

**BIOCOMBUSTIBLES:
FACTORES QUE INCIDEN EN LA
CALIDAD DE LA BRIQUETA**

por

SADO ABDELHAMID

Ingeniero Mecánico

Tesis presentada como requerimiento parcial
para acceder al grado académico de
“MAGISTER EN INGENIERIA ESTRUCTURAL”
de la
Universidad Nacional de Tucumán

Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán”
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
San Miguel de Tucumán
Noviembre 2021

“A mi Familia y Amigos”

....

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer:

A Dios y a su madre Santa María, una y mil veces por su ayuda y compañía en cada paso y hora de estudio de la maestría en los momentos buenos y malos.

A el Dr. Facundo Isla quién participo en mi formación y contribuyo como tutor del presente trabajo de investigación, cuyo apoyo, experiencia, capacidad y dedicación fueron fundamentales para poder realizar esta tesis.

A la Dra. Bibiana Luccioni, Directora Académica de la carrera, por brindarme la oportunidad de realizar el posgrado, por su ayuda, consejo, orientación y ejemplo profesional.

A los profesores del XIII Maestría en Ingeniería Estructural de la Universidad Nacional de Tucumán, por su dedicación y comprensión durante el dictado de los cursos y en especial a los directores del Instituto de Estructuras Ing. Sergio Gutiérrez y Ing. Enrique Galíndez.

A mis compañeros de la maestría Luciana Argañaraz Saenz y Daniel Farfán Duran, por su gran ejemplo, tiempo y apoyo los cuales fueron pilar fundamental en el cursado. También deseo agradecer a Fabián Fiengo Pérez, José Luis Álvarez, Martín Almenar, José Saracho y a todos los miembros del instituto que me apoyaron y fueron de gran soporte para el cursado y tesis.

A mis compañeros del INTI por su ayuda y acompañamiento durante todo el posgrado Martín Rearte, Marcos Risso, Guillermo Martínez y Alejandra Delaporte y en especial al director de INTI Tucumán Ing. Julio Agnello por su apoyo y gestión para que pueda realizar el posgrado.

A mis Profesores de la carrera de ingeniería Mecánica UTN-FRT en especial a los ingenieros Luis Mentz, Luis D'Alessandro y Luis García los cuales me enseñaron lo que es ser un profesional apasionado, el cual ama su profesión y la enseñanza de esta.

Finalmente quiero agradecer a mi novia Mercedes, familia y amigos de toda la vida, que han estado siempre en las alegrías y tristezas brindándome su apoyo y contención, ya que sin ellos nada de esto habría sido posible.

RESUMEN

En la actualidad existe una creciente demanda de energía y combustibles renovables a nivel mundial, debido a la expansión demográfica, tecnológica y a los impactos ambientales que el uso de los combustibles fósiles conlleva. Una solución a esta demanda social es el uso de biocombustibles. Los biocombustibles son la única fuente de energía renovable que se puede gestionar, es decir; plantar, cultivar, cosechar, transformar, transportar, almacenar y usarse cuando el usuario lo requiera, sin dificultades tecnológicas y a bajos costos. Además, cuando los mismos se producen y emplean de manera sustentable, resultan eficientes económica y ambientalmente.

Existe innumerable bibliografía que especifica y fundamenta los requisitos de las normas de calidad, pero no como trabajar con los valores de los parámetros de producción industrial para alcanzar los valores planteados por estos estándares de calidad de los biocombustibles.

En esta tesis, dentro del campo de los biocombustibles, se estudia particularmente las briquetas fabricadas con biomasa de la región del norte argentino, teniendo en cuenta los estándares de calidad de la norma ISO 17225. Para ello, se lleva a cabo una campaña experimental, donde se fabrican las briquetas y se ensayan, observando como inciden en la calidad los cuatro parámetros industriales de mayor trascendencia en la producción a escala de biocombustibles sólidos. Dos de estos parámetros son la presión y temperatura de briqueteado, los cuales están asociados a la tecnología de fabricación, y los otros dos parámetros, asociados a la biomasa y al método de extracción e industrialización, son la humedad y la granulometría. El análisis de la calidad de los especímenes con las distintas combinaciones de parámetros de producción industrial es evaluado a través de la densidad y la resistencia a la compresión. Obteniendo de este análisis las combinaciones de los parámetros de fabricación industrial que resultan en valores de calidad superior a la norma y, además, como modificar los parámetros de producción industrial desde una condición de fabricación preexistente para alcanzar los estándares requeridos por dicha norma.

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
ÍNDICE	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE SIMBOLOS	xiii
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Contenido	3
CAPÍTULO 2 BIOCOMBUSTIBLES	5
2.1. Energía a partir de la Biomasa	5
2.2. Definición de biocombustible y sus derivados	16
2.3. Los biocombustibles	18
2.4. Oferta Total de biomasa en la Argentina	21
CAPÍTULO 3 CALIDAD EN BIOCOMBUSTIBLES	23
3.1. Introducción	23
3.2. Evolución de las normas y reglamentos de referencia de los biocombustibles solidos	25
3.3. La importancia de la estandarización de los biocombustibles	28
3.4. Beneficios de la normalización de los biocombustibles solidos	30
3.5. Relación entre regulación, estandarización y certificación de los biocombustibles solidos	31
3.6. Garantía de calidad	32
3.7. Objetivos y marco de un sistema de garantía de calidad para los biocombustibles sólidos	33
3.8. Norma de referencia internacional de biocombustibles solidos	34

3.9. Incidencia de las características de calidad en el uso de los biocombustibles	41
3.10. Ensayos de calidad en los biocombustibles	43
3.11. Incidencia de los indicadores de calidad en las briquetas con respecto a las normas	57
CAPÍTULO 4 ESTUDIO DEL PROCESO DE DENSIFICADO.....	60
4.1. Introducción.....	60
4.2. Incidencia del tipo de biomasa particulada en el biocombustible	60
4.3. Estructuras particuladas de la biomasa proveniente de la madera	62
4.4. Mecanismos predominantes de enlaces internos en la estructura de los biocombustibles	65
4.5. Propiedades de la biomasa residual de madera	68
4.6. Proceso de briqueteado.....	79
4.7. Modelo matemático del proceso de prensado o briqueteado de biomasa.....	79
4.8. Valores óptimos de los parámetros industriales de briqueteado	94
CAPÍTULO 5 CAMPAÑA EXPERIMENTAL: DISEÑO, ELABORACION Y ENSAYO	102
5.1. Introducción.....	102
5.2. Metodología de ensayo y equipamiento utilizado	102
5.3. Descripción de dispositivos e instrumentos de ensayo	103
5.4. Adecuación de la Biomasa para la fabricación de los especímenes	116
5.5. Especímenes producidos:	123
CAPÍTULO 6 CAMPAÑA EXPERIMENTAL: RESULTADOS	134
6.1. Análisis de los especímenes producidos	134
CAPÍTULO 7 ANALISIS DE CALIDAD EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS INDUSTRIALES	157
7.1. Introducción.....	157
7.2. Estudio de la variación de Densidad y Resistencia a la compresión para cada Granulometría en función de Presión, Temperatura y Contenido de humedad	158
7.3. Estudio de la variación de Densidad y Resistencia a la compresión para cada Contenido de humedad en función de Granulometría, Presión y Temperatura.....	176
7.4. Análisis de Correlación entre los resultados obtenidos de la Densidad y Resistencia a la Compresión.....	180
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	189

8.1. Introducción.....	189
8.2. comportamiento de la calidad en función de los parámetros de fabricación.....	189
8.3. Relación general entre la densidad y la resistencia a la compresión	191
8.4. Recomendaciones generales en los parámetros de fabricación industrial para la mejora de la calidad en las briquetas	192
8.5. Aportes al desarrollo de los biocombustibles	193
8.6. Futuras líneas de investigación	193
REFERENCIAS	195

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Consumo energético de Estados Unidos en 2000 (R. Saidura, 2011).	6
Figura 2.2: Matriz energética Mundial (Agencia Internacional de Energía).	6
Figura 2.3: Prospectiva de crecimiento energético renovable en argentina (Ministerio de Energía y Minería de Argentina, 2106)	8
Figura 2.4: Distribución de energía del RENOVAR 1.0 y sus beneficios (Ministerio de Energía y Minería de Argentina, 2106).	9
Figura 2.5: Superficie forestal como proporción de la superficie total en 1990, 2010 y 2015.	10
Figura 2.6: ciclo del carbono industrial (M'ollerstena & *, 2003)	11
Figura 2.7: Proceso de fotosíntesis (R. Saidura, 2011).	12
Figura 2.8: Clasificación de la biomasa (Parikka, 2003).	12
Figura 3.1: Tables with property grades in EN ISO 17225-1 to 7 (Križan, 2014)	23
Figura 3.2: Ejemplo de clasificación de 1 biomasa Woody (EN 14961-1: 2010).	25
Figura 3.3: Evolución de las normas de referencia de biocombustibles sólidos (Sánchez, 2015)..	27
Figura 3.4: Marco europeo e internacional para biocombustibles sólidos normalización (Wolfgang & Rainer, 2011).	30
Figura 3.5: Jerarquía de regulación, normalización y certificación (Wolfgang & Rainer, 2011).	31
Figura 3.6: cadena de suministro de los biocombustibles sólidos (extraído de EN 15234).	34
Figura 3.7: Determinación de humedad para astillas (izquierda) y biomasa molida (derecha) (Ortiz, 2006; Vega y Ortiz, 2013).	44
Figura 3.8: Determinación del poder calorífico en un calorímetro (Vega y Ortiz, 2013). Derecha: Detalle de la bomba calorimétrica (Ortiz, 2006).	45
Figura 3.9: Poder calorífico neto en función de la humedad para astillas de una empresa de logística de biomasa para cuatro especies del noroeste español (Somoza, 2014).	46
Figura 3.10: La baja densidad aparente de biomasa residual y astillas resulta en altos costes de transporte. Derecha: compactación de biomasa en pacas mediante empacadora forestal (Sanz Piñeiro et al., 2011).	49
Figura 3.11: Detalle de un torre vibratoria CISA con mallas normalizadas para determinación de la distribución granulométrica (izquierda) (Ortiz, 2006).	50
Figura 3.12: Control de calidad de la granulometría y contenido de finos de astillas de tres muestras (C-P,B y X) en una empresa consumidora de astilla para combustión en el Noroeste español (Somoza et al., 2014).	51

Figura 3.13: “Figura 1 ISO 17225-3” Dimisiones de las briquetas (D: Diámetro, L: Longitud, A: Anchura, L*: Altura o diámetro de briquetas cilíndricas).....	53
Figura 3.14: Determinación del contenido de cenizas de biomasa molida.	54
Figura 3.15: Temperaturas de fusión de las cenizas según las normas ISOv540:2008 y DIN 51730:1998-04 a) DT, b) ST, c) HT, d) FT (Maginot, Rähim, ARTEMIO, & Lidia, 2015).....	55
Figura 3.16: Ensayo de resistencia a la compresión transversal	56
Figura 3.17: Ensayo de resistencia a la compresión axial.	56
Figura 3.18: Impacto de las propiedades del combustible en el proceso de combustión. (M. Rönnbäck, 2012).....	58
Figura 3.19: Dependencia entre las propiedades mecánicas y químico-térmicas (Rönnbäck & et al., 2012).	58
Figura 4.1: Partículas sólidas "A" en partículas (Jindra, 1984).	61
Figura 4.2: Diferencia entre cambiar el tamaño de la superficie de cuerpos sólidos ideales y reales (Jesenák, 2008).	62
Figura 4.3: Ejemplos de estructura de partículas (Jesenák, 2008).	63
Figura 4.4: Diagrama de triángulo que representa las composiciones de las fases. (Fedá, 1977).	63
Figura 4.5: Resistencia teórica de las partículas de la sustancia unida en relación con el tamaño de partícula antes del prensado (Jindra, 1984; Medek, 1991).....	64
Figura 4.6: Representación esquemática de diversos grados de saturación entre partículas (Pietsch, 1991). (a) sin saturación - seco; (b) capas de absorción; (c) puentes líquidos (estado pendular); (d) estado de transición (estado funicular); (e) estado completamente saturado (estado líquido); (f) gota.	66
Figura 4.7: Esquema que representa los mecanismos de unión (Pietsch, 1991).....	67
Figura 4.8: Nomograma para la conversión mutua entre humedad absoluta y relativa en madera (Požgaj & et al., 1997).	71
Figura 4.9: Representación ilustrativa entre la densidad aparente y el peso volumétrico (Simanov, 1995).	73
Figura 4.10: Representación ilustrativa del espacio y la porosidad (Pietsch, 1991).....	74
Figura 4.11: Cambio en la masa de madera según la fuerza aplicada (Pietsch, 2002).	75
Figura 4.12: Compresibilidad de algunos tipos de materiales de madera (virutas, aserrín seco, polvo de madera, astillas) (Dzurenda, 2002).	76
Figura 4.13: Briqueteadora de pistón.	77
Figura 4.14: Briqueteadora de tornillo.	77
Figura 4.15: Briqueteadora hidráulica	78
Figura 4.16: Briqueteadora de tronillo.	78
Figura 4.17: Partes básicas y dimensiones principales de la cámara de prensado a.) Cónico; b.) cilíndrico (Storožev y Popov, 1978).....	82

Figura 4.18: Ejemplos de diferentes secciones transversales de cámara: a.) Clásico; b.) profundo; c.) poco profunda; d.) bien; e.) cilíndrico; f.) cónico; g.) paso (Pérez, 2009).	83
Figura 4.19: Coordenadas esféricas que describen las interfaces superior e inferior de la concentración de deformación plástica en una cámara de prensado cónico (Storožev y Popov, 1978).	84
Figura 4.20: Distribución de presión en la cámara de prensado en una prensa vertical uniaxial (Horrihgs, 1985).	87
Figura 4.21: Comportamiento de la presión radial y axial (Horrihgs, 1985).	89
Figura 4.22: Esquema de las fuerzas y presiones que actúan sobre un elemento de volumen dV dentro del canal de prensado (Holm & et al., 2006).	90
Figura 4.23: Densidad de briquetas con respecto al tamaño de la fracción de material a varias temperaturas de prensado, para aserrín de pino ($w = 10\%$; $p = 155$ MPa) (Križan, Šooš & Vukelić, 2009; Križan & Matúš, 2008).	95
Figura 4.24: Comparación de briquetas de aserrín de pino fabricadas con diferentes tamaños de granulometría. ($p=159$ MPa, $T=25^{\circ}\text{C}$, $w_r=10\%$) (Križan, 2009).	96
Figura 4.25: Efectos de la humedad sobre la temperatura de transición de la lignina en abeto a diferentes velocidades de pistón (Hejma y otros, 1981).	97
Figura 4.26: Densidad de briquetas, dependencia del aserrín de pino en el contenido de humedad en la fracción ($p = 286$ MPa; $L = 2$ mm) (Križan & et al., 2014; Križan & Matúš, 2008).	98
Figura 4.27: Briquetas con conformadas a diferentes presiones (Križan, Šooš y Vukelić, 2008)... ..	99
Figura 4.28: Dependencia de la densidad de briquetas con respecto a varias temperaturas de prensado para aserrín de pino ($w = 10\%$; $L = 2$ mm) (Križan, Šooš & Vukelić, 2009; Križan & Matúš, 2008).	99
Figura 4.29: Dependencia de la resistencia de la briqueta en la temperatura de prensado ($p = 100$ MPa, $w = 20\%$, $L = 1$ mm) (Sitzmann y Buschhart, 2009).	100
Figura 4.30: Densidad de briqueta en función de la presión de compactación y la temperatura..	101
Figura 5.1: Componentes y vista generales de la matriz de conformado de las briquetas.....	104
Figura 5.2: Vista frontal y de corte de la matriz ensamblada preparación de la biomasa.....	105
Figura 5.3: Matriz ensamblada montada en prensa Instron para la fabricación de briquetas.	106
Figura 5.4: Cuerpo de la matriz con la resistencia, resistencias suncho y termocuplas.....	107
Figura 5.5: Foto de los topes, tapa y pistón de la matriz de briqueteado.....	107
Figura 5.6: Termografía de la matriz en régimen térmico	108
Figura 5.7: Mallado de la matriz	109
Figura 5.8: Estudio de tensiones de la matriz con 150 MPa de presión interna.....	110
Figura 5.9: Prensa INSTRON 8800 con la matriz de fabricación de briquetas	111
Figura 5.10: Celda de carga INSTRON.....	112
Figura 5.11: Celda de carga BSL MTS-1 tipo S	112

Figura 5.12: Horno de secado.....	113
Figura 5.13: Tamices calibrados para la separación de biomasa	114
Figura 5.14: Calibre digital marca Geotech	114
Figura 5.15: Balanza granataria RADWAG WTC 600	115
Figura 5.16: Placa de adquisición USB-1616FS	115
Figura 5.17: Biomasa previa a la separación y al secado.....	117
Figura 5.18: granulometrías utilizadas en la fabricación de los especímenes de briquetas	118
Figura 5.19: Muestras de biomasa los ensayos de humedad para las distintas granulometrías..	119
Figura 5.20: Secado en horno de las diferentes muestras de biomasa	120
Figura 5.21: Foto de la matriz montada en etapa de producción de briqueta.	121
Figura 5.22: Ciclo de fabricación de las briquetas. a) Posición de carga de biomasa. b) Inicio de la compresión. c) Fin de la compresión. d) Extracción inferior del biocombustible.	122
Figura 5.23: Determinación de la densidad (masa y volumen)	123
Figura 5.24: Briqueta G<1-W8	124
Figura 5.25: Briqueta G<1-W13	125
Figura 5.26: Briqueta G<1-W19	126
Figura 5.27: Briqueta G< 3-W8	127
Figura 5.28: Briqueta G< 3-W13	128
Figura 5.29: Briqueta G< 3-W19	129
Figura 5.30: Briqueta G< 8-W8	130
Figura 5.31: Briqueta G< 8-W13	131
Figura 5.32: Briqueta G< 8-W19	132
Figura 5.33: Ensayo de estudios de tendencia con una humedad de 8%	133
Figura 6.1: Densidad para una granulometría < 1 mm.	141
Figura 6.2: Densidad para granulometría < 3 mm.	141
Figura 6.3: Densidad para granulometría < 8 mm.	141
Figura 6.4: Resistencia a compresión para granulometría < 1 mm.....	142
Figura 6.5: Resistencia a compresión para granulometría de < 3 mm.....	142
Figura 6.6: Resistencia a compresión para granulometría de < 8 mm.....	142
Figura 6.7: Densidad para humedad del 8 %.	143
Figura 6.8: Densidad para humedad del 13%.	143
Figura 6.9: Densidad para humedad del 19%.	143
Figura 6.10: Resistencia a compresión para Humedad del 8%.	144
Figura 6.11: Resistencia a compresión para Humedad del 13%.	144
Figura 6.12: Resistencia a compresión para Humedad del 19%.	144
Figura 6.13: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría <1 mm y una humedad del 8%.	145

Figura 6.14: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 3 mm y una humedad del 8% 145

Figura 6.15: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 8 mm y una humedad del 8%. 146

Figura 6.16: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría <1 mm y una humedad del 13%..... 146

Figura 6.17: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 3 mm y una humedad del 13%..... 146

Figura 6.18: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 8 mm y una humedad del 13%..... 147

Figura 6.19: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría <1 mm y una humedad del 19%..... 147

Figura 6.20: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 3 mm y una humedad del 19%..... 147

Figura 6.21: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 8 mm y una humedad del 19%..... 148

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Evolución de la matriz energética Argentina 1970-2014.....	7
Tabla 2.2: Proporción de residuos generados en industrias de productos forestales seleccionados.	14
Tabla 3.1: Clasificación de origen y fuentes de biomasa sólida leñosa ISO 17225.	35
Tabla 3.2: Principales formas comercializadas de biomasa sólida (ISO 17225).....	36
Tabla 3.3: Resumen de las propiedades de cuatro combustibles de madera (ISO 17225).....	36
Tabla 3.4: Ejemplo de requisitos de calidad para astillas de madera clase A1 para una caldera pequeña.....	37
Tabla 3.5: Quality requirements for wood pellets for small scale use (ISO 17225).	39
Tabla 3.6: Quality requirements for wood pellets for industrial (ISO 17225)	40
Tabla 3.7: Requerimientos de calidad de briquetas de madera (ISO 17225).....	41
Tabla 3.8: Incidencia de las propiedades en los biocombustibles briquetas (Barro, 2008)	42
Tabla 3.9: Valores de humedad en la recepción para las categorías A1, A2 y B de astillas y briquetas según las normas ISO 17225-3 e ISO 17225-4 M: humedad (% base húmeda).	45
Tabla 3.10: Poder calorífico superior anhidro (PCS H=0%) (KJ/kg), poder calorífico neto (Q) a humedades de 25 y 10% (KJ/kg) y categorías en base a Q según las normas ISO 17225-2 e ISO 17225-4 (certificado ENPlus) para los valores de humedad de 25 y 10% para astillas y pellets, respectivamente.....	48
Tabla 3.11: Densidades aparentes de astillas de distintas fracciones para los grupos de especies forestales.	49
Tabla 3.12: Categorías según ISO 17225-3 e ISO 17225-4 para briquetas y astillas en base a su densidad aparente.	50
Tabla 3.13: Categorías de distribución granulométrica (P) para astillas, a especificar, según norma ISO 17225-2 de calidad de astillas.....	50
Tabla 4.1: Tamaño de las partículas de DWM (Dzurenda, 2002).	69
Tabla 4.2: Clases de granulometría de material a granel según STN 260070.....	70
Tabla 4.3: Granularidad de materiales derivados de madera a granel (Hejma & et al., 1981).	70
Tabla 4.4: Densidad aparente de algunos materiales de madera con un contenido de humedad de $w_r = 10\%$	73

Tabla 5.1: Valores de los parámetros industriales de fabricación utilizados en la campaña experimental.	103
Tabla 5.2: Cálculo de la cantidad de biomasa a separar por granulometría	118
Tabla 6.1: Resultados de carga de rotura por compresión diametral granulometría $G < 1$	135
Tabla 6.2: Resultados de carga de rotura por compresión diametral granulometría $G < 3$	137
Tabla 6.3: Resultados de carga de rotura por compresión diametral granulometría $G < 8$	139
Tabla 6.4: Resultados de carga de rotura ordenados según la secuencia de ensayos.	149
Tabla 6.5: Resultados de carga de rotura ordenados por densidad.	151
Tabla 6.6: Resultados de carga de rotura ordenados por resistencia.	153
Tabla 6.7: Resultados de carga de rotura ordenados por la semi-suma de $D \cdot R$	155
Tabla 7.1: Rango y valores nominales de los parámetros de ensayos.	157
Tabla 7.2: comparación de densidad entre los puntos $G < 1$ -W8-T125-P90 y $G < 1$ W8-T125-P135.	159
Tabla 7.3: Proyección lineal de la densidad para $G < 1$ -W8.....	163
Tabla 7.4: Proyección lineal de la densidad para $G < 3$ -W8.....	169
Tabla 7.5: Proyección lineal de la densidad para $G < 8$ W8	175

LISTA DE SIMBOLOS

PARAMETROS

- A: material constante dando las propiedades elásticas del material prensado
- a: radio de la interfaz inferior del abrigo esférico donde se concentra la deformación plástica dentro de la cámara de prensado
- A_K : coeficiente calculado en base a resultados experimentales que caracterizan la forma y la curvatura de la curva
- Astillas: chip de madera
- b: meso de la bandeja
- B: material constante
- β_s : coeficiente de compresibilidad
- C: coeficiente de compresibilidad
- DWM: masa de madera desintegrada
- D_2 : diámetro de la zona de presión
- D_4 : diámetro de la parte de calibración de la cámara de prensado
- D_k : diámetro de la cámara de prensado
- dh: diferencial de altura
- $\Delta e = e_0 - e$: cambio en la porosidad
- Δy : presionando la briqueta después de lograr la fuerza de carga máxima mm
- ρ : densidad resultante
- E: módulo de elasticidad
- ε : relación de deformación
- E_v : módulo de elasticidad en la dirección axial o vertical. Para la deformación elástica
- E_0 : módulo volumétrico de elasticidad
- e_0 : valor inicial de porosidad para $\sigma = \sigma_0$
- EJ: Exajulio
- E_L : módulos de elasticidad en las direcciones lateral de los haces de fibras
- E_R : módulos de elasticidad en las direcciones radial de los haces de fibras
- F_{max} : Fuerza máxima que actúa sobre la briqueta N
- F_m : F_m - fuerza de presión sobre el tapón
- F_N : fuerza normal (radial)
- F_μ : fuerza de fricción
- G: Granulometría
- G_e : módulo de elasticidad en las direcciones lateral y radial de los haces de fibras
- γ : conicidad de las paredes en la zona 3 en grados

h_0 : altura inicial de la muestra

H : longitud del tapón comprimido (mm)

m^3 : metro cubico

mm: milímetros

m_0 : peso de madera absolutamente seca

m_F : masa final luego de la humectación hasta la humedad de ensayo

m_h : masa húmeda

m_S : masa seca

m_v : peso del agua en la madera

m_w : peso de la madera a una humedad de "w"

MSW: municipal solid waste

MPa : mega pascal

μ : coeficiente de fricción

kcal/kg : Kilo Caloría por kilogramo

kN: Kilo Newton

kp : coeficiente relacionado con la presión, calculado a partir de resultados experimentales

Ktep: kilo tonelada equivalente de petróleo

Kw: kilo Watt

λ : relación de presión horizontal

L : granulometría (para la bibliografía de referencia)

l_k : longitud total del canal de prensado

l_z : longitudes de la columna

l_n : longitud de la briqueta

L_N : Longitud de la briqueta

L_4 : - longitud de la parte de calibración

$q_{v,gr}$: poder calorífico superior a volumen constante del combustible

$q_{v,gr,d}$: poder calorífico a volumen contante del combustible (sin humedad)

$q_{p,net,d}$: poder calorífico inferior en base seca a presión constante

$p_{r, r}$: presión radial residual

p_4 : Presión generada en la zona de calibración

Ph: peso de la muestra húmeda;

Pi: presión de ensayo

Ps: peso de la muestra seca.

p_N : presión normal (radial)

p_k : presión axial del pistón

p_g : contrapresión en la carcasa de la prensa

P_{m0} : presión inicial en el tapón:

LISTA DE SIMBOLOS

p_m : presión axial en el obturador / presión sobre el tapón
 p_{max} : coeficiente elegido en base al monitoreo de la presión (presión máxima)
Pmax: Carga Máxima de rotura de forma transversal
 p_r : presión radial
 p : presión de prensado
P.C.I poder calorífico inferior
 S_2 : área de sección transversal de la salida de la parte de prensado
 S_4 : área de sección transversal de la entrada en la parte de calibración
 S_r : área de la cubierta lateral del elemento
 S_r : área de la sección transversal del elemento.
 σ_B : Resistencia Axial de la briqueta
 σ_{BL} : Resistencia de la briqueta por unidad de la longitud
 σ_k : límite elástico del material
 σ : esfuerzo promedio
t: tonelada
 T_k : distancia entre el pistón y el extremo inferior de la zona de presión en la cámara (mm)
 $V\varepsilon$: volumen de los espacios
 V_t : volumen total
 ν_{RL} : coeficiente de Poisson
W: contenido de humedad (sobre base húmeda)
 W_{ad} : contenido de humedad en la muestra de análisis, en porcentaje en masa
 w_a : humedad absoluta
 W_i : humedad inicial
 W_F : humedad final
 w_r : humedad relativa
 $w(H)d$: contenido de hidrógeno, en porcentaje en masa, del biocombustible sin humedad (seco)
 $w(O)d$: contenido de oxígeno, en porcentaje en masa del biocombustible sin humedad
 $w(N)d$: contenido de nitrógeno, en porcentaje en masa, del biocombustible sin humedad.

SIGLAS

CE: Comisión Europea
CEN: comité europeo de normas
Comité Intergubernamental Panel sobre Cambio Climático (IPCC)
EN : Normas Europeas
ENPlus: Certificación de biocombustibles bajo la norma UNE-EN 14961-2 establece una serie de requisitos que deben cumplir los pellets para alcanzar unos determinados niveles de calidad.

El sistema de certificación ENplus® se basa en esta norma para asegurar la calidad de los pellets para uso térmico, tanto industrial como doméstico.

FAO = Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

ISO: International Organization for Standardization

ISO 17225: Norma ISO de Especificaciones y clases de combustibles de biocombustibles sólidos (UNE EN ISO 17225-1:2014).

MSW: municipal solid waste

MEF: método de elementos finitos

SAE 1045: o AISI 1045 es un acero medio carbono que tiene una gran demanda para aplicaciones que requieran una mayor exigencia a esfuerzos, presenta una mayor resistencia contra un acero de bajo carbono.

STN: Norma técnica eslovaca.

STN 260070: Clasificación y marcado de materiales a granel transportados en equipos de transporte para los estándares de la Norma técnica eslovaca.

TC: Comité Técnico

UNE - EN 14961-1: Norma de especificaciones y clases de combustibles Biocombustibles sólidos. Parte 1 Requisitos generales.

UNE - EN 14149: Norma Europea o Standar European para envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos y unidades de carga. Ensayo de choque por caída rotacional.

UNE - EN 15234: Norma Europea o Standar European para la garantía de calidad de los Biocombustibles

UE: Unión Europea

WISDOM: Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Biomasa para Energía

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema

Debido a la creciente demanda energética en el contexto mundial, a consecuencia del crecimiento demográfico y del aumento del consumo de energética percapita a nivel mundial. En conjunto con el constante impulso social y político del cuidado del ambiente. Han confluído en el incremento de la demanda de las fuentes energías renovables y que este uso sea eficiente. Lo cual ha llevado a que el mercado energético demande estándares de calidad muy alto para los biocombustibles como las briquetas.

Estos estándares están diseñados para garantizar que el costo de transporte de los biocombustibles solidos sea rentable, ya que la mayor dificultad que tiene el uso de los biocombustibles es la baja densidad energética que tiene su materia prima, lo cual incide de forma directa en el costo de traslado de la energía.

Por esto el proceso de fabricación de las briquetas es diseñado para garantizar que el costo de transporte sea rentable, manteniendo íntegro al biocombustible, ya que, este posee dimensiones definidas las cuales se deben conservar para poder ser utilizado/quemado en un equipo de combustión de manera eficiente. Si la briketa sufre rotura o desmoronamiento, daría lugar a la formación de partículas muy pequeñas, las cuales no se queman de manera eficiente. Puesto que, si estas partículas son pequeñas, es decir de menor tamaño que los orificios de la grilla del quemador, estas partículas caerán al cenicero sin entrar en combustión, o estas partículas son aún más pequeñas podrían ser sopladas hacia la chimenea sin ser quemada.

Se requiere que las briquetas sean lo suficientemente densas para que el costo del transporte sea rentable y posean la resistencia suficiente para mantener su integridad hasta que lleguen a su destino, para ser aprovechadas en los equipos de combustión de forma eficiente.

En pos de lo anteriormente descrito las normas de referencias de biocombustibles establecen la densidad que deben poseer las briquetas y la necesidad de cuantificar la resistencia mecánica de las briquetas para asegurar su integridad. Por lo que en la actualidad se tiene un proceso de conformado de briquetas el cual se define en cuatro parámetros del proceso de briqueteado, dos de estas variables están referidas al proceso de conformado tecnológico las cuales

son la presión y la temperatura de la briqueteadora. Las dos restantes, están referidas a la biomasa con que se fabrica las briquetas, estas variables son la humedad y granulometría de la biomasa.

Por lo que el desafío en la producción de briquetas radica en encontrar los valores óptimos de los cuatro parámetros de conformado de las briquetas que garanticen alcanzar estos estándares de densidad y resistencia. Tomando como camino en esto la reducción de los costos energéticos en la producción. Por lo que se necesita analizar la incidencia de estos cuatro parámetros y como cada uno de estos incide en los otros, a la vez que se relaciona esta incidencia con eficiencia y la optimización de los costos en la producción de las briquetas.

1.2. Motivación

Actualmente la biomasa contribuye alrededor del 10 al 15% de la demanda mundial de energía. En países industrializados, la biomasa en promedio contribuye entre el 9 al 14% de los suministros totales de energía. Pero según estiman las proyecciones de World Energy Council, se prevé incrementar el uso de la biomasa para cubrir hasta 30% de la demanda mundial de energía, proyectado para el año 2025. Esto es trascendente para los países que desean expandir su producción energética y más aún para seguir la tendencia mundial de cambiar las fuentes de energía convencionales por renovables.

La Argentina tiene en su matriz un 4% de energía proveniente de la biomasa, lo que representa un valor reducido siendo un país agro productor. A raíz de esto, a partir del 2006 en la Argentina se crearon leyes de promoción de la bioenergía para poder alcanzar los estándares mundiales de generación de energías renovable como la bioenergía. Por lo que, para introducir las energías renovables a la matriz energética del país, es estratégico trabajar con biocombustibles, ya que se calculó que el 75.9% de las energías renovables usadas a nivel mundial proviene de biomasa según declara la Agencia Internacional de Energía en 2009.

Por este motivo en el año 2007 el INTI (Instituto Nacional de Tecnología Nacional) se enfocó en promover el aprovechamiento de las Biomasa como recurso estratégico para la generación de energía distribuida renovables a partir de la agro y foresto Industria. Fomentando la producción de biocombustibles como Briquetas, Pellets y Chips buscando reducir los costos logísticos con el fin de diversificar la matriz energética, impulsar e industrializar las producciones rurales, reduciendo el costo de la energía térmica, para potenciar el desarrollo rural. Al valorizar sus residuos como subproductos y darles a estos residuos una correcta disposición, mejorando la calidad de los ambientes municipales al brindarle una opción rentable para la correcta disposición y uso de los residuos como las podas.

Por estos motivos nace la necesidad de cuantificar y garantizar la calidad en los biocombustibles, por lo que desde el INTI se desarrolló una metodología de trabajo con el fin de insertar el concepto de calidad en toda la cadena de la producción de biocombustibles en el país, siendo el eslabón más indicado para el inicio de esta actividad las plantas productoras de biocombustible donde se producen los chip, briquetas y pellets.

Ya que en las plantas de fabricación de biocombustibles es donde se introduce el mayor agregado de valor y tecnología al biocombustible, porque este proceso le confiere sus principales características y lo diferencia de un residuo agrícola. Por lo que se planteó el desarrollo de un manual (handbook) de referencia para alcanzar los estándares de calidad que el mercado de los biocombustibles demanda. Este manual busca trabajar, modificar y optimizar los parámetros de procesos de fabricación de los biocombustibles (presión, temperatura, humedad y granulometría) de manera de alcanzar los estándares que la norma propone de forma económica. Es decir, como un parámetro incide en el otro y como llegar a las condiciones de conformado que garanticen la calidad minimizando los costos. En el capítulo 2 se amplía la motivación de la tesis, resaltando lo estratégico del recurso biomasa para un país como la Argentina en el contexto actual.

1.3. Objetivos

Esta tesis tiene por objetivo determinar la variación de la calidad de los parámetros físico-mecánicos de biocombustibles sólidos densificados “Briquetas” en función de los siguientes parámetros de producción industrial; Presión de Prensa, Temperatura de Prensa, humedad y granulometría. Estas determinaciones tienen el fin de buscar las relaciones de mayor eficiencia en los procesos industriales de producción de biocombustible en la búsqueda de:

- Alcanzar la calidad en la producción de briquetas que demandan las normas de referencia internacionales
- Optimizar los costos de la producción industrial de briquetas
- Generando material de referencia para el uso industrial de las relaciones entre los parámetros de producción industriales y la calidad buscada.

1.4. Contenido

En correspondencia con los objetivos planteados en esta tesis, se desarrolla el análisis de la calidad de las briquetas en función de los parámetros de producción industrial. A continuación, se describe brevemente el contenido de cada capítulo:

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN, en este capítulo se trata brevemente la motivación e importancia del tema a desarrollar, los objetivos del proyecto final y el contenido de esta.

CAPÍTULO 2: BIOCMBUSTIBLES, en este capítulo se describe al recurso biomasa, tipos y fuentes de biomasa, biocombustibles, los diferentes tipos como pellets, briquetas y chips, su proceso de fabricación, las ventajas de los combustibles de primera y segunda generación. Y el contexto del uso del biocombustible en la Argentina.

CAPÍTULO 3: CAMPAÑA EXPERIMENTAL, en este capítulo se describe las normas y reglamentos de los biocombustibles sólidos, la importancia de la estandarización los biocombustibles, como esta incide en la eficiencia de los biocombustibles y el contexto mundial del mercado de los biocombustibles

CAPÍTULO 4: EQUIPOS DE ENSAYO, en este capítulo se describe el proceso de fabricación de los biocombustibles densificados, como la materia prima incide en el proceso de fabricación, la estructura interna de la biomasa base para la fabricación de los biocombustibles, la tecnología para la producción del briqueteado y los modelos matemáticos del proceso en conjunto con los valores óptimos para el proceso de fabricación

CAPÍTULO 5: CAMPAÑA EXPERIMENTAL: DISEÑO, ELABORACION Y ENSAYO, en este capítulo se describen la campaña experimental, la metodología diseñada para la fabricación de los especímenes de las briquetas y de los ensayos de calidad de estos especímenes, describiendo el equipo y material utilizado.

CAPÍTULO 6: ENSAYOS DE IMPACTO Y ANALISIS DE RESULTADOS, en este capítulo se muestran los resultados obtenidos durante la campaña experimental de los ensayos. En este se analizan los resultados de los parámetros de calidad, tanto de densidad como de resistencia a la compresión analizando sus variaciones para las curvas de Humedad, Granulometría, Temperatura y Presión de Prensado.

CAPÍTULO 7: CALIDAD DEL BIOCOMBUSTIBLE EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS INDUSTRIALES, en este capítulo se analizan los resultados expuestos en el capítulo anterior. Este análisis se realiza fijando la humedad y la granulometría para las diferentes calibraciones de los otros parámetros de calidad analizando punto las variaciones de los parámetros y como estas inciden en los parámetros de calidad tanto densidad como resistencia a la compresión

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, en este capítulo se describen la forma más eficiente técnico-económicas de alcanzar los estándares de calidad que la norma de referencia exigen y/o mejor la calidad de las briquetas, según los análisis del capítulo anterior.

CAPÍTULO 2

BIOCOMBUSTIBLES

En este capítulo se describe los tipos de biomasa y biocombustibles, sus fuentes de producción y características energéticas.

2.1. Energía a partir de la Biomasa

La biomasa contribuye alrededor del 10 al 15%, es decir el 45 ± 10 EJ, de la demanda energética mundial. En promedio en los países industrializados la biomasa contribuye entre el 9 y el 14% de los suministros totales de energía. Por lo que se prevé llevar a un tercio según estiman las proyecciones WEC (*World Energy Council*) para estos países, si las condiciones económicas y políticas son las adecuadas.

Por lo que las perspectivas para 2025, proponen que el 30% de los combustibles y un 60% del suministro mundial de la electricidad, provendrán de fuentes de energía renovables.

Considerando a la biomasa como la cuarta fuente de energía en el mundo, correspondiendo al 14% del consumo de energía total del mundo, siendo una proporción mayor que la de carbón (12%) y comparables a las de gas natural (15%).

Los estudios energéticos exponen que la biomasa proporciona más de un 3% del total de la energía consumida en Estados Unidos de Norte América, lo que representa alrededor del 53% de la energía suministrada por energía renovables (R. Saidura, 2011).

Al analizar la biomasa como un recurso estratégico, utilizaremos el concepto de “matriz energética” ya que este es una representación cuantitativa de la totalidad de energía que utiliza un país, e indica la incidencia relativa de las fuentes en esta matriz y cual es incidencia de cada tipo de energía: nuclear, hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica o combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón. Siendo utilizada la matriz energética para realizar análisis y comparaciones sobre los consumos energéticos de un país a lo largo del tiempo, o para comparar con otros países, brindando una herramienta fundamental para la planificación (energiasdemipais.educ.ar, 2012).

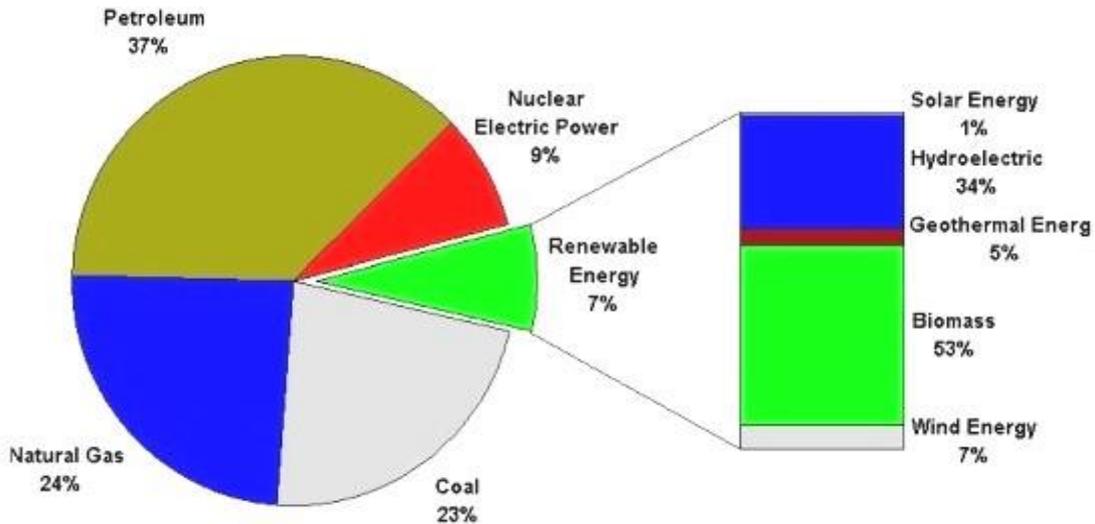


Figura 2.1: Consumo energético de Estados Unidos en 2000 (R. Saidura, 2011).

La biomasa representaba el 53% de la energía renovable en estados unidos en el año 2000, lo que a un 3,71% ($\approx 4\%$) de la matriz energética total de Estados Unidos, al contemplar que las energías renovables representan el 7% de esta matriz.

Por lo que al comparar la matriz energética de Estados Unidos con la matriz de la Argentina en el año 2000 como se puede observar en la Figura 2.1 y Figura 2.2 el porcentaje que ocupa la biomasa para cada matriz energética es similar ($3,71\% \approx 4\%$). De esta forma se puede apreciar la importancia del recurso biomasa para un país industrializado tanto como para un país en vías de desarrollo. mostrando que la argentina sigue la tendencia de los países desarrollados.

Matriz energética Argentina 2000

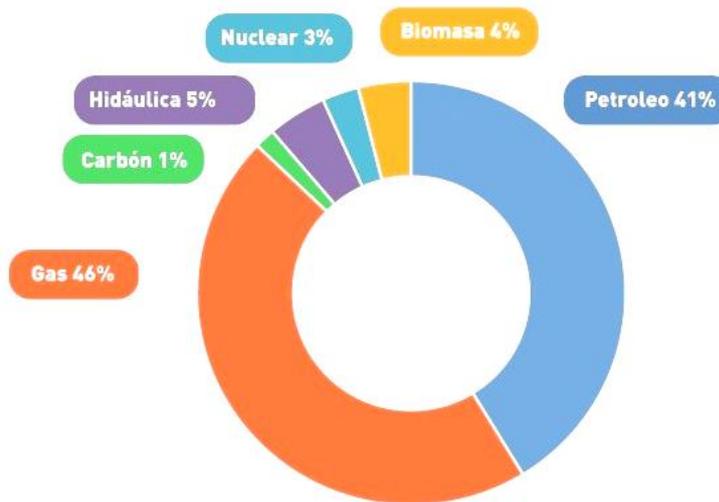


Figura 2.2: Matriz energética Mundial (Agencia Internacional de Energía).

Al analizar el progreso de la matriz energética de la Argentina en la década comprendida entre el periodo del 2000 al 2010 se puede observar solo variaciones en la Tabla 2.1 los porcentajes de gas y petróleo consumido. Pero la relación entre energía total e hidrocarburos se mantuvo constante en el 87% mientras que las demás energías se mantuvieron constantes.

Tabla 2.1: Evolución de la matriz energética Argentina 1970-2014.

ANO	Petróleo %	Gas Natural %	Carbón Mineral %	Hidro-energía %	Nuclear %	Biomasa %	Eólica y solar %	Total Oferta Primarias + importación Secundarias %	Total Oferta Primarias KTEP
1970	71,2	18,1	3,2	0,5	0	7	0,00	100	31879
1980	62	25,5	2,7	3,7	1,9	4,3	0,00	100	44224
1990	48,5	36,5	2,3	4	4,6	4,1	0,00	100	49325
2000	41,2	46,2	1,3	4,7	2,7	3,9	0,00	100	66588
2009	36,01	50,38	1,41	5,34	2,63	4,22	0,00	100	79012
2010	38,02	47,68	1,18	5,35	2,77	5,01	0,00	100	78579
2011	35,50	49,57	1,12	5,06	3,31	5,44	0,00	100	79666
2012	34,91	51,52	0,86	4,52	2,21	5,98	0,00	100	79138
2013	34,65	51,99	1,36	4,65	2,00	5,35	0,00	100	81115
2014	34,17	51,27	1,69	5,03	1,71	5,91	0,22	100	77408
Fuente: PANORAMA DE LA ENERGIA EN ARGENTINA 2015 (Fundación Bariloche)									

Es fundamental el análisis de esta década ya que desde el año 2004 la demanda energética comenzó a crecer un 5% anual, esto de la mano del crecimiento económico del 5,5% en la economía argentina, por lo que desde el año 2009 la balanza comercial que tenía un saldo favorable desde el punto de vista energético comenzó a ser negativo, es decir que paso de un saldo favorable de 1760 millones dólares a un déficit de 6200 millones de dólares.

Lo que generó una serie de acciones políticas como la expropiación del 51% de las acciones de YPF que pertenecía Repsol y un fuerte impulso al sector de las energías renovables a través del programa GENREN el cual llama a licitación unos 1000 MW de energía renovables, donde 150 MW estaban destinados a biocombustibles y 200 a MW Biomasa. Por lo que el programa GEREN estableció contratos a 15 años en los cuales se aseguraba al oferente la compra de la energía. No obstante, solo se concretaron una pequeña cantidad de proyectos de biomasa aproximadamente un 9% de lo licitado.

Por lo que en año 2012 en una iniciativa del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca y del Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, con la asistencia técnica de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación “FAO” se lanza el proyecto para la promoción de la energía derivada de la biomasa “PROBIOMASA” con el cual se incorporarían 200 MW eléctricos y 200 MW térmicos. No obstante, se señaló que el financiamiento de las inversiones es la principal barrera del proyecto de generación de energía a partir de la biomasa. Por estos motivos, desde 2013 se llevaron a cabo acciones para elaborar una propuesta de *Nationally Appropriate Mitigation Actions* (NAMA) con base en PROBIOMASA Argentina, para acceder al

financiamiento internacional. Mostrando un aspecto novedoso, ya que es una de las primeras iniciativas a nivel nacional en las cuales la política energética y ambiental se coordinan para el desarrollo de la generación de energías renovables (M.Y. Recalde, 2015)

No obstante, las nuevas acciones llevadas a cabo no bastaron para cumplir lo demandado, ni cumplir los objetivos esperados. Por lo que en el año 2015 se sancionó de la ley 27191 impulso a las energías renovables, la cual exige como punto principal a los grandes usuarios del mercado eléctrico, es decir los consumidores con una demanda de potencia iguales o mayores a 300 kW deberán comprar o producir un 8% de su consumo energético total a provenientes de fuentes renovables a partir de 31 de diciembre del 2017. Esta ley también plantea alcanzar para el año 2025 un consumo mínimo del 20% de energía renovable para los grandes consumidores.

De tal forma que para poder cubrir la demanda de energías renovables que establece la ley 27191 se llevó a cabo el programa RENOVAR el cual licita la instalación de plantas de energía renovables por más de 1000 MW de energía renovables en varias etapas, con una prospectiva de generación según lo muestra la Figura 2.3.

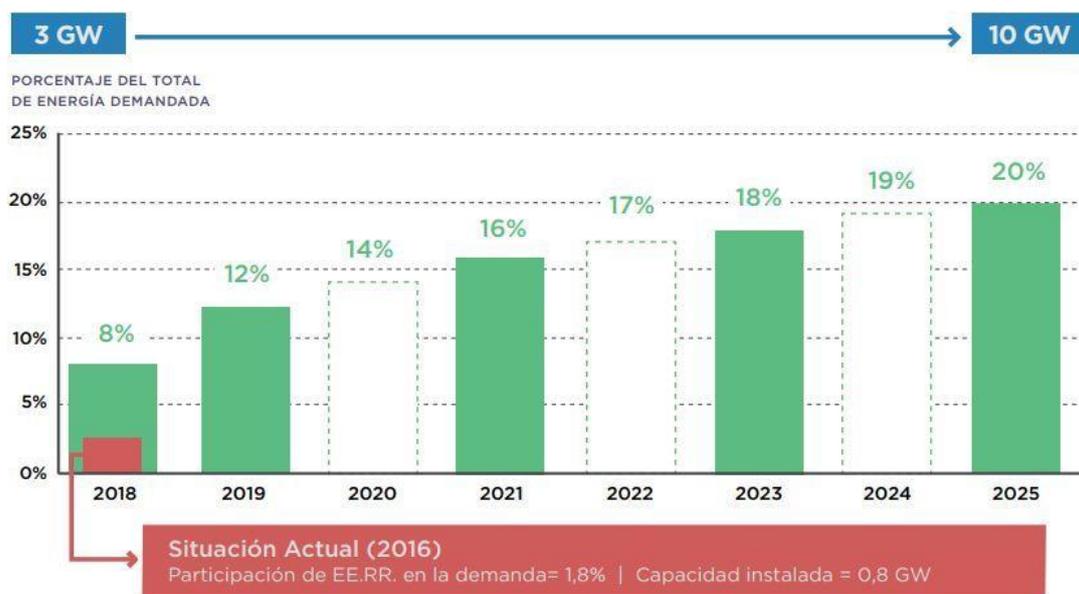


Figura 2.3: Prospectiva de crecimiento energético renovable en argentina (Ministerio de Energía y Minería de Argentina, 2106)

En la primera etapa este programa se tiene el siguiente esquema de distribución de recursos en función de la tecnología de energía renovables a emplear y tienen los siguientes beneficios como se muestra en la Figura 2.4 donde se observa que la tercera fuente renovable que en orden de importancia es la biomasa con 65 MW:



Figura 2.4: Distribución de energía del RENOVAR 1.0 y sus beneficios (Ministerio de Energía y Minería de Argentina, 2106).

La Cuantificación del Recurso:

Al evaluar a la biomasa como un recurso energético estratégico en el contexto global, podemos cuantificar el beneficio que se puede lograr al introducir la tecnología en el aprovechamiento de este recurso renovable, al tomar las siguientes consideraciones. La biomasa debe transformarse de un residuo agrícola a un biocombustible el cual posea un gran valor agregado, este es generado en el proceso de transformación del mismo biocombustible.

Ya que al cambiar el concepto de un residuo a un biocombustible el que es empleando para generar energía térmica o eléctrica, y cumple estándares de calidad como los combustibles tradicionales, pero con el beneficio de no contaminar al ambiente al estar en un ciclo de carbono neutro.

Por lo que, en la evaluación de un análisis global del recurso desde un punto de vista general, la biomasa provee energía en forma de calor, electricidad y combustibles líquidos, abarcando alrededor del 14% del suministro de energía primaria a nivel mundial. Esto se distribuye en un 25% en los países industrializados y el otro 75% se utiliza en los países en desarrollo.

En la actualidad se estima que existe unas 3870 hectáreas de bosques en el planeta. La superficie de bosque por persona cambia en relación del continente en que se encuentre, es decir. 6,6 Ha per cápita en Oceanía, 1,4 Ha en Europa. Las superficies de bosques variaron como lo muestra la Figura 2.5. En todo el mundo la biomasa se extiende por encima del suelo estimándose unas $420 \cdot 10^9$ toneladas de bosques, de las cuales más del 40% se encuentra en América del Sur. Las estimaciones de la FAO en el año 2000 muestran que la producción y el uso de leña y madera en rollo a nivel mundial alcanzaron aproximadamente $3300 \cdot 10^6$ metros cúbicos en 1999. Donde el 55% se usa directamente como combustible en forma de leña partida de este porcentaje el 90% se produce y consume en los países en desarrollo. El 45% restante se usa como materia prima industrial, pero alrededor del 40% de esta termina como residuos de procesos primarios o secundarios, que son adecuados para la producción de energía.

