_i = a \cdot b \cdot \sqrt{t_i}$$

siendo  $a \cdot b$  el coeficiente de absorción de agua en  $\frac{g}{m^2 \cdot s^{0.5}}$ , que llamaremos  $C_g$ , por lo que nos queda que:

$$y_i = C_g \sqrt{t_i}$$

La relación de masa de agua absorbida por unidad de superficie es:

$$y_i = \frac{m_h - m_s}{A}$$

siendo:

- $m_h$ : La masa en gramos de la probeta húmeda, en nuestro caso es la masa del papel justo al sacarlo de la cámara.
- $m_s$ : La masa en gramos de la probeta seca, que es la masa del papel tras retirar mediante la termobalanza toda el agua que contiene.
- $A$ : Es el área que está en contacto con la humedad, que en este caso sería la superficie total del papel, es decir dos veces el área de la probeta.

Para poder sacar el coeficiente de absorción primero tenemos que obtener  $y_i$ . Debido al funcionamiento automatizado de la termobalanza, no tenemos directamente las masas de los papeles húmedos y secos, pero se pueden obtener de la ecuación que usa la termobalanza para calcular el porcentaje en peso de agua absorbida con los datos que hemos ido midiendo en la serie de ensayos realizados con cada muestra. Necesitamos hacerlo en varios pasos.

1. Como el gramaje del papel se obtiene incluyendo la masa de agua que tiene este en condiciones de laboratorio, podemos obtener la masa húmeda que tiene el papel en dichas condiciones, multiplicando el gramaje por el área del papel.

$$m_{h,l} = G \cdot A$$

Tabla 8. Valores en gramos de la masa húmeda,  $m_{h,l}$ , de los papeles de distintos gramajes en las condiciones de laboratorio.

|           | K135      | K170      | K200      | K225      | K275      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $m_h$ (g) | 0,49±0,06 | 0,61±0,07 | 0,72±0,08 | 0,83±0,09 | 0,99±0,11 |

2. Como antes de meter cada muestra en la cámara se midió el porcentaje de humedad que tenían en las condiciones de laboratorio,  $w_l$ , una vez tenemos la masa húmeda del papel en las condiciones del laboratorio podemos obtener la masa seca del papel,  $m_s$ .

$$m_s = \left(1 - \frac{w_l}{100}\right) \cdot m_{h,l}$$

Tabla 9. Valores en gramos de la masa seca,  $m_s$ , de los distintos papeles.

|           | K135      | K170      | K200      | K225      | K275      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $m_s$ (g) | 0,45±0,05 | 0,56±0,06 | 0,66±0,07 | 0,77±0,09 | 0,91±0,10 |

3. Con la masa seca del papel y los porcentajes de humedad dados por la termobalanza podemos obtener la masa húmeda con la que los papeles han salido de la cámara para cada punto medido en la Gráfica 3.

$$m_h = \frac{m_s}{1 - \frac{w}{100}}$$

Los resultados se encuentran en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores en gramos de la masa húmeda,  $m_h$ , tras permanecer los distintos tipos de papel Kraftliner en las condiciones de cámara durante los tiempos indicados en la primera columna.

| Tiempo (min) | K135      | K170      | K200      | K225      | K275      |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0            | 0,45±0,05 | 0,56±0,06 | 0,66±0,07 | 0,77±0,09 | 0,91±0,10 |
| 1            | 0,47±0,05 | 0,58±0,07 | 0,69±0,08 | 0,80±0,09 | 0,94±0,11 |
| 2            | 0,48±0,06 | 0,59±0,07 | 0,70±0,08 | 0,81±0,09 | 0,96±0,11 |
| 3            | 0,49±0,06 | 0,60±0,07 | 0,71±0,08 | 0,82±0,09 | 0,98±0,11 |
| 4            | 0,49±0,06 | 0,61±0,07 | 0,72±0,08 | 0,83±0,09 | 0,98±0,11 |
| 5            | 0,50±0,06 | 0,62±0,07 | 0,73±0,08 | 0,84±0,10 | 0,99±0,11 |
| 10           | 0,51±0,06 | 0,63±0,07 | 0,75±0,09 | 0,86±0,10 | 1,02±0,12 |
| 15           | 0,52±0,06 | 0,64±0,07 | 0,75±0,09 | 0,87±0,10 | 1,03±0,12 |
| 20           | 0,52±0,06 | 0,64±0,07 | 0,76±0,09 | 0,88±0,10 | 1,04±0,12 |
| 30           | 0,52±0,06 | 0,65±0,07 | 0,76±0,09 | 0,89±0,10 | 1,05±0,12 |
| 45           | 0,53±0,06 | 0,65±0,07 | 0,77±0,09 | 0,89±0,10 | 1,06±0,12 |
| 60           | 0,53±0,06 | 0,65±0,07 | 0,77±0,09 | 0,89±0,10 | 1,06±0,12 |
| 75           | 0,53±0,06 | 0,66±0,07 | 0,77±0,09 | 0,90±0,10 | 1,07±0,12 |
| 90           | 0,53±0,06 | 0,66±0,07 | 0,77±0,09 | 0,90±0,10 | 1,07±0,12 |
| 105          | 0,53±0,06 | 0,66±0,07 | 0,77±0,09 | 0,90±0,10 | 1,07±0,12 |
| 120          | 0,53±0,06 | 0,66±0,07 | 0,77±0,09 | 0,90±0,10 | 1,07±0,12 |

4. Finalmente, multiplicando la masa húmeda por el porcentaje de humedad del papel, obtenemos la masa de agua que ha absorbido cada papel en función del tiempo que permanece en la cámara:

$$m_h - m_s = \frac{w}{100} \cdot m_h$$

Los datos se encuentran en la Tabla 11. Podemos ver que en términos absolutos la cantidad de agua que absorben los papeles es mayor cuanto más gramaje tienen, aunque como vimos el porcentaje relativo a su peso (la humedad determinada con la termobalanza) es menor cuanto más pesa el papel.



Tabla 11. Masa en miligramos de agua absorbida en los papeles para tiempos crecientes en las condiciones de cámara.

| Tiempo (min) | K135  | K170   | K200   | K225   | K275   |
|--------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 0            | 0±0   | 0±0    | 0±0    | 0±0    | 0±0    |
| 1            | 22±3  | 25±3   | 28±4   | 32±4   | 29±5   |
| 2            | 33±5  | 37±6   | 42±5   | 45±6   | 46±7   |
| 3            | 38±5  | 44±7   | 50±7   | 53±7   | 53±7   |
| 4            | 44±6  | 54±8   | 61±8   | 61±9   | 65±9   |
| 5            | 51±7  | 59±7   | 68±8   | 73±9   | 75±9   |
| 10           | 62±7  | 75±10  | 87±12  | 94±12  | 104±13 |
| 15           | 69±9  | 82±11  | 93±11  | 103±12 | 119±16 |
| 20           | 73±9  | 85±11  | 99±13  | 111±15 | 123±16 |
| 30           | 76±10 | 89±11  | 104±12 | 120±15 | 135±17 |
| 45           | 80±10 | 95±11  | 110±13 | 126±16 | 143±18 |
| 60           | 81±11 | 96±11  | 112±13 | 128±15 | 147±18 |
| 75           | 83±10 | 99±12  | 114±13 | 131±16 | 152±18 |
| 90           | 83±10 | 99±12  | 115±13 | 134±17 | 155±18 |
| 105          | 83±10 | 99±11  | 116±14 | 132±15 | 156±19 |
| 120          | 83±10 | 100±12 | 117±14 | 134±16 | 157±18 |

Una vez tenemos la masa de agua en el papel, necesitamos el área de la probeta expuesta a las condiciones de humedad, que sería las dos caras principales del papel y el área de los bordes de la muestra cuadrada. A esta área la llamaremos área total:

$$A_t = 2 \cdot A_{cara} + 4 \cdot A_{borde} = 2 \cdot l^2 + 4 \cdot e \cdot l$$

siendo  $e$  el espesor del papel.

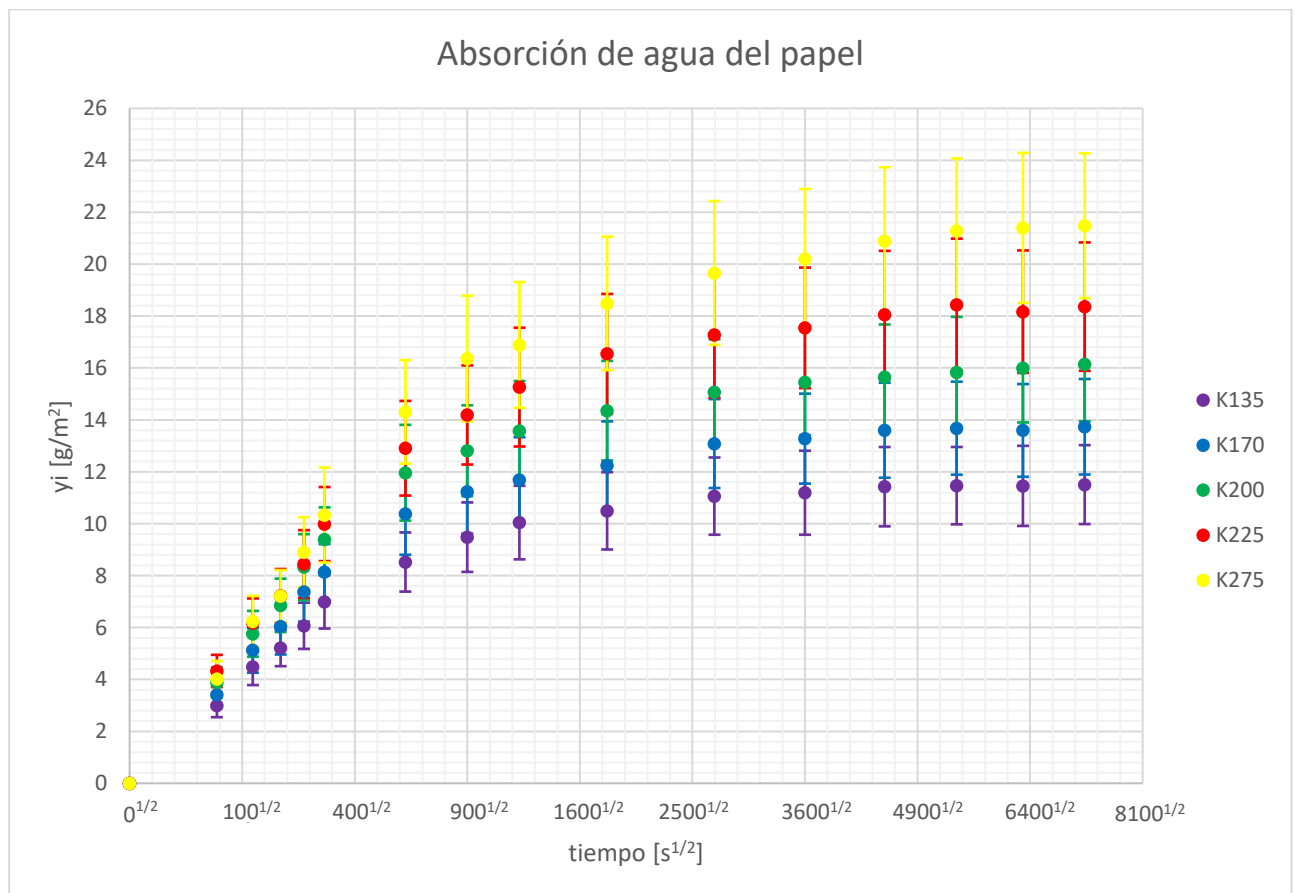
Como las probetas son cuadradas de 6 cm de lado, sustituimos en la ecuación y nos queda:

$$A_t = 7,2 \cdot 10^{-3} + 0,24 \cdot e$$

Con esto ya podemos calcular la cantidad de agua absorbida por unidad de superficie,  $y_i$ , que necesitamos para sacar el coeficiente de absorción de agua (Tabla 12). Para calcular el coeficiente de absorción de agua por capilaridad,  $C_g$ , solo nos queda representar esta cantidad en función de la raíz cuadrada del tiempo en segundos (Gráfica 4), y ver si el comportamiento es lineal para que se cumpla la aproximación que plantea la norma de referencia:  $y_i = C_g \cdot \sqrt{t}$ .

**Tabla 12.** Masa de agua absorbida por unidad de superficie expuesta a las condiciones de cámara,  $y_i$ , en  $\text{g/m}^2$  para los tiempos ensayados

| Tiempo (min) | K135     | K170     | K200     | K225     | K275     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0            | 0,0±0,0  | 0,0±0,0  | 0,0±0,0  | 0,0±0,0  | 0,0±0,0  |
| 1            | 3,0±0,5  | 3,4±0,5  | 3,9±0,6  | 4,3±0,6  | 4,0±0,7  |
| 2            | 4,5±0,7  | 5,1±0,9  | 5,8±0,9  | 6,2±1,0  | 6,2±1,0  |
| 3            | 5,2±0,7  | 6,0±1,1  | 6,9±1,0  | 7,2±1,0  | 7,2±1,0  |
| 4            | 6,1±0,9  | 7,4±1,1  | 8,3±1,3  | 8,4±1,3  | 8,9±1,4  |
| 5            | 7,0±1,0  | 8,1±1,1  | 9,4±1,2  | 10,0±1,4 | 10,3±1,8 |
| 10           | 8,5±1,1  | 10,4±1,6 | 12,0±1,8 | 12,9±1,8 | 14,3±2,0 |
| 15           | 9,5±1,3  | 11,2±1,6 | 12,8±1,7 | 14,2±1,9 | 16,4±2,4 |
| 20           | 10,0±1,4 | 11,7±1,6 | 13,6±1,9 | 15,3±2,3 | 16,9±2,4 |
| 30           | 10,5±1,5 | 12,2±1,7 | 14,4±1,9 | 16,5±2,3 | 18,5±2,6 |
| 45           | 11,1±1,5 | 13,1±1,7 | 15,1±2,0 | 17,3±2,4 | 19,7±2,8 |
| 60           | 11,2±1,6 | 13,3±1,7 | 15,5±2,1 | 17,5±2,3 | 20,2±2,7 |
| 75           | 11,4±1,5 | 13,6±1,8 | 15,7±2,0 | 18,1±2,5 | 20,9±2,7 |
| 90           | 11,5±1,5 | 13,7±1,8 | 15,8±2,1 | 18,4±2,5 | 21,3±2,8 |
| 105          | 11,5±1,5 | 13,6±1,8 | 16,0±2,1 | 18,2±2,4 | 21,4±2,9 |
| 120          | 11,5±1,5 | 13,7±1,8 | 16,1±2,2 | 18,4±2,5 | 21,5±2,8 |

