



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA



EFFECTO DEL TRATAMIENTO ALCALINO DE LA FRACCIÓN DE RECHAZOS EN LAS PROPIEDADES DEL PAPEL DUO EN CPP SAN PEDRO DE LA PAZ

Por

Camila Paz Antonia Muñoz Oliva

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniera Civil Química.

Profesor Guía:

Miguel Ángel Pereira S.

Profesor Comisión:

Johanna Castaño.

Profesional Supervisor:

Luis Carrasco Ch.

Diciembre 2025

Concepción (Chile)

©2025 Camila Paz Antonia Muñoz Oliva

©2025 Camila Paz Antonia Muñoz Oliva

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Agradecimientos

Hoy, 17 de diciembre, miro hacia atrás y no puedo evitar emocionarme al pensar en que ya han pasado 6 años desde que ingresé a la universidad y con ello, recuerdo a muchas personas que estuvieron presentes. Por eso me gustaría agradecerles y dejarlo plasmado en esta tesis.

En primer lugar, agradezco a Dios por su amor y misericordia, por acompañarme día a día y por darme la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar con éxito esta etapa.

A mis padres, Claudia y Pedro, quienes fueron y son mis pilares fundamentales. Les agradezco por su apoyo incondicional, por los valores entregados, por creer en mí y cada día recordarme que soy capaz de esto y mucho más. Los amo y sin ustedes esto no habría sido posible.

A mis hermanos Geraldine y Samuel, a mi cuñado Jorge, y a mis sobrinos Agustina y Lucas, quienes con su compañía y cariño llenan mis días de alegría, y fueron un apoyo fundamental para mantener la motivación de continuar y nunca rendirme.

A mi Rayencita, mi hermana de corazón, por su apoyo incondicional, porque aun estando a distancia siempre estuvo presente, con palabras de ánimo, con algún chiste o alguna historia tragicómica que lograba alegrar mis días.

A mis pastores Jorge y Eva. Por sus oraciones, guía y apoyo espiritual.

A mis amigas de la Universidad, especialmente Javiera, Nicol y Angélica, por esos días, tardes y noches de estudio compartido, por las risas, anécdotas y el compañerismo, que hicieron de esta etapa una experiencia más llevadera y significativa.

A los profesores, compañeros y asistentes del Departamento de Ingeniería Civil Química. Especialmente destaco el apoyo de Don Tito, Carlita y el profesor Miguel Pereira, quienes fueron fundamentales para el desarrollo de mi memoria de título.

Finalmente, a la empresa CPP San Pedro de la Paz por brindarme la oportunidad de desarrollar en primer lugar mi práctica profesional y luego mi memoria de título. Al equipo de operaciones y personal de laboratorio, quienes siempre estuvieron prestos a enseñar, apoyar y guiar. Especialmente agradezco a Daniela, Rina, Natalia, Mauricio, Don Luis y al turno C (incluyendo a Don Dani).

Resumen

El presente estudio se centra en analizar, mediante ensayos de laboratorio, los efectos de la modificación del tratamiento alcalino aplicado a la fracción de rechazos de la pulpa mecánica sobre las propiedades del papel Duo, producido en la planta Papelera del Pacífico (CPP), ubicada en San Pedro de la Paz.

Se realizaron ensayos de laboratorio en los que se variaron la dosificación de soda cáustica, la temperatura del tratamiento y el tiempo de residencia sobre pulpa proveniente de la fracción de rechazos de pulpa mecánica. Para el estudio experimental se evaluaron tres niveles por factor: carga de soda de 4%, 5% y 6%; temperaturas de tratamiento de 70, 90 y 120 °C; y tiempos de residencia de 10, 20 y 30 min. Posteriormente, se fabricaron hojas de laboratorio y se midieron propiedades críticas para la evaluación de la calidad del papel Duo, tales como índice de tracción, índice de rasgado, resistencia a la explosión, SCT, porosidad y rigidez.

A partir del análisis gráfico y estadístico de los resultados se determinó que la carga de soda cáustica y la temperatura del tratamiento son los factores con mayor influencia sobre las propiedades evaluadas, generando cambios significativos principalmente en aquellas asociadas a la resistencia del papel, como el índice de tracción, el índice de rasgado, la explosión y el SCT. El análisis estadístico evidenció que la carga de soda es estadísticamente significativa para el índice de tracción y el SCT, el tiempo de residencia influye de manera significativa en la porosidad y la temperatura en la rigidez, mientras que propiedades como el índice de rasgado y la explosión no presentaron dependencia estadísticamente significativa respecto de los factores estudiados. Así mismo, el proceso de optimización permitió identificar que el ensayo N°12 logra optimizar el conjunto de propiedades evaluadas, con énfasis especialmente en el índice de tracción, el índice de rasgado y la rigidez, bajo condiciones de 5% de carga de soda, 70 °C de temperatura y 30 min de tiempo de residencia.

Finalmente, el análisis comparativo entre hojas elaboradas con pasta tratada bajo condiciones del óptimo señalado y hojas fabricadas con pasta proveniente del estanque TQ-5 demuestra que la modificación de las condiciones de proceso permite mejorar la calidad del papel. En función de estos resultados, se recomienda realizar una prueba a nivel industrial aplicando los ajustes en la dosificación de soda y en el tiempo de residencia, con el fin de validar que la modificación de los factores estudiados constituye una solución efectiva al problema planteado.

Abstract

This study focuses on analyzing, through laboratory tests, the effects of modifying the alkaline treatment applied to the mechanical pulp rejects fraction on the properties of Duo paper, produced at the Papelera del Pacífico (CPP) plant, located in San Pedro de la Paz.

Laboratory tests were conducted varying the caustic soda dosage, treatment temperature, and residence time were varied on pulp from the mechanical pulp reject fraction. For the experimental study, three levels were evaluated for each factor: caustic soda loading of 4%, 5%, and 6%; treatment temperatures of 70, 90, and 120 °C; and residence times of 10, 20, and 30 minutes. Subsequently, laboratory sheets were manufactured, and critical properties for evaluating the quality of Duo paper were measured, such as tensile strength, tear strength, burst strength, SCT, porosity, and stiffness.

Based on the graphical and statistical analysis of the results, it was determined that the caustic soda loading and the treatment temperature are the factors with the greatest influence on the evaluated properties, generating significant changes primarily in those associated with paper strength, such as tensile strength, tear strength, burst strength, and SCT. The statistical analysis shows that the soda loading is statistically significant for the tensile strength and SCT, residence time significantly influences porosity, and temperature influences stiffness, while properties such as tear strength and burst strength did not show a statistically significant dependence on the studied factors. Likewise, the optimization process identified that test No. 12 optimizes the set of evaluated properties, with particular emphasis on tensile strength, tear strength, and stiffness, under conditions of 5% soda loading, 70 °C, and a 30-minute residence time.

Finally, the comparative analysis between sheets manufactured with pulp treated under the specified optimal conditions and sheets manufactured with pulp from tank TQ-5 demonstrates that modifying the process conditions improves paper quality. Based on these results, it is recommended that an industrial-scale trial applying the adjustments to the caustic soda dosage and residence time to validate that modifying the studied factors constitutes an effective solution to the problem.

Índice

1. Introducción.....	16
2. Objetivos.	20
2.1 Objetivo general.	20
2.2 Objetivos específicos.	20
3. Materiales y Metodología	21
3.1 Levantamiento de datos operacionales.....	21
3.2 Diseño experimental.....	22
3.3 Trabajo en laboratorio de productos forestales (LPF) Udec.....	22
3.3.1 Caracterización y manejo de materia prima	22
3.3.2 Preparación de soda cáustica	23
3.3.3 Preparación de pulpa para ensayos.....	23
3.3.4 Pulpa en reactor	24
3.3.5 Refinado de pulpa.....	24
3.4 Trabajo en laboratorio central planta CPP San Pedro de la Paz	25
3.4.1 Medición de consistencia, CSF y análisis Fiber tester.....	25
3.4.2 Formación de hojas de laboratorio	26
3.5 Trabajo en laboratorio de productos terminados planta CPP San Pedro de la paz	27
3.5.1 Medición de propiedades del papel	27
3.6 Análisis estadístico	30
3.7 Elaboración de hojas con mezcla de pulpas (pasta)	30
3.8 Elaboración de hojas con pasta del estanque TQ-5	31
3.9 Revisión de datos de planta	32
4. Resultados y discusión.....	33
4.1 Datos operacionales.....	33
4.1.1 Prensa estrujadora.....	33
4.1.2 Estanque de soda cáustica	33
4.1.3 Digestor	34
4.1.4 Refinador.....	34
4.2 Resultados de las propiedades medidas.....	35
4.2.1 Índice de tracción	35
4.2.2 Índice de rasgado.....	36
4.2.3 Resistencia a la explosión.....	37
4.2.4 Short Compresion Test	38
4.2.5 Porosidad.....	39

4.2.6 Rigidez.....	40
4.3 Análisis estadístico	41
4.3.1 Estadística descriptiva	41
4.3.1 Resultado estadístico de índice de tracción	42
4.3.2 Resultado estadístico de índice de rasgado	42
4.3.3 Resultado estadístico de la resistencia a la explosión.....	43
4.3.4 Resultado estadístico de SCT	43
4.3.5 Resultado estadístico de porosidad.....	43
4.3.6 Resultado estadístico de rigidez	44
4.4 Verificación de supuestos Anova.....	45
4.5 Optimización de cada propiedad	45
4.6 Optimización general de las propiedades	46
4.7 Comparación entre resultado de laboratorio y datos de planta.....	46
4.8 Comparación de propiedades medida a hojas hechas con pasta elaborada en laboratorio y hojas de TQ-5.....	48
5. Conclusiones y recomendaciones	50
5.1 Conclusiones	50
5.2 Recomendaciones.....	51
6. Referencias	52
7. Anexos	54
7.1 Anexo 1: Equipos de planta.....	54
7.2 Anexo 2: Datos de diseño de experimento	55
7.3 Anexo 3: Caracterización de la materia prima	56
7.3.1 Fórmulas para obtener la humedad y consistencia de la pulpa.....	56
7.3.2 Resultados de humedad y consistencia.....	57
7.3.3 Fórmulas para obtener la masa requerida para cada ensayo.....	57
7.4 Anexo 4: Cálculo de carga de soda.....	57
7.5 Anexo 5: Preparación soda cáustica.	58
7.6 Anexo 6: Preparación de pulpa para ensayos	59
7.7 Anexo 7: Equipos utilizados en el laboratorio LPF	60
7.7.1 Reactor.....	60
7.7.2 Refinador.....	60
7.8 Anexo 8: Formación de hojas	62
7.8.1 Equipos utilizados en la formación de hojas.	63
7.10 Anexo 10: Resultados.....	66

7.10.1 Planilla con resultados de medición de propiedades	66
7.10.2 Pruebas de múltiples rangos	67
7.11 Anexo 11: Verificación de supuestos Anova.....	73
ANEXO D: FORMATO RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO	85

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama preparación pulpa mecánica. Fuente: Elaboración propia	17
Figura 2. Área de refinación del rechazo. Elaboración propia.	18
Figura 3. Estructura del cartón. Fuente: Quiminet.	19
Figura 4. Prensa estrujadora (sunds).	33
Figura 5. Estanque de soda cáustica.	33
Figura 6. Digestor fábrica pulpa.	34
Figura 7. Refinador Fábrica de pulpa.	34
Figura 8. Gráfico del comportamiento del índice de tracción en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.	36
Figura 9. Gráfico del comportamiento del índice de rasgado en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.	37
Figura 10. Gráfico del comportamiento de la explosión en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.	38
Figura 11. Gráfico del comportamiento del SCT en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.	39
Figura 12. Gráfico del comportamiento de la porosidad en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.	40
Figura 13. Gráfico del comportamiento de la rigidez en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.	41
Figura 14. Gráfico comparativo del índice de tracción entre fabricaciones de papel Duo y Onda del año 2025 con el Ensayo 12. Fuente: Elaboración propia	47
Figura 15. Gráfico comparativo del índice de rasgado entre fabricaciones de papel Duo y Onda del año 2025 con el Ensayo 12. Fuente: Elaboración propia	47
Figura 16. PGW utilizado para el desfibrado de la madera. Fuente: Autocapacitación CPP.	54
Figura 17. Equipos del área de refinación de rechazos.	54
Figura 18. Muestras de pulpa para medir humedad.	56
Figura 19. Preparación de soda cáustica.	58
Figura 20. Pulpa con agua de proceso en volumen de 3,5 litros.	59
Figura 21. Pulpa disgregada en agitador eléctrico.	59

Figura 22. Reactor de 10 litros.....	60
Figura 23. Pulpa en el reactor.....	60
Figura 24. Refinador de discos.....	60
Figura 25. Parte interna del refinador (discos).....	60
Figura 26. Uso de refinador.....	61
Figura 27. Equipo para análisis Cannadian Standard Freeness.....	61
Figura 28. Pulpa envasada.....	61
Figura 29. Pulpa diluida para formar hojas.	62
Figura 30. Hojas formadas.	62
Figura 31. Hojas secas.....	62
Figura 32. Formador de hojas.	63
Figura 33. Secador de hojas.	63
Figura 34. Dinamómetro Alwetron SE-60 Elab/318.....	64
Figura 35. Tearing tester.....	64
Figura 36. Explosímetro Mullen Elab/351	64
Figura 37. Medidor de resistencia a la compresión en corto SCT Elab/347	65
Figura 38. Medidor porosidad tester L&W Bendtsen Elab/337.....	65
Figura 39. Medidor de rigidez Táber Elab/214	65
Figura 40. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de índice de tracción. Fuente: Statgraphics.	74
Figura 41. Gráfica para comprobar independencia del índice de tracción. Fuente: Statgraphics.	74
Figura 42. Gráfica para comprobar homocedasticidad del índice de tracción. Fuente: Statgraphics.	75
Figura 43. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de índice de rasgado. Fuente: Statgraphics.	76
Figura 44. Gráfica para comprobar independencia del índice de rasgado. Fuente: Statgraphics.	76
Figura 45. Gráfica para comprobar homocedasticidad del índice de rasgado. Fuente: Statgraphics.	77
Figura 46. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de explosión. Fuente: Statgraphics.	77
Figura 47. Gráfica para comprobar independencia de explosión. Fuente: Statgraphics.	78
Figura 48. Gráfica para comprobar homocedasticidad de explosión. Fuente: Statgraphics.	78
Figura 49. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de SCT. Fuente: Statgraphics.	79
Figura 50. Gráfica para comprobar independencia de SCT. Fuente: Statgraphics.....	80
Figura 51. Gráfica para comprobar homocedasticidad de SCT. Fuente: Statgraphics.....	80

Figura 52. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de rigidez. Fuente: Statgraphics.	81
Figura 53. Gráfica para comprobar independencia de rigidez. Fuente: Statgraphics.....	81
Figura 54. Gráfica para comprobar homocedasticidad de rigidez. Fuente: Statgraphics.....	82
Figura 55. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de porosidad. Fuente: Statgraphics....	83
Figura 56. Gráfica para comprobar independencia de porosidad. Fuente: Statgraphics.....	83
Figura 57. Gráfica para comprobar homocedasticidad de porosidad. Fuente: Statgraphics.	84

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen estadístico de las propiedades medidas a las hojas de laboratorio correspondientes a las corridas experimentales.....	41
Tabla 2. Análisis Anova del índice de tracción.	42
Tabla 3. Análisis Anova del índice de rasgado.	42
Tabla 4. Análisis Anova de explosión	43
Tabla 5. Análisis Anova de SCT.....	43
Tabla 6. Ensayos correspondientes a datos atípicos.	44
Tabla 7. Análisis Anova de Porosidad.	44
Tabla 8. Análisis Anova de Rigidez.....	44
Tabla 9. Optimización de cada propiedad y las condiciones para alcanzar su optimización	46
Tabla 10. Comparación de los resultados de las propiedades medidas en las hojas hechas en el laboratorio de pasta modificada bajo las condiciones del ensayo 12 con hojas de pasta del estanque TQ-5.	49
Tabla 11. Niveles de variables estudiadas.	55
Tabla 12. Diseño de experimento.	55
Tabla 13. Datos de muestreo para obtener humedad.....	56
Tabla 14. Humedad y consistencia de cada muestra.	57
Tabla 15. Resultados de las propiedades medidas a las hojas de laboratorio.....	66
Tabla 16. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para el índice de tracción.	67
Tabla 17. Significancia en los contrastes de concentración de soda cáustica para el índice de tracción con un 95% de confianza.....	67
Tabla 18. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para el índice de tracción.....	67
Tabla 19. Significancia en los contrastes de temperatura para el índice de tracción con un 95% de confianza.	67
Tabla 20. Prueba de múltiples rangos de tiempo para el índice de tracción.....	68
Tabla 21. Significancia en los contrastes de tiempo para el índice de tracción con un 95% de confianza.	68
Tabla 22. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para el índice de rasgado.	68

Tabla 23. Significancia en los contrastes de concentración de soda cáustica para el índice de rasgado con un 95% de confianza.	68
Tabla 24. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para el índice de rasgado.	68
Tabla 25. Significancia en los contrastes de temperaturas para el índice de rasgado con un 95% de confianza.	68
Tabla 26. Prueba de múltiples rangos de tiempo para el índice de rasgado.	69
Tabla 27. Significancia en los contrastes de tiempo para el índice de rasgado con un 95% de confianza.	69
Tabla 28. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para la explosión.	69
Tabla 29. Significancia en los contrastes de concentración para la explosión con un 95% de confianza.	69
Tabla 30. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para la explosión.....	69
Tabla 31. Significancia en los contrastes de temperatura para la explosión con un 95% de confianza.	69
Tabla 32. Prueba de múltiples rangos de tiempo para la explosión.	70
Tabla 33. Significancia en los contrastes de tiempo para la explosión con un 95% de confianza. ...	70
Tabla 34. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para el SCT.....	70
Tabla 35. Significancia en los contrastes de concentración de soda cáustica para el SCT con un 95% de confianza.....	70
Tabla 36. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para el SCT.	70
Tabla 37. Significancia en los contrastes de temperatura para el SCT con un 95% de confianza. ...	70
Tabla 38. Prueba de múltiples rangos de tiempo para el SCT.....	71
Tabla 39. Significancia en los contrastes de tiempo para el SCT con un 95% de confianza.	71
Tabla 40. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para la rigidez.....	71
Tabla 41. Significancia en los contrastes de concentración de soda cáustica para la rigidez con un 95% de confianza.	71
Tabla 42. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para la rigidez.	71
Tabla 43. Significancia en los contrastes de temperatura para la rigidez con un 95% de confianza. 71	
Tabla 44. Prueba de múltiples rangos de tiempo para la rigidez.	72
Tabla 45. Significancia en los contrastes de tiempo para la rigidez con un 95% de confianza.	72
Tabla 46. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para la porosidad.	72

Tabla 47. Significancia en los contrastes de concentración de soda cáustica para la porosidad con un 95% de confianza.	72
Tabla 48. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para la porosidad.	72
Tabla 49. Significancia en los contrastes de temperatura para la porosidad con un 95% de confianza.	73
Tabla 50. Prueba de múltiples rangos de tiempo para la porosidad.	73
Tabla 51. Significancia en los contrastes de tiempo para la porosidad con un 95% de confianza....	73
Tabla 52. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para índice de tracción.	74
Tabla 53. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para índice de rasgado.	76
Tabla 54. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para explosión.	78
Tabla 55. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para SCT	79
Tabla 56. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para rigidez.	81
Tabla 57. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para porosidad.	83

Nomenclatura

Símbolo/abreviatura	Descripción	Unidad
CPP	Compañía papelera del pacífico	-
TAPPI	Asociación Técnica de la Industria de la Pulpa y el Papel	-
DKL	Double Kraft Liner (Cartón reciclado)	-
PGW	Pressurized Groundwood	-
CL	Clasificador de la fábrica de pulpa	-
TQ	Estanque	-
CS	Consistencia	%
M_{TS}	Masa total seca	g
M_F	Masa de filtro seco	g
M_M	Masa de muestra	g
CSF	Canadian Standard Freeness	ml
P_h	Pulpa húmeda	g
M_A	Masa de pulpa aceptada	g
M_R	Masa de pulpa refinada	g
M_{PM}	Masa de pulpa mecánica	g
M_{DKL}	Masa de pulpa de DKL	g
H	Humedad	%
M_{HB}	Masa húmeda de la muestra con bandeja	g
M_{SB}	Masa seca de la muestra con bandeja	g
M_S	Masa seca de pulpa	g
M_H	Masa húmeda de pulpa	g
CS_r	Consistencia requerida	%
V	Volumen	ml
M_{HCSF}	Masa húmeda para realizar CSF	g
M_{HFT}	Masa húmeda para realizar Fiber Tester	g

1. Introducción

La industria del papel desempeña un rol estratégico en la economía mundial y chilena, siendo un componente esencial en sectores como el embalaje, la logística y la distribución de bienes de consumo. La creciente relevancia de los papeles para corrugado se refleja en las proyecciones del mercado global de cajas de cartón corrugado, estimado en USD 162,82 mil millones en 2023 y con un crecimiento esperado a USD 230,64 mil millones para 2030 (*Corrugated Boxes Market Size, s. f.*).