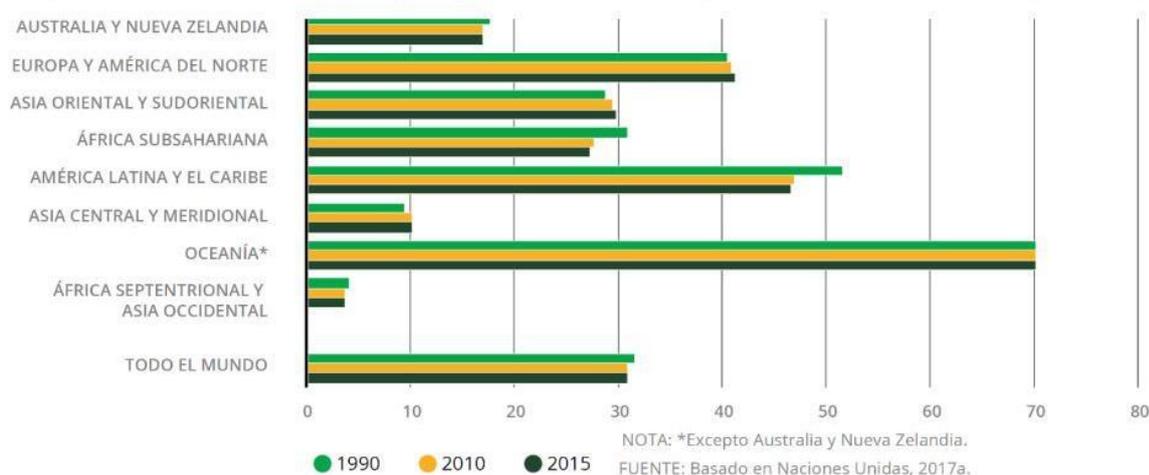


Figura 2.5: Superficie forestal como proporción de la superficie total en 1990, 2010 y 2015.

El potencial mundial de energía a partir de biomasa sostenible total es aproximadamente 100 EJ/año. Correspondiendo a biomasa leñosa 41.6 EJ/año, que es aproximadamente el 30% del consumo total de energía mundial en la actualidad. Casi el 60% de esta biomasa se usa solo en Asia por lo que una comparación entre el potencial disponible con el uso actual muestra que a nivel mundial se utilizan aproximadamente dos quintos del potencial de biomasa existente, y en la mayoría de las regiones del mundo el uso actual de biomasa está claramente por debajo del potencial disponible. Solo en Asia el uso actual excede el potencial disponible. Por lo tanto, es posible un mayor uso de biomasa para la producción de biocombustibles y bioenergía renovables de alta eficiencia (Parikka, 2003).

El ambiente y la Biomasa:

El uso de energías renovables es necesario para mitigar el cambio climático causado por las emisiones de gases de invernadero. Por este motivo en el mundo se están llevando a cabo trabajos para sustituir los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables. Esto con fines de estabilizar la concentración atmosférica de CO₂, ya que las emisiones globales deben reducirse en al menos el 60% de los niveles actuales.

Aproximadamente el 80% de las emisiones totales provienen de uso de combustibles fósiles en los países industrializados, el 20% restante se estima que provienen de la deforestación, en los países tropicales (Parikka, 2003).

El Comité Intergubernamental Panel sobre Cambio Climático (IPCC) afirma que la mayor parte del calentamiento global se debe al aumento en los últimos 50 años de la concentración de los gases de efectos invernadero en el ambiente (CO₂) provenientes de los combustibles fósiles.

Por lo que analizar las formas de mitigar esta concentración, se concluyó que no basta una sola medida por lo que se debe combinar una mayor eficiencia en el consumo y menor consumo de combustibles fósiles, lo que equivale a sustitución de la energía de fuentes fósiles por energía

renovables o nuclear, combinado esto con la captura del CO₂ del ambiente por medio de la forestación.

Por lo que una forma de mitigar el cambio ambiental es el empleo de energía proveniente de la biomasa, debido que en su empleo se captura y almacena el CO₂. Es decir, se puede producir CO₂ negativo o absorber el CO₂ a medida que crece la biomasa como se indica en la Figura 2.6.

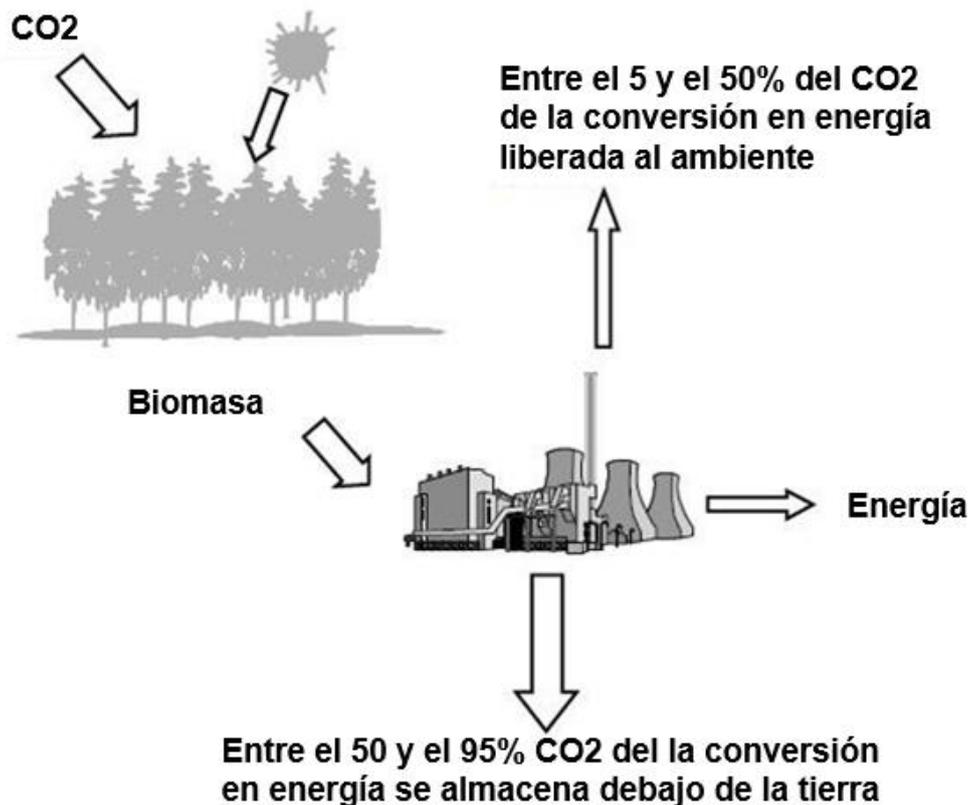


Figura 2.6: ciclo del carbono industrial (M'ollerstena & *, 2003)

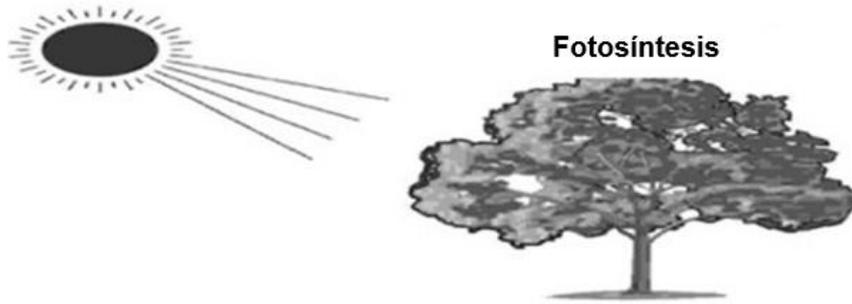
Por lo que el uso de bioenergía con captura y almacenamiento de CO₂ elimina de forma contante el CO₂ de la atmósfera mientras se satisface la demanda de energía. Debido a esto el uso de bioenergía supone una solución segura para la captura del CO₂ a largo plazo, lo cual es fundamental para la reducción de los daños que produce el cambio climático (M'ollerstena & *, 2003).

Biomasa y derivados:

Según la directiva 2009/28/CE dirigida al fomento del uso de las energías procedentes de fuentes renovables. Define a la biomasa como a la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas,

incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales.

La energía que se acumula en la biomasa tiene su origen en el sol ya que, a partir del proceso de la fotosíntesis, las plantas absorben la energía del sol, agua, suelo y el CO₂ de la atmósfera, almacenando estas energías en sustancias orgánicas a la vez que libera oxígeno en el proceso como se observa en la siguiente imagen. Posteriormente, los animales al alimentarse incorporan y transforman esta energía de las plantas. Por lo que los productos de esta transformación en la digestión animal de la biomasa también se consideran como bioenergía (TRANSBIOMA, 2012).



En el proceso de la fotosíntesis, de las plantas convierten la energía de la radiación solar en energía química en forma de glucosa.

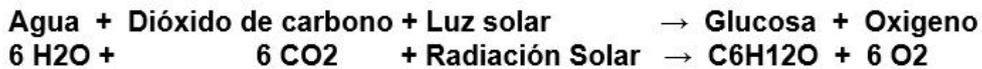


Figura 2.7: Proceso de fotosíntesis (R. Saidura, 2011).

La fuente de la biomasa:

La biomasa puede clasificarse de distinta manera y forma según su Composición, Origen o Estado, como lo muestra la siguiente Figura 2.8:

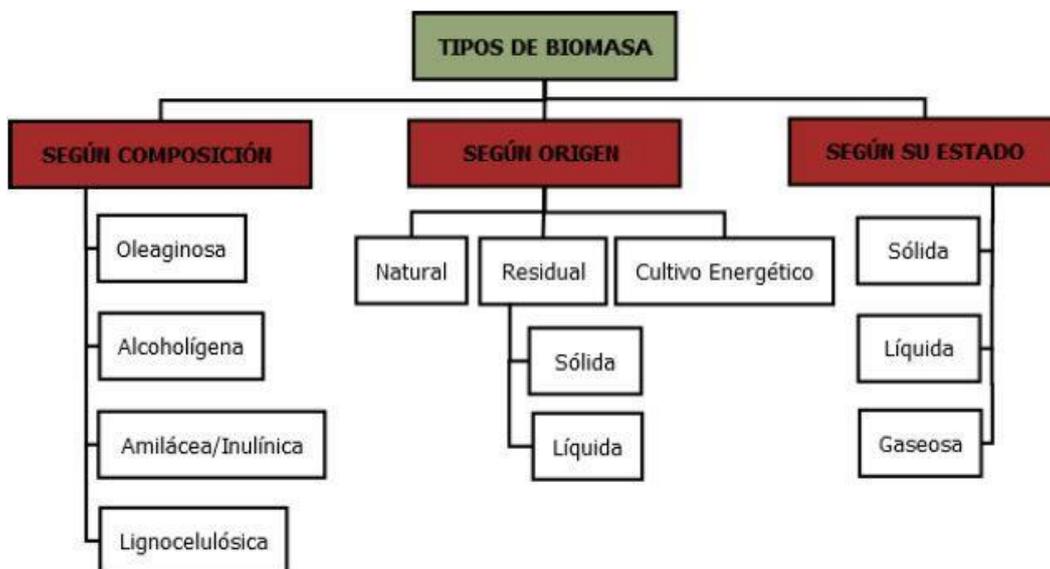


Figura 2.8: Clasificación de la biomasa (Parikka, 2003).

En este análisis nos centraremos en la biomasa del tipo lignocelulósica sólida, la cual proviene de los residuos generados a partir de las producciones forestales e industriales. Las cuales puede dividirse en dos categorías: en primer lugar, los residuos de explotación forestal, generados a partir de operaciones de cosecha de las plantaciones y en segundo lugar los subproductos industriales, generados por la industria forestal durante procesamiento de madera, aglomerado, madera contrachapada, pasta de madera o pulpa.

Generalmente menos del 66% del volumen de la biomasa que es extraída de las plantaciones forestal o bosque es industrializada, el volumen restante se deja en la plantación, la cual se puede quemar como combustibles como el caso de la leña troceada o se procesa para emplearse como chip.

Aproximadamente entre el 45-55% de la madera que ingresada a la industria se transforman en residuos de la actividad principal como un aserradero o una planta de contrachapado. Por lo que la cantidad actual de residuos difiere de fábrica en fábrica y depende de varios factores, como la especie de la madera, la tecnología con que se procesa la madera y la clase de industria. Aunque se estiman las siguientes cifras promedio para catalogar los subproductos de la actividad forestal que se muestran en la Tabla 2.2 en porcentaje del peso del rollo de madera a procesar (Parikka, 2003).

Tabla 2.2: Proporción de residuos generados en industrias de productos forestales seleccionados.

(%)	Aserrado.	Madera Contrachapada.	Tableros.	Operaciones Integradas.
El Producto Terminado	45-55	40-50	85-90	65-70
Residuos / Combustible	43	45	5	24
Chips Y Parte.	34-15			
Corteza	28-21			
Aserrín	16-23			
Costaneros	15-32			
Virutas	5-1			
Otro	3-7			
Pérdidas	7	8	5	8

Bioenergía, Biomasa y Residuos provenientes de la foresto industria:

La madera como sus residuos tienen un gran valor como combustible, por lo que se puede clasificar en las siguientes categorías:

(a) Corteza: el contenido de corteza varía entre el 10-22% del total en volumen en una explotación forestal en función del tamaño del árbol y la especie.

(b) Residuos gruesos: costaneros, recortes, aserradero y piezas de borde de la placa. Estos residuos se pueden utilizar con propósitos energéticos y también como materia prima para pulpa y aglomerado.

(c) Núcleos: esta madera se utiliza generalmente como madera en rollo en aserraderos o como madera para pasta.

(d) Aserrín: es un subproducto que se genera en el proceso industrial de la madera en los aserraderos, siendo este la principal base en la producción de los combustibles por medio del proceso de densificado como briquetas y pellets. También se utilizan para la producción de tableros.

(e) virutas de cepillado: son el resultado del redimensionamiento y alisado de madera aserrada, madera contrachapada y tableros durante su proceso. Este material es ideal para la producción de tableros, también se utiliza como materia prima para la producción de combustibles densificados. (Parikka, 2003)

Biomasa proveniente de los residuos municipales:

Tanto en las grandes ciudades como en las pequeñas se generan una gran cantidad de biomasa per cápita proveniente de los desechos urbanos o municipales, también llamada MSW (*municipal solid waste*) esta ocupa un lugar significativo en las fuentes de la biomasa, ya que este tipo de residuos proporciona un 24% de la energía disponible de la biomasa (desechos de madera 64%, MSW 24%, residuos agrícolas 5% y gases de vertedero 5%).

El uso de bioenergía proveniente de los vertederos tiene un mayor costo que la proveniente del carbón, pero el uso de esta reduce entre 60- 90% el volumen de basura arrojada en los vertederos (Demirbas, 2000).

En esta tesis se considera a este tipo de biomasa apta para la producción de briquetas a niveles industriales, ya que, si se tratan previamente por medio de procesos de separado, secado, trituración y mezcla con el aglutinante es factible la producción de briquetas. Es el caso de estas briquetas la calidad final de las briquetas depende en gran parte de la composición de los MSW (P. Križan, 2011)

Benéficos del uso biocombustibles:

La biomasa es una fuente de energía limpia y renovable la cual puede mejorar la calidad de nuestro ambiente de forma significativa. Ya que la bioenergía genera menos emisiones a la atmósfera que los combustibles fósiles, reduce la cantidad de residuos enviados a los vertederos y disminuye la dependencia del petróleo. Además, la energía proveniente de la biomasa también crea miles de puestos de trabajo y ayuda a revitalizar las comunidades rurales ya que cosecha a cosecha año a año emplea a miles de trabajadores rurales siendo la energía renovable de mayor generación de puestos de trabajo por unidad de energía generada.

Por estos motivos, la sustitución de los combustibles fósiles por la energía generada con biomasa resultará una reducción neta de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo que la biomasa es un medio propicio y adecuado para cumplir con los objetivos de reducción de gases de efecto invernadero. Siempre que la biomasa se cultive o reforeste y utilice correctamente.

La descomposición natural de la biomasa genera gas metano, el que es aproximadamente veinte veces más activo como gas de efecto invernadero que el dióxido de carbono. Por lo tanto, un beneficio en la quema eficiente de biomasa para la generación de bioenergía es la menor emisión de gases de efecto invernadero en comparación a la descomposición natural. En conjunto los biocombustibles tienen un contenido de azufre insignificante lo que contribuyen a la merma de las emisiones de dióxido de azufre, que causan lluvia ácida. Además, la combustión de la biomasa produce menos ceniza de la combustión del carbón, pudiéndose emplear esta ceniza proveniente de biocombustibles como mejorador de suelo.

La combustión de los residuos agrícolas, forestales y los MSW para la producción de energía se considera un uso eficaz de los residuos y desechos el cual reduce el problema de la eliminación

de residuos, especialmente en las áreas municipales en la que no se cuenta con superficie para la disposición de los residuos.

Los gobiernos reconocen a la biomasa como un recurso estratégico interno, el cual no está sujeto a las fluctuaciones de precios internacionales o las incertidumbres de suministro de combustibles importados.

En particular en los países en desarrollo, el uso de los biocombustibles líquidos, tales como el biodiesel y bioetanol, reduce las presiones económicas de la importación de productos de refinerías de petróleo.

2.2. Definición de biocombustible y sus derivados

Biocombustibles:

Los biocombustibles son combustibles que se componen o se producen a partir de biomasa. Estos biocombustibles pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Como el bioetanol, el biodiesel, el biogás, el syngas, los pellets o las briquetas son ejemplos de biocombustibles (Standardization, 2014).

Se puede clasificar a los biocombustibles desde un punto de vista morfológico en sólidos, líquidos y gaseosos. Esta tesis está centrada en los biocombustibles sólidos como los pellets, astillas (chip) y briquetas, así como la leña y el carbón vegetal.

Dejando de lado a los demás biocombustibles, como los biocombustibles líquidos como el bioetanol, el metanol y el biodiesel, y los biogases los cuales están formados por distintas mezclas de monóxido de carbono (CO), el metano (CH₄) y el hidrógeno (H₂) los cuales son preponderantes.

Los biocombustibles son producidos a partir de transformación de biomasa, proveniente principalmente de los granos como el trigo, maíz, los residuos agrícolas y los residuos de la industria maderera y de la industria forestal (Ricardo Baettig P., 2010).

Astillas de madera:

Las astillas o chip de madera son trozos pequeños de entre 5 y 100 mm de longitud cuya calidad depende fundamentalmente de la materia prima de la que proceden, de su extracción y de la tecnología con la que se realice el astillado. Como ventaja los combustibles que poseen un pretratamiento relativamente sencillo (astillado y secado), tienen un coste inferior que las biomásas producidas industrialmente. Se pueden producir localmente y ser un combustible de alta calidad para calderas de cualquier tamaño, aunque precisan de mayor espacio de almacenamiento que los pellets o las briquetas. No deben emplearse como combustible si la humedad supera el 15%, y su PCI dependerá de la materia vegetal de origen (www.agenciaandaluzadelaenergia.es/, 2011).

Pellet:

Los pellets de biomasa son un biocombustible sólido densificado el cual está estandarizado a nivel internacional. Este consiste en pequeños cilindros (de 5-12 mm de diámetro y de 10-30 mm de largo) procedentes de la compactación de aserrín y virutas, provenientes de aserraderos de la industria de la madera y otras biomásas como las podas de cultivos arbóreos y residuos forestales. En el proceso de peletización no se utilizan productos químicos sino simplemente presión, temperatura y vapor, aunque es posible encontrar un porcentaje reducido de aditivos biológicos.

El uso principal de los pellets es como combustible para aplicaciones térmicas en el sector residencial e industrial. Generalmente presenta con un contenido medio de humedad del 8-10% y su P.C.I. (poder calorífico inferior) medio es de 4.000 kcal/kg en base húmeda. ([/www.agenciaandaluzadelaenergia.es/](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/), 2011)

Leña:

La leña proviene de trocear troncos que no van a ser utilizados para producir madera, y puede producirse en la operación de podas de plantaciones forestales y tratamientos silvícolas. La leña se obtiene con una humedad que puede superar el 40%, por lo que debe almacenarse para que la humedad descienda hasta el 20% el P.C.I. dependerá del origen, aunque puede oscilar entre las 2.900 y 3.500 kcal/kg en base húmeda. ([/www.agenciaandaluzadelaenergia.es/](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/), 2011)

Briquetas:

Las briquetas son cilindros de biomasa densificada de tamaño superior al del pellet, provenientes normalmente de aserrín y virutas de los aserraderos. Estos cilindros sustituyen normalmente a los leños en las calderas. Las principales propiedades de las briquetas son una humedad menor del 10%, un P.C.I de 3.700- 4.000 kcal/kg en base húmeda y una densidad en torno a los 1.000-1300 kg/m³. El contenido en cenizas no llega al 0,7%. ([/www.agenciaandaluzadelaenergia.es/](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/), 2011)

Obtención de biocombustibles:

Los biocombustibles sólidos, entre los que se incluyen a la leña, astilla, paja, carbón vegetal, pellets o briquetas, etc. Son en la actualidad la principal fuente de energía a partir de biomasa.

Dependiendo de la naturaleza de la biomasa y su proceso de conversión en biocombustible, puede clasificarse a los biocombustibles de la siguiente forma:

- Proceso Mecánico: astillado, trituración y compactación o densificado
- Proceso Termoquímicos: combustión, pirolisis y gasificación
- Proceso Biotecnológicos: micro bacterianos y enzimáticos

(Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009):

2.3. Los biocombustibles

El uso de biocombustibles como alternativa al uso de hidrocarburos produce una reducción del impacto ambiental, siendo este remplazo una tendencia ambiental moderna, aunque su empleo se ha realizado desde mucho tiempo atrás. Por ejemplo, en los países subdesarrollados (sobre todo en zonas rurales) se emplean los rastrojos y la leña como fuente primaria de energía. En los países desarrollados se aprovecha la madera para generar electricidad, a diferencia de los subdesarrollados, ya que en estos hay una verdadera industria silvícola sustentable que permite renovar los bosques y explotar su madera en la búsqueda del cuidado del ambiente (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009).

Los biocombustibles de primera generación:

Los biocombustibles líquidos de primera generación son los más favorecidos ya que su producción hoy en día es aproximadamente igual a un equivalente de 20 millones de toneladas de petróleo, lo que significa 1% del consumo mundial total (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009).

Las ventajas de los biocombustibles de primera generación:

En la actualidad a nivel mundial, las empresas y gobiernos están haciendo una intensa campaña para presentar a los biocombustibles como alternativas ambientalmente amigables, la cual puede ayudar a combatir el cambio climático mundial, al sustituir una parte del consumo del petróleo destinados a combustibles para transporte, produciendo una menor contaminación ambiental.

Esto siempre que se hagan las consideraciones de la reproducción y repetición del ciclo de plantación (forestación) y cosecha, teniendo en cuenta que no se agoten los suelos ni se contaminen ni degraden los campos de cultivo.

Los biocombustibles se adaptan con una buena flexibilidad a las tecnologías existentes en contrapunto las demás fuentes alternativas como es el hidrógeno, que requieren de una tecnología diferente lo que conlleva al remplazo de la tecnología desarrolladas para los hidrocarburos convencionales.

Un gran beneficio de los biocombustibles de primera generación es la facilidad de uso en aplicaciones generales lo que genera un gran beneficio a los agricultores en particular a los pequeños productores.

Algunos organismos internacionales sostienen que la producción de biocombustibles de primera generación no está en contraposición con la producción de alimentos o la seguridad alimentaria. La administración anterior del gobierno norteamericano sostuvo esta posición, no obstante, esta temática es polémica, ya que esto impacta en el encarecimiento de los alimentos a nivel mundial (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009).

Biocombustibles de segunda generación:

Los biocombustibles de segunda generación se diferencian de los de primera generación en dos aspectos;

Proviene de biomasa que no son alimentaria y son producidos con innovaciones tecnológicas las cuales posibilitan la producción ecológica. Al provenir de biomasa no alimentarias, se pueden cultivar en tierras marginales que no son adecuadas para el cultivo de alimentos.

Un caso de esto es la producción de biocombustibles líquidos como el bioetanol de segunda generación con biomasa celulósica, lo que posibilita el uso de los residuos de los aserraderos y de la silvicultura lo que permite diversificar el uso de los bosques y protegerlos del desmonte para usos plantaciones agrícolas convencionales.

Los biocombustibles de segunda generación también pueden ser producidos a partir de biomasa forestales de origen lignocelulósico como el álamo y el sauce, el pasto de elefante, el mijo y los residuos celulósicos industriales en la producción de muebles y otros productos industriales.

En el contexto mundial actual, existe una continua alza de precios de los alimentos, por lo que se busca el uso de las biomasa no alimentarias las cuales suelen ser abundantes y se cultivan en terrenos no agrícolas o estériles.

Debido a esto los biocombustibles de segunda generación resuelven la controversia de la producción de alimentos o biocarburantes (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009).

Ventajas del uso biocombustibles de segunda generación:

Los biocombustibles de segunda generación se producen a partir de diferentes tipos y variedades de biomasa las cuales son no comestibles por lo que no tienen valor alimentario, y se consideran desechos de las industrias de los vegetales como de la madera.

La biomasa empleada para su producción puede producirse en áreas no agrícolas ni ganaderas, también posibilita la diversificación del uso de los bosques y promover la silvicultura y detener la deforestación.

Es factible la recuperación de terrenos desérticos y erosionados como laderas o zonas desérticas, en las cuales se puede emplear para capturar gases de efecto invernadero por medio de plantaciones de raíces.

Además, se puede usar MSW para la producción de biocombustibles de segunda generación (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009).

Biomasa lignocelulósica como fuente de biocombustible:

En esta tesis nos centraremos en biomasa lignocelulosa apta para la producción de biocombustibles sólidos, la cual proviene de los residuos de la foresto industrias locales principalmente de aserraderos, siendo este un recurso que se encuentra en abundancia en la Argentina como se aprecia en la Tabla 2.2.

La principal fuente de biomasa para la producción de biocombustibles sólidos son los residuos de la industria maderera, residuos de los cultivos agrícolas y de raleos forestales.

Por lo que, al estudiar este tipo de biomasas en la Argentina, el estudio WISDOM ARGENTINA de 2009 ejecutado por el PROBIOMASA muestra el siguiente potencial de recurso biomasa disponibles:

Tabla 2.2: Residuos por actividad clasificados por provincias (Roveda & Trossero, 2009).

PROVINCIA	Residuos de poda	Residuos de poda de vid	Residuos de poda de otros Frutales	Residuos de poda de olivo	Residuos Arroz en campo	Residuos Agrícolas Cañeros (RAC)	Residuos de Bagazo no utilizados	Residuos cáscara maní	Residuos Industriales Arrocería	Residuos desmote Algodón	Residuos de orujo de oliva	Residuos de aserraderos	Total
Valores expresados en toneladas de biomasa en base seca por año													
BUENOS AIRES	16.300	78	37.659	0	0	0	0	0	0	0	0	17.399	71.436
CAPITAL FEDERAL	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0	5378.0	0.0	0.0	0.0	5.378.0
CATAMARCA	5.747	9.315	28.025	91.742	0	63	32.003	0	0	0	25.448	127	192.470
CHACO	232	0	404	0	10.765	0	0	0	0	34.737	0	16.702	62.839
CHUBUT	0	24	2.210	0	0	0	0	0	0	0	0	1.143	3.377
CORDOBA	204	711	6.378	0	0	0	0	180.011	0	319	0	3.810	191.433
CORRIENTES	73.707	0	663	0	173.621	0	0	0	29.046	5.856.7	0	516.984	799.877
ENTRE RIOS	141.850	42	2.321.0	0.0	144.585.0	0.0	0.0	0.0	84.450.0	0.0	0.0	160.445.0	533.692.7
FORMOSA	3.304	0	17	0	12.303	0	0	0	0	2.172	0	12.759.0	30.555
JUJUY	20.135	207	4.533	0	0	161.641	85.285	0	0	159.7	0	7.527	279.487
LA PAMPA	0	285	2.723	0	0	0	0	0	0	0	0	1.397	4.405
LARIOJA	554	21.846	22.846	98.331	0	0	0	0	0	0	48.193	0	191.770
MENDOZA	0	361.502.7	296.597	35.785.7	0	0	0	0	0	0	114.399	4.572	812.857
MISIONES	24.887.1	0.0	1.076.8	0.0	769.0	0	2.736.0	0.0	2.648.0	0.0	0.0	840.935.0	873.052
NEUQUEN	0	2.131	46.776	0	0	0	0	0	0	0	0	2.794	51.701
RIONEGRO	0	4.768	221.828,8	0	0	0	0	0	0	0	0	3.302	229.899
SALTA	17.406	5.094	3.244	0	0	52.609	135.089	0	0	2.738	0	55.021	271.201
SAN JUAN	12.6	113.515.8	26.591.8	16.272	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.490.0	2.032.0	203.914.2
SAN LUIS	3	0	193	0	0	0	0	0	0	6.343	0	762	7.301
SANTA CRUZ	0	0	1.100	0	0	0	0	0	0	0	0	381	1.481
SANTA FE	1.572	0	3.671	0	46.907	0	19.847	0	6.111	1.985	0	6.350	86.443
SANTIAGO DEL ESTERO	1.986	49.4	310	0	0	4.500	0	0	0	0.0	0	11.742	18.588
TIERRA DEL FUEGO	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	254	2

TUCUMAN	102.872	124	2.435	0	0	697.359	881.011	0	0	0	0	10.973	1.694.775
Totales	410.772	519.692	711.601	242.131	388.950	916.172	1.155.971	180.011	127.633	54.310	233.530	1.677.411	6.618.183
Porcentaje de Residuos de aserraderos sobre el total												25%	

Como se muestra en la tabla anterior las plantaciones forestales y sus residuos aportan el 25% del potencial Biomásico de la Argentina los cuales provienen de plantaciones forestales y de bosques Nativos.

Del total descrito anteriormente de 1677411 t se encuentran anualmente un potencialmente disponible y accesible de manera sustentable de biomasa leñosa proveniente de los bosques nativos e implantados en la argentina es de 143 millones de toneladas.

Donde las provincias con mayor potencial son las de Santiago del Estero (17.257.800 t), Salta (16.941.600 t), Chaco (13.438.600 t), La Pampa (10.688.200 t), Formosa (9.650.900 t) y Buenos Aires (7.696.800 t) (Roveda & Trossero, 2009).

2.4. Oferta Total de biomasa en la Argentina

En la Argentina la oferta total de biomasa accesible y potencialmente disponible cuantificada en el WISDOM 2009 es de 148.360.000 t a la misma se denomina biomasa “comercial” accesible y potencialmente disponible. Donde las provincias con mayor potencial son: Salta 16.634.100 t, Santiago del Estero 16.392.100 t, Chaco 12.785.000 t Formosa 9.230.000 t, La Pampa 9.185.100 t y Río Negro 5.382.900 t.

Teniendo en cuenta las restricciones de la producción sustentable estables se estima en 193.000.000 t, de las cuales 143.000.000 t son físicamente accesibles y están potencialmente disponibles para su uso.

Este resultado se alcanzó considerando el uso actual de suelo y las prácticas industriales actuales. Limitando estos cálculos a los cultivos destinados a la producción de biocombustibles u bioenergía. A estos recursos se le suman 2.700.000 t de biomasa leñosa proveniente de los residuos de los aserraderos y de las plantaciones frutales por un estimado de 2.300.000 t subproductos biomásicos derivados de las agroindustrias alcanzando un total 124.000.000 t lo que asciende a un potencialmente disponible total de 148.000.000 t. De esta oferta se aprecian los siguientes valores representativos a las consideraciones como dendrocombustibles, con una productividad leñosa anual sustentable en el país de 193.000.000 t en base seca, donde 143.000.000 t anuales en base seca son accesibles y están potencialmente disponibles para la producción de energía.

Obteniéndose un total de biomasa leñosa potencialmente disponibles de 148.000.000 t/año en base seca de las cuales 124.000.000 t/año son comercialmente disponibles lo que representa energéticamente a 37.200 ktep/año lo que equivale a más del 50 % de la oferta interna de energía primaria del país.

Si se considera que el consumo en 2009 de biomasa para la producción de bioenergía alcanzó un estimado de 7.900.000 t/año de las cuales 2.200.000 t/año son MSW.

Por lo que según las estimaciones del WINDOM Argentina 2009 existe superávit potencial de biomasa energética a nivel nacional, no obstante, a niveles regionales hay gran variabilidad e incluso algunas zonas esto es deficitarias (Roveda & Trossero, 2009).

CAPÍTULO 3

CALIDAD EN BIOCOMBUSTIBLES

3.1. Introducción

En las investigaciones de referencia sobre la densificación de biomasa lignocelulósica proveniente de la madera para la producción de biocombustibles. Define a la calidad en la producción de los biocombustibles sólidos como una amplia gama de características físicas y químicas, como el tamaño de las partículas, el contenido de humedad, el poder calorífico, su resistencia mecánica y los contenidos de azufre, cloro, nitrógeno, potasio, cenizas. También se tiene en cuenta la procedencia de la fuente primaria de la biomasa la cual debe de ser una fuente renovable.

La estandarización de biocombustibles sólidos es un requisito necesario para la expansión del mercado de biocombustibles sólidos. Ya que al establecer estándares para biocombustibles sólidos se contribuye a simplificar y homogenizar la oferta de biocombustibles, con su respectiva conversión en energía, ya que se establece los tipos de biocombustibles que existen en el mercado y alcanzar una comprensión económica del precio del combustible. Además, la estandarización puede garantizar que los biocombustibles cumplan con los requisitos que demandan los equipos de combustión y generación de energía, garantizando el ciclo de carbono neutro y alcanzar los requisitos ambientales al minimizar las emisiones de sustancias contaminantes a la atmósfera.

Además, la calidad es quien vincula el sector productivo de los biocombustibles y los equipos que realiza la conversión de energía química a térmica garantizando la eficiencia en este proceso. Por los estándares brindan a los fabricantes de equipos de aprovechamiento energético puedan diseñar equipos que funcionen en las distintas regiones geográficas ahorrando inversiones en desarrollos de equipos para cada biocombustible (Križan, 2014).

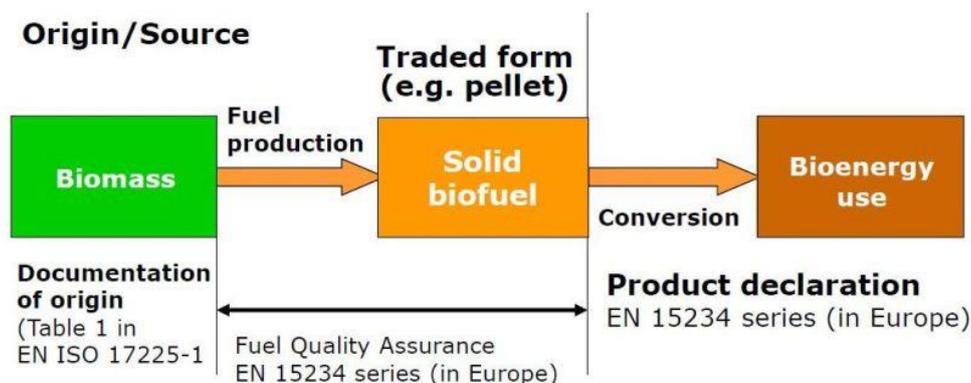


Figura 3.1: Tables with property grades in EN ISO 17225-1 to 7 (Križan, 2014)

Por lo que en la actualidad existen varias legislaciones, manuales y normas que definen las características y requisitos que se deben garantizar en la producción de los biocombustibles. Siendo estos requisitos fundamentales para los proveedores de biocombustibles porque estas normas aclaran y simplifican a los estándares de calidad con los que trabaja el mercado de los biocombustibles, categorizando a cada tipo de biocombustibles según propiedades y características.

En este contexto en la Unión Europea las normas de biocombustibles están definidas por las normas CEN 14588 y EN 1496. Estas normas definen a los biocombustibles, las materias primas para su producción, los indicadores de calidad, los procedimientos para determinar las propiedades del biocombustible y el sistema de calificación para la segmentación del biocombustible según la calidad del producto final. En los países más desarrollados (países con una mayor producción de biomasa), existían otros estándares incluso antes de los establecidos por la UE. Estas normas nacionales fueron la base para la creación de las nuevas normas de la UE. En Argentina, el mercado de biocombustibles está aumentando gradualmente. Por lo que, para el crecimiento y estabilización del mercado argentino de biocombustibles, es necesario la creación de normas que den un marco de referencia al mercado de los biocombustibles a nivel local. (Križan, 2014).

En los siguientes puntos definiremos de forma general los estándares desarrollados por los criterios establecidos por CEN / TC 335. Describiendo el alcance de la estandarización la terminología, especificaciones y clases, control de calidad, muestreo y reducción de muestras, y los métodos de prueba incluyen materiales crudos y procesados que se originan de la agricultura y de la silvicultura.

Una de las herramientas más importantes, para el desarrollo de un mercado consolidado de los biocombustibles en Europa son los estándares que deben cumplir los biocombustibles sólidos actualmente en desarrollados en CEN / TC 335. Los estándares se usan como herramientas para lograr una transacción eficiente de biocombustibles y el buen entendimiento entre los vendedores. y los compradores.

El alcance de estas normas ha sido definido por la comisión de biocombustibles sólidos cubiertos por el TC 335 el cual es idéntico a lo descrito por la Directiva 2000/76 / EC [Artículo 2.2 a) de i) a v)] sobre la incineración de residuos.

Un ejemplo de este alcance es que para evitar dudas la madera de demolición no está incluida en el alcance del CEN / TC 335. La madera de demolición es “madera usada que surge de la demolición de edificios o instalaciones de ingeniería civil” (EN 14588).

La siguiente figura muestra las diferentes fuentes y procesos por las cual se puede producir biocombustibles solidos

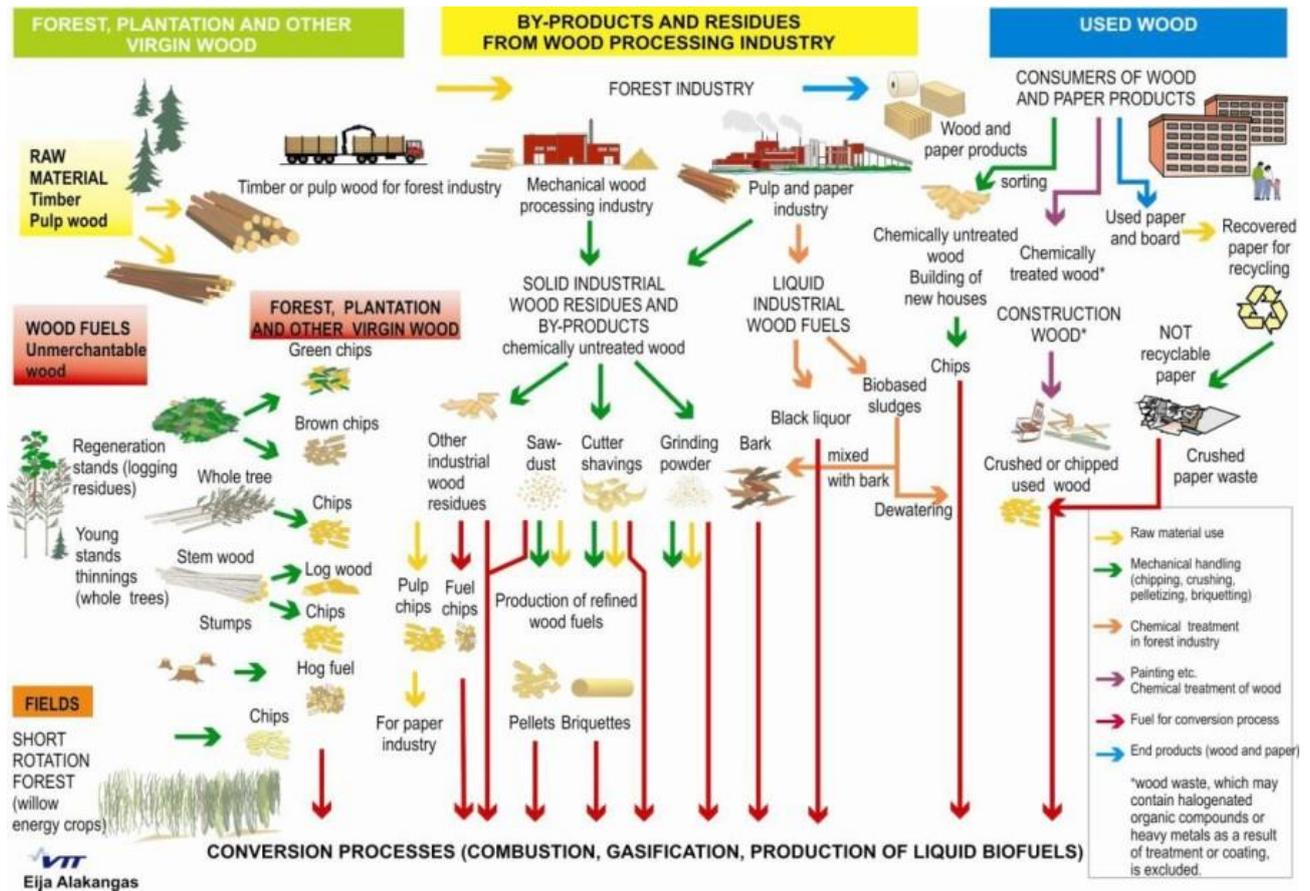


Figura 3.2: Ejemplo de clasificación de 1 biomasa Woody (EN 14961-1: 2010).

3.2. Evolución de las normas y reglamentos de referencia de los biocombustibles solidos

En los siguientes puntos se describirá a los referentes y referencias técnicas de los comités y organismos que desarrollaron las normas de referencia internacionales de biocombustibles.

Estándares europeos (EN):

Los estándares son documentos técnicos los cuales sirven como norma, estos están basados en acuerdos de grupos referentes en el tema, técnicos, fabricantes y usuarios, interesados en la temática. Los estándares europeos deben ser adaptados a estándares nacionales en cada uno de los países por sus respectivos organismos reguladores nacionales (Gaber M., 2014).

Especificaciones técnicas (CENTS):

Las especificaciones técnicas (TS, por sus siglas en inglés) son documentos de carácter normativo elaborados y aprobados por un comité técnico. Estas pueden servir como estándares provisionales e incluir requisitos técnicos de tecnologías innovadoras. Las especificaciones técnicas también resultan útiles si no es posible llegar a un consenso sobre un estándar común y, por ello,

tienen que convivir diversas especificaciones. Estas se pueden aplicar como estándares nacionales, aunque no sean obligatorio.

CEN (Comité Europeo de Normalización):

Entre los años 2000 y 2006 se elaboraron diversas especificaciones técnicas (CEN/TS) en el Comité Técnico CEN/TC 335 de biocombustibles sólidos que posteriormente pasaron a ser estándares plenamente aceptados.

Los países que pertenecen al CEN son: Alemania, Antigua República Yugoslava de Macedonia, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumanía, Suecia, Suiza y Turquía.

Comité de la ISO (Organización Internacional de Normalización) – Comité Internacional de Normalización:

ISO conformo en 2007 el Comité Técnico ISO/TC 238 de biocombustibles sólidos con la misión de trabajar en el desarrollo de los mercados internacionales de biocombustibles sólidos.

Los estándares europeos previamente publicados son utilizados como proyectos de estándar en el ISO/TC 238 y parcialmente desarrollados y debidamente complementados.

Los primeros estándares en materia de biocombustibles sólidos fueron publicados como ÖNORM EN ISO a partir de 2014 (ÖNORM es una norma nacional publicada por el *Austrian Standards Institute*).

Esta reestructuración solo implicará ligeras modificaciones de los textos normativos, pero se asignarán nuevos números a los estándares. (Gaber M., 2014)

Contexto mundial de las normas de biocombustibles solidos:

En esta tesis tomaremos como referencias los desarrollos de normas europeas, ya que estos desarrollos son los que se tienen como referencia a nivel mundial. Por lo que las normas ISO se basan en la norma EN para este caso.

En el siguiente apartado se describirá el desarrollo de las normas de biocombustibles en la argentina por parte de IRAM (Instituto Argentino de Normalización y Certificación).

En la actualidad la metodología para la caracterización de biocombustibles sólidos esta estandarizada por el CEN, este organismo define las normas a nivel europeo para la caracterización de biocombustibles indicando los parámetros a estudiar para estos combustibles.

En los diferentes países se adapta y traduce las normas CEN para ser empleadas según el caso. Por ejemplo, en Alemania (*Deutsches Institut für Normung* o traducido Instituto Alemán de Normalización) en España AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación) en

Argentina el IRAM. Las adaptaciones se realizan por medio de un comité técnico que se encarga de la elaboración y aplicación de las normativas respectivas, teniendo en cuenta el mercado, la tecnología disponible de los productores y consumidores de biocombustibles según corresponda el caso.

A nivel europeo existe un manual para la certificación de biocombustibles sólidos provenientes de la madera para usos energéticos basado en la norma ISO 17225, 2014. El objetivo de este sistema de certificación de biocombustibles es asegurar en el suministro de biocombustibles con la calidad, la cual está claramente definida. Además de asegurarla calidad en el proceso de producción y logística de los biocombustibles, esta certificación divide a las briquetas categorías o clases A1, A2 y B, definiendo tres calidades de briquetas de madera (Sánchez, 2015).

En la Figura 3.3 se muestra la evolución de las normas de biocombustibles sólidos en la línea del tiempo.

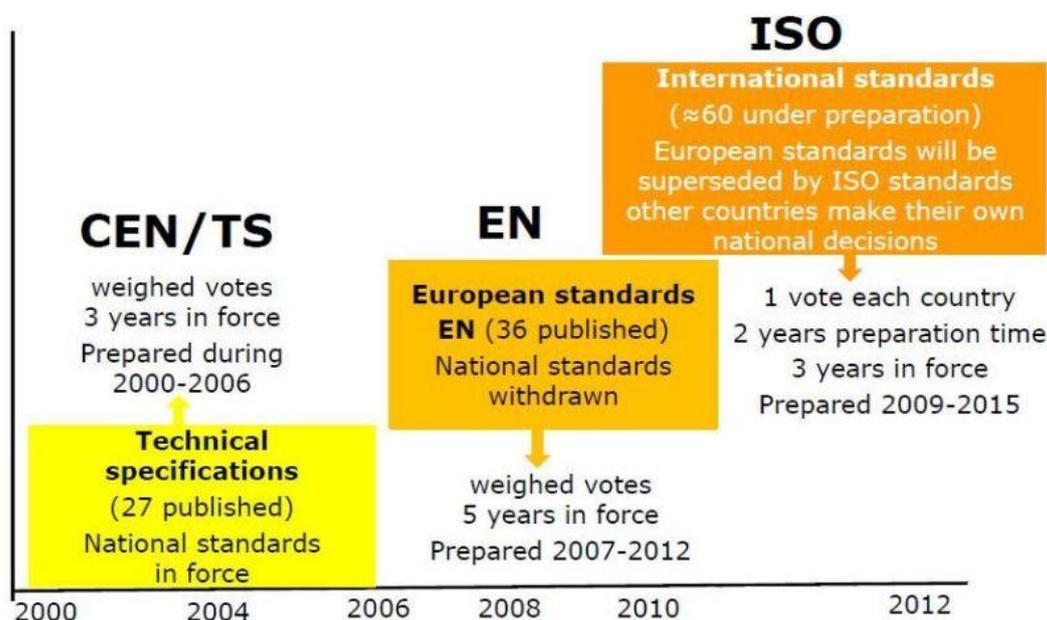


Figura 3.3: Evolución de las normas de referencia de biocombustibles sólidos (Sánchez, 2015).

Normas de biocombustibles sólidos en la Argentina:

Desde el año 2017 representantes del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) y del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) comenzaron a trabajar en la primera norma de biocombustibles sólidos de la Argentina. En este trabajo también participaron empresas productoras y consumidoras de biomásas y de biocombustibles sólidos, universidades e instituciones tecnológicas y científicas de todo el país.

En la Argentina la bioenergía comenzó a tomar relevancia como en el resto del mundo ya que el empleo de este tipo de energía permite aprovechar desechos municipales, agrícolas e industriales de forma limpia.

Para el caso de la Argentina, el desarrollo de este tipo de energía renovable tiene un gran potencial ya que la foresto y agroindustrial generan grandes volúmenes de materiales los cuales pueden ser utilizados como fuentes de energía y medio de diversificación de las industrias primarias.

Por lo que con el objetivo de regular el sector de los biocombustibles, tanto para los compradores como para los productores. En la primera semana de octubre de 2018 concluyó con el armado de la norma IRAM-ISO 17225-1 sobre “Biocombustibles sólidos”; siendo esta la primera fase del trabajo de estandarización del sector. Por lo que una vez concluida esta primera fase se propone continuar en una próxima instancia en la cual se abrirá el documento a discusión pública, invitando a referentes en la temática a realizar aportes y ratificaciones.

En está previsto avanzar con normativas vinculadas a la clasificación de pellets, chips de madera y briquetas, ya que estos tres biocombustibles sólidos permiten generar calor y electricidad, siendo los más empleados en el mercado (Borrega, 2018).

3.3. La importancia de la estandarización de los biocombustibles

En los años noventa la Comisión Europea solicito al CEN el pedido del desarrollo de los estándares para los biocombustibles sólidos con el fin de impulsar como política energética de Europa al uso de los biocombustibles. Con esta política de la Comisión Europea impulso la producción de bioenergía, esto debido al cambio climático y la seguridad en el suministro de energética.

Por lo que con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y no depender de los países productores de petróleo y gas. Se planteo el uso de energía renovable en un 20% el consumo energético total de Europa para el año 2020.

Debido al creciente aumento de las importaciones de biomasa en Europa, el pedido de desarrollo de normas tomo más importancia tanto en Europa como el resto del mundo, lo que derivó a que el pedido de los estándares se realice a nivel mundiales.

En los siguientes puntos se describen los trabajos realizados por el CEN Europea / TCS, e ISO / TC relacionados a los biocombustibles solidos como a la biomasa. (Wolfgang & Rainer, 2011)

Nos referimos a los estándares como normas dirigidas a proporcionar, un producto o servicio normalizado (de calidad constante) y competitivo. Por lo que se establecen requisitos aplicables a los productos y al cumplimiento de características especificaciones, en conjunto con los medios para verificar el cumplimiento de tales requisitos. En este caso estos estándares son recomendaciones de cumplimiento voluntario.

En esta normativa se describe el estado actual de la técnica o tecnología aplicado a determinado ámbito en el cual se establece un estándar.

El uso de una norma no es un requisito contraproducente para algún sector del mercado, sino que es un valor agregado el cual conforma la creación de condiciones clara y enmarca en un contexto de confianza entre los productores y consumidores.

Los estándares son desarrollados por expertos especializados en la temática de interés sean; usuarios, autoridades, asociaciones profesionales, comerciantes, fabricantes industriales y científicos.

Estos estándares contribuyen al comercio internacional y contribuyen al uso racionalización de los biocombustibles al garantizar la calidad y la protección ambiental.

Generalmente los estándares se elaboran a petición de representantes de la industria o de los organismos del gobierno o de organizaciones de protección al consumidor, en el caso de la Argentina fueron IRAM y la secretaria de comercio de la Nacional.

A continuación, se describe el desarrollo de las normas de biocombustibles ISO las cuales se utilizaron por IRAM como base para el desarrollo de las normas ISO IRAN 17225 las que son adaptaciones de las ISO al mercado argentino.

El desarrollo de las normas comenzó por el trabajo llevado a cabo por el CEN mediante un comité de técnicos "CEN/TC" el cual está conformado especialistas en la temática (productores, comerciantes, usuarios) designados por la organización de normalización de cada país. Estos comités técnicos pueden subdividirse en varios grupos de trabajo (GT).

Para el desarrollo de este trabajo los expertos trabajan en conjunto con los especialistas de organizaciones nacionales de normalización, que proporcionan los secretarios y gestores de proyecto para cada comité o grupo de trabajo. Las conformaciones de los estándares de los biocombustibles sólidos tienen como objetivo general definir los métodos y procesos que garanticen la calidad de los mismos, siempre buscando el incentivar el mercado y al comercio internacional de los biocombustibles sólidos.

Por lo que el desarrollo de las normas europeas fue realizado en las siguientes fases:

(La fase de propuestas los grupos de trabajo preparan los primeros borradores de los estándares, que son identificados con la marca "PR").

- I. La fase de sondeo (se recopilan e incorporan a los estándares los comentarios de las organizaciones nacionales de normalización, que son identificados con la marca
- II. Fase de ratificación (las organizaciones nacionales de normalización emiten su voto sobre el nuevo estándar; si este es ratificado, se publica y es identificado con la marca "EN" o "ISO")

European and international framework for solid biofuel standardisation

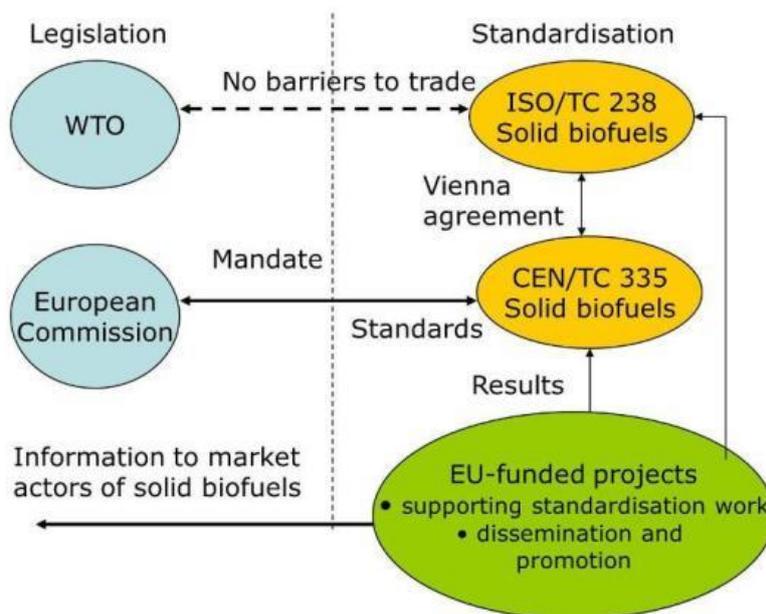


Figura 3.4: Marco europeo e internacional para biocombustibles sólidos normalización (Wolfgang & Rainer, 2011).