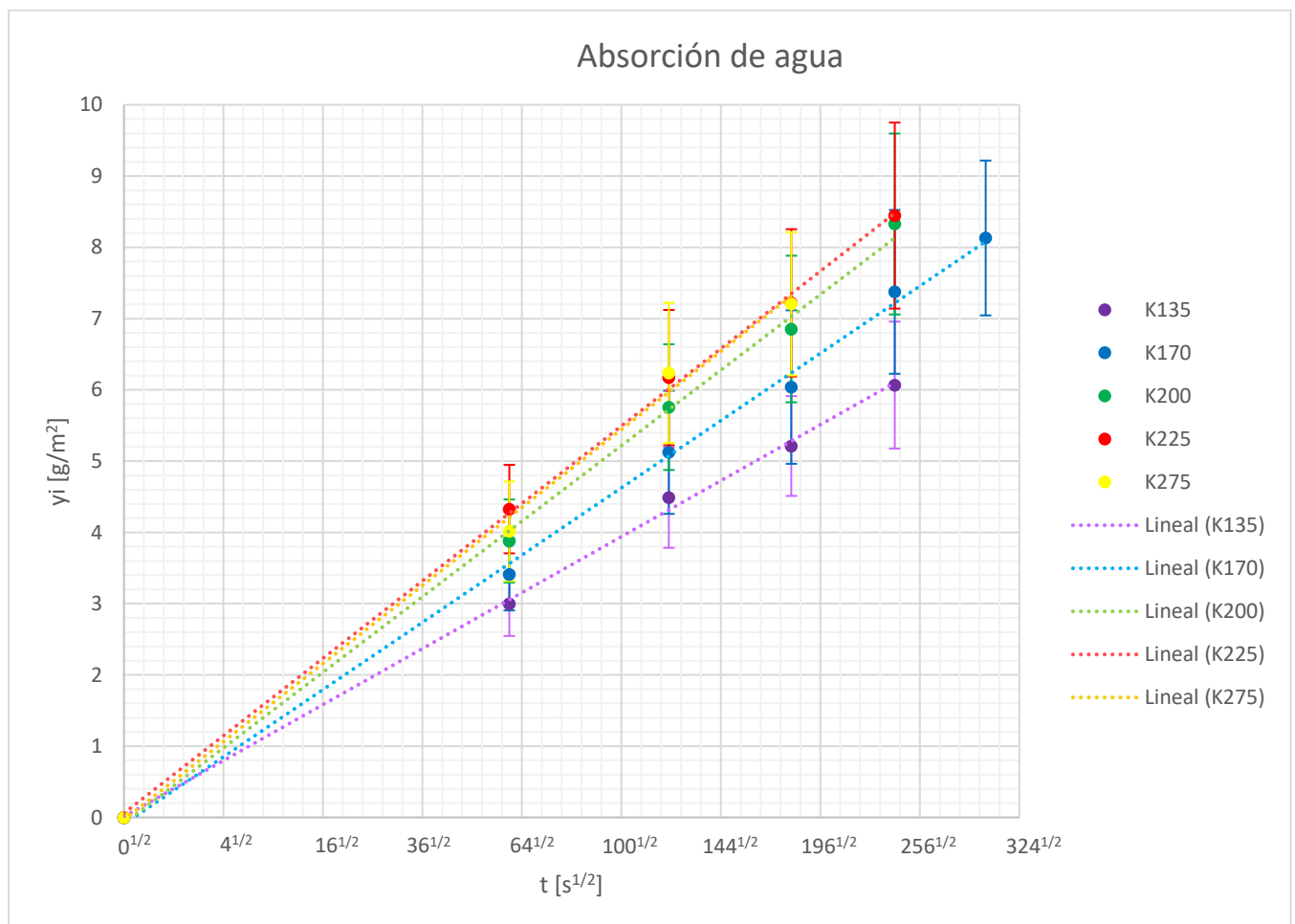


Como podemos ver en la Gráfica 5, el comportamiento en la primera parte de la curva es lineal, aunque a partir entre los datos a 5 y a 10 minutos se produce un descenso de la pendiente inicial. Los valores usados para hacer el ajuste lineal se han seleccionado desde  $t = 0$  s hasta el tiempo en el que el coeficiente de regresión lineal empezaba a empeorar. En la Tabla 12 se resaltan en negrita los valores usados para el ajuste, y en la Gráfica 5 se representa una ampliación de la zona lineal.

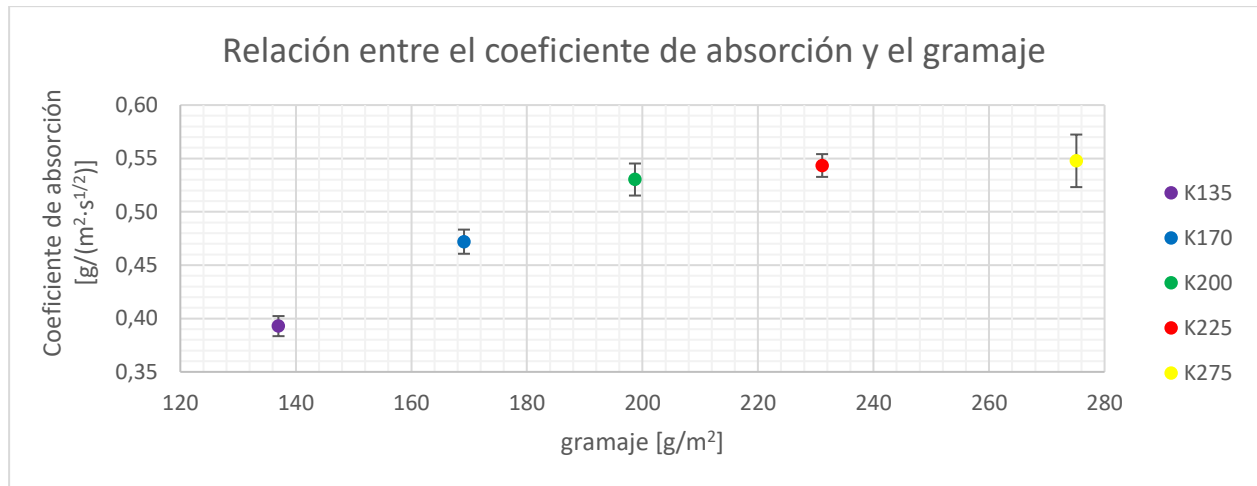
El ajuste lineal por *Mínimos Cuadrados* nos proporciona la pendiente y el error de la pendiente de esta dependencia lineal, con lo que ya tenemos el valor del coeficiente de absorción de agua por capilaridad,  $C_g$ , para los distintos papeles. Los valores obtenidos se pueden ver en la Tabla 13.

Tabla 13. Coeficiente de absorción de agua,  $C_g$ , obtenido de la parte inicial de la curva de variación de la masa de agua absorbida por unidad de área frente a la raíz cuadrada del tiempo en segundos.

|  | K135        | K170        | K200        | K225        | K275        |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $C_g \left[ \frac{g}{m^2 \cdot s^{0.5}} \right]$ | 0,393±0,009 | 0,472±0,011 | 0,530±0,015 | 0,543±0,011 | 0,548±0,025 |



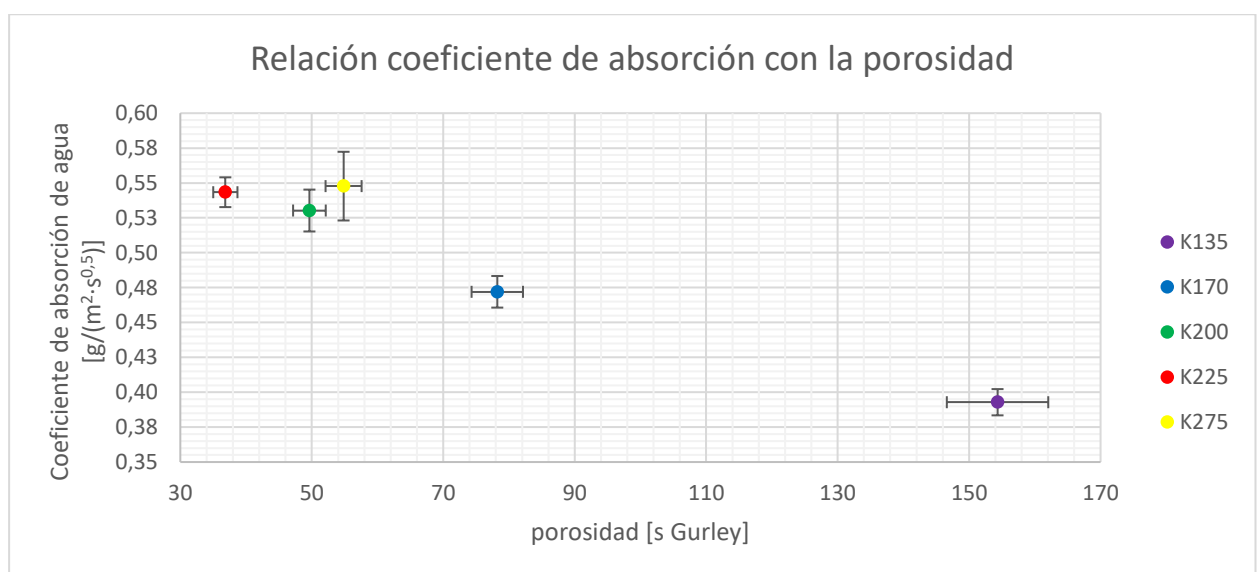
Gráfica 5. Representación de la zona lineal de los datos de absorción de agua de acuerdo con la norma UNE-EN 1925



Gráfica 6. Relación entre el coeficiente de absorción de agua en el transitorio inicial y el gramaje.

Como ya se dijo, este coeficiente da idea de cómo de rápido se absorbe el agua en los papeles. Hemos obtenido que el coeficiente de absorción de agua es mayor cuanto mayor es el gramaje del papel hasta el K200, y a partir de ese gramaje permanece prácticamente constante en  $0,55 \frac{g}{m^2 \cdot s^{0.5}}$ .

También es interesante comparar los datos de velocidad inicial de absorción de agua con los de porosidad que tenemos medidos por el método Gurley (Tabla 4). Los resultados se pueden ver en la Gráfica 7, y vemos que en general la tendencia es que el coeficiente de absorción decrece conforme la porosidad es más baja (notar que la porosidad se da en segundos Gurley, y a mayor tiempo Gurley menor es la porosidad) para los papeles desde el K200 hasta el K225, que son los papeles en los que obtuvimos un coeficiente de absorción más elevado (de aproximadamente  $0,55 \frac{g}{m^2 \cdot s^{0.5}}$ ) son los que tienen mayor permeabilidad, situándose los tres por debajo de 60 s Gurley. Entre los tres, el K275 es el que se sale de la tendencia general, obteniéndose una porosidad más baja que la que le correspondería según el coeficiente de absorción que hemos obtenido. Si nos fijamos en los resultados de porosidad de la Tabla 4 vemos que mientras la porosidad aumenta progresivamente, pero para el papel de mayor gramaje la porosidad es menor de lo esperado según esta tendencia, y ahora hemos obtenido un coeficiente de absorción de agua en los momentos iniciales algo más alto de lo esperado.



Gráfica 7. Relación entre el coeficiente de absorción de agua en el transitorio inicial y la porosidad o permeabilidad de los papeles determinada con el método Gurley.

Estos resultados nos hacen pensar que este papel tan grueso puede tener un tamaño y estructura de poros diferente, e incluso una composición algo diferente, al resto de papeles Kraftliner estudiados. Como previamente se ha comentado en el apartado 5.1, con un estudio más profundo de la absorción de agua del papel, con ensayos como el COBB, podrían aportar más información sobre cómo se produce la absorción de agua en el papel dependiendo de las características que se controlan en la fabricación del papel. Como se comentó en el capítulo 3, el papel es un derivado de un producto natural como la madera y por ello tiene una estructura y composición química compleja, y las pequeñas variaciones en ésta influyen en su capacidad de absorción de agua. <sup>[16]</sup>

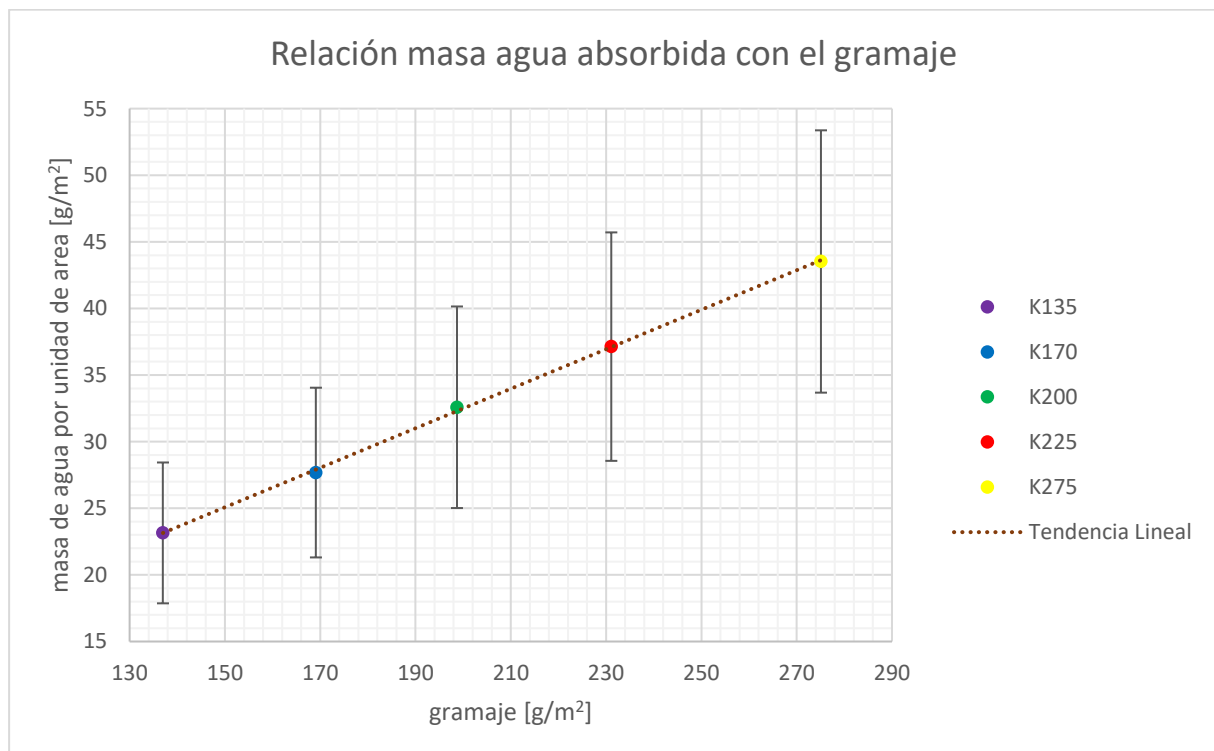
### 5.2.2 Absorción de agua a saturación.

Vamos a ocuparnos ahora de estudiar la absorción de agua en condiciones de saturación para los distintos papeles estudiados. Como ya se ha visto, tras 120 minutos en la cámara los papeles se encuentran saturados de agua para esas condiciones ambientales.

Vamos a ver qué papel coge más agua en términos absolutos y cual coge más agua en relación con la masa seca que tiene. Para lo primero vamos a calcular la diferencia entre la masa seca y la masa húmeda por unidad de área para un tiempo en cámara de 120 minutos, que corresponderá con la masa de agua absorbida a saturación por unidad de área para cada tipo de papel. En la Tabla 14 se pueden ver los resultados, y en la Gráfica 8 se representan estos resultados en función del gramaje.