El papel se presenta como una alternativa ambientalmente más amigable frente a otras opciones como, por ejemplo, el plástico. Al ser biodegradable, reciclable y derivado de recursos renovables, contribuye a reducir el impacto ambiental de los envases y embalajes. En este contexto, cada día la exigencia de generar papeles de calidad aumenta, colocando a las empresas fabricantes a enfrentar desafíos operacionales y estratégicos relacionados con la eficiencia productiva, la optimización de recursos y la innovación tecnológica, con el fin de satisfacer las demandas del mercado.

En Chile, la Compañía Papelera del Pacífico (CPP) es una empresa dedicada a la fabricación de diferentes tipos de papeles para el mercado de envases y embalajes, utilizando fibras recicladas y vírgenes. Cuentan con dos plantas papeleras en Chile, lo que les permite poder estar más cerca de sus clientes y tener una mayor capacidad de producción anual, alcanzando las 210.000 toneladas de papel. (*Quiénes Somos - Cpp, 2025*).

El presente estudio se enfoca en la planta CPP San Pedro, en donde la producción de papeles se sustenta en una mezcla de tres tipos de pulpas. En primer lugar, la pulpa mecánica, obtenida a partir de un proceso mecánico-químico aplicado a madera de pino radiata. En segundo lugar, la pulpa de cartón reciclado (DKL), proveniente del reprocesamiento de fibras. Y, finalmente, la pulpa de recorte, generada a partir de los mismos papeles fabricados en planta que no cumplen los estándares físico-mecánicos exigidos por los clientes. La mezcla de estas tres pulpas genera la pasta utilizada en la fabricación de papeles Duo y Onda por medio de la máquina papeleras.

La pulpa mecánica representa cerca del 50% de la pasta utilizada en la fabricación de papeles, por lo que desempeña un rol fundamental dentro del proceso productivo. Su obtención comprende cuatro etapas principales, ver Figura 1. En primer lugar, se realiza el desfibrado, proceso que consiste en desintegrar la madera, mediante la tecnología PGW, método presurizado que hace uso de piedras giratorias (Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático, 2006). Ver Figura 17 (Anexo 1).

Posteriormente, la pulpa pasa a la etapa de clasificación, donde cinco clasificadores (CL) separan el material en dos partes: el aceptado, correspondiente a la pulpa que presenta las condiciones físicas adecuadas, y pasa directo a la etapa de espesado. La otra parte es el rechazo, que corresponde a la fracción más gruesa de pulpa y que requiere un tratamiento adicional de refinación, cuyo objetivo es mejorar las características de las fibras que no cumplen los criterios iniciales. Finalmente, el proceso concluye con el espesado, en donde a través de dos filtros Dorr Oliver se extrae parte del agua contenida en la pulpa, elevando su consistencia hasta aproximadamente 4,5% (Rojas, C. 2020).

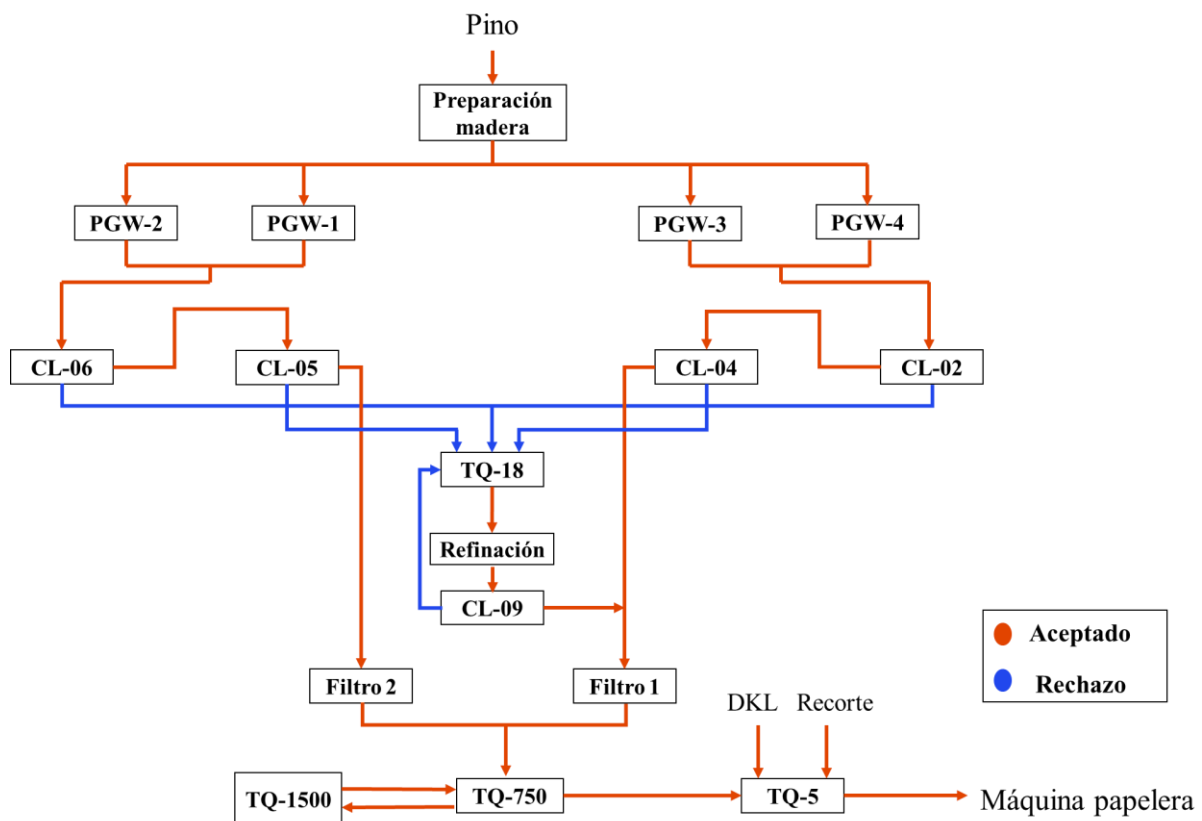


Figura 1. Diagrama de preparación pulpa mecánica.

Fuente: Elaboración propia

La refinación del rechazo es una etapa esencial dentro del proceso (ver Figura 2) y está compuesta por ocho equipos principales, entre los que destacan una prensa estrujadora (sunds), un digestor y un refinador. La pulpa ingresa a la prensa con una consistencia de 3-4% y sale por el tornillo disgregador ubicado en la parte superior de la prensa, a una consistencia de 35-40%. Luego, la pulpa se envía al digestor, donde se incrementa su temperatura y se hidrata mediante la inyección de vapor a baja presión.

En esta condición, la pulpa llega al refinador a través de un tornillo alimentador lateral y un tornillo alimentador interno. En el refinador, la pulpa es sometida a la acción de dos discos: uno giratorio unido al rotor y otro fijo al estator, que permiten realizar el proceso de refinación. En este proceso, las fibras experimentan una fibrilación externa e interna, lo que provoca la formación de finos y el acortamiento de las fibras. Como resultado, la fibra adquiere mayor flexibilidad y resistencia mecánica (Soza & González, s.f.).

Una vez refinada, la pulpa ingresa al clasificador 9, en donde nuevamente se separa el aceptado del rechazo. El aceptado continúa su flujo hacia el filtro Door 1, mientras que el rechazo se dirige al estanque TQ-18, donde se reinicia el ciclo. En la Figura 17 (Anexo 1) se muestran los equipos de planta.

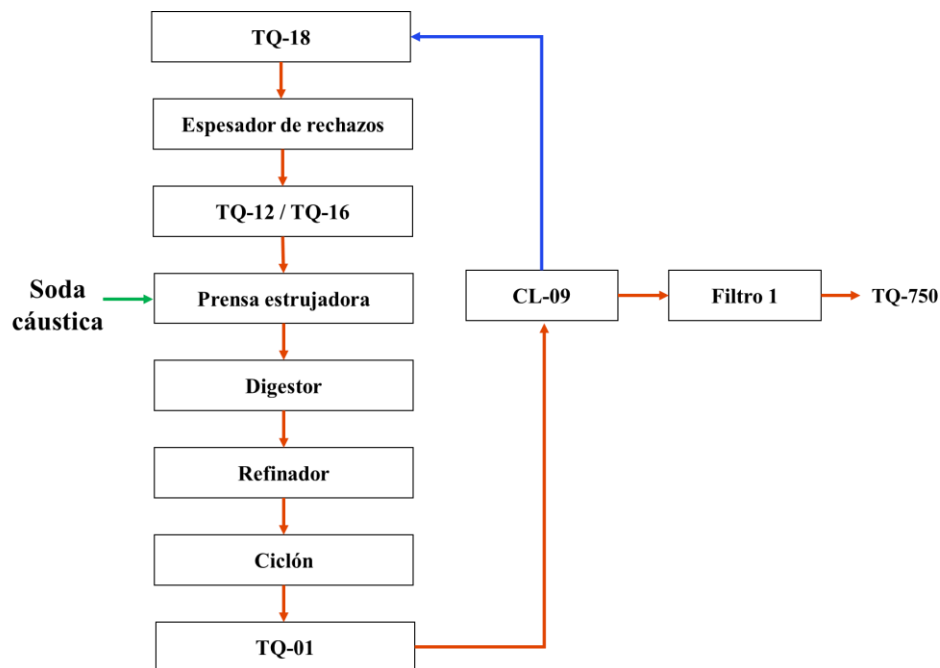


Figura 2. Área de refinación del rechazo.
Elaboración propia.

En la industria del cartón corrugado, los papeles utilizados cumplen funciones específicas que determinan las exigencias mecánicas y de calidad a las que deben responder durante su fabricación y uso final. En este contexto, en la planta CPP de San Pedro se elaboran actualmente dos tipos de papeles: papel Onda HP y papel Duo Light, ambos destinados a la fabricación de cartón corrugado, pero con funciones y requerimientos distintos dentro del envase, tal como se muestra en la Figura 3.

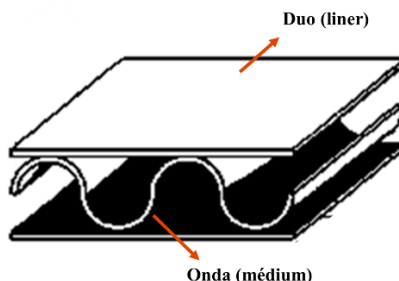


Figura 3. Estructura del cartón.

Fuente: Quiminet.

El papel Onda se utiliza como elemento estructural, aportando rigidez y mejorando la capacidad de compresión al cartón corrugado. En contraste, el papel Duo es fabricado con la finalidad de poder ser usado como Onda y liner, es decir, como capa externa del cartón, lo que implica mayores exigencias en términos de resistencia mecánica, en el proceso de fabricación como también en la conversión, en donde se realizan procesos como impresión, troquelado, plegado y encolado, para la formación de la plancha de cartón.

Desde el punto de vista del proceso productivo en CPP, ambos papeles se fabrican a partir de pulpa mecánica de pino y fibras recicladas. Sin embargo, una diferencia relevante en la fabricación del papel Duo es la aplicación de un tratamiento alcalino con hidróxido de sodio (NaOH), más conocido como soda cáustica, a la fracción de rechazos de la pulpa mecánica. Este tratamiento tiene por objetivo modificar las características de la fibra, mejorando la flexibilidad, mediante el hinchamiento y cambios generados en la estructura de su pared (Yun Ji, 2018).

En la operación industrial se ha identificado un problema que afecta directamente el prestigio de la empresa, en base a la calidad de sus productos. Cuando el papel Duo es utilizado como liner en el proceso de conversión, este tiende fácilmente a rasgarse en el liner interno, fenómeno determinado como “liner partido”. Frente a esta problemática la propuesta de investigación es analizar el comportamiento de la pulpa y luego de la pasta frente a la modificación de 3 variables de proceso, carga de soda cáustica, temperatura de la pulpa al momento del tratamiento alcalino y el tiempo de residencia que tiene la soda en contacto con la pulpa, sobre el tratamiento aplicado a la fracción de rechazos, considerando distintos niveles para cada factor.

El análisis de estas variables busca establecer condiciones de operación que permitan mejorar las propiedades medibles asociadas al problema de liner partido, tales como la rigidez, la tracción y la resistencia al rasgado y a la explosión.

2. Objetivos.

2.1 Objetivo general.

Construir un plan operacional mediante un estudio de variables críticas de proceso de la fracción de rechazo de la pulpa mecánica para mejorar las propiedades del papel Duo, debido a los problemas del liner partido.

2.2 Objetivos específicos.

1. Determinar, mediante ensayos de laboratorio, el efecto de la carga de soda cáustica, tiempo de residencia y temperatura sobre las propiedades de la pulpa obtenida de la fracción de rechazos.
2. Establecer los límites operacionales en el subproceso estudiado.
3. Elaborar propuesta de mejora operativa para lograr el óptimo experimental.

3. Materiales y Metodología

A continuación, se aborda la metodología de trabajo que se utilizó para el análisis de la mejora en las propiedades del papel Duo. Empezando por el levantamiento de datos operacionales de la planta, seguido por la construcción de un diseño experimental, y luego todo el trabajo realizado en el laboratorio, terminando con un análisis estadístico y comparativo con datos de planta.

3.1 Levantamiento de datos operacionales

Para caracterizar el comportamiento del sistema y evaluar la influencia de los factores operacionales, se recopiló información directamente en planta, con énfasis en los equipos pertenecientes al área de interés. El objetivo fue identificar las condiciones actuales de operación en términos de carga de soda, temperatura y tiempo de residencia. Esto se llevó a cabo en terreno mediante la observación y medición de las variables del proceso, y se complementó con información extraída desde la autocapacitación, material de estudio de la planta, también de las pantallas de la sala de control y con antecedentes sobre el modo de operación, proporcionados por los operadores del área.

A continuación, se detalla el procedimiento utilizado para la obtención de cada variable:

- Carga de soda: Se observaron las pantallas de la sala de control durante las fabricaciones de papel Duo, en donde se indica la carga específica y el flujo de soda cáustica en (kg_{soda}/ton_{pulpa}) y en (l/min) respectivamente, por medio de sensores de flujo, también se consultó a los operadores y jefes de turno cuáles eran los valores que se usaban en la operación regularmente.
- Temperatura de la pulpa: En la prensa estrujadora, donde se dosifica la soda, no se dispone de un sistema de medición de temperatura en línea. Por esta razón, se realizó la medición en terreno, extrayendo muestra de pulpa, determinando su temperatura mediante un termómetro.
- Tiempo de residencia: Para medir el tiempo de residencia de la soda en la pulpa previo al refinado, era necesario medir cuánto tiempo transcurría desde que la pulpa sale de la prensa hasta que llega al refinador. Esto se realizó aprovechando la instancia cuando la fábrica de pulpa se encontraba fuera de servicio, es decir, cuando no había flujo en las líneas ni en los equipos.

Una vez reiniciada la operación, se procedió a abrir las válvulas dejando pasar flujo desde los PGW en adelante, cuando el flujo llegó a la prensa, se esperó el llenado de la tina del equipo y que el flujo llegara a 1800 l/min, condición que indica que ya comenzó a pasar flujo por el tornillo disgregador, elemento encargado de transportar la pulpa hacia la salida del equipo y en el cual se realiza la

aplicación de la soda a la pulpa. En ese momento, se inició la medición del tiempo usando un cronómetro, realizando el seguimiento a través de las pantallas de la sala de control. Finalmente, cuando el flujo llegó al refinador, evento identificado por un sensor de flujo, se detuvo el cronómetro, obteniéndose así el tiempo de residencia correspondiente.

3.2 Diseño experimental

Con el propósito de evaluar el efecto del tratamiento alcalino en la fracción de rechazos de la fábrica de pulpa en las propiedades del papel Duo, y teniendo como base los datos de planta, se diseñó un experimento utilizando un diseño de superficie de respuesta (RSM), con el fin de modelar y optimizar las condiciones de operación.

Las variables analizadas en el estudio fueron: carga de soda cáustica (% p/p respecto a la pulpa), correspondiente a la dosificación de hidróxido de sodio; temperatura (°C), a la cual se llevó a cabo el tratamiento alcalino; y tiempo de residencia (min), definido como el tiempo de contacto de la pulpa con la solución alcalina previo al refinado. Para cada variable se seleccionaron tres niveles de operación, detallados en la Tabla 11 (Anexo 2), definidos a partir de experiencias operacionales en planta, restricciones propias del proceso y antecedentes bibliográficos. En donde, por ejemplo, se indica que a cargas mayores a 6% de soda cáustica, la fibra comienza a degradarse, disminuyendo propiedades de resistencia (Yun Ji, 2018).

De lo anterior, resultó un diseño cúbico 3^3 , generando 27 corridas experimentales. El diseño completo del experimento se presenta en la Tabla 12 (Anexo 2).

Como variables dependientes se midieron las propiedades del papel Duo: índice de tracción, índice de rasgado, resistencia a la explosión, SCT, porosidad y rigidez. Siendo estas las propiedades críticas para definir la calidad del papel liner (Cepi Container Board, 2014).

3.3 Trabajo en laboratorio de productos forestales (LPF) Udec

3.3.1 Caracterización y manejo de materia prima

La materia prima para el desarrollo de los ensayos fue suministrada por la empresa. Se trasladaron desde la planta 20 kilos de pulpa de la fracción de rechazo y 100 litros de agua de proceso. La pulpa fue muestreada a la salida de la prensa estrujadora y desde el estanque de agua recirculada TQ-10, el agua de proceso.

En primera instancia, en el laboratorio se determinó la humedad de la pulpa, para lo cual se tomaron nueve muestras, como se presenta en la Figura 18 (Anexo 3). Cada muestra fue pesada en un inicio y posteriormente secada en una estufa a 105°C durante 4 horas. Una vez alcanzado el peso constante de las muestras, estas fueron retiradas y nuevamente pesadas. Con los datos obtenidos, presentados en la Tabla 13 (Anexo 3), se calculó el contenido de humedad, con la ecuación 1 (Anexo 3) y, a partir de este valor, se determinó la consistencia de la pulpa, usando la ecuación 2 (Anexo 3), lo que permitió establecer la masa necesaria para cada ensayo.

Luego, con el dato de la masa de pulpa requerida, se dividió el volumen total en bolsas pequeñas de plástico, con el fin de poder refrigerarlas para evitar la proliferación de hongos. También, al agua de proceso se le agregaron 50 gotas de cloro para poder conservarla sin microorganismos.

3.3.2 Preparación de soda cáustica

A partir de perlas de soda cáustica se prepararon 250 ml de una solución con una concentración del 50%, tal como se muestra en la Figura 19 (Anexo 5), con el objetivo de reproducir la misma concentración del químico utilizado en planta. Para su elaboración, se pesaron 190,6 g de soda cáustica sólida, los cuales se disolvieron inicialmente en un vaso precipitado y luego en un matraz aforado, completando el volumen con agua destilada. Durante la preparación, se utilizó un agitador magnético para asegurar la homogeneidad de la solución, la que finalmente se trasvasió a un frasco para reactivos.

3.3.3 Preparación de pulpa para ensayos

En el proceso de planta la pulpa tratada en la etapa de refinación llega al clasificador 9 a una consistencia de 3,5% aproximadamente, por lo tanto, se decidió trabajar a esa consistencia para luego hacer la comparación entre los ensayos de laboratorio y los datos de planta.

Después de obtener la humedad y la consistencia, se calculó la cantidad de pulpa que se debía disgregar en un volumen de 3,5 litros de agua de proceso para obtener la consistencia deseada, utilizando las Fórmulas 3 y 4 presentadas en el Anexo 3. Después, la pulpa fue colocada en recipientes plásticos junto al agua de proceso, y con ayuda de un agitador se disgregó por un tiempo de media hora, tal como se muestra en las Figuras 20 y 21 (Anexo 6).