3.4. Beneficios de la normalización de los biocombustibles sólidos

Como se describió anteriormente en la normalización, se benefician a todos los actores del mercado por lo que en los siguientes apartados se describirán los beneficios tanto para los productores como para los usuarios de biocombustibles.

Beneficios de la normalización de los biocombustibles en el mercado:

La inserción de normas reconocidas a un mercado es el medio eficaz para hacerlo competitivo ya que el uso de estándares lleva a la reducción de costos en la producción de biocombustibles. En conjunto informa a los consumidores de manera transparente de las diferentes opciones de compra, mostrando las diferentes relaciones precio calidad, según las diferentes calidades que establece la norma.

Además, las normas son utilizadas para indicar que los productos cumplen con los requisitos ambientales y legales, lo que es importante para que los consumidores puedan diferenciar a los productores que cumplen o no estos requisitos. También las normas garantizan que la calidad de los biocombustibles adquiridos sea uniforme (Wolfgang & Rainer, 2011).

Benéficos de la normalización de los biocombustibles en el sector público:

A pesar de que en Europa las normas son de carácter voluntario y están separadas de los sistemas legales y reglamentarios, los cuales generalmente son usados para apoyar o

complementar la legislación mencionadas anteriormente como proteger el medio ambiente o asegurar la calidad para los consumidores.

Estos beneficios toman mayor importancia cuando estos tienen un compromiso del gobierno a la reducción de la carga tributaria para los biocombustibles que estén bajo el cumplimiento de las normas con el fin de potenciar el uso de la bioenergía segura.

Un ejemplo claro de la importancia de las normas en el ámbito de los biocombustibles es la sostenibilidad de las plantaciones de las cuales se extrae la biomasa. Ya que es un requisito normativo demostrar que la biomasa utilizada cumple con los requisitos de sostenibilidad.

Las normas también brindan un lenguaje técnico universal. Ya que estas se emplean a nivel mundial, tanto para comerciantes como para productores y consumidores de biocombustibles sean estos domésticos o industriales. En conjunto se brinda un lenguaje técnico en común el cual describe las características de los biocombustibles (Wolfgang & Rainer, 2011).

3.5. Relación entre regulación, estandarización y certificación de los biocombustibles sólidos

En la siguiente figura se muestra de forma esquemática la relación que hay entre regulación, estandarización y certificación. Por lo que en la pirámide se representa las desde abajo hacia arriba las distintas jerarquías. Por ejemplo, las normas europeas pueden respaldarse en las directivas políticas, las que ayudan a las empresas a cumplir con los requisitos establecidos por la legislación.

Las organizaciones de normalización desarrollan normas las cuales establecen especificaciones técnicas las cuales son los requisitos que estas normativas especifican. Siendo estas normativas siempre de carácter voluntario, tanto para los fabricantes como para los demás actores del mercado de los biocombustibles por lo que no son obligatorias.

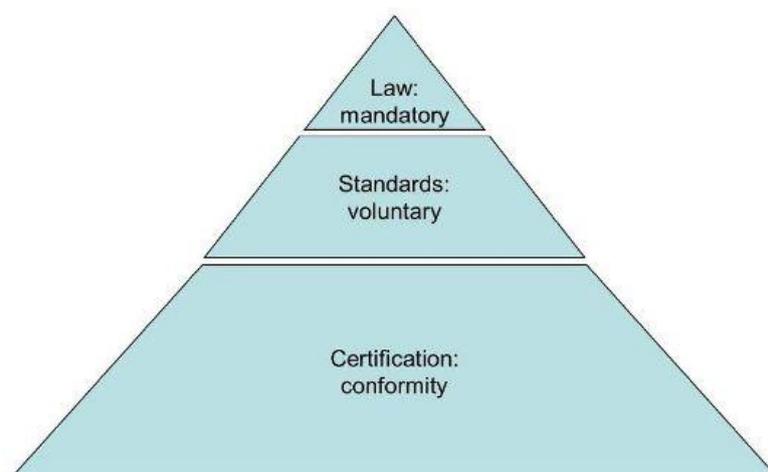


Figura 3.5: Jerarquía de regulación, normalización y certificación (Wolfgang & Rainer, 2011).

La certificación se basa en la confianza justificada de que un productos, servicios, procesos o sistemas cumple con una norma específica. Los sellos de certificación son dados por organismos

públicos o empresas terceras independientes a las partes interesadas. Los cuales auditan que los productos y prácticas cumplan de forma consistentemente con la conformidad con los estándares definidos en la norma. Estos sellos son fácilmente reconocibles y actúan como etiquetas de calidad, seguridad y buen rendimiento del biocombustible (Wolfgang & Rainer, 2011).

3.6. Garantía de calidad

Las normas tienen el objetivo de describir los procesos para garantizar el cumplimiento de los requisitos de calidad y garantizar la confianza del cumplimiento de las especificaciones de los biocombustibles.

Estas normas referidas a los biocombustibles sólidos se extienden por toda la cadena de suministros en la producción de biocombustibles sólidos. Por lo que su objetivo es ofrecer una herramienta la cual permita un comercio eficiente de los biocombustibles en un marco que garantice la calidad de tal forma que sea de fácil aplicación y no sea una carga burocrática

Por lo que para la implementación de la EN 15234 norma de referencia en cuanto a normas que garantizan la calidad, se deben cumplir diferentes tareas dependiendo del lugar que se ocupe en la cadena de suministro de los biocombustibles. Por lo que el proveedor de la materia prima es el primer participante, por lo que tiene la responsabilidad de especificar el origen y fuente de la biomasa que se utiliza como materia prima, lo cual se debe realizar mediante la documentación pertinente.

Por lo que a continuación describiremos los requisitos generales de la primera parte de la norma:

Requisitos generales Parte 1 de la norma EN 15234-1: 2011

En este punto se describen los procedimientos necesarios para cumplir con los requisitos de calidad y las medidas para garantizar la confianza en el cumplimiento de las especificaciones de los biocombustibles.

Esta norma abarca la totalidad de la cadena de suministro de los biocombustibles sólidos, desde la producción de la materia prima hasta la venta al consumidor domiciliario.

El objetivo general de la norma es ofrecer una herramienta la cual permita un comercio eficiente de los biocombustibles y proporcionar instrucciones para la adopción de medidas de garanticen la calidad. A su vez esta norma debe de ser fáciles de aplicar y que no debe contener una carga burocrática excesiva.

Son múltiples los trabajos que se deben realizar para implementar un sistema de garantía de calidad de biocombustibles sólidos conforme con la norma EN 15234, Esto depende de la función o de la posición que cumpla el actor participante en el mercado, de la cadena de suministro. El proveedor de la biomasa o materia prima es el primer actor de la cadena de suministro de biocombustibles sólidos. Este provee del recurso en forma de materia prima para aprovechamiento energético y tiene la responsabilidad de especificar con exactitud el origen, la fuente y la ubicación

de la cual proviene esta biomasa. Esta documentación debe estar accesible a lo largo de toda cadena de suministro y asegurar la trazabilidad de la biomasa.

El productor de los biocombustibles comprueba que la materia prima recibida cumple con las especificaciones indicadas por el proveedor de la misma en lo que respecta a su origen y fuente.

El comerciante de biocombustibles el cual recensiona los biocombustibles y verifica que se cumplan las especificaciones indicadas por el productor en la etiqueta del producto o en los contratos de suministro.

El consumidor final de los biocombustibles comprueba que el etiquetado del producto cumple con los criterios establecidos en el contrato de suministro.

Los biocombustibles deberán acompañarse siempre de las declaraciones del tipo de producto con independencia de la forma en que se comercialicen los mismos sea a granel o en envasados. Si los productos se venden envasados, la declaración de producto deberá fijarse al envase a modo de folleto etiquetado. Si los productos se comercializan a granel siempre deben acompañarse de un comprobante que indiquen todos los parámetros de calidad y procedencia. Es necesario y recomendable expedir una declaración de producto por cada entrega, sin importar la forma en que se comercialice el biocombustible. Por lo que el estándar o norma EN 15234 definen las especificaciones de calidad mínimas que han de constar en la declaración de los biocombustibles sólidos son los siguientes:

- Proveedor,
- forma de comercialización,
- origen y fuente, país(es) o lugar de origen,
- especificación de las propiedades EN ISO 17225, material tratado químicamente (sí / no)
- firma, fecha.

3.7. Objetivos y marco de un sistema de garantía de calidad para los biocombustibles sólidos

El mercado internacional de los biocombustibles sólidos requiere la aplicación y el uso de estándares generalizados con el fin de lograr procedimientos efectivos que entre los productores, comerciantes y consumidores. Los estándares contemplados por las normas diferentes exigencias en función de los volúmenes comercializados. Por lo que se puede dividir a los consumidores finales en dos clases:

- Pequeños consumidores, los cuales de requieren combustibles de alta calidad con unas especificaciones estrictas.
- Grandes consumidores o industriales, los cuales pueden utilizar biocombustibles de calidades bajas por la robustez de los equipos en los que se utiliza el biocombustible.

Es importante señalar que de acuerdo la norma ISO 9001 un sistema de gestión de la calidad suele constar de las siguientes etapas: (a) planificación de la calidad, (b) control de calidad, (c) garantía de calidad y (d) mejora de la calidad. Estos puntos hacen referencia a las etapas de garantía y control de calidad.

En la siguiente figura mostramos de forma gráfica la aplicación de la norma EN 15234 a lo largo de la cadena de los biocombustibles sólidos (Gaber M., 2014).

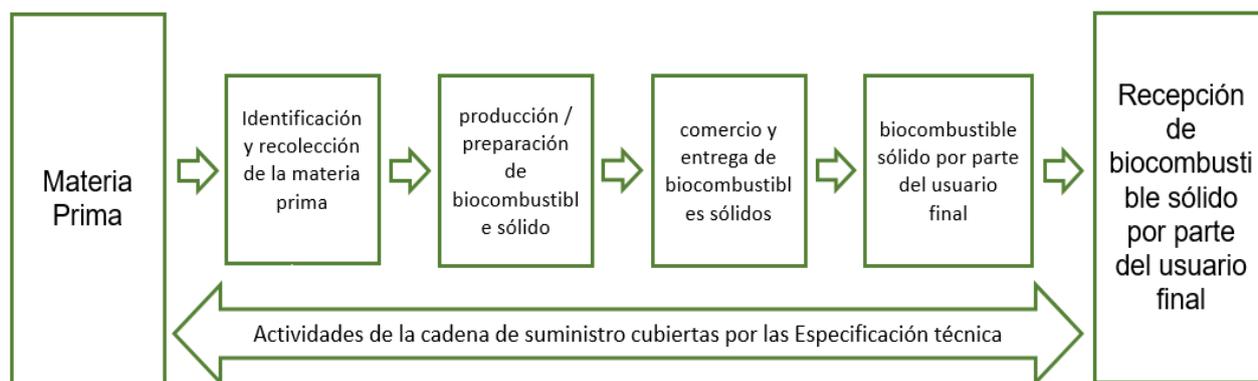


Figura 3.6: cadena de suministro de los biocombustibles sólidos (extraído de EN 15234).

3.8. Norma de referencia internacional de biocombustibles sólidos

En este punto se describirá la norma EN ISO 17225 la cual ha evolucionado de la norma EN 14961. Siendo esta norma la que se usa de base para la norma IRAM de biocombustibles en Argentina

La norma EN ISO difiere en varios aspectos de la norma la EN ya que está dividida en una sección general y nueve secciones específicas dedicadas a los diferentes biocombustibles sólidos, además del cambio de ciertas características particulares.

Se considera que la norma EN ISO 17225 es el estándar más importante producido por el comité técnico TC238, ya que este enmarca desde el origen de la materia prima de los biocombustibles, hasta forma que se comercializada, para cada uno de los biocombustibles. Este estándar da una lista de propiedades específicas con su rango de valores, los cuales varían según las clases en que se dividen los biocombustibles de acuerdo a cada tipo.

En las demás partes desde la 2 a 8, se establecen las clases de calidad para uno de los biocombustibles específicos; como pellets de madera, briquetas, astillas de madera, Leña, pellets no leñosos, briquetas no leñosas, madera tratada térmicamente y restos de olivo y los criterios que cada combustible debe cumplir para pertenecer en una clase de calidad (Kofman, 2016).

Parte 1 Requisitos generales:

En el primer apartado de la norma se contiene una tabla, en la cual se separan los biocombustibles según su origen. De forma que en la primera columna se enumeran los

biocombustibles sólidos de la siguiente forma: biomasa leñosa, biomasa herbácea, biomasa de fruta, biomasa acuática y luego el grupo de mezclas.

En la segunda columna se tipifican el origen de los biocombustibles con mayor detalle, y en la última columna se especifica la biomasa.

En la Tabla 3.1 se define el origen de la biomasa leñosa (los demás materiales se los definen en otros puntos complementarios). Luego del origen de la biomasa se especifican su procedencia y en la última columna se define a la biomasa de forma específica. Las propiedades en particular de las biomásas en definen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1: Clasificación de origen y fuentes de biomasa sólida leñosa ISO 17225.

1. Woody biomass		
1.1 Forest and plantation wood	1.1.1 Whole trees without roots	1.1.1.1 Deciduous
		1.1.1.2 Coniferous
		1.1.1.3 Short rotation coppice
		1.1.1.4 Bushes
		1.1.1.5 Blends and mixtures
	1.1.2 Whole trees with roots	1.1.2.1 Deciduous
		1.1.2.2 Coniferous
		1.1.2.3 Short rotation coppice
		1.1.2.4 Bushes
		1.1.2.5 Blends and mixtures
	1.1.3 Stemwood	1.1.3.1 Deciduous
		1.1.3.2 Coniferous
		1.1.3.3 Blends and mixtures
	1.1.4 Logging residues	1.1.4.1 Fresh/Green, Deciduous (including leaves)
		1.1.4.2 Fresh/Green, (including needles) Coniferous
		1.1.4.3 Stored, Deciduous
		1.1.4.4 Stored, Coniferous
		1.1.4.5 Blends and mixtures
1.1.5 Stumps/roots	1.1.5.1 Deciduous	
	1.1.5.2 Coniferous	
	1.1.5.3 Short rotation coppice	
	1.1.5.4 Bushes	
	1.1.5.5 Blends and mixtures	
1.1.6 Bark (from forestry operations) *		
1.1.7 Wood from garden, park, roadside maintenance, vineyards and fruit orchards		
1.1.8 Blends and mixtures		
1.2 By-products and residues from wood processing industry	1.2.1 Chemically untreated wood residues	1.2.1.1 Without bark, Deciduous
		1.2.1.2 Without bark, Coniferous
		1.2.1.3 With bark, Deciduous
		1.2.1.4 With bark, Coniferous
		1.2.1.5 Bark (from industry operations) *
	1.2.2 Chemically treated wood residues, fibres and wood constituents	1.2.2.1 Without bark
		1.2.2.2 With bark
		1.2.2.3 Bark (from industry operations) *
		1.2.2.4 Fibres and wood constituents
	1.2.3 Blends and mixtures	
1.3 Used wood	1.3.1 Chemically untreated wood	1.3.1.1 Without bark
		1.3.1.2 With bark
		1.3.1.3 Bark *
	1.3.2 Chemically treated wood	1.3.2.1 Without bark
		1.3.2.2 With bark
		1.3.2.3 Bark *
	1.3.3 Blends and mixtures	

Tabla 3.2: Principales formas comercializadas de biomasa sólida (ISO 17225).

Fuel name	Typical particle size	Common preparation method
Whole tree	> 500 mm	No preparation or delimbed
Wood chips	5 to 100 mm	Cutting with sharp tools
Hog fuel	Varying	Crushing with blunt tools
Stemwood/roundwood	>100 cm	Cutting with sharp tools
Logwood	50 to 100 cm	Cutting with sharp tools
Firewood	5 to 100 cm	Cutting with sharp tools
Slabs and offcuts	Varying	Cutting with sharp tools
Bark	Varying	Debarking residue from trees Can be shredded or unshredded
Bundle	Varying	Lengthways oriented & bound
Fuel powder	< 1 mm	Milling
Sawdust	1 to 5 mm	Cutting with sharp tools
Shavings	1 to 30mm	Planing with sharp tools
Briquettes	Ø > 25 mm	Mechanical compression
Pellets	Ø < 25 mm	Mechanical compression
Bales		
Small square bales	0.1 m ³	Compressed and bound to squares
Big square bales	3.7 m ³	Compressed and bound to squares
Round bales	2.1 m ³	Compressed and bound to cylinders
Chopped straw or energy grass	10 to 200 mm	Chopped during harvesting or before combustion
Grain or seed	Varying	No preparation or drying except for process operations necessary for storage for cereal grain
Fruit stones or kernel	5 to 15 mm	No preparation or pressing and extraction by chemicals
Fibre cake	Varying	Prepared from fibrous waste by dewatering
Charcoal	Varying	Charcoal is prepared by destructive distillation and pyrolysis of biomass
Thermally treated biomass	Varying	Mild pre-treatment of biomass at a temperature between 200-300 °C for a short time period (e.g. 60 minutes)

En la Tabla 3.3 proporciona una descripción general de las propiedades específica de cada uno de los principales combustibles producidos a partir de madera y se indica si las propiedades son normativas o informativas.

Tabla 3.3: Resumen de las propiedades de cuatro combustibles de madera (ISO 17225).

Property	Property abbreviation	Wood briquettes	Wood pellets	Wood chips/hogfuel	Firewood
Origin		norm	norm	norm	norm
Traded form		norm	norm	norm	norm
Wood species		NA	NA	NA	norm
Dimensions	D or P	norm (D, L and W), shape	norm (D and L)	norm (P)	norm (D, L)
Moisture content	M	norm	norm	norm	norm
Ash content	A	norm	norm	norm	NA
Mechanical durability	DU	NA	norm	NA	NA
Amount of fines	F	NA	norm	norm	NA
Bulk density	BD	norm	norm	norm	NA
Additives		norm	norm	NA	NA
Net calorific value	Q	norm	norm	inform	inform
Nitrogen content	N	norm	norm	norm/inform	NA
Sulphur content	S	norm	norm	norm/inform	NA
Chlorine content	Cl	norm	norm	norm/inform	NA
Arsenic	As	norm	norm	norm/inform	NA
Cadmium	Cd	norm	norm	norm/inform	NA
Chromium	Cr	norm	norm	norm/inform	NA
Copper	Cu	norm	norm	norm/inform	NA
Lead	Pb	norm	norm	norm/inform	NA
Mercury	Hg	norm	norm	norm/inform	NA
Nickel	Ni	norm	norm	norm/inform	NA
Zinc	Zn	norm	norm	norm/inform	NA
Ash melting behaviour	DT	NA	inform	inform	NA
Surface area of briquettes		inform	NA	NA	NA

Si una propiedad está especificada según la normativa, significa que la información debe estar disponible y visible. Por ejemplo, para el contenido de humedad, el rango comienza con M10, lo que significa que el producto debe contener menos del 10% de humedad. El rango abarca desde M10 a M55 +. Este último valor M55 + significa que el contenido de humedad es mayor que 55% y en tales casos debe indicarse el valor máximo.

En este apartado de la norma en la Tabla 3.4 se definen los requisitos de calidad específicos. Por ejemplos los de la calidad de los chips o astillas de madera para una caldera.

Tabla 3.4: Ejemplo de requisitos de calidad para astillas de madera clase A1 para una caldera pequeña.

Property	Class	Explanation
Origin	1.1.1.1	Woody biomass, from forest or plantation wood, from whole trees without roots, from Broadleaf trees
Traded form	Wood chips	Cut with sharp instruments
Dimensions	P16S	Chip particles of which 60% will fall through a screen of 16 mm round holes, with maximum 15% fines (less than 3.15 mm in size) and $\leq 6\%$ $> 31,5$ mm and all < 45 mm The cross sectional area of the oversized particles < 2 cm ²
Moisture content	M10-M25	Fuel with a moisture content of between 10 and 25% of total weight
Ash content	A1.0	Fuel with an ash content of less than 1% on dry basis
Bulk density	BD150-BD250	Bulk density of the loose chips to be larger than 150 kg/m ³ loose volume and less than 250 kg/m ³ at the moisture content as received
Net calorific value	Q	Can be calculated from the moisture content
Chemical content		Does not have to be specified since the fuel comes from a virgin source

Las siguientes partes de la norma EN ISO 17225 desde 2 hasta la 8 se han desarrollado para el mercado denominado no industrial, por lo que está dirigida a los consumidores de hasta 500 kW térmicos. Las clases en las que se separan calidad de los biocombustibles han sido formuladas para calderas típicas dentro de ese rango de 500 kW. Estas clases de calidad están desarrolladas para facilitar que los fabricantes e instaladores de calderas, consumidores y proveedores tengan el combustible de calidad adecuado para tales usos.

De este modo se evita incurrir en descripciones complicadas que usan diferentes palabras y significados las cuales distorsionan el mercado. En algunos apartados de la norma se han incluido requisitos de calidad para uso industrial del combustible, como para pellets y briquetas de madera.

En todas las partes de las normas relacionadas con calderas no industriales, se han formulado varias clases de calidad, generalmente con dos combustibles de clase A las cuales son A1 y A2 y uno o dos combustibles de clase B. Los requisitos de calidad para la clase A son siempre más altos que los de la clase B.

Parte 2: pellets de madera clasificados

En este apartado describiremos las características del desarrollo y requerimientos de la norma para los pellets de madera, ya que de este punto de la norma se desprende el apartado de la norma de briquetas.

La norma para los pellets de madera se a desarrollado bajo requisitos de calidad preciso como los siguientes:

- Para estufas y calderas pequeñas pellets clase A,
- Para calderas más grandes de hasta 500 kW, pellets clase B con requisitos de calidad menores que los de la categoría
- Los requisitos de calidad para pellets de madera para uso industrial, que tienen la denominación I1 a I3

Las propiedades relevantes para los pellets de madera son: el origen del material base, las dimensiones, el contenido de cenizas, la durabilidad, la cantidad de finos y el contenido de cloro.

Los pellets de clase A1 proviene de aserrín o de madera en rollo sin corteza. Estos materiales tienen un bajo contenido químico. Los Pellets de la clase A2 se pueden producir a partir de materiales que contienen corteza, mientras que los pellets de la clase B pueden contener subproductos de fábricas de cartón y papel, así como madera limpia y usada.

Dado que la mayoría de las estufas o calderas pequeñas no tienen eliminación automática de cenizas, es importante que el contenido de cenizas de los pellets es mínima por lo que se busca que este sea lo más bajo posible, por lo que se utilizan pellets de clase A para estufas pequeñas, mientras que para la clase B, está destinada para calderas más grandes con eliminación automática de cenizas, se puede tolerar un mayor contenido de cenizas, de igual forma estas propiedades se extrapolan a la propiedades físicas de los pellets y briquetas que mientras mayor sea la potencia del equipo en el que se utilizan menores son los requisitos.

Los pellets al igual que las briquetas sufren mucho en el transporte desde su producción hasta el punto de consumo. Este desgaste produce finos, que tienen características de combustión diferente a los pellets enteros reduciendo la eficiencia y el grado de aprovechamiento de los biocombustibles.

Si el contenido de finos es demasiado grande, la caldera o equipo de consumo de biocombustibles, quemará más caliente de lo habitual y la ceniza puede formar clinker. Por lo tanto, la durabilidad de los pellets debe ser superior al 97,5% Esto implica que los pellets pueden soportar el traslado y manejo sin degradarse. El contenido de cloro de los pellets de madera es una característica importante, porque el riesgo de corrosión aumenta con la cantidad de cloro.

Por lo que En estos ejemplos descriptos anteriormente se muestra como cada una de las propiedades que la norma fija un valor tiene una incidencia en el uso de los biocombustibles. Por lo que en la siguiente tabla se describirá las diferentes clases y tipo de pellets de uso doméstico e industrial.

Tabla 3.5: Quality requirements for wood pellets for small scale use (ISO 17225).

	Property class, Analysis method	Unit	A1	A2	B
Normative	Origin and source, ISO 17225-1		1.1.3 Stemwood 1.2.1 Chemically untreated wood residues ^a	1.1.1 Whole trees without roots 1.1.3 Stemwood 1.1.4 Logging residues 1.2.1 Chemically untreated wood residues ^a	1.1 Forest, plantation and other virgin wood 1.2 By-products and residues from wood processing industry 1.3.1 Chemically untreated used wood
	Diameter, D ^b and Length L ^c ISO 17829 According Figure 1	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40
	Moisture, M, ISO 18134-1, ISO 18134-2	w-% as received, wet basis	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
	Ash, A ^d , ISO 18122	w-% dry	A0.7 ≤ 0,7	A1.2 ≤ 1,2	A2.0 ≤ 2,0
	Mechanical durability, DU, ISO 17831-1	w-% as received	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
	Fines, F ^e , ISO 18846	w-% as received	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
	Additives ^f	w-% as received	≤ 2 Type and amount to be stated	≤ 2 Type and amount to be stated	≤ 2 Type and amount to be stated
	Net calorific value, Q, ISO 18125	MJ/kg or kWh/kg as received	Q16.5 ≥ 16,5 or Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 or Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 or Q4.6 ≥ 4,6
	Bulk density, BD ^g , ISO 17828	kg/m ³ as received	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Nitrogen, N, ISO 16948	w-% dry	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
	Sulphur, S, ISO 16994	w-% dry	S0.04 ≤ 0,04	S0.05 ≤ 0,05	S0.05 ≤ 0,05
	Chlorine, Cl, ISO 16994	w-% dry	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03
	Arsenic, As, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Cadmium, Cd, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Chromium, Cr, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Copper, Cu, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Lead, Pb, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Mercury, Hg, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	
Nickel, Ni, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10	
Zinc, Zn, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 100	≤ 100	≤ 100	
Informative: Ash melting behaviour ^h , CEN/TS 15370-1 ^[4]	°C	Should be stated	Should be stated	Should be stated	

Tabla 3.6: Quality requirements for wood pellets for industrial (ISO 17225)

	Property class, Analysis method	Unit	I1	I2	I3
Normative	Origin and source, ISO 17225-1		1.1 Forest, plantation and other virgin wood 1.2.1 Chemically untreated wood residues ^a	1.1 Forest, plantation and other virgin wood 1.2.1 Chemically untreated wood residues ^a	1.1 Forest, plantation and other virgin wood 1.2 By-products and residues from wood processing industry 1.3.1 Chemically untreated used wood
	Diameter, D ^d and Length L ^c , ISO 17829 According Figure 1	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D10, 10 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D10, 10 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D12, 12 ± 1; 3,15 < L ≤ 40
	Moisture, M, ISO 18134-1, ISO 18134-2	w-% as received, wet basis	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
	Ash, A, ISO 18122	w-% dry	A1.0 ≤ 1,0	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
	Mechanical durability, DU, ISO 17831-1	w-% as received	97,5 ≤ DU ≤ 99,0	97,0 ≤ DU ≤ 99,0	96,5 ≤ DU ≤ 99,0
	Fines, F ^d , ISO 18846	w-% as received	F4.0 ≤ 4,0	F5.0 ≤ 5,0	F6.0 ≤ 6,0
	Additives ^e	w-% as received	< 3 Type and amount to be stated	< 3 Type and amount to be stated	< 3 Type and amount to be stated
	Net calorific value, Q, ISO 18125	MJ/kg as received	Q16.5 ≥ 16,5	Q16.5 ≥ 16,5	Q16.5 ≥ 16,5
	Bulk density, BD ^f , ISO 17828	kg/m ³	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Nitrogen, N, ISO 16948	w-% dry	N0.3 ≤ 0,3	N0.3 ≤ 0,3	N0.6 ≤ 0,6
	Particle size distribution of disintegrated pellets, ISO 17830	w-% dry	≥ 99% (< 3,15 mm) ≥ 95% (< 2,0 mm) ≥ 60% (< 1,0 mm)	≥ 98% (< 3,15 mm) ≥ 90% (< 2,0 mm) ≥ 50% (< 1,0 mm)	≥ 97% (< 3,15 mm) ≥ 85% (< 2,0 mm) ≥ 40% (< 1,0 mm)
	Sulphur, S, ISO 16994	w-% dry	S0.05 ≤ 0,05	S0.05 ≤ 0,05	S0.05 ≤ 0,05
	Chlorine, Cl, ISO 16994	w-% dry	Cl0.03 ≤ 0,03	Cl0.05 ≤ 0,05	Cl0.1 ≤ 0,1
	Arsenic, As, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 2	≤ 2	≤ 2
	Cadmium, Cd, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
	Chromium, Cr, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 15	≤ 15	≤ 15
	Copper, Cu, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 20	≤ 20	≤ 20
	Lead, Pb, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 20	≤ 20	≤ 20
	Mercury, Hg, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
	Zinc, Zn, ISO 16968	mg/kg dry	≤ 200	≤ 200	≤ 200
Informative Ash melting behaviour ^g , CENTS 15370-1 ^[4]	°C	Should be stated	Should be stated	Should be stated	

Parte 3 briquetas de madera:

En el apartado anterior de la norma se identifica a los pellets de madera con las clases de calidad A y B en función de sus características esto se repite de igual manera para el caso de las briquetas de madera.

Los requisitos de calidad para las briquetas son idénticos que para los pellets pero para las briquetas el requisito de durabilidad mecánica no se calcula y su valor se estima en función de los valores de la densidad másica, esto se debe a que las briquetas no están expuestas a un alto desgaste en el transporte y al manejo a diferencia de los pellets, por lo que en esta tesis buscaremos correlacionar la densidad con la resistencia a compresión transversal como medida de resistencia al acopio y transporte de las briquetas.

En la siguiente tabla se muestra las tres clases de briquetas que establece la norma ISO y las características específicas de cada una de ellas (Standardization, 2014).

Tabla 3.7: Requerimientos de calidad de briquetas de madera (ISO 17225).

	Property class, Analysis method	Units	A		B ^a
			1	2	
Normative	Origin and source, ISO 17225-1		1.1.3 Stemwood 1.2.1 Chemically untreated wood residues ^b	1.1.1 Whole trees without roots 1.1.3 Stemwood 1.1.4 Logging residues 1.2.1 Chemically untreated wood residues ^b	1.1 Forest, plantation and other virgin wood 1.2 By-products and residues from wood processing industry 1.3.1 Chemically untreated used wood
	Diameter (<i>D</i>) or length (<i>L₁</i>), width (<i>L₂</i>) and height (<i>L₃</i>) According Figure 1	mm Shape	Diameter, width, height and length to be stated Specify according to Figure 1 e.g. 1 or 2, etc.	Diameter, width, height and length to be stated Specify according to Figure 1 e.g. 1 or 2, etc.	Diameter, width, height and length to be stated Specify according to Figure 1 e.g. 1 or 2, etc.
	Moisture, <i>M</i> , ISO 18134-1, ISO 18134-2	w-% as received	M12 ≤ 12	M15 ≤ 15	M15 ≤ 15
	Ash, <i>A</i> , ISO 18122	w-% dry	A1.0 ≤ 1,0	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
	Particle density, <i>DE</i> , ISO 18847	g/cm ³ as received	DE1.0 ≥ 1,0	DE0.9 ≥ 0,9	DE0.9 ≥ 0,9
	Additives ^c	w-% dry	≤ 2 Type and amount to be stated	≤ 2 Type and amount to be stated	≤ 2 Type and amount to be stated
	Net calorific value, <i>Q</i> , ^d ISO 18125	MJ/kg or kWh/kg as received	Q15.5 ≥ 15,5 or Q4.3 ≥ 4,3	Q15.3 ≥ 15,3 or Q4.25 ≥ 4,25	Q14.9 ≥ 14,9 or Q4.15 ≥ 4,15
	Nitrogen, <i>N</i> , ISO 16948	w-% dry	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
	Sulphur, <i>S</i> , ISO 16994	w-% dry	S0.04 ≤ 0,04	S0.04 ≤ 0,04	S0.05 ≤ 0,05
	Chlorine, <i>Cl</i> , ISO 16994	w-% dry	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03
	Arsenic, <i>As</i> , ISO 16968	mg/kg dry	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Cadmium, <i>Cd</i> , ISO 16968	mg/kg dry	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Chromium, <i>Cr</i> , ISO 16968	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Copper, <i>Cu</i> , ISO 16968	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Lead, <i>Pb</i> , ISO 16968	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Mercury, <i>Hg</i> , ISO 16968	mg/kg dry	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
	Nickel, <i>Ni</i> , ISO 16968	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zinc, <i>Zn</i> , ISO 16968	mg/kg dry	≤ 100	≤ 100	≤ 100	
Informative	Surface area of briquettes, including the hole surface if any	cm ² /kg	Should be stated	Should be stated	Should be stated

3.9. Incidencia de las características de calidad en el uso de los biocombustibles

En la norma de referencia ISO 17225 se exigen distintas características a los biocombustibles, los cuales sirven para dividir a los biocombustibles en diferentes casos A1, A2 o B como se observa en la Tabla 3.7. Estas características o parámetros pueden ser físicos, químicos o mecánicos. Ya que cada uno de estos indica propiedades específicas buscadas en los biocombustibles para garantizar un correcto funcionamiento y eficiencia en los equipos de

combustión. A continuación, se enumera a los parámetros y cuál es su importancia en biocombustibles (Barro, 2008):

Tabla 3.8: Incidencia de las propiedades en los biocombustibles briquetas (Barro, 2008)

PROPIEDAD QUÍMICA	IMPORTANCIA
C	Influye en el poder calorífico
N	Emisiones de NOx
Cl	Corrosión, disminuye la temperatura de fusión de las cenizas, emisiones de partículas, emisiones de PCDDs y PCDFs
S	Emisiones de SOx, corrosión por formación de sulfatos con los cloruros alcalinos y alcalino-térreos liberando cloro
Elementos mayoritarios: Al, Si, K, Na, Ca, Mg, Fe, P y Ti	Corrosión, ensuciamiento de las calderas, variación de la temperatura de fusión de las cenizas, retención de contaminantes en cenizas y formación de aerosoles y partículas finas
Elementos minoritarios: As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Se, Te, V y Zn	Problemas en la reutilización de las cenizas con fines de fertilización, formación de aerosoles y partículas, corrosión por formación de cloruros y formación de depósitos
PROPIEDADES FÍSICAS	IMPORTANCIA
Humedad	Almacenamiento, poder calorífico inferior, pérdidas, auto-ignición, temperatura y eficiencia de la combustión
Cenizas	Costes en la eliminación de cenizas (ensuciamiento de calderas, etc.), riesgo formación depósitos, emisiones de partículas
Poder calorífico	Utilización del combustible, diseño de la planta
Volátiles	Influye en la descomposición térmica y en el comportamiento en la combustión (reacciones de combustión heterogéneas)

Distribución del tamaño de partícula	Problemas de heterogeneidad, propiedades de secado, selección sistema transporte, formación de bóvedas, formación polvo, porosidad, afecta al comportamiento en la combustión
Densidad de partícula	Densidad energética, problemas de logística; de espacio y gastos en almacenamiento y transporte
Formación de bóvedas	Atascos en los sistemas de alimentación de las calderas
Diámetro y longitud	Pérdidas durante el transporte, formación de polvo, bloqueo de los sistemas de alimentación
PROPIEDADES MECANICAS	IMPORTANCIA
Durabilidad mecánica	Cambios en la calidad, problemas durante transporte, pérdidas de combustible, formación de polvo, problemas en el almacenamiento, fallos en el sistema de alimentación, emisiones de polvo durante la combustión
Resistencia a la compresión	Determina la capacidad que tiene el biocombustible de ser estibado para su transporte y la resistencia que tiene en su transporte

3.10. Ensayos de calidad en los biocombustibles

En los siguientes puntos se describirás los ensayos más relevantes que se realizan a los biocombustibles para establecer su calidad y enmarcarlos en una clase según norma. Siendo estos parámetros los de mayor importancia a la hora de ponderar la calidad de un biocombustible.

Humedad: El contenido de humedad en la biomasa que se utiliza para la producción de biocombustibles varía desde el 5% hasta el 100%, por lo que en muchos casos es necesario secar a la biomasa para el proceso de producción de los biocombustibles. El agua requiere unas 2.300 kcal/kg para vaporizarse y 1.500 kcal/Kg para alcanzar 700°C durante la pirolisis o gasificación. Por lo que un excedente en el contenido de humedad impide que se alcancen temperaturas adecuadas en el hogar, así como problemas en la regulación y control del proceso. También se producen más inquinados y escorias durante el proceso de combustión. Por lo que se generan humos con elevado contenido de CO.

Por lo que el contenido de agua es clave en el proceso de briqueteado y se considera el factor más importante sobre la calidad de las briquetas. El contenido de humedad también puede actuar tanto como un agente aglomerante en la fabricación de las briquetas, incidiendo en la

durabilidad mecánica y el contenido de finos, además de actúa como un lubricante el cual disminuye la fricción en la matriz de briqueteado.

El contenido de humedad se determina según las normas ISO/FDIS 18134-1 a 3, mediante secado en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante:

$$W[\%] = \left(\frac{Ph - Ps}{Ph} \right) 100 \quad \text{Ec. 3.1}$$

Dónde: $W(\%)$: humedad en porcentaje sobre base húmeda; Ph : peso de la muestra húmeda; Ps : peso de la muestra seca.



Figura 3.7: Determinación de humedad para astillas (izquierda) y biomasa molida (derecha) (Ortiz, 2006; Vega y Ortiz, 2013).

En la Tabla 3.9 se resumen los requisitos de humedad según la norma ISO 17225 para briquetas de madera y astillas. Se observa que, para alcanzar el certificado las briquetas requieren un contenido de humedad de hasta el 10%. Los requisitos son menos estrictos para las astillas, distinguiéndose las categorías M10, M25 (astilla A1) y M35 (astilla A2), Astillas con humedad superiores a 35% corresponden a una categoría B. (Maginot, Râhim, ARTEMIO, & Lidia, 2015)

Tabla 3.9: Valores de humedad en la recepción para las categorías A1, A2 y B de astillas y briquetas según las normas ISO 17225-3 e ISO 17225-4 M: humedad (% base húmeda).

Contenido de Humedad					
biocombustibles			Categoría		
			A1	A2	B
ISO 18134-1a3	% base Húmeda	Briquetas ISO 17225-3	M10 <10%	M10 <10%	M10 <10%
		Astillas ISO 17225-4	m25 <25%	m35 <35%	> 35 %

Poder calorífico: EL poder calorífico es la cantidad de energía que desprende un kilogramo de biocombustible al quemarse. Este potencial energético define a un biocombustible, el mismo depende básicamente de la composición química del combustible. Se denomina potencia calorífica o poder calorífico superior de un combustible al calor desprendido en su combustión completa, a presión constante y temperatura de 25°C, cuando toda el agua inicialmente presente en estado líquido en el combustible y el contenido de agua que aparece en los productos de combustión está condensada al estado líquido.

Este poder calorífico tendrá diversos valores según la humedad del material. Se expresará en unidades energéticas por unidad de masa, generalmente en kilojulios / kilogramo o kilocalorías / kilogramo de biomasa con una determinada humedad.

Para determinar experimentalmente el poder calorífico superior de un combustible sólido, siguiendo la ISO/CD 18125 se emplea generalmente la bomba de Malhe.

$$q_{v,gr,d} = q_{v,gr} \frac{100}{(100 - W_{ad})} \quad \text{Ec. 3.2}$$

La Ec. 3.2. permite el cálculo del poder calorífico a volumen contante del combustible (sin humedad) seca el cual se indica con $q_{v,gr,d}$ en julios por gramo; W_{ad} es la humedad en la muestra de análisis, en porcentaje en masa; y $q_{v,gr}$ es el poder calorífico superior a volumen constante del combustible como se analiza, en julios por gramo.



Figura 3.8: Determinación del poder calorífico en un calorímetro (Vega y Ortiz, 2013). Derecha: Detalle de la bomba calorimétrica (Ortiz, 2006).

El poder calorífico inferior de un combustible es el calor generado por la combustión total, en las condiciones de presión constante y 25°C de temperatura, descontando el calor de

vaporización del agua contenida en la muestra, formada por oxidación del hidrogeno inherente a la materia anhidra. Su valor será función del poder calorífico superior y de la humedad de del biocombustible. La diferencia con el poder calorífico superior será el calor necesario para vaporizar el agua inicialmente presente y la formada en la combustión. De acuerdo con la ISO/CD 18125 poder calorífico inferior en base seca se calcula como (Ec. 3.3.):

$$q_{p,net,d} = q_{v,gr,d} - 212,2 w(H)d - 0,8 [w(O)d + w(N)d] \quad \text{Ec. 3.3}$$

En la Ec. 3.3. se describe el cálculo de $q_{p,net,d}$ que es el valor calorífico inferior en base seca a presión constante, en julios por gramo, del biocombustible; $q_{v,gr,d}$ es el poder calorífico superior en base seca, en julios por gramo, del biocombustible; $w(H)d$ es el contenido de hidrógeno, en porcentaje en masa, del biocombustible sin humedad (seco); $w(O)d$ es el contenido de oxígeno, en porcentaje en masa del biocombustible sin humedad; $w(N)d$ es el contenido de nitrógeno, en porcentaje en masa, del biocombustible sin humedad.

El poder calorífico neto es función inversa de la humedad por lo que a medida que aumenta la humedad el poder calorífico neto disminuye. En la Figura 3.9 se observa la correlación entre el poder calorífico y la humedad para cuatro especies de biomásas españolas.

Este tipo de gráficas permite realizar un seguimiento del poder calorífico en función del nivel de humedad observado en la recepción y a lo largo de los meses de almacenaje de la astilla, permitiendo la toma de decisiones sobre la conveniencia de un secado forzado o la prolongación de un periodo de secado natural en función del poder calorífico neto deseado.

El monitoreo de la humedad y el poder calorífico neto asociado por lo tanto se establece como un parámetro clave para basar un sistema de calidad en pago por KJ neto de cada partida de madera o astilla recibida en planta según una medición in situ del contenido de humedad, y para una correcta planificación de los costes de transporte basado en la cantidad de KJ transportados por camión, considerando los valores de densidad energética que se desprenden de los valores de densidad aparente de la astilla o madera a transportar.

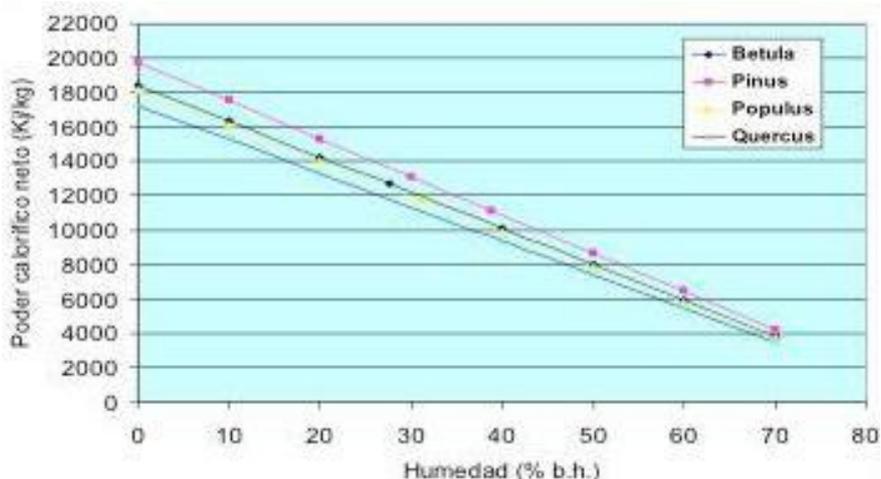


Figura 3.9: Poder calorífico neto en función de la humedad para astillas de una empresa de logística de biomasa para cuatro especies del noroeste español (Somoza, 2014).

En la siguiente tabla se muestra un resumen los valores de poder calorífico a humedad 0% es decir anhidro y poder calorífico neto y categoría de calidad a las humedades de referencia para astillas y pellets A1 ($W=25\%$ y $W=10\%$) para las principales especies forestales del noroeste.

Por lo que se puede observar en la tabla las especies de valores más altos de PCS, superiores a los 20.000 KJ/kg, fueron las tres especies de Pinus, *B. celyberica* y *A. melanoxylon* con el resto de las frondosas mostrando valores inferiores de reducidos de PCS. Estas cinco especies, junto con *S. atrocinnerea* y *P. avium*, serían catalogadas como astilla A1 a un nivel de 25%, máximo nivel de humedad admisible para esta categoría según la norma ISO 17225-4, mientras que el resto de las especies se clasificarían como astillas A2 en base a un poder calorífico neto inferior a 13.000 KJ/kg a esta humedad.

Con respecto al potencial para producción de pellets, tan sólo las cinco especies de mayor poder calorífico podrían ser utilizadas al 100% para la fabricación de pellet A1 a un nivel de humedad $<10\%$ en base a su poder calorífico neto a esta humedad, *Salix* y *Prunus* contarían con un valor de Q correspondiente a un pellet clase B, y el resto de las frondosas necesitarían ser mezcladas con especies de poder calorífico más elevado para la elaboración de pellets.

A nivel global los estudios realizados han corroborado un mayor poder calorífico en especies de coníferas que las frondosas, siendo atribuido a sus mayores contenidos de carbono, mayores contenidos de lignina y mayores contenidos de extractivos en las resinas (Maginot, Rāhim, ARTEMIO, & Lidia, 2015)

Tabla 3.10: Poder calorífico superior anhidro (PCS H=0%) (KJ/kg), poder calorífico neto (Q) a humedades de 25 y 10% (KJ/kg) y categorías en base a Q según las normas ISO 17225-2 e ISO 17225-4 (certificado ENPlus) para los valores de humedad de 25 y 10% para astillas y pellets, respectivamente.

Especie	Poder calorífico superior anhidro (KJ/Kg)	Astilla		Pellet	
		Q (H=25%) (KJ/Kg)	Categoría astilla (H=25%) (ISO 17225-4)	Q (H=10%) (KJ/Kg)	Categoría pélet (H=10%) (ISO 17225-2)
Pinus pinaster	20955 (±902) a	14111	A1 (Q13.0)	17423	A1(Q16.5)
Pinus radiata	20674 (±730) ab	13900	A1 (Q13.0)	17170	A1(Q16.5)
Pinus sylvestris	20645 (±434) ab	13879	A1 (Q13.0)	17144	A1(Q16.5)
Betula celtiberica	20325 (±698) ab	13639	A1 (Q13.0)	16856	A1(Q16.5)
Acacia melanoxylon	20189 (±475) b	13537	A1 (Q13.0)	16734	A1(Q16.5)
Salix atrovirens	19649 (±717) bc	13132	A1 (Q13.0)	16248	B (Q16.0)
Prunus avium	19602 (±472) bc	13096	A1 (Q13.0)	16205	B (Q16.0)
Populus euramericana	19352 (±257) bc	12909	A2 (Q11.0)	15980	No ENPlus<16.0
Eucalyptus globulus	19335 (±867) c	12896	A2 (Q11.0)	15965	No ENPlus<16.0
Fagus sylvatica	19179 (±402) cd	12779	A2 (Q11.0)	15825	No ENPlus<16.0
Fraxinus excelsior	19143 (±387) cd	12752	A2 (Q11.0)	15792	No ENPlus<16.0
Quercus robur	18776 (±640) cd	12477	A2 (Q11.0)	15462	No ENPlus<16.0
Castanea sativa	18298 (±983) d	12118	A2 (Q11.0)	15032	No ENPlus<16.0
Acer pseudoplatanus	18123 (±319) d	11987	A2 (Q11.0)	14874	No ENPlus<16.0

Densidad aparente: La densidad de la biomasa seca, de origen proveniente de frondosas y coníferas tiene una media entre 570 y 450 kg/m³ respectivamente. Si esta materia se astilla y acopia considerando unos coeficientes de astillados y apilados de 0.16 y 0.33, se obtienen los siguientes valores de densidad aparente para las distintas fracciones de biomasa.

Tabla 3.11: Densidades aparentes de astillas de distintas fracciones para los grupos de especies forestales.

Densidad Aparente kg / m ³				
Especie	Madera del tronco	Madera de las ramas	Corteza del tronco	Corteza de las ramas
Coníferas	148-175	141-166	167-197	186-219
Frondosas Pesadas	206-238	214-249	203-234	244-282
Frondosas Ligeras	169-195	180-210	188-217	225-260

Los valores menores corresponden a densidades aparentes de astillas grandes, mientras que los valores mayores corresponden a las astillas de pequeñas.

Los valores bajos de densidad aparente en las biomazas residual y astillas (Chip) encarecen el transporte del biocombustible en especial en largas distancias (Figura 3.10). Además, estos valores bajos causan una demanda superior de espacio de almacenaje por lo cual se busca que las briquetas sean los más compactas posibles, con el fin de reducir los costos logísticos y de almacenamiento.



Figura 3.10: La baja densidad aparente de biomasa residual y astillas resulta en altos costes de transporte. Derecha: compactación de biomasa en pacas mediante empacadora forestal (Sanz Piñeiro et al., 2011).

La densificación de la biomasa mediante el briqueteado puede incrementar la densidad aparente desde 100-250 kg/ m³ hasta valores de 900 a 1000 kg/ m³ lo que reduce en consecuencia costes de transporte y de almacenaje. Adicionalmente, es importante considerar la densidad aparente ya que es un parámetro fundamental en los cálculos de alimentación de los equipos que se alimentan con biocombustibles. Por lo que las variaciones en la densidad aparente causan variaciones en la eficiencia de la combustión (Maginot, Rähim, ARTEMIO, & Lidia, 2015).

En la siguiente tabla se muestran los estándares de volumen de la norma europea para astillas y briquetas. Por lo que se aprecia como el proceso de densificado aumenta la densidad energética de los biocombustibles, lo que incrementa su rango de uso económico respecto a su punto de generación.

Tabla 3.12: Categorías según ISO 17225-3 e ISO 17225-4 para briquetas y astillas en base a su densidad aparente.

Clase de propiedad Método de análisis	Unidades	biocombustible	Categoría ISO 17225		
			A1	A2	B
Densidad, DE, ISO 18847	kg /m ³	Briquetas ISO 17225-3	DE 1000 ≥ 1000	DE 900 ≥ 900	DE 900 ≥ 900
EN 1510		Astilla ISO 17225-4	BD 150 ≥ 150	BD 150 ≥ 150	A especificar

Granulometría y contenido de finos de los biocombustibles: La distribución granulométrica se determina siguiendo la norma ISO/DIS 17827-1-2 / UNE-EN 15149-1 empleando para ello una torre vibradora como la que se observa en la siguiente imagen. La norma de referencia indica el tamaño específico de los tamices normalizados de 120, 100, 65, 45, 31.5, 16, 8 y 3.15 mm en estos se recoge la fracción de una muestra representativa de biomasa determinándose el porcentaje retenido de cada fracción en los distintos tamaños.

Una vez definida las fracciones de la distribución según la norma EN 15149-1. Esta establece las distintas categorías de calidad como se muestra en la Tabla 3.13. La norma también establece límites tanto para cantidad y tamaño de las partículas sobredimensionados como se muestra en la Figura 3.11 en la parte derecha, estas partículas pueden bloquear la alimentación de la caldera o equipo de combustión, esto también se aplica al contenido de partículas pequeñas, las cuales se denomina finos, las mismas tiene tamaño inferior a 3.15 mm, estas partículas resultan en un mayor contenido de cenizas y riesgo de formación de sinterizados los cuales disminuyen la calidad de los biocombustibles (Maginot, Rähim, ARTEMIO, & Lidia, 2015).



Figura 3.11: Detalle de un torre vibratoria CISA con mallas normalizadas para determinación de la distribución granulométrica (izquierda) (Ortiz, 2006).

Tabla 3.13: Categorías de distribución granulométrica (P) para astillas, a especificar, según norma ISO 17225-2 de calidad de astillas.

Fracción principal (mínimo 60% w-%) mm (ISO/DIS 17827-1 y -2)	Fracción gruesa w-% (Sección / longitud máxima de sobredimensionados)
P16 small 3.15 ≤ P ≤ 16mm	< 3% < 31.5 mm y todos los sobredimensionados < 1cm ²
P31 medium 3.15 ≤ P ≤ 31.5mm	≤ 6% > 45 mm, < 3% sobredimensionados
P45 large 8 ≤ P ≤ 45mm	< 12% > 63 mm y todos < 300 mm
P63 extra large 8 ≤ P ≤ 63mm	≤ 8% > 100 mm, y todos < 300 mm
P90 coarse 16 ≤ P ≤ 90mm	≤ 10% > 125 mm, y todos < 300 mm
P300 extra coarse 3.15 ≤ P ≤ 300mm	A especificar

En la siguiente figura se muestra la distribución granulométrica de astilla o chip de madera de tres muestras diferentes.

- En el centro se observa que sólo una de las tres muestras de astilla (C-P) tiene un control granulométrico que logra un tamaño de astilla P32, mientras que las otras dos muestras cuentan con un exceso de sobredimensionados (C-B) y de finos (C-X), resultando en astilla más heterogénea, de categoría P45.
- Los elevados contenidos de finos, es decir mayores al 6%, generalmente por contaminación por tierra, conlleva que la astilla sea propensa a la sinterización de cenizas en la combustión.