Tabla 14. Masa de agua absorbida por las probetas de los distintos tipos de papeles en saturación.

|                                      | K135 | K170 | K200 | K225 | K275  |
|--------------------------------------|------|------|------|------|-------|
| [g H <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> ] | 23±5 | 28±6 | 33±8 | 37±9 | 44±10 |



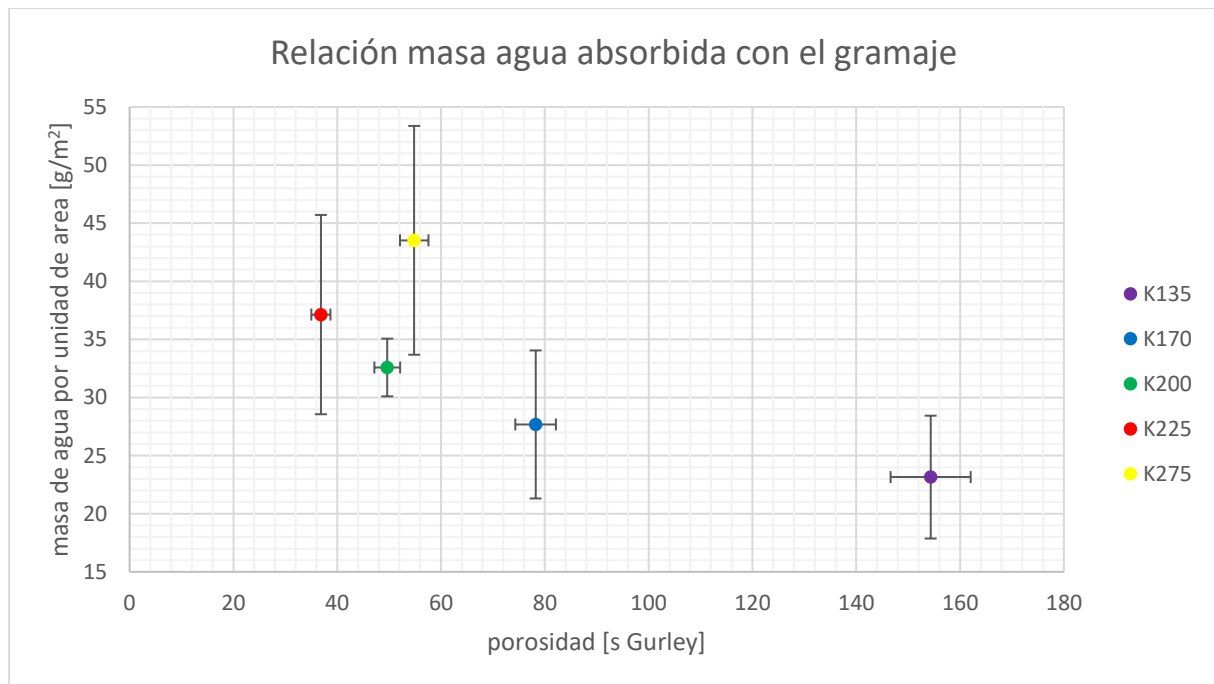
Gráfica 8. Masa de agua por unidad de área absorbida por las probetas de los distintos tipos de papeles en función de su gramaje.

Si aplicamos *Mínimos Cuadrados* a esta relación, nos queda la siguiente ecuación de la recta:

$$m_{\text{agua sat}} \left[ \frac{g}{m^2} \right] = (148,3 \pm 2,0) \cdot 10^{-3} \cdot G \left[ \frac{g}{m^2} \right] + (2,8 \pm 0,4)$$

Por otro lado, podemos ver el tipo de papel que es capaz de absorber más agua a saturación en relación con su masa seca, en lugar de hacerlo respecto a la masa húmeda según los datos que nos da la termobalanza. Para ello dividimos la cantidad de agua absorbida entre la masa seca, y obtenemos el mismo valor, dentro de la incertidumbre estimada, para todos los papeles, que es del  $(18 \pm 4) \%$ .

Si representamos la masa de agua saturada por unidad de área frente a la porosidad, como se puede ver en la gráfica 9, podemos ver que nos sale un comportamiento muy parecido al del coeficiente de absorción de agua, es decir, que la cantidad de agua que absorbe el papel por unidad de superficie aumenta con la porosidad (menor tiempo Gurley) con la excepción del papel de mayor gramaje, que tiene una porosidad más alta que el K225 y el K200, pero absorbe mayor cantidad de agua. Esto demuestra que la porosidad sigue influyendo en la cantidad de agua que retiene el papel por unidad de área, pero que no es el único factor que regula la absorción de agua del papel. Como se dijo en el Capítulo 3, el agua que retiene el papel en unas condiciones dadas depende de la combinación de la porosidad y la cantidad y tipo de fibras que tiene el papel.



Gráfica 9. Masa de agua por unidad de área absorbida por las probetas de los distintos tipos de papeles en función de su porosidad.

### **5.3. Estudio de la resistencia a la compresión.**

Una vez tenemos estudiada la absorción de agua, vamos a ver los resultados de los ensayos de compresión en corto (SCT), que es la propiedad mecánica más importante que se estudia en los papeles Kraftliner. Estas medidas se realizan en este trabajo para tres estados de humedad. Por tanto, una vez veamos estos resultados podemos determinar la influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel.

#### **5.3.1 Características mecánica del papel seco**

En primer lugar, vamos a comparar los resultados del ensayo mecánico realizado con el papel seco. Estos ensayos mecánicos se realizaron tras sacar las muestras de papel de la termobalanza, sin darle

tiempo a que absorban humedad en las condiciones de laboratorio, ya que los ensayos en el compresómetro son muy rápidos. Recordemos también que los ensayos se realizan en la dirección de máquina (MD) y en la dirección transversal (CD). En la Tabla 15 tenemos los valores de SCT en kN/m que nos facilita el equipo de medida para los papeles secos.

Tabla 15. Valores de resistencia a la compresión en corto (SCT) en kN/m obtenido para los papeles de diferentes gramajes sin humedad absorbida.

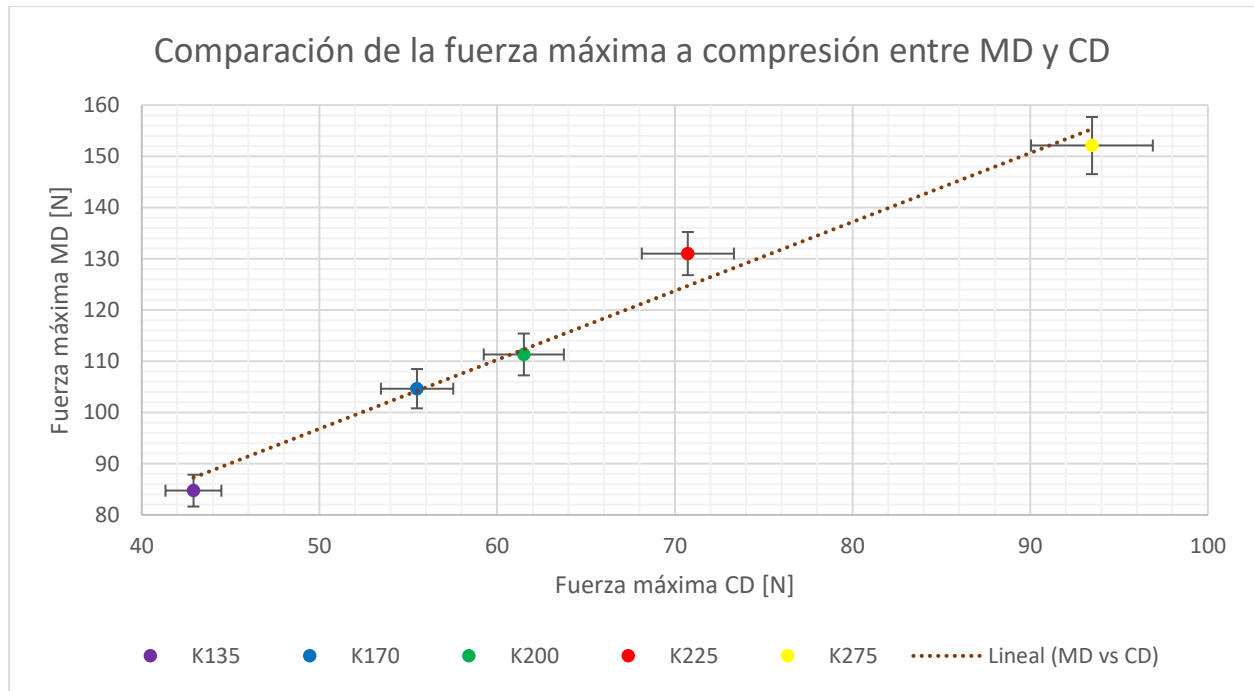
| Humedad Papel | Dirección del ensayo | K135      | K170      | K200      | K225      | K275     |
|---------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 0%            | Máquina (MD)         | 5,7±0,3   | 7,0±0,4   | 7,4±0,4   | 8,7±0,4   | 10,5±0,5 |
|               | Trasversal (CD)      | 2,86±0,14 | 3,70±0,18 | 4,10±0,21 | 4,72±0,24 | 6,2±0,3  |

A partir de los valores de SCT podemos obtener el valor de fuerza máxima que ha resistido el papel como se describió en el apartado 4.2.2. Ya que todas las tiras son de la misma anchura (15 mm) este factor no afectará a las conclusiones que podamos extraer de estos resultados. Puede resultar más interesante calcular la tensión a compresión dividiendo el SCT por el espesor del papel, lo que tiene unidades de resistencia.

En la Tabla 16 tenemos los valores de la fuerza máxima que resisten los diferentes papeles y de su resistencia a la compresión,  $\sigma_c$ , teniendo en cuenta el espesor del mismo. Aunque este parámetro puede variar ligeramente con la humedad, vamos a considerar para los tres estados de humedad estudiados que los espesores son los medidos en las condiciones de laboratorio, con un contenido de humedad intermedio (ver Tabla 6).

Tabla 16. Valores de fuerza máxima en N y tensión máxima en MPa con su estimación de errores para los cinco papeles de diferentes gramajes sin humedad absorbida.

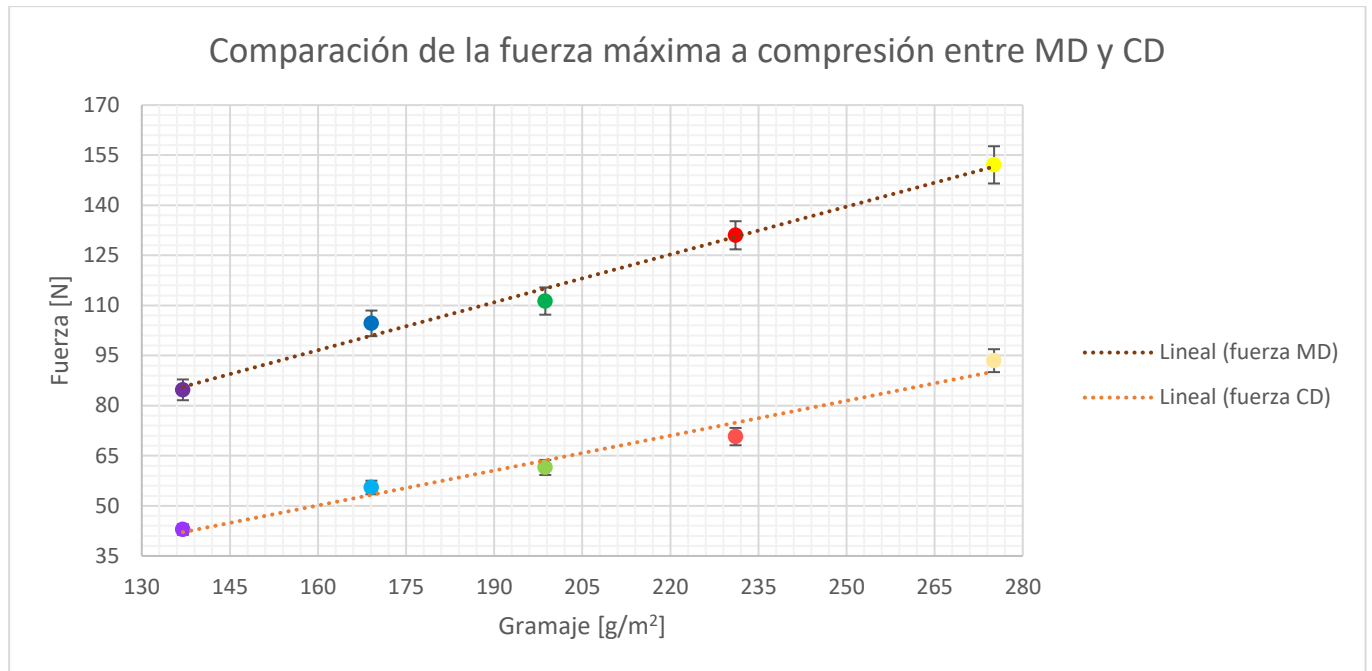
|                  | Dirección  | K135     | K170     | K200     | K225  | K275  |
|------------------|------------|----------|----------|----------|-------|-------|
| F (N)            | Máquina    | 85±3     | 105±4    | 111±4    | 131±4 | 152±6 |
|                  | Trasversal | 42,9±1,6 | 55,5±2,0 | 61,5±2,3 | 71±3  | 94±3  |
| $\sigma_c$ (MPa) | Máquina    | 31±10    | 30±8     | 26±6     | 26±5  | 26±4  |
|                  | Trasversal | 16±5     | 16±4     | 14±3     | 14±3  | 16±3  |



Gráfica 10. Comparación de la fuerza máxima a compresión de los papeles secos entre ambas direcciones de ensayo.

Como podemos ver en la gráfica 10, existe una relación entre la fuerza máxima en MD con la fuerza máxima en CD. La bibliografía nos dice que la fuerza máxima en dirección de máquina es 1,5 veces mayor que la dirección transversal.<sup>[17]</sup> Esto se debe a que en dirección de máquina actúa principalmente la resistencia de las fibras y los enlaces entre ellas, pero en dirección transversal a la máquina, solo actúa los enlaces entre fibras. El papel es un material compuesto formado por fibras cortas principalmente alineadas en la dirección de máquina y unidas por una matriz, por tanto, es anisótropo presentando un mayor refuerzo en la dirección de alineación de las fibras.<sup>[23]</sup> En nuestro caso, si obtenemos la pendiente de la recta nos sale que es  $1,35 \pm 0,12$ . Esto quiere decir que la dirección de máquina es 1,35 veces más resistente a compresión que la dirección transversal. Esto es un indicativo de que las fibras están bien orientadas en este conjunto de papeles, y sirve para comprobar que a la hora de obtener las muestras no hemos confundido en ningún momento la dirección de máquina con la transversal, y que cuando se han fabricado el tamiz de alambre ha cumplido su función de orientar las fibras correctamente. La orientación de las fibras es muy importante para la fabricación del cartón. Si las fibras no están bien orientadas, a la hora de fabricar las planchas de cartón se produce un fenómeno llamado *twist*, que provoca que la plancha se retuerza como si se le estuviese aplicando una torsión. Con lo cual, las cajas resisten menos debido a los esfuerzos internos que soporta por dicha torsión.