3.3.4 Pulpa en reactor

El reactor es el equipo en el cual se aplicaron las diferentes condiciones de operación correspondientes a las variables de estudio. Este consiste en un estanque de 10 litros, provisto de tres resistencias distribuidas a lo largo de su estructura y un sistema de aspas internas que permiten agitar la pulpa. En la Figura 22 (Anexo 7) se muestra el equipo utilizado.

En primera instancia, la pulpa se colocó en el reactor y se llevó a la temperatura deseada, ya sea 70, 90 o 120°C (temperaturas en estudio). Luego, se inyectó la cantidad de soda cáustica correspondiente a la concentración definida: 3,2 ml para 4%, 4,0 ml para 5% y 4,9 ml para 6%, el cálculo se muestra en el Anexo 4. Finalmente, justo después de la inyección de soda, se inicia la medición del tiempo de residencia con un cronómetro, considerando valores de 10, 20 o 30 min según corresponda. Una vez cumplido el tiempo establecido, la pulpa se retiró del equipo y se dispuso en un balde para llevarla al refinador.

3.3.5 Refinado de pulpa

En planta, el refinado del rechazo constituye una etapa esencial, ya que en este proceso la fibra alcanza las condiciones óptimas para continuar hacia la máquina papelera. En el laboratorio para poder replicar este proceso se utilizó un refinador de discos, el cual se muestra en la Figura 24 (Anexo 7).

La pulpa se vertió en el refinador de a poco sobre un tornillo de alimentación y fue recibida con un balde por la parte inferior del equipo, tal como se muestra en la Figura 26 (Anexo 7). Este proceso fue controlado mediante el análisis Canadian Standard Freeness (CSF), en donde después de un número de pasadas por el refinador se tomaba una muestra de 85,7 g de pulpa húmeda, con una consistencia de 3,5% y se realizaba el análisis, cuando este arrojaba un resultado entre 80 y 100 ml, la pulpa se envasaba en recipientes plásticos como se muestra en la Figura 28 (Anexo 7), de lo contrario, se le realizaban más pasadas por el refinador. La abertura entre discos (gap) se definió al inicio del estudio, el cual quedó fijo para todos los ensayos.

3.4 Trabajo en laboratorio central planta CPP San Pedro de la Paz

3.4.1 Medición de consistencia, CSF y análisis Fiber tester.

La pulpa se trasladó desde el laboratorio de la Universidad hasta el laboratorio central de la planta CPP para la fabricación de hojas. Previo a este proceso, se midieron nuevamente la consistencia y el CSF de la pulpa, con el fin de contar con datos más precisos en la fabricación de hojas.

En primera instancia se midió la consistencia de la pulpa, definida según TAPPI como el porcentaje en peso de sólidos secos presentes en una suspensión acuosa de fibras. El procedimiento se llevó a cabo conforme al método TAPPI T240, utilizando una masa de muestra comprendida entre 60 y 100g de pulpa. La muestra se diluyó aproximadamente en 200 ml de agua y posteriormente se vertió en un embudo de filtro al vacío sobre un papel filtro. Una vez extraída la mayor cantidad de agua, el papel filtro junto a la muestra húmeda se retiró del embudo y se colocó en una plancha secadora. Tras un

$$CS\% = \frac{M_{TS} - M_F}{M_M} * 100\% \quad (7)$$

tiempo aproximado de 10 min, la muestra se retiró, se dejó acondicionar a temperatura ambiente y se pesó, para finalmente aplicar la Fórmula (7) que permite obtener la consistencia.

Donde, CS es la consistencia de la pulpa y M_{TS} , M_F y M_M corresponden a las masas, total seca, de filtro seco y de la muestra, respectivamente.

Con el dato de la consistencia y usando la Fórmula 8, se obtiene la masa húmeda (M_{HCSF}) que se debe disponer para poder realizar el análisis CSF. Este análisis requiere de 3g seco de pulpa en 1 litro de agua a una temperatura de 20°C aproximadamente.

$$M_{HCSF}: 300/CS \quad (8)$$

El análisis CSF entrega la capacidad de drenaje que tiene la pulpa, dato directamente relacionado con el grado de refinación. Con este dato se pudo evidenciar que toda la pulpa tuvo el mismo tratamiento de refinación, variable que se controló para todos los ensayos.

El análisis Fiber tester permite conocer propiedades de la fibra luego del tratamiento aplicado. Mediante este ensayo es posible determinar la distribución de fibras largas, medianas y cortas, así como el largo y el ancho de las fibras.

Este análisis se realizó utilizando el equipo L&W Fiber Tester, y el procedimiento fue el siguiente: Para la medición se requiere 1 g de pulpa seca, por lo tanto, usando la Fórmula 9 se obtuvo la masa de pulpa húmeda (M_{HFT}) requerida para el análisis.

$$M_{HFT}: 100/CS \quad (9)$$

La muestra se diluyó en aproximadamente 1000 ml de agua industrial. Posteriormente, se extrajo un volumen entre 100 y 200 ml de la suspensión, el cual se transfirió a un vaso precipitado y se colocó en el carrusel cambiador de muestras del equipo. El equipo está conectado a un computador que permite configurar el tipo de informe que se requiere de cada muestra.

Al iniciar el análisis, el medidor aspira la muestra y la diluye a la concentración adecuada. La suspensión de fibra se bombea a través de una celda de medición y el equipo empieza a tomar fotos a las fibras, y luego de 10 min el reporte se visualiza en la pantalla del computador.

3.4.2 Formación de hojas de laboratorio

Se realizaron hojas de gramaje 100 g/m^2 , según la norma TAPPI T205. Para ello, se toman 2 gramos de pulpa seca, por ende, con el dato de la consistencia se obtiene la cantidad de pulpa húmeda que es necesaria para fabricar la hoja, tal como se muestra en la Fórmula 10.

$$P_h = \frac{200}{CS} \quad (10)$$

En donde P_h corresponde a la pulpa húmeda que se necesita pesar y CS es la consistencia de la pulpa.

Para cada ensayo de laboratorio se fabricaron 12 hojas, siguiendo el procedimiento descrito a continuación. Primero, se pesa la masa húmeda requerida en 12 jarrones. Luego se diluye la pulpa agregando agua, y la solución se vierte en la formadora de hojas, la cual se llena de agua hasta el límite establecido por el equipo. Mediante la inyección de burbujas la mezcla se distribuye de manera homogénea, y posteriormente se drena el agua dejando una capa delgada de pulpa sobre la malla que se encuentra en la parte inferior.

La hoja formada se extrae con ayuda de un papel filtro Ederol húmedo, un disco metálico, y una hoja de celulosa. A continuación, se baja la tapa de prensado para facilitar la extracción de agua; se espera aproximadamente 3 segundos, aplicando presión para que la hoja se desprenda de la malla. Con un movimiento rápido, la hoja se retira, quedando pegada al filtro Ederol, tal como se muestra en la Figura 30 (Anexo 8).

Luego las hojas se secan en los secadores *rapid kothen* que simulan el calor de la máquina papelera, durante 5 min. Finalmente, se obtiene una hoja de laboratorio de 200 cm^2 , como se observa en la Figura 31 (Anexo 8). Este procedimiento se replicó para los 27 ensayos, fabricando un total de 324 hojas.

3.5 Trabajo en laboratorio de productos terminados planta CPP San Pedro de la paz

El laboratorio de productos terminados es un lugar climatizado a 22°C y 52% de humedad, en este laboratorio se analizan cada uno de los tambores de papel que se fabrican en planta haciendo test de resistencia, color, rasgado, entre otros, con el fin de medir la calidad del papel fabricado.

Para el estudio realizado se midieron 6 propiedades: índice de tracción, índice de rasgado, resistencia a la explosión, SCT, porosidad y rigidez.

Todas las propiedades son medidas bajo los estándares TAPPI, normas utilizadas para garantizar la integridad de las pruebas que se realizan en papel y pulpa (TAPPI test methods T200-T1210, 1994-1995). A continuación, se detalla el procedimiento de la medición de cada una de las propiedades.

3.5.1 Medición de propiedades del papel

Antes de medir las propiedades de las hojas de laboratorio, estas debieron ser climatizadas, permaneciendo un mínimo de 2 horas en el laboratorio de productos terminados. Posteriormente, se determinó el gramaje pesando cinco hojas en la balanza analítica del laboratorio.

Entre los ensayos realizados a las hojas fabricadas en la máquina papelera y aquellos efectuados a las hojas de laboratorio existen diferencias, principalmente porque estas últimas no presentan orientación de fibra, lo cual influye en las propiedades de índice de tracción, Índice de rasgado y SCT. No obstante, los ensayos se realizaron igualmente, considerando dicha limitación.

3.5.1.1 Índice de tracción

El índice de tracción es una propiedad mecánica que mide la resistencia del papel a la tensión longitudinal y/o transversal. Representa la capacidad del papel para soportar fuerzas de estiramiento antes de romperse y se expresa en fuerza por unidad de ancho (kN/m). Su medición se realiza bajo la norma TAPPI T494 om-01, utilizando el equipo mostrado en la Figura 34 (Anexo 9).

El procedimiento consiste en cortar cinco hojas en la guillotina LYW1, obteniendo 5 probetas de 15 mm de ancho. Luego, se digita el gramaje correspondiente en el equipo y se colocan una a una las

probetas bajo los dos sensores. El equipo toma cada muestra y aplica una fuerza hasta provocar su ruptura. A partir de las cinco mediciones se obtiene un promedio, al cual posteriormente se aplica la Fórmula 11 para calcular el índice de tracción.

$$\text{Índice de tracción (Nm/g)} = \frac{\text{Resistencia promedio (kN/m)}}{\text{gramaje (g/m}^2\text{)}} \quad (11)$$

3.5.1.2 Índice de rasgado

El rasgado mide la capacidad del papel para resistir la propagación de un desgarro una vez iniciado. Esta propiedad se expresa en mN y el ensayo se realiza de acuerdo con la norma TAPPI T414 om-98, utilizando el equipo mostrado en la Figura 35 (Anexo 9).

El ensayo comienza con la preparación de la muestra, la cual está compuesta por 10 probetas obtenidas a partir de cinco hojas de laboratorio (dos probetas por hoja). La muestra se coloca entre las mordazas del equipo, se realiza un corte inicial mediante un cuchillo incorporado y posteriormente se acciona el péndulo que aplica la fuerza necesaria para generar el rasgado. Este procedimiento se repite dos veces, obteniéndose dos valores del esfuerzo requerido, a partir de los cuales se calcula un promedio. Finalmente, aplicando la Fórmula 12 se obtiene el índice de rasgado.

$$\text{Índice de rasgado (mN m}^2\text{/g)} = \frac{\text{Promedio de rasgado (mN)}}{\text{gramaje (g/m}^2\text{)}} \quad (12)$$

3.5.4.3 Resistencia a la explosión

Esta propiedad se define como la capacidad del papel a romperse cuando se le aplica una fuerza sobre una superficie circular, a través de una membrana que se infla gradualmente hasta la ruptura del papel. Se mide en unidades de Psi y el ensayo se realiza según la norma TAPPI T403 om-02, utilizando el equipo mostrado en la Figura 36 (Anexo 9)

El equipo consta de una membrana y una prensa. La hoja se coloca sobre la membrana y, al descender la prensa, esta se infla de manera progresiva hasta romper el papel. Este procedimiento se repite tres veces sobre la misma hoja. Los resultados individuales, así como el valor promedio, se registran en la pantalla del computador.

3.5.1.4 Short Compresion Test (SCT)

El objetivo de esta propiedad consiste en medir la resistencia al aplastamiento en corto, resistencia a la compresión en la dirección transversal. Se mide en KN/m según la norma TAPPI T824 om-02 utilizando el equipo que se muestra en la Figura 37 (Anexo 9).

El procedimiento consiste en cortar 3 probetas de 15 mm de ancho, obtenidas de una misma hoja mediante la guillotina LYW1. Cada probeta se coloca de forma individual en las mordazas del equipo, el cual realiza la medición y registra el valor correspondiente. Este proceso se repite con las tres probetas y, finalmente, el equipo entrega el promedio de los valores obtenidos.

3.5.1.5 Porosidad Gurley

La porosidad se define como la capacidad del papel para permitir que un flujo de aire (100 ml) bajo una presión controlada, atraviese los poros de su estructura en un tiempo determinado. Se expresa en segundos y se mide bajo la norma TAPPI T536 om-02, utilizando el equipo mostrado en la Figura 38 (Anexo 9).

El procedimiento consiste en realizar cinco mediciones, cada una sobre una hoja distinta de laboratorio. Cada hoja se coloca bajo el sensor, este sella un área específica, y se aplica el flujo de aire que atraviesa los poros del papel. Finalmente, a partir de las cinco mediciones se calcula un valor promedio.

3.5.1.6 Rigidez

La rigidez en el papel es la propiedad mecánica que mide la resistencia del material a ser doblado o deformado cuando se aplica una fuerza perpendicular a su plano. Se mide en unidades de $(g \cdot cm)$ y el análisis se realiza según la norma TAPPI T489 om-92, utilizando el equipo mostrado en la Figura 39 (Anexo 9).

El procedimiento consiste en cortar dos probetas de 3,5 x 6,6 cm de una misma hoja. Se miden por separado, colocando la probeta entre las mordazas con el equipo previamente ajustado en cero. Con la muestra posicionada, se recalibra el cero mediante los tornillos de ajuste de las mordazas. Para iniciar la medición, se gira el interruptor de control de palanca hacia la derecha y se detiene cuando el péndulo alcanza el ángulo de 15°. Luego, se repite el procedimiento moviendo el interruptor hacia la izquierda. Se registran las 4 mediciones tomando un promedio por lado y luego uno general.

3.6 Análisis estadístico

Luego con los datos que se obtuvieron de la medición de las propiedades, se realizó un análisis estadístico. Para ello se utilizó el software Statgraphics Centurion, un programa estadístico que permite aplicar una amplia variedad de métodos de análisis, visualizar tendencias y respaldar la toma de decisiones basada en los datos (Statgraphics Technologies, Inc., s.f.).

En este estudio, Statgraphics se empleó para evaluar la significancia estadística de las variables independientes (carga de soda cáustica, temperatura y tiempo de residencia) sobre cada una de las propiedades del papel, primero mediante una estadística descriptiva, y luego con modelos obtenidos en los análisis multifactoriales, específicamente a través del análisis de varianza (Anova). Adicionalmente, el software permitió identificar los valores óptimos de cada propiedad y también el ensayo que optimizaba simultáneamente todas ellas.

Luego de cada análisis Anova, se comprobaron los tres supuestos. En primer lugar, la normalidad de los residuos, la cual exige que la distribución de la variable dependiente sea normal en cada grupo factorial (López-Roldan, 2015), y para determinarla se analizó el gráfico cuantil-cuantil (Q-Q) además de la prueba estadística Shapiro-Wilk. El segundo supuesto que se debe cumplir es la Independencia, es decir, que el valor de una observación no influya ni afecte el valor de otras observaciones (Stone, 2018). Este supuesto se comprobó mediante el gráfico de residuos versus corridas experimentales (número de filas). Por último, se debe comprobar homocedasticidad, la cual indica que la varianza de los términos del error debe ser constante en todas las características incluidas en el modelo (Briseño y Luquín, 2025), analizado mediante el gráfico residuos versus predichos.

3.7 Elaboración de hojas con mezcla de pulpas (pasta)

Luego del análisis estadístico se determinó el ensayo que optimizaba todas las propiedades. Bajo las condiciones de dicho ensayo, se volvió al laboratorio de la universidad y se preparó nuevamente esa pulpa. Posteriormente, se mezcló con pulpa de aceptado y DKL con el objetivo de generar una mezcla similar a la pasta utilizada en la máquina papelera.

Tal como se indicó en el punto 1, la pasta empleada en la máquina papelera está compuesta por un 50% de pulpa mecánica, 40% de pulpa de DKL y un 10% de pulpa de recorte. A su vez, la pulpa mecánica se conforma por un 60% de pulpa de aceptado y un 40% de pulpa refinada correspondiente a la fracción de rechazos. Con dicha información y considerando solo pulpa mecánica y DKL en razones de 60 y 40%, se realizaron los cálculos para generar la pasta deseada.

Para la preparación de la pulpa mecánica, se utilizó pulpa proveniente de la salida del filtro 2 (aceptado) y se mezcló con la pulpa refinada tratada en el laboratorio de la universidad. Las masas requeridas de cada fracción se determinaron mediante las Fórmulas 13 y 14, de acuerdo con las proporciones establecidas.

$$M_A = \frac{60g * 100}{CS} \quad (13)$$

$$M_R = \frac{40g * 100}{CS} \quad (14)$$

Donde, M_A es la masa de pulpa aceptada, M_R es la masa de pulpa refinada y CS es la consistencia de cada una de ellas.

Se dispuso a hacer 10 hojas de laboratorio, para lo cual se requería de 20 g de pulpa seca, para la fabricación de hojas de $100 \frac{g}{m^2}$. No obstante, por motivos de seguridad experimental, se consideró una masa total de 25 g, con el fin de disponer de material adicional en caso de que fuese necesario repetir la elaboración de alguna hoja. De esta masa total, el 60% corresponde a pulpa mecánica (15g) y el 40% a pulpa de DKL (10 g). A partir de las Fórmulas 15 y 16, se determinaron las masas de cada una de ellas (M_{PM}) y (M_{DKL}) respectivamente, para la preparación de la pasta.

$$M_{PM} = \frac{15g * 100}{CS} \quad (15)$$

$$M_{DKL} = \frac{10g * 100}{CS} \quad (16)$$

Finalmente, se mezcló todo y se fabricaron las hojas siguiendo el procedimiento explicado en el punto 3.4.2 para luego medir todas las propiedades ya mencionadas.

3.8 Elaboración de hojas con pasta del estanque TQ-5

En el estanque TQ-5 se prepara la pasta que alimenta la máquina papelera. A este estanque ingresan la pulpa mecánica, la pulpa DKL y la pulpa de recorte, además de la dosificación de almidón. Desde este estanque se tomaron muestras de la pasta tanto para la fabricación de Duo como de Onda, a partir de las cuales se elaboraron hojas destinadas a la comparación de propiedades con las hojas descritas en el apartado anterior. Se optó por hacer hojas de este punto del proceso debido a que, en fases posteriores, a la pasta se le adicionan productos químicos para la retención y el encolado, los cuales influyen en las propiedades finales del papel. En consecuencia, no resulta apropiado comparar directamente el producto final de la máquina con las hojas especificadas en el apartado anterior. Por ello, la comparación se realizó utilizando hojas obtenidas a partir de muestras del estanque TQ-5, elaboradas según el procedimiento descrito en el punto 3.4.2.

3.9 Revisión de datos de planta

Con el propósito de comparar los resultados de cada ensayo con los valores históricos de la planta, se revisaron las planillas de calidad de pulpa, específicamente aquellas correspondientes al clasificador 9, punto al cual ingresa la pulpa sometida al proceso de refinación. En este punto del proceso se elaboran diariamente hojas de laboratorio, a partir de las cuales se determinan el índice de tracción y el índice de rasgado. A partir de estos registros, se realizó inicialmente una comparación entre las fabricaciones de papel Onda y de papel Duo, y posteriormente, una comparación con las hojas elaboradas a partir del diseño de experimentos.

Adicionalmente, utilizando los valores de las propiedades determinadas en las hojas fabricadas con pasta preparada en el laboratorio, se realizó un análisis comparativo con los resultados obtenidos a partir de hojas elaboradas con pasta proveniente del estanque TQ-5.

4. Resultados y discusión

4.1 Datos operacionales

4.1.1 Prensa estrujadora

La prensa estrujadora consiste esencialmente de una Tina sellada que recibe la pulpa, dos rodillos giratorios que realizan el prensado y un tornillo triturador que disgrega y descarga la pulpa estrujada hacia el tornillo volumétrico que alimenta al refinador (Rojas, C. 2020).

Es un equipo atmosférico (ver Figura 4), el cual recibe la pulpa a un 4% de consistencia y la entrega al digestor a un valor de 35% seco, manteniendo una temperatura de 70°C aproximadamente. Dispone de 4 toberas mediante las cuales se realiza la dosificación de soda cáustica utilizada en la fabricación de papel Duo. Operacionalmente, se comienza por una dosificación de 40 (kg_{soda}/ton_{pulpa}) para saturar el sistema, 12 horas previo al cambio de fabricación de la máquina y luego se reduce a 35 (kg_{soda}/ton_{pulpa}).



Figura 4. Prensa estrujadora (sunds)

4.1.2 Estanque de soda cáustica

Estanque con capacidad de 5000 l, el cual se utiliza para almacenar la soda cáustica durante las fabricaciones de papel Duo. Se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Estanque de soda cáustica.