Figura 3.12: Control de calidad de la granulometría y contenido de finos de astillas de tres muestras (C-P,B y X) en una empresa consumidora de astilla para combustión en el Noroeste español (Somoza et al., 2014).

Por lo que uno de los beneficios secundarios que aporta el densificado es de la biomasa en pellets o briquetas es la homogeneidad del biocombustible producido. El cual está diseñado para funcionar de eficiente en las calderas o quemadores.

Tamaños:

Las biomasas provenientes de la madera intercambian humedad con un ambiente húmedo absorbiendo y emitiendo humedad en un ambiente seco, hasta alcanzar un estado de equilibrio disminuyendo o aumentando la energía neta contenida por kilogramo de biomasa. Por lo que un factor que puede limitar la higroscopicidad de los biocombustibles es la dureza superficial, la cual es elevada en las briquetas y pellets a causa de su proceso de densificado a elevadas presiones y temperaturas de producción.

Sin embargo, los extremos de los pellets y de las briquetas están expuestos. Por lo que en un ambiente húmedo la absorción de humedad se da por los extremos, de modo que un parámetro importante es la ratio longitud/diámetro. En las briquetas se distinguen dos casos generales de producción en general. El primero lugar están las briquetas producidas en máquinas con émbolo, es decir, de avance positivo, por lo que las briquetas producidas quedan con todas las superficies selladas al paso de la humedad. Y en un segundo caso se encuentran las briquetas producidas por medio de un tornillo sin fin el cual mediante la reducción de la sección en la cual gira el sinfín se logra el densificado, en este segundo caso los extremos de las briquetas son un punto de intercambio de humedad, ya que esto es el resultado de una fractura, la cual deja a los extremos de forma irregular.

En este contexto la relación longitud/diámetro es trascendente en los casos de utilizar sistemas de alimentación neumática, debido al hecho de que los biocombustibles sobredimensionados (con un largo excedente) pueden bloquear la alimentación de estos sistemas.

Por lo que las normas solicitan que se definan las dimensiones características de las briquetas, ya que los sistemas de transporte y combustión de las calderas se diseñan en función a estas dimensiones. Estas dimensiones están definidas por norma en relación a la morfología las briquetas como lo indica la Figura 3.13.

	Clase de propiedad/ Método de análisis	Unidades	A		B ^a
			1	2	
Normativo	Origen y fuente, EN 17225-1		1.1.3 Fuste 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente ^b	1.1.1 Árboles enteros sin raíces 1.1.3 Fuste 1.1.4 Restos de corta 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente ^b	1.1 Bosque, plantaciones y otra madera virgen 1.2 Subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera 1.3.1 Madera usada no tratada químicamente
	Diámetro (D) o longitud (L ₁), anchura (L ₂) y altura (L ₃)	mm	A declarar el diámetro la anchura y la longitud	A declarar el diámetro la anchura y la longitud	A declarar el diámetro la anchura y la longitud
	Según la figura 1	Shape	Especificado según la figura 1 por ejemplo 1 o 2, etc.	Especificado según la figura 1 por ejemplo 1 o 2, etc.	Especificado según la figura 1 por ejemplo 1 o 2, etc.

Figura 3.13: “Figura 1 ISO 17225-3” Dimensiones de las briquetas (D: Diámetro, L: Longitud, A: Anchura, L*: Altura o diámetro de briquetas cilíndricas).

Durabilidad Mecánica:

La durabilidad mecánica o resistencia al transporte es un parámetro de calidad que se define como la habilidad de un biocombustible densificado de permanecer intacto al ser transportado y manejado lo cual se define en la ISO 17831. Esta resistencia se determina como la resistencia del combustible densificado al choque o fricción, en función del desgaste mecánico, que trae aparejado la generación de finos o polvo durante el transporte en media y larga distancia y en el manejo y almacenaje de los biocombustibles, este ensayo es un indicador de la producción de polvo, lo que supone no solo un inconveniente energético para el consumidor por una combustión ineficiente, sino un riesgo para la salud por la inspiración de partículas agresivas a los pulmones.

Finos:

El contenido de partículas finas o finos es un parámetro importante ya que este en función del contenido de cenizas y adicionalmente los finos pueden alterar los sistemas de alimentación de

las calderas y resultar en combustiones no homogéneas. Además, estas partículas aumentan el riesgo potencial de auto ignición en el manejo, transporte y almacenaje de los biocombustibles.

Cenizas:

El contenido de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material, la cual se indica en porcentajes, siendo un parámetro fundamental en la combustión en las calderas, ya que un alto porcentaje de cenizas trae como consecuencia:

- Obstrucción de los ventiladores de la parrilla
- Daños en los sistemas automáticos de limpieza de quemadores y los intercambiadores
- Generación de inquemados que hay que eliminar frecuentemente;
- Daños en los automatismos, sondas, etc.
- Incremento de los alquitranes condensados en chimeneas pueden afectar a los electroventiladores de la chimenea.

Esta determinación del contenido de cenizas se realiza en base seca por medio combustión de 1 g de biomasa molida a 1 mm en un crisol de porcelana, el cual se coloca en una mufla a $550 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ durante 5 h (Figura 3.14) siguiendo el procedimiento descrito por la norma ISO/FDIS 18122 /EN 14775.

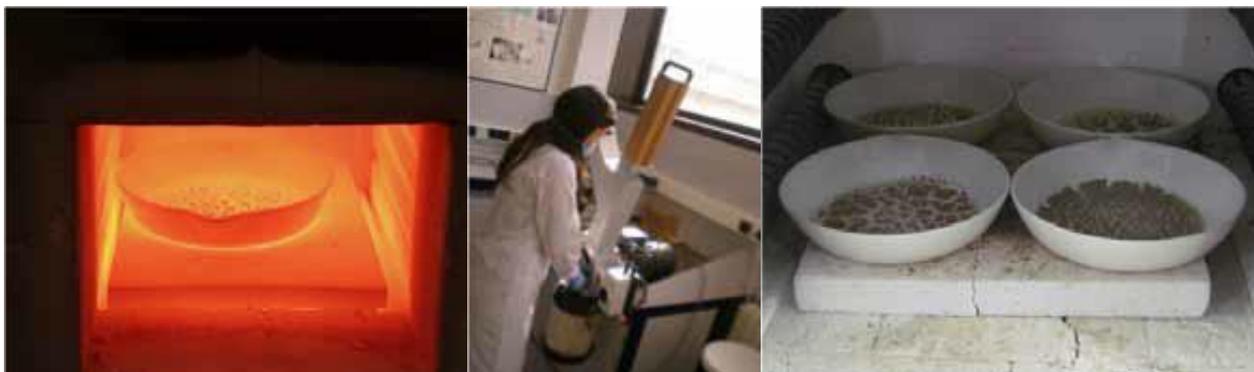


Figura 3.14: Determinación del contenido de cenizas de biomasa molida.

Temperatura de fusión de las cenizas:

La sinterización o aglomeración y fusión de cenizas es uno de los principales indicadores de calidad de las briquetas, pellets y biocombustibles en general. Este parámetro representa un riesgo potencial de deterioro y obstrucción de la caldera y equipos de combustión por la formación de escorias.

La determinación de las temperaturas de fusión de cenizas se realiza según la norma ISO 540:2008 Este test se monitorea en un microscopio electrónico el proceso continuo de fusión de una muestra piramidal de dimensiones especificadas de cenizas obtenidas según las especificaciones de la norma ISO 540:2008. Esto se realiza al introducir la muestra en un horno estandarizado incrementando la temperatura de 550 a $>1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ con una tasa constante definida

de calentamiento, y registrando los siguientes puntos de deformación observados en la muestra de cenizas: (Maginot, Rähim, ARTEMIO, & Lidia, 2015).

- Punto de Temperatura de Deformación (DT): temperatura a la que se producen los primeros signos de redondeo de la punta o bordes de la muestra de ceniza.
- Punto de Temperatura Esférica (ST): temperatura a la que los bordes de la muestra de ceniza se tornan completamente redondos, con su altura siendo igual a la anchura de la base de muestra.
- Punto de Temperatura Hemiesférica (HT): temperatura a la que la muestra es aproximada hemiesférica, con la altura siendo igual a la mitad del diámetro de la base de la muestra.
- Punto de Temperatura de fusión (FT): temperatura a la que el material de la muestra se ha fundido de modo que su altura es un tercio de la altura a la temperatura hemiesférica.

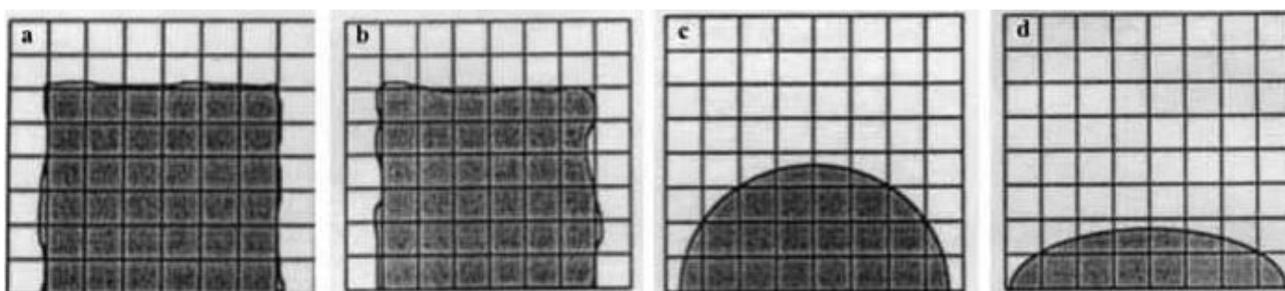


Figura 3.15: Temperaturas de fusión de las cenizas según las normas ISOv540:2008 y DIN 51730:1998-04 a) DT, b) ST, c) HT, d) FT (Maginot, Rähim, ARTEMIO, & Lidia, 2015)

Resistencia a la compresión:

Es la propiedad mecánica de las briquetas que indica la resistencia al transporte, manipuleo y almacenamiento de las briquetas. Esta propiedad no está definida por norma ISO pero si se utiliza en otras normas de referencia en las cuales se solicita que se indique su valor.

El término "resistencia de la briqueta" se refiere a la presión máxima que puede soportar una briqueta cuando se la comprime con un punzón o pistón de forma transversal a su eje.

La misma se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{Bt} = \max p \text{ (MPA)} \quad \text{Ec. 3.4}$$

El ensayo se realiza aplicando la carga de forma uniforme hasta la desintegración completa de la briqueta. Las briquetas se comprimen con un pistón de circulares de 30 mm de diámetro. Se usan siete briquetas seleccionadas al azar para las pruebas, y el valor registrado de las pruebas se determina a partir del promedio aritmético de cinco valores de prueba (se excluyen los valores más altos y bajos). Por lo que la resistencia se define según la siguiente ecuación:

$$\sigma_{Bt} = \frac{1}{5} \sum_{t=1}^5 p_i \text{ (MPA)} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Esta norma fue diseñada para para briquetas a base de carbono; sin embargo, también se puede aplicar a briquetas fabricadas de biomasa.

Existen dos ensayos de resistencia relacionadas con la compresión de briquetas cilíndricas. Ambos son pruebas a compresión simple hasta la rotura. El valor del ensayo de división es proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a la longitud de la briketa.

El ensayo de resistencia a la rotura trasversal o diametral se realiza de acuerdo con la norma STN 441309. Con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{BL} = \frac{F_{max}}{L_N} \text{ (N/mm)} \quad \text{Ec. 3.6}$$

σ_{BL} : Resistencia de la briketa por unidad de la longitud N.mm-1

F_{max} : Fuerza máxima que actúa sobre la briketa N

L_N : Longitud de la briketa mm

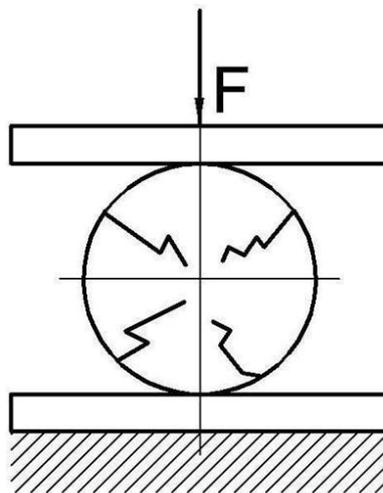


Figura 3.16: Ensayo de resistencia a la compresión transversal

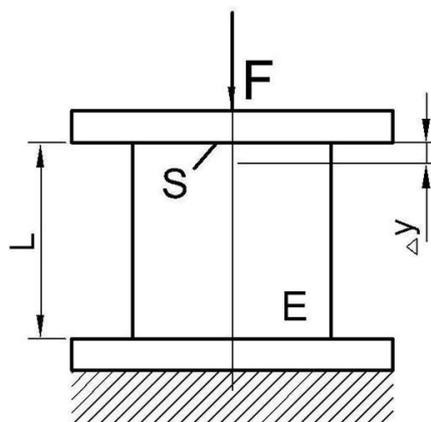


Figura 3.17: Ensayo de resistencia a la compresión axial.

El ensayo de resistencia a la rotura axial o longitudinal se realiza de acuerdo con la norma STN 441309. Con la siguiente ecuación:

$$\sigma_B [MPa] = E \varepsilon \quad \text{Ec. 3.7}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{l_n} \quad \text{Ec. 3.8}$$

dónde:

σ_B : Resistencia Axial de la briqueta MPa

E: módulo de elasticidad MPa

ε : relación de deformación

Δy : presionando la briqueta después de lograr la fuerza de carga máxima mm

l_n : longitud de la briqueta mm

3.11. Incidencia de los indicadores de calidad en las briquetas con respecto a las normas

Los biocombustibles sólidos se consideran de alta calidad si cumplen los requisitos definidos en las Normas de referencia. Cada parámetro / indicador de calidad monitoreado se describe con precisión, con un procedimiento normado para su determinación, y para cada parámetro se define un límite preciso de su valor admisible. Si una briqueta ensayada entra dentro de estos límites, puede considerarse un producto de calidad. Sin embargo, estos límites de calidad son válidos solo en casos donde el biocombustible sólido satisface todos los demás indicadores de calidad monitoreados sean químicos-térmicos y físicos-mecánicos.

Los parámetros de calidad se pueden dividir en dos categorías. El primero se refiere a los indicadores químico-térmicos de calidad estos son por ejemplo el contenido de cenizas, el poder calorífico, punto de fusión de la ceniza y los elementos químicos. La segunda categoría consiste en los llamados indicadores físicos-mecánicos de calidad que incluyen parámetros como la densidad de briquetas y la resistencia a la compresión. La primera categoría depende esencialmente del tipo de materia prima con la que se fabrica el biocombustible (la biomasa base proporciona sus propiedades y composición química). La segunda categoría depende de varios parámetros los cuales se derivan del proceso de fabricación de las briquetas. Estos parámetros se pueden modificar durante la producción de las briquetas siendo llamados parámetros de fabricación industriales, por ejemplo; la humedad, granulometría, presión y temperatura de prensado.

En esta tesis se estudia la relación entre los parámetros de fabricación industrial y como inciden en los parámetros de calidad físicos-mecánicos de las briquetas. Ya que los parámetros de calidad termo-químicos dependen de la fase de crecimiento y el origen de la biomasa.

Por experiencia, la calidad de los parámetros físicos-mecánicos en las briquetas se evalúa principalmente de acuerdo con su densidad.

En la Figura 3.18 se muestra la dependencia entre las propiedades químicas., físico-mecánicas y de combustión y como estas inciden en el desempeño de los biocombustibles.

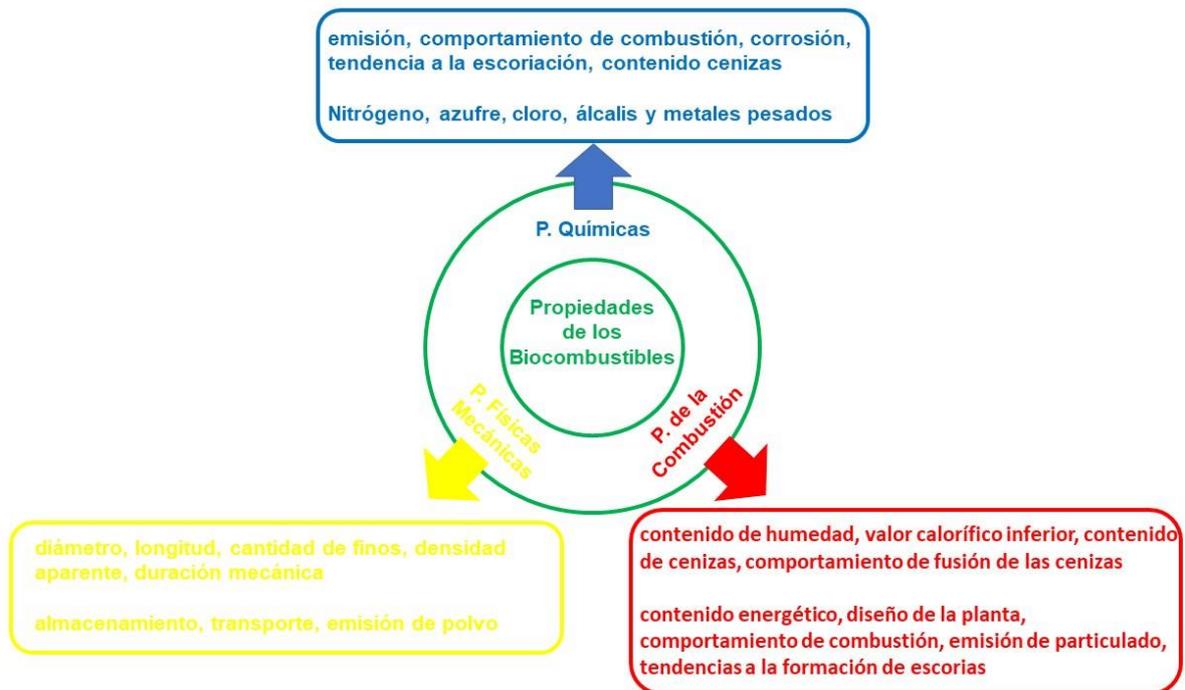


Figura 3.18: Impacto de las propiedades del combustible en el proceso de combustión. (M. Rönnbäck, 2012).

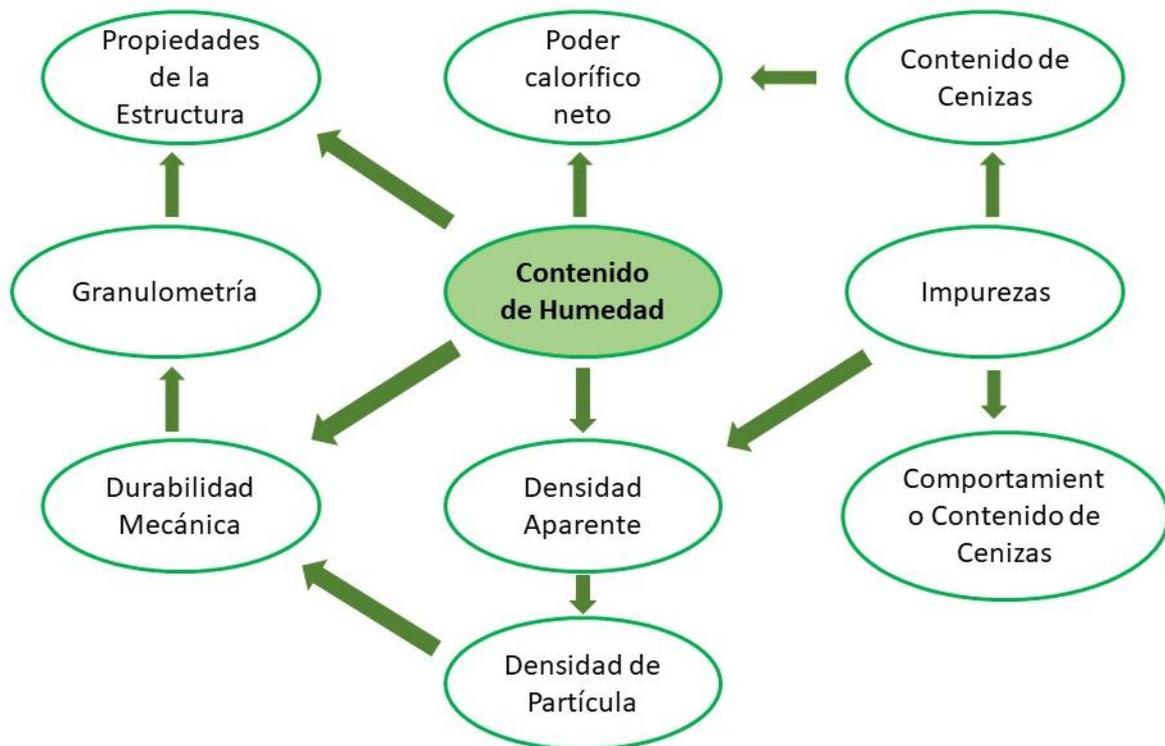


Figura 3.19: Dependencia entre las propiedades mecánicas y químico-térmicas (Rönnbäck & et al., 2012).

En la Figura 3.19 se muestra la correlación entre las distintas propiedades térmicas, químicas y el contenido de humedad ya que este incide directa o indirectamente en los otros parámetros de calidad de los biocombustibles.

Por lo que, en la búsqueda de la calidad en los biocombustibles, es fundamental el trabajo sobre el Contenido de Humedad ya que este afecta a la mayoría de los parámetros de calidad tanto físico-mecánicos como los termo-químicos.

CAPÍTULO 4

ESTUDIO DEL PROCESO DE DENSIFICADO

4.1. Introducción

En el estudio del proceso de briqueteado se considera el análisis completo del proceso de densificado, lo que implica el estudio de la distribución de fuerzas y los parámetros que afectan al proceso de densificado tanto del proceso mecánico como de la biomasa y como estos parámetros se interrelacionan entre sí. Por lo que en este análisis se evaluará el contenido ideal de humedad o contenido de agua, el tipo de biomasa o de madera y su estructura, ya sea en forma de aserrín o viruta. Por lo que se desarrollan estudios tanto las propiedades mecánicas, químicas y la geometría de las partículas, las interacciones de fuerza entre partículas individuales y las causas y efecto de estas propiedades. Por lo que para estos estudios es clave la caracterización de la biomasa en el proceso de briqueteado para predecir y garantizar la calidad final de las briquetas según los estándares descritos en el capítulo anterior.

Por lo que a continuación se describirá los procesos y factores que interviene en el proceso de briqueteado

4.2. Incidencia del tipo de biomasa particulada en el biocombustible

Los biocombustibles densificados están conformados por partículas sólidas, líquidas y gaseosas. La fracción de líquido y gas la ocupan los poros que se encuentran entre las partículas sólidas.

Si las partículas sólidas son suficientemente porosas se denomina poros superficiales o poros abiertos y los poros son internos se conocen como poros cerrados.

La cantidad de líquido o gas dentro de los poros externos puede variar. Este contenido en los poros superficiales puede penetrar hasta los poros internos de las partículas, lo que cambia sustancialmente sus propiedades geométricas y físicas.

Los poros superficiales aumentan el área de las partículas, mientras que los poros internos afectan la densidad o resistencia del biocombustible.

La relación entre el tamaño de la superficie y las propiedades de los biocombustibles es esencial, ya que el aumento de la superficie tiene el efecto natural de aumentar su reactividad, en las reacciones homogéneas y heterogéneas. La reactividad química es esencialmente proporcional al tamaño de la superficie.

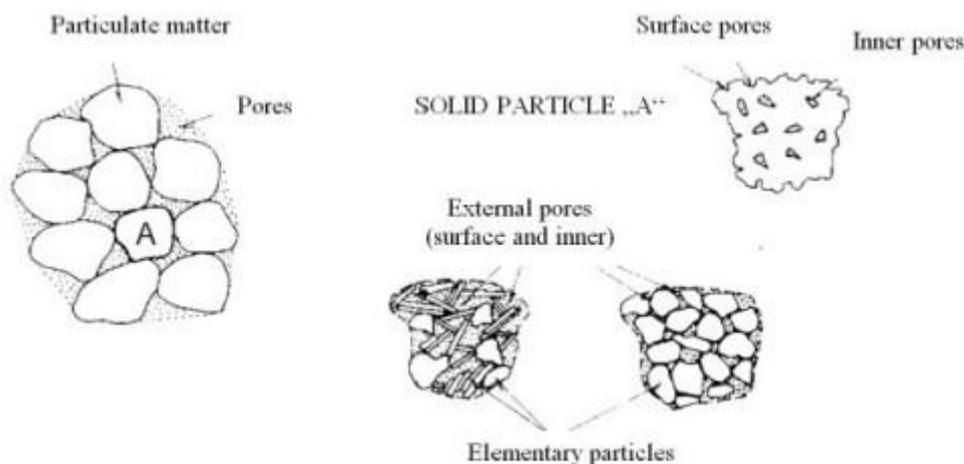


Figura 4.1: Partículas sólidas "A" en partículas (Jindra, 1984).

Las excepciones a esto son situaciones en que los poros superficiales están recubiertos con una sustancia inerte o no reactiva. Sin embargo, en los casos en que el tamaño del biocombustible se reduce mediante métodos mecánico-químicos (trituration, por ejemplo), las superficies internas expuestas también aumentan la reactividad. Hay muchos ejemplos que documentan la relación mutua entre el tamaño de la superficie y las propiedades de las partículas sólidas. Sin embargo, es necesario señalar que el cambio en las propiedades físico-químicas de las partículas sólidas está relacionado solo con cambios significativos en de la relación del tamaño de la superficie. Sin embargo, incluso pequeños cambios en el tamaño de partícula afectan fundamentalmente el espectro de aplicación de estas sustancias. Por lo tanto, el tamaño de la superficie afecta la mayoría de las propiedades de la sustancia.

La relación entre el tamaño de la superficie y las propiedades físico-químicas de las partículas sólidas reside en el hecho de que al aumentar el tamaño de la superficie aumenta el número de átomos que componga la interfaz entre fases. Para partículas individuales, la cantidad de átomos en la interfaz entre fases aumenta relativamente, lo que aumenta el número total de átomos en el sistema de partículas.

En las partículas solididad las partículas individuales que las constituyen se contactan entre sí. Este contacto restringe el movimiento libre entre partículas sólidas individuales y, por lo tanto, afecta la resistencia y la rigidez de las partículas. Los grados de libertad de las partículas en las astillas de madera cambian con respecto a la magnitud de la tensión a lo largo del proceso de deformación. El aumento de la tensión reduce los grados de libertad hasta que la magnitud de la tensión alcanza el límite elástico de la partícula (astillas de madera), lo que resulta en la desintegración y el consiguiente aumento de la libertad de movimiento.

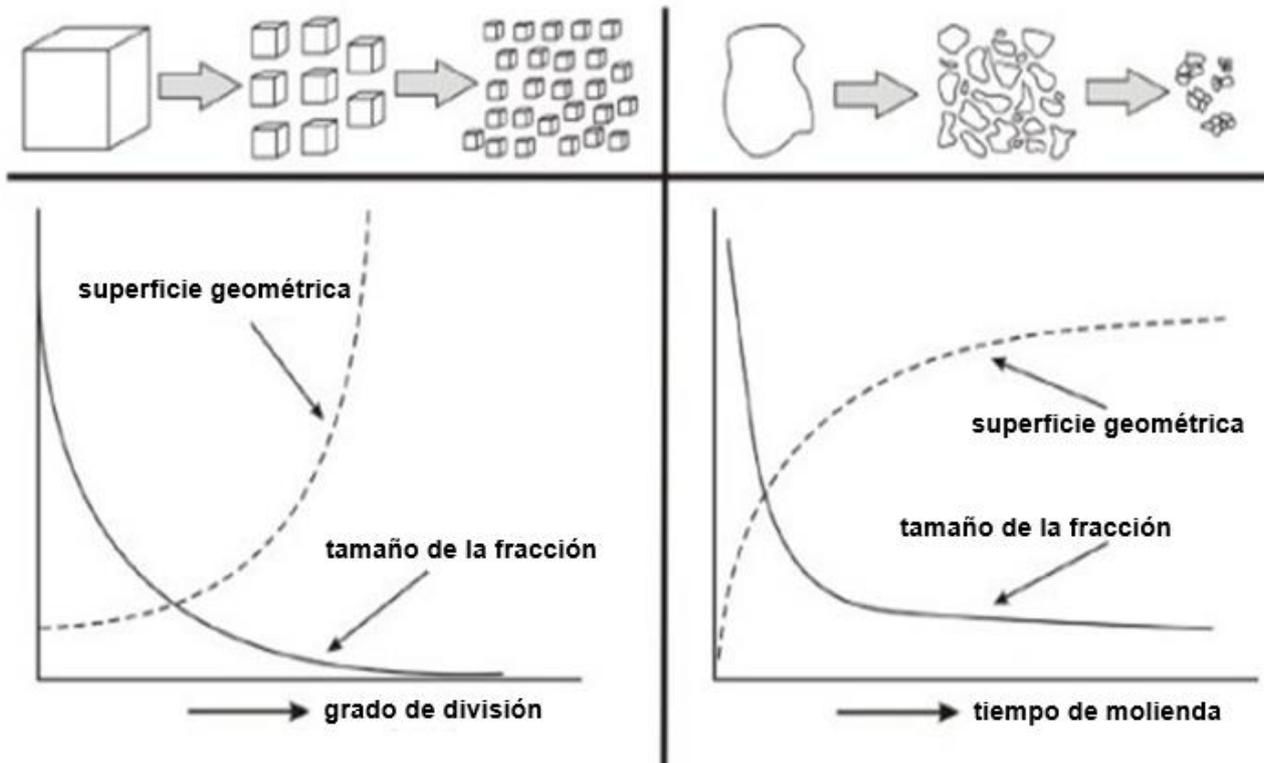


Figura 4.2: Diferencia entre cambiar el tamaño de la superficie de cuerpos sólidos ideales y reales (Jesenák, 2008).

Esta propiedad se emplea en el proceso de prensado o densificado de las partículas sólidas, en el que la acción de la presión y el calor compactan las partículas sólidas en un único bloque compacto. Sin embargo, al presionar, el esfuerzo no debe exceder el límite elástico de las partículas sólidas. El objetivo es minimizar los poros que ocupan espacio entre partículas sólidas, contribuir a una interacción más fuertes entre partículas individuales y así obtener una briqueta de mayor densidad.

4.3. Estructuras particuladas de la biomasa proveniente de la madera

Las propiedades mecánicas de las partículas dependen de su disposición, de las partículas de partículas internas. La estructura o textura (interna) de la materia particulada definen la disposición geométrica de las partículas sólidas y el comportamiento de las interacciones entre las partículas.

El comportamiento depende del número de enlaces estructurales el cual está en función del tamaño, la forma, la rugosidad y la resistencia de las partículas sólidas. Además de estos factores se relaciona el comportamiento con la heterogeneidad (superficies alternas de partículas finas y de gruesas) conocidas como la textura o, a veces, conocidas como la macroestructura.

Es importante diferenciar entre la estructura de sustancias compuestas de partículas de tamaño variable es decir con diversos grados de polidispersión y sustancias con polidispersión igual,

pero con un tamaño absoluto variable de partícula. La Figura 4.3 describe ejemplos de composición o estructura de material particulado.

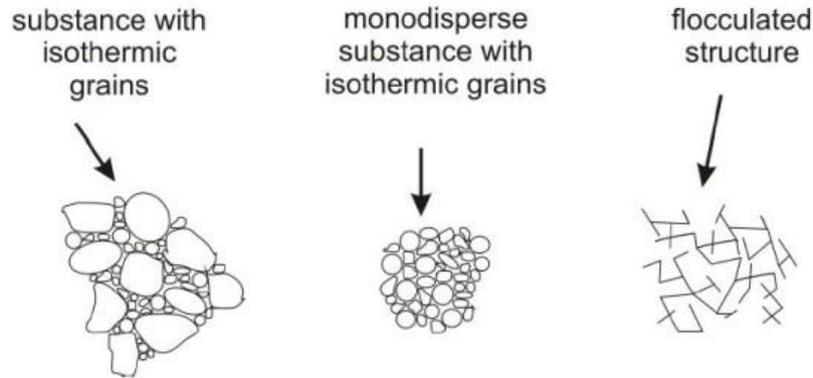


Figura 4.3: Ejemplos de estructura de partículas (Jesenák, 2008).

Para el proceso de densificado es muy importante conocer la composición de las partículas, su estructura y el tamaño de estas. El tamaño y la estructura afectan los mecanismos de unión y la fuerza de estas interacciones en la compresión. Por lo que estas propiedades afectan la continuidad del proceso de densificación y la calidad de las de briquetas. Los factores que definen la estructura de las partículas pueden dividirse en tres grupos: el carácter de las partículas sólidas, la disposición geométrica de las partículas y el comportamiento entre ellas.

En el primer grupo las características de las partículas individuales y grupales de las partículas sólidas son: la resistencia, composición, tipo de estructura de la partícula sólida; y el tamaño, forma y aspereza de la partícula. La característica más utilizada de este grupo es la curva de granulométrica: como el diagrama de la composición de la fase de partículas el cual se observa en la Figura 4.4.

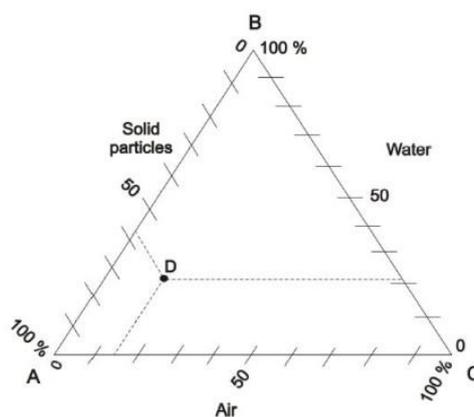


Figura 4.4: Diagrama de triángulo que representa las composiciones de las fases. (Feda, 1977).

Es posible cambiar la composición de fase previo al densificado al variar el contenido de agua o humedad antes de este proceso. El contenido de agua puede reducirse hasta cierto punto mediante el secado. Cuanto más pequeña es la partícula, mayor es la efectividad del secado. El objetivo del secado no es obtener partículas completamente secas ya que, si se presionaran las

partículas completamente secas, se obtendría partículas sinterizadas, las cuales no sirven como biocombustibles.

La estructura y las variables de estado forman el segundo y tercer grupo de factores a analizar. El segundo grupo de factores define la disposición geométrica de la fase sólida, entre los que se destaca la masa volumétrica promedio de la cual podemos derivar la porosidad del material. Si las partículas sólidas crean un grupo de partículas elementales, entonces es importante describir la disposición geométrica de los grupos de partículas.

El tercer grupo de características estructurales es decir los enlaces entre partículas, para materiales particulados es posible diferenciar dos tipos de enlaces:

En primer lugar, están los enlaces efectuados por carga externa o de fricción y enlaces creados a partir de tensiones internas también llamados enlaces cohesivos. Estos ocurren como resultado de mecanismos de las variables de unión que afectan las propiedades mecánicas, así como el proceso de prensado.

En la Figura 4.5 la línea discontinua paralela al eje de las abscisas divide el diagrama en áreas I y II. El área I representa una briqueta sujeta a alta presión. En esta área, las partículas de la briqueta están en contacto superficial. El Área II representa el proceso de prensado donde se aplican puentes de contacto alrededor de las partículas que están en contacto.

Las líneas diagonales dividen el diagrama en regiones, que definen los mecanismos de enlace. Por lo que a partir de este diagrama se muestra que picar la biomasa de madera en partículas muy pequeñas es una buena práctica antes de densificar para obtener el mejor enlace mutuo entre las partículas.

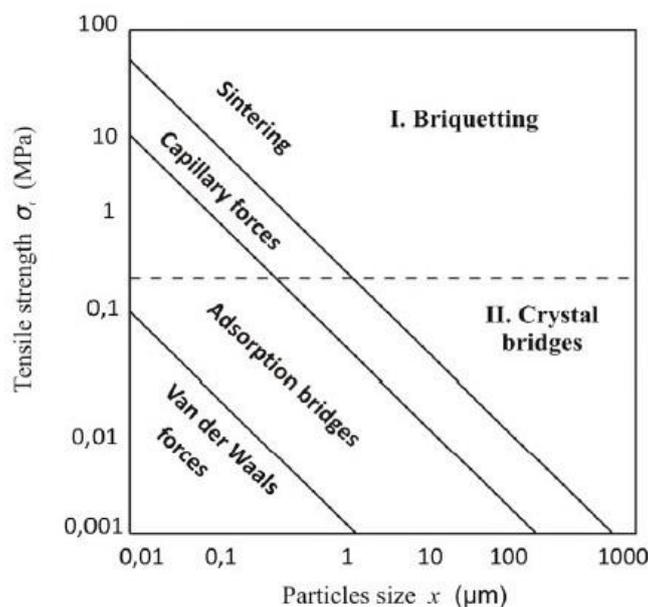


Figura 4.5: Resistencia teórica de las partículas de la sustancia unida en relación con el tamaño de partícula antes del prensado (Jindra, 1984; Medek, 1991).

4.4. Mecanismos predominantes de enlaces internos en la estructura de los biocombustibles

En las distintas fases de contacto de la estructura interna de los biocombustibles en la cuales se relacionan las partículas que crean enlaces o fuerza de unión entre ellas, basadas en varios mecanismos. Estos enlaces afectan todas las propiedades mecánicas de las partículas que integran al biocombustible.

La fuerza de contacto de entre las partículas se da por una compilación de enlaces elementales en la superficie del contacto real. En las partículas, todos los tipos de mecanismos de enlace actúan prácticamente juntos. El enfoque teórico como el cálculo de las fuerzas de adhesión considera la rugosidad del material. Siendo la prueba de Jenkins, es una prueba de corte que se utiliza, para probar experimentalmente los cálculos de teóricos.

La resistencia a la tracción de la adhesión entre las partículas se puede especificar a partir de los valores característicos obtenidos para el material a granel, es decir varios puntos de contacto de las partículas caracterizados por la coordenada K y la rugosidad de la superficie de contacto. En los enlaces emergentes entre partículas influyen en varios factores, principalmente la saturación de líquido.

Por lo que para este análisis de comportamiento se considera las siguientes definiciones:

- Sustancias particuladas secas: sustancia que no contiene ninguna fase líquida; partículas solidas con partículas de aire / gas que llenan los espacios entre partículas sólidas, es decir una saturación $S = 0$ (Figura 4.6).
- Sustancias particuladas húmedas: sustancia que consiste en una fase líquida junto con una fase sólida, donde algo de líquido ocupa los espacios entre las partículas, la saturación toma valores entre $0 < S < 1$ (Figura 4.6).
- Pasta: se denomina así a las sustancias particuladas que consiste solo en una fase líquida compuesta de partículas cuyos poros están completamente llenos de líquido, los valores de saturación son iguales a $S = 1$ (Figura 4.6).

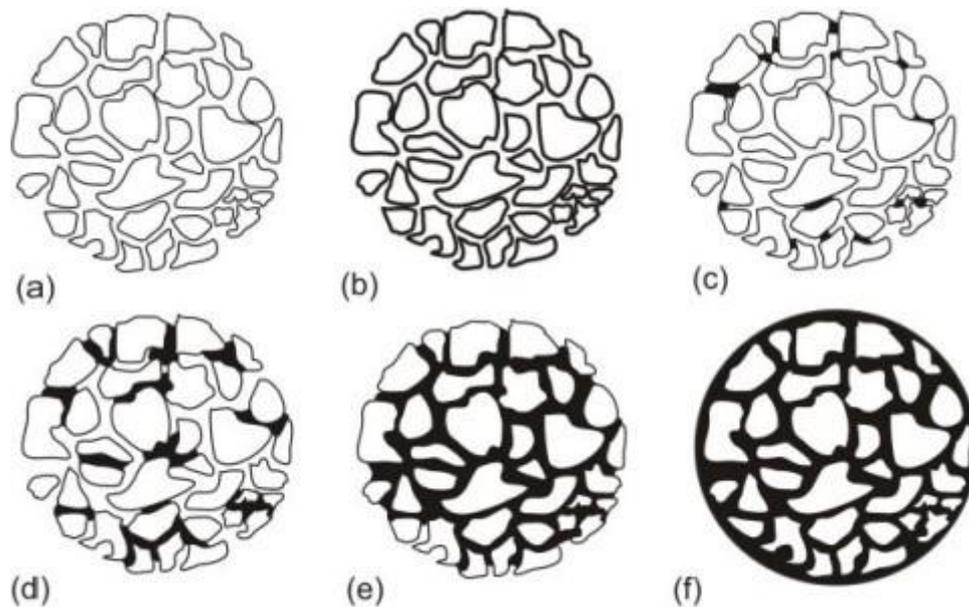


Figura 4.6: Representación esquemática de diversos grados de saturación entre partículas (Pietsch, 1991). (a) sin saturación - seco; (b) capas de absorción; (c) puentes líquidos (estado pendular); (d) estado de transición (estado funicular); (e) estado completamente saturado (estado líquido); (f) gota.

Los mecanismos de enlaces se pueden dividir en 5 grupos y varios subgrupos según Pietsch los cuales son los siguientes:

A) Puentes de carácter sólido: Los enlaces que se producen entre los contactos de las partículas creadas por puentes en la fase sólida. Su ocurrencia resulta en:

- partículas sinterizadas (difusión de átomos y moléculas a temperaturas más altas)
- fusión parcial de la superficie de la partícula (adhesión de fusión - soldadura en frío)
- reacción química entre partículas (generalmente activada por la humedad)
- endurecimiento de la unión entre partículas (generalmente activado por la humedad)
- recristalización de la fase sólida del componente líquido
- secado (recristalización de componentes solubles y eliminación de partículas no líquidas).

B) Fuerzas de adhesión y cohesión: enlaces creados por la adhesión en las superficies de interfaz y la acción de fuerzas cohesivas internas causadas por:

- uso de adhesivos de alta viscosidad (unión de partículas con un adhesivo de alta viscosidad)
- formación de capas de absorción / $<3 \eta m$ / (pequeñas partículas que atraen a los átomos de alrededores y moléculas creando una capa absorbente)

C) Tensión superficial y presión capilar: - las interacciones con el mecanismo de unión más común entre partículas de materiales húmedos son:

- puentes líquidos (creados en materiales con un mayor contenido líquido en el contacto, condensación capilar),

- presión capilar (si el volumen de poros entre las partículas en el sistema disperso se llena con agua, la presión capilar crea un enlace entre los poros y la superficie de las partículas).

D) Fuerzas atractivas entre partículas–Incluso en los casos en que no se producen puentes de alguna sustancia entre partículas, un enlace de fuerza causado por interacciones moleculares crea campos de unión en las partículas. Las mismas partículas pueden emitir estos campos que categorizamos como:

- fuerzas moleculares (fuerza de Van der Waals)
- fuerzas electrostáticas
- fuerzas magnéticas

E) Enlaces de forma:

- Partículas en forma de fibras, escamas, pétalos o partículas con superficies irregulares que se unen / enredan entre sí cuando se presionan.

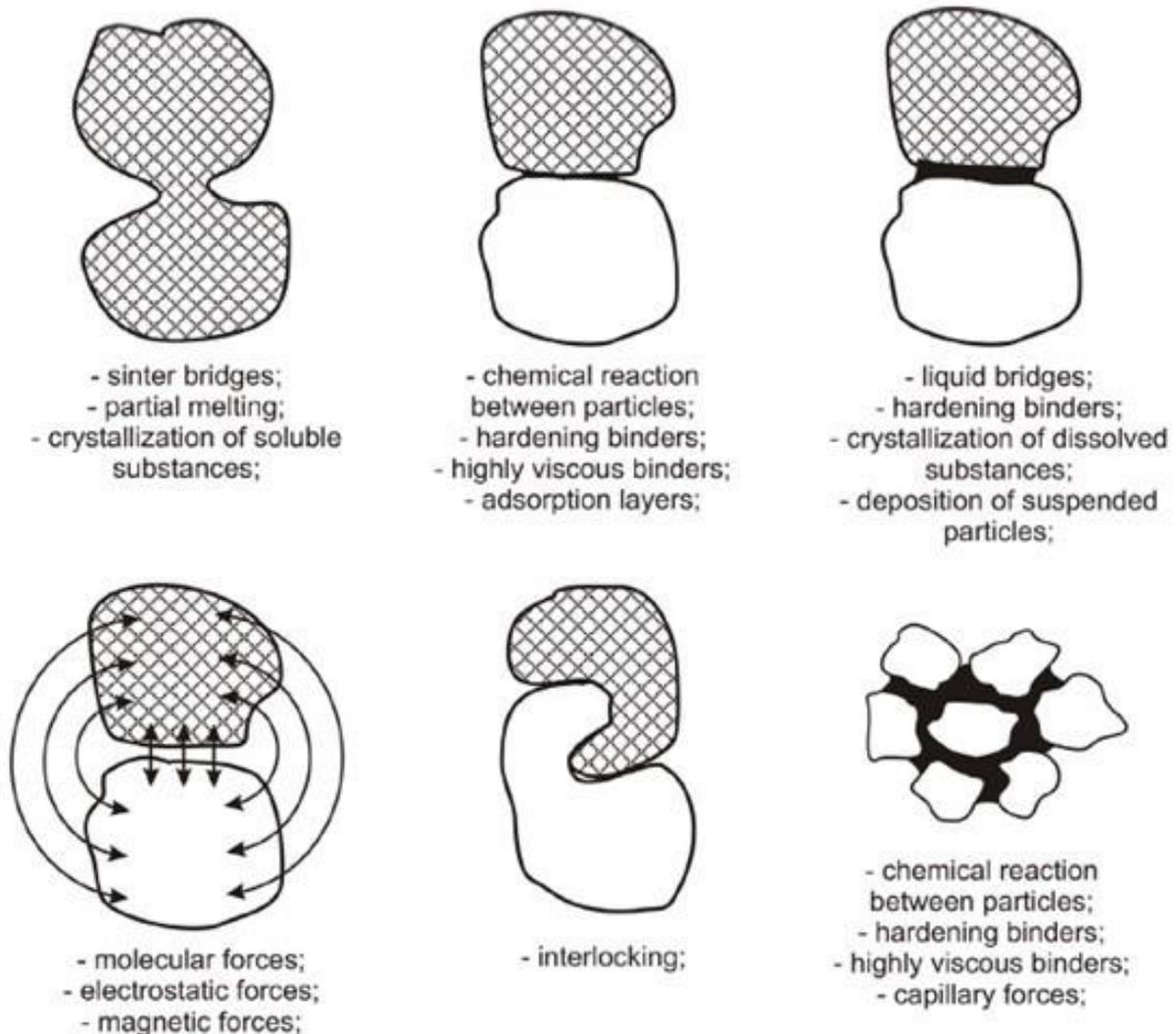


Figura 4.7: Esquema que representa los mecanismos de unión (Pietsch, 1991).

Estas fuerzas de unión causadas por los mecanismos son fuerzas cohesivas internas que actúan entre partículas, el enlace entre las partículas actúa incluso después de que se quitó las fuerzas externas que actúan sobre las partículas (las fuerzas normales de compresión y fricción se dan en las áreas cargadas por fuerzas externas).

4.5. Propiedades de la biomasa residual de madera

Al procesar la madera, las astillas y el aserrín son un subproducto resultante, su forma, tamaño y cantidad dependen de las propiedades físico-mecánicas de la madera, así como de la forma, el tamaño y las herramientas de corte o la tecnología utilizada para procesar la dicha madera.

estas partículas también se conocen como astillas, virutas, polvo o fibras y se pueden unificar bajo un término común: masa de madera desintegrada (DWM) lo que en esta tesis llamamos como la biomasa residual de madera.

La DWM se caracteriza por no ocupar todo el espacio con su masa, ya que existen espacios de aire entre las partículas sólidas. En consecuencia, la DWM se encuentra en la categoría de dispersiones, es decir un sistema desproporcionado compuesto por dos fases. Otra propiedad típica de DWM es que cuando cada partícula de madera individual cambia, la forma externa general del volumen también cambia.

Las propiedades que tiene mayor incidencia en la compresión o en el densificado a la DWM son el tamaño y la morfología o forma de las partículas, la granularidad, la humedad, la densidad aparente y la compresibilidad de las partículas. A continuación, se describirá como las características y propiedades inciden en el proceso de briqueteado.

Morfología o Forma de partícula de la biomasa residual de madera:

La forma geométrica de las partículas de madera depende del proceso con el que se industrializa la madera, por lo que cada tipo de proceso tiene dimensiones distintas. Sin embargo, se puede dividir en 3 grupos:

- A. partículas isométricas: partículas que tienen aproximadamente la misma dimensión en las tres direcciones (viruta fina, polvo fino)
- B. partículas planas: el largo y el ancho son significativamente mayores que el grosor (astillas, virutas, escamas).
- C. partículas de fibra: partículas con alargamiento significativo en una dirección (fibra partículas de polvo de espesor medio).

En la Tabla 4.1 se muestra las dimensiones características para cada tipo de DWM

Tabla 4.1: Tamaño de las partículas de DWM (Dzurenda, 2002).

Método de partículas DWM	Tamaño de partícula	
	mínimo (mm)	máximo (mm)
Astillas (astilladora de madera)	2.5	40
Astilla (máquina desintegradora de madera)	0,16	6.5
Aserrín húmedo (aserrín de la sierra para madera)	0,064	4.8
Aserrín seco (sierra circular longitudinal)	0,027	3.5
Fibras de madera seca	0.5 0.5	4 4
Polvo de madera (lijado de banda)	0.001	0.5

Granulometría de la biomasa residual de madera:

La granularidad o composición granular, caracteriza cuantitativamente las partículas individuales, o a los grupos de partículas de en función del tamaño específico del material a granel. El material a granel es un sistema o un conjunto de partículas con tamaños variables que se pueden clasificar en clases según el tamaño de sus fracciones. En la siguiente tabla se muestra las clases de granulometría de acuerdo con la norma de referencia STN 260070 y su tamaño de fracción correspondiente.

Tabla 4.2: Clases de granulometría de material a granel según STN 260070.

Clase	Granulometría mm	Definición
Muy fina	0.07-0.50	A
Fina	0.50-3.50	B
Grano fino	3.50-13.0	C
Grano medio	13.0-75.0	D ₁
Grano grueso	Superior a 75.0	D ₂
Irregular	Fibra de tamaño irregular	E

Según Hejma y et al (1981), clasifica a la granulometría de los diferentes materiales sueltos derivados de madera a granel en las segundas clases: gruesos, medianos, medianos, finos y muy finos.

La granularidad de las fracciones se puede ver en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Granularidad de materiales derivados de madera a granel (Hejma & et al., 1981).

Etiquetado de granularidad	Dimensión de fracciones (mm)
Grueso	a > 1
Medio grueso	0.5 - 1
Medio	0.3 - 0.5
Multa	0.03 - 0.3
Muy bien	0.001 - 0.03d

Esta propiedad se define como la composición granular de los materiales a granel. Esta se realiza por medio del tamizado del material con una serie de tamices calibrados de forma sucesivas y gradúan con tamaños de malla de gruesas a finas.

Contenido de humedad de la biomasa residual de madera:

La humedad del material de madera se determina a través la determinación del peso del agua m_v dentro de su volumen. Generalmente se expresa en forma de humedad absoluta o humedad relativa del material proveniente de madera según la norma de referencia STN EN 844-4.

Cuando hablamos de humedad absoluta, estamos definiendo el peso del agua como una relación con el peso de la madera absolutamente seca, y definimos la humedad relativa a la relación del peso del agua tomando como base al peso de la masa húmeda. La humedad absoluta y relativa de la madera se expresa como un porcentaje% y se calcula a través de las siguientes relaciones (STN 490103):

$$w_a = \frac{m_v}{m_0} 100 = \frac{m_v - m_0}{m_0} 100 (\%) \tag{Ec. 4.1}$$

$$w_r = \frac{m_v}{m_w} 100 = \frac{m_w - m_0}{m_w} 100 (\%) \tag{Ec. 4.2}$$

$$m_w = m_0 + m_v (Kg) \tag{Ec. 4.3}$$

dónde:

w_a : humedad absoluta

w_r : humedad relativa

m_0 : peso de madera absolutamente seca (peso de madera después del secado a $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)

m_w : peso de la madera a una humedad de "w"

m_v : peso del agua en la madera

La relación entre la humedad absoluta y relativa en la madera se ilustra en la Figura 4.8.

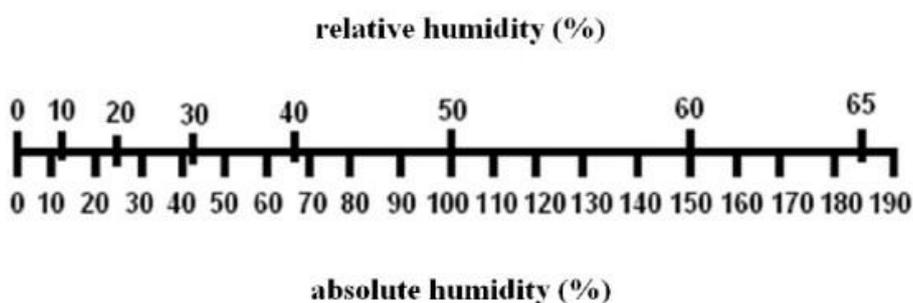


Figura 4.8: Nomograma para la conversión mutua entre humedad absoluta y relativa en madera (Požgaj & et al., 1997).