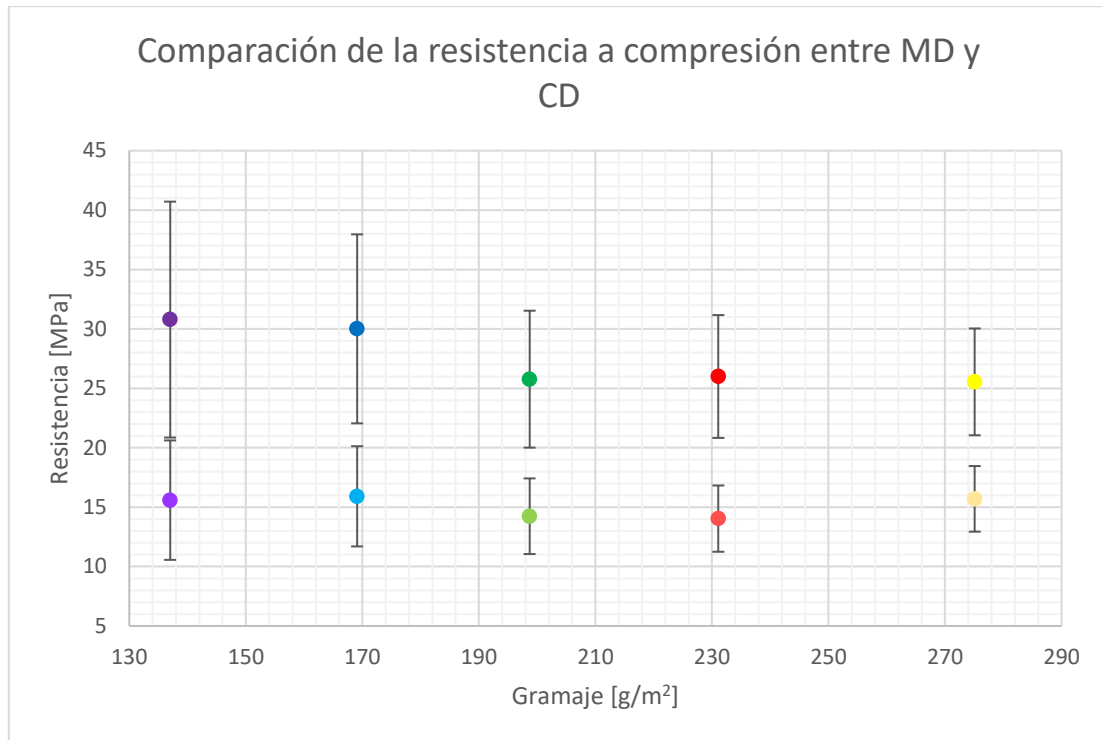


Gráfica 11. Comparación de dependencia de la fuerza máxima a compresión de los papeles secos con el gramaje para ambas direcciones de ensayo. Los colores oscuros corresponden a los puntos en dirección de máquina y los colores claros a dirección transversal.

En la gráfica 11 podemos observar que existe una relación lineal entre el gramaje y la fuerza máxima que soporta el papel. Y dado que existe también una relación lineal entre el espesor y el gramaje (Gráfica 1), la fuerza a compresión que soportan los papeles también es lineal con su espesor para este rango de gramajes que estamos estudiando. Si obtenemos las ecuaciones de la recta para ambas direcciones de ensayo mediante el método de *Mínimos Cuadrados*, nos queda

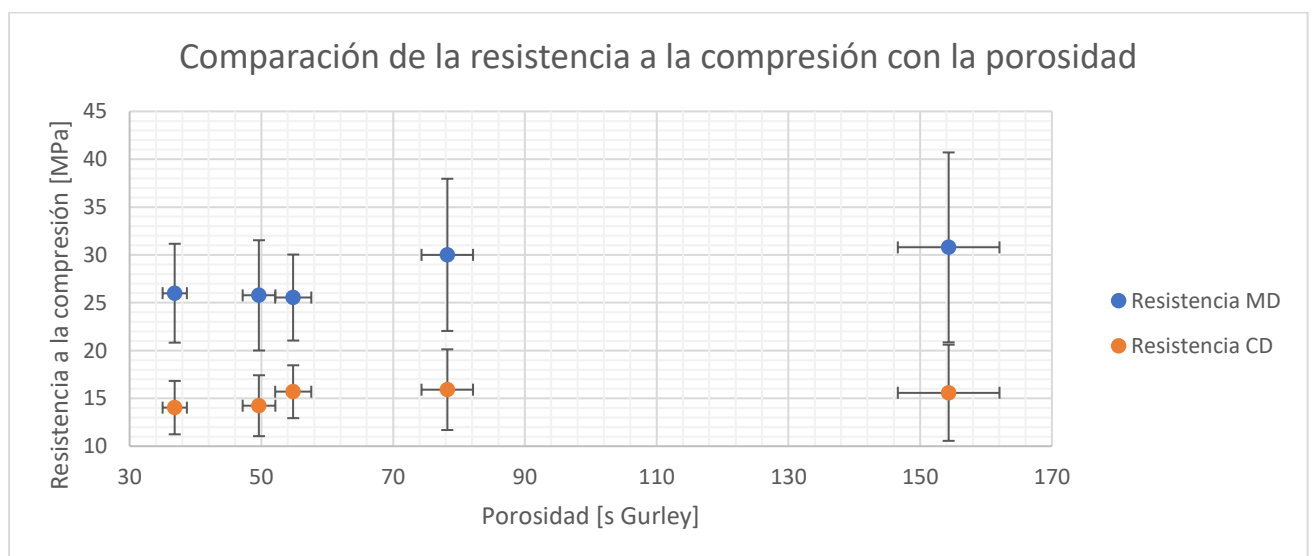
- Para MD:  $F_{max}[N] = (0,48 \pm 0,03) \left[ \frac{Nm^2}{g} \right] \cdot G \left[ \frac{g}{m^2} \right] + (20 \pm 6) [N]$
- Para CD:  $F_{max}[N] = (0,34 \pm 0,03) \left[ \frac{Nm^2}{g} \right] \cdot G \left[ \frac{g}{m^2} \right] - (5 \pm 7) [N]$

Comparando estas dos ecuaciones, se refuerza la diferencia entre las direcciones de máquina y transversal cuando el papel trabaja a compresión. Si nos fijamos en las pendientes, podemos ver que el refuerzo en la dirección de máquina (longitudinal) con el gramaje se incrementa un 29% más rápido que el refuerzo en la dirección transversal. Esto se traduce en que cuanto más gramaje, y por ende más fibra alineada haya, mayor será el refuerzo en la dirección de máquina respecto a la dirección transversal. Además, vemos que el límite inferior de la fuerza que soportaría un papel de gramaje infinitamente pequeño es 25 N mayor en la dirección longitudinal que en la dirección transversal.



Gráfica 12. Comparación de la resistencia a compresión de los papeles secos con el gramaje para ambas direcciones de ensayo. Los colores oscuros corresponden a los puntos en MD y los colores claros a CD.

En la Gráfica 12 se compara la resistencia a la compresión, calculada como la fuerza dividida por la sección del papel, en función del gramaje. En esta gráfica podemos observar que los valores de la resistencia a compresión no cambian tanto como la fuerza en función del gramaje. Al tener en cuenta la sección estamos considerando la tensión que soportan unitariamente las fibras, y vemos que es muy similar para todos los papeles en el rango de gramajes estudiados. Si hacemos la media para ambas direcciones, obtenemos que  $\sigma_{C,MD} = (27,8 \pm 1,3)$  MPa y  $\sigma_{C,CD} = (15,2 \pm 0,5)$  MPa. Estos resultados remarcan la diferencia entre las dos direcciones principales del papel, ya que nuevamente tenemos un valor para la dirección de máquina 1,9 veces mayor (casi el doble) que en la dirección transversal.



Gráfica 13. Resistencia a compresión de los papeles secos en función de la porosidad para ambas direcciones de ensayo.

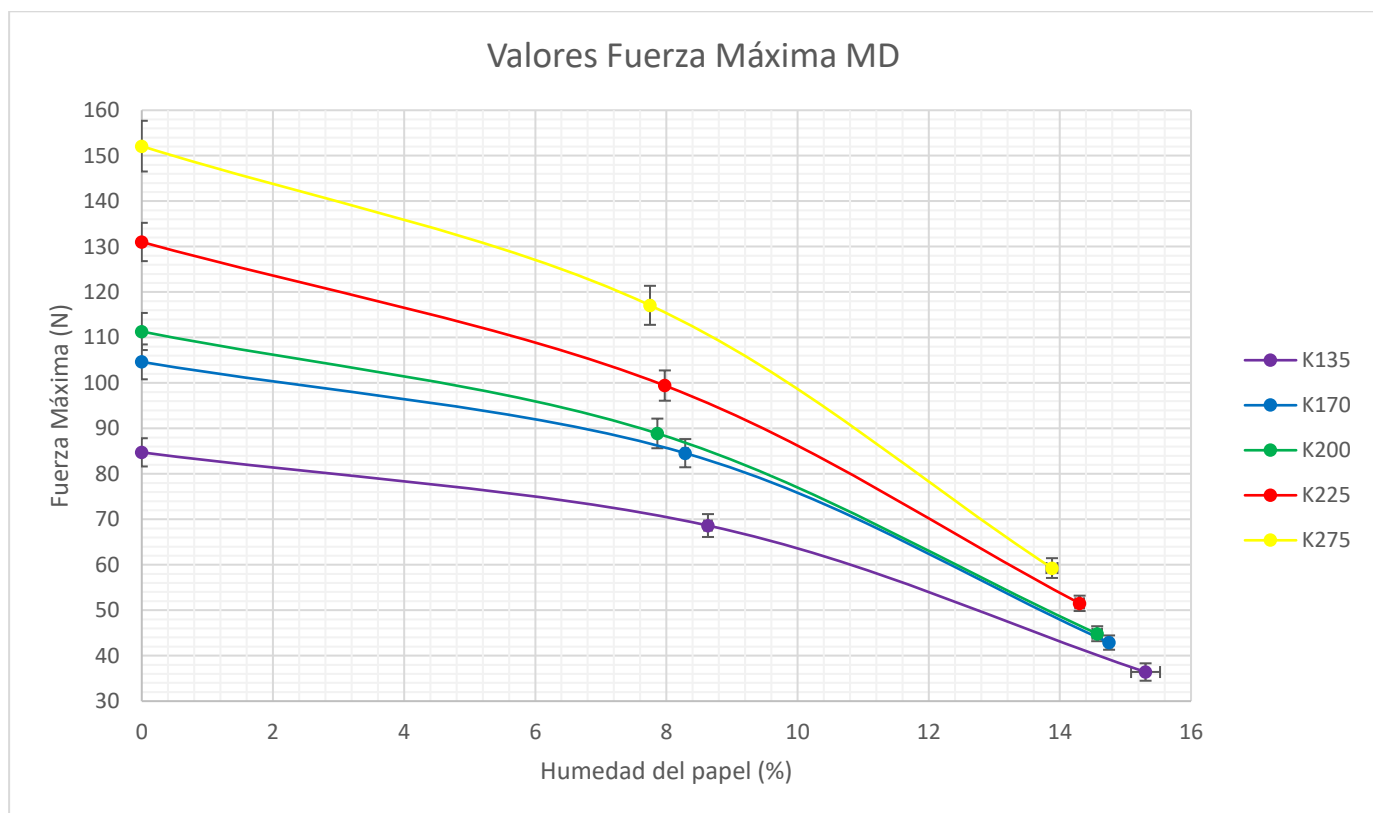
Si observamos la gráfica 13, que considerando los errores con los que se ha determinado la resistencia a la compresión no hay mucha variación en los valores con la porosidad, aunque para los tres papeles con mayor porosidad (menor tiempo Gurley) la resistencia en la dirección de máquina es unos 5 MPa más baja que para los dos papeles con menor porosidad. En materiales anisótropos la resistencia mecánica debe disminuir con el aumento de la porosidad, como vemos en nuestros resultados. Esto explica las pequeñas variaciones que hay entre los distintos papeles.

### 5.3.2 Medidas de resistencia a tres porcentajes de humedad.

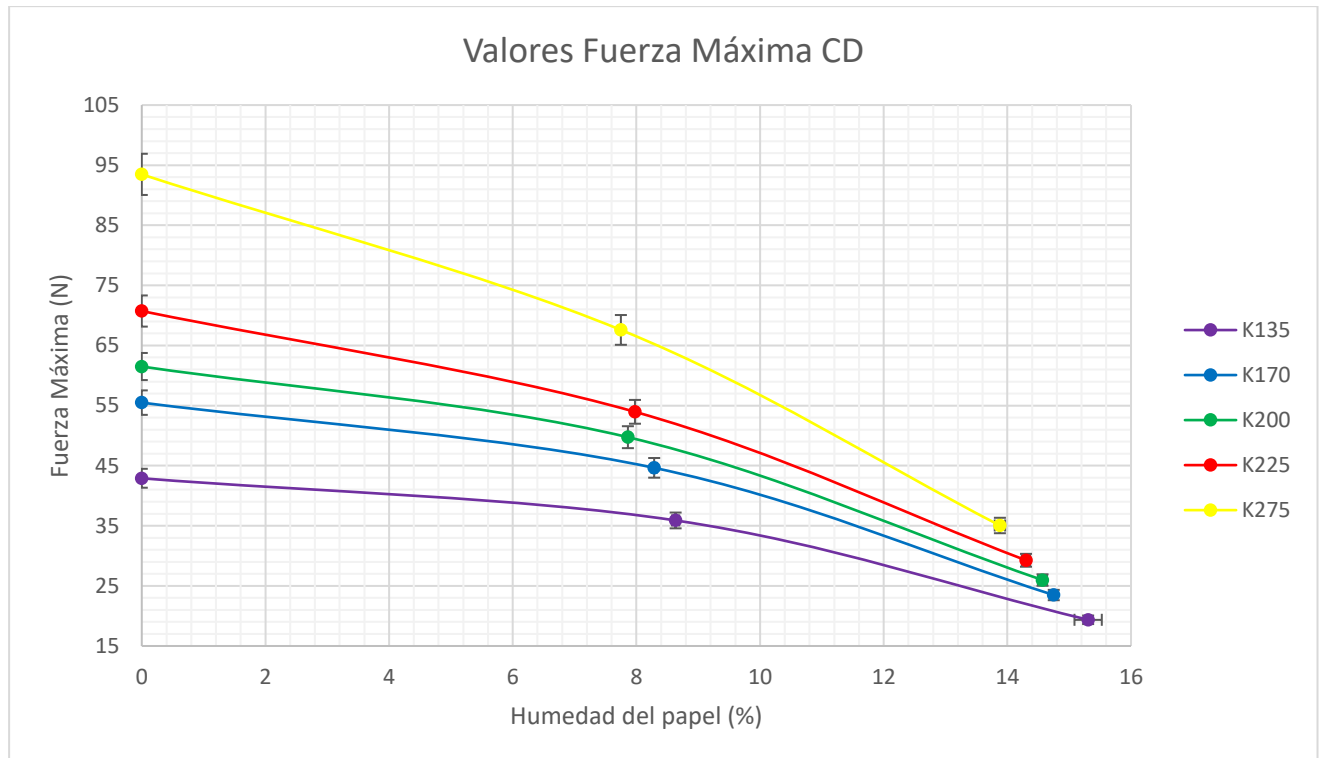
Una vez realizado este análisis de la influencia de las características del papel en la resistencia a la compresión en corto, veamos el efecto de la humedad en las propiedades mecánicas comparando los valores medidos para las muestras secas, saturadas de humedad en condiciones de laboratorio y saturadas de humedad en cámara. En la Tabla 17 podemos ver todos los datos de fuerza máxima en N con su error estimado, y en la Gráfica 14 y 15 se representan estos valores en función del contenido en humedad para la dirección de máquina y para la dirección transversal.

Tabla 17. Fuerza máxima a compresión. Unidades en Newton.

| Humedad                 | Dirección del ensayo | K135     | K170     | K200     | K225     | K275     |
|-------------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Papel seco              | Máquina (MD)         | 85±3     | 105±4    | 111±4    | 131±4    | 152±6    |
|                         | Trasversal (CD)      | 42,9±1,6 | 55,5±2,0 | 61,5±2,3 | 71±3     | 94±3     |
| Condiciones laboratorio | Máquina (MD)         | 68,6±2,5 | 85±3     | 89±3     | 99±3     | 117±4    |
|                         | Trasversal (CD)      | 35,9±1,3 | 44,6±1,6 | 49,7±1,8 | 54,0±2,0 | 67,6±2,5 |
| Papel saturado (1h)     | Máquina (MD)         | 36,4±1,9 | 42,9±1,6 | 44,8±1,6 | 51,5±1,7 | 59,3±2,2 |
|                         | Trasversal (CD)      | 19,4±0,7 | 23,5±0,9 | 26,0±1,0 | 29,3±1,1 | 35,0±1,3 |



Gráfica 14. Variación de la fuerza máxima que resisten los papeles a compresión en la dirección de máquina (MD) en función de su contenido en humedad para los cinco tipos de papeles estudiados.