4.1.3 Digestor

Es un recipiente presurizado (ver Figura 6) y su función es almacenar la pulpa proveniente de la prensa estrujadora a un nivel constante, manteniéndola bajo presión para asegurar una descarga uniforme hacia el refinador. También en este equipo se aplica vapor a la pulpa para hidratar y calentar ablandando las fibras favoreciendo el posterior desfibrado en el refinador (Rojas, C. 2020).

La temperatura y presión que se mantiene en el equipo es de 115°C y 140 kPa respectivamente. Y el nivel que normalmente se mantiene es de 15% pero para la fabricación de papel Duo el nivel 30%



Figura 6. Digestor fábrica pulpa.

4.1.4 Refinador

La función de este equipo (ver Figura 7) es refinar la pulpa rechazada y previamente espesada, de manera de satisfacer las condiciones de calidad para continuar con el proceso de fabricación de papel.

Operacionalmente la pulpa ingresa al refinador por medio de un tornillo de alimentación lateral y un tornillo de alimentación interno, los cuales conducen la pulpa hasta la zona de refinación, compuesta por dos discos refinadores, uno fijo (estator) y uno móvil (rotor), separados por un gap de 0,3- 0,5 mm, dependiendo de la calidad de pulpa necesaria (Rojas, C. 2020).

El refinador normalmente trabaja a una temperatura de 148°C, a presión fija de 240 kPa y a una potencia estable, controlada por el operador, inferior a los 3000 kW. Y el tiempo que se demora la pulpa en llegar desde la prensa al refinador es de 5 min.



Figura 7. Refinador Fábrica de pulpa.

4.2 Resultados de las propiedades medidas.

Los resultados de cada una de las propiedades medidas a las hojas hechas en el laboratorio se registraron en una planilla Excel tal como se muestra en la Tabla 15 (Anexo 10). Dichos resultados fueron graficados con el propósito de analizar de forma visual el comportamiento de las propiedades según la modificación de los tres factores estudiados.

Cabe destacar que los resultados obtenidos deben interpretarse considerando que el tratamiento aplicado a la pulpa en el laboratorio presenta diferencias relevantes respecto del proceso realizado en planta. En operación industrial, la soda cáustica se dosifica en la prensa estrujadora sobre una masa con una consistencia superior al 35%, lo que dificulta la distribución del reactivo. En cambio, en el laboratorio el químico fue incorporado a una pulpa de 3,5% de consistencia, dentro de un reactor equipado con un sistema de agitación, lo que permitió una distribución homogénea de la soda cáustica. También, es importante considerar la diferencia existente en el desempeño y operación del refinador de laboratorio versus el de planta, siendo este último un equipo de mayor magnitud, el cual trabaja a grandes potencias.

Además, mientras que en planta el proceso se desarrolla en flujo continuo, en el laboratorio la pulpa tratada en el reactor se trasladó en baldes hacia el refinador, generando variaciones en temperatura y presión, lo que no está presente en el proceso industrial.

Considerando estos aspectos, a continuación, se presentan los gráficos con su respectivo análisis.

4.2.1 Índice de tracción

En la Figura 8, se grafica la respuesta del índice de tracción. De manera general, se observa que los valores más elevados de la propiedad se alcanzan cuando se combinan temperaturas altas con mayores dosificaciones de soda cáustica, reflejando una relación directa entre estas variables.

A 70°C se observa que los valores del índice de tracción se concentran entre 51 y 55 Nm/g donde el tiempo que genera un mayor valor es el de 10 min, por lo tanto, a menor temperatura, es necesario un menor tiempo de residencia para alcanzar los mayores valores de la propiedad.

A 90°C se alcanza el valor mayor del conjunto de datos, siendo este a 6%/20 min. Se observa una distribución más clara frente a las cargas de soda y a los tiempos, pues a 5 y 6% los tiempos se organizan de la misma forma, 20 min para los valores mayores de índice de tracción, luego 30 min y finalmente 10 min.

Por último, a 120 °C, se observa de manera mucho más clara el efecto de la carga de soda. A mayor carga, mejores son los valores de la propiedad.

En síntesis, según el análisis visual del gráfico, los factores que generan mayor impacto en el índice de tracción son la carga de soda y la temperatura, influyendo ambos de manera directa.

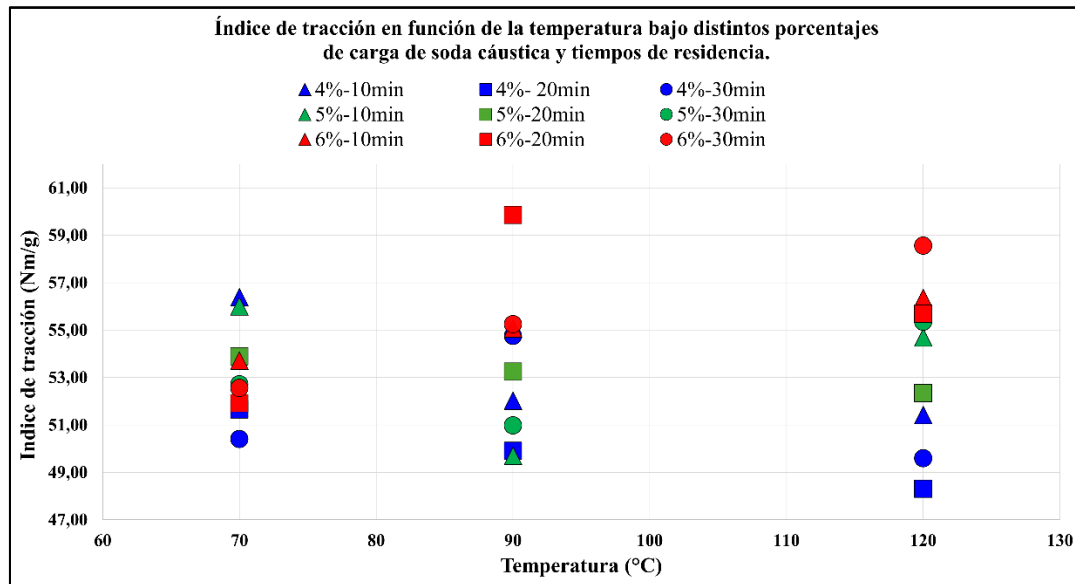


Figura 8. Gráfico del comportamiento del índice de tracción en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.

4.2.2 Índice de rasgado

En general la dispersión del índice de rasgado mostrada en la Figura 9, indica que a bajas cargas de soda cáustica se consiguen mejores valores de la propiedad. A 70°C los valores de índice de rasgado se concentran entre 5,8 y 6,8 mNm^2/g , destacando el tratamiento 4%/20min como el valor más alto del conjunto de datos. A 90°C la respuesta de la propiedad se vuelve menos estable, con descensos notorios en algunos ensayos con una dosificación de soda del 6%. Esto evidencia que el incremento en la carga de soda no conduce a una mejora de la propiedad y que, además, cuando dicho aumento se combina con un incremento de temperatura (desde 70 a 90°C), los valores obtenidos disminuyen aún más. Finalmente, a 120 °C se observan nuevamente un valor superior a 7,0 mNm^2/g con un tiempo de 30 min, lo que indica una relación favorable para los valores de índice de tracción, entre alta temperatura y mayor tiempo de residencia.

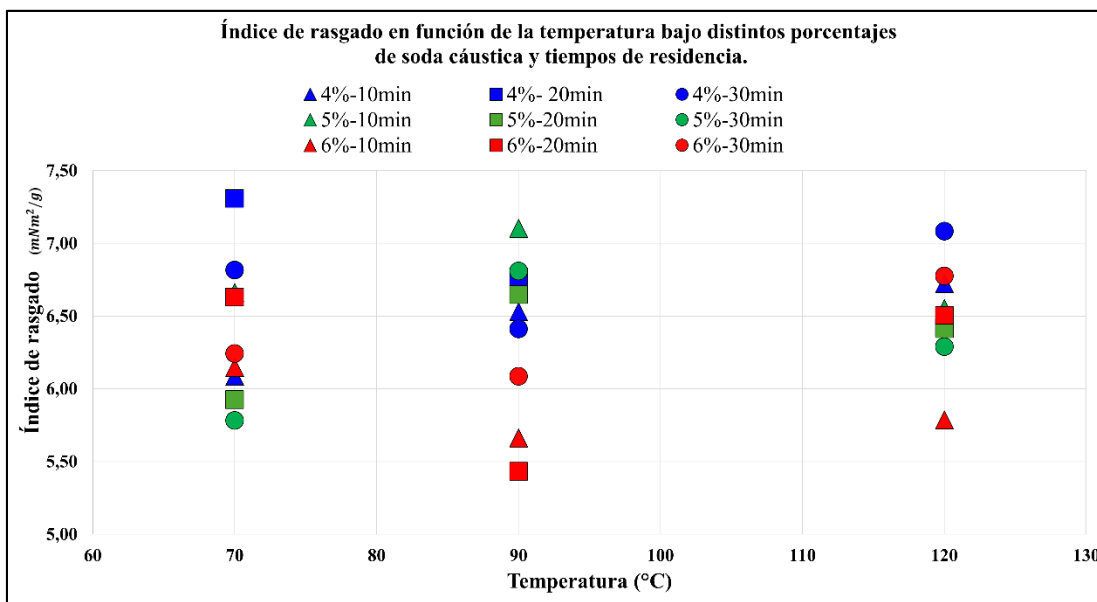


Figura 9. Gráfico del comportamiento del índice de rasgado en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.

4.2.3 Resistencia a la explosión

En la Figura 10, se muestra la gráfica de la propiedad de explosión, según la variación de los factores estudiados. Se observa un comportamiento disperso, sin una tendencia definida frente a las variables de carga de soda, tiempo y temperatura.

A 70°C, los valores de explosión se distribuyen mayoritariamente entre 36 y 44 psi, con ligeras variaciones dependiendo la carga de soda. El tiempo de residencia que destaca en dicha temperatura es de 20 min, siendo parte de los valores más altos.

A 90° se observa el valor máximo del conjunto, alcanzado bajo la condición de 6%/30 min (≈ 47 psi). Sin embargo, a esta misma temperatura también aparecen resultados considerablemente más bajos, lo que evidencia una dispersión más amplia.

Finalmente, a 120°C, los valores se agrupan en torno a 38-41 psi, mostrando diferencias menores entre carga de soda y tiempos. Esto sugiere una zona de respuesta más estable, donde la propiedad no es afectada de forma significativa por los factores estudiados.

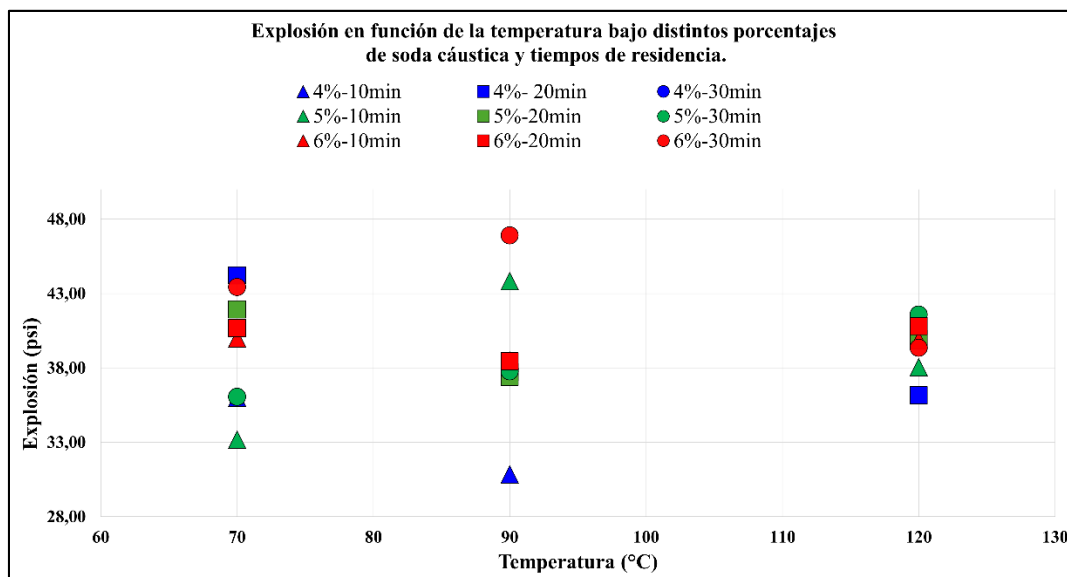


Figura 10. Gráfico del comportamiento de la explosión en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.

4.2.4 Short Compression Test

El gráfico del SCT, presentado en la Figura 11, evidencia que la carga de soda es el factor más determinante para alcanzar valores elevados de esta propiedad. La carga de 6% destaca evidentemente en las tres temperaturas evaluadas, mostrando los resultados más altos.

En las temperaturas de 70°C y 90°C, el tiempo no presenta variación significativa en el comportamiento del SCT, ya que los valores se mantienen relativamente constantes. Sin embargo, a 120°C se observa un cambio relevante: a esta temperatura, el valor más alto se alcanza con un tiempo de 10 min, lo que indica que el incremento térmico modifica la respuesta temporal de la propiedad.

También se identifica que los valores más bajos corresponden a la menor carga de soda, incluso cuando se aplican los tiempos más prolongados, lo que refuerza el rol dominante de la dosificación en el resultado final.

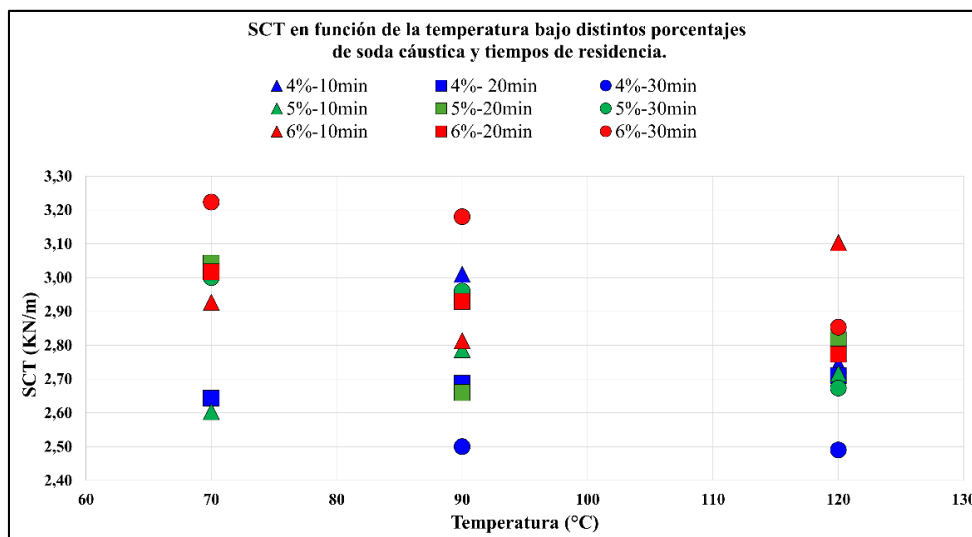


Figura 11. Gráfico del comportamiento del SCT en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia

4.2.5 Porosidad

El gráfico presente en la Figura 12, muestra el comportamiento de la porosidad del papel bajo distintas combinaciones de los factores estudiados.

En relación con la temperatura, se identifica una tendencia clara: la porosidad aumenta conforme la temperatura se eleva, especialmente para la carga de 6%. A 70 °C se presentan valores relativamente bajos, mientras que a 90 °C se observa un incremento notable. Finalmente, a 120 °C se alcanzan nuevamente valores altos, aunque con cierta variación según la carga de soda cáustica.

Respecto a la carga, se aprecia un comportamiento consistente: a mayor carga, mayor porosidad. Los valores correspondientes al 6% son los más altos en cada una de las tres temperaturas evaluadas, mostrando incrementos pronunciados tanto a 90 °C como a 120 °C. Por su parte, la carga de 4% presenta los valores más bajos, mientras que al 5% se sitúa de manera intermedia.

En cuanto al tiempo, se observa que para 70 y 90°C a mayor tiempo, mayor es el valor de la porosidad, por el contrario, a 120°C el mayor valor se alcanza en un tiempo de 10 min, lo que lleva a destacar una relación inversa entre temperatura y tiempo.

Así también, es importante señalar que los valores más altos que se obtuvieron de la propiedad presentan en común una mayor proporción de finos, es decir, una mayor cantidad de fibras cortas, de acuerdo con el análisis Fiber Tester detallado en el punto 3.4.1. La tabla de resultados del análisis se muestra en el Anexo 10.

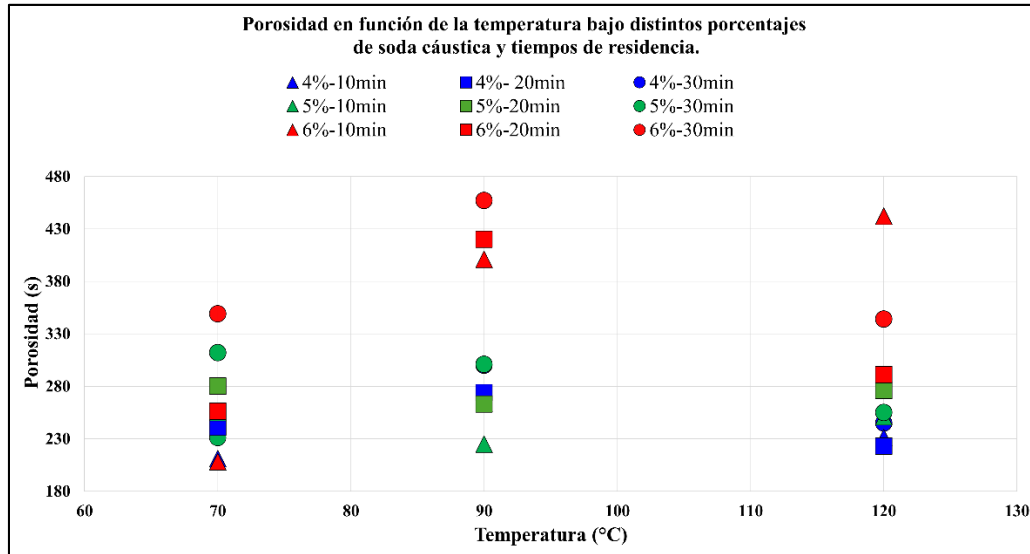


Figura 12. Gráfico del comportamiento de la porosidad en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.

4.2.6 Rigidez

En la Figura 13, se presenta el comportamiento de la rigidez frente a las diferentes condiciones de carga de soda cáustica, temperatura y tiempo de residencia. A partir del gráfico se aprecia que la temperatura actúa como un factor muy influyente para esta propiedad, ya que a medida que aumenta, los valores de rigidez disminuyen independiente de los valores de los otros dos factores analizados. Así también, el tiempo de residencia genera la misma respuesta en la propiedad, a valores mayores de tiempo los valores de rigidez son menores. En contraste, la carga de soda evidencia un efecto opuesto, generando un incremento en los valores de rigidez conforme se eleva su nivel.

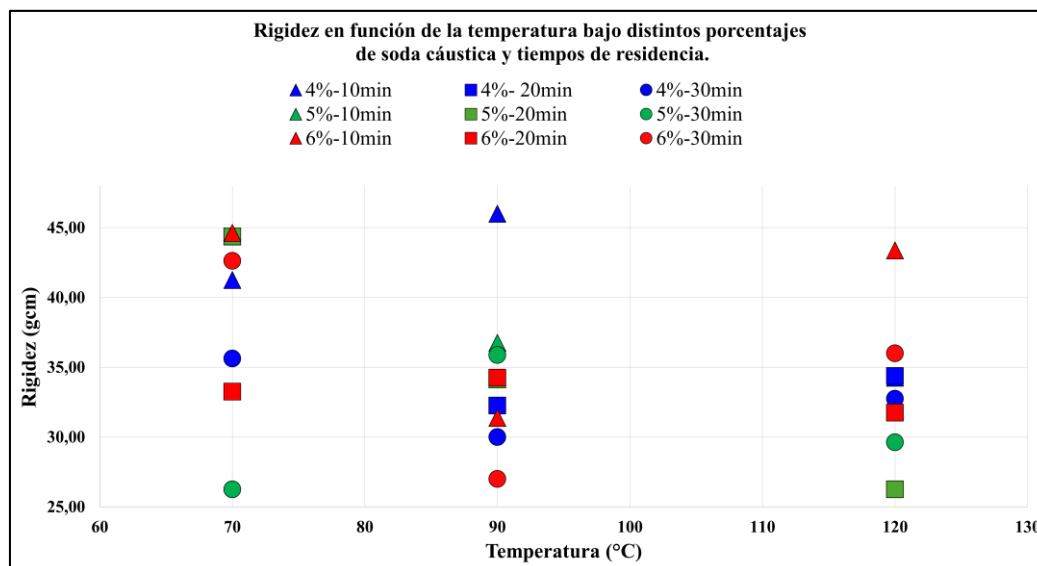


Figura 13. Gráfico del comportamiento de la rigidez en función de la temperatura, a diferentes porcentajes de carga de soda cáustica y tiempos de residencia.