Los mecanismos que retienen a la humedad dentro de la madera son las uniones químicas, entre el agua libre y agua ligada a la madera, estos enlaces se describen a continuación:

- A. El agua unida químicamente es el resultado de compuestos químicos que componen a la biomasa, este contenido no se puede eliminar por secado, solo por combustión.

Por esta razón, está incluido en el estado seco absoluto de la madera. Su contenido se determina a través del análisis químico de madera, y su contenido varía entre el 1-2% de la materia en madera seca. Este porcentaje no tiene efecto en las características físicas o mecánicas.

- B. El agua libre o agua capilar se encuentra en la lumen o estructura de la madera en los espacios libre entre las células. Solo está presente en la madera cuando las paredes de las celdas están llenas de agua aglomerada. La cantidad varía desde el punto de saturación de la fibra alcanza la saturación por completo superar el 100% de w_a . Su contenido depende del volumen de las células de la estructura y de los espacios intercelulares. Este contenido tiene efecto sobre las características físicas o mecánicas de la biomasa, pero no es tan influyente como el agua ligada.
- C. El agua ligada o agua higroscópica, se encuentra en las paredes celulares y está unido por hidrógeno en el grupo hidróxido OH a la parte amorfa de la célula y a la parte hemiceluloso. Este contenido de humedad es del 0%. Desde el punto de vista de saturación de la fibra y su valor de referencia es de 30% w_r . Este contenido depende principalmente de las especies de la biomasa, métodos de extracción y Otros efectos del proceso. El agua ligada es el mayor de los contenidos de humedad entre los porcentajes de humedad descritos anteriormente, por lo que tiene mayor incidencia sobre las características físicas o mecánicas de la biomasa.

En la práctica se clasifica al grado de humedad en la madera de la siguiente forma:

- i. Exposición húmeda a largo plazo al agua (más del 100% w_r);
- ii. Recién cortado (50 a 100% w_r), en algunos casos hasta 180% w_r dependiendo de las especies de madera
- iii. Secado al aire ambiente (15 a 20% w_r)
- iv. Secado en habitación seca (8 a 10% w_r)
- v. Absolutamente seco, secado a 103 ± 2 ° C

Densidad aparente de biomasa residual de madera:

La densidad aparente se define como la relación entre la masa de partículas y su volumen

$$\rho_s = \frac{m}{V_s} \text{ (Kg / m}^3\text{)} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Para la medición de la densidad aparente, así como el ángulo de talud o de reposo, podemos usar el aparato de Gary. Por lo que al trabajar con un volumen fijo se busca determinar la densidad aparente a partir de la determinación del peso que tiene este volumen físico.

La prueba del ángulo de reposo o ángulo de talud utiliza el mismo dispositivo de Gary, sin el recipiente de la muestra y se permite que las partículas caigan libremente en la superficie plana.

Luego se toman la altura y el diámetro de la masa vertida. Las sustancias cohesivas tienen un ángulo de reposo más alto, mientras que las sustancias no cohesivas tienen un ángulo más bajo.

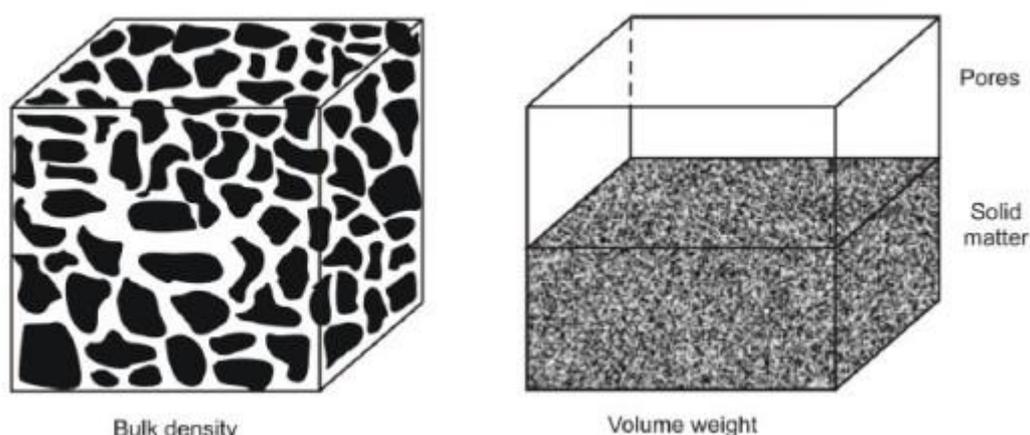


Figura 4.9: Representación ilustrativa entre la densidad aparente y el peso volumétrico (Simanov, 1995).

La densidad aparente depende de las propiedades del material a granel (especies de madera, granularidad, contenido de humedad). La dependencia aproximada entre la densidad de madera y la densidad aparente de la biomasa residual de madera se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_s = (0,3 \div 0,5) \text{ (Kg/ m}^3\text{)} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Tabla 4.4: Densidad aparente de algunos materiales de madera con un contenido de humedad de $w_r = 10\%$

biomasa residual de madera	Densidad Parente kg.m ³
Virutas de abeto	80 - 124
Aserrín de abeto	113 - 166
Aserrín de haya	195 - 218
Astillas de madera	238 - 259
Polvo de lijado	256 - 279

Espaciado y porosidad de la biomasa residual de madera:

Los espacios libres entre las partículas de madera que se están en contacto entre sí a granel se denominan poros. Las partículas sólidas contienen poros superficiales y poros internos., la porosidad del material a granel representa el volumen de estos poros o el volumen alrededor de las partículas.

Este parámetro además de definir la composición de las partículas también define el almacenamiento, el transporte, los procesos de combustión y la incineración automática.

Por lo que la forma en el espacio que tiene la partícula se define de la siguiente manera, por ejemplo, una configuración cúbica tiene una separación de $\epsilon = 0$, mientras que una partícula esférica nunca tendrá espaciado de cero.

La organización de partículas: las partículas esféricas de diámetro idéntico tienen seis configuraciones y seis valores diferentes de ϵ . La separación también depende del número de contactos entre partículas.

Se puede calcular el espaciado utilizando con la Ec. 4.6, donde $V_e \text{ mm}^3$ es el volumen de los espacios y $V_t \text{ mm}^3$ es el volumen total:

$$\epsilon = \frac{V_e}{V_e + V_t} \tag{Ec. 4.6}$$

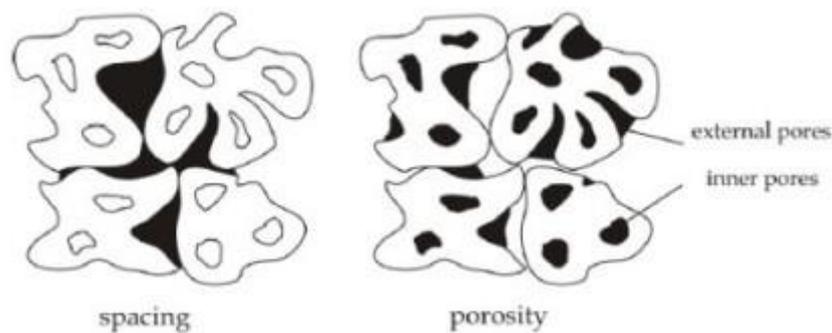


Figura 4.10: Representación ilustrativa del espacio y la porosidad (Pietsch, 1991).

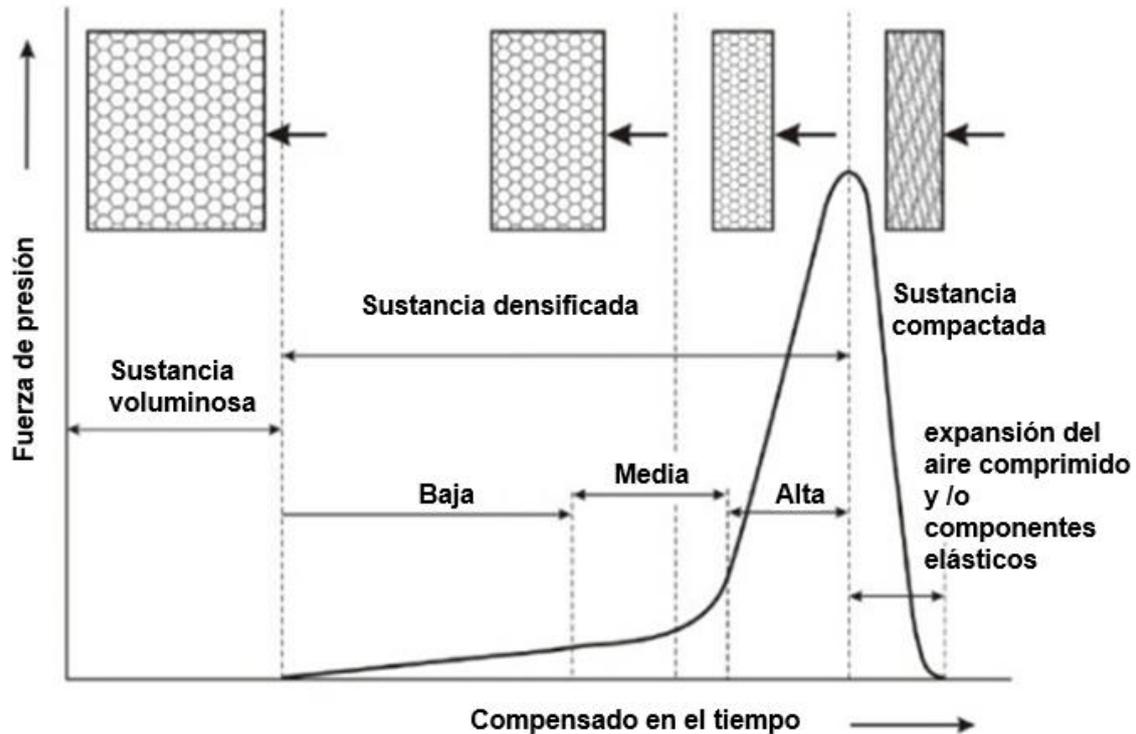
Compresibilidad de la biomasa residual de madera:

La compresibilidad de la biomasa residual de madera se define como la capacidad del material a granel de cambiar su volumen por acción de una fuerza externa aplicada. Se define como el coeficiente de compresibilidad β_s , el cual representa al cambio relativo de volumen para un cambio unitario de la presión aplicada.

$$\beta_s = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dp} \tag{Ec. 4.7}$$

La compresibilidad es una propiedad que incide en gran medida en proceso de briqueteado. La compresión de la biomasa residual de madera disminuye el tamaño y la porosidad del material

a granel mientras que el peso volumétrico aumenta por la acción de fuerza externa. Se determina la compresibilidad de un material particulado mediante un ensayo de compresión uniaxial con un edómetro. Al comprimir una muestra se obtiene la curva de compresibilidad correspondiente a dicha muestra, la cual describe como se comprime la muestra ante la acción de la fuerza.



+

Figura 4.11: Cambio en la masa de madera según la fuerza aplicada (Pietsch, 2002).

Bajo la carga de compresión las partículas sólidas del material se empujan entre si acercándose más cerca una de otra creando una unión adhesiva fuerte. En la parte superior de la figura anterior, se muestran cuatro bocetos que representan el cambio en la estructura de un material a granel durante la compactación.

Los efectos que acompañan a la aplicación de presión en las partículas son un cambio en la forma y el tamaño de las partículas, lo que resulta en un cambio en el volumen total. En la parte inferior de la Figura 4.11 el crecimiento de la fuerza de compresión con respecto al tiempo supone que el movimiento del pistón es constante hasta el valor máximo. Después de obtener el valor máximo, el movimiento del pistón es en la dirección opuesta y también constante.

En el primer paso de la densificación, las partículas del material se reagrupan, debido al decrecimiento de la fuerza, la cual todavía no es alta, por lo que las partículas no cambian de forma ni de tamaño las partículas. En el segundo paso, donde la fuerza de presión comienza a aumentar, las partículas frágiles se rompen y las partículas elásticas se deforman.

Es necesario considerar dos propiedades de interés que afectan y limitan el proceso de densificación, así como el rendimiento de la máquina de prensado. Al presionar el exceso de aire

dentro de los poros y la deformación elástica, afectan a la densificación y la compresibilidad de las partículas. Estas propiedades causan grietas y puntos debilidades en la briqueta los que pueden provocar fragilidad y la rotura de la briqueta. El aumento gradual de la presión de prensado cambia el tamaño de las partículas hasta la deformación, reduciendo la porosidad. El grado en que las partículas se deforman está dado por la compresibilidad del tipo de madera a granel.

La capacidad de prensado máxima está definida por las características mecánicas la briqueteadora, por lo tanto, es necesario diseñar un proceso de densificado para cada madera en particular.

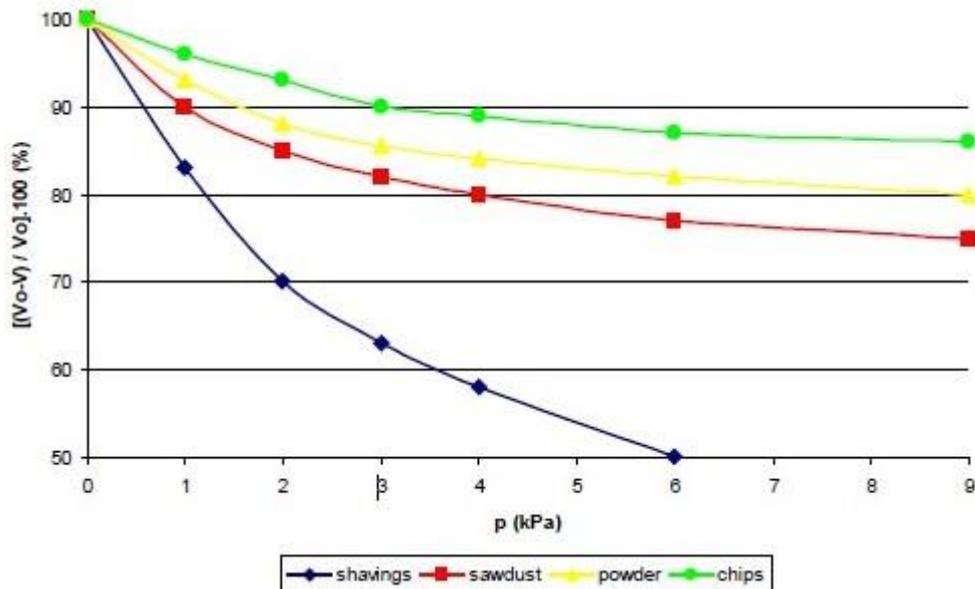


Figura 4.12: Compresibilidad de algunos tipos de materiales de madera (virutas, aserrín seco, polvo de madera, astillas) (Dzurenda, 2002).

En la Figura 4.12 se muestra las diferencias en la compresibilidad de varios tipos de madera. El coeficiente de compresibilidad de los residuos de maderas que consisten en partículas isométricas (aserrines) tienen valores de $\beta_s = 0.75-0.85$ y de $\beta_s = 0.50$ para virutas de madera.

Tecnología aplicada al proceso de producción de briquetas:

Las tecnologías empleadas para la producción de briquetas se basan principalmente en la compresión y extrusión de biomasa acondicionada previamente al briquetado

Los países pioneros en desarrollar este tipo de tecnología fueron Alemania y Japón posteriormente siguieron los desarrollos de china durante en el siglo XX.

La tecnología de briquetado o densificado de biocombustibles sólidos se basa en aplicar presión a la biomasa por medio de diferentes mecanismos como pistones y tornillos sin fin, los cuales son impulsados por medio de sistemas hidráulicos o mecánicos. En estas tecnologías se realizaron importantes adelantos durante los últimos años buscando resolver los problemas de desgaste por abrasión y la formación de escoria.

Los procesos de briqueteado se pueden clasificar de la siguiente manera:

- A. Briqueteadora de pistón: como se muestra en la siguiente figura, en este tipo de equipo la densificación se produce por impacto, del pistón sobre la biomasa, el cual hace pasar a la biomasa por un cilindro que termina en un dado el cual da la forma final a la briqueta. De este modo se logra comprimir a la biomasa para obtener la briqueta final. Este tipo de equipo tiene una vida útil prolongada y un consumo de energía bajo. Por lo que se recomienda su uso para una gran variedad de biomasa como rastrojo, cáscara de arroz, tallos de algodón, entre otros residuos de cosechas. Esta clase de equipos trabajan a alta presión, lo que genera la necesidad de un constante mantenimiento al pistón.

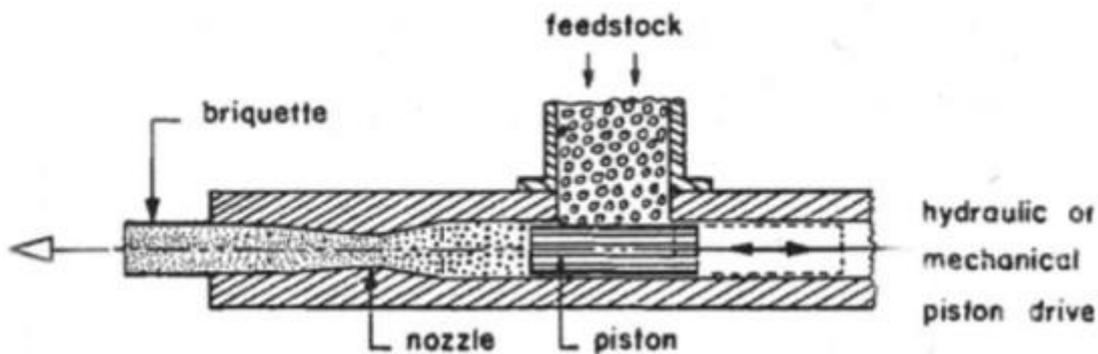


Figura 4.13: Briquetadora de pistón.

- B. Briquetadora de tornillos: Las briquetadoras de tornillos producen briquetas de forma continua a medida que la biomasa se desplaza por un dado cónico el cual es calentado por medios de resistencias eléctricas desde el exterior con el fin de liberar y plastificar la lignina. Lo que logra reducir la fricción entre las briquetas y las paredes de la briquetadora. Las briquetas elaboradas con este equipo son de alta calidad, ya que esta clase de equipo tiene un funcionamiento suave y silencioso. Este tipo de equipos presentan un alto desgaste del tornillo sin fin y un mayor consumo de energía (Fonseca, 2011).

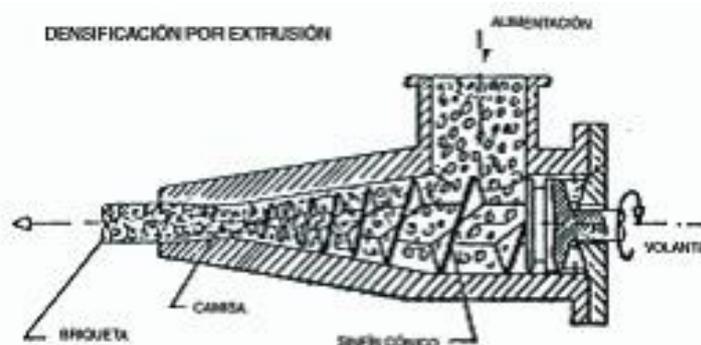


Figura 4.14: Briquetadora de tornillo.

- C. Briquetadora de prensa hidráulica: En este tipo de briquetadora, la potencia es transmitida al pistón por medio de un sistema hidráulico el cual trabaja a altas presiones como lo muestra la siguiente imagen. Por lo que el movimiento y la compactación de la biomasa en el cilindro

es lenta en comparación con los sistemas de impacto. Lo que resulta en una menor producción de briquetas para iguales condiciones mecánicas. Pero este tipo de equipo puede procesar biomásas con un mayor contenido de humedad.

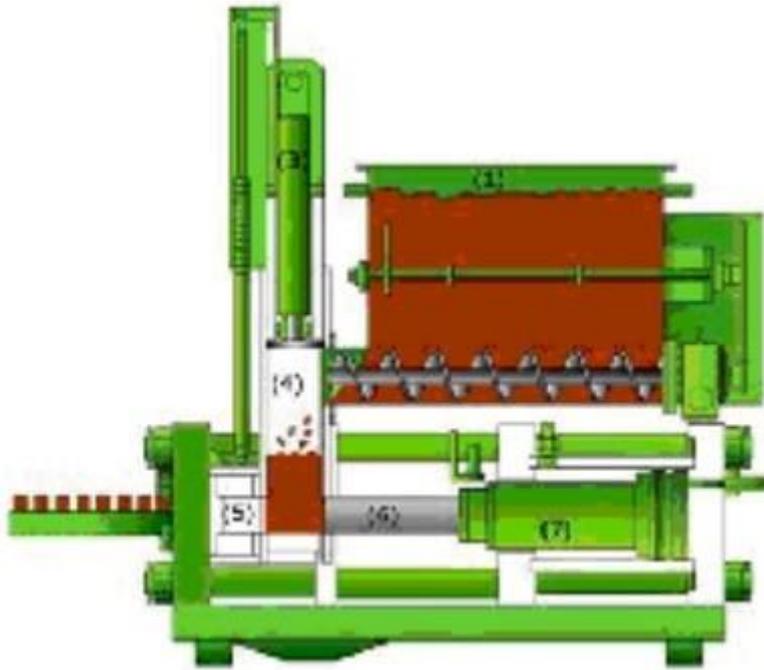


Figura 4.15: Briquetadora hidráulica

D. Briquetadora de prensa de rodillos: En esta clase de equipos la biomasa se comprime entre rodillos, los cuales contra rotan entre sí, esto se puede hacer en una o dos etapas dependiendo de la densidad inicial. La compactación final se produce con la presión generada entre los dos rodillos que giran a contra flujo del material. Estos rodillos tienen cavidades con la forma de las briquetas cuando el material pasa entre los rodillos quedando conformada la briqueta como se observa en la siguiente figura. En estas briquetadoras se controla la producción mediante la regulación de velocidad de alimentación del tornillo sin fin, velocidad de los rodillos, distancia entre los rodillos, la fuerza de presión entre los rodillos la cual se regula con la distancia entre los rodillos y la rigidez del sistema.



Figura 4.16: Briquetadora de tronillo.

4.6. Proceso de briqueteado

Definimos el proceso de briqueteado como la densificación o compactación de partículas desacoplas en un cuerpo rígido conformado, el cual tiene una alta densidad. Por lo que, en un sentido estricto, el briqueteado es la conversión físico-mecánica de partículas con o sin la adición de un aditivo aglomerante en un producto sólido y de forma regular el cual se caracteriza por su gran densidad.

En este proceso tienen incidencia las características del material a densificar como la composición del material base, la presión del proceso, temperatura y caudal de biomasa los cuales se deben definir con precisión para cada tipo de biomasa.

Composición de la mezcla de biomasa:

La composición en diferentes proporciones de biomasa y de aditivos inciden en la producción de los biocombustibles densificados, ya que esto permite incrementar o mejorar la cantidad y calidad de los materiales base utilizados, la calidad de las briquetas finales, la resistencia físico-mecánica como la durabilidad. Por ejemplo, la producción de briquetas con mezcla de aserrín de madera de Ceiba y marlo de maíz en distintas proporciones como 90:10, 70:30 y 50:50 varía la densidad, la resistencia a la compresión y el índice de resistencia al impacto de las briquetas.

Presión de briqueteado:

La presión que se utiliza para la producción de briquetas es uno de los parámetros clave en la producción, el cual tiene un gran rango de operación para las distintas clases y tipos de biomasa y temperaturas de producción. Un ejemplo de esto es la presión que se aplicadas en el briqueteado manual, en contraste con las presiones elevadas briqueteadoras hidráulicas. Por lo que estas presiones pueden varias en función del material que se desee densificar ya que variar entre 15.7 y 31.4 Mpa para cardo ruso con temperaturas entre 80 a 105 °C o para residuos agropecuarios entre 31 a 318 Mpa a 25 °C obteniendo resultados de densidad entre 0.4 y 0.84 g/cm³

Temperatura de proceso:

La temperatura producción de briqueta incide de forma directa en la calidad de las briquetas, afectando principalmente a la densidad y a la resistencia mecánica. Las temperaturas de proceso van desde los de 25 hasta 130 °C. Por lo que aumentar la temperatura por ejemplo de 80 a 100 °C permitirá la plastificación de la lignina. Aunque Križan (2012) propone que la temperatura óptima para la producción de briquetas es 120°C.

4.7. Modelo matemático del proceso de prensado o briqueteado de biomasa

En este apartado describiremos el estado actual del arte de los modelos matemáticos empleados para la simulación del proceso de briqueteado por medio de un proceso de prensado uniaxial. Esto con el fin de describir el comportamiento del proceso de briqueteado desde el punto

de vista teórico en contraste con el punto de vista experimental, por lo que se tomara referencia de los trabajos y modelos que menciona križan (2014).

En esta descripción se enumerará los distintos factores que inciden en la producción de las briquetas, factores como la; distribución de presión en la cámara de prensado, efectos de la geometría de la cámara en la distribución de presión.

Teoría del prensado uniaxial de material particulado:

El desarrollo de este modelo se realiza bajo la convección de que la presión de prensado puede ser aplica de forma uniaxial en un único eje o multiaxial, hidrostático en todos los ejes.

Las condiciones cinéticas límite para el prensado uniaxial son $\epsilon_r = 0$, $\epsilon_a = \epsilon_v$, y el tensor de tensión es anisotrópico por lo que se define al proceso como una consolidación anisotrópica.

Un fenómeno indeseable en el prensado uniaxial es la fricción, ya que esta disminuye en parte el valor teórico de la consolidación anisotrópica. Las tensiones anisotrópicas en el prensado uniaxial crean una estructura compresiva de forma anisótropa. El tensor desviador es distinto de cero lo que induce a un comportamiento de expansión o dilatación.

El prensado uniaxial de una sustancia elástica lineal bajo presión lateral K_0 . Muestra un comportamiento según la ley de Hooke de acuerdo con la experiencia que los ensayos lo han demostrado. Por lo que este comportamiento queda definido por la siguiente ecuación:

$$\epsilon_\alpha = \frac{1 - 2\nu}{E_v} (1 + 2 K_0) \sigma_\alpha \tag{Ec. 4.8}$$

E_v es el módulo de elasticidad en la dirección axial o vertical. Para la deformación elástica, la estructura no cambia por lo que E_v es constante.

La deformación referida al desplazamiento de las partículas es irreversible. Debido a que la estructura de la biomasa cambia por lo E_v ya no es constante, y depende de la tensión σ_a la cual define su intensidad de la alteración estructural, la cual varía según la siguiente ecuación.

$$\sigma_{Bt} = \epsilon E \tag{Ec. 4.9}$$

$$d \left(\frac{dh}{h_0} \right) = \frac{d\sigma}{E_0} \tag{Ec. 4.10}$$

Donde:

E_0 : módulo volumétrico de elasticidad (MPa)

$\sigma = \sigma_s$: esfuerzo promedio (MPa)

h_0 : altura inicial de la muestra (mm)

dh : diferencial de altura (mm)

En la Ec.4.10 se plantea para el prensado uniaxial la condición de $\sigma = \sigma_\alpha$

Por lo que, al plantear el desarrollo matemático de la ecuación y las condiciones de contorno, se obtiene la siguiente ecuación con dos tipos de curvas de compresión:

- A. En casos de cambios lineales en el módulo de deformación E_0' en conjunto con el aumento de tensión σ para $n'=1$ siendo n el exponente que describe la intensidad de los cambios en las estructurales. La curva de compresión está definida por la siguiente ecuación.

$$\Delta e = C (1 - e_0) \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad \text{Ec. 4.11}$$

Donde:

C: coeficiente de compresibilidad

$\Delta e = e_0 - e$: cambio en la porosidad

e_0 : valor inicial de porosidad para $\sigma = \sigma_0$

El caso de $n'=0$ representa una estructura sin cambios. Para los materiales particulados o granulados se considera un $n' > 0$.

- B. En casos donde $n' \neq 1$, podemos sustituir $C/(1-n') = C_0$ y $n'-1 = n$ obteniendo:

$$\Delta e = C_0 (1 - e_0) \left[1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^n \right] \quad \text{Ec. 4.12}$$

Aunque las curvas descritas por las ecuaciones anteriores se contradicen entre si por sus planteos en función de la porosidad, ambas convergen de forma similar para cuando n' aproximándose a 1. Por lo que la Ec. 4.11 se aplica para materiales frágiles o de baja plasticidad y la ecuación 4.12 se aplica para materiales de alta plasticidad.

Se puede apreciar que al tomar valores de $n'=1$ en la Ec. 4.11 esta es más representativa para predecir el crecimiento de la resistencia del material particulado ante una presión aplicada, ya que el contacto deslizante entre las partículas se vuelve preponderante, ya que la carga aplicada cambia significativamente la estructura de la sustancia (biomasa). Por lo que esto es aplicable a los polvos frágiles (aserrines) que tengan un gran factor de deslizamiento que describa el contacto que se rompen y se regeneran entre sí, este fenómeno se presenta principalmente a bajas presiones y cuando se trabaja con sustancias con estructuras anisótropas como por ejemplo; madera, aserrín y virutas. Para este tipo de biomazas los enlaces por contacto no crecen significativamente bajo la acción de la presión, lo que resulta en una sustancia de estructura compresiva.

En el caso de la Ec. 4.12 para $n < 0$ caracteriza a los casos de un mayor crecimiento de la resistencia estructural ante la compresión. Causada por un aumento gradual en los pares de contacto de las partículas. Por lo que esta ecuación se emplea para metales blandos en que se encuentra en forma de polvo o de partículas isométricas, los cuales se suelen trabajarse a altas presiones donde el óxido superficial se rompe y el coeficiente de fricción intergranular aumenta bruscamente (Križan, 2014)

Teoría del prensado o briqueteado de desplazamiento positivo:

El estudio del prensado uniaxial se basa en el prensado de desplazamiento positivo como una de las tecnologías básicas para la conformación o formación volumétrica en frío. Cuando se conforma la briqueta por presión, el material se vierte en una cavidad cerrada donde se comprime la biomasa. En este proceso las características y parámetros de la biomasa tienen una gran incidencia en este proceso. Por lo que se emplean los siguientes criterios para el diseño del proceso.

La teoría del briqueteado de desplazamiento positivo y las relaciones de presión dentro de la cámara de prensado se describe a continuación para el caso más simple, donde la cámara de prensado está construida de cuatro partes como en la siguiente figura.

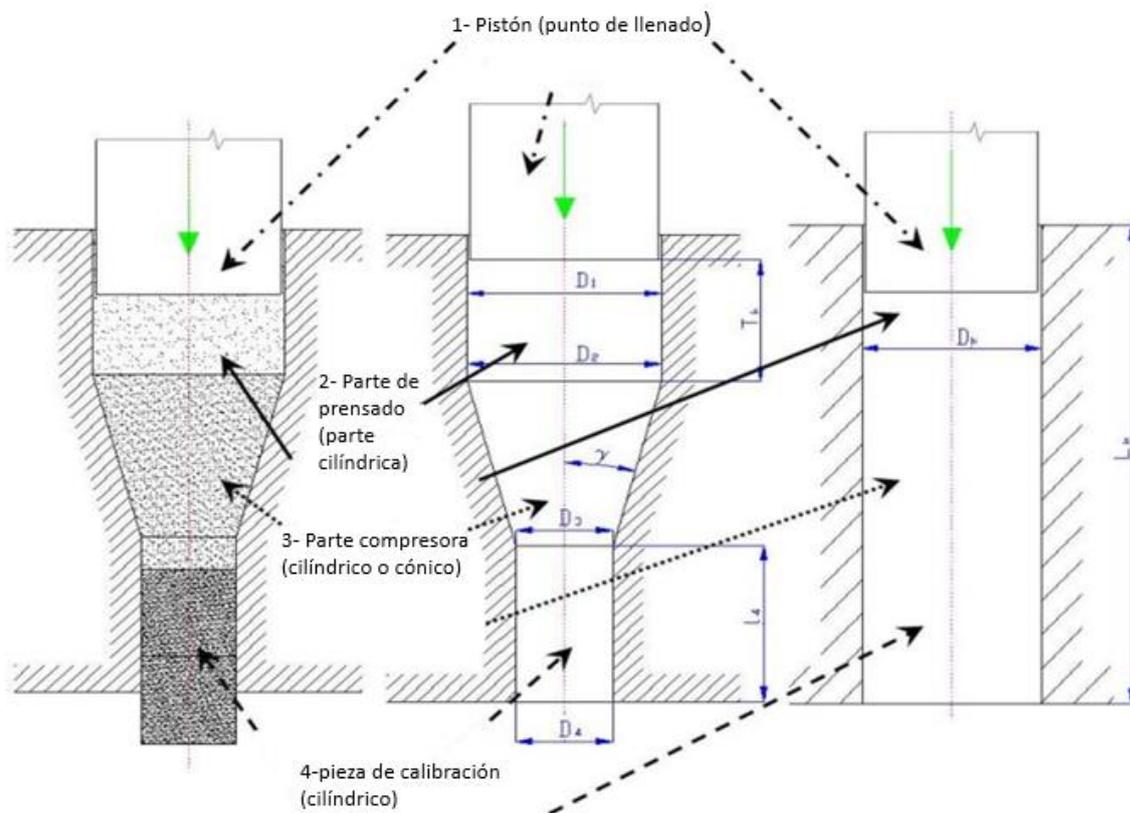


Figura 4.17: Partes básicas y dimensiones principales de la cámara de prensado a.) Cónico; b.) cilíndrico (Storožev y Popov, 1978).

En la Figura 4.17 se muestra las distintas zonas del proceso de briqueteado, en la parte superior se encuentra la boca de ingreso de la biomasa zona 1, luego por la acción del pistón se inicia la compresión en la zona 2. En la zona 3 (puede ser cónica) se conoce como reductor, en esta zona de la cámara de prensado se realiza la compactación o densificado básico debido a la fuerza del pistón y a la presión generada contra la cámara. En la última zona de la cámara de la briqueteadora se encuentra la sección calibración o terminación en la que se mantiene la presión durante un periodo de tiempo con aportes de calor externo para reducir los efectos de dilatación, y

Estos cambios por dilatación se deben al retroceso en los límites elásticos del material. La magnitud y grado de este efecto depende de los parámetros de prensado, temperatura y presión además de las propiedades del material como la humedad y granulometría.

Por lo que en consecuencia se debe asegurar la estabilización de la briqueta para reducir los efectos de la dilatación. Por lo que procurar el tiempo de reposo a presión y temperatura las briquetas se consideran estables o estabilizadas.

Durante la dilatación las briquetas cambian de tamaño, esto se acrecienta para los casos donde se tiene un excedente en el contenido de contenido de humedad. Lo que resulta en un agrietamiento de la briqueta reduciendo sus propiedades mecánicas, por lo que en el diseño y regulación del proceso de briqueteado se debe considerar la saturación de humedad del aire. Ya que este exceso de humedad demanda un periodo de calibración más largo en proporción al caso de cuando se trabaja con niveles adecuados de humedad y granulometría.

En la siguiente figura se muestra las distintas clases de cámara de prensado que se utilizan habitualmente en la construcción de briqueteadoras. Estas pueden ser cilíndricas o cónicas o una combinación de ambas. Por lo que en la industria se utilizan varios tipos de combinaciones de estos tipos de cámara como se muestra en la siguiente.

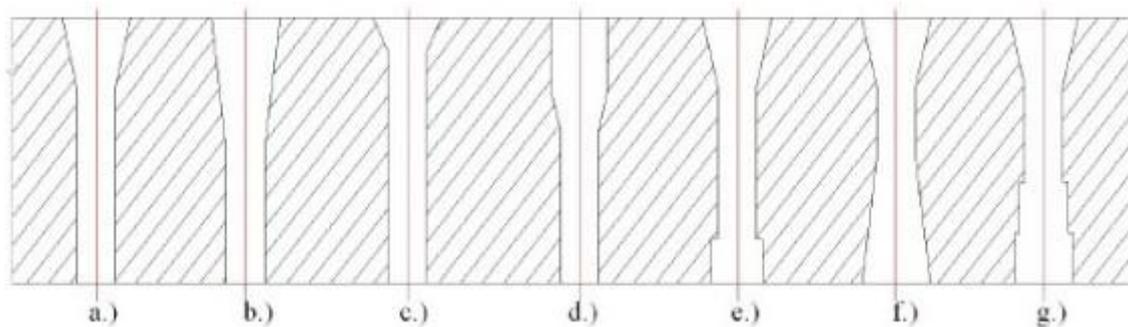


Figura 4.18: Ejemplos de diferentes secciones transversales de cámara: a.) Clásico; b.) profundo; c.) poco profunda; d.) bien; e.) cilíndrico; f.) cónico; g.) paso (Pérez, 2009).

La presión que se desarrolla en cada una de las distintas zonas se calcula de forma diferente debido a que esta presión depende de la geometría. Por lo que las relaciones de compresión se calculan por separado para una de las zonas 2, 3 y 4.

La presión necesaria para la conformación de la briqueta se calcula como la suma de las presiones que actúan en la cámara de la briqueteadora. Las siguientes ecuaciones son válidas para cámaras de prensado cónicas, las cuales se realizan por el desarrollo de la teoría del prensado directo.

$$p_4 = \sigma_k \frac{4\mu L_4}{D_4} \text{ (MPa)} \quad \text{Ec. 4.13}$$

donde:

p_4 : Presión generada en la zona de calibración

μ : coeficiente de fricción

σ_k : límite elástico del material MPa

D_4 : diámetro de la parte de calibración de la cámara de prensado mm

L_4 : - longitud de la parte de calibración mm

El cálculo de la distribución de presión en la zona de prensado o zona cónica está dado por la siguiente ecuación, siendo esta válida para cámaras con un ángulo γ pequeño.

$$p_3 = \sigma_k \left(1 + \frac{\mu + 0,5}{2 \gamma} \right) \cdot \ln \frac{S_2}{S_4} + p_4 \quad (MPa) \quad \text{Ec. 4.14}$$

donde:

γ : conicidad de las paredes en la zona 3 °

S_2 : área de sección transversal de la salida de la parte de prensado mm²

S_4 : área de sección transversal de la entrada en la parte de calibración mm²

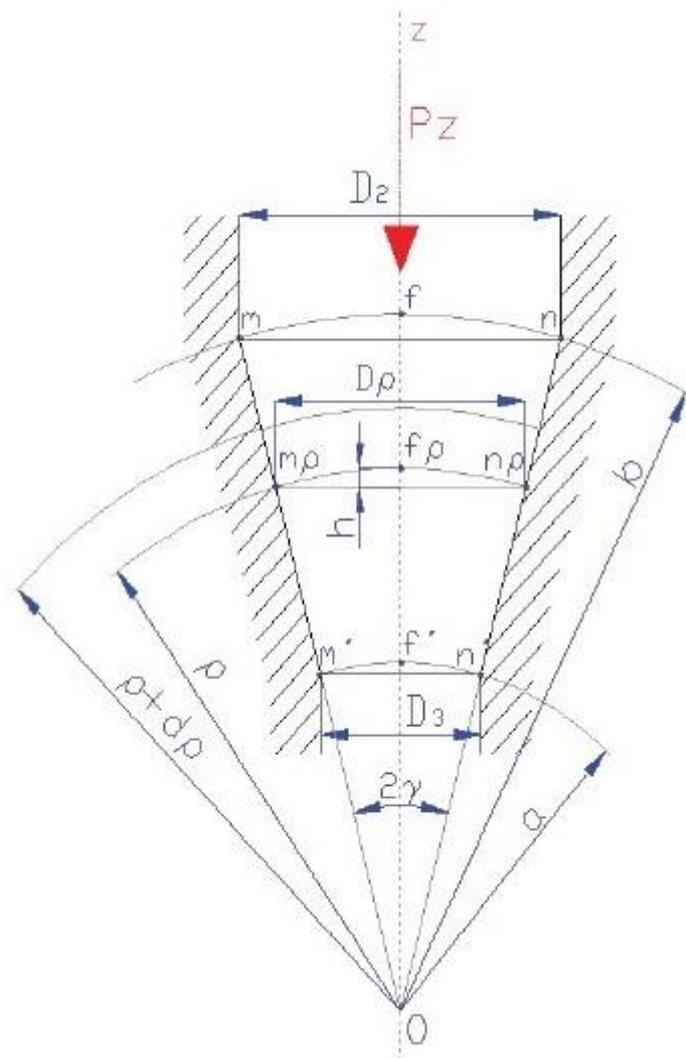


Figura 4.19: Coordenadas esféricas que describen las interfaces superior e inferior de la concentración de deformación plástica en una cámara de prensado cónico (Storožev y Popov, 1978).

El estudio del proceso de prensado se realiza por medio de un sistema de referencias esférico. Existe una interfaz entre el material que presenta una deformación plástica, esta interface

comienza en la superficie m-f-n en la cual se tiene un ángulo de límite de 2γ como se aprecia en la figura anterior;

En el caso que el diámetro D_3 sea igual a D_4 los autores de estos postulados Storožev y Popov toman como hipótesis que la deformación ocurre en el radio ρ . Por lo que trabajan con un volumen elemental dV , el cual está bordeado por las superficies esféricas con un radio que satisface los valores de ρ y $\rho + d\rho$ y la superficie de la cámara cónica.

En las zonas de concentración de deformación plástica del material presentan una inconsistencia o falta de correlación entre el tamaño del grano y la aparición de tensiones residuales. En la práctica, la concentración de deformación se da en la zona 2 de prensado. Este se origina debido a que no existen prácticamente deformación plástica en la zona 2 de presión, por lo que podemos suponer que el material se desplaza como un todo es decir una sola masa o sólido y el cual está sometido a una presión elástica igualmente distribuida. Por lo que Storožev y Popov establecen que en condiciones de fricción favorables las presiones en las paredes de la cámara de alimentación son mucho más bajas que la presión axial.

Las fuerzas de fricción disminuyen linealmente con respecto a una longitud de carrera del pistón T_k más corta. Los cálculos de estos efectos se realizan por medio del equilibrio de trabajos o equilibrio de esfuerzos.

Por lo que en este análisis se trabaja bajo la ley o fundamento de la relación de las deformaciones plásticas, por lo que se plantea en el análisis del equilibrio de fuerzas externas que actúan en caminos específicos y el trabajo de las fuerzas internas como $A_{out.} = A_{int.}$

Por lo que para este caso el trabajo A_3 (trabajo desarrollado en la zona 3) se ajusta a la suma de los trabajos resultantes de la presión en la interfaz superior.

Para este caso, el trabajo A_3 se ajustó a la suma del trabajo de la fuerza resultante F_3 de la presión activa en la interfaz superior donde se concentra la deformación plástica más el trabajo de deformación total para cambiar la forma de AD más el trabajo de las fuerzas de fricción de contacto en la superficie cónica AF y el trabajo necesario para superar la resistencia en la zona de calibración 4.

La presión sobre el pistón en la zona 2 de la cámara se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$p_2 = p_3 + \sigma_k \frac{2 T_k}{D_2} \quad (MPa) \quad \text{Ec. 4.15}$$

donde:

T_k : distancia entre el pistón y el extremo inferior de la zona de presión en la cámara mm

D_2 : diámetro de la zona de presión mm

La ecuación resultante para el cálculo de la presión de prensado para el proceso de briqueteado es la siguiente. La cual se obtiene a partir de la sustitución en la Ec. 4.15 en la Ec. 4.16 de p_3 y de la Ec. 4.14 por p_4 en la Ec. 4.16 donde se obtiene la siguiente ecuación.

$$p = \sigma_k \left(\ln \frac{S_2}{S_4} + \ln \frac{S_2}{S_4} \frac{\mu + 0,5}{2 \gamma} + \frac{2 T_k}{D_2} + \frac{4\mu L_4}{D_4} \right) \quad (MPa) \quad \text{Ec. 4.16}$$

Por lo que con esta ecuación se puede diseñar el proceso de briqueteado, en búsqueda de la determinación de las presiones óptimas para el proceso.

Modelo matemático de las relaciones de tensiones en la cámara:

En este modelo matemático describe las relaciones de presiones dentro de la cámara de prensado vertical uniaxial. Por lo que se plantea el uso de un tapón de contrapresión al final de la cámara el que evita la pérdida de material al llenar la cámara en la parte inferior como se muestra en la siguiente imagen.

Horrighs plantea la relación de presión dentro de la cámara de prensado entre el pistón y el obturador para un elemento de material prensado de longitud dx sin considerar el peso de las briquetas durante el proceso de densificado. Por lo que a partir de las relaciones de presión que se desarrollan dentro de la cámara, es posible expresar la ecuación para el equilibrio de la fuerza como la siguiente ecuación:

$$[p_m - (p_m + dp_m)] \frac{\pi D_k^2}{4} - \mu p_r \pi D_k dx = 0 \quad \text{Ec. 4.17}$$

En los presionar materiales a granel se considera generalmente que se trabaja con presiones anisotrópicas, por lo cual las presiones más altas son perpendiculares al eje de desplazamiento. La relación entre las tensiones primarias radial σ_r y las axial σ_m se define como el coeficiente de presión residual, o la relación de presión horizontal λ . Para los materiales disgregados λ tiene valores entre 0 a 1.

$$\lambda = \frac{\sigma_r}{\sigma_m} = \frac{p_r}{p_m} \quad \text{o} \quad p_r = \lambda p_m (MPa) \quad \text{Ec. 4.18}$$

Donde:

p_k : presión axial del pistón MPa

p_g : contrapresión en la carcasa de la prensa MPa

p_r : presión radial MPa

p_m : presión axial en el obturador MPa

D_k : diámetro de la cámara de prensado mm

μ : coeficiente de fricción

H : longitud del tapón comprimido mm

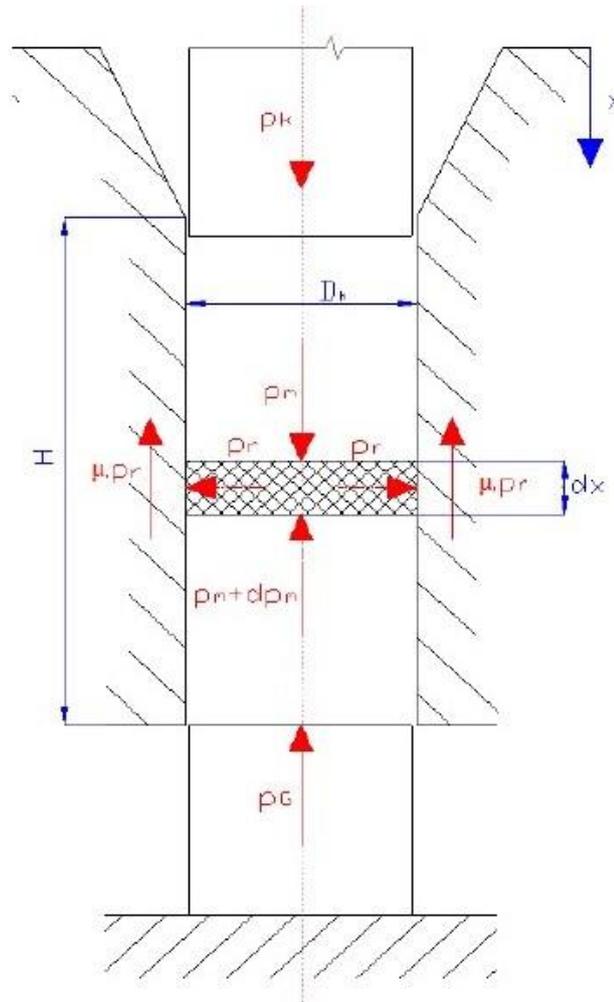


Figura 4.20: Distribución de presión en la cámara de prensado en una prensa vertical uniaxial (Horrighs, 1985).

Después de sustituir la Ec. 4.18 en la Ec. 4.17 y aplicar las siguientes condiciones de contorno: $x = 0$ para $p_m = p_k$, y para $x = H$, $p_m = p_g$, se obtiene la siguiente relación (Horrighs, 1985):

$$p_k = p_g e^{\frac{4\lambda\mu H}{D_k}} \quad (MPa) \quad \text{Ec. 4.19}$$

La ecuación anterior muestra la relación entre la presión del pistón p_k y la contrapresión que actúa sobre el material prensado p_g . Esta relación puede usarse para cámaras abiertas donde la contrapresión se genera, por la fricción estática entre el material y las paredes de la cámara.

Por lo que, a partir de esta relación, podemos determinar la magnitud de la contrapresión necesaria para la conformación de la briqueta y determinar la fricción estática en la columna de la prensa.

Por lo que la Ec. 4.19 se puede expresar de la siguiente manera, obteniendo los valores de p_k (presión del pistón) para un dada p_G (contra presión de la cascara):

$$p_G = p_k e^{\frac{4\lambda\mu H}{D_k}} \quad (MPa) \quad \text{Ec. 4.20}$$

Según el análisis de (Križan, 2014) en base a su experiencia, no basta con la determinación de la presión del pistón, ya que en el proceso una vez quitada la carga del pistón se generan tensiones residuales que afectan al proceso de densificado.

Para el cálculo de la presión después de quitar la carga Horrigths planteo el siguiente desarrolló, en el cual contempla las presiones residuales que se generan en el interior del espécimen $p_{r,r}$.

Esta presión residual causa que las briquetas se fracturen. Por lo que es fundamental encontrar la relación entre la presión de prensado y la longitud de calibración para que estas presiones no sean excesivas. Esto se debe a que luego de quitar el tapón inferior la tensión radial se vuelve dominante en lugar de la axial, lo que significa que el cambio en la dirección de la tensión debe ocurrir durante la descarga de la presión. Por lo que se debe cuidar cuantificar esta presión residual, con el fin de limitarla para obtener un proceso efectivo.

Para poder extraer la briqueeta de la cámara de prensado su resistencia f_c debe ser mayor que las tensiones o presiones radiales residuales $\sigma_{r,r}$ o $p_{r,r}$. Ya que si se cumple esta condición está bien sacar la briqueeta de la parte de calibración.

El comportamiento de la presión axial y radial se plantean de acuerdo a la compactación inicial de la fase de prensado en función de los valores de los estados de descarga y sobrecarga según lo describen las siguientes ecuaciones:

A. Para presionar el tapón en el rango de plástico, se cumple lo siguiente ecuación:

$$p_r = \lambda p_m \quad (MPa) \quad \text{Ec. 4.21}$$

B. Para el movimiento del tapón ya compactado en el rango elástico:

$$p_r = A p_m + p_{r,r} \quad (MPa) \quad \text{Ec. 4.22}$$

Donde la constante A representa la constante del material la cual cuantifica las propiedades elásticas en el material prensado.

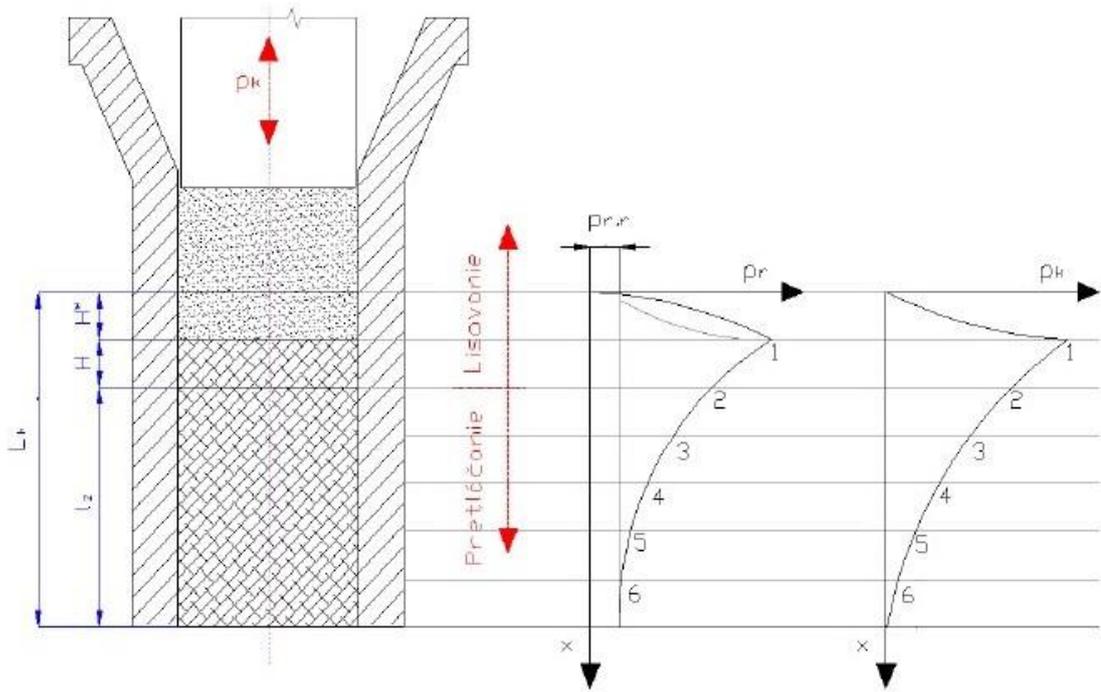


Figura 4.21: Comportamiento de la presión radial y axial (Horrigs, 1985).

Según sea la presión en la fase de compresión, se puede evaluar las condiciones de equilibrio de la fuerza para cada punto del elemento material de estudio como se observa en la Figura 4.20. Por lo que se puede describir las presiones resultantes en la columna de prensado como se muestra en la Figura 4.21.