Gráfica 15. Variación de la fuerza máxima que resisten los papeles a compresión en la dirección transversal (CD) en función de su contenido en humedad para los cinco tipos de papeles estudiados.

Como era de esperar, a mayor cantidad de humedad en el papel, menor es la fuerza máxima que puede resistir este porque el agua hace que se produzcan esfuerzos internos que lo deterioran.

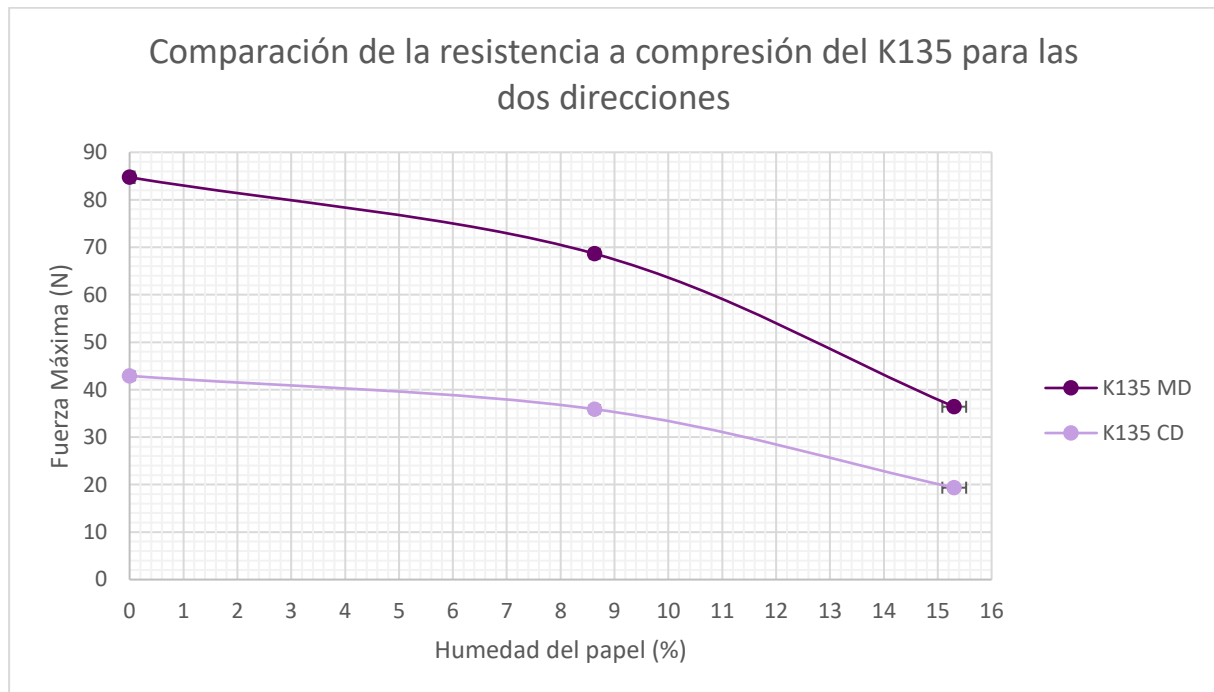
Si realizamos el cociente entre la fuerza en dirección de máquina (MD) y transversal (CD) en condiciones de laboratorio y con el papel saturado, obtenemos aproximadamente el mismo valor que obtuvimos con el papel seco. Esto muestra que las pérdidas por la absorción de agua son uniformes en todo el papel.

Tabla 18. Valores de fuerza divididos entre el espesor para las distintas condiciones de humedad y direcciones de ensayo.

| Humedad                 | Dirección del ensayo         | Resistencia [MPa] |
|-------------------------|------------------------------|-------------------|
| Papel seco              | Dirección de máquina (MD)    | 27,6±1,3          |
|                         | Trasversal a la máquina (CD) | 15,1±0,5          |
| Condiciones laboratorio | Dirección de máquina (MD)    | 21,8±1,3          |
|                         | Trasversal a la máquina (CD) | 11,9±0,6          |
| Papel saturado (1h)     | Dirección de máquina (MD)    | 11,2±0,8          |
|                         | Trasversal a la máquina (CD) | 6,3±0,3           |

Si dividimos la fuerza entre el espesor, suponiendo que el este no varía con el contenido de humedad del papel, nos quedan los datos que aparecen en la Tabla 18. Como vemos este valor también disminuye con la humedad del papel, pero se sigue manteniendo la diferencia entre dirección de máquina (MD) y dirección transversal (CD). También se aprecia que el descenso de la resistencia lo hace de la misma forma que la fuerza, es decir, de forma proporcional al valor seco. Con lo cual, se le puede aplicar los coeficientes que veremos en el siguiente punto.

En la gráfica 16 podemos ver una comparación de la fuerza máxima a compresión en la que se aprecia cómo desciende dicha fuerza en función de la humedad del papel y como la diferencia entre la dirección de máquina y la dirección transversal se mantiene.



Gráfica 16. Comparación de la fuerza máxima a compresión entre la dirección de máquina y la dirección transversal para el K135.

### 5.3.3 Factores de corrección por la humedad para la resistencia a la compresión en corto

Como vimos en el Capítulo 3, el contenido en humedad del papel depende de la humedad relativa a la que se encuentre, y también de su recorrido por ambientes con distintas humedades en los que haya estado. Y como acabamos de ver sus propiedades mecánicas dependen del contenido en humedad del papel. El comportamiento no es sencillo, y precisamente eso es lo que motivó la realización de este TFG. Este problema se soluciona en el laboratorio aplicando unos factores de corrección a la propiedad medida a una humedad distinta de la indicada en la norma. Esos factores son la relación entre la propiedad medida a una humedad de referencia y la propiedad medida a la humedad de realización del ensayo, como ya se dijo en el apartado 3.6

Vamos a calcular con nuestros datos estos factores de corrección para la SCT en función del contenido de humedad del papel se han publicado en el libro *Physical Testing of Paper*,<sup>[17]</sup> (ver Figura 3.25 en el Capítulo 3). Recordemos también que en esta referencia obtienen el siguiente factor de corrección para la propiedad SCT según la humedad absorbida por el papel (%M):

$$\frac{SCT_{50\%HR}}{SCT_{\%M}} = 0,531 \cdot e^{0,089 \cdot \%M}$$

Esta ecuación con los mismos coeficientes es válida también para la fuerza máxima aplicada a compresión, que es el parámetro con el que nosotros hemos trabajado, ya que al hacer el cociente del término a la izquierda de la igualdad se va la anchura de la probeta.

Con nuestros datos vamos a definir los dos parámetros de corrección siguientes:

$$k_{seco} = \frac{F_{lab}}{F_{seco}} \quad \text{y} \quad k_{sat} = \frac{F_{lab}}{F_{sat}}$$

donde el subíndice “seco” se refiere a los valores de fuerza máxima a compresión medida con la muestra seca (0% HR, %M = 0%), y el “sat” se utiliza para identificar las medidas realizadas con los papeles equilibrados en las condiciones de cámara (90%HR, %M = 14,56).

Los valores de  $k_{seco}$  y  $k_{sat}$  para cada uno de los gramajes y en las dos direcciones en las que se han hecho los ensayos SCT se encuentran en las Tablas 19 y 20. El error lo estimamos por *Teoría de Medidas*.

- Dirección de máquina:

Tabla 19. Coeficientes de corrección en dirección de máquina

|            | K135      | K170      | K200      | K225      | K275      |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $k_{seco}$ | 0,81±0,06 | 0,81±0,06 | 0,80±0,06 | 0,76±0,05 | 0,77±0,06 |
| $k_{sat}$  | 1,89±0,17 | 1,97±0,14 | 1,98±0,15 | 1,93±0,13 | 1,98±0,14 |

- Transversal a la dirección de máquina: Los valores obtenidos son los siguientes.

Tabla 20. Coeficientes de corrección en dirección transversal a la máquina

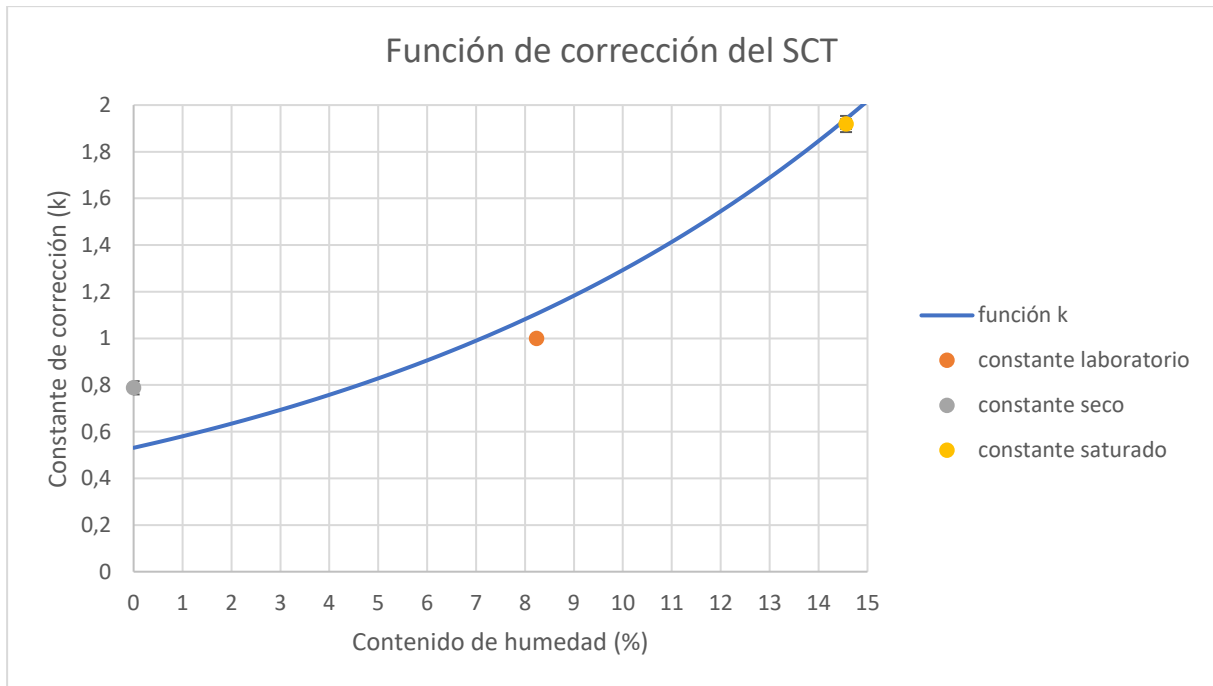
|            | K135      | K170      | K200      | K225      | K275      |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $k_{seco}$ | 0,84±0,07 | 0,80±0,08 | 0,81±0,07 | 0,76±0,08 | 0,72±0,08 |
| $k_{sat}$  | 1,85±0,09 | 1,90±0,09 | 1,92±0,09 | 1,84±0,09 | 1,93±0,09 |

Estos resultados vislumbran una información interesante, y es que, independientemente del gramaje y de la dirección de máquina en la que se mida la propiedad mecánica, todos tienen el mismo factor de fuerza. Por lo que, si se tuviesen más datos, se podría ver como varía este coeficiente según la cantidad de agua contenida en el papel y hacer un ajuste para calibrar este parámetro para el laboratorio y el tipo de papel que utiliza esta empresa.

Comparando los dos coeficientes también se puede ver que el papel pierde mucha resistencia a la compresión con el agua, como ya vimos en el apartado anterior directamente de los datos de la fuerza máxima. Si nos fijamos, el coeficiente  $k_{seco}$  es algo menor que la unidad (0,79±0,03 es su valor medio para todos los papeles en ambas direcciones) ya que la fuerza máxima del papel en condiciones de laboratorio es 0,79 veces menor que la del papel seco, es decir, el papel seco es, aproximadamente, un 20% más resistente que el papel en condiciones de laboratorio. Por su parte, el coeficiente  $k_{sat}$  es mayor que la unidad, y su valor medio (1,92±0,03) nos dice que al 90%HR el papel con las condiciones de laboratorio soporta casi el doble de fuerza que el papel saturado, o lo que es lo mismo, el papel saturado aguanta la mitad que el papel en condiciones de laboratorio.

Esto es importante tenerlo en cuenta a la hora de elegir los papeles para las cajas de embalar productos de agricultura, ya que, si el cartón y la caja se diseñan considerando las condiciones normales o de laboratorio, en condiciones de alta humedad, como en las cámaras donde se almacenan estos productos, el papel va a perder del orden del 50% de su resistencia mecánica, lo que puede repercutir en la resistencia del cartón y la resistencia final de la caja.

Para finalizar comparamos nuestros resultados con los de la referencia [17]. En la Gráfica 16 se representan con puntos los coeficientes de corrección obtenidos en este trabajo y mediante una línea azul la ecuación resultante del ajuste de los datos en el libro *Physical Testing of Paper*.<sup>[17]</sup>



Gráfica 17. Comparativa de los factores de corrección obtenidos en este trabajo (puntos) con el ajuste obtenido en el libro Physical Testing of Paper <sup>[17]</sup> en línea continua.

Podemos ver que nuestros datos encajan bastante bien con los de la referencia. En concreto, el  $k_{sat}$  medido saturando el papel de humedad en unas condiciones de humedad relativa bien controladas encaja justo sobre la curva, mientras que los otros dos puntos se desvían un poco, pero manteniendo la tendencia. En las condiciones de laboratorio nuestro papel absorbió un poco más de humedad que el de la referencia (7% de humedad frente a algo más del 8% que tenemos nosotros), y en las condiciones del  $k_{seco}$  la humedad que le hemos asignado a esas medidas de resistencia sabemos que es más pequeña que la que tiene en realidad. Esta comparativa les da más validez a nuestros resultados.

## **Capítulo 6. Conclusiones**

A la vista de los resultados que hemos obtenido en nuestro estudio de la dependencia de las propiedades a compresión en función de la humedad que contiene el papel Kraftliner, y contrastándolos con resultados previos encontrados en la búsqueda bibliográfica que se ha hecho, podemos establecer las siguientes conclusiones:

La caracterización básica que se ha realizado de los 5 papeles tipo Kraftliner seleccionados ha permitido ver que todos ellos se ajustan a los valores normales y límites que garantiza el fabricante, únicamente se ha detectado que el papel de menor gramaje tiene la porosidad medida con el método Gurley ((157±8) s Gurley) en el extremo superior del rango de valores dados por el fabricante (entre 20 y 150 s Gurley para todos los papeles).

Se ha diseñado un protocolo para medir la absorción de agua en los papeles utilizando una cámara húmeda a condiciones fijas de 90 %HR y 20 °C y variando el tiempo de permanencia en dicha cámara. Se ha visto que el contenido de humedad del papel va aumentando con el tiempo que permanece en estas condiciones de elevada humedad relativa, alcanzándose la saturación en todos los casos para tiempos del orden de dos horas.

El estudio de absorción de humedad realizado a tiempos cortos (antes de alcanzar la saturación) ha mostrado que la ganancia de masa debida a la absorción de humedad es lineal con la raíz cuadrada del tiempo, lo que es característico de la absorción de agua por capilaridad en materiales porosos. Esto significa que el papel, que es un material compuesto, anisótropo y complejo, en los primeros instantes y cuando parte desde el estado seco se comporta para la absorción de humedad desde el ambiente como un material poroso. El coeficiente de absorción, determinado como la pendiente del tramo lineal, es creciente con el gramaje del papel hasta que alcanza un plateau para el K200 de aproximadamente  $0,55 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$ . En función de la porosidad encontramos que a más porosidad (menos segundos Gurley) mayor el coeficiente de absorción, saliéndose de esta tendencia únicamente el papel más grueso (K275).