4.3 Análisis estadístico

4.3.1 Estadística descriptiva

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para cada propiedad. Los resultados se detallan en la Tabla 1. Donde se reportan, el promedio, la desviación estándar y también los valores estandarizados de sesgo y curtosis, entre otros.

Cuando estos dos últimos parámetros se encuentran dentro del rango de -2 a +2, se considera que los datos presentan una aproximación a una distribución normal, lo que permite realizar una primera evaluación de los datos analizados. Así mismo, la estadística descriptiva facilita la identificación de valores atípicos, aspecto clave previo a la aplicación de un análisis de varianza (Anova).

Tabla 1. Resumen estadístico de las propiedades medidas a las hojas de laboratorio correspondientes a las corridas experimentales.

Estadísticos descriptivos	Índice de tracción	Índice de rasgado	Resistencia a la explosión.	SCT	Porosidad	Rigidez
Recuento	27	27	27	27	23	27
Promedio	53,42	6,43	39,32	2,83	264,61	36,01
Desviación estándar	2,82	0,46	3,38	0,20	38,39	6,64
Coefficiente de variación	5,28%	7,14%	8,59%	7,10%	14,51%	18,44%
Mínimo	48,31	5,43	30,84	2,49	208,0	26,25
Máximo	59,86	7,31	46,91	3,22	349,0	52,0
Rango	11,55	1,88	16,07	0,73	141,0	25,75
Sesgo estandarizado	0,62	-0,65	-0,48	0,33	1,30	1,29

Curtosis estandarizada	-0,26	0,27	1,03	-0,91	0,02	-0,27
------------------------	-------	------	------	-------	------	-------

Fuente: Statgraphics.

4.3.1 Resultado estadístico de índice de tracción

Se presenta el análisis Anova correspondiente al índice de tracción en la Tabla 2, en donde el valor -P entrega la significancia de los factores sobre la propiedad, en este caso el único factor estadísticamente significativo es la concentración, puesto que su valor -P es menor a 0,05.

Tabla 2. Análisis Anova del índice de tracción.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Carga de soda	66,89	2	33,45	4,95	0,02
B: Temperatura	0,53	2	0,26	0,04	0,96
C: Tiempo	4,12	2	2,06	0,30	0,74
Residuos	135,06	20	6,75		

Fuente: Statgraphics.

Así también, se obtuvo el análisis de prueba de múltiples rangos, en donde se observan las diferencias entre los niveles de cada factor. Para la concentración los únicos dos niveles que presentan una diferencia estadísticamente significativa son 4% con 6%, con un valor de 3,84. Las tablas de las pruebas de los tres factores se presentan en el Anexo 10.

4.3.2 Resultado estadístico de índice de rasgado

El análisis Anova para el índice de rasgado detallado en la Tabla 3, muestra de que ningún factor es estadísticamente significativo para la propiedad, puesto que ninguno tiene un valor -P, menor a 0,05.

Tabla 3. Análisis Anova del índice de rasgado.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Carga de soda	1,34	2	0,67	3,35	0,06
B: Temperatura	0,08	2	0,04	0,19	0,83
C: Tiempo	0,07	2	0,03	0,17	0,85
Residuos	3,99	20	0,20		

Fuente: Statgraphics.

A pesar de que ningún factor es estadísticamente significativo del análisis de prueba de múltiples rangos se identifica una diferencia de 0,54; considerando un límite de 0,44; para la concentración entre los valores de 4 y 6%. Para los demás factores no hay diferencia entre los niveles, esto se detalla en las tablas presente en el Anexo 10.

4.3.3 Resultado estadístico de la resistencia a la explosión

Al igual que el índice de rasgado el análisis Anova para la explosión detallado en la Tabla 4, muestra que ningún factor es estadísticamente significativo para la propiedad, ya que todos los valores -P son mayores a 0,05.

Tabla 4. Análisis Anova de explosión

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Carga de soda	42,61	2	21,31	1,95	0,17
B: Temperatura	1,24	2	0,62	0,06	0,94
C: Tiempo	33,87	2	16,94	1,55	0,24
Residuos	218,57	20	10,93		

Fuente: Statgraphics.

De las pruebas múltiples de rangos se obtiene que no hay ninguna diferencia significativa entre los niveles de cada factor. Se detalla en las tablas del Anexo 10.

4.3.4 Resultado estadístico de SCT

El análisis Anova del SCT detallado en la Tabla 5, muestra que esta propiedad es únicamente afectada por la concentración, puesto que su valor -P es de 0,01.

Tabla 5. Análisis Anova de SCT

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Carga de soda	0,33	2	0,16	5,33	0,01
B: Temperatura	0,08	2	0,04	1,35	0,28
C: Tiempo	0,03	2	0,01	0,46	0,63
Residuos	0,61	20	0,03		

Fuente: Statgraphics.

De las pruebas de múltiples rangos las diferencias estadísticamente significativas solo se encuentran en la concentración entre 4 y 6%, y entre 5 y 6%, con diferencias de 0,27 y 0,17 respectivamente con un límite de 0,17 para ambos casos. Este análisis se detalla más en las tablas del Anexo 10.

4.3.5 Resultado estadístico de porosidad

Previo al análisis Anova, para la porosidad fue necesario eliminar 4 datos atípicos correspondientes a los ensayos presentados en la Tabla 6. Al eliminarlos se consiguió que los datos siguieran una distribución normal.

Tabla 6. Ensayos correspondientes a datos atípicos.

Carga de soda (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Porosidad (s)
6	90	10	401
6	90	20	420
6	90	30	457
6	120	10	442

Fuente: Statgraphics.

Así, la Tabla 7 del análisis Anova de la porosidad indica que el único factor estadísticamente significativo es el tiempo, puesto que es el único con un valor -P menor a 0,05.

Tabla 7. Análisis Anova de Porosidad.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Carga de soda	6117,45	2	3058,72	3,60	0,05
B: Temperatura	1697,29	2	848,65	1,00	0,39
C: Tiempo	10785,30	2	5392,63	6,34	0,009
Residuos	13598,40	20	849,90		

Fuente: Statgraphics.

De la prueba de múltiples rangos se obtiene que hay una diferencia en carga de soda de 44,8 entre 4 y 6% con un límite de 36,33 y también en tiempo, con una diferencia de 53,96 entre 10 y 30 min de un límite de 32,26. En cambio, en temperatura no hay diferencias. Las tablas de cada variable se muestran en el Anexo 10.

4.3.6 Resultado estadístico de rigidez

Para la rigidez el análisis Anova detallado en la Tabla 8, muestra que esta propiedad es afectada estadística y únicamente por la temperatura, puesto que su valor -P igual a 0,03.

Tabla 8. Análisis Anova de Rigidez.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Carga de soda	46,66	2	23,33	0,73	0,49
B: Temperatura	273,65	2	136,83	4,29	0,03
C: Tiempo	188,08	2	94,04	2,95	0,08
Residuos	637,74	20	31,89		

Fuente: Statgraphics.

Las pruebas de múltiples rangos muestran que hay una diferencia significativa entre 70 y 90°C, y entre 70 y 120°C con diferencias de 6,31 y 7,13 respectivamente con un límite de 5,55. También existe

una diferencia entre los tiempos de 10 y 30 min con una diferencia de 6,46 y un límite de 5,55; pero en concentración no hay diferencia entre los tres niveles empleados. Los detalles se muestran en las tablas del Anexo 10.

4.4 Verificación de supuestos Anova

Para garantizar la validez de los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Anova), es importante verificar el cumplimiento de sus supuestos estadísticos. Estos supuestos permiten asegurar que las conclusiones respecto a los efectos de los factores analizados y sus interacciones se basan en un modelo adecuado y confiable. En particular, se evalúa que los residuos presenten normalidad, independencia y homocedasticidad, ya que el incumplimiento de alguno de ellos puede generar estimaciones sesgadas de las varianzas, afectar la significancia estadística de los factores y disminuir la capacidad predictiva del modelo, según el libro “Diseño y análisis de experimentos”. No obstante, el análisis de varianza (Anova) se considera una prueba estadística robusta, por lo tanto, el incumplimiento de alguno de los supuestos no debe entenderse como totalmente restrictivo en la aplicación de la prueba, ni el análisis resulta invalidado. Sin embargo, hay que ser conscientes de los incumplimientos (López-Roldan, 2015).

En general, todas las propiedades cumplen con los supuestos de normalidad e independencia de manera satisfactoria; sin embargo, el supuesto de homocedasticidad no se cumple de manera estricta, debido a la falta de constancia de las varianzas dentro del conjunto de datos. Aun así, los resultados son considerados aceptables, lo que permite validar el análisis Anova realizado.

En el Anexo 11, se presentan los gráficos correspondientes al cumplimiento de los supuestos para cada una de las propiedades medidas y su análisis respectivo.

4.5 Optimización de cada propiedad

Mediante la aplicación de un diseño de experimento del tipo superficie de respuesta en Statgraphics, se realizó la optimización de cada propiedad, maximizándola o minimizándola según correspondiera. Este procedimiento permitió obtener el valor óptimo junto con las condiciones de operación asociadas a cada factor para alcanzarlo. A continuación, en la Tabla 9 se presentan los resultados correspondientes a cada una de las propiedades analizadas.

Tabla 9. Optimización de cada propiedad y las condiciones para alcanzar su optimización

Propiedad	Meta	Carga de soda (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Valor óptimo
Índice de tracción	máx.	6	120	30	58,79 Nm/g
Índice de rasgado	máx.	4	120	30	6,85 mNm ² /g
Explosión	máx.	6	70	30	43,86 psi
SCT	máx.	6	70	30	3,30 KN/m
Porosidad	min.	6	70	10	214,63 s
Rigidez	min.	5	105	30	28,87 gcm

4.6 Optimización general de las propiedades

Del mismo diseño de experimento, se realizó una optimización de múltiples respuestas, con el fin de obtener el ensayo que lograra mejorar todas las propiedades en simultáneo.

El programa permite colocar grados de importancia a las variables que se quieren optimizar, llamados impactos, los cuales van desde el 1 al 5, donde 1 corresponde a una importancia muy baja y 5 es el mayor grado de importancia. De las 6 propiedades analizadas, 3 de ellas fueron clasificadas como muy importantes, siendo el índice de tracción, índice de rasgado y la rigidez, ya que son propiedades que se relacionan directamente con el problema del liner partido que tiene el papel Duo actualmente. Las propiedades restantes fueron clasificadas con un impacto de 3.

Considerando lo mencionado, la optimización determinó que el ensayo N° 12 era el que lograba mejorar simultáneamente todas las propiedades. Dicho ensayo corresponde a una condición operacional de 5% de carga de soda, 70°C de temperatura en el tratamiento alcalino y 30 minutos de tiempo de residencia.

4.7 Comparación entre resultado de laboratorio y datos de planta

En la Figura 14, se presenta la gráfica del índice de tracción correspondientes a los datos obtenidos de la planilla de “calidad de pulpa” para la fabricación de papel Duo 100 g/m² y papel Onda 135 g/m², específicamente de la pulpa del aceptado del clasificador 9, que es la que mejor se asemeja a la pulpa tratada en el laboratorio. La gráfica muestra la diferencia entre cada fabricación de papel en planta del presente año y el valor de índice de tracción del ensayo 12.

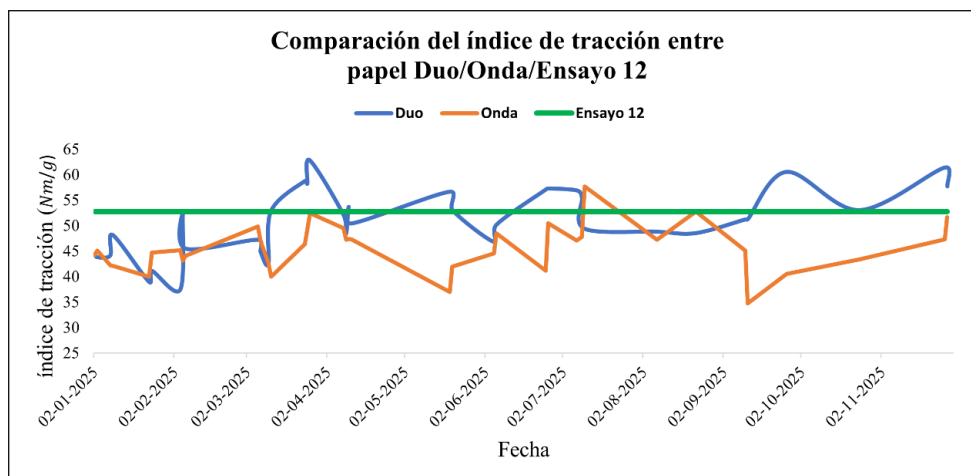


Figura 14. Gráfico comparativo del índice de tracción entre fabricaciones de papel Duo y Onda del año 2025 con el Ensayo 12.

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma en la Figura 15, se presenta un gráfico comparativo al igual que el anterior, pero del índice de rasgado.

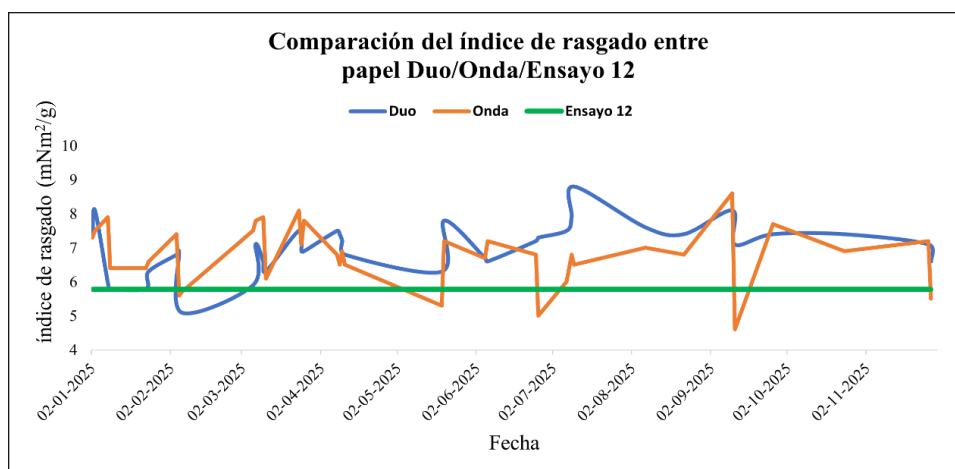


Figura 15. Gráfico comparativo del índice de rasgado entre fabricaciones de papel Duo y Onda del año 2025 con el Ensayo 12.

Fuente: Elaboración propia

De los gráficos presentados anteriormente, se observa que para el índice de tracción sí hay mejoras con respecto a los resultados de planta, sin embargo, no es en su totalidad, pues hay puntos por sobre el ensayo 12 que indican que con las condiciones actuales del proceso se alcanzan mejores resultados. Por otro lado, en el caso del índice de rasgado, este está muy por debajo de lo que se consigue en planta, incluso por debajo del papel onda, lo que indica que la soda no favorece esta última propiedad.

4.8 Comparación de propiedades medida a hojas hechas con pasta elaborada en laboratorio y hojas de TQ-5

Como fue mencionado en el punto 3.6, luego de obtener el ensayo que optimizaba todas las propiedades en simultáneo, se fabricó nuevamente la pulpa bajo las condiciones del ensayo N°12. Esta pulpa se mezcló con pulpa de DKL y pulpa mecánica del aceptado para así generar pasta y analizar el comportamiento de la modificación del tratamiento de la fracción de rechazo mezclado a las otras pulpas utilizadas en planta.

En la Tabla 10, se muestran los valores de las seis propiedades medidas durante todo el estudio, a las hojas hecha con pulpa modificada, según las condiciones del ensayo 12, de la fracción de rechazo, y también las hojas hechas del estanque TQ-5 tanto para la fabricación de papel Onda, como para la fabricación de papel Duo.

Al analizar los resultados, se observa que las propiedades del papel fabricado como Duo y Onda, bajo las condiciones actuales de planta, presentan diferencias entre ambas fabricaciones, particularmente en el índice de rasgado, la resistencia a la explosión y el SCT. Estos resultados evidencian que el uso de soda cáustica genera modificaciones en la fibra, aun cuando se mantienen constantes las condiciones de temperatura y tiempo de residencia en ambos casos.

Por otro lado, al comparar el papel elaborado con pasta proveniente del estanque TQ-5 para la fabricación de papel Duo con aquel obtenido a partir de pasta modificada bajo las condiciones del ensayo N° 12, se observan mejoras relevantes en varias propiedades. El índice de tracción presenta un aumento significativo, lo que indica una mejora sustancial en la resistencia mecánica del papel. Asimismo, la resistencia a la explosión y el SCT aumentan, lo que sugiere una estructura más resistente y una mayor capacidad para soportar esfuerzos combinados y de compresión.

No obstante, el índice de rasgado disminuye, alcanzando valores incluso inferiores a los del papel TQ-5 Onda, lo que refuerza el análisis presentado en el apartado 4.2.2, donde se señala que esta propiedad se ve afectada negativamente por el aumento en la carga de soda cáustica. En cuanto a la porosidad, se observa una disminución considerable, lo que indica una hoja más abierta y permeable. Finalmente, la rigidez presenta un valor intermedio entre las fabricaciones de papel Duo y Onda, lo que sugiere que la modificación aplicada permite mejorar determinadas propiedades resistentes sin incrementar de manera excesiva la rigidez del papel.

Tabla 10. Comparación de los resultados de las propiedades medidas en las hojas hechas en el laboratorio de pasta modificada bajo las condiciones del ensayo 12 con hojas de pasta del estanque TQ-5.

Propiedades	TQ-5 (Onda)	TQ-5 (Duo)	Pasta con modificación de ensayo N°12
Gramaje (g/m^2)	105,10	104,50	111,80
Índice de tracción (Nm/g)	47,35	30,11	52,71
Índice de rasgado (mNm^2/g)	6,65	7,46	5,78
Explosión (psi)	37	39	40,97
SCT (KN/m)	2,17	2,5	3,00
Porosidad Gurley (s)	126	131	84,05
Rigidez ($g \cdot cm$)	24,90	31,90	26,25

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El presente estudio permitió evaluar de manera sistemática el efecto del tratamiento alcalino aplicado a la fracción de rechazos de la pulpa mecánica sobre las propiedades del papel Duo, abordando la problemática asociada al liner partido. A partir de la ejecución de ensayos de laboratorio y la caracterización de las muestras, se determinó que la modificación de las condiciones de operación influye de forma significativa en las propiedades mecánicas y estructurales del papel.

Los resultados de los ensayos de laboratorio y su análisis estadístico evidenciaron que no todos los factores estudiados influyen de la misma manera ni con la misma intensidad sobre las propiedades del papel. En particular, se identificó la soda cáustica como el parámetro con mayor impacto global, especialmente sobre propiedades asociadas a la resistencia del papel, mientras que la temperatura del tratamiento y el tiempo de residencia mostraron efectos más específicos sobre la rigidez y la porosidad, respectivamente. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de considerar el equilibrio entre las distintas propiedades, dado que mejorar el valor de una de ellas puede implicar compromisos en otras.

La aplicación de técnicas de optimización permitió definir una condición operativa que logra un desempeño global satisfactorio de las propiedades evaluadas, y en base a la comparación con hojas elaboradas a partir de pasta proveniente del estanque TQ-5 confirmó que la pulpa tratada bajo las condiciones propuestas presenta un comportamiento mecánico superior, lo que valida el enfoque experimental adoptado.