Por lo que al aplicar las condiciones de contorno para $x = L$ en la Ec. 4.23, podemos formular la relación entre la presión en el tapón uniforme para una la longitud de la columna l_z como se muestra en la siguiente ecuación:

$$p_m(x) = \frac{p_{r,r}}{A} \left(e^{\frac{4\mu A}{D_k}(1-x)} - 1 \right) \quad (MPa) \quad \text{Ec. 4.23}$$

Después de sustituir la Ec. 4.20 en la Ec. 4.23, obtenemos la siguiente relación:

$$l_z = \frac{D_k}{4\mu A} \ln \left(A \frac{P_G}{p_{r,r}} + 1 \right) \quad (mm) \quad \text{Ec. 4.24}$$

La longitud total del canal de prensado l_k esta dada por la suma de las longitudes de la columna l_z y la longitud del tapón H .

La longitud l_k se puede calcular directamente con la siguiente ecuacion debido a que $L_z \gg H$

$$L_k = \frac{D_k}{4\mu A} \ln \left(A \frac{P_G}{p_{r,r}} + 1 \right) \quad (mm) \quad \text{Ec. 4.25}$$

Por lo que para este cálculo se debe conocer la longitud del tapón H, la densidad que se desea alcanzar, las dimensiones de la cámara de prensado, las propiedades del material y las presiones conocidas como la p_k y las constantes del material μ , λ , A, a y p_r , r. (Križan, 2014)

Modelo matemático del "Caso elástico puro":

En este apartado se describe el caso en el que las deformaciones del material son elásticas dentro de la cámara de prensado, por lo que las siguientes expresiones se desarrollan las variaciones de presión en tapón, de forma de un disco plano con espesor dx y radio r.

En el centro del disco la presión es igual a la presión de la prensa y el cambio diferencial en la presión dp_m promedio de la siguiente ecuación:

$$dp_m = \frac{dF_m}{\pi r^2} \therefore dF_m = dp_m \pi r^2 \tag{Ec. 4.26}$$

La fuerza de fricción dF_μ que actúa sobre el área diferencial $2 \pi r dx$ esta dada por la ecuación:

$$dF_\mu = \mu dF_N = \mu p_N 2 \pi r dx \tag{Ec. 4.27}$$

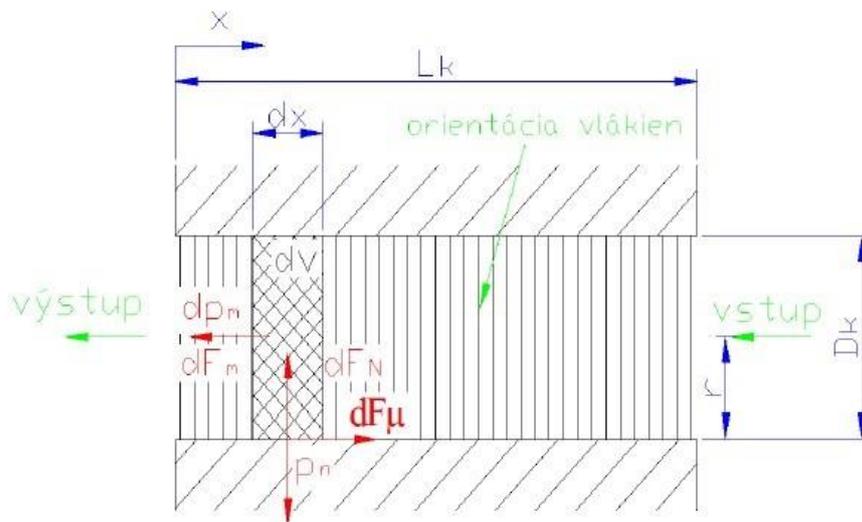


Figura 4.22: Esquema de las fuerzas y presiones que actúan sobre un elemento de volumen dV dentro del canal de prensado (Holm & et al., 2006).

Donde:

- p_m : presión de presión sobre el tapón MPa
- F_m : F_m - fuerza de presión sobre el tapón N
- F_N : fuerza normal (radial) N
- F_μ : F_μ - fuerza de fricción N

- p_N : presión normal (radial) MPa
- D_k : diámetro de la cámara de prensado mm
- r : radio de la cámara de prensado mm
- L_k : longitud de la cámara de prensado mm

Las siguientes relaciones se basan en suponer que la biomasa tiene un comportamiento ortotropico, es decir que las propiedades son independientes entre las direcciones en relación con las fibras del material.

Por lo que Holm 2006 plantea que las fibras están orientadas perpendicularmente a la dimensión mayor de la cámara de prensado, a la vez que se plantea que los materiales cumplen con la ley de Hooke entre la tensión y la deformación.

Por lo que la tensión causada por la expansión se considera positivo, mientras que la contracción se considera negativa.

Si se aplica una fuerza a un elemento ya sea de expansión o compresión y esta no se pierde esto se conoce como comportamiento elástico. La relación entre las fibras paralelas y perpendiculares y la deformación radial se describe según el coeficiente de Poisson ν_{RL} . Este coeficiente se calcula a partir de la relación de la deformación longitudinal y radial. Esto considerando al material en su sección transversal.

$$\nu_{RL} = \frac{\text{Extensión longitudinal } \frac{dv}{dr}}{\text{Extensión Radial } \frac{du}{dx}} \quad \text{Ec. 4.28}$$

Por lo que en el caso de restricciones espaciales los gránulos que se encuentran en el canal de prensado no pueden expandirse de forma radial, por lo tanto, el alargamiento o dilatación se manifiesta como una tensión en las paredes del canal de prensado. Por lo que según la ley de Hooke al considerar las fibras en las direcciones lateral y radial se puede escribir de la siguiente ecuación que describen el comportamiento del elemento:

$$F_L = E_L S_r \frac{\Delta r}{r} (N) \quad \text{Ec. 4.29}$$

$$F_r = E_R S_k \frac{du}{dx} (N) \quad \text{Ec. 4.30}$$

Donde:

- E_L : módulos de elasticidad en las direcciones lateral de los haces de fibras
- E_R : módulos de elasticidad en las direcciones radial de los haces de fibras
- S_r : área de la cubierta lateral del elemento

S_k : área de la sección transversal del elemento.

En esta ecuación se considera las condiciones de que la P_r es igual a la P_N y P_k es igual P_m se obtiene la siguiente ecuación de la presión

$$P_N = G_e \nu_{RL} P_m \quad \text{Ec. 4.30}$$

donde G_e es la relación entre el módulo de elasticidad en las direcciones lateral y radial de los haces de fibras.

Por lo que al igualar la Ec. 4.26 y Ec. 4.27 obtenemos la siguiente ecuación al conciderar $dF_m = dF_\mu$:

$$dp_m \pi r^2 = \mu P_N 2 \pi r dx \quad \text{Ec. 4.31}$$

Por lo que al introducir la ecuación anterior en la Ec. 4.30 la y plantear la solución para $x - x_0 = L_K$. Obtenemos la siguiente relación resultante la cual da la relación del cambio de presión para el tapón en la cámara.

$$P_m = P_{m0} e^{\frac{2\mu G_e \nu_{RL} L_K}{r}} \text{ (MPa)} \quad \text{Ec. 4.32}$$

Donde es P_{m0} presión inicial en el tapón:

Modelo matemático-físico del prensado, en la "Composición del material de la briqueta":

Este modelo físico-matemático refleja el comportamiento del material comprimido según la experiencia de la investigación, este modelo fue diseñado por Kádárová (2005). En este modelo se muestra el grado de complejidad que conlleva este tipo de proceso.

Este modelo es solo válido para un cierto rango de presión e intervalo de temperatura. Ya que este modelo fue diseñado en función de la experiencia práctica en los ensayos definidos.

$$\rho = A_K (p + B) e^{kp(p_{max}-p)} \quad \text{Ec. 4.33}$$

donde:

ρ : densidad resultante kg.dm^3

A_K : coeficiente calculado en base a resultados experimentales que caracterizan la forma y la curvatura de la curva

B : material constante

kp : coeficiente relacionado con la presión, calculado a partir de resultados experimentales

p_{max} : coeficiente elegido en base al monitoreo de la presión (presión máxima) MPa

p : presión de prensado MPa

Este modelo caracteriza la relación entre la densidad y la presión de prensado. Por lo que para cada nivel de temperatura es necesario calcular los coeficientes según la experiencia experimental. Por lo que el coeficiente kp se define en base a los ensayos.

De los ensayos que definieron este modelo se determinó que la presión de prensado efectiva máxima es de p_{max} 400 MPa.

Por lo que este límite de p_{max} marca el límite eficaz de presión en el proceso de briqueteado. Dando pie al planteo de la siguiente ecuación donde se introduce este límite físico.

$$\rho = A_K(p + B) e^{kp(400-p)} \quad \text{Ec. 4.34}$$

Según los diferentes ensayos el coeficiente constantes B toma los siguientes valores para las siguientes biomásas:

aserrín de abeto $\Rightarrow B = 96$

aserrín de roble $\Rightarrow B = 110$

paja $\Rightarrow B = 106$

tallos $\Rightarrow B = 221$

La constante B depende del contenido de sustancias volátiles. Marcando un límite en un 76% ya que, a partir de este porcentaje, su valor disminuye bruscamente. Este comportamiento ocurre de igual manera en función al contenido de celulosa con un valor límite del 48%.

De igual manera el coeficiente A_K se obtiene a partir de ensayos, pero este coeficiente también depende de la temperatura a la que se desarrolla el proceso. La constante kp es el coeficiente relacionado con la presión del proceso y es igual al coeficiente A_K este depende de la temperatura del material.

4.8. Valores óptimos de los parámetros industriales de briqueteado

En este punto se describirá y analizará los rangos óptimos de los parámetros industriales de briqueteado, con el fin de alcanzar los estándares de calidad óptimos. Entre estos parámetros se encuentran los parámetros tecnológicos del proceso es decir presión y temperatura de prensa, así mismo como los parámetros de la biomasa tanto la humedad como la granulometría.

Este análisis se basa solo en los parámetros industriales, ya que estos son los parámetros que se pueden medir, analizar, modificar y controlar de forma continua en un proceso industrial a gran escala de manera sostenible y económica. Ya que a los parámetros restantes que afectan al proceso de briqueteado no es posible su control de forma sostenible y económica en escalas industriales.

Por lo que se describirá los cuatro parámetros industriales enumerados anteriormente, ya que además de ser estos los que se pueden adecuar en un proceso industrialmente hasta sus valores óptimos, estos también son los más representativos industrialmente del proceso de briqueteado.

A continuación, se enumera a los parámetros generales que caracterizan al proceso de briqueteado:

- Contenido de humedad
- Granulometría del material
- Temperatura de prensado
- Presión e de prensado
- Tipo de material
- Temperatura del material
- Método de prensado
- Velocidad de prensado
- Tiempo de espera
- Forma de la cámara de prensado diámetro, longitud y forma (cónica)
- Material de la cámara, acabado (rugosidad de la superficie) y tratamiento de la superficie de la prensa
- Cámara y herramienta
- Contrapresión que actúa sobre el tapón comprimido
- Longitud del canal de enfriamiento

A continuación, se describirán a estos cuatro parámetros y los valores óptimos para el proceso de briqueteado eficiente.

4.8.1. Granulometría de la biomasa óptimas

La granulometría de la biomasa incide directamente en el proceso de densificado por lo que afecta directamente a la calidad del biocombustible. La granulometría muestra un comportamiento directamente proporcional ya que mientras más grande la partícula más energía se requiere para el densificado. Este comportamiento está unido a que las briquetas conformadas con partículas de mayor tamaño tienen menor homogeneidad y resistencia mecánica. Por lo que en el caso contrario las briquetas conformadas con partículas finas tienen una mayor uniformidad y densidad que las briquetas que se fabrican con partículas de mayor tamaño.

. Esto se debe a que al aumentar el tamaño de las partículas la fuerza de unión entre las partículas disminuye lo que resulta en una rigidez estructural menor, por lo que las briquetas se pueden fisurar o romper ante la acción de una fuerza mínima. Por lo que las briquetas conformadas con partículas de mayor tamaño se deben fabricar con una presión prensado de forma excesiva para obtener briquetas resistentes y densas.

Razón por la que para mejorar el proceso de densificado se debe aumentar la superficie de contacto entre granos lo que se logra al trabajar con granos más pequeños. Esto se puede apreciar en la siguiente figura en la cual muestra que mientras más pequeños los granos más homogénea y mejor la calidad o densidad tendrán las briquetas.

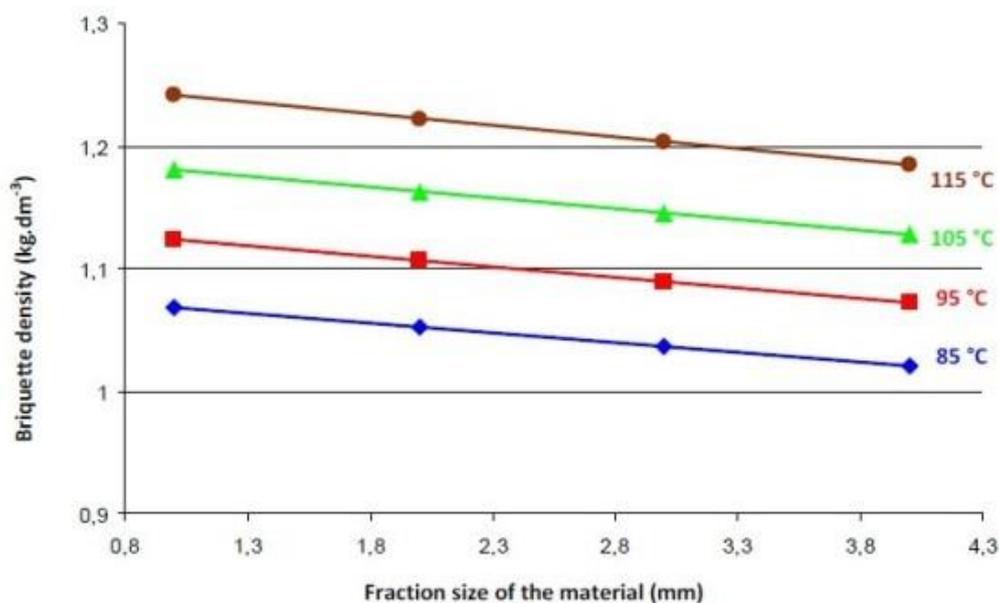


Figura 4.23: Densidad de briquetas con respecto al tamaño de la fracción de material a varias temperaturas de prensado, para aserrín de pino ($w = 10\%$; $p = 155 \text{ MPa}$) (Križan, Šooš & Vukelić, 2009; Križan & Matúš, 2008).

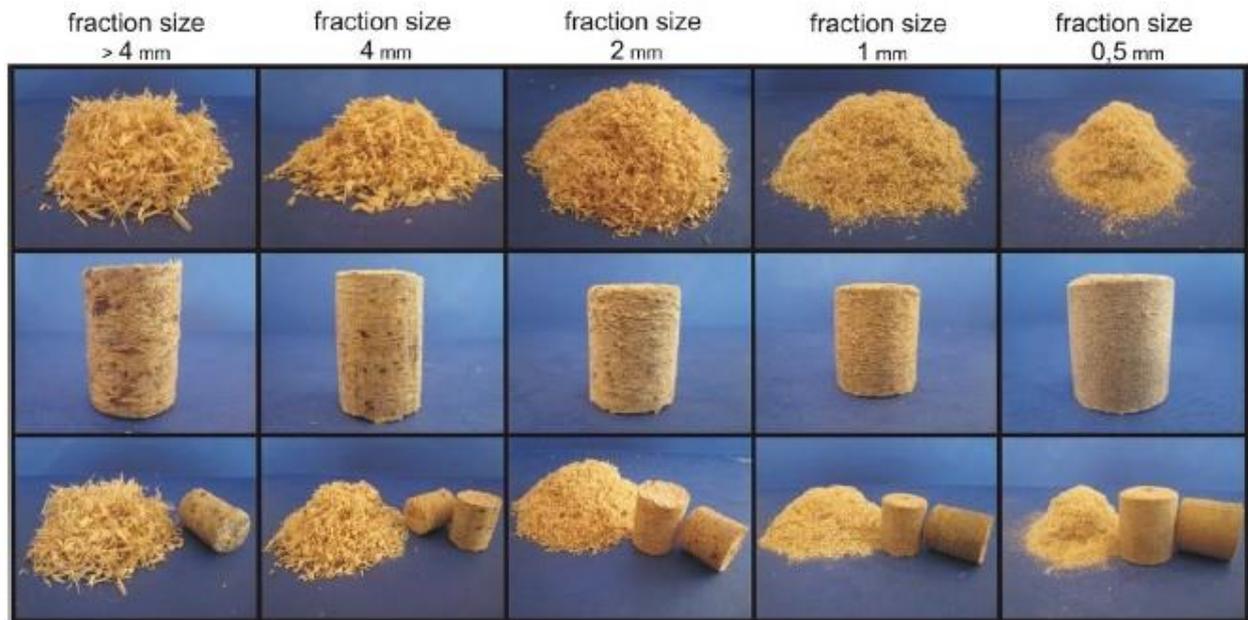


Figura 4.24: Comparación de briquetas de aserrín de pino fabricadas con diferentes tamaños de granulometría. ($p=159$ MPa, $T=25^{\circ}\text{C}$, $w_r=10\%$) (Križan, 2009).

Por lo que se considera que mientras más pequeña la granulometría es mejor para el proceso de briqueteado ya que como se ve en la figura anterior a menor granulometría mayor densidad tienen las briquetas independientemente de la temperatura de prensado. Por lo que el rango óptimo de este parámetro lo determina el límite técnico económico del gasto energético en adecuar la biomasa a la granulometría óptima que cumpla con las condiciones de calidad. Es decir, una vez regulado los otros tres parámetros industriales se reduce el tamaño del grano hasta dar con la calidad deseada, ya que este parámetro es el que menor costo beneficio tiene en el proceso.

Por lo que se busca encontrar la granulometría adecuada para las diferentes condiciones briqueteado que no se puedan cambiar o solo cambiar en un rango determinado (presión, temperatura, humedad). No obstante, la granulometría toma valores de referencia bibliográficos entre 0,5 a 4 milímetros. (Križan, 2014).

En conjunto con lo descrito anteriormente de la conveniencia de trabajar con partículas pequeñas, la bibliografía recomienda trabajar con partículas superiores a 0,5 milímetros ya que las partículas muy pequeñas causan una fricción excesiva lo que conlleva a la producción de briquetas frágiles por la sobre temperatura y carbonización de las partículas. Estas partículas muy pequeñas suelen denominarse finos

4.8.2. Contenido de Humedad óptimo

El contenido de humedad de la biomasa es un factor crítico en el proceso de briqueteado ya que este permite que el proceso de briqueteado sea óptimo o no, debido a su gran incidencia en el proceso. Además, el contenido de humedad del biocombustible final debe estar en concordancia

con el reglamento normativo respecto del mercado donde se comercialice. Por lo que para asegurar el contenido de humedad final se debe trabajar con las variables de proceso y con el contenido de humedad inicial. En conjunto con la incidencia tanto en la fabricación como en los límites normativos, este es el único de los cuatro parámetros industriales que afecta al contenido neto de energía por unidad de peso de los biocombustibles, por lo que se debe tener los recaudos para que no afecte al contenido energético de los biocombustibles (este fenómeno se describe en la sección 3.10.2.

Poder calorífico.

Por esta razón desde mediados de siglo XX se estudia este parámetro para encontrar sus valores óptimos el prensado del aserrín de madera. En el 2007 Šooš determinó que estos valores son óptimos para el proceso entre el 8 y el 18% del contenido de humedad.

Ya que, si el contenido de humedad es muy bajo o alto, las partículas que conforman al biocombustible no se ordenan de forma consistente lo que resulta en una estructura inestable. Esto se debe a que el contenido de humedad tiene incidencia directa en la plastificación de la lignina contenida en la biomasa la cual es el aglutinante natural que contiene la biomasa.

Ya que al incrementar la temperatura en proceso de densificado la lignina se ablanda, cambiando del estado sólido a un estado plástico, este fenómeno depende del tipo de madera a densificar ya que la lignina se plastifica a diferentes temperaturas y en distintos porcentajes.

Este mecanismo fundamental para el conformado del biocombustible se ve afectado por el contenido de humedad, debido a que este contenido de humedad afecta a la transición de calor dentro del biocombustibles. Transmisión que es fundamental para la liberación y plastificación de la lignina, este fenómeno se puede apreciar en la siguiente figura.

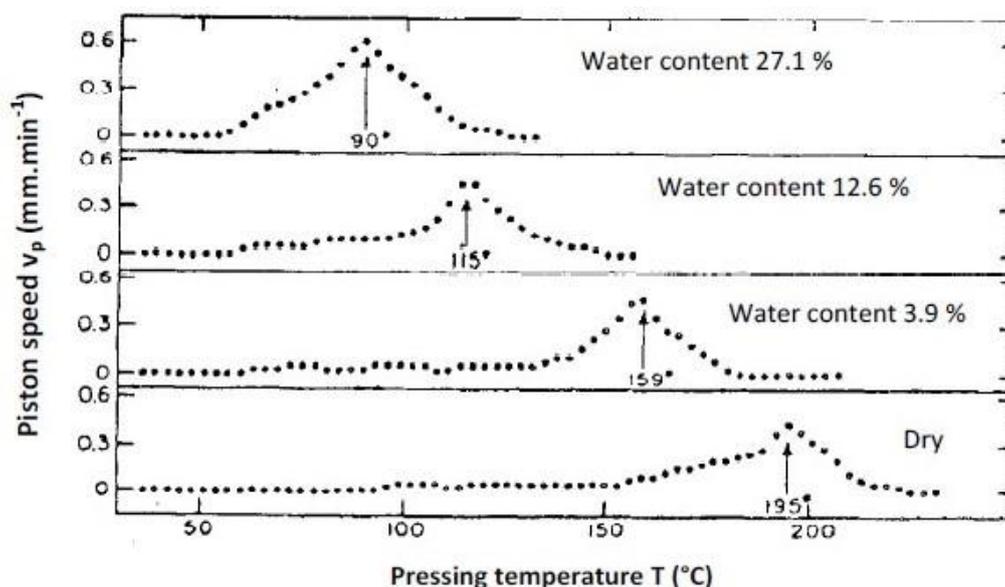


Figura 4.25: Efectos de la humedad sobre la temperatura de transición de la lignina en abeto a diferentes velocidades de pistón (Hejma y otros, 1981).

Por lo que la interacción entre la humedad, presión y temperatura definen la calidad del biocombustible producido. Ya que si la presión y temperatura son óptimas pero la humedad esta

fuera del rango de humedad la briqueta resultante será inestable y de baja densidad. Esto se debe a que el exceso de humedad saldrá de la briqueta en forma de escapes repentinos de vapor que fisuran o rompen la estructura de la briqueta. No obstante, si el contenido de humedad es muy bajo menor al 6% la briqueta requiere una mayor temperatura y una presión para obtener una briqueta de alta calidad, aunque esto es económicamente no rentable y corre el riesgo de carbonización.

Estos fenómenos descriptos anteriormente tienen incidencia en la calidad de briquetas incidiendo directamente en su principal parámetro de calidad físico, el cual es la densidad de la briqueta, esta variación en este parámetro se la puede observar en la siguiente figura.

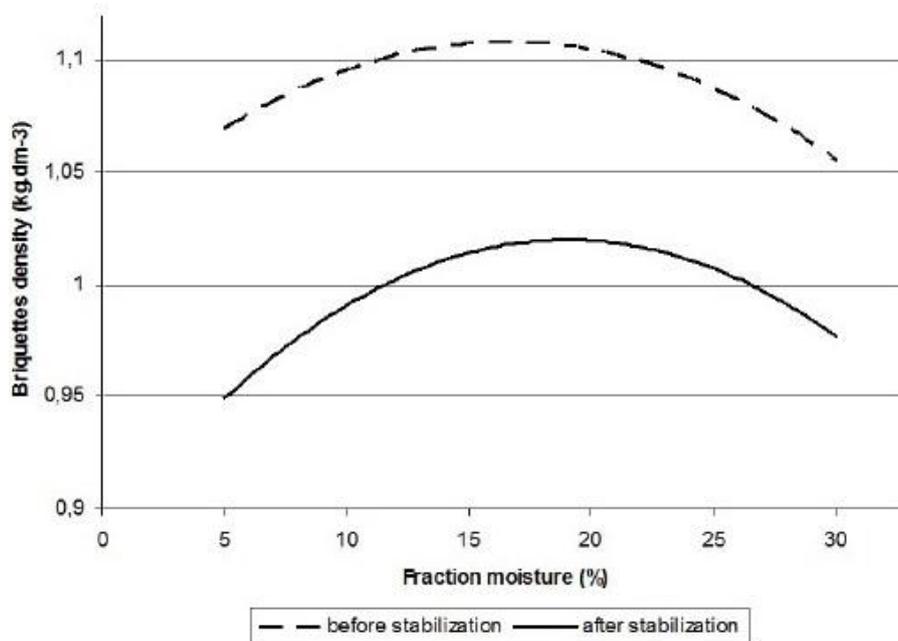


Figura 4.26: Densidad de briquetas, dependencia del aserrín de pino en el contenido de humedad en la fracción ($p = 286$ MPa; $L = 2$ mm) (Križan & et al., 2014; Križan & Matúš, 2008).

4.8.3. Presión de briqueteado

Al ser la presión de prensado uno de los parámetros críticos y más preponderantes en el proceso de briqueteado y tener una incidencia preponderante en la calidad final de las briquetas. Las presiones de trabajo que se utilizan habitualmente varían entre 55 a 355 MPa dependiendo de los requisitos de calidad y fines del biocombustible fabricado. Ya que estos pueden ser muy exigentes para la exportación de biocombustibles o mínimos para una producción autónoma.

En el proceso de prensado la biomasa sufre dos tipos de deformaciones la deformación elástica y plástica. Las deformaciones elásticas se revierten una vez que se quita la presión, en cambio las deformaciones plásticas, deforman de forma permanente al material. En conjunto con las deformaciones se produce un reordenamiento de las partículas dentro de la cámara de prensado debido a la acción de la presión.

Tanto la presión como la temperatura de proceso y el contenido de humedad del material tiene una relación directa sobre las deformaciones elásticas y plásticas. Esto al considerar que la granulometría o estructura de los granos es la que definen la resistencia al incremento de la presión. En la siguiente figura se puede apreciar como lo cambios de presión inciden en el conformado de las briquetas, al mantener constante los otros tres parámetros de producción industrial.



Figura 4.27: Briquetas con conformadas a diferentes presiones (Križan, Šooš y Vukelić, 2008).

En la figura anterior se puede apreciar los cambios en las briquetas para las diferentes presiones de conformado- En todos los casos se trabajó con biomasa proveniente de pino con un tamaño de fracción consistente o granulometría de $L = 2 \text{ mm}$, un contenido de humedad 10% y temperatura $55 \text{ }^\circ \text{C}$. Por lo que en la figura anterior se observa como la briqueta se vuelve más compacta o densa de mayor calidad a medida que aumenta la presión de conformado.

En la siguiente figura se cuantifica este aumento de la calidad o densidad de la briqueta en función de la presión para las diferentes temperaturas de trabajo. Razón por la cual a la presión de trabajo la define la calidad final requerida y el límite técnico económico. Porque por cada aumento de presión para obtener una mejor calidad se requiere un gasto mayor de energía y disponer de una planta de briqueteado más robusto.

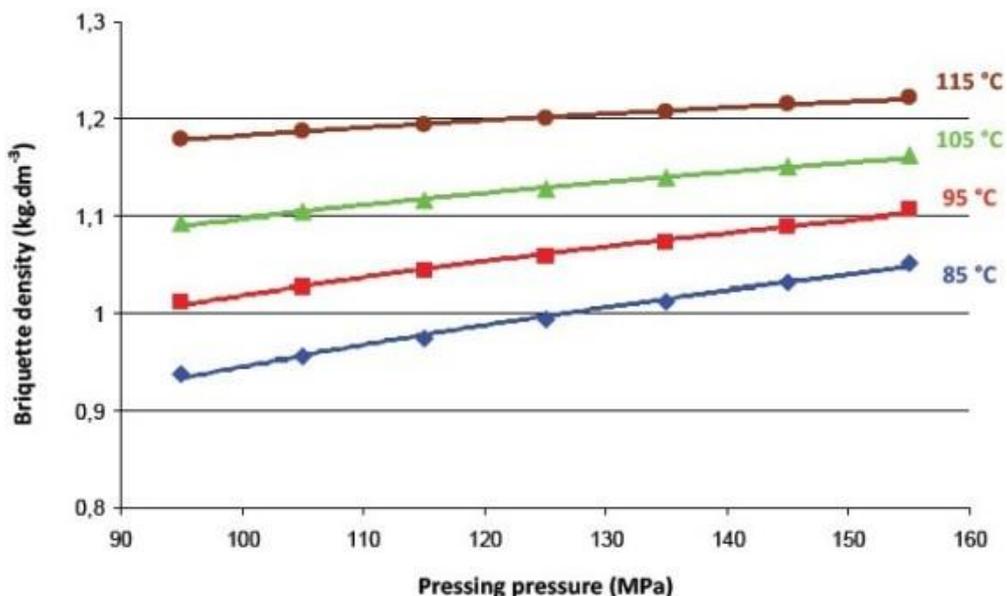


Figura 4.28: Dependencia de la densidad de briquetas con respecto a varias temperaturas de prensado para aserrín de pino ($w = 10\%$; $L = 2 \text{ mm}$) (Križan, Šooš & Vukelić, 2009; Križan & Matúš, 2008).

4.8.4. Temperatura de proceso

La temperatura en el proceso tiene incidencia significativa en la calidad y resistencia finales de la briqueta, ya que este parámetro del proceso es el que permite la liberación y plastificación de la lignina, la cual es el aglutinante natural que contiene las biomásas de origen forestales. Cuanta más lignina contenga la biomasa y más de esta se emplee en el proceso de briqueteado, las briquetas resultantes tendrán una mayor uniformidad y rigidez a causa de la unión que la lignina logra entre las fibras.

La bibliografía de referencia establece un límite y rango de temperaturas de trabajo, ya que un aumento de la temperatura excesivo no mejora la calidad de las briquetas como se muestra en la siguiente figura. Puesto que este exceso no solo evapora el contenido de humedad, sino que evaporan las sustancias aglutinantes y volátiles de la biomasa las cuales son térmicamente fundamentales para el proceso, ya que el contenido de humedad es quien trasmite el calor.

Por lo que se debe producir biocombustibles en un rango de temperatura la cual no sea excesiva no solo por lo descrito anteriormente, sino que existe el riesgo de combustión de la briqueta.

La lignina se plastifica aproximadamente 120 ° C (la temperatura específica depende de la biomasa). Por lo que al producir briquetas a temperatura ambiente se obtiene briquetas inestables que se fisuran o rompen. Razón por la que se puede apreciar en la Figura 4.29: Dependencia de la resistencia de la briqueta en la temperatura de prensado ($p = 100$ MPa, $w = 20\%$, $L = 1$ mm) (Sitzmann y Buschhart, 2009). como la resistencia a la compresión de las briquetas aumenta con el incremento de la temperatura, hasta el un pico de resistencia defino por los contras efectos de dicho aumento de temperatura.

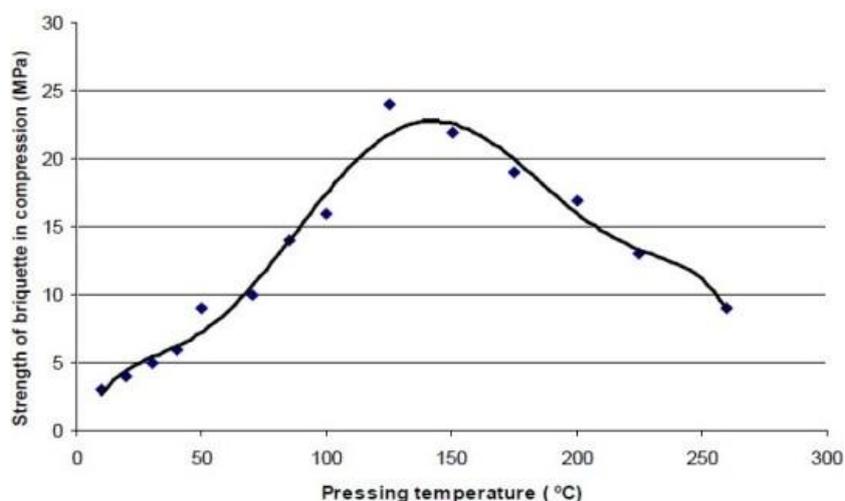


Figura 4.29: Dependencia de la resistencia de la briqueta en la temperatura de prensado ($p = 100$ MPa, $w = 20\%$, $L = 1$ mm) (Sitzmann y Buschhart, 2009).

Además, a esto contra efectos descritos anteriormente un calentamiento excesivo o sobrecalentamiento va en contra de la calidad de la briqueta, ya que la biomasa forestal cambia sus propiedades físicas y químicas a causa de este. Una señal de este cambio de características es el

color ya que las altas temperaturas los elementos que componen a la estructura de la biomasa se descomponen en sus elementos base. Esto se debe a que la madera consiste en celulosa, lignina y hemicelulosas. La celulosa crea la estructura primaria, mientras que la lignina y las hemicelulosas trabajan sobre esta estructura. Por lo que la temperatura y humedad inciden y afectan a las sustancias que llenan esta estructura de celulosa al provocar que se ablanden y plastifiquen disminuyendo la calidad de la briqueta.

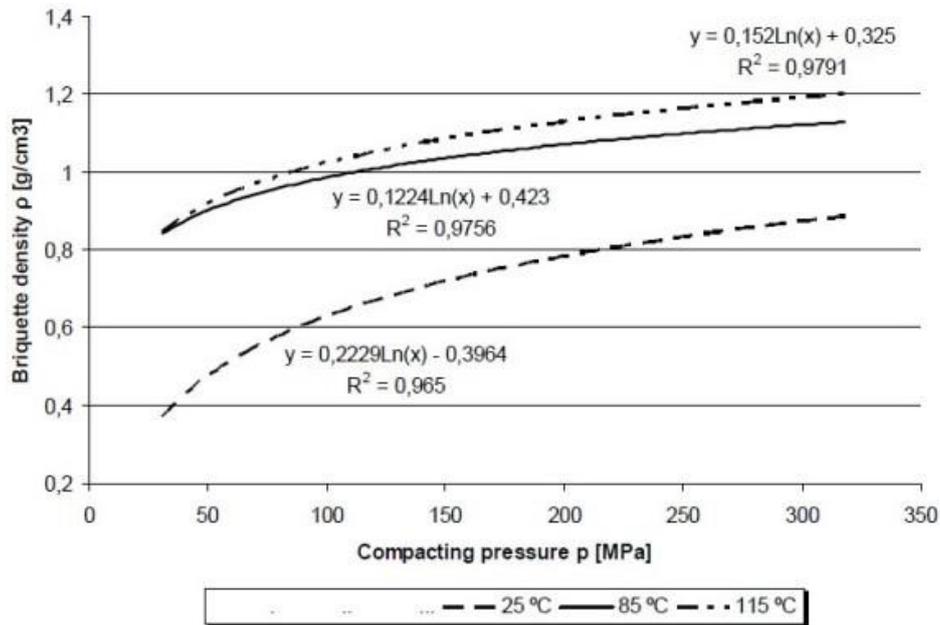


Figura 4.30: Densidad de briqueta en función de la presión de compactación y la temperatura.

En el proceso de prensado la presión y la temperatura actúan en conjunto. Por lo que, si se aumenta la presión, podemos reducir la temperatura requerida, y viceversa. Esto se puede observar en la figura anterior. Por lo que al trabajar a temperaturas más altas se obtiene la densidad deseada sin aumentar la presión. Industrialmente es más eficiente energéticamente aumentar la temperatura que la presión de prensado.

CAPÍTULO 5

CAMPAÑA EXPERIMENTAL: DISEÑO, ELABORACION Y ENSAYO

5.1. Introducción

En este capítulo se describe al equipo, metodología, ensayos y resultados del conformado de briquetas realizados en la presente tesis. En los cuales se busca determinar las condiciones óptimas de briqueteado para alcanzar los estándares de calidad que establecen las normas de referencia.

A continuación, se establecerá los rangos de trabajo y ensayo de los cuatro parámetros elegidos para estudiar experimentalmente la producción industrial de briquetas, debido a su trascendencia en los procesos industriales de fabricación.

Estos ensayos se realizaron con residuos de la industrialización de la madera de pino, de un aserradero de la capital de San Miguel de Tucumán La especie de pino es *Elliottii* provenientes de NOA.

5.2. Metodología de ensayo y equipamiento utilizado

Como se mencionó anteriormente el objetivo de los ensayos es determinar las mejores condiciones de briqueteado para obtener la calidad exigida por norma de forma eficiente. Por lo que se buscó en los ensayos y análisis la correlación entre los parámetros de producción industrial con los parámetros de calidad solicitados por la norma de referencia y las propiedades mecánicas.

El análisis de la variación de los cuatros parámetros con mayor trascendencia en la producción industrial de briquetas, los cuales son Presión y temperatura de briqueteado y la granulometría y humedad de la biomasa. Por lo que se analizó como estos inciden en la calidad de la briqueta al variar los parámetros de uno o en conjunto.

Este análisis se realizó en tres puntos definidos del rango de cada parámetro de producción industrial definido anteriormente por la bibliografía de referencia, ya que no es factible el análisis en una gran cantidad de puntos por razones, temporales, económicas y técnica. No obstante, al tomar los puntos extremos y puntos medio de los rangos establecidos por la bibliografía de referencia se

logró se observar, cuantificar y analizar el comportamiento de la calidad de la briqueta en función de los parámetros de fabricación industrial. En la Tabla 5.1 se muestran los valores de los cuatro parámetros de fabricación industrial utilizados en la campaña experimental. De cada combinación de valores se fabricaron tres especímenes con el fin de tener un promedio representativo de la calidad obtenida para cada combinación de los parámetros de fabricación, produciéndose 243 especímenes de briquetas. Además, se fabricaron una serie de briquetas fuera los parámetros indicados por la bibliografía con el fin de realizar un estudio de tendencia de la calidad fuera de los rangos anteriormente mencionados. Este estudio de tendencia se realizó para la temperatura 200°C y la presión de 300 MPa, para los tres valores de granulometría, pero solo para la humedad del 8%, por lo que en la campaña experimental se fabricó un total de 279 especímenes de briquetas.

Tabla 5.1: Valores de los parámetros industriales de fabricación utilizados en la campaña experimental.

Granulometría "G" mm	Humedad "W" %	Presión de Conformado "P" MPa	Temperatura de Conformado "T" °C
<1	8	90	75
<3	13	135	100
<8	19	190	125

5.3. Descripción de dispositivos e instrumentos de ensayo

En este apartado se describirá tanto a los dispositivos utilizados para la fabricación de las briquetas como al instrumental que se utilizó para los ensayos de la resistencia mecánica y medición de la densidad de las briquetas.

5.3.1. Matriz de fabricación de briquetas

La matriz ha sido diseñada para ser representativa en características y funcionamiento a la fabricación industrial de briquetas, por lo que se diseñó a la matriz con un diámetro de 40 milímetros de diámetro con un largo determinado por la relación de densidad final obtenida en el proceso, manteniendo una longitud mínima de 40 mm para las densidades menores. Esto se debe a que la longitud de las briquetas es inversamente proporcional a aumento de la densidad y al aumento de la presión y estos son variables para los distintos casos de ensayo.

El diseño de la matriz fue planteado buscando un elemento simple y robusto el cual pueda transferir el calor desde las resistencias externas al interior con la menor inercia térmica posible. Esto con el fin de no tener grandes variaciones entre la temperatura de medición de la sonda del termóstato en el interior de la cámara de la matriz.

La matriz fue diseñada y verificada con Solidwork programa de referencia para componentes mecánicos diseñado por medio de MEF comportamiento elástico y plástico. Se adoptó una presión de diseño de 250 MPa, se adoptó este valor de acuerdo con la bibliografía de referencia, ya que

esta bibliografía plantea que solo un 50% de la presión aplicada a la prensa en el sentido axial se transfiere a la matriz en forma de presión interna. Por lo que la matriz puede trabajar con una presión hasta 500 MPa.

Los ensayos se realizarán hasta 300 MPa por lo que solo se transferirá a la matriz unos 150 MPa como carga radial o presión interna en la cámara de compresión. Además, se ha considerado un aumento de presión lento y progresivo para la fabricación de los especímenes de las briquetas con los distintos valores de los parámetros de ensayo.

A continuación, se muestra en las siguientes figuras los planos de los componentes y conjunto de la matriz de conformado de briquetas, la cual se utiliza a la prensa de ensayos Instron como fuente de movimiento de presión controlada el movimiento del pistón para los ensayos.

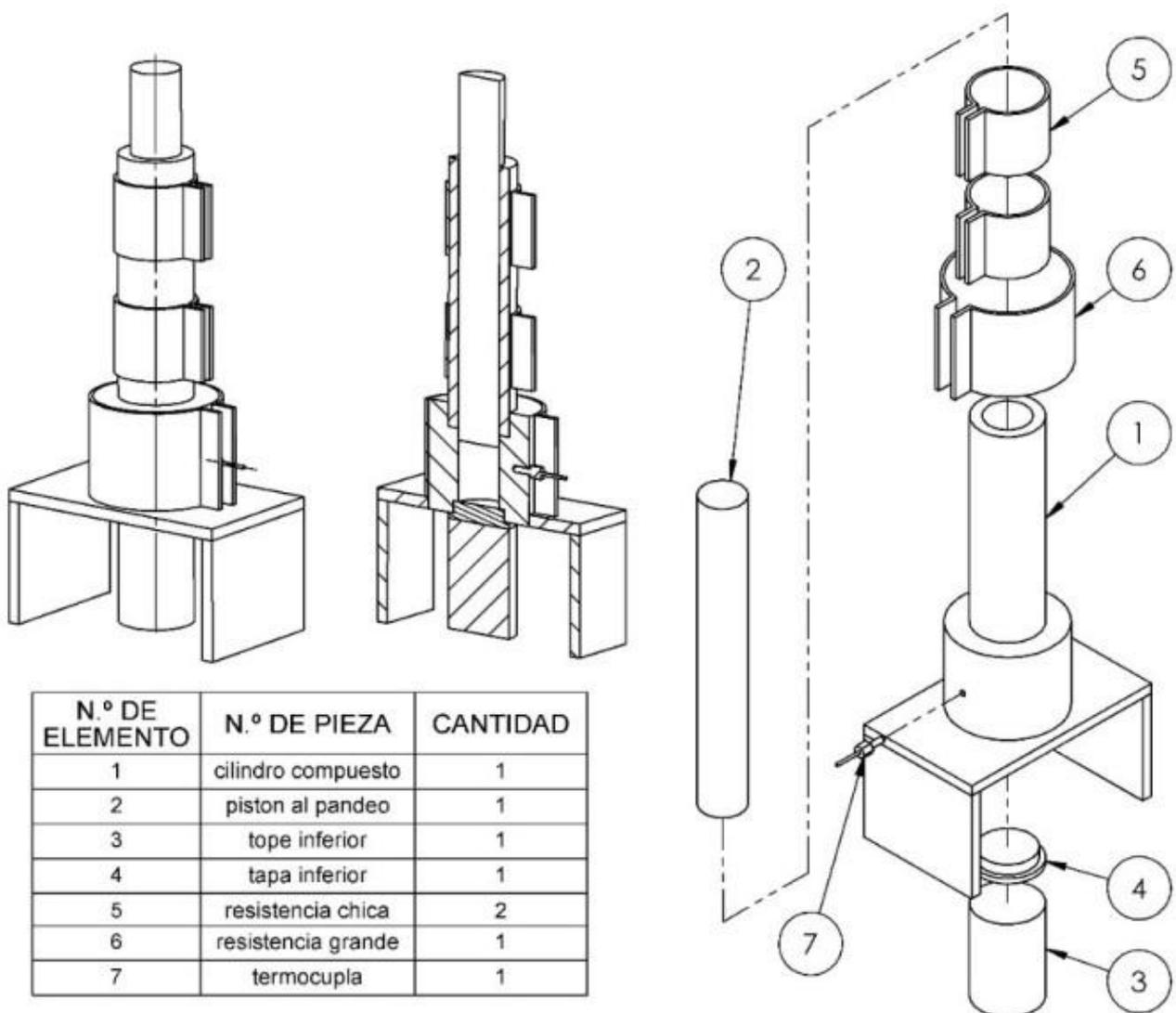


Figura 5.1: Componentes y vista generales de la matriz de conformado de las briquetas

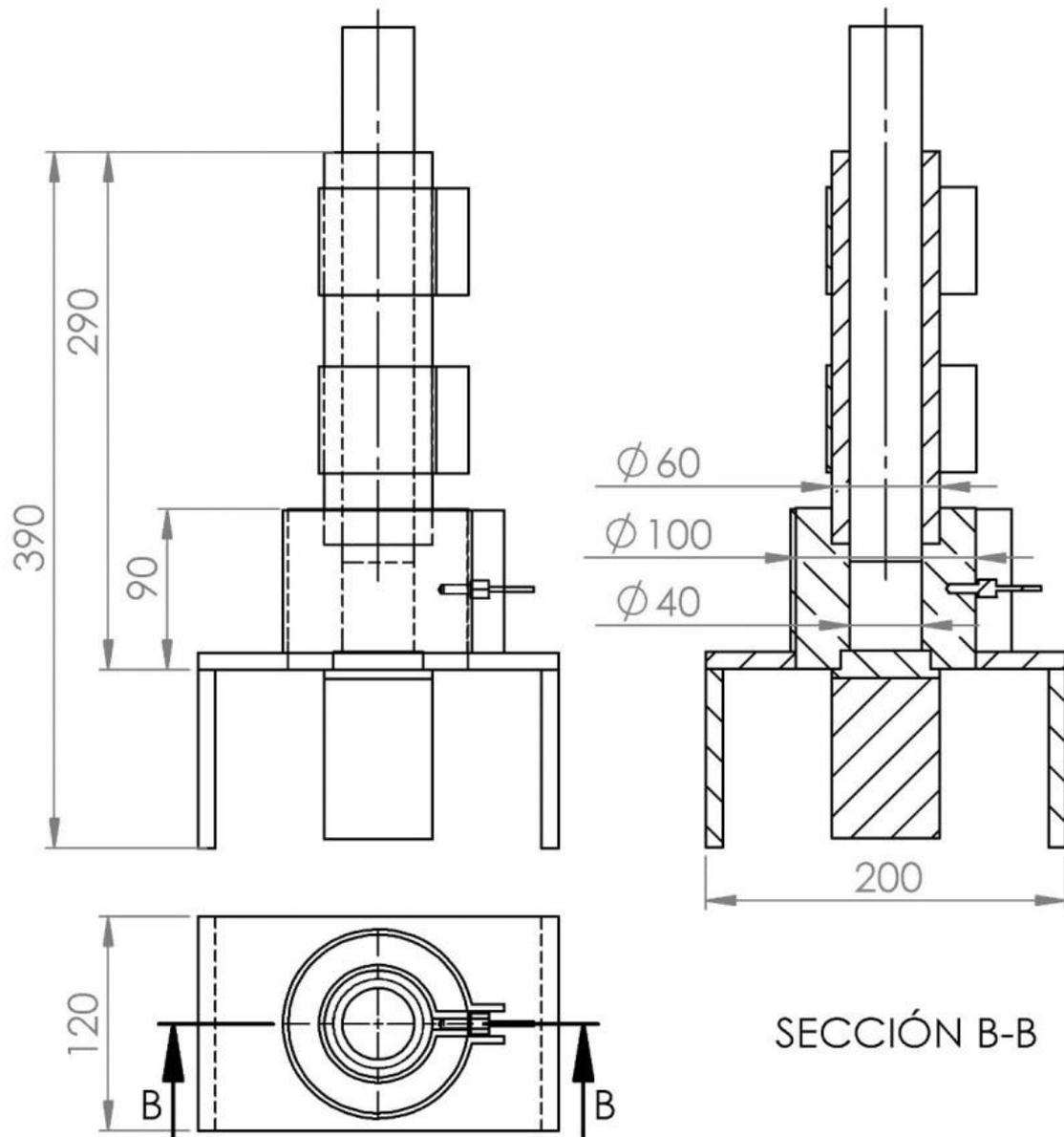


Figura 5.2: Vista frontal y de corte de la matriz ensamblada preparación de la biomasa

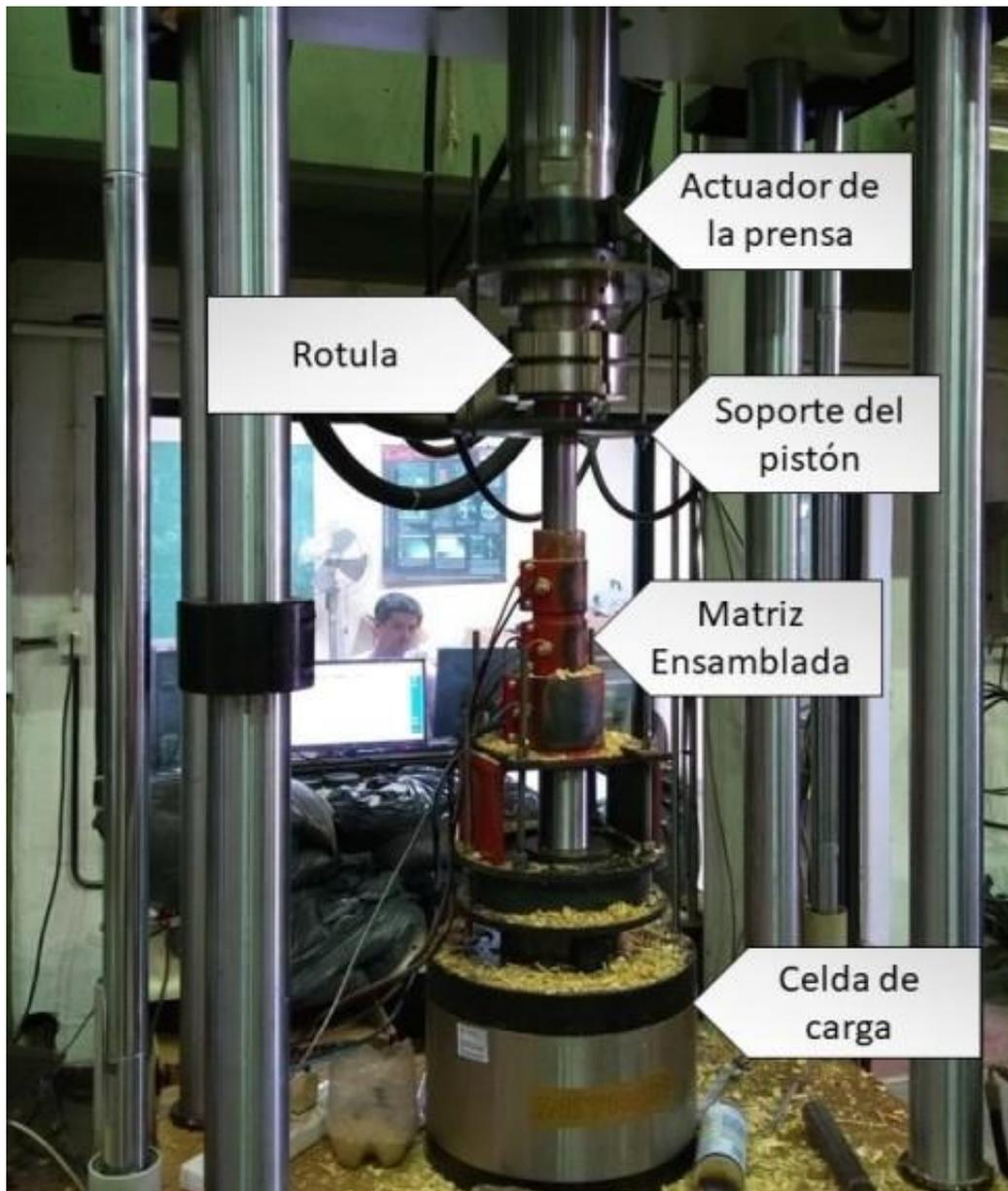


Figura 5.3: Matriz ensamblada montada en prensa Instron para la fabricación de briquetas.



Figura 5.4: Cuerpo de la matriz con la resistencia, resistencias suncho y termocuplas.



Figura 5.5: Foto de los topes, tapa y pistón de la matriz de briqueteado.

Una vez fabricada la matriz y ensamblada se realizó un estudio termográfico para verificar la homogeneidad de temperaturas, con el fin de verificar la uniformidad de temperaturas en la matriz de briqueteado para asegurar un proceso homogéneo y representativo de la fabricación industrial.

En las siguientes figuras se muestra el estudio termográfico realizado a la matriz una vez alcanzado el régimen térmico de funcionamiento. Pudiéndose observar en las termografías una buena homogeneidad térmica, ya que entre el punto superior e inferior de la matriz solo se aprecia una diferencia de 0.5 °C.