A tiempos largos (una hora) todos los papeles han alcanzado la saturación con humedad. La masa de agua que absorben crece linealmente con el gramaje, y también es ligeramente creciente con la porosidad. El porcentaje de humedad a saturación que contiene el papel respecto a su peso seco es de un  $(18 \pm 4) \%$  para todos los papeles.

El estudio de la resistencia a la compresión en corto (SCT) ha mostrado la anisotropía del papel, que es 1,35 veces más resistente en la dirección de máquina que en la dirección transversal. En su estado seco, la fuerza que resiste el papel es creciente con el gramaje y el espesor. Cuando dividimos esta fuerza por la sección a compresión del ensayo (espesor por anchura de la probeta) obtenemos la resistencia a la compresión, que varía muy poco con el gramaje (siendo ligeramente decreciente) y es algo mayor para los papeles con menos porosidad (30 MPa para el K135 y K170 frente a los 25 MPa para el K200, K225 y K275 en la dirección de máquina).

Respecto al objetivo principal de este TFG de estudiar la influencia de la humedad en la resistencia a compresión, se ha visto que la fuerza que soporta el papel a compresión disminuye con el contenido en humedad del papel. También se han podido sacar los factores de corrección del parámetro SCT por efecto de la humedad para nuestros papeles y en las condiciones ambientales de nuestro laboratorio. Los resultados obtenidos con nuestro método de variación del contenido en humedad se ajustan muy bien a los que hemos encontrado publicados en la literatura para este parámetro mecánico, lo que corrobora que nuestro método es adecuado para la determinación de estos coeficientes en los casos



en los que no podamos disponer de una cámara climática en la que se pueda variar la humedad relativa.

En conclusión, la realización de este TFG ha permitido a la alumna aplicar los conocimientos que ha adquirido en las asignaturas de la titulación a un caso real de estudio de propiedades mecánicas de un material complejo como es el papel. La búsqueda bibliográfica realizada y su estudio han permitido a la alumna ampliar sus conocimientos y llegar a entender lo que estaba haciendo en el día a día de su trabajo en el laboratorio de control de calidad de Smurfit Kappa Almería. A su vez, los resultados obtenidos en el marco de este TFG son de interés para este laboratorio, ya que ahora disponen de factores de corrección para aplicar al SCT y de un protocolo para su determinación contrastado con la bibliografía.

Como no podía ser de otra manera, el tiempo para la realización del TFG es limitado y hay cosas que se han quedado en el tintero. Por eso, como trabajo futuro se pueden ampliar estos ensayos testeando un conjunto de valores de humedad absorbida más amplio para todos los papeles que se usa en la agricultura, de forma que se puedan obtener unos factores de corrección todavía más representativos. También se puede medir otras propiedades del papel, como la absorción de agua líquida o la resistencia a tracción, y estudiar las relaciones que hay entre ellas.

## **Capítulo 7. Bibliografía**

- [1] Administración General del Estado (2018). *Informe del Mercado de Trabajo de Almería*. Observatorio de las Ocupaciones. [online] Madrid: Servicio Público de Empleo Estatal (SEPE), p.18. Disponible: <http://publicacionesoficiales.boe.es> [Acceso 13 nov. 2019].
- [2] Redaccion Aenverde (2019). *Almería lidera las exportaciones agroalimentarias de Andalucía*. [online] Disponible: <http://aenverde.es/almeria-lidera-las-exportaciones-agroalimentarias-de-andalucia> [Acceso 13 nov. 2019].
- [3] M. F. (2017). El uso de cartón frente al plástico ahorraría casi 60 millones al sector. *Diario de Almería*. [online] Disponible: [http://www.diariodealmeria.es/agriculturadealmeria/carton-plastico-ahorraria-millones-Bsector\\_0\\_1158484237.html](http://www.diariodealmeria.es/agriculturadealmeria/carton-plastico-ahorraria-millones-Bsector_0_1158484237.html) [Acceso: 13 nov. 2019].
- [4] Proexport (2015). *Análisis comparativo de costes en envases agrícolas*. Envases y embalajes como factores de rentabilidad y sostenibilidad del sector hortofrutícola español. [online] Murcia: Proexport. Disponible: <http://www.proexport.es/envases-y-embalajes-como-factores-de-rentabilidad-y-sostenibilidad-del-sector-hortofruticola-espanol/#> [Acceso 13 nov. 2019].
- [5] Vegabaja Packaging. (2019). *Cartón ondulado VS Plástico Vegabaja Packaging*. [online] Disponible: <https://vegabajapackaging.es/carton-ondulado-vs-plastico/> [Acceso 13 nov. 2019].
- [6] TotalSafePack. (2016). *Envases de plástico vs envases de cartón TotalSafePack*. [online] Disponible: <https://www.totalsafepack.com/envases-plastico-vs-envases-carton/> [Acceso 13 nov. 2019].
- [7] Mondi Group (2012). *Sack Kraft Paper production*. [video] Disponible: [https://www.youtube.com/watch?v=qs8UgFz28L0&list=WL&index=7&t=0s&ab\\_channel=MondiGroup](https://www.youtube.com/watch?v=qs8UgFz28L0&list=WL&index=7&t=0s&ab_channel=MondiGroup) [Acceso 5 ene 2020].
- [8] UNE-ISO 5636-5:2015 *Papel y cartón. Determinación de la permeancia al aire (rango medio). Parte 5: Método Gurley*.
- [9] UNE-ISO 9895:2019. *Papel y cartón. Resistencia a la compresión. Ensayo de compresión en corto*.
- [10] UNE-EN ISO 534:2012. *Papel y cartón. Determinación del espesor, densidad y volumen específico. (ISO 534:2011)*.
- [11] UNE-EN ISO 287:2018. *Papel y cartón. Determinación del contenido de humedad de un lote. Método de secado en estufa*.
- [12] UNE-EN ISO 2233:2002 *Envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos y unidades de carga. Acondicionamiento para ensayos. (ISO 2233:2000)*.
- [13] UNE-EN 20187:1994 *Papel, cartón y pastas. Atmósfera normal de acondicionamiento y ensayo y procedimiento para controlar la atmósfera y el acondicionamiento de muestras (ISO 187:1990). (Versión oficial EN 20187:1993)*.
- [14] UNE 57009:2015 *Papel y cartón. Tolerancias de gramaje*.
- [15] UNE-EN ISO 536:2013 *Papel y cartón. Determinación del gramaje. (ISO 536:2012)*
- [16] R. Mark, *Handbook Of Physical Testing Of Paper*. New York: Marcel Dekker, 2002
- [17] R. E. Popil, *Physical Testing Of Paper*. Shawbury (Shropshire, UK), 2017
- [18] H. Haslach, JR., *The Moisture and Rate-Dependent Mechanical Properties of Paper: A Review*, Kluwer Academic Publishers, Países Bajos, 2000.
- [19] M. Ek, G. Gellerstedt and G. Henriksson, *Pulping Chemistry and Technology: Pulping Chemistry and Technology*, Berlin: Gruyter, 2009.
- [20] P. Bajpai, *Biermman's handbook of pulp and paper* [S.l.]: Elsevier, 2018.

Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.

[21] F. Strömberg, *Humidity's effect on strength and stiffness of containerboard materials*, Master Tesis, Universidad de Karlstad, 2015.

[22] M. Carracedo y B. Gárate, *Estudio de la resistencia de papeles vírgenes versus reciclados empleados en la fabricación de cartón corrugado*, Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, vol. 9, no. 1, pp. 119-124, 2005.

[23] William D. Callister. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverté. Barcelona 2016

## **Anexo A. Tabla de datos**

Los valores resaltados son los valores que se encuentran fuera del rango garantizado por el fabricante.

### **A.1 Caracterización del papel**

Tabla A1.1. Masa del papel para gramaje en gramos

| K135  | K170  | K200  | K225  | K275  |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,318 | 1,656 | 2,002 | 2,267 | 2,752 |
| 1,373 | 1,686 | 1,980 | 2,284 | 2,782 |
| 1,378 | 1,709 | 1,981 | 2,341 | 2,798 |
| 1,371 | 1,709 | 1,970 | 2,319 | 2,732 |
| 1,349 | 1,672 | 1,982 | 2,314 | 2,739 |
| 1,370 | 1,685 | 1,996 | 2,306 | 2,756 |
| 1,380 | 1,691 | 1,999 | 2,322 | 2,804 |
| 1,389 | 1,706 | 1,984 | 2,308 | 2,732 |
| 1,386 | 1,696 | 1,992 | 2,342 | 2,742 |
| 1,381 | 1,702 | 1,980 | 2,304 | 2,669 |

TablaA1.2 Porosidad obtenida en segundos Gurley

| K135         |          | K170     |          | K200     |          | K225     |          | K275     |          |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Interior     | Exterior | Interior | Exterior | Interior | Exterior | Interior | Exterior | Interior | Exterior |
| <b>173,0</b> | 148,0    | 67,8     | 71,6     | 55,1     | 51,2     | 40,2     | 33,0     | 58,4     | 50,0     |
| <b>169,3</b> | 157,8    |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>178,7</b> | 148,4    | 70,7     | 76,0     | 46,8     | 49,9     | 33,8     | 37,6     | 58,9     | 52,5     |
| 142,4        | 155,6    |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>172,5</b> | 145,3    | 78,0     | 76,6     | 51,5     | 52,1     | 36,1     | 39,0     | 51,3     | 54,2     |
| <b>157,8</b> | 147,1    |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>187,6</b> | 143,5    | 78,0     | 82,9     | 49,7     | 49,5     | 37,0     | 39,3     | 51,3     | 53,5     |
| <b>172,4</b> | 151,9    |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 108,0        | 133,8    | 74,2     | 82,9     | 48,7     | 51,1     | 38,8     | 35,0     | 53,9     | 55,4     |
| <b>174,3</b> | 163,8    |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 135,5        | 153,2    | 78,9     | 82,7     | 47,8     | 53,6     | 33,0     | 36,2     | 56,9     | 54,1     |
| 148,6        | 139,6    |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>163,7</b> | 159,2    | 82,7     | 82,4     | 47,9     | 47,6     | 35,5     | 35,2     | 56,9     | 58,6     |
| <b>156,1</b> | 163,9    |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>154,7</b> | 162,6    | 82,4     | 82,0     | 53,3     | 51,5     | 39,7     | 40,3     | 57,9     | 51,5     |
| <b>165,4</b> | 135,4    |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 153,9        | 149,3    | 82,4     | 81,3     | 46,5     | 46,8     | 36,1     | 37,9     | 61,7     | 54,6     |
| <b>150,5</b> | 152,6    |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 147,1        | 171,1    | 73,0     | 77,9     | 46,3     | 47,9     | 34,9     | 38,4     | 52,7     | 52,4     |
| 139,2        | 140,2    |          |          |          |          |          |          |          |          |

Tabla A1.3. Espesor obtenido en milímetros

| K135 | K170 | K200 | K225 | K275 |
|------|------|------|------|------|
| 0,18 | 0,23 | 0,28 | 0,33 | 0,39 |
| 0,19 | 0,24 | 0,29 | 0,34 | 0,39 |
| 0,19 | 0,24 | 0,28 | 0,32 | 0,40 |
| 0,19 | 0,23 | 0,29 | 0,34 | 0,39 |
| 0,18 | 0,23 | 0,28 | 0,34 | 0,40 |
| 0,18 | 0,24 | 0,29 | 0,33 | 0,40 |
| 0,18 | 0,23 | 0,30 | 0,34 | 0,39 |
| 0,18 | 0,23 | 0,29 | 0,33 | 0,39 |
| 0,18 | 0,23 | 0,28 | 0,33 | 0,40 |
| 0,18 | 0,23 | 0,27 | 0,34 | 0,40 |
| 0,18 | 0,23 | 0,29 | 0,34 | 0,40 |
| 0,18 | 0,22 | 0,29 | 0,33 | 0,39 |
| 0,18 | 0,23 | 0,29 | 0,34 | 0,40 |
| 0,19 | 0,23 | 0,31 | 0,34 | 0,41 |
| 0,18 | 0,24 | 0,28 | 0,34 | 0,40 |
| 0,18 | 0,23 | 0,29 | 0,33 | 0,40 |
| 0,19 | 0,24 | 0,29 | 0,34 | 0,40 |
| 0,18 | 0,23 | 0,30 | 0,34 | 0,39 |
| 0,19 | 0,23 | 0,28 | 0,34 | 0,40 |
| 0,19 | 0,24 | 0,29 | 0,34 | 0,40 |

**A.2 Cálculo de la absorción de agua**

Tabla A2.1. Humedad del papel en condiciones de laboratorio

| K135 | K170  | K200 | K225 | K275 |
|------|-------|------|------|------|
| 8,94 | 8,23  | 8,07 | 8,07 | 7,81 |
| 8,69 | 8,35  | 7,96 | 8,18 | 7,94 |
| 8,73 | 8,54  | 8,09 | 8,13 | 7,79 |
| 8,83 | 8,31  | 8,16 | 8,11 | 7,98 |
| 8,20 | 8,15  | 8,02 | 8,15 | 7,75 |
| 8,37 | 8,38  | 7,96 | 8,15 | 7,90 |
| 8,65 | 8,42  | 8,19 | 8,16 | 7,87 |
| 8,40 | 8,24  | 7,99 | 8,30 | 8,24 |
| 8,38 | 8,06  | 8,09 | 8,32 | 7,92 |
| 8,42 | 9,15  | 8,12 | 7,94 | 7,81 |
| 8,62 | 10,13 | 8,26 | 8,08 | 7,80 |
| 8,43 | 9,49  | 8,04 | 8,44 | 7,41 |
| 8,57 | 10,60 | 7,85 | 8,41 | 7,98 |
| 8,43 | 9,68  | 8,23 | 8,14 | 7,69 |
| 8,98 | 8,97  | 8,06 | 8,02 | 7,67 |
| 8,30 | 8,55  | 7,77 | 8,19 | 8,02 |

Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.