5.2 Recomendaciones

En función de los resultados obtenidos y del análisis estadístico realizado, se proponen las siguientes recomendaciones:

1. La forma de aplicación de la soda cáustica en la fracción de rechazos en el laboratorio difiere de la práctica habitual en planta, lo que sugiere que la homogeneidad lograda durante su dosificación tuvo una influencia relevante en los resultados obtenidos. En este contexto, se propone aumentar el número de puntos de dosificación de soda cáustica en la prensa estrujadora, incrementando las actuales cuatro toberas a seis. Alternativamente, se plantea modificar el punto de dosificación incorporando en un estanque posterior a la prensa estrujadora, equipado con un sistema de agitación que mantenga la pulpa en movimiento constante, con el fin de asegurar una dosificación más homogénea.
2. De acuerdo con los resultados del proceso de optimización, se recomienda aumentar la dosificación de soda cáustica desde 35 kg de soda por tonelada de pulpa hasta 50 kg de soda por tonelada de pulpa, condición que mostró un mejor desempeño global de las propiedades evaluadas.
3. Se propone aumentar el tiempo de residencia del tratamiento alcalino. Si bien esto podría lograrse mediante la implementación del estanque propuesto para el nuevo punto de dosificación de soda, dicha alternativa implicaría un mayor impacto en la infraestructura de la planta. Como opción de menor intervención, se recomienda aumentar el nivel de operación del digestor desde un 15% a un 50%, lo que permitiría incrementar el tiempo de residencia en dicho equipo.
4. Considerando las modificaciones propuestas en la dosificación de soda y el tiempo de residencia, se recomienda realizar una prueba a escala industrial que permita evaluar el comportamiento del papel durante el proceso de conversión y verificar la efectividad de los ajustes operacionales planteados.
5. Finalmente, se sugiere ampliar el análisis operacional incorporando otras variables de proceso, tales como la cantidad de rechazo, el uso de PGW y la velocidad de operación de los PGW, entre otras. Tal como se observa en los resultados de planta, se alcanzan buenos valores de propiedades en condiciones actuales de operación; por ello, se recomienda analizar en detalle otras condiciones que generan estos máximos.

6. Referencias

- Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático. (2006) *Acuerdo de Producción Limpia: Industria del papel, Región del Bío-Bío* (APL). Gobierno de Chile. Recuperado de: https://www.agenciasustentabilidad.cl/resources/uploads/documentos/archivos/138/apl_industria_de_l_papel_-_region_del_bio_bio.pdf agenciasustentabilidad.cl
- Briseño, H. & Luquín, D. (2025). *Econometría en tu idioma* (1ª ed). Universidad Panamericana, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. ISBN 978-607-8826-91-9. Recuperado de: <https://scripta.up.edu.mx/server/api/core/bitstreams/9b5196a4-185b-4db4-95f0-bdb827b28de1/content>
- Cepi ContainerBoard. (2022). *Lista europea de papeles para cartón ondulado: Definición, identificación, términos de garantía para las especificaciones técnicas y tendencias y desarrollos técnicos* (6.ª ed.). Cepi ContainerBoard. Recuperado de: <https://www.cepi-containerboard.org/>
- CPP. (2025). *Quiénes somos - Cpp*. Recuperado de: <https://cpp.cl/quienes-somos/>
- Corrugated Boxes Market Size, share. *Industry Report*, 2030. (s. f.). Recuperado de: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/corrugated-boxes-market-report>.
- D.C. Montgomery. *Diseño y análisis de experimentos*, (2013). Limusa Wiley and John Wiley & Sons, 2º ed. ISBN 9789681861568
- Ji, Y., Peng, Y., Strand, A., Fu, S., Sundberg, A. y Retulainen, E. (2018). "Evolución de la fibra durante el tratamiento alcalino y su impacto en las propiedades de la lámina de papel", *BioRes.* 13(4), 7310-7324. Recuperado de: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/fiber-evolution-during-alkaline-treatment-and-its-impact-on-handsheet-properties>
- López-Roldan, P. & Fachelli, S. (2015). *Metodología de la investigación social cuantitativa*. (1ª ed). Universidad Autónoma de Barcelona, Departamento de Sociología. Recuperado de: https://ddd.uab.cat/pub/caplli/2016/163568/metinvsoccua_cap3-8a2016.pdf
- Rojas, C, Silva, X, (2020). *Autocapacitación – Unipapel*. Recuperado de: <https://unipapel.advision.cl>
- Soza, J., & González, R. (s. f.). *Estudio de refinación de mezclas de celulosa fibra corta–fibra larga en refinador piloto Escher Wyss*. CMPC Celulosa S.A. Recuperado de: <https://www.eucalyptus.com.br/icep03/190Soza.text.pdf>

Statgraphics Technologies, Inc. (s.f.). *Statgraphics Centurion*. Recuperado de: <https://www.statgraphics.com>

Stone,B. (2018). *Suposiciones frecuentes sobre los datos (Parte 1: Muestras aleatorias e independencia estadística)*. Recuperado de: <https://addlink.es/noticias/minitab/2802-suposiciones-frecuentes-sobre-los-datos-parte-1-muestras-aleatorias-e-independencia>

TAPPI. (1994-1995). *Tappi Test Methods* (1ª ed). TAPPI PRESS Technology Park/Atlanta. ISBN 0-89852-212-9.

TAPPI T 240 Pulp consistency » SGS-IPS Testing. (2018). SGS-IPS Testing. Recuperado de: <https://ipstesting.com/find-a-test/tappi-test-methods/tappi-t-240-pulp-consistency-test/>

7. Anexos

7.1 Anexo 1: Equipos de planta

El Desfibrador Presurizado PGW (Pressure Groundwood, madera desfibrada a presión) desfibra los troncos al interior de una cámara hermética y presurizada. El desfibrado se logra presionando los troncos contra la superficie desfibradora que rota a una velocidad de 333 rpm. Las características abrasivas de la piedra, la alta temperatura interior (sobre 115 °C) y la presión interna (2.3 bar) permiten que las fibras se separen de la madera hasta producir una suspensión de fibra en agua denominada pulpa mecánica (Rojas, C. 2020).

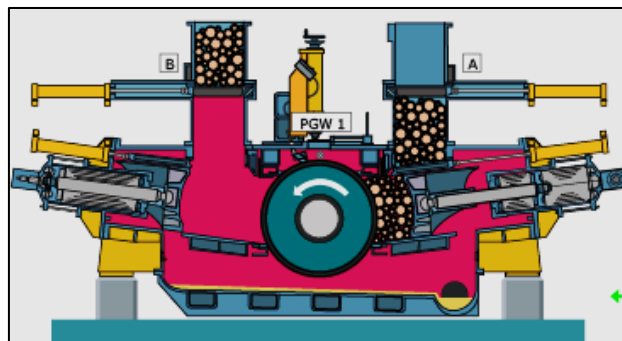


Figura 16. PGW utilizado para el desfibrado de la madera.
Fuente: Autocapacitación CPP.

En la Figura 17, se muestran los equipos de planta, donde el N°1 indica la prensa estrujadora, el N°2 el digestor y el N°3 el refinador.

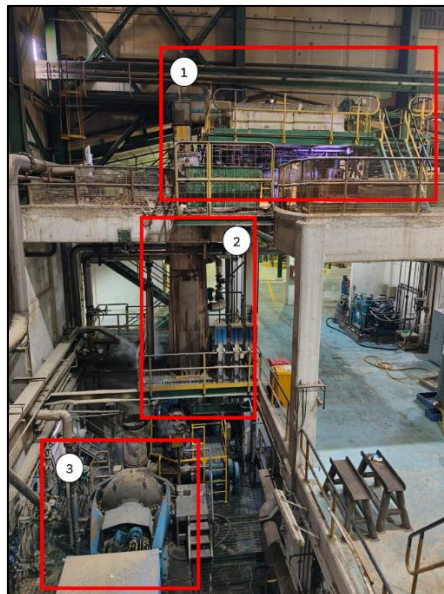


Figura 17. Equipos del área de refinación de rechazos.

7.2 Anexo 2: Datos de diseño de experimento

Tabla 11. Niveles de variables estudiadas.

Nivel	Carga de soda (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	4	70	10
2	5	90	20
3	6	120	30

Tabla 12. Diseño de experimento.

Nº	Carga NaOH (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Cant. hojas
1	4	70	10	12
2	4	70	20	12
3	4	70	30	12
4	4	90	10	12
5	4	90	20	12
6	4	90	30	12
7	4	120	10	12
8	4	120	20	12
9	4	120	30	12
10	5	70	10	12
11	5	70	20	12
12	5	70	30	12
13	5	90	10	12
14	5	90	20	12
15	5	90	30	12
16	5	120	10	12
17	5	120	20	12
18	5	120	30	12
19	6	70	10	12
20	6	70	20	12
21	6	70	30	12
22	6	90	10	12
23	6	90	20	12
24	6	90	30	12
25	6	120	10	12
26	6	120	20	12
27	6	120	30	12

7.3 Anexo 3: Caracterización de la materia prima



Figura 18. Muestras de pulpa para medir humedad.

Tabla 13. Datos de muestreo para obtener humedad.

Muestra	Masa bandeja (g)	Masa muestra húmeda + bandeja (g)	Masa muestra seca + bandeja (g)
1	1,10	17,56	7,17
2	1,06	22,20	8,30
3	0,94	18,96	6,94
4	0,69	19,04	7,09
5	0,69	22,52	8,34
6	0,64	14,48	5,38
7	0,87	17,65	6,41
8	0,77	17,94	6,49
9	0,74	17,57	6,57

7.3.1 Fórmulas para obtener la humedad y consistencia de la pulpa

$$H = \frac{M_{HB} - M_{SB}}{M_{HB}} * 100 \quad (1)$$

$$CS = 100 - H \quad (2)$$

Donde:

M_{HB} : Masa húmeda con bandeja (g)

CS: Consistencia de la pulpa (%)

M_{SB} : Masa seca con bandeja (g)

H: Humedad (%)

7.3.2 Resultados de humedad y consistencia

Tabla 14. Humedad y consistencia de cada muestra.

Muestra	Humedad (%)	Consistencia (%)
1	59,17	40,82
2	62,60	37,40
3	63,38	36,62
4	62,74	37,26
5	62,95	37,05
6	62,88	37,12
7	63,68	36,32
8	63,84	36,16
9	62,63	37,37

La humedad de la pulpa y la consistencia se obtuvieron con el promedio de 8 muestras, puesto que el dato de la muestra 1 se aleja mucho de la media en comparación con los demás.

7.3.3 Fórmulas para obtener la masa requerida para cada ensayo

$$M_S = \frac{CS_r * V}{100} \quad (3)$$

$$M_H = \left(\frac{M_S}{CS} \right) * 100 \quad (4)$$

Donde:

M_S : Masa seca de pulpa (g)

V: Volumen (ml)

M_H : Masa húmeda de pulpa (g)

CS: Consistencia (%)

CS_r : Consistencia requerida (%)

7.4 Anexo 4: Cálculo de carga de soda

La carga de soda cáustica es calculada en base a la pulpa seca que se procesa. Así, con los gramos secos utilizados en cada ensayo, se aplica regla de tres simples para obtener 3, 5 y 6% y dividiendo por la densidad de la soda cáustica se obtienen los ml de solución requerida. A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas.

$$M_s = \frac{MS * S\%}{100\%} \quad (5)$$

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_s} \quad (6)$$

Donde:

M_s = Masa de soda cáustica.

V_s = Volumen de soda cáustica.

$S\%$ = Porcentaje de soda cáustica.

ρ_s = Densidad de soda cáustica.

MS = Masa seca de pulpa.

7.5 Anexo 5: Preparación soda cáustica.



Figura 19. Preparación de soda cáustica.

7.6 Anexo 6: Preparación de pulpa para ensayos



Figura 20. Pulpa con agua de proceso en volumen de 3,5 litros.



Figura 21. Pulpa disgregada en agitador eléctrico.

7.7 Anexo 7: Equipos utilizados en el laboratorio LPF

7.7.1 Reactor



Figura 22. Reactor de 10 litros.



Figura 23. Pulpa en el reactor.

7.7.2 Refinador



Figura 24. Refinador de discos.

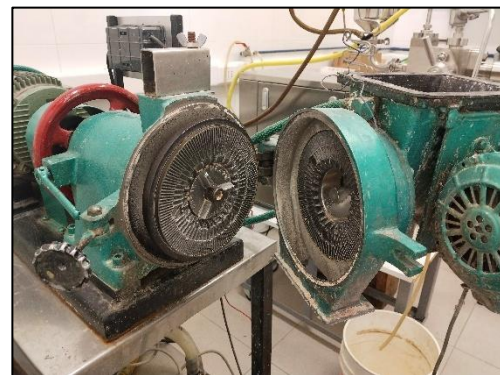


Figura 25. Parte interna del refinador (discos).

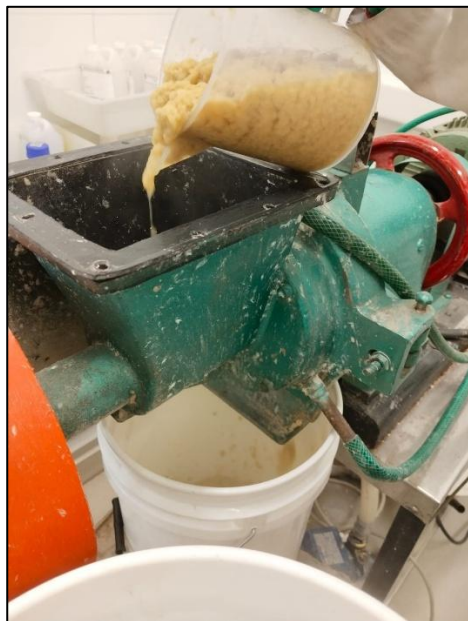


Figura 26. Uso de refinador.



Figura 27. Equipo para análisis Canadian Standard Freeness.



Figura 28. Pulpa envasada.

7.8 Anexo 8: Formación de hojas.



Figura 29. Pulpa diluida para formar hojas.



Figura 30. Hojas formadas.



Figura 31. Hojas secas.

7.8.1 Equipos utilizados en la formación de hojas.



Figura 32. Formador de hojas.



Figura 33. Secador de hojas.

7.9 Anexo 9: Equipos para la medición de propiedades



Figura 34. Dinamómetro Alwetron SE-60
Elab/318



Figura 35. Tearing tester



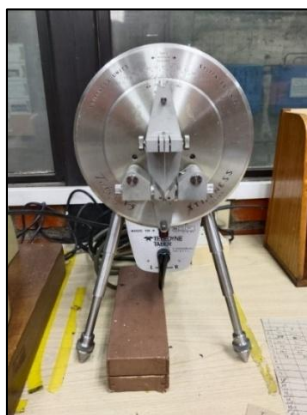
Figura 36. Explosímetro Mullen
Elab/351



**Figura 37. Medidor de resistencia a la compresión en corto SCT
Elab/347**



**Figura 38. Medidor porosidad tester L&W Bendtsen
Elab/337**



**Figura 39. Medidor de rigidez Táber
Elab/214**

7.10 Anexo 10: Resultados

7.10.1 Planilla con resultados de medición de propiedades

Tabla 15. Resultados de las propiedades medidas a las hojas de laboratorio.

N°	gramaje	Ensayos	Carga NaOH (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	IND.TRACC	IND.RAS	EXPLOSIÓN	SCT	RIGIDEZ	POROSIDAD
1	98,6	A1	4%	70	10	56,39	6,09	35,99	2,60	41,25	211
2	104,2	A2	4%	70	20	51,65	7,31	44,22	2,64	52,00	241
3	107,4	A3	4%	70	30	50,40	6,82	36,06	3,04	35,63	231
4	110,8	B1	4%	90	10	52,03	6,53	30,84	3,01	46,00	264
5	106,1	B2	4%	90	20	49,90	6,77	37,72	2,69	32,25	274
6	105,2	B3	4%	90	30	54,75	6,41	37,77	2,50	30,00	300
7	109,4	C1	4%	120	10	51,42	6,72	39,96	2,74	34,25	231
8	106,8	C2	4%	120	20	48,31	6,42	36,15	2,71	34,38	223
9	106,1	C3	4%	120	30	49,59	7,08	41,59	2,49	32,75	245
10	95,7	D1	5%	70	10	56,00	6,66	33,17	2,60	44,38	255
11	112,4	D2	5%	70	20	53,90	5,93	41,93	3,04	44,38	280
12	111,8	D3	5%	70	30	52,71	5,78	40,97	3,00	26,25	312
13	110,6	E1	5%	90	10	49,69	7,10	43,83	2,79	36,75	225
14	102,3	E2	5%	90	20	53,25	6,65	37,39	2,66	34,13	263
15	106,7	E3	5%	90	30	50,98	6,81	40,38	2,96	35,88	301
16	102,2	F1	5%	120	10	54,69	6,55	38,04	2,72	31,88	251
17	103	F2	5%	120	20	52,35	6,41	39,95	2,82	26,25	276
18	97,7	F3	5%	120	30	55,36	6,29	37,69	2,67	29,63	255
19	101,1	G1	6%	70	10	53,72	6,15	39,98	2,93	44,63	208
20	114,4	G2	6%	70	20	51,92	6,63	40,68	3,02	33,25	256
21	116,7	G3	6%	70	30	52,56	6,24	43,44	3,22	42,63	349
22	101,9	H1	6%	90	10	55,07	5,66	38,49	2,81	31,38	401
23	103,9	H2	6%	90	20	59,86	5,43	38,45	2,93	34,25	420
24	105,4	H3	6%	90	30	55,25	6,09	46,91	3,18	27,00	457
25	106,8	I1	6%	120	10	56,36	5,79	39,88	3,10	43,38	442
26	102,7	I2	6%	120	20	55,69	6,50	40,81	2,77	31,75	291
27	105,6	I3	6%	120	30	58,56	6,78	39,34	2,85	36,00	344

Tabla 16. Resultados del análisis Fiber Tester

Carga (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Fibra larga (%)	Fibra media (%)	Fibra corta (%)	Largo (mm)	Ancho (mm)
4	70	10	29,5	35,9	34,6	1,00	36
4	70	20	27,3	36	36,8	0,97	35,8
4	70	30	27,3	36	36,6	0,97	36
4	90	10	29,4	35,6	35,1	1,01	36,2
4	90	20	29,1	35,3	35,6	0,99	35,8
4	90	30	27,6	36,3	36,2	0,98	35,7
4	120	10	31,4	34,1	34,5	1,05	36,3
4	120	20	31,5	35,1	33,5	1,04	36,3
4	120	30	30,4	34,9	34,7	1,03	36,1
5	70	10	29,6	35,3	35	1,01	36,1
5	70	20	25,2	35,8	39	0,92	35,4
5	70	30	25,5	35,8	38,8	0,91	35,4
5	90	10	29,7	35,7	34,6	1,00	36,4
5	90	20	29,1	35,6	35,4	0,99	36
5	90	30	28,2	35,2	36,5	0,98	35,8
5	120	10	30,3	36,3	33,5	1,03	36,5
5	120	20	28,6	35,8	35,5	0,98	36
5	120	30	30,4	34,7	35	1,04	36,2

6	70	10	29,8	35,6	34,6	1,01	35,9
6	70	20	28,2	35,4	36,4	0,97	36,2
6	70	30	26,9	35,4	37,7	0,94	35,5
6	90	10	26,3	35,8	38	0,93	35,4
6	90	20	23,6	36,8	39,7	0,87	34,9
6	90	30	23,8	36,6	39,6	0,89	34,7
6	120	10	26,3	36,8	36,9	0,93	35,5
6	120	20	31,4	34,3	34,3	1,04	36,7
6	120	30	30,5	35,1	34,4	1,03	36,6

7.10.2 Pruebas de múltiples rangos

Índice de tracción

Tabla 17. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para el índice de tracción.

Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
4,0%	9	51,60	0,87	A
5,0%	9	53,21	0,87	AB
6,0%	9	55,44	0,87	B

Fuente: Statgraphics.

Tabla 18. Significancia en los contrastes de concentración de soda cáustica para el índice de tracción con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
4,0%-5,0%		-1,61	2,56
4,0%-6,0%	*	-3,84	2,56
5,0%-6,0%		-2,23	2,56

Fuente: Statgraphic

Tabla 19. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para el índice de tracción.

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
70	9	53,25	0,87	A
90	9	53,42	0,87	A
120	9	53,59	0,87	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 20. Significancia en los contrastes de temperatura para el índice de tracción con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
70-90		-0,17	2,56
70-120		-0,34	2,56
90-120		-0,17	2,56

Fuente: Statgraphics.

Tabla 21. Prueba de múltiples rangos de tiempo para el índice de tracción.

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	9	52,98	0,87	A
30	9	53,35	0,87	A
10	9	53,93	0,87	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 22. Significancia en los contrastes de tiempo para el índice de tracción con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
10-20		0,95	2,56
10-30		0,58	2,56
20-30		-0,37	2,56

Fuente: Statgraphics.

Índice de rasgado

Tabla 23. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para el índice de rasgado.

Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
4,0%	9	6,68	0,15	A
5,0%	9	6,46	0,15	AB
6,0%	9	6,14	0,15	B

Fuente: Statgraphics.

Tabla 24. Significancia en los contrastes de concentración de soda cáustica para el índice de rasgado con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
4,0%-5,0%		0,22	0,44
4,0%-6,0%	*	0,54	0,44
5,0%-6,0%		0,32	0,44

Fuente: Statgraphics.

Tabla 25. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para el índice de rasgado.

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
70	9	6,40	0,15	A
90	9	6,38	0,15	A
120	9	6,50	0,15	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 26. Significancia en los contrastes de temperaturas para el índice de rasgado con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
70-90		0,02	0,44
70-120		-0,10	0,44
90-120		-0,12	0,44

Fuente: Statgraphics.

Tabla 27. Prueba de múltiples rangos de tiempo para el índice de rasgado.

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	9	6,45	0,15	A
30	9	6,48	0,15	A
10	9	6,36	0,15	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 28. Significancia en los contrastes de tiempo para el índice de rasgado con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
10-20		-0,09	0,44
10-30		-0,12	0,44
20-30		-0,03	0,44

Fuente: Statgraphics.

Explosión

Tabla 29. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para la explosión.

Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
4,0%	9	37,81	1,10	A
5,0%	9	39,26	1,10	A
6,0%	9	40,89	1,10	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 30. Significancia en los contrastes de concentración para la explosión con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
4,0%-5,0%		-1,45	3,25
4,0%-6,0%		-3,08	3,25
5,0%-6,0%		-1,63	3,25

Fuente: Statgraphics.

Tabla 31. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para la explosión.

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
70	9	39,60	1,10	A
90	9	39,09	1,10	A
120	9	39,27	1,10	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 32. Significancia en los contrastes de temperatura para la explosión con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
70-90		0,52	3,25
70-120		0,34	3,25

90-120		-0,18	3,25
--------	--	-------	------

Fuente: Statgraphics.

Tabla 33. Prueba de múltiples rangos de tiempo para la explosión.

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	9	39,70	1,10	A
30	9	40,46	1,10	A
10	9	37,80	1,10	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 34. Significancia en los contrastes de tiempo para la explosión con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
10-20		-1,90	3,25
10-30		-2,66	3,25
20-30		-0,76	3,25

Fuente: Statgraphics.

SCT

Tabla 35. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para el SCT.

Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
4,0%	9	2,71	0,06	A
5,0%	9	2,81	0,06	A
6,0%	9	2,98	0,06	B

Fuente: Statgraphics.

Tabla 36. Significancia en los contrastes de concentración de soda cáustica para el SCT con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
4,0%-5,0%		-0,09	0,17
4,0%-6,0%	*	-0,27	0,17
5,0%-6,0%	*	-0,17	0,17

Fuente: Statgraphics.

Tabla 37. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para el SCT.

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
70	9	2,90	0,06	A
90	9	2,84	0,06	A
120	9	2,76	0,06	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 38. Significancia en los contrastes de temperatura para el SCT con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
-----------	---------------	------------	-------------

70-90		0,06	0,17
70-120		0,14	0,17
90-120		0,07	0,17

Fuente: Statgraphics.

Tabla 39. Prueba de múltiples rangos de tiempo para el SCT.

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	9	2,81	0,06	A
30	9	2,88	0,06	A
10	9	2,81	0,06	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 40. Significancia en los contrastes de tiempo para el SCT con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
10-20		0,002	0,17
10-30		-0,07	0,17
20-30		-0,07	0,17

Fuente: Statgraphics.

Rigidez

Tabla 41. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para la rigidez.

Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
4,0%	9	37,61	1,88	A
5,0%	9	34,39	1,88	A
6,0%	9	36,03	1,88	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 42. Significancia en los contrastes de concentración de soda cáustica para la rigidez con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
4,0%-5,0%		3,22	5,55
4,0%-6,0%		1,58	5,55
5,0%-6,0%		-1,64	5,55

Fuente: Statgraphics.

Tabla 43. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para la rigidez.

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
70	9	40,49	1,88	A
90	9	34,18	1,88	A
120	9	33,36	1,88	B

Fuente: Statgraphics.

Tabla 44. Significancia en los contrastes de temperatura para la rigidez con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
-----------	---------------	------------	-------------

70-90	*	6,31	5,55
70-120	*	7,13	5,55
90-120		0,82	5,55

Fuente: Statgraphics.

Tabla 45. Prueba de múltiples rangos de tiempo para la rigidez.

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	9	35,85	1,88	A
30	9	32,86	1,88	AB
10	9	39,32	1,88	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 46. Significancia en los contrastes de tiempo para la rigidez con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
10-20		3,47	5,55
10-30	*	6,46	5,55
20-30		2,99	5,55

Fuente: Statgraphics

Porosidad

Tabla 47. Prueba de múltiples rangos de la concentración de soda cáustica para la porosidad.

Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
4,0%	9	246,67	9,72	A
5,0%	9	268,67	9,72	AB
6,0%	5	291,47	14,12	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 48. Significancia en los contrastes de concentración de soda cáustica para la porosidad con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
4,0%-5,0%		-22,00	29,13
4,0%-6,0%	*	-44,80	36,33
5,0%-6,0%		-22,80	36,33

Fuente: Statgraphics.

Tabla 49. Prueba de múltiples rangos de la temperatura para la porosidad.

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
70	9	260,33	9,72	A
90	6	282,03	13,47	A
120	8	264,03	10,47	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 50. Significancia en los contrastes de temperatura para la porosidad con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
70-90		-22,10	34,41
70-120		-3,70	30,28
90-120		18,40	34,41

Fuente: Statgraphics.

Tabla 51. Prueba de múltiples rangos de tiempo para la porosidad.

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	8	267,50	11,57	A
30	8	296,63	10,51	AB
10	7	242,67	11,57	A

Fuente: Statgraphics.

Tabla 52. Significancia en los contrastes de tiempo para la porosidad con un 95% de confianza.

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
10-20		-24,84	32,26
10-30	*	-53,96	32,26
20-30		-29,13	30,90

Fuente: Statgraphics.

7.11 Anexo 11: Verificación de supuestos Anova

Índice de tracción

El gráfico Q-Q de los residuos del índice de tracción, ver figura xx, muestra una adecuada alineación de los puntos con la recta teórica, sin desviaciones importantes ni presencia de valores atípicos, lo que sugiere el cumplimiento del supuesto de normalidad. Confirmado con el resultado de la prueba de Shapiro- Wilk, en donde el valor $-P = 0,67$; mayor a 0,05 indica que la muestra sigue una distribución normal.

La gráfica de independencia, ver Figura xx, no presenta patrones, tendencias ni correlaciones evidentes entre los residuos, lo que indica que el supuesto de independencia se cumple. Por su parte, el supuesto de homocedasticidad se comprueba mediante el gráfico de residuos versus predichos, mostrado en la Figura xx, en donde se ve una dispersión relativamente constante de los residuos a lo largo del rango de valores ajustados, lo que sugiere varianza constante.

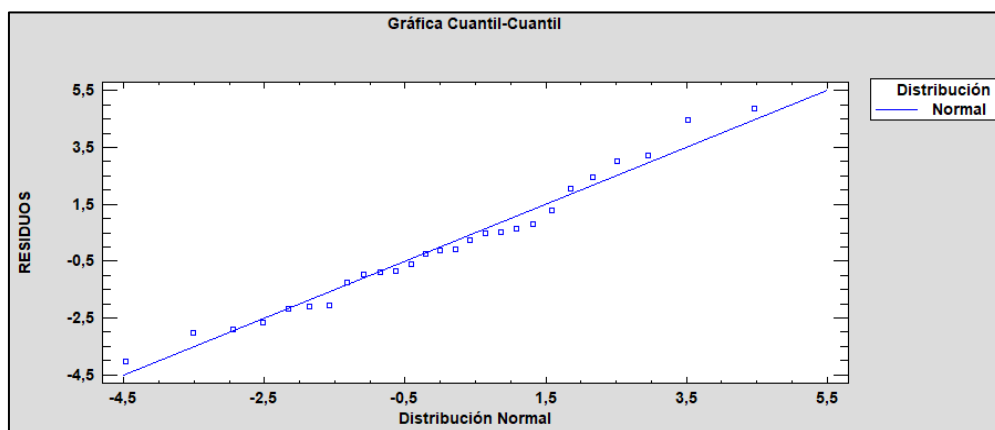


Figura 40. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de índice de tracción.
Fuente: Statgraphics.

Tabla 53. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para índice de tracción.

Prueba	Estadístico	Valor -P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,97	0,67

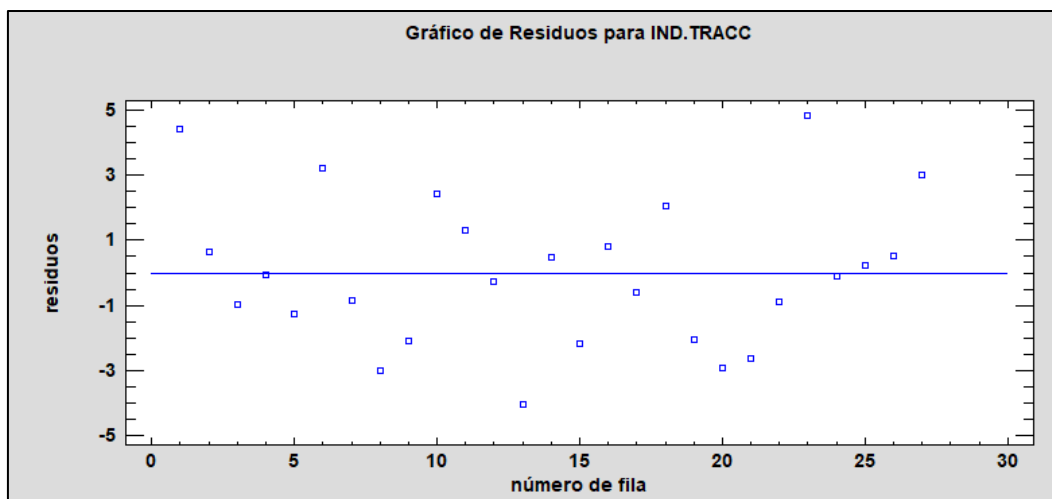


Figura 41. Gráfica para comprobar independencia del índice de tracción.
Fuente: Statgraphics.

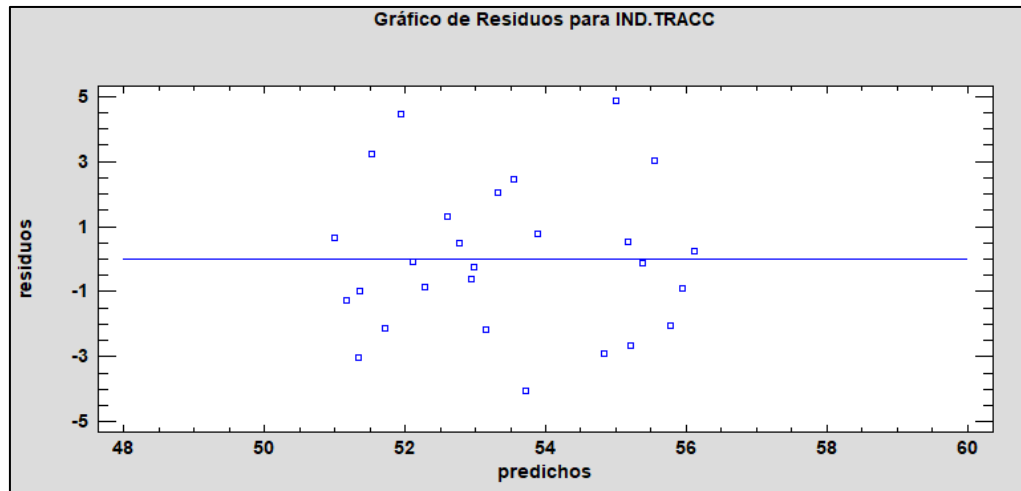


Figura 42. Gráfica para comprobar homocedasticidad del índice de tracción.

Fuente: Statgraphics.

Índice de rasgado

En el gráfico Q-Q correspondiente al índice de rasgado, ver Figura xx, los residuos se distribuyen de manera cercana a la recta de referencia, con leves dispersiones en los extremos que no resultan significativas. Esto concuerda con la prueba de Shapiro-Wilk en donde el valor $-P = 0,76$; mayor a 0,05 indicando que la muestra sigue una distribución normal.

La gráfica de independencia en la Figura xx, no evidencia autocorrelación ni estructura definida en los residuos, cumpliendo el supuesto de independencia. La gráfica de homocedasticidad, ver Figura xx, presenta una dispersión uniforme, indicando varianza aproximadamente constante entre los valores.

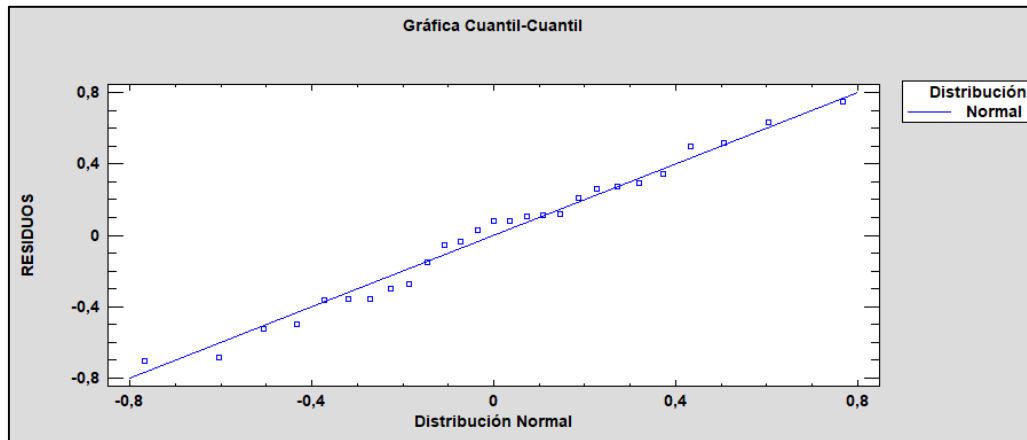


Figura 43. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de índice de rasgado.
Fuente: Statgraphics.

Tabla 54. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para índice de rasgado.

Prueba	Estadístico	Valor -P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,97	0,76

Fuente: Statgraphics.

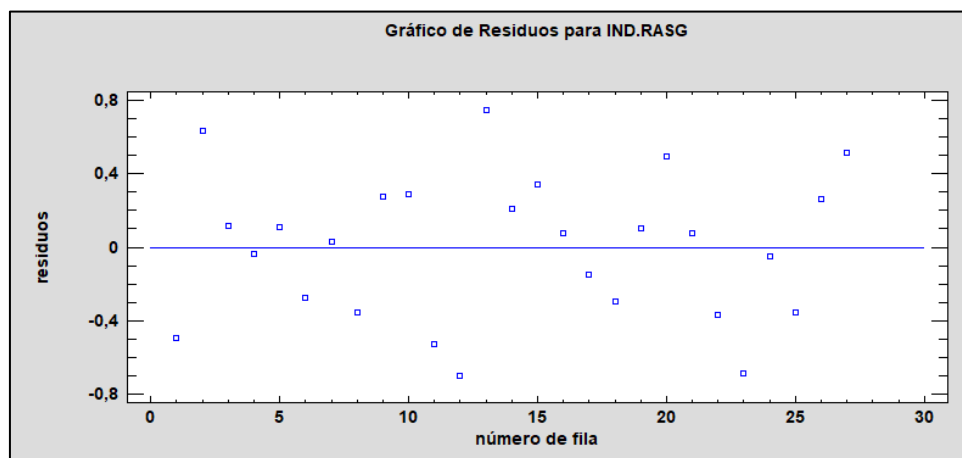


Figura 44. Gráfica para comprobar independencia del índice de rasgado.
Fuente: Statgraphics.

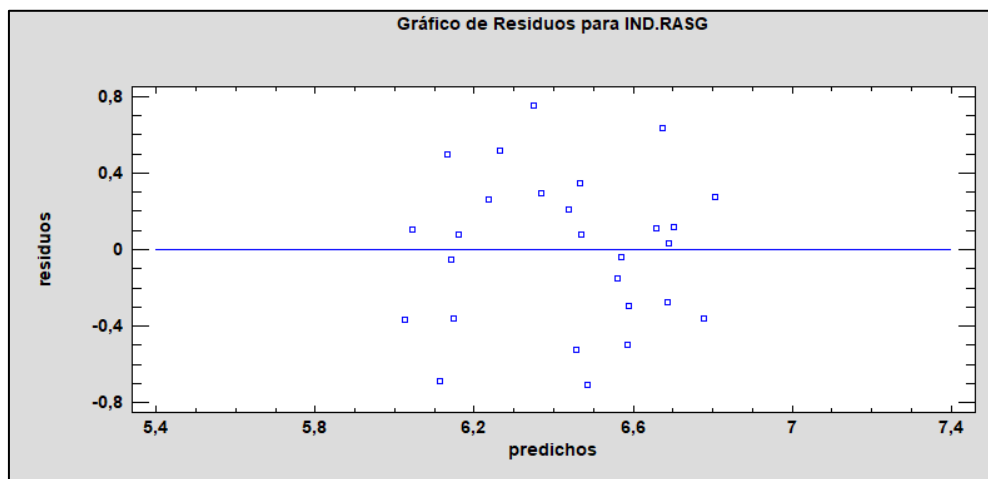


Figura 45. Gráfica para comprobar homocedasticidad del índice de rasgado.
Fuente: Statgraphics.

Explosión

El gráfico Q-Q de los residuos de explosión presente en la Figura xx, muestra una distribución razonablemente alineada con la recta teórica, aunque con una dispersión ligeramente mayor en comparación con otras propiedades. No obstante, la prueba de Shapiro-Wilk, indica un valor $-P = 0,27$; con este valor mayor a 0,05 indica que no se rechaza la hipótesis de normalidad.

La gráfica de independencia en la Figura xx, no presenta patrones sistemáticos, lo que sugiere independencia entre las observaciones. Así mismo, la gráfica de homocedasticidad, ver Figura xx, no evidencia cambios marcados en la variabilidad de los residuos, por lo que se considera que el supuesto de varianzas constantes se cumple de manera aceptable.

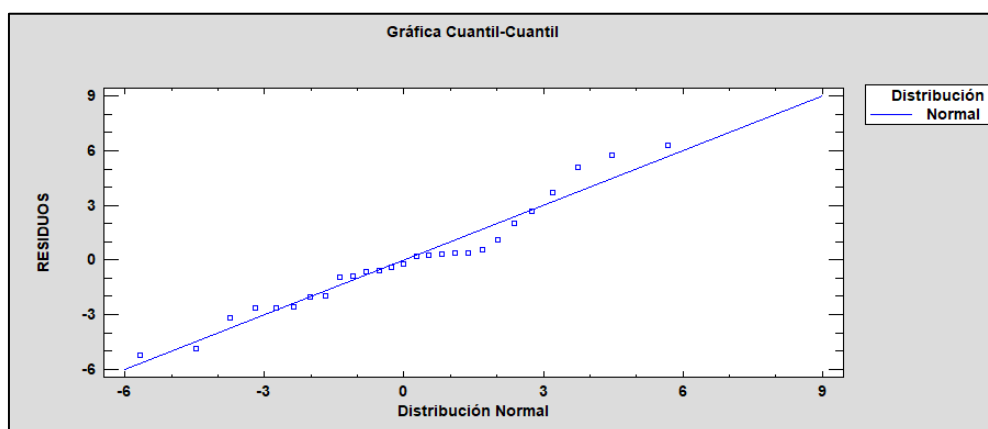


Figura 46. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de explosión.
Fuente: Statgraphics.

Tabla 55. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para explosión.

Prueba	Estadístico	Valor -P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,95	0,27

Fuente: Statgraphics.