Estudio de homogeneidad de temperaturas en matriz de briqueteado

Medidas	
Sp1	117,6 °C
Sp2	117,1 °C
Parámetros	
Emisividad	0.95
Temp. refl.	20 °C
Geolocalización	
Brújula	11° N



Figura 5.6: Termografía de la matriz en régimen térmico

En la siguiente figura se muestra el mallado del estudio de esfuerzos realizado sobre la matriz de briqueteado. La misma se realizó mediante el programa de diseño mecánico por MEF Solidwork. Este análisis se desarrolló mediante un análisis no lineal para contemplar el desgranamiento módulo de elasticidad de las fibras internas ante la acción de la presión interna.

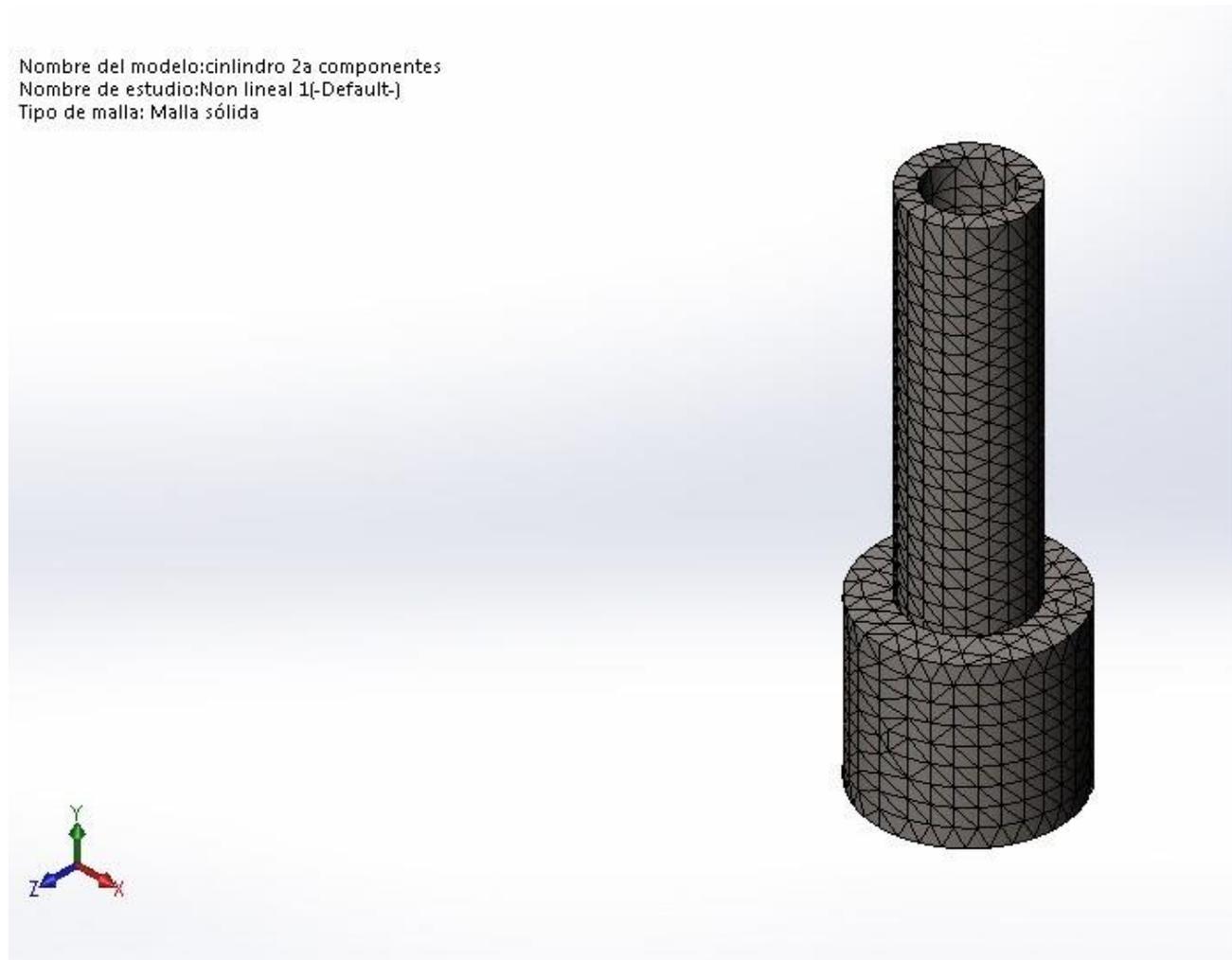


Figura 5.7: Mallado de la matriz

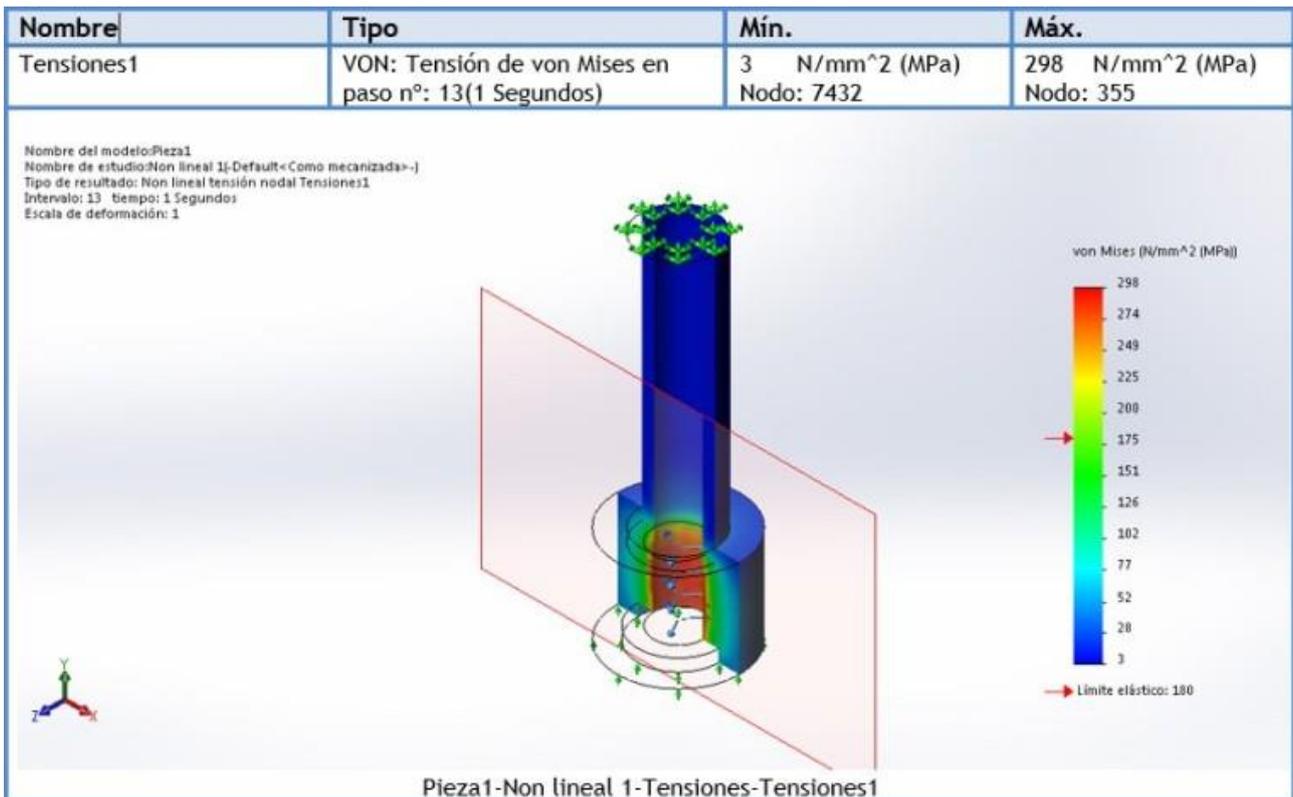


Figura 5.8: Estudio de tensiones de la matriz con 150 MPa de presión interna

Como se observa en la figura anterior la tensión máxima de Von Mises alcanzan un valor de 298 MPa para una presión interna aplicada de 150 MPa. Este valor de tensiones comprueba el dimensionamiento inicial, ya que se trabajó con un acero SAE 1045 Estirado en frio el cual tiene un límite de fluencia de 530 MPa y un límite a la rotura de 630 MPa; por lo que el diseño brinda un factor de seguridad de 2 lo cual es adecuado al establecer un procedimiento de aplicación de carga a una tasa de velocidades baja.

Recordemos que de la presión aplicada por el pistón de forma axial solo el 50% se transforma en presión radial. Por lo cual este análisis de MEF con 150 MPa valida ensayos hasta 300 MPa de presión axial.

5.3.2. Prensa Instron

Los ensayos y la fabricación de los especímenes se realizaron en la prensa hidráulica servo controlada INSTRON modelo 8800 (la prensa es originalmente una INSTRON modelo 8504 la cual fue actualiza al modelo 8800) la cual consta de una capacidad máxima ensayo de 500 KN. En esta prensa se puede controlar tanto la velocidad de carga como el desplazamiento del actuador por medio de software de esta.



Figura 5.9: Prensa INSTRON 8800 con la matriz de fabricación de briquetas

5.3.3. Celda de carga Instron

Celda de carga INSTRON con capacidad máxima de 1000 KN y sensibilidad de 0.05 KN.



Figura 5.10: Celda de carga INSTRON

Se utilizó esta celda de carga para la fabricación de los especímenes de las briquetas con un programa de aplicación de carga a una tasa constante de 20 KN/s

5.3.4. Celda de carga BSL MTS-1 tipo S



Figura 5.11: Celda de carga BSL MTS-1 tipo S

5.3.5. Horno de secado

Se utilizó el horno de secado tanto para la determinación de la humedad de la biomasa con la que se fabricaron los especímenes y para el secado de la biomasa para la fabricación con distintas humedades.

El horno se reguló a la temperatura de 110 °C según lo estable la norma ASTM D-2216 tanto para los ensayos de humedad como para el secado de la biomasa.



Figura 5.12: Horno de secado

5.3.6. Tamices calibrados

Se empleó los tamices calibrados para separar el aserrín y virutas en las distintas granulometrías con el fin de determinar cuál es la granulometría óptima para el conformado de las briquetas y como la granulometría afecta la calidad final de las briquetas.

Esta separación se realizó con tres tamices el primero de 1 mm para separar el material inferior a esta medida, el segundo de 3.15 mm para separar el material menor a esta medida y un tercero para separar el tercer y último para separar a la biomasa inferior a 8 mm.



Figura 5.13: Tamices calibrados para la separación de biomasa

5.3.7. Calibre

En la determinación de la densidad de se utilizó un calibre digital de 200 mm marca Geotech con una apreciación de 0.01 mm

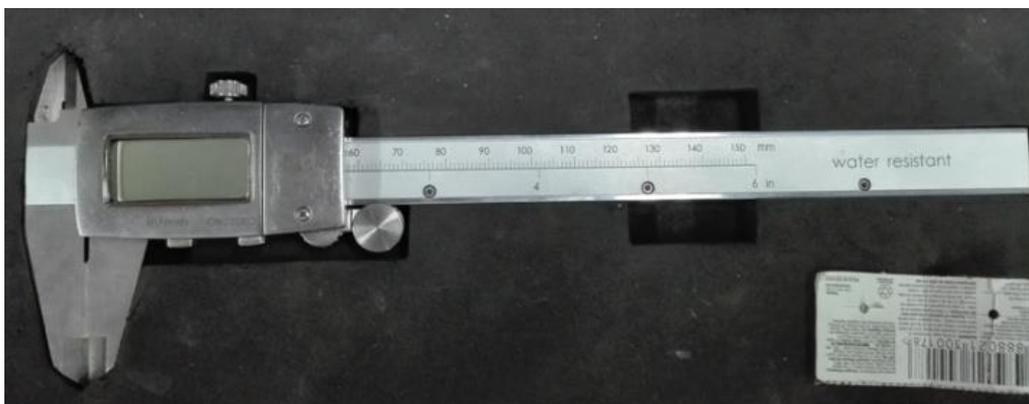


Figura 5.14: Calibre digital marca Geotech

5.3.8. Balanza granataria marca

Para la determinación de la densidad de las briquetas se utilizó una balanza granataria de RADWAG modelo WTC 600 con una capacidad de 500 g y una apreciación de 0.1g.



Figura 5.15: Balanza granataria RADWAG WTC 600

5.3.9. Placa de adquisición de USB 1616FS

Placa de adquisición USB-1616FS de 16 canales marca Measurement Computing



Figura 5.16: Placa de adquisición USB-1616FS

5.4. Adecuación de la Biomasa para la fabricación de los especímenes

La adecuación o preparación de la biomasa con la cual se conforma las briquetas es una de las claves para obtener briquetas que cumplan con los estándares de calidad de las normas de referencia. Por lo que estudiar como la variación de la humedad y granulometría afectan el proceso de briqueteado es trascendental para determinar las condiciones óptimas de conformado.

Por lo que se procedió al separado de la biomasa en distintas granulometrías según los distintos calibres descritos en el apartado anterior y el posterior secado hasta la humedad de equilibrio para una posterior regulación final de la humedad por humectación, hasta el valor de ensayo. El procedimiento de adecuación se realizó en este orden ya que en el procedimiento de separación por granulometría se descarta material por lo cual realizar la adecuación en este orden, conlleva no secar material a descartar, por lo que se seca solo el material a utilizar. Esto también se debe a que la biomasa una vez secada es permeable a adquirir humedad ambiente por lo que se realizó el proceso de secado al final de la adecuación. Dejando para el final la humectación del material hasta los distintos valores de humedad de ensayo. Para un paso final de conformado de la briketa en las diferentes temperaturas y presiones de prensa.

En los siguientes apartados se describirá el proceso de briqueteado.

5.4.1. Fuente de la biomasa

La biomasa utilizada es proveniente de pino reforestado del NOA principalmente pino de las especies *Pinus Elliottii* y *Pinus Taeda*. La cual es industrializada en los aserraderos locales de la provincia. Para los ensayos se compró tanto aserrín como viruta del aserradero 25 de mayo de la ciudad de san Miguel de Tucumán, ya que este es un de los referentes de la industria maderera de la provincia.

Habitualmente los aserraderos de la provincia comercializan los residuos o subproductos de su actividad principal como cama sanitaria de animales o para ser usado como sustrato para limpieza.



Figura 5.17: Biomasa previa a la separación y al secado.

5.4.2. Separación de la biomasa según su granulometría

La separación en distintas granulometrías se realizó con el fin de analizar como calidad final del biocombustible (densidad y resistencia a la compresión) se ve afectada por los cambios granulometría y como esta se correlaciona con las distintas variables como humedad, presión y temperatura.

Los valores en los que se separó la biomasa fue determinado por dos criterios.

- a. No es posible ensayar las granulometrías en avanzando de milímetro a milímetro que daría un número muy grande de ensayos por lo que trabajo con tres valores representativos para las diferentes fabricaciones industriales y de las distintas biomásas que se puede obtener en el mercado local.
- b. Se seleccionó las tres granulometrías de base en los ensayos de determinación de la granulometría que utiliza la norma UNE EN 14149. Ya que con esta norma se realizan los ensayos a nivel industrial de granulometría los cuales se utilizan para caracterizar las propiedades de los subproductos de la actividad maderera.

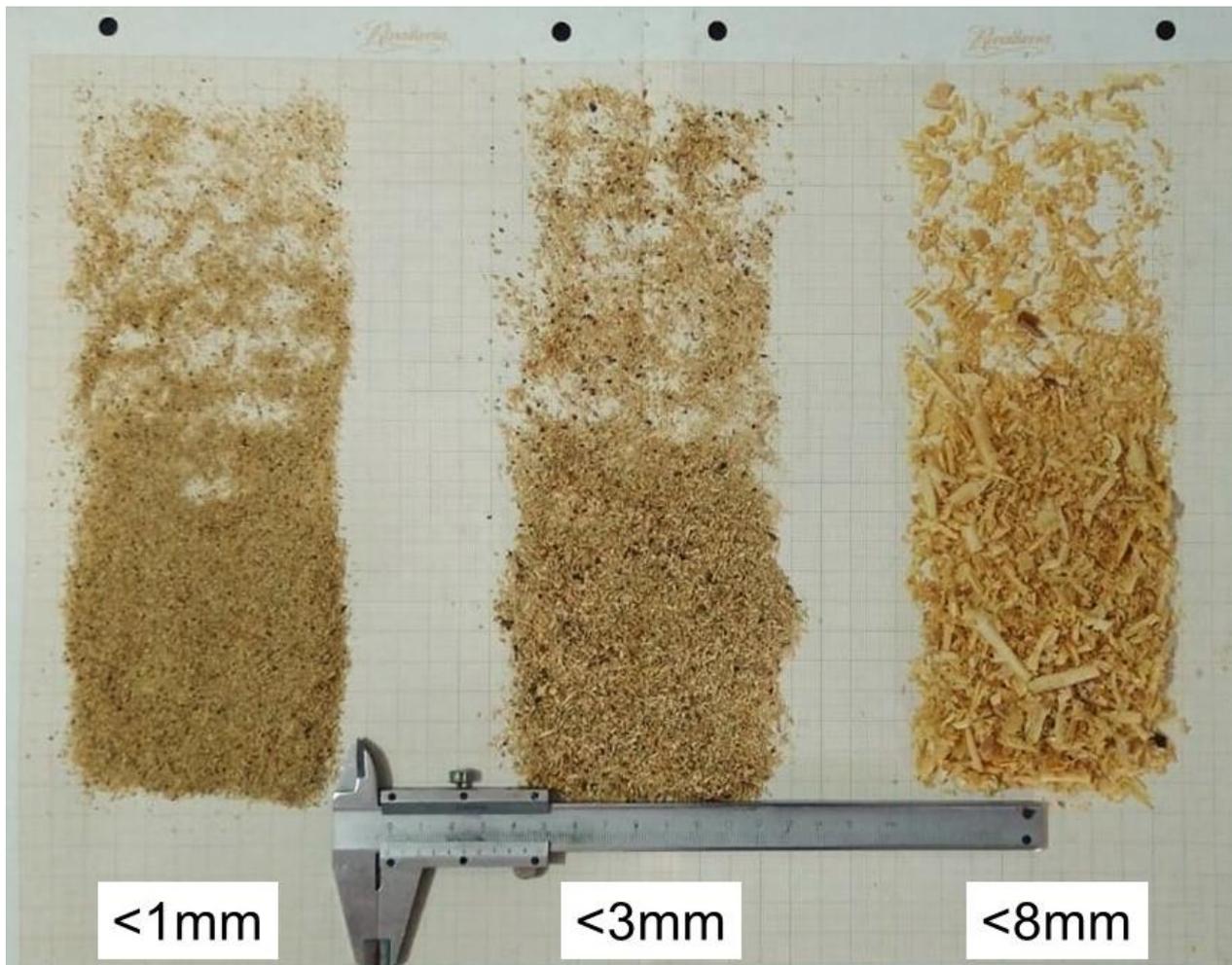


Figura 5.18: granulometrías utilizadas en la fabricación de los especímenes de briquetas

La separación de la biomasa se realizó, utilizando tamices de calibres descriptos anteriormente, de forma manual. La cantidad para separar de biomasa en kilogramos fue determinada mediante la siguiente tabla en la que se contempló la densidad media de aserrín y el volumen de la cámara de briqueteado de la matriz de como lo indica la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Cálculo de la cantidad de biomasa a separar por granulometría

Determinación de la masa a separa	Total	P/ cada Granulometría
Especímenes	270	90
Volumen por Unidad m ³	0,0005	
Volumen sub total	0,135	0,045
Densidad Kg/m ³	170	
Peso Kg	22,95	7,65
Coefficiente de compensación*	1,4	
Cantidad de biomasa final Kg	32,13	10,71
(*) se separó un 40% más de biomasa de lo cuantificado para contemplar las pérdidas de masa por secado y en el manipuleo en la producción de las briquetas		

Por lo que se separaron un total de 33 Kg de bимasa, siendo de estos 11 Kg de cada una de las diferentes granulometrías.

5.4.3. Secado de la biomasa y regulación calibrado de humedad e los ensayo

Luego de la separación en las diferentes granulometrías se procedió a un estudio de la humedad para cada uno de los diferentes rangos granulométricos.

Este análisis se realizó de acuerdo a la norma ASTM D-2216 es decir se calentó el horno de secado hasta 110°C de temperatura en el cual se mantiene la muestra en el interior hasta que la masa se mantenga constante es decir pierda el contenido de agua, este proceso duró aproximadamente 24 horas de secado.

Al realizar el análisis de las distintas muestras se determinó un con tenido promedio entre 19% y 21% para las diferentes muestras en base seca:

El cálculo de la humedad se realizó mediante la siguiente ecuación

$$W = \frac{m_h - m_s}{m_s - b} \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde:

W: contenido de humedad %

m_h: masa húmeda en gramos

m_s: masa seca en gramaos

b: peso de la bandeja en gramos

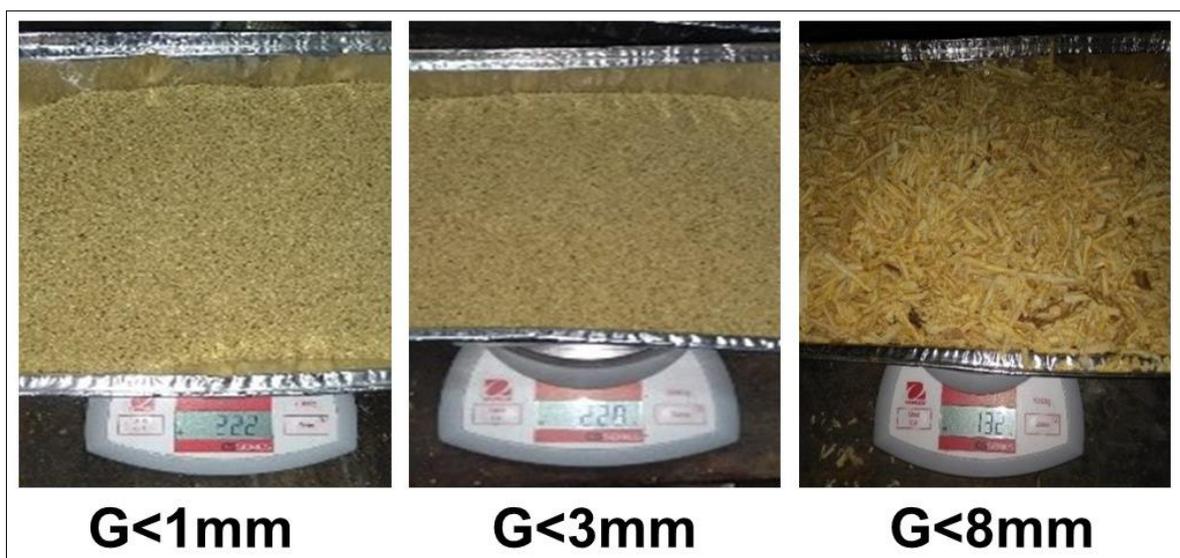


Figura 5.19: Muestras de biomasa los ensayos de humedad para las distintas granulometrías



Figura 5.20: Secado en horno de las diferentes muestras de biomasa

Una vez realizadas las determinaciones del contenido de humedad. Y puesto que estas fueron mayores que la media recomendada por la bibliografía del 12 al 13%. Se prosiguió a secar a todas las muestras de biomasa hasta la humedad de equilibrio de un 6% para luego ser regulada hasta el punto de humedad para cada ensayo es decir 8, 13 y 19% respetivamente. Esto se logró agregando agua en forma de spray y homogenizando la mezcla según las siguientes ecuaciones tomando como base la Ec. 5.1.

$$m_S = \frac{m_h}{\frac{100 + W_i}{100}} \quad \text{Ec. 5.2}$$

$$m_F = m_S (W_F + 1) \quad \text{Ec. 5.3}$$

Donde:

W_i : humedad inicial

W_F : humedad final

m_S : masa seca

m_h : masa húmeda

m_F : masa final luego de la humectación hasta la humedad de ensayo W_F

El peso de las muestras secas fue controlado para contemplar si estas ganaban humedad entre el tiempo desde el secado hasta la producción de las briquetas.

Las muestras fueron guardadas en doble bolsa y pesadas las mismas ganaron 2% de contenido de humedad en los 35 días desde su secado hasta su uso para la fabricación de los especímenes debido al alto contenido de humedad en el ambiente. Esto fue determinado por la diferencia de pesos en el peso una vez secado y el peso luego de los 35 días aplicando la Ec. 5.3.

5.4.4. Producción de las briquetas de ensayo en prensa INSTRON

Una vez separa la biomasa en las diferentes granulometrías y secada hasta la humedad de reposo y una posterior calibración de humedad por spray hasta la humedad ensayo. Se prosiguió al montaje de la matriz de briqueteado en la prensa Instron, a la colocación de resistencia sunchos y a la introducción del método de aplicación de carga en el programa de la prensa a tasa constante de 20 KN/s hasta alcanzar la presión final de ensayo.

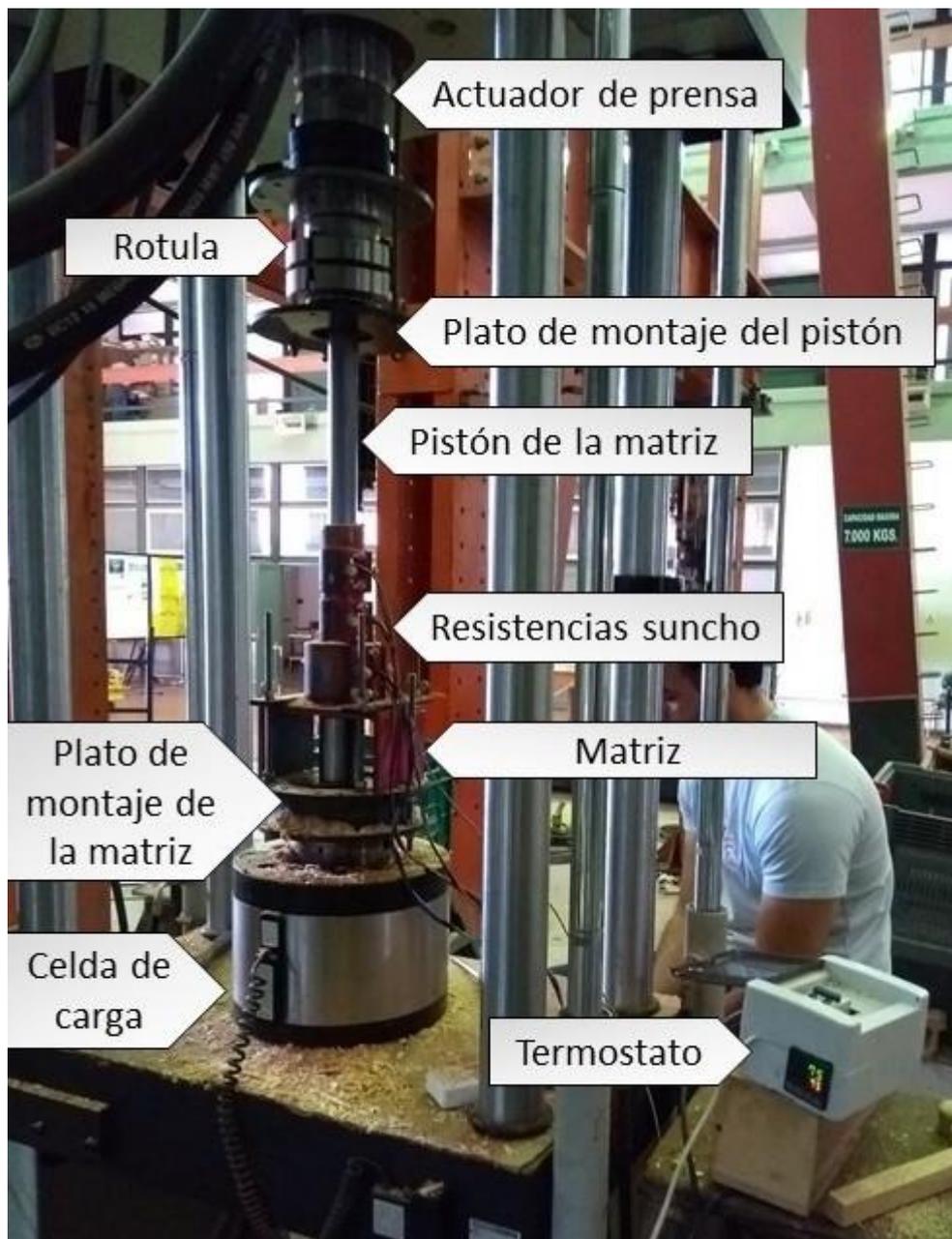


Figura 5.21: Foto de la matriz montada en etapa de producción de briqueta.

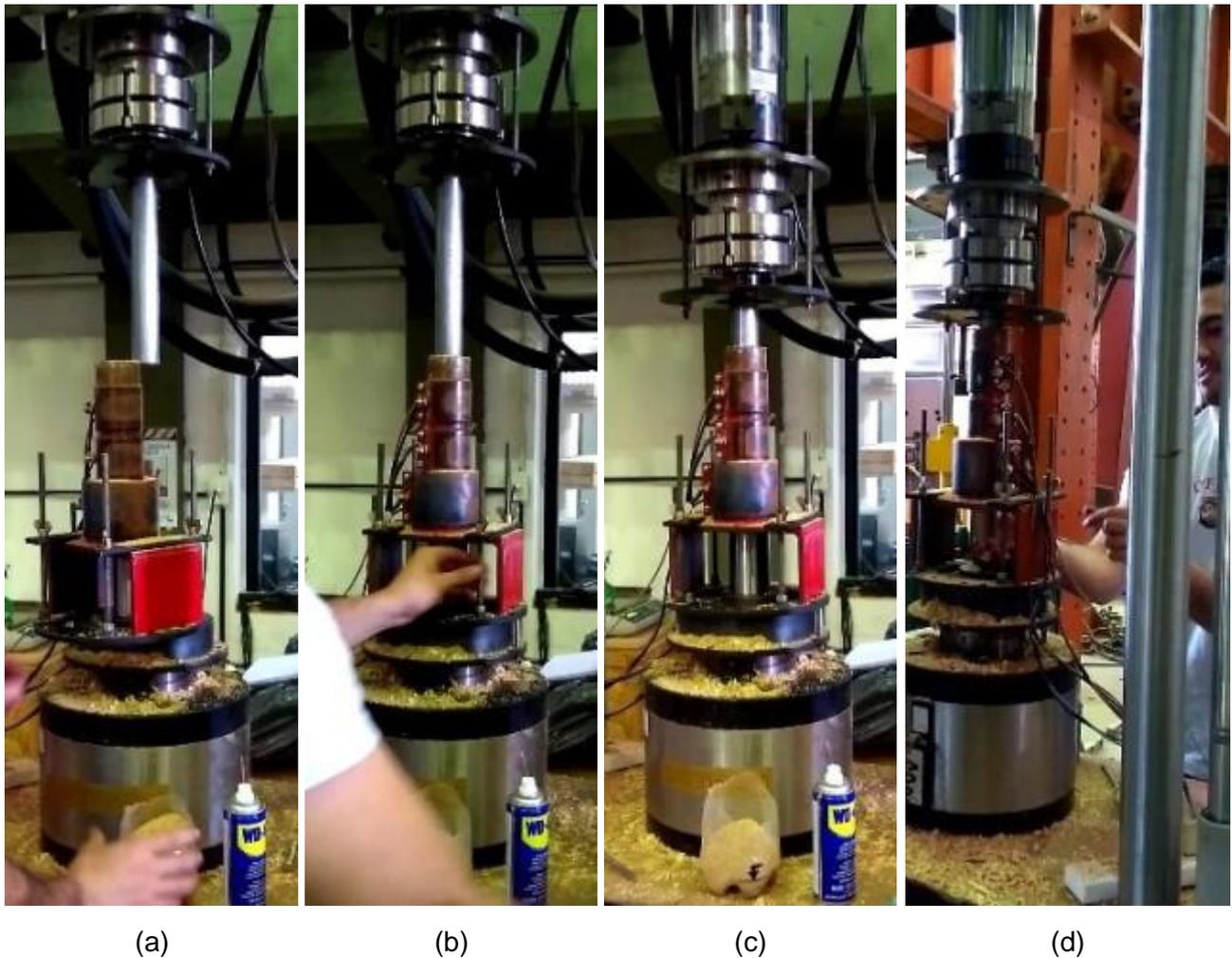


Figura 5.22: Ciclo de fabricación de las briquetas. a) Posición de carga de biomasa. b) Inicio de la compresión. c) Fin de la compresión. d) Extracción inferior del biocombustible.

La fabricación de las briquetas se realizó mediante el siguiente procedimiento simple, como se observa en la imagen anterior, este procedimiento consta de los siguientes pasos.

- a. Carga de la biomasa por la parte superior de matriz.
- b. Centrado en prensa e inicio de la compresión
- c. Compresión hasta el límite de carga fijado
- d. Extracción de la briqueta por la salida inferior de la matriz, mediante la quita del tope inferior mediante el desplazamiento del pistón.

5.4.5. Análisis de densidad de las briquetas

El primer análisis que se les realizó a las briquetas fue la determinación de su densidad al ser este de carácter no destructivo. Esta determinación es la más relevante con respecto a las normas de referencia ISO 17225 ya el valor densidad es el parámetro físicos mecánico principal de las briquetas. Y luego se realizó el ensayo de resistencia la compresión por su carácter destructivo.



Figura 5.23: Determinación de la densidad (masa y volumen)

En las siguientes tablas se muestra los resultados de las mediciones de las densidades de los distintos especímenes separados por la granulometría.

5.5. Especímenes producidos:

En la Figura 5.24 a la Figura 5.33, se muestran los especímenes de briquetas producidos con las diferentes variaciones de los parámetros de fabricación industrial. Estas tablas están organizadas de acuerdo con la granulometría y humedad, es decir por sus características de la biomásicas y en cada una de las tablas se disponen en las fila y columna la presión y temperatura de proceso respectivamente.

Granulometría 1 mm; Humedad 8%			
Presión MPa	Temperatura °C		
	75	100	125
90			
135			
180			

Figura 5.24: Briqueta G<1-W8

Granulometría 1 mm ; Humedad 13%			
Presión MPa	Temperatura °C		
	75	100	125
90			
135			
180			

Figura 5.25: Briqueta G<1-W13

Granulometría 1 mm ; Humedad 19%			
Presión MPa	Temperatura °C		
	75	100	125
90			
135			
180			

Figura 5.26: Briqueta G<1-W19

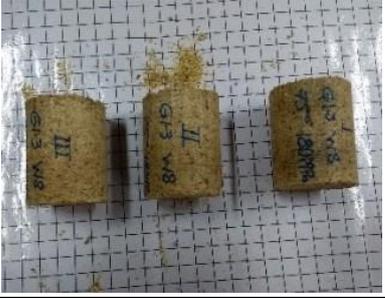
		Granulometría < 3 mm; Humedad 8%		
Presión MPa		Temperatura °C		
		75	100	125
90				
135				
180				

Figura 5.27: Briqueta G< 3-W8

Granulometría < 3 mm ; Humedad 13%			
Presión MPa	Temperatura °C		
	75	100	125
90			
135			
180			

Figura 5.28: Briqueta G< 3-W13

Granulometría < 3 mm ; Humedad 19%			
Presión MPa	Temperatura °C		
	75	100	125
90			
135			
180			

Figura 5.29: Briqueta G< 3-W19

Granulometría < 8 mm ; Humedad 8%			
Presión MPa	Temperatura °C		
	75	100	125
90			
135			
180			

Figura 5.30: Briqueta G< 8-W8

Granulometría < 8 mm ; Humedad 13%			
Presión MPa	Temperatura °C		
	75	100	125
90			
135			
180			

Figura 5.31: Briqueta G< 8-W13

Granulometría < 8 mm ; Humedad 19%			
Presión MPa	Temperatura °C		
	75	100	125
90			
135			
180			

Figura 5.32: Briqueta G< 8-W19

En la siguiente tabla se muestran las fotos de las briquetas obtenidas para los ensayos de tendencia los cuales están por encima de los valores de referencia descritos anteriormente es decir 200°C y 300 MPa para las distintas granulometrías con un 8% de humedad.

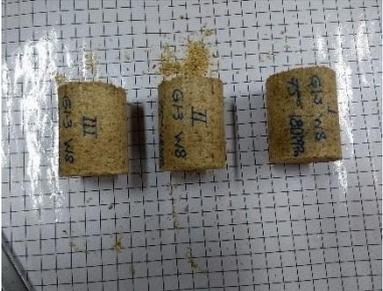
Ensayo de estudios de tendencia con una humedad de 8%			
Granulometría	Temperatura °C / Presión MPa		
	125°C/180 MPa	200°C /180 MPa	125°C /300 MPa
<1mm			
< 3mm			
< 8mm			

Figura 5.33: Ensayo de estudios de tendencia con una humedad de 8%

CAPÍTULO 6

CAMPAÑA EXPERIMENTAL: RESULTADOS

6.1. Análisis de los especímenes producidos

Los resultados obtenidos al evaluar a los diferentes especímenes en dos características de calidad los cuales son densidad y resistencia la compresión.

Los resultados se presentarán en las siguientes tablas agrupando a estos de acuerdo con su granulometría ya que este es el parámetro de referencia para la separación inicial y este depende generalmente de los procesos que se llevan a cabo en los aserraderos de los cuales deriva las biomásas que se utilizan para la fabricación de los biocombustibles.

6.1.1. Análisis de resistencia a la compresión de las briquetas

El último de los análisis que se le realizó a los especímenes fue el ensayo de compresión diametral, debido a su carácter destructivo. Este ensayo se realizó mediante el uso de un pistón de acero SAE 1045 circular de 40 mm de diámetro, para aplicar la carga de compresión de forma uniforme. Con el fin de lograr una comparación directa entre los ensayos al normalizar la longitud de aplicación de la carga, ya que los diferentes especímenes de briquetas tuvieron diferentes longitudes.

Los resultados de estos ensayos se presentan a continuación en las siguientes tablas separados por granulometría.

Tabla 6.1: Resultados de carga de rotura por compresión diametral granulometría G<1

Espécimen	Pmax Carga Maxima N	Promedio Pmax Carga Maxima N	Densidad Kg/ m ³	Densidad Promedio Kg/ m ³
G<1_W08_075c_090_1	71	137	457	551
G<1_W08_075c_090_2	218		572	
G<1_W08_075c_090_3	120		624	
G<1_W08_075c_135_1	185	334	648	689
G<1_W08_075c_135_2	388		715	
G<1_W08_075c_135_3	431		704	
G<1_W08_075c_180_1	469	417	746	745
G<1_W08_075c_180_2	386		752	
G<1_W08_075c_180_3	397		738	
G<1_W08_100c_090_1	588	521	764	743
G<1_W08_100c_090_2	732		782	
G<1_W08_100c_090_3	244		683	
G<1_W08_100c_135_1	793	663	823	804
G<1_W08_100c_135_2	696		836	
G<1_W08_100c_135_3	499		752	
G<1_W08_100c_180_1	1062	1023	875	845
G<1_W08_100c_180_2	1467		898	
G<1_W08_100c_180_3	540		761	
G<1_W08_125c_090_1	969	762	833	822
G<1_W08_125c_090_2	724		830	
G<1_W08_125c_090_3	595		803	
G<1_W08_125c_135_1	623	500	832	789
G<1_W08_125c_135_2	473		778	
G<1_W08_125c_135_3	402		758	
G<1_W08_125c_180_1	2315	1429	1010	910
G<1_W08_125c_180_2	1074		873	
G<1_W08_125c_180_3	899		847	
G<1_W08_125c_300_1	829	893	1059	1052
G<1_W08_125c_300_2	920		1061	
G<1_W08_125c_300_3	931		1037	
G<1_W08_200c_180_1	849	805	983	949
G<1_W08_200c_180_2	748		920	
G<1_W08_200c_180_3	816		943	
G<1_W13_075c_090_1	606	531	835	836
G<1_W13_075c_090_2	536		829	
G<1_W13_075c_090_3	453		833	
G<1_W13_075c_135_1	664	710	842	863
G<1_W13_075c_135_2	667		875	
G<1_W13_075c_135_3	801		872	
G<1_W13_075c_180_1	1103	1060	905	906
G<1_W13_075c_180_2	931		904	
G<1_W13_075c_180_3	1147		909	
G<1_W13_100c_090_1	487	459	830	807
G<1_W13_100c_090_2	439		799	
G<1_W13_100c_090_3	453		791	
G<1_W13_100c_135_1	711	607	871	863
G<1_W13_100c_135_2	535		866	
G<1_W13_100c_135_3	574		854	
G<1_W13_100c_180_1	771	549	882	887
G<1_W13_100c_180_2	0		890	
G<1_W13_100c_180_3	876		889	
G<1_W13_125c_090_1	377	322	785	773
G<1_W13_125c_090_2	301		785	
G<1_W13_125c_090_3	290		750	
G<1_W13_125c_135_1	558	499	853	827
G<1_W13_125c_135_2	443		807	

G<1_W13_125c_135_3	497		822	
G<1_W13_125c_180_1	588	601	856	857
G<1_W13_125c_180_2	573		855	
G<1_W13_125c_180_3	643		861	
G<1_W19_075c_090_1	378	379	797	803
G<1_W19_075c_090_2	390		810	
G<1_W19_075c_090_3	368		802	
G<1_W19_075c_135_1	629	610	851	853
G<1_W19_075c_135_2	553		841	
G<1_W19_075c_135_3	649		867	
G<1_W19_075c_180_1	716	693	907	863
G<1_W19_075c_180_2	704		816	
G<1_W19_075c_180_3	659		866	
G<1_W19_100c_090_1	245	290	762	779
G<1_W19_100c_090_2	244		782	
G<1_W19_100c_090_3	382		793	
G<1_W19_100c_135_1	373	420	828	835
G<1_W19_100c_135_2	390		839	
G<1_W19_100c_135_3	497		837	
G<1_W19_100c_180_1	392	527	823	848
G<1_W19_100c_180_2	349		802	
G<1_W19_100c_180_3	841		919	
G<1_W19_125c_090_1	197	249	769	767
G<1_W19_125c_090_2	274		768	
G<1_W19_125c_090_3	276		764	
G<1_W19_125c_135_1	346	341	798	803
G<1_W19_125c_135_2	348		817	
G<1_W19_125c_135_3	330		793	
G<1_W19_125c_180_1	285	376	748	772
G<1_W19_125c_180_2	537		815	
G<1_W19_125c_180_3	304		753	

Tabla 6.2: Resultados de carga de rotura por compresión diametral granulometría G< 3

Espécimen	Pmax Carga Máxima N	Promedio Pmax Carga Máxima N	Densidad Kg/ m ³	Densidad Promedio Kg/m ³
G< 3_W08_075c_090_1	275	367	651	670
G< 3_W08_075c_090_2	446		679	
G< 3_W08_075c_090_3	379		682	
G< 3_W08_075c_135_1	561	610	589	594
G< 3_W08_075c_135_2	632		646	
G< 3_W08_075c_135_3	635		547	
G< 3_W08_075c_180_1	749	775	600	674
G< 3_W08_075c_180_2	796		723	
G< 3_W08_075c_180_3	781		698	
G< 3_W08_100c_090_1	442	542	712	724
G< 3_W08_100c_090_2	484		701	
G< 3_W08_100c_090_3	700		760	
G< 3_W08_100c_135_1	606	735	591	631
G< 3_W08_100c_135_2	912		677	
G< 3_W08_100c_135_3	687		624	
G< 3_W08_100c_180_1	1180	1027	667	686
G< 3_W08_100c_180_2	908		693	
G< 3_W08_100c_180_3	992		699	
G< 3_W08_125c_090_1	1236	966	830	815
G< 3_W08_125c_090_2	278		740	
G< 3_W08_125c_090_3	1385		873	
G< 3_W08_125c_135_1	562	849	740	737
G< 3_W08_125c_135_2	921		732	
G< 3_W08_125c_135_3	1063		740	
G< 3_W08_125c_180_1	872	1008	795	788
G< 3_W08_125c_180_2	1122		804	
G< 3_W08_125c_180_3	1031		765	
G< 3_W08_125c_300_1	1097	1188	1046	1048
G< 3_W08_125c_300_2	1282		1048	
G< 3_W08_125c_300_3	1186		1051	
G< 3_W08_200c_180_1	1729	1283	1143	1042
G< 3_W08_200c_180_2	1187		998	
G< 3_W08_200c_180_3	933		986	
G< 3_W13_075c_090_1	504	649	832	833
G< 3_W13_075c_090_2	737		829	
G< 3_W13_075c_090_3	704		840	
G< 3_W13_075c_135_1	1045	1052	880	893
G< 3_W13_075c_135_2	1035		908	
G< 3_W13_075c_135_3	1076		891	
G< 3_W13_075c_180_1	1314	1199	902	903
G< 3_W13_075c_180_2	1185		887	
G< 3_W13_075c_180_3	1100		920	
G< 3_W13_100c_090_1	522	480	780	782
G< 3_W13_100c_090_2	387		766	
G< 3_W13_100c_090_3	531		799	
G< 3_W13_100c_135_1	696	732	740	720
G< 3_W13_100c_135_2	775		699	
G< 3_W13_100c_135_3	725		722	
G< 3_W13_100c_180_1	225	737	749	818
G< 3_W13_100c_180_2	818		845	
G< 3_W13_100c_180_3	1166		859	
G< 3_W13_125c_090_1	515	421	759	744
G< 3_W13_125c_090_2	344		719	
G< 3_W13_125c_090_3	403		754	
G< 3_W13_125c_135_1	457	511	771	772
G< 3_W13_125c_135_2	549		776	

G< 3_W13_125c_135_3	526		769	
G< 3_W13_125c_180_1	602	788	798	816
G< 3_W13_125c_180_2	756		798	
G< 3_W13_125c_180_3	1007		852	
G< 3_W19_075c_090_1	601	502	776	780
G< 3_W19_075c_090_2	581		772	
G< 3_W19_075c_090_3	325		791	
G< 3_W19_075c_135_1	997	832	849	830
G< 3_W19_075c_135_2	791		819	
G< 3_W19_075c_135_3	707		822	
G< 3_W19_075c_180_1	1077	1102	855	880
G< 3_W19_075c_180_2	1259		913	
G< 3_W19_075c_180_3	971		872	
G< 3_W19_100c_090_1	581	439	746	737
G< 3_W19_100c_090_2	339		721	
G< 3_W19_100c_090_3	398		743	
G< 3_W19_100c_135_1	555	433	840	794
G< 3_W19_100c_135_2	334		772	
G< 3_W19_100c_135_3	410		768	
G< 3_W19_100c_180_1	742	618	825	800
G< 3_W19_100c_180_2	516		785	
G< 3_W19_100c_180_3	595		789	
G< 3_W19_125c_090_1	85	114	605	636
G< 3_W19_125c_090_2	76		635	
G< 3_W19_125c_090_3	182		669	
G< 3_W19_125c_135_1	232	259	708	719
G< 3_W19_125c_135_2	299		729	
G< 3_W19_125c_135_3	246		718	
G< 3_W19_125c_180_1	59	393	700	746
G< 3_W19_125c_180_2	577		777	
G< 3_W19_125c_180_3	542		761	

Tabla 6.3: Resultados de carga de rotura por compresión diametral granulometría G< 8

Espécimen	Pmax Carga Máxima N	Promedio Pmax Carga Máxima N	Densidad Kg/ m ³	Densidad Promedio Kg/ m ³
G< 8_W08_075c_090_1	108	116	529	523
G< 8_W08_075c_090_2	122		538	
G< 8_W08_075c_090_3	119		502	
G< 8_W08_075c_135_1	230	192	589	594
G< 8_W08_075c_135_2	179		646	
G< 8_W08_075c_135_3	168		547	
G< 8_W08_075c_180_1	187	247	600	674
G< 8_W08_075c_180_2	245		723	
G< 8_W08_075c_180_3	309		698	
G< 8_W08_100c_090_1	168	128	588	573
G< 8_W08_100c_090_2	97		560	
G< 8_W08_100c_090_3	119		572	
G< 8_W08_100c_135_1	209	220	591	631
G< 8_W08_100c_135_2	260		677	
G< 8_W08_100c_135_3	191		624	
G< 8_W08_100c_180_1	361	310	667	686
G< 8_W08_100c_180_2	245		693	
G< 8_W08_100c_180_3	323		699	
G< 8_W08_125c_090_1	660	385	738	633
G< 8_W08_125c_090_2	190		546	
G< 8_W08_125c_090_3	303		614	
G< 8_W08_125c_135_1	345	338	740	737
G< 8_W08_125c_135_2	210		732	
G< 8_W08_125c_135_3	459		740	
G< 8_W08_125c_180_1	334	336	795	788
G< 8_W08_125c_180_2	379		804	
G< 8_W08_125c_180_3	295		765	
G< 8_W08_125c_300_1	872	844	987	962
G< 8_W08_125c_300_2	792		976	
G< 8_W08_125c_300_3	869		922	
G< 8_W08_200c_180_1	1322	1207	0	0
G< 8_W08_200c_180_2	1405		0	
G< 8_W08_200c_180_3	892		0	
G< 8_W13_075c_090_1	386	341	776	778
G< 8_W13_075c_090_2	366		797	
G< 8_W13_075c_090_3	272		763	
G< 8_W13_075c_135_1	484	372	815	810
G< 8_W13_075c_135_2	365		821	
G< 8_W13_075c_135_3	267		794	
G< 8_W13_075c_180_1	446	501	854	872
G< 8_W13_075c_180_2	483		898	
G< 8_W13_075c_180_3	573		865	
G< 8_W13_100c_090_1	633	500	834	800
G< 8_W13_100c_090_2	483		778	
G< 8_W13_100c_090_3	383		788	
G< 8_W13_100c_135_1	538	526	721	796
G< 8_W13_100c_135_2	622		827	
G< 8_W13_100c_135_3	417		840	
G< 8_W13_100c_180_1	597	796	863	873
G< 8_W13_100c_180_2	918		901	
G< 8_W13_100c_180_3	874		856	
G< 8_W13_125c_090_1	579	450	778	761
G< 8_W13_125c_090_2	399		764	
G< 8_W13_125c_090_3	372		740	
G< 8_W13_125c_135_1	472	511	781	818
G< 8_W13_125c_135_2	555		818	

G< 8_W13_125c_135_3	507		854	
G< 8_W13_125c_180_1	566	689	856	866
G< 8_W13_125c_180_2	706		861	
G< 8_W13_125c_180_3	796		881	
G< 8_W19_075c_090_1	490	410	717	693
G< 8_W19_075c_090_2	345		687	
G< 8_W19_075c_090_3	396		677	
G< 8_W19_075c_135_1	396	456	656	706
G< 8_W19_075c_135_2	434		683	
G< 8_W19_075c_135_3	540		780	
G< 8_W19_075c_180_1	563	535	757	681
G< 8_W19_075c_180_2	486		683	
G< 8_W19_075c_180_3	558		602	
G< 8_W19_100c_090_1	313	409	656	442
G< 8_W19_100c_090_2	358		671	
G< 8_W19_100c_090_3	557		0	
G< 8_W19_100c_135_1	192	248	547	570
G< 8_W19_100c_135_2	341		623	
G< 8_W19_100c_135_3	213		540	
G< 8_W19_100c_180_1	500	503	729	721
G< 8_W19_100c_180_2	506		727	
G< 8_W19_100c_180_3	503		706	
G< 8_W19_125c_090_1	354	307	682	609
G< 8_W19_125c_090_2	414		585	
G< 8_W19_125c_090_3	152		560	
G< 8_W19_125c_135_1	271	381	689	712
G< 8_W19_125c_135_2	434		732	
G< 8_W19_125c_135_3	439		716	
G< 8_W19_125c_180_1	378	325	667	696
G< 8_W19_125c_180_2	252		697	
G< 8_W19_125c_180_3	344		724	

6.1.2. Representación gráfica de los ensayos de densidad y resistencia a la compresión

En este apartado compararemos la incidencia de los cuatros parámetros de producción industrial es decir Granulometría, Humedad, Temperatura y Presión de briqueteado en los valores de los parámetros de calidad tanto densidad como resistencia a la compresión.

En las siguientes tablas y gráficas se presentarán los resultados anteriormente exhibidos en las tablas separándolos por granulometría y luego separados por humedad. Luego se presentarán los mismos resultados ordenados en gráficos separados por humedad. Con el fin de poder visibilizar de forma notoria los cambios de calidad con respecto a los cambios de granulometría.