|       |       |      |      |      |
|-------|-------|------|------|------|
| 8,15  | 9,21  | 7,72 | 8,19 | 7,76 |
| 8,59  | 9,03  | 7,95 | 7,94 | 7,98 |
| 8,26  | 8,97  | 8,00 | 7,97 | 7,64 |
| 8,80  | 9,80  | 8,02 | 7,87 | 7,83 |
| 9,68  | 9,15  | 7,85 | 8,19 | 7,62 |
| 8,13  | 10,46 | 7,94 | 8,13 | 7,65 |
| 9,30  | 8,97  | 7,96 | 8,20 | 7,78 |
| 8,73  | 8,56  | 7,96 | 8,30 | 7,65 |
| 9,92  | 8,40  | 8,12 | 8,25 | 7,61 |
| 9,09  | 8,33  | 7,82 | 8,22 | 7,65 |
| 9,76  | 8,46  | 7,84 | 8,06 | 7,82 |
| 10,66 | 8,51  | 7,92 | 8,20 | 7,86 |
| 10,24 | 8,62  | 7,96 | 8,20 | 7,58 |
| 8,87  | 8,57  | 8,23 | 8,14 | 7,52 |
| 10,40 | 8,24  | 8,00 | 8,13 | 7,67 |
| 8,87  | 8,26  | 7,96 | 8,15 | 7,72 |
| 9,60  | 8,16  | 8,02 | 8,27 | 7,65 |
| 9,76  | 8,28  | 7,97 | 8,01 | 7,62 |
| 8,80  | 8,37  | 8,15 | 8,07 | 7,57 |
| 9,09  | 8,64  | 8,01 | 8,22 | 7,62 |
| 8,80  | 8,24  | 8,19 | 8,09 | 7,59 |
| 10,74 | 8,55  | 8,19 | 8,18 | 7,76 |
| 9,84  | 8,50  | 8,35 | 8,03 | 7,73 |
| 10,40 | 8,33  | 8,39 | 8,19 | 7,60 |
| 8,87  | 8,55  | 8,26 | 7,70 | 7,69 |
| 8,20  | 8,36  | 8,40 | 7,98 | 7,44 |
| 8,87  | 8,19  | 8,09 | 7,83 | 7,60 |
| 9,52  | 8,17  | 8,23 | 7,64 | 7,69 |
| 9,24  | 8,32  | 8,39 | 7,65 | 7,78 |
| 8,59  | 8,22  | 8,29 | 7,68 | 8,07 |
| 9,68  | 8,22  | 8,15 | 8,08 | 7,62 |
| 10,24 | 8,24  | 7,92 | 8,10 | 7,62 |
| 8,80  | 8,25  | 8,02 | 7,99 | 7,52 |
| 8,94  | 8,33  | 7,78 | 7,96 | 7,53 |
| 8,87  | 8,26  | 7,77 | 7,81 | 7,49 |
| 10,48 | 8,17  | 7,59 | 7,62 | 7,64 |
| 10,57 | 8,35  | 7,67 | 7,96 | 7,34 |
| 9,76  | 8,25  | 7,68 | 8,05 | 7,51 |
| 9,68  | 8,51  | 7,43 | 7,76 | 7,76 |
| 10,40 | 8,41  | 7,64 | 7,88 | 7,64 |
| 9,68  | 8,51  | 7,70 | 7,76 | 7,93 |
| 8,78  | 8,53  | 7,55 | 7,98 | 7,82 |
| 8,62  | 8,44  | 7,54 | 7,82 | 7,65 |
| 8,76  | 8,43  | 7,61 | 7,93 | 7,77 |
| 8,78  | 8,16  | 7,65 | 8,11 | 7,48 |

Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.

|      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|
| 8,93 | 8,43 | 7,61 | 7,91 | 7,65 |
| 8,54 | 8,46 | 7,55 | 7,76 | 7,51 |
| 8,82 | 8,44 | 7,30 | 7,96 | 7,65 |
| 9,02 | 8,18 | 7,63 | 7,81 | 7,42 |
| 8,55 | 8,16 | 7,55 | 7,89 | 7,67 |
| 8,96 | 8,13 | 7,57 | 7,61 | 7,48 |
| 8,93 | 8,10 | 7,51 | 7,78 | 7,79 |
| 8,50 | 8,04 | 7,71 | 7,67 | 7,75 |
| 8,74 | 8,16 | 7,77 | 7,79 | 7,76 |
| 8,91 | 8,53 | 7,62 | 7,82 | 7,76 |
| 8,52 | 8,54 | 7,80 | 8,01 | 7,94 |
| 8,62 | 8,39 | 7,61 | 7,75 | 7,69 |
| 8,54 | 8,53 | 7,71 | 7,90 | 7,66 |
| 8,35 | 8,17 | 7,83 | 7,90 | 7,59 |
| 8,62 | 8,58 | 7,72 | 7,68 | 7,65 |
|      | 8,50 | 7,84 | 7,68 | 7,58 |
|      | 8,35 |      | 7,67 | 7,55 |
|      | 8,56 |      | 7,77 |      |
|      | 8,50 |      | 7,68 |      |
|      | 8,33 |      |      |      |

Tabla A2.2. Tanteo humedad, en tanto por ciento

|         | K135  | K275  |
|---------|-------|-------|
| 1 min   | 4,29  | 3,57  |
| 2 min   | 6,29  | 4,55  |
| 3 min   | 7,52  | 5,43  |
| 4 min   | 9,74  | 7,18  |
| 5 min   | 10,10 | 8,23  |
| 10 min  | 12,76 | 10,68 |
| 15 min  | 14,37 | 11,85 |
| 20 min  | 14,47 | 12,65 |
| 30 min  | 14,95 | 13,61 |
| 45 min  | 15,39 | 13,32 |
| 60 min  | 15,50 | 13,73 |
| 75 min  | 15,13 | 14,34 |
| 90 min  | 15,27 | 14,21 |
| 105 min | 15,76 | 14,58 |
| 120 min | 15,48 | 14,59 |
| 135 min |       | 14,82 |

Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.

Tabla A2.3. Datos de humedad obtenidos en tanto por ciento (%)

|      | 1 min | 2 min | 3 min | 4 min | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 45 min | 60 min | 75 min | 90 min | 105 min | 120 min |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| K135 | 4,65  | 6,72  | 7,57  | 9,40  | 9,96  | 12,21  | 13,18  | 14,12  | 14,42  | 15,09  | 14,47  | 15,70  | 15,63  | 15,30   | 15,51   |
|      | 4,68  | 6,58  | 7,82  | 8,87  | 10,50 | 11,95  | 13,67  | 14,40  | 15,09  | 14,98  | 15,47  | 15,43  | 15,67  | 15,54   | 15,85   |
|      | 4,27  | 6,34  | 7,79  | 8,94  | 10,63 | 12,26  | 13,53  | 13,47  | 14,23  | 14,98  | 15,30  | 15,53  | 15,69  | 15,81   | 15,69   |
|      | 4,58  | 7,44  | 7,83  | 8,98  | 9,84  | 11,95  | 12,77  | 13,71  | 14,65  | 15,43  | 15,54  | 15,83  | 15,60  | 15,80   | 15,56   |
|      | 4,88  | 6,70  | 7,80  | 8,42  | 9,78  | 12,14  | 13,24  | 14,07  | 14,07  | 15,30  | 15,75  | 15,40  | 15,51  | 15,61   | 15,73   |
| K170 | 4,58  | 5,79  | 8,37  | 8,40  | 9,55  | 11,22  | 12,76  | 12,94  | 14,00  | 14,40  | 14,86  | 14,82  | 15,20  | 15,05   | 15,12   |
|      | 4,24  | 6,87  | 7,83  | 8,58  | 9,53  | 12,74  | 12,19  | 13,35  | 13,24  | 14,64  | 14,82  | 14,89  | 15,12  | 14,87   | 15,02   |
|      | 4,08  | 6,63  | 6,99  | 8,73  | 9,79  | 11,62  | 13,15  | 12,98  | 13,85  | 14,63  | 14,72  | 15,05  | 15,03  | 15,21   | 15,37   |
|      | 4,19  | 5,61  | 6,69  | 9,66  | 9,57  | 12,15  | 12,58  | 13,08  | 13,83  | 14,57  | 14,74  | 15,25  | 15,27  | 15,05   | 15,00   |
|      | 4,20  | 6,40  | 6,60  | 8,47  | 9,46  | 11,85  | 13,19  | 13,75  | 13,89  | 14,61  | 14,62  | 15,28  | 15,03  | 15,07   | 15,40   |
| K200 | 4,00  | 6,03  | 6,52  | 8,64  | 9,35  | 10,92  | 11,98  | 13,01  | 13,65  | 14,27  | 14,29  | 14,70  | 14,67  | 14,87   | 14,97   |
|      | 3,99  | 6,39  | 6,91  | 8,99  | 9,34  | 11,71  | 12,48  | 12,90  | 13,79  | 14,14  | 14,63  | 14,81  | 14,86  | 15,07   | 15,00   |
|      | 3,90  | 5,71  | 7,10  | 8,00  | 9,53  | 12,62  | 12,40  | 12,63  | 13,55  | 14,64  | 14,69  | 14,69  | 14,68  | 15,10   | 15,39   |
|      | 4,25  | 5,58  | 7,39  | 8,49  | 9,35  | 11,70  | 12,53  | 13,64  | 13,91  | 14,08  | 14,66  | 14,78  | 15,18  | 15,10   | 15,40   |
|      | 4,39  | 6,16  | 7,24  | 7,96  | 9,40  | 11,38  | 12,53  | 12,96  | 13,47  | 14,16  | 14,58  | 14,66  | 14,99  | 14,88   | 14,83   |
| K225 | 3,99  | 5,52  | 6,11  | 6,74  | 8,96  | 11,06  | 11,66  | 12,17  | 13,91  | 14,14  | 14,24  | 14,82  | 15,34  | 14,59   | 14,72   |
|      | 3,83  | 5,40  | 6,63  | 7,69  | 8,46  | 10,42  | 11,84  | 12,15  | 14,00  | 13,81  | 14,27  | 14,55  | 14,62  | 14,74   | 14,82   |
|      | 4,15  | 5,76  | 6,55  | 7,32  | 8,82  | 11,07  | 11,82  | 13,27  | 13,30  | 14,66  | 14,56  | 14,40  | 15,16  | 14,79   | 14,76   |
|      | 3,80  | 5,12  | 6,56  | 7,66  | 8,29  | 10,89  | 12,13  | 12,50  | 13,30  | 14,13  | 14,27  | 15,02  | 14,77  | 14,79   | 15,26   |
|      | 4,00  | 5,93  | 6,30  | 7,77  | 8,83  | 11,23  | 12,01  | 13,29  | 13,47  | 13,81  | 14,17  | 14,49  | 14,71  | 14,75   | 14,79   |
| K275 | 3,24  | 4,43  | 5,62  | 6,88  | 6,34  | 10,63  | 12,07  | 12,03  | 13,38  | 13,35  | 14,13  | 14,22  | 14,38  | 14,65   | 14,74   |
|      | 2,69  | 5,22  | 5,23  | 6,99  | 8,17  | 9,99   | 11,72  | 11,48  | 12,76  | 13,31  | 13,76  | 14,36  | 14,63  | 14,55   | 14,56   |
|      | 3,05  | 4,88  | 5,47  | 6,76  | 7,49  | 10,28  | 11,10  | 11,45  | 12,58  | 13,47  | 13,69  | 14,66  | 14,64  | 14,70   | 14,64   |
|      | 3,00  | 4,64  | 5,40  | 6,27  | 7,75  | 10,31  | 10,98  | 12,33  | 12,86  | 13,48  | 14,03  | 14,23  | 14,51  | 14,82   | 14,69   |
|      | 3,55  | 4,54  | 5,48  | 6,26  | 8,35  | 10,03  | 11,88  | 12,09  | 12,71  | 14,21  | 13,79  | 13,98  | 14,44  | 14,21   | 14,54   |



Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.

### A.3 Medición de la compresión en corto

Tabla A3.1 SCT en dirección de máquina (MD) en kN/m

|      | 0    | Lab  | 60'  |      | 0    | Lab  | 60'  |      | 0    | Lab  | 60'  |       | 0     | Lab  | 60'  |      | 0     | Lab  | 60'  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|
| K135 | 6,27 | 3,97 | 2,37 | K170 | 7,12 | 5,49 | 3,04 | K200 | 8,08 | 5,71 | 3,08 | K225  | 8,76  | 6,75 | 3,67 | K275 | 9,81  | 8,42 | 3,43 |
|      | 6,00 | 4,94 | 2,39 |      | 7,16 | 5,78 | 3,02 |      | 7,63 | 6,19 | 2,88 |       | 8,72  | 6,89 | 3,53 |      | 10,01 | 8,08 | 4,12 |
|      | 6,04 | 4,59 | 2,31 |      | 6,34 | 5,86 | 2,66 |      | 6,89 | 6,30 | 2,82 |       | 7,50  | 7,15 | 3,42 |      | 11,57 | 8,61 | 3,60 |
|      | 5,55 | 4,88 | 2,38 |      | 6,08 | 5,42 | 2,47 |      | 8,17 | 5,46 | 2,81 |       | 9,17  | 6,84 | 3,44 |      | 10,92 | 6,56 | 4,13 |
|      | 5,86 | 4,79 | 2,37 |      | 7,52 | 5,66 | 2,98 |      | 8,35 | 5,87 | 2,89 |       | 9,39  | 5,90 | 3,48 |      | 8,35  | 7,89 | 3,73 |
|      | 5,62 | 4,88 | 2,25 |      | 7,97 | 6,16 | 2,70 |      | 7,94 | 5,76 | 2,72 |       | 8,12  | 6,44 | 3,51 |      | 9,52  | 7,53 | 4,13 |
|      | 5,46 | 4,66 | 2,45 |      | 6,33 | 5,70 | 2,95 |      | 7,49 | 5,28 | 3,18 |       | 10,12 | 6,66 | 3,06 |      | 9,99  | 7,31 | 4,29 |
|      | 5,06 | 4,73 | 2,37 |      | 7,08 | 5,70 | 2,84 |      | 7,94 | 6,11 | 2,78 |       | 9,52  | 6,70 | 3,55 |      | 9,11  | 6,93 | 4,07 |
|      | 5,40 | 5,05 | 2,77 |      | 7,05 | 5,41 | 2,74 |      | 7,38 | 6,34 | 2,87 |       | 8,94  | 6,41 | 3,42 |      | 10,85 | 6,97 | 3,85 |
|      | 5,17 | 4,57 | 2,55 |      | 6,04 | 5,19 | 3,01 |      | 6,82 | 6,23 | 2,89 |       | 9,16  | 6,34 | 3,41 |      | 10,73 | 7,87 | 3,94 |
|      | 6,25 | 4,73 | 2,43 |      | 7,63 | 5,91 | 3,00 |      | 6,90 | 5,84 | 2,87 |       | 8,44  | 7,13 | 3,37 |      | 10,80 | 7,66 | 3,90 |
|      | 5,64 | 4,78 | 2,34 |      | 6,54 | 5,63 | 2,80 |      | 7,26 | 5,94 | 3,13 |       | 7,29  | 6,17 | 3,38 |      | 11,14 | 7,85 | 4,37 |
|      | 5,90 | 4,48 | 2,61 |      | 7,27 | 5,63 | 2,84 |      | 7,15 | 5,63 | 3,00 |       | 9,03  | 6,35 | 3,75 |      | 11,53 | 8,09 | 3,81 |
|      | 6,09 | 4,64 | 2,77 |      | 7,36 | 5,13 | 2,82 |      | 7,49 | 6,19 | 2,86 |       | 8,73  | 6,43 | 3,69 |      | 9,20  | 7,99 | 3,84 |
|      | 5,73 | 4,22 | 2,44 |      | 7,71 | 5,91 | 2,67 |      | 7,57 | 5,54 | 3,25 |       | 8,80  | 7,30 | 3,63 |      | 8,40  | 8,69 | 3,97 |
|      | 5,44 | 4,38 | 2,40 |      | 7,38 | 5,55 | 2,84 |      | 7,57 | 5,09 | 3,02 |       | 8,69  | 6,87 | 3,39 |      | 9,58  | 8,28 | 4,17 |
| 5,08 | 4,64 | 2,33 | 6,74 | 5,07 | 3,20 | 7,56 | 6,36 | 3,22 | 8,12 | 6,85 | 3,47 | 10,38 | 8,17  | 4,26 |      |      |       |      |      |
| 5,43 | 4,12 | 2,21 | 6,49 | 5,68 | 2,99 | 6,44 | 6,50 | 3,04 | 8,91 | 6,05 | 3,02 | 10,50 | 7,84  | 3,52 |      |      |       |      |      |
| 5,52 | 4,46 | 2,40 | 7,10 | 5,73 | 2,84 | 7,35 | 5,83 | 3,09 | 9,02 | 6,46 | 3,28 | 8,95  | 7,71  | 3,95 |      |      |       |      |      |
| 5,47 | 4,00 | 2,40 | 6,61 | 6,13 | 2,77 | 6,45 | 6,36 | 3,38 | 8,26 | 6,88 | 3,22 | 11,46 | 7,66  | 3,96 |      |      |       |      |      |

Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del papel Kraftliner utilizado para hacer cajas de cartón.