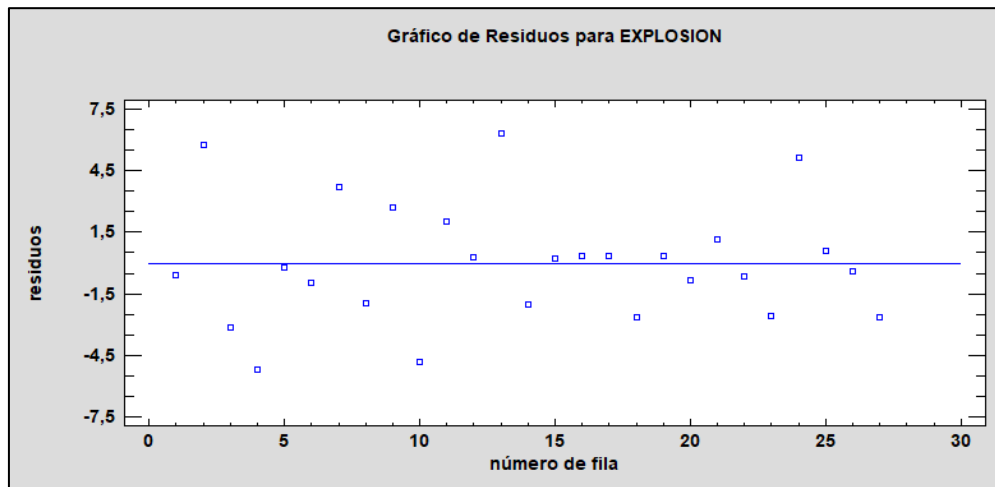


Figura 47. Gráfica para comprobar independencia de explosión.

Fuente: Statgraphics.

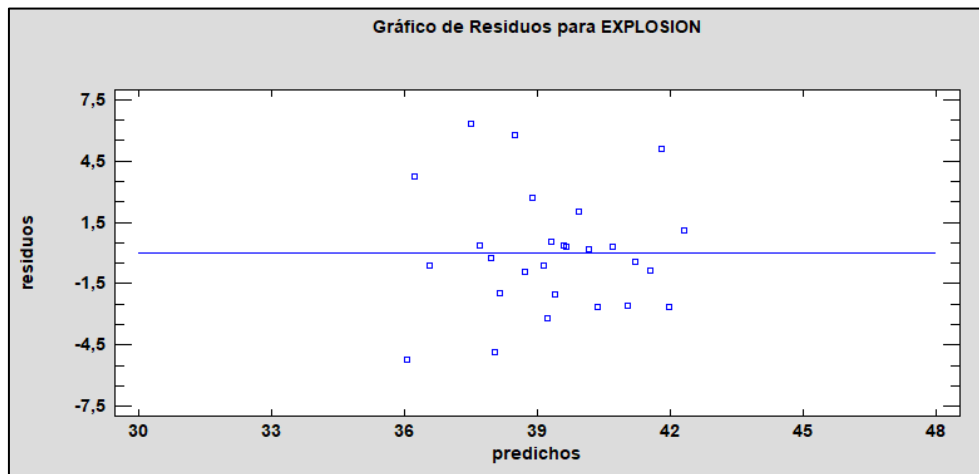


Figura 48. Gráfica para comprobar homocedasticidad de explosión.

Fuente: Statgraphics.

Para el SCT, el gráfico Q-Q presente en la Figura xx, muestra una buena concordancia entre los residuos y la distribución normal teórica, sin desviaciones relevantes. Este comportamiento es coherente con el resultado de la prueba de Shapiro- Wilk en donde el valor $-P = 0,54$; siendo este mayor a 0,05 no se puede rechazar la hipótesis de que la muestra se distribuye de manera normal.

La gráfica de independencia en la Figura xx indica una distribución aleatoria de los residuos, sin tendencias ni agrupamientos, mientras que la gráfica de homocedasticidad, ver Figura xx, muestra una dispersión homogénea, lo que sugiere que los supuestos de independencia y varianza constante se cumplen adecuadamente.

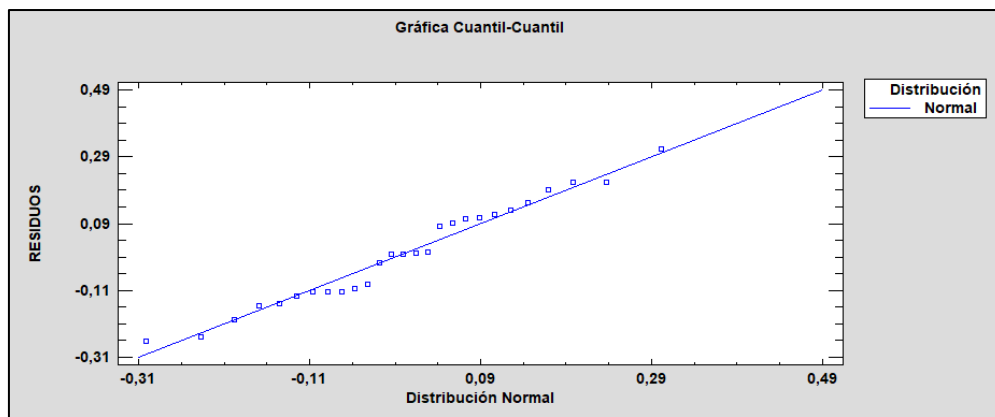


Figura 49. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de SCT.

Fuente: Statgraphics.

Tabla 56. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para SCT

Prueba	Estadístico	Valor -P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,97	0,54

Fuente: Statgraphics.

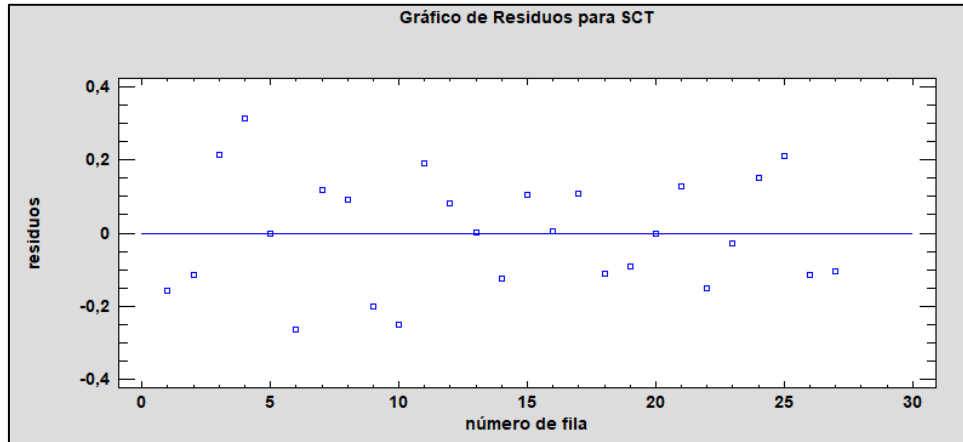


Figura 50. Gráfica para comprobar independencia de SCT.
Fuente: Statgraphics.

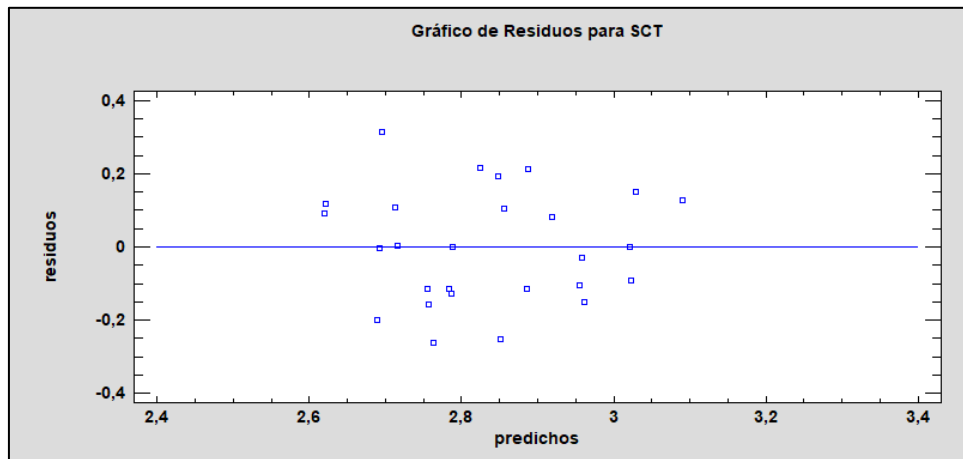


Figura 51. Gráfica para comprobar homocedasticidad de SCT.
Fuente: Statgraphics.

Rigidez:

El gráfico Q-Q de los residuos de rigidez, presente en la figura xx, muestra una alineación adecuada con la recta de normalidad, lo que se respalda con la prueba de Shapiro-Wilk que indica un valor -P de 0,59; comprobando el supuesto de normalidad.

En cuanto a la independencia, la gráfica en la Figura xx no muestra estructuras ni patrones evidentes, y la gráfica de homocedasticidad en la Figura xx, indica que los residuos mantienen una varianza similar a lo largo del rango de los valores ajustados.

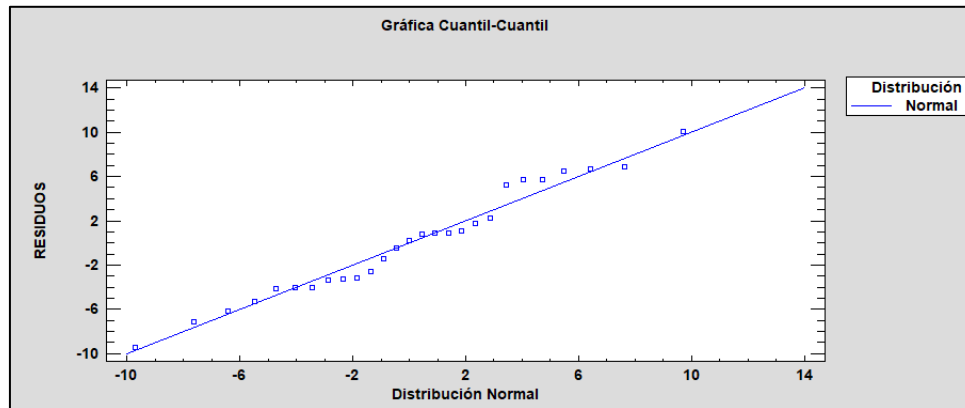


Figura 52. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de rigidez.

Fuente: Statgraphics.

Tabla 57. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para rigidez.

Prueba	Estadístico	Valor -P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,97	0,59

Fuente: Statgraphics.

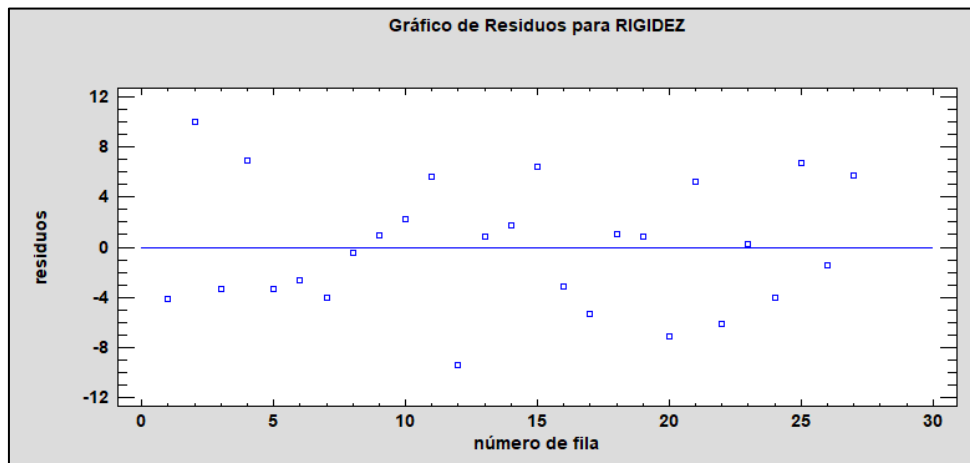


Figura 53. Gráfica para comprobar independencia de rigidez.

Fuente: Statgraphics.

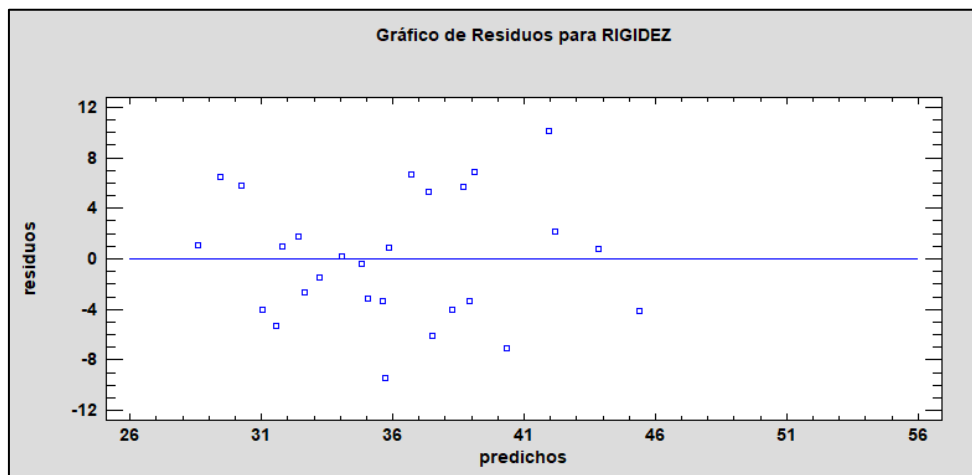


Figura 54. Gráfica para comprobar homocedasticidad de rigidez.

Fuente: Statgraphics.

Porosidad

El gráfico Q-Q de los residuos de porosidad, en la figura xx, muestra una mayor dispersión en los extremos en comparación con otras propiedades; sin embargo, la tendencia general sigue la recta teórica, lo que sugiere un cumplimiento razonable del supuesto de normalidad. Respaldado por la prueba de Shapiro-Wilk con un valor -P de 0,20; siendo este último mayor a 0,05 no se puede rechazar la hipótesis de que la muestra viene de una distribución normal, comprobando el supuesto de normalidad.

La gráfica de independencia, Figura xx, no evidencia autocorrelación ni patrones definidos, y la gráfica de homocedasticidad, Figura xx, muestra una dispersión relativamente uniforme de los residuos, por lo que se considera que los supuestos de independencia y homogeneidad de varianzas se cumplen.

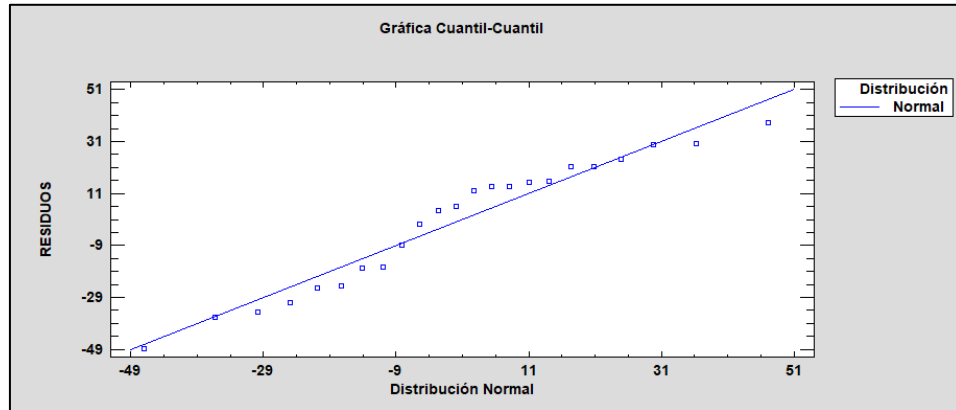


Figura 55. Gráfico Q-Q Distribución normal de los residuos de porosidad.

Fuente: Statgraphics.

Tabla 58. Prueba de estadístico W de Shapiro Wilk para porosidad.

Prueba	Estadístico	Valor -P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,94	0,20

Fuente: Statgraphics.

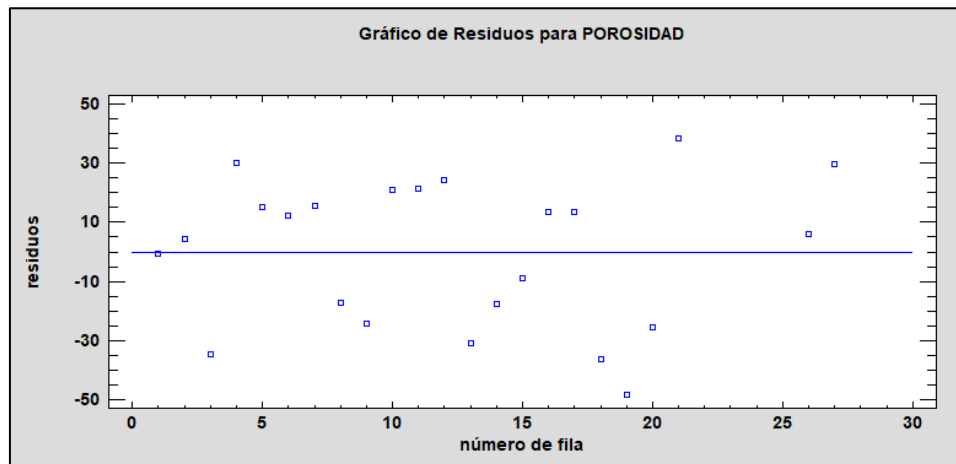


Figura 56. Gráfica para comprobar independencia de porosidad.

Fuente: Statgraphics

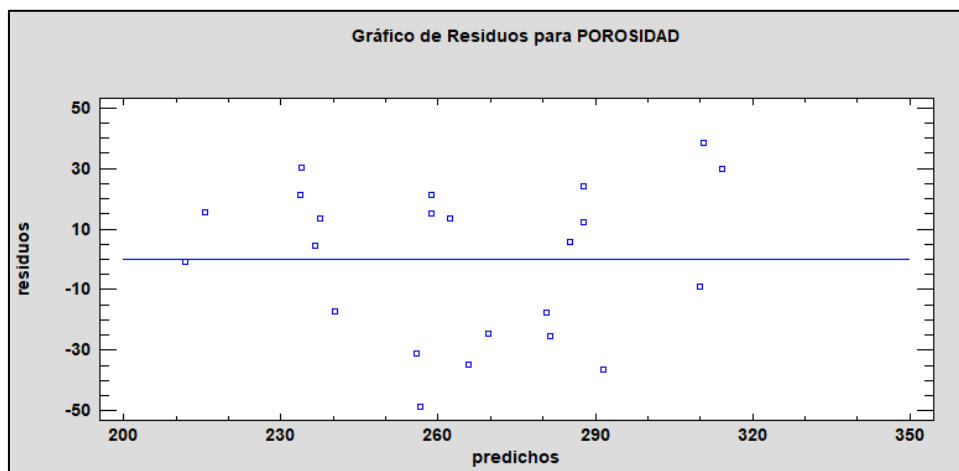


Figura 57. Gráfica para comprobar homocedasticidad de porosidad.

Fuente: Statgraphics.

En síntesis, luego del análisis de todos los gráficos, se concluye que los supuestos de normalidad e independencia se cumplen de manera satisfactoria para todas las propiedades analizadas, no obstante, la homocedasticidad no se cumple estrictamente. Sin embargo, el análisis ANOVA se considera válido debido al carácter balanceado del diseño experimental y al cumplimiento de los supuestos de normalidad e independencia, condiciones bajo las cuales el método resulta robusto frente a desviaciones moderadas de la igualdad de varianzas.

ANEXO D: FORMATO RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA

RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Química.
Carrera : Ingeniería Civil Química
Nombre del memorista : Camila Paz Antonia Muñoz Oliva
Título de la memoria : Efecto del tratamiento alcalino de la fracción de rechazos en las propiedades del papel Duo en CPP San Pedro de la Paz
Fecha de la presentación oral: Enero 2026
Profesor(es) Guía : Miguel Pereira.
Profesor(es) Revisor(es) : Johanna Castaño.
Concepto :
Calificación :

El presente estudio analiza, mediante ensayos de laboratorio, los efectos de la modificación del tratamiento alcalino aplicado a la fracción de rechazos de la pulpa mecánica sobre las propiedades del papel Duo, producido en la planta Papelera del Pacífico (CPP), San Pedro de la Paz. Para ello, se variaron: dosificación de soda cáustica, temperatura del tratamiento y tiempo de residencia, evaluando tres niveles por factor. A partir de la pulpa tratada se fabricaron hojas de laboratorio y se midieron propiedades relevantes para la evaluación de la calidad del papel: índice de tracción y rasgado, resistencia a la explosión, SCT, porosidad y rigidez.

Como resultado, se tiene que: la carga de soda cáustica y la temperatura del tratamiento son los factores con mayor influencia sobre las propiedades evaluadas. La carga de soda resultó estadísticamente significativa para el índice de tracción y el SCT; el tiempo de residencia influyó de manera significativa en la porosidad y la temperatura en la rigidez. Mediante la optimización de los ensayos se identificó una condición operativa que mejora el desempeño del papel, correspondiente a 5% de carga, 70°C y 30 min. Finalmente, la comparación con hojas elaboradas a partir de pasta de planta evidenció que la modificación del tratamiento alcalino permite mejorar la calidad del papel, destacando su potencial aplicación a nivel industrial.