Tabla A3.2 SCT en dirección de máquina (CD) en kN/m

|      | 0    | Lab  | 60'  |      | 0    | Lab  | 60'  |      | 0    | Lab  | 60'  |      | 0    | Lab  | 60'  |      | 0    | Lab  | 60'  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| K135 | 2,70 | 2,57 | 1,29 | K170 | 3,47 | 3,07 | 1,56 | K200 | 3,87 | 3,42 | 1,78 | K225 | 5,17 | 3,68 | 2,08 | K275 | 5,26 | 4,84 | 2,26 |
|      | 2,66 | 2,89 | 1,39 |      | 3,26 | 2,89 | 1,65 |      | 4,09 | 3,59 | 1,69 |      | 5,11 | 3,15 | 2,06 |      | 6,11 | 4,12 | 2,22 |
|      | 3,06 | 2,63 | 1,26 |      | 3,66 | 2,99 | 1,65 |      | 4,53 | 3,55 | 1,80 |      | 4,86 | 4,00 | 1,96 |      | 6,60 | 4,85 | 2,25 |
|      | 3,25 | 1,98 | 1,29 |      | 3,97 | 2,77 | 1,53 |      | 3,79 | 3,07 | 1,61 |      | 5,76 | 3,54 | 2,15 |      | 6,22 | 4,73 | 2,19 |
|      | 2,62 | 2,27 | 1,41 |      | 3,57 | 2,96 | 1,69 |      | 4,48 | 3,13 | 1,72 |      | 5,39 | 3,83 | 1,97 |      | 6,01 | 4,54 | 2,22 |
|      | 2,93 | 2,41 | 1,31 |      | 3,87 | 2,75 | 1,54 |      | 4,09 | 2,72 | 1,74 |      | 4,89 | 3,80 | 2,06 |      | 6,38 | 4,35 | 2,07 |
|      | 2,52 | 2,58 | 1,38 |      | 4,00 | 2,75 | 1,53 |      | 4,10 | 3,27 | 1,76 |      | 4,57 | 2,63 | 1,86 |      | 6,27 | 4,52 | 2,20 |
|      | 2,83 | 2,02 | 1,31 |      | 4,21 | 2,93 | 1,58 |      | 3,80 | 3,31 | 1,64 |      | 4,37 | 3,08 | 1,77 |      | 6,73 | 4,71 | 2,22 |
|      | 2,86 | 2,65 | 1,27 |      | 3,12 | 3,39 | 1,33 |      | 4,64 | 3,21 | 1,56 |      | 4,33 | 3,39 | 1,89 |      | 5,75 | 4,21 | 2,39 |
|      | 2,61 | 2,01 | 1,21 |      | 3,96 | 2,99 | 1,49 |      | 4,19 | 3,79 | 1,84 |      | 4,94 | 3,74 | 1,89 |      | 6,25 | 4,16 | 2,41 |
|      | 2,86 | 2,56 | 1,36 |      | 3,75 | 2,86 | 1,49 |      | 3,95 | 3,50 | 1,70 |      | 4,35 | 3,64 | 1,88 |      | 6,34 | 4,42 | 2,52 |
|      | 3,23 | 2,28 | 1,24 |      | 3,60 | 3,23 | 1,49 |      | 4,31 | 3,50 | 1,88 |      | 4,01 | 3,90 | 1,84 |      | 6,98 | 5,01 | 2,46 |
|      | 2,49 | 2,47 | 1,28 |      | 3,92 | 3,28 | 1,55 |      | 3,67 | 3,42 | 1,72 |      | 4,35 | 3,89 | 2,06 |      | 5,22 | 4,11 | 2,39 |
|      | 3,08 | 2,28 | 1,25 |      | 3,80 | 2,77 | 1,67 |      | 5,02 | 3,12 | 1,72 |      | 4,30 | 2,96 | 2,03 |      | 5,72 | 4,52 | 2,45 |
|      | 2,50 | 2,33 | 1,10 |      | 4,19 | 2,98 | 1,59 |      | 4,23 | 3,20 | 1,77 |      | 4,15 | 3,86 | 2,01 |      | 6,83 | 4,25 | 2,32 |
|      | 3,32 | 2,47 | 1,36 |      | 3,31 | 2,82 | 1,62 |      | 3,58 | 3,17 | 1,73 |      | 5,01 | 3,89 | 1,90 |      | 6,45 | 4,31 | 2,47 |
|      | 3,36 | 2,67 | 1,23 |      | 3,92 | 2,84 | 1,66 |      | 3,91 | 2,97 | 1,64 |      | 4,77 | 3,62 | 1,94 |      | 6,34 | 4,23 | 2,30 |
|      | 2,83 | 2,55 | 1,28 |      | 3,59 | 3,38 | 1,48 |      | 3,85 | 3,02 | 1,66 |      | 4,82 | 3,84 | 1,91 |      | 6,06 | 4,76 | 2,40 |
|      | 2,72 | 2,26 | 1,17 |      | 3,05 | 3,10 | 1,64 |      | 4,00 | 3,79 | 1,87 |      | 4,62 | 3,42 | 1,92 |      | 6,69 | 4,76 | 2,40 |
|      | 2,78 | 1,97 | 1,42 |      | 3,77 | 2,77 | 1,56 |      | 3,90 | 3,57 | 1,80 |      | 4,54 | 4,09 | 1,83 |      | 6,42 | 4,72 | 2,59 |

## **Anexo B. Derivadas del error aplicando La Teoría de Errores**

### **B.1. Error del área**

$$A = l^2$$

$$\Delta A = \left| \frac{\partial A}{\partial l} \right| \cdot \Delta l$$

$$\Delta A = 2l \cdot \Delta l$$

Para las muestras de 6 cm de lado, el área es  $(36 \pm 4)$  cm<sup>2</sup>.

Para las muestras de 10 cm de lado, el área es  $(1,00 \pm 0,06)$  dm<sup>2</sup>.

### **B.2. Error del gramaje**

$$G = \frac{m}{A}$$

$$\Delta G = \left| \frac{\partial G}{\partial m} \right| \cdot \Delta m + \left| \frac{\partial G}{\partial A} \right| \cdot \Delta A$$

$$\Delta G = \frac{\Delta m}{A} + \frac{m}{A^2} \cdot \Delta A$$

Ya que el área es fija para todas las muestras, el error del gramaje nos queda de la siguiente forma:

$$\Delta G = \Delta m + 0,06m$$

### **B.3. Error de la masa húmeda en condiciones de laboratorio**

$$m_h = G \left[ \frac{g}{m^2} \right] \cdot A [cm^2] \cdot 10^{-4} \left[ \frac{m^2}{cm^2} \right]$$

$$\Delta m_h = \left| \frac{\partial m_h}{\partial G} \right| \cdot \Delta G + \left| \frac{\partial m_h}{\partial A} \right| \cdot \Delta A$$

$$\Delta m_h = A \cdot 10^{-4} \cdot \Delta G + G \cdot 10^{-4} \cdot \Delta A$$

Sustituimos los valores del área y su error, ya que estos van a ser constantes para todas las muestras y nos queda:

$$\Delta m_h = (36 \cdot \Delta G + 4 \cdot G) \cdot 10^{-4}$$

### **B.4. Error de la masa seca**

$$m_s = m_h \cdot \left( 1 - \frac{w(\%)}{100} \right)$$

$$\Delta m_s = \left| \frac{\partial m_s}{\partial m_h} \right| \Delta m_h + \left| \frac{\partial m_s}{\partial w(\%)} \right| \Delta w(\%)$$

$$\Delta m_s = \left( 1 - \frac{w(\%)}{100} \right) \cdot \Delta m_h + \left( \frac{m_h}{100} \right) \cdot \Delta w(\%)$$

### **B.5. Error de la masa húmeda de cada punto**

$$m_h = \frac{m_s}{\left(1 - \frac{w(\%)}{100}\right)}$$

$$\Delta m_h = \left| \frac{\partial m_h}{\partial m_s} \right| \Delta m_s + \left| \frac{\partial m_h}{\partial w(\%)} \right| \Delta w(\%)$$

$$\Delta m_h = \left( \frac{1}{1 - \frac{w(\%)}{100}} \right) \cdot \Delta m_s + \left( \frac{m_s}{100 \left(1 - \frac{w(\%)}{100}\right)^2} \right) \cdot \Delta w(\%)$$

### **B.6 Error del contenido de agua en el papel**

$$m_h - m_s = \frac{w}{100} \cdot m_h$$

$$\Delta(m_h - m_s) = \left| \frac{\partial(m_h - m_s)}{\partial w} \right| \cdot \Delta w + \left| \frac{\partial(m_h - m_s)}{\partial m_h} \right| \cdot \Delta m_h$$

$$\Delta(m_h - m_s) = \frac{m_h}{100} \cdot \Delta w + \frac{w}{100} \cdot \Delta m_h$$

$$\Delta(m_h - m_s) = \frac{m_h \cdot \Delta w + w \cdot \Delta m_h}{100}$$

### **B.7 Error del área total**

$$A_t = 2 \cdot l^2 + 4 \cdot e \cdot l$$

$$\Delta A_t = \left| \frac{\partial A_t}{\partial l} \right| \cdot \Delta l + \left| \frac{\partial A_t}{\partial e} \right| \cdot \Delta e$$

$$\Delta A_t = 4(l + e) \cdot \Delta l + 4l \cdot \Delta e$$

$$\Delta A_t = 4(0,06 + e) \cdot 4 \cdot 10^{-4} + 1,2 \cdot 10^{-5}$$

$$\Delta A_t = 1,08 \cdot 10^{-4} + 1,6e \cdot 10^{-6}$$

### **B.8 Error de $y_i$**

$$y_i = \frac{m_h - m_s}{A_t}$$

$$\Delta y_i = \left| \frac{\partial y_i}{\partial(m_h - m_s)} \right| \cdot \Delta(m_h - m_s) + \left| \frac{\partial y_i}{\partial A_t} \right| \cdot \Delta A_t$$

$$\Delta y_i = \frac{\Delta(m_h - m_s)}{A_t} + \frac{(m_h - m_s)}{A_t^2} \cdot \Delta A_t$$

### **B.9 Error de $F_{max}$**

$$F_{max}[N] = \sigma_c^b \left[ \frac{kN}{m} \right] \cdot 15 [mm] \cdot 1 \left[ \frac{N \cdot m}{kN \cdot mm} \right]$$

$$\Delta F_{max} = \left| \frac{\partial F_{max}}{\partial \sigma_c^b} \right| \cdot \Delta \sigma_c^b + \left| \frac{\partial F_{max}}{\partial h} \right| \cdot \Delta h$$

$$\Delta F_{max} = h \cdot \Delta \sigma_c^b + \sigma_c^b \cdot \Delta h$$

$$\Delta F_{max} = 15 \cdot \Delta \sigma_c^b + \sigma_c^b \cdot 0,1$$

### **B.10 Error de $\sigma_c$**

$$\sigma_c [MPa] = \frac{\sigma_c^b \left[ \frac{N}{mm} \right]}{e [mm]}$$

$$\Delta \sigma_c = \left| \frac{\partial \sigma_c}{\partial \sigma_c^b} \right| \cdot \Delta \sigma_c^b + \left| \frac{\partial \sigma_c}{\partial e} \right| \cdot \Delta e$$

$$\Delta \sigma_c = \frac{\Delta \sigma_c^b}{e} + \frac{\sigma_c^b}{e^2} \cdot \Delta e$$

### **B.11 Error factor de fuerza**

$$k = \frac{F_{seco \ o \ sat}}{F_{condiciones \ lab}}$$

$$\Delta k = \left| \frac{\partial k}{\partial F_{seco \ o \ sat}} \right| \cdot \Delta F_{seco \ o \ sat} + \left| \frac{\partial k}{\partial F_{condiciones \ lab}} \right| \cdot \Delta F_{condiciones \ lab}$$

$$\Delta k = \frac{\Delta F_{seco \ o \ sat}}{F_{condiciones \ lab}} + \frac{F_{seco \ o \ sat} \cdot \Delta F_{condiciones \ lab}}{F_{condiciones \ lab}^2}$$

### **B.12 Error de F/G**

$$\frac{F}{G} = \frac{F_{MD \ o \ CD}}{G}$$

$$\Delta \frac{F}{G} = \left| \frac{\partial F/G}{\partial F_{MD \ o \ CD}} \right| \cdot \Delta F_{MD \ o \ CD} + \left| \frac{\partial F/G}{\partial G} \right| \cdot \Delta G$$

$$\Delta \frac{F}{G} = \frac{\Delta F_{MD \ o \ CD}}{G} + \frac{F_{MD \ o \ CD}}{G^2} \cdot \Delta G$$

### **B.13 Error de MD/CD**

$$DDM = \frac{F_{MD}}{F_{CD}}$$

$$\Delta DDM = \left| \frac{\partial DDM}{\partial F_{MD}} \right| \cdot \Delta F_{MD} + \left| \frac{\partial DDM}{\partial F_{CD}} \right| \cdot \Delta F_{CD}$$

$$\Delta DDM = \frac{\Delta F_{MD}}{F_{CD}} + \frac{F_{MD}}{F_{CD}^2} \cdot \Delta F_{CD}$$



### Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se realiza una investigación para estudiar la influencia del gramaje del papel y la humedad ambiental en las propiedades mecánicas a compresión del papel Kraftliner, un papel de fibra usado en la fabricación de cartón corrugado para hacer cajas para envasar y comercializar productos agrícolas.

En el estudio experimental se han usado 5 papeles de gramajes distintos, todos ellos muy utilizados en la industria del papel y cartón para la agricultura. Tras una Caracterización básica de estos cinco papeles, se estudia en primer lugar la absorción de agua del papel en función del tiempo que permanece en una atmósfera de humedad relativa elevada. Luego se realizan los ensayos mecánicos de compresión en corto para tres niveles de humedad contenida en el papel, con el objetivo de ver la influencia del agua absorbida en las propiedades mecánicas. Los diferentes ensayos se realizan siguiendo la normativa vigente para papel y cartón. Los resultados muestran que el papel con condiciones de humedad relativa de 90% y 20 °C se satura en una hora. Cuando está saturado, el papel, independientemente del gramaje, pierde en torno al 50% de su resistencia a la compresión. Como todos los gramajes tienen la misma variación de resistencia mecánica en función de la humedad que contienen, se pueden calcular unos “factores de corrección” para tener en cuenta el efecto de la humedad relativa en los valores de resistencia a compresión en corto según la humedad que haya en el laboratorio cuando se hacen estos ensayos. Se han obtenido estos factores y se han comparado con los publicados en la bibliografía para otros papeles y condiciones experimentales.

### Abstract

This Degree Final Project deals with the investigation of the influence of the paper grammage and humidity in the compression mechanicals properties of the Kraftliner paper. This paper is a fiber based paper used in the manufacturing of corrugated fiberboard to make cardboard boxes, which are used to package and market agricultural products.

Five papers with different grammages have been used in this experimental study, all of them widely used in the agriculture paper and cardboard industry. After a basic characterization of the five papers, the paper water sorption is studied as a function of how long the paper is in a wet chamber at high relative humidity and constant temperature. In this environment the paper moisture content increases up to a certain saturation level. Once the paper water sorption is studied, standardized Short Compression Test are performed for three paper moisture levels. In this way, the influence of moisture in the paper mechanical properties is studied. All the experiments are conducted using European standards which apply for paper and cardboard.

The results show that the paper is saturated after around one hour at 90% relative humidity and 20 °C. When the paper is moisture saturated, regardless of its grammage, its compressive strength falls around 50%. Since the same variation of the compressive strength with the moisture level is obtained for all the grammages, “correction factors” have been calculated to take into account the laboratory relative humidity in the results of the Short Compression Test. The correction factors obtained in this project are also compared with other factors in the bibliography