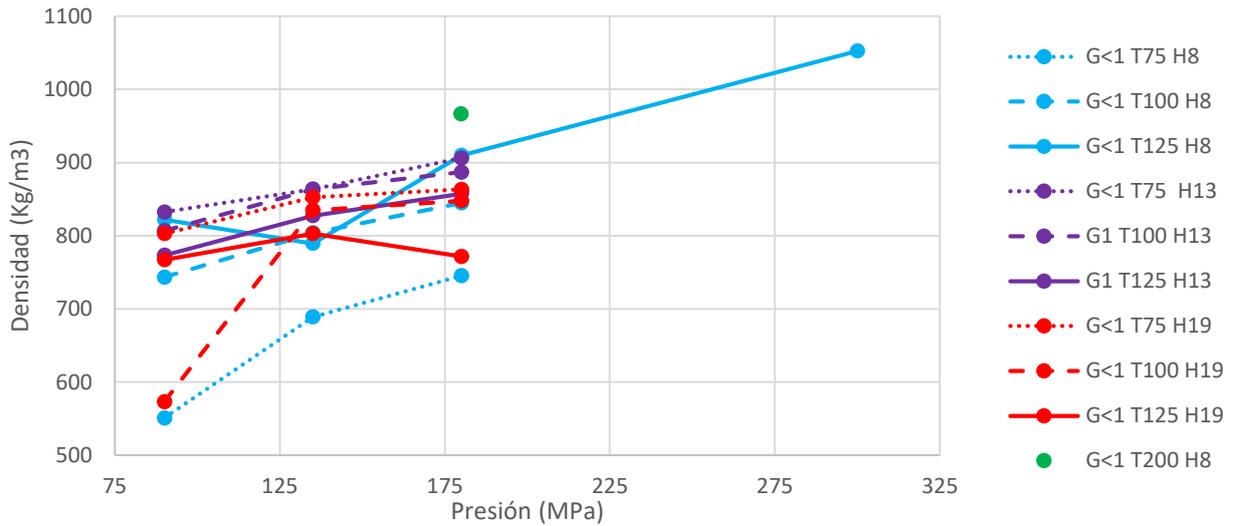


Figura 6.1: Densidad para una granulometría < 1 mm.

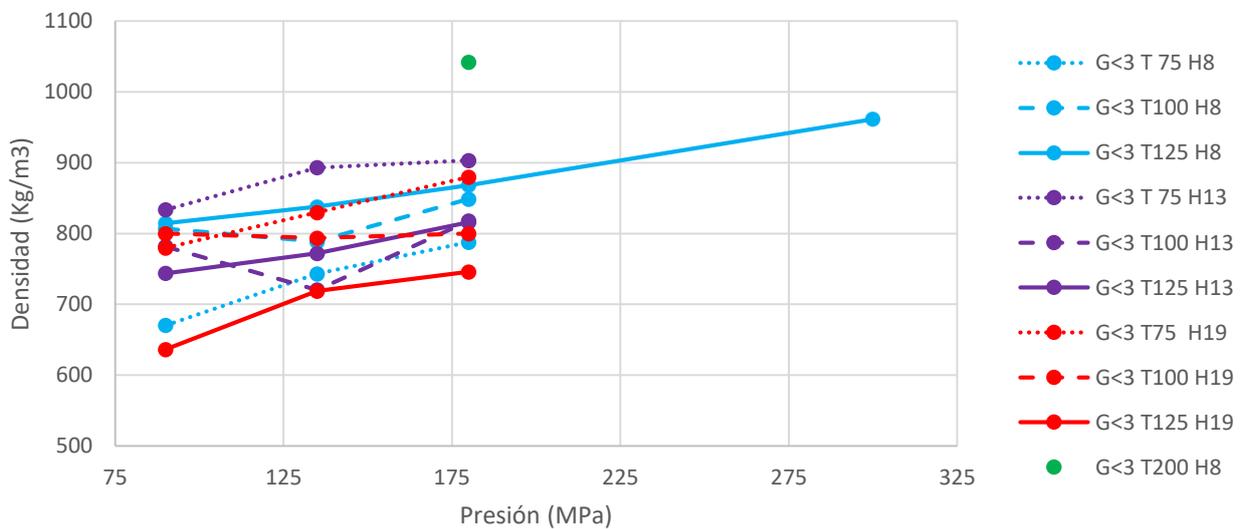


Figura 6.2: Densidad para granulometría < 3 mm.

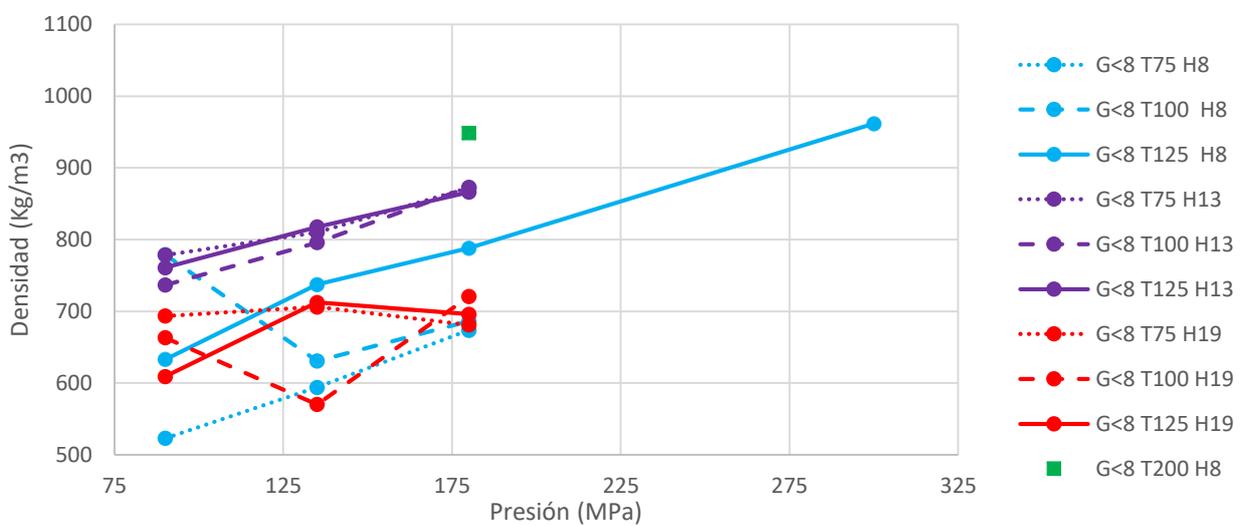


Figura 6.3: Densidad para granulometría < 8 mm.

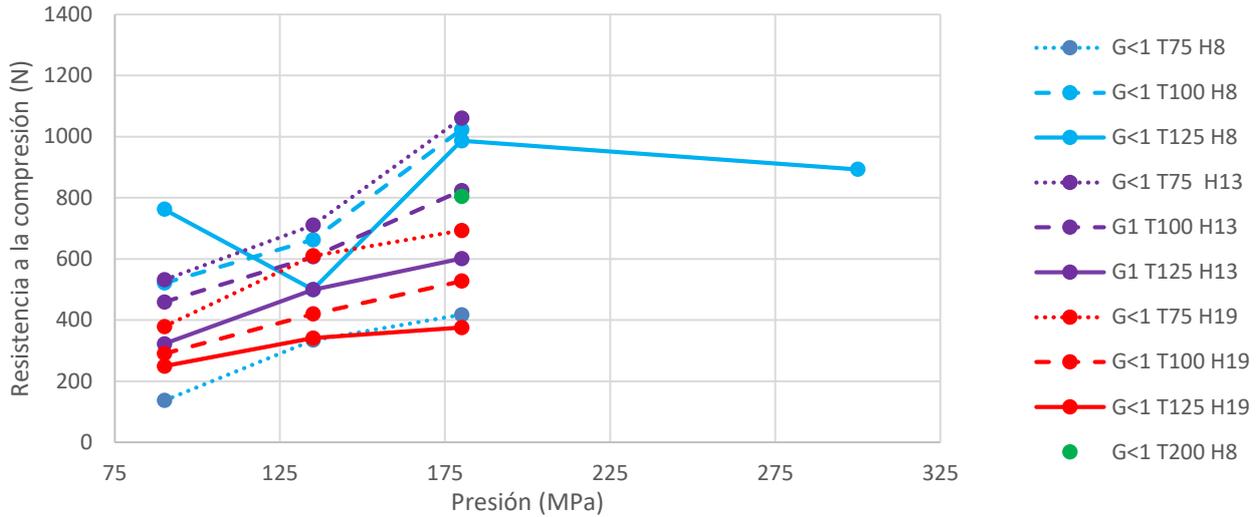


Figura 6.4: Resistencia a compresión para granulometría < 1 mm.

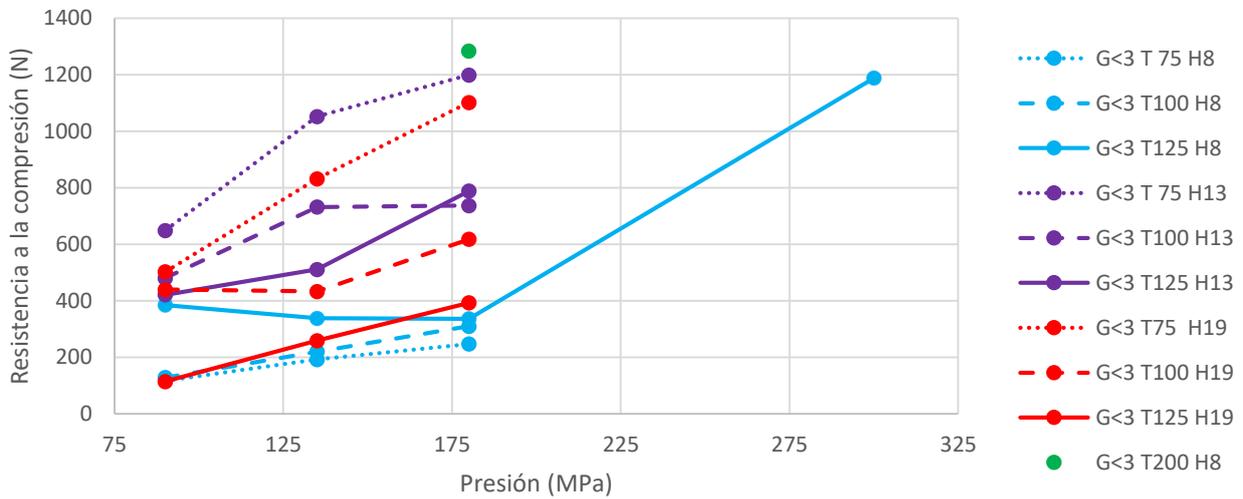


Figura 6.5: Resistencia a compresión para granulometría de < 3 mm.

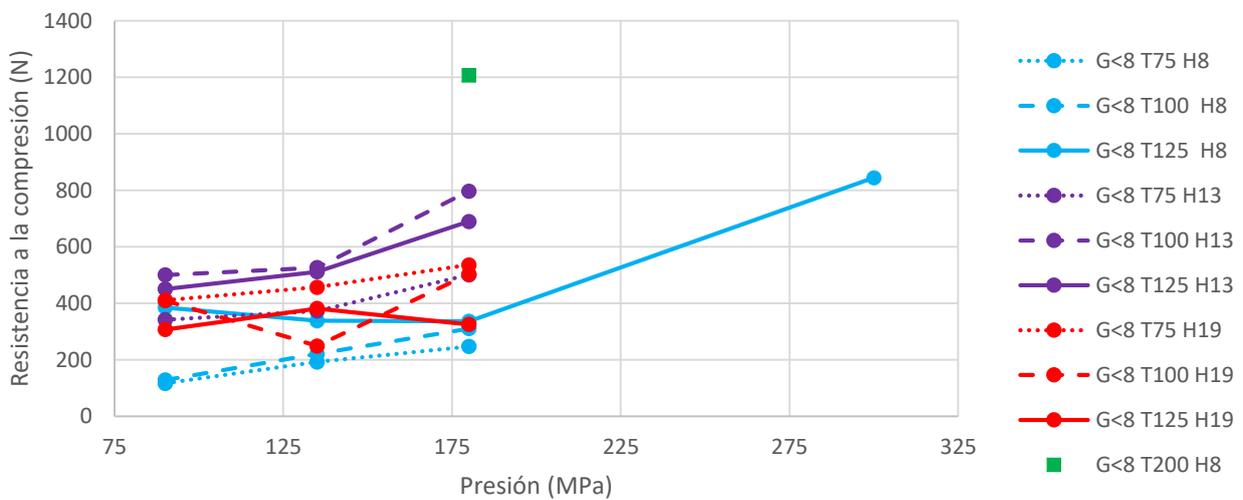


Figura 6.6: Resistencia a compresión para granulometría de < 8 mm.

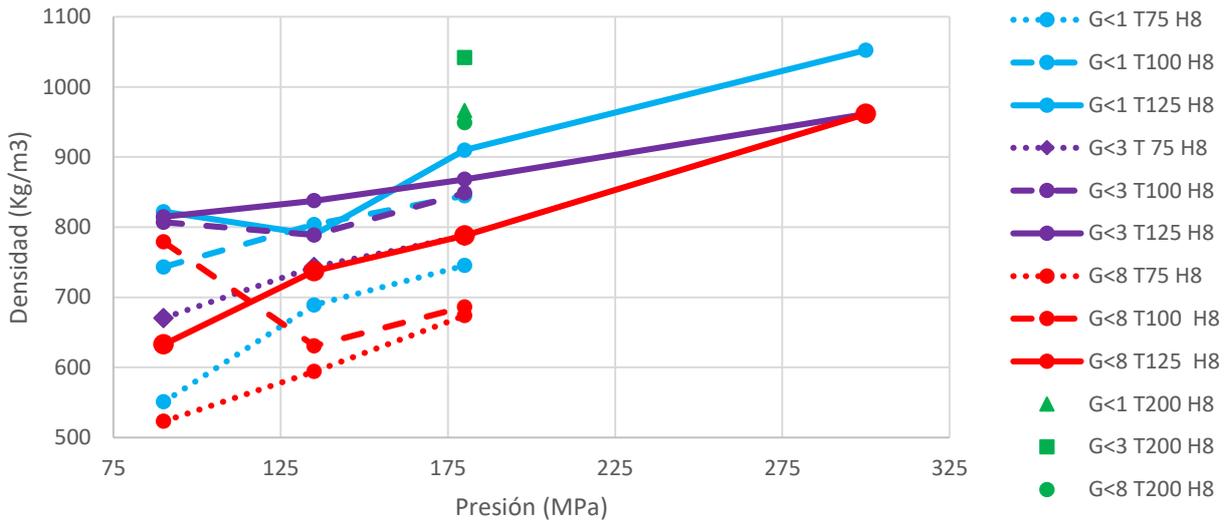


Figura 6.7: Densidad para humedad del 8 %.

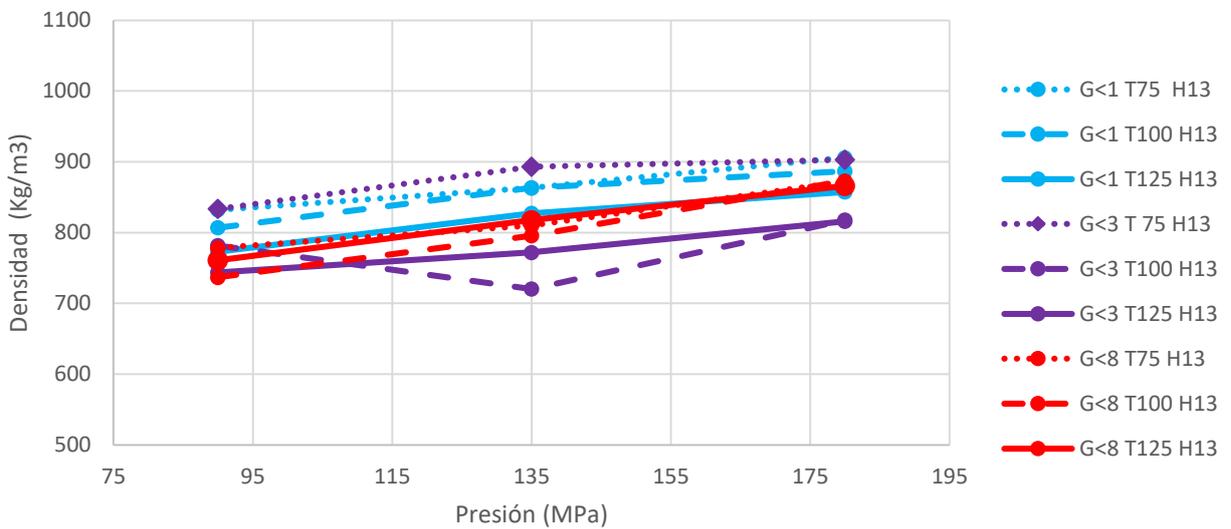


Figura 6.8: Densidad para humedad del 13%.

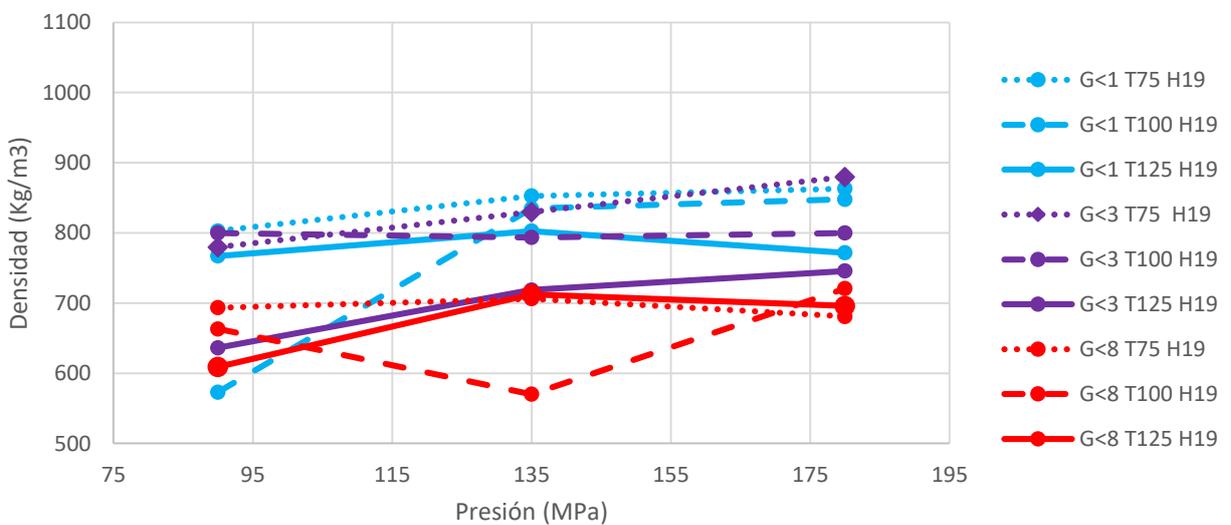


Figura 6.9: Densidad para humedad del 19%.

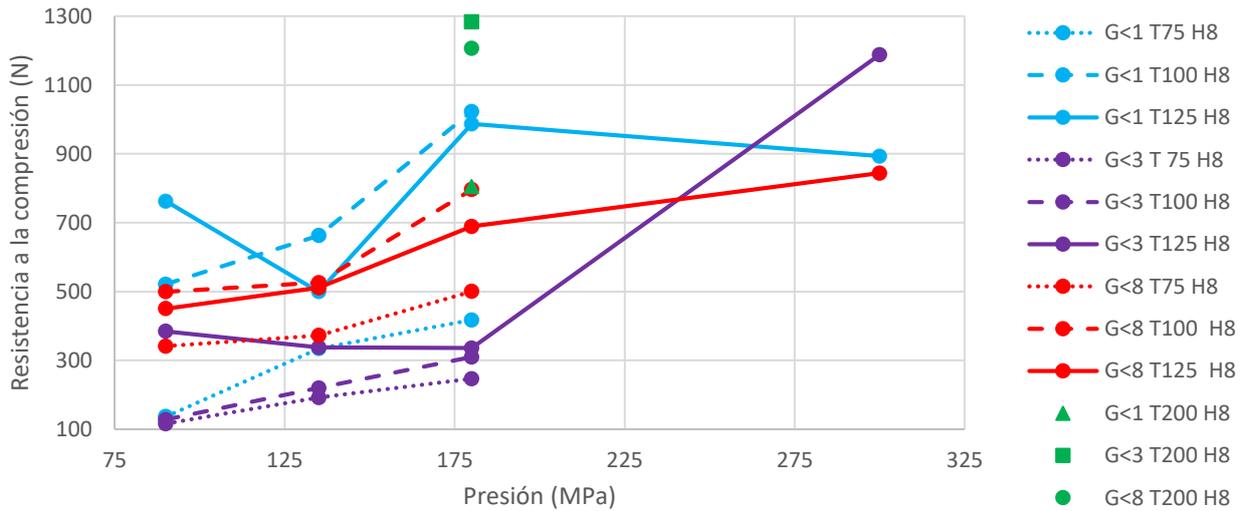


Figura 6.10: Resistencia a compresión para Humedad del 8%.

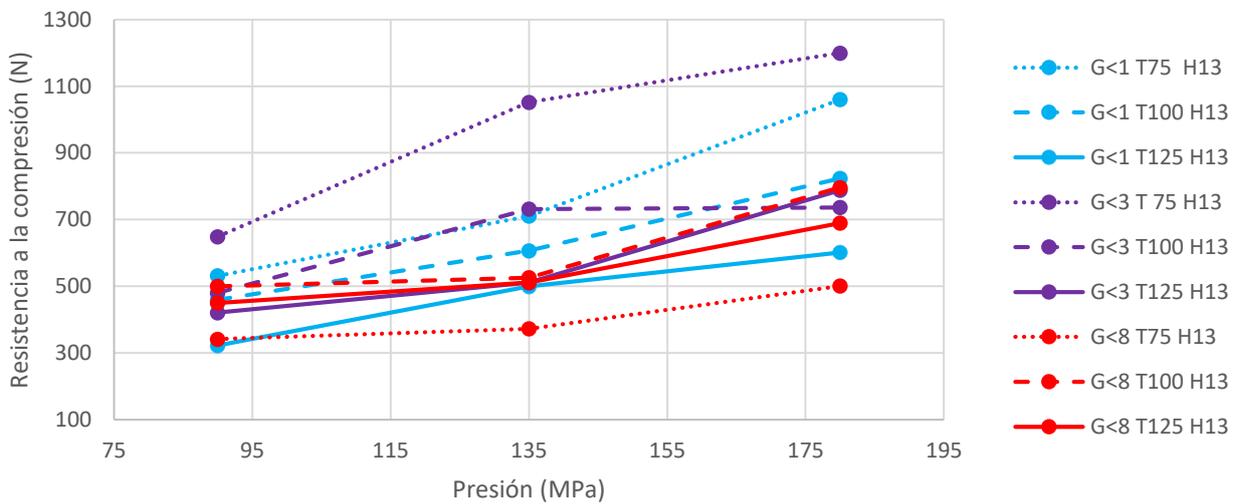


Figura 6.11: Resistencia a compresión para Humedad del 13%.

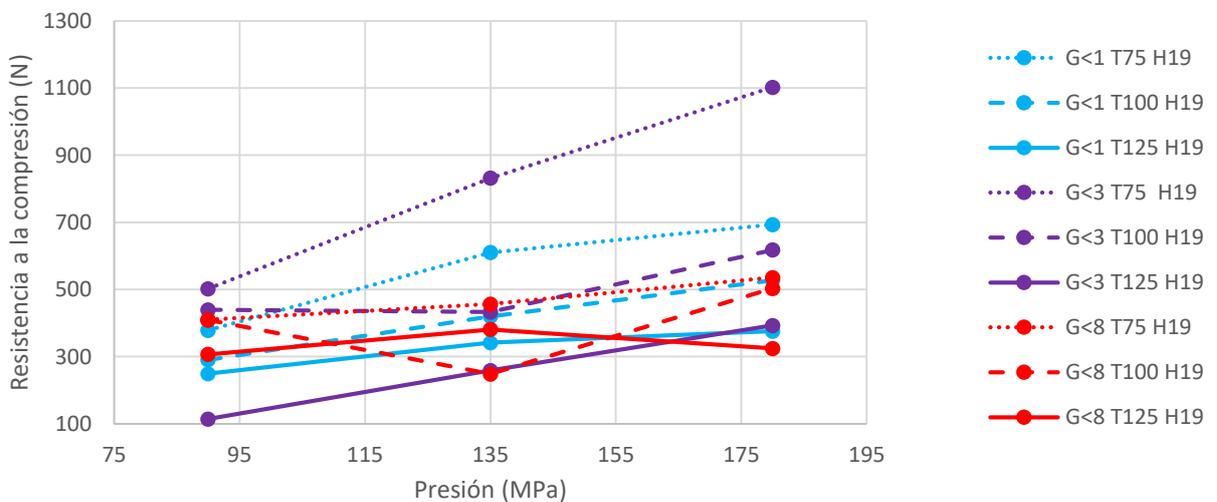


Figura 6.12: Resistencia a compresión para Humedad del 19%.

6.1.3. Comparación de indicadores de calidad principales “densidad y la resistencia a la compresión”

En las siguientes graficas se compara los valores de densidad y resistencia la compresión obtenidos en los ensayos de los diferentes especímenes de briquetas, con el fin de comparar los cambios de estos parámetros de calidad frente a los cambios en los parámetros de fabricación (presión y temperatura briqueteado, humedad y granulometría). Estos resultados se agrupan por densidad y granulometría. Indicando en el eje de las abscisas la presión de fabricación, con las diferentes curvas se indica la temperatura de fabricación y en el eje de las ordenadas se indica los valores de los indicadores de calidad.

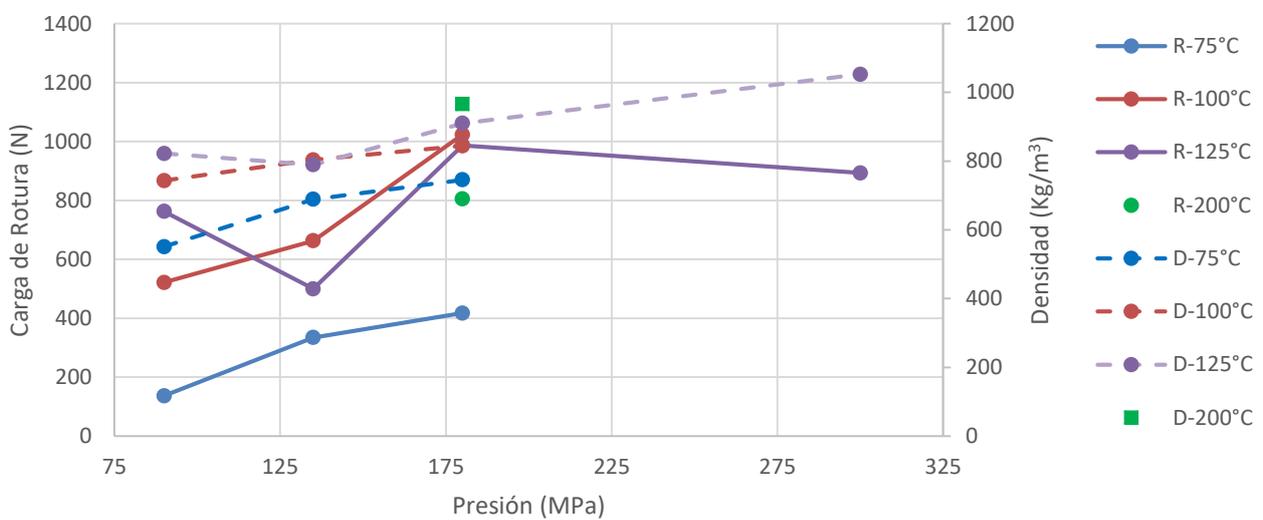


Figura 6.13: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría <1 mm y una humedad del 8%.

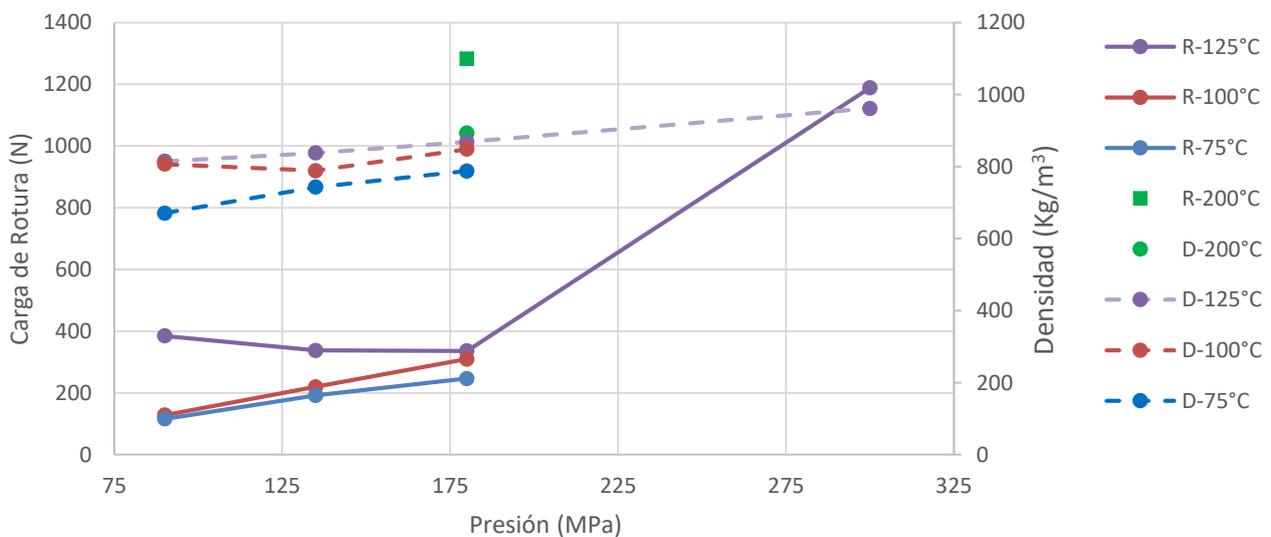


Figura 6.14: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría <3 mm y una humedad del 8%

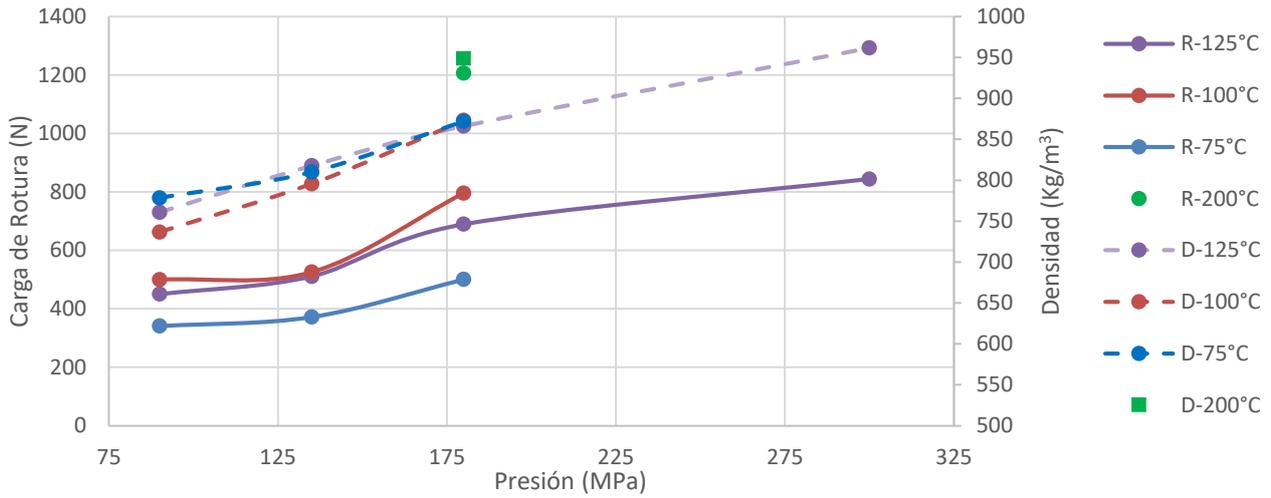


Figura 6.15: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 8 mm y una humedad del 8%.

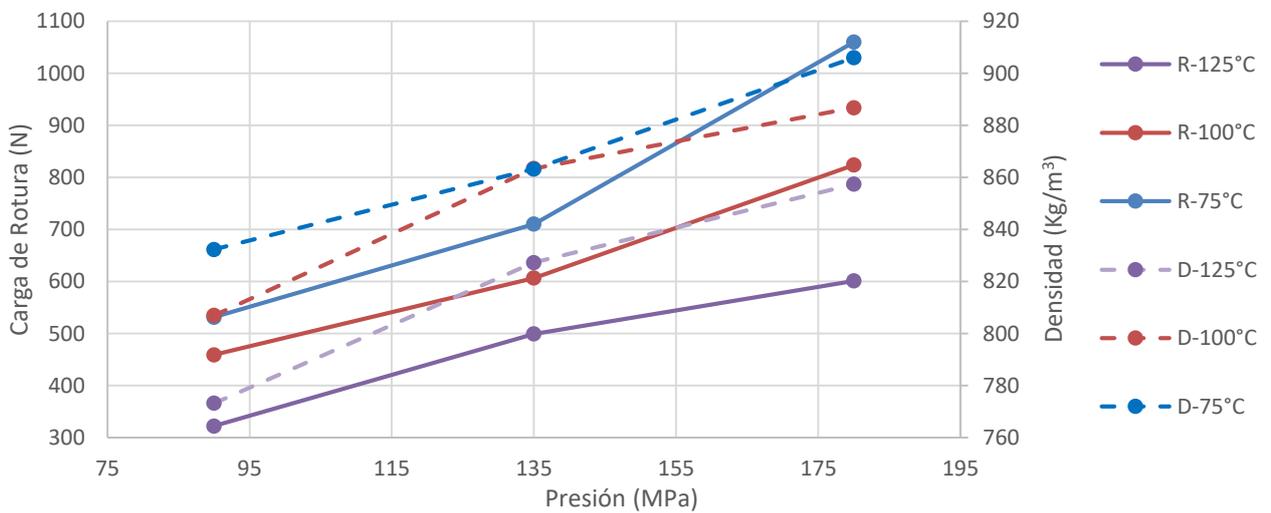


Figura 6.16: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 1 mm y una humedad del 13%.

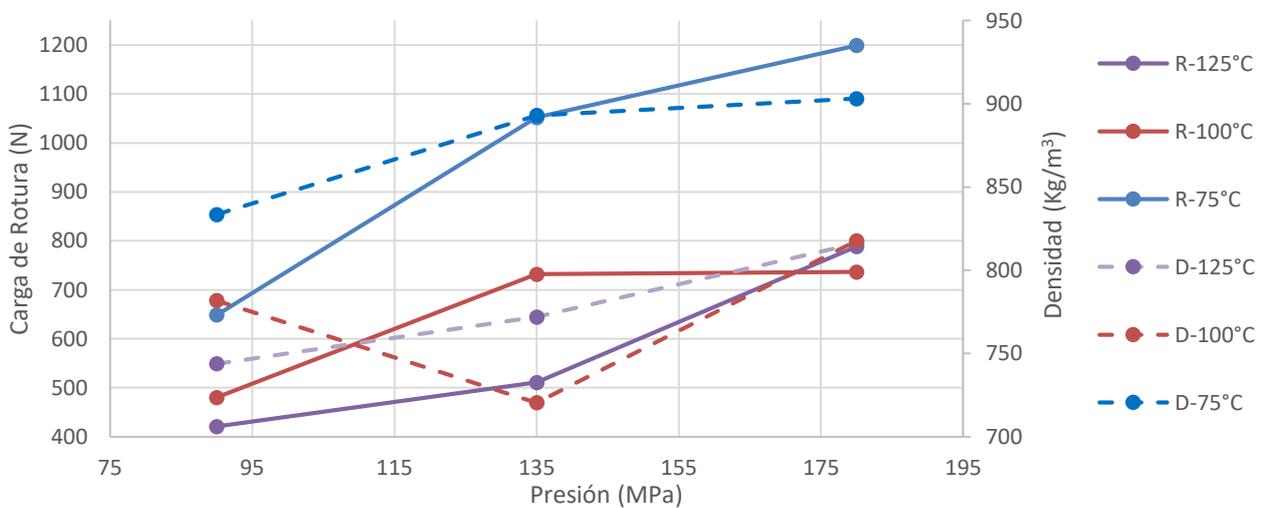


Figura 6.17: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 3 mm y una humedad del 13%.

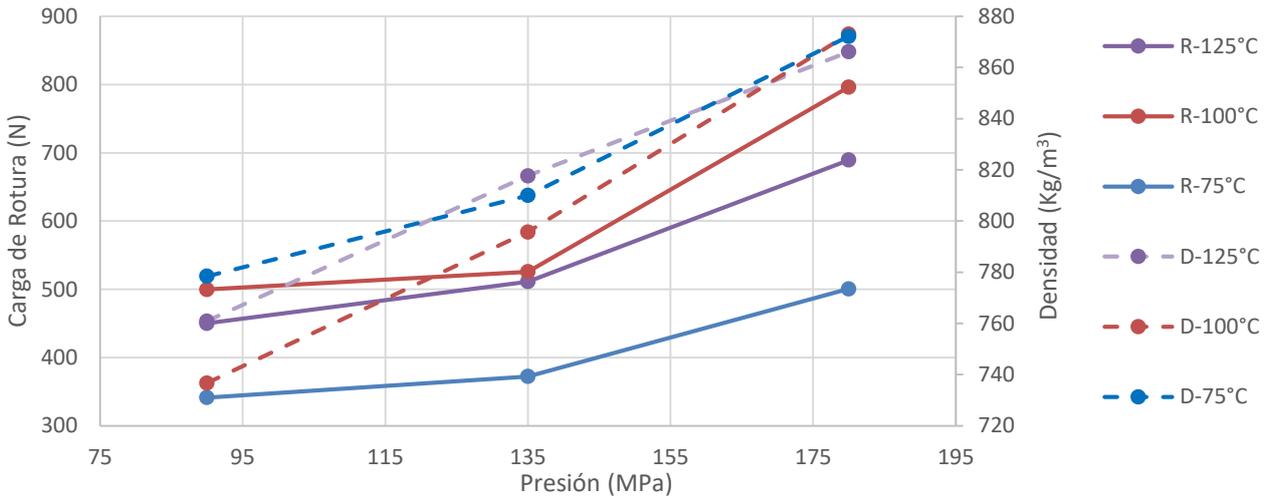


Figura 6.18: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 8 mm y una humedad del 13%.

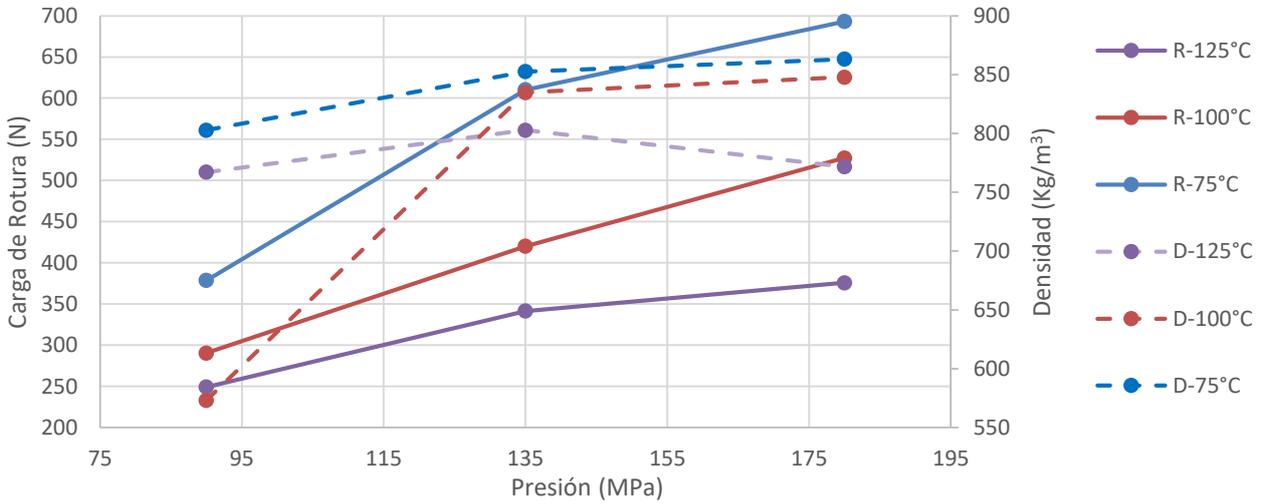


Figura 6.19: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 1 mm y una humedad del 19%.

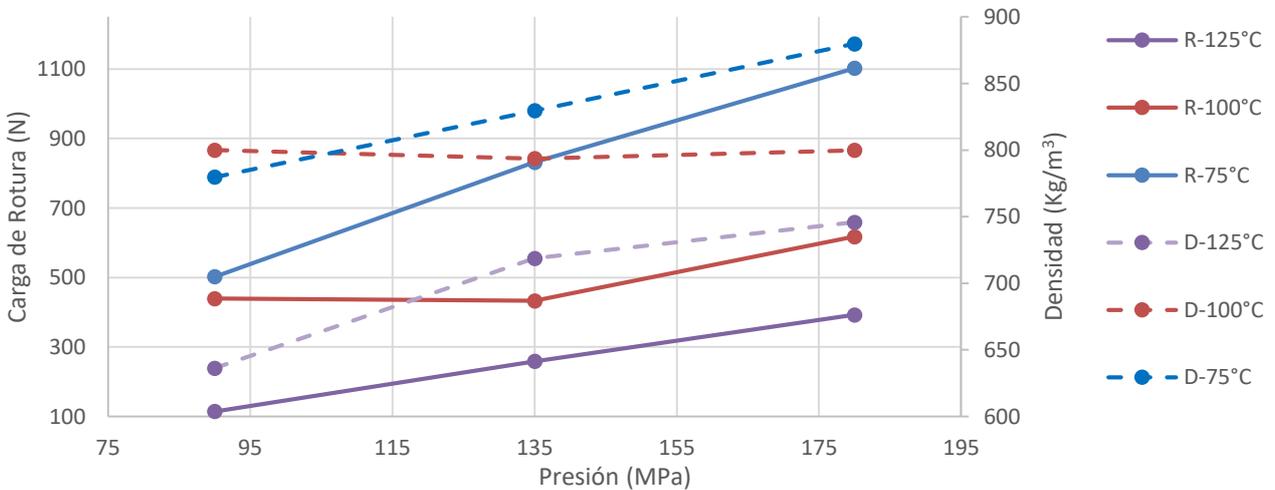


Figura 6.20: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 3 mm y una humedad del 19%.

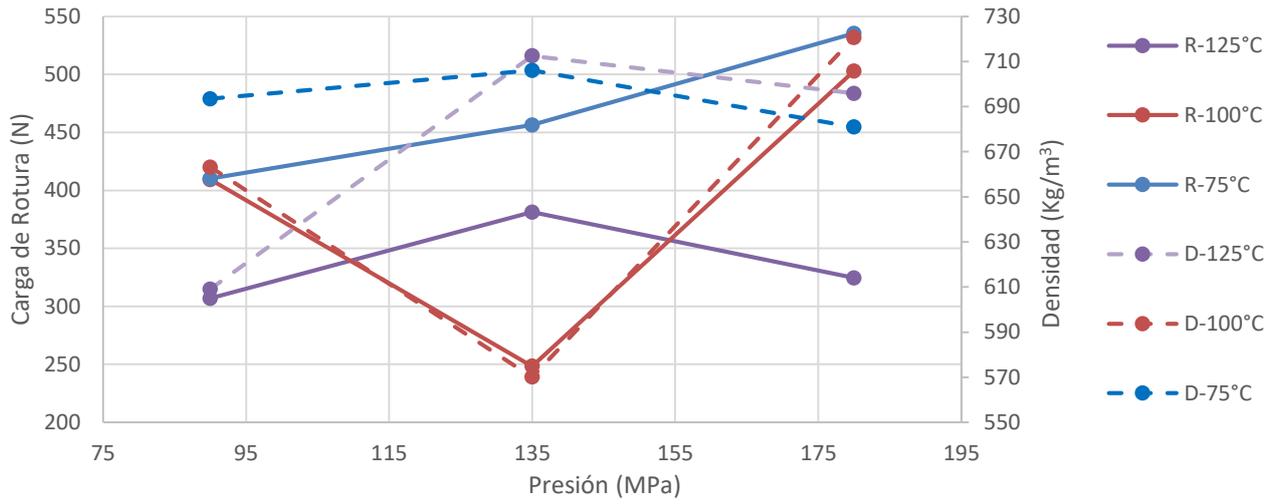


Figura 6.21: Comparación entre densidad y Resistencia la compresión para una granulometría < 8 mm y una humedad del 19%.

6.1.4. Reordenamiento y comparación de los resultados obtenidos

En este apartado se presentan en las siguientes tablas los resultados de los indicadores de calidad de densidad y resistencia a la compresión ordenados de acuerdo con el orden de ensayos y en la tabla final los resultados de forma reordenada de acuerdo con la semisuma de los valores indicadores de calidad (densidad y resistencia) esto con el fin de ordenar y visibilizar cual es la combinación más conveniente de los parámetros de producción para obtener la mayor calidad final.

En la columna del extremo derecho de las tablas valores se muestra la semisuma de los valores de densidad y resistencia a la compresión normalizados por el máximo valor obtenido. Esta normalización tiene el objetivo de mostrar los valores en porcentajes relativos. Tomando como 100 % al máximo obtenido, posibilitando ver los incrementos o decrementos de la calidad respecto a la variación a los parámetros de fabricación.

Tabla 6.4: Resultados de carga de rotura ordenados según la secuencia de ensayos.

Ordenados según la secuencia de ensayos						
Nº de Orden	Espécimen	Resistencia a la compresión N	Resistencia a la compresión Normalizada al máximo	Densidad	Densidad Normalizada al máximo	semisuma de normalizados al máximo
1	G<1_W08_075c_090	136,7	11,4	550,8	60,5	36,0
2	G<1_W08_075c_135	334,5	27,9	689,0	75,7	51,8
3	G<1_W08_075c_180	417,5	34,8	745,3	81,9	58,4
4	G<1_W08_100c_090	521,2	43,5	743,2	81,7	62,6
5	G<1_W08_100c_135	662,5	55,2	803,8	88,3	71,8
6	G<1_W08_100c_180	1023,1	85,3	844,6	92,8	89,1
7	G<1_W08_125c_090	762,5	63,6	822,0	90,4	77,0
8	G<1_W08_125c_135	499,6	41,7	789,4	86,8	64,2
9	G<1_W08_125c_180	986,7	82,3	909,8	100,0	91,1
10	G<1_W08_125c_300	893,2	74,5	1052,4	115,7	95,1
11	G<1_W08_200c_180	804,6	67,1	966,3	106,2	86,6
12	G<1_W13_075c_090	531,5	44,3	832,3	91,5	67,9
13	G<1_W13_075c_135	710,4	59,2	863,2	94,9	77,1
14	G<1_W13_075c_180	1060,0	88,4	906,0	99,6	94,0
15	G<1_W13_100c_090	459,3	38,3	724,1	79,6	58,9
16	G<1_W13_100c_135	606,7	50,6	863,4	94,9	72,7
17	G<1_W13_100c_180	823,7	68,7	886,8	97,5	83,1
18	G<1_W13_125c_090	322,4	26,9	773,3	85,0	55,9
19	G<1_W13_125c_135	499,4	41,6	827,3	90,9	66,3
20	G<1_W13_125c_180	601,2	50,1	857,4	94,2	72,2
21	G<1_W19_075c_090	378,7	31,6	802,8	88,2	59,9
22	G<1_W19_075c_135	610,2	50,9	852,6	93,7	72,3
23	G<1_W19_075c_180	693,2	57,8	863,2	94,9	76,3
24	G<1_W19_100c_090	290,4	24,2	573,1	63,0	43,6
25	G<1_W19_100c_135	420,1	35,0	834,8	91,8	63,4
26	G<1_W19_100c_180	527,3	44,0	847,9	93,2	68,6
27	G<1_W19_125c_090	249,2	20,8	767,1	84,3	52,5
28	G<1_W19_125c_135	341,3	28,5	802,7	88,2	58,3
29	G<1_W19_125c_180	375,7	31,3	771,7	84,8	58,1
30	G< 3_W08_075c_090	366,8	30,6	670,4	73,7	52,1
31	G< 3_W08_075c_135	609,6	50,8	743,1	81,7	66,3
32	G< 3_W08_075c_180	775,3	64,6	787,7	86,6	75,6
33	G< 3_W08_100c_090	542,0	45,2	806,9	88,7	66,9
34	G< 3_W08_100c_135	735,0	61,3	788,7	86,7	74,0
35	G< 3_W08_100c_180	1026,6	85,6	848,6	93,3	89,4

36	G< 3_W08_125c_090	966,3	80,6	814,6	89,5	85,1
37	G< 3_W08_125c_135	848,8	70,8	837,8	92,1	81,4
38	G< 3_W08_125c_180	1008,1	84,1	868,2	95,4	89,7
39	G< 3_W08_125c_300	-1188,2	-99,1	-961,6	-105,7	102,4
40	G< 3_W08_200c_180	-1283,1	-107,0	-1042,0	-114,5	110,8
41	G< 3_W13_075c_090	648,7	54,1	833,5	91,6	72,8
42	G< 3_W13_075c_135	1052,1	87,7	893,0	98,2	92,9
43	G< 3_W13_075c_180	1199,3	100,0	903,2	99,3	99,6
44	G< 3_W13_100c_090	480,0	40,0	781,8	85,9	63,0
45	G< 3_W13_100c_135	731,8	61,0	720,4	79,2	70,1
46	G< 3_W13_100c_180	736,5	61,4	817,7	89,9	75,6
47	G< 3_W13_125c_090	420,7	35,1	743,8	81,8	58,4
48	G< 3_W13_125c_135	510,7	42,6	771,9	84,8	63,7
49	G< 3_W13_125c_180	788,3	65,7	816,0	89,7	77,7
50	G< 3_W19_075c_090	502,2	41,9	779,7	85,7	63,8
51	G< 3_W19_075c_135	831,6	69,3	829,6	91,2	80,3
52	G< 3_W19_075c_180	1102,1	91,9	879,8	96,7	94,3
53	G< 3_W19_100c_090	439,5	36,6	800,0	87,9	62,3
54	G< 3_W19_100c_135	432,7	36,1	793,6	87,2	61,7
55	G< 3_W19_100c_180	617,5	51,5	799,9	87,9	69,7
56	G< 3_W19_125c_090	114,3	9,5	636,3	69,9	39,7
57	G< 3_W19_125c_135	258,8	21,6	718,8	79,0	50,3
58	G< 3_W19_125c_180	392,6	32,7	745,8	82,0	57,4
59	G< 8_W08_075c_090	116,1	9,7	523,1	57,5	33,6
60	G< 8_W08_075c_135	192,1	16,0	594,1	65,3	40,7
61	G< 8_W08_075c_180	246,7	20,6	673,7	74,0	47,3
62	G< 8_W08_100c_090	128,0	10,7	779,0	85,6	48,1
63	G< 8_W08_100c_135	220,0	18,3	630,7	69,3	43,8
64	G< 8_W08_100c_180	309,8	25,8	686,2	75,4	50,6
65	G< 8_W08_125c_090	384,5	32,1	632,9	69,6	50,8
66	G< 8_W08_125c_135	337,7	28,2	737,2	81,0	54,6
67	G< 8_W08_125c_180	336,0	28,0	788,1	86,6	57,3
68	G< 8_W08_125c_300	-844,3	-70,4	-961,6	-105,7	88,0
69	G< 8_W08_200c_180	-1206,5	-100,6	-948,8	-104,3	102,4
70	G< 8_W13_075c_090	341,3	28,5	778,4	85,6	57,0
71	G< 8_W13_075c_135	372,3	31,0	810,0	89,0	60,0
72	G< 8_W13_075c_180	500,6	41,7	872,2	95,9	68,8
73	G< 8_W13_100c_090	499,7	41,7	736,7	81,0	61,3
74	G< 8_W13_100c_135	525,8	43,8	795,7	87,5	65,7
75	G< 8_W13_100c_180	796,4	66,4	873,0	96,0	81,2
76	G< 8_W13_125c_090	450,1	37,5	760,9	83,6	60,6
77	G< 8_W13_125c_135	511,2	42,6	817,7	89,9	66,2
78	G< 8_W13_125c_180	689,4	57,5	866,1	95,2	76,3
79	G< 8_W19_075c_090	410,2	34,2	693,5	76,2	55,2
80	G< 8_W19_075c_135	456,4	38,1	706,1	77,6	57,8
81	G< 8_W19_075c_180	535,4	44,6	680,9	74,8	59,7
82	G< 8_W19_100c_090	409,2	34,1	663,2	72,9	53,5
83	G< 8_W19_100c_135	248,4	20,7	570,1	62,7	41,7
84	G< 8_W19_100c_180	502,9	41,9	720,6	79,2	60,6
85	G< 8_W19_125c_090	306,9	25,6	609,0	66,9	46,3
86	G< 8_W19_125c_135	381,2	31,8	712,5	78,3	55,0
87	G< 8_W19_125c_180	324,6	27,1	695,8	76,5	51,8
	Máximo	1199,3	100,0	909,8	100,0	100,0
	Promedio	537,2	35,7	648,9	71,3	53,5

Tabla 6.5: Resultados de carga de rotura ordenados por densidad.

ordenados por densidad						
Ni de Orden	Espécimen	Resistencia a la compresión N	Resistencia a la compresión Normalizada al máximo	Densidad	Densidad Normalizada al máximo	semisuma de normalizados al máximo
1	G<1_W08_125c_300	893,2	74,5	1052,4	115,7	95,1
2	G<3_W08_200c_180	1283,1	107,0	1042,0	114,5	110,8
3	G<1_W08_200c_180	804,6	67,1	966,3	106,2	86,6
4	G<3_W08_125c_300	1188,2	99,1	961,6	105,7	102,4
5	G<8_W08_125c_300	844,3	70,4	961,6	105,7	88,0
6	G<8_W08_200c_180	1206,5	100,6	948,8	104,3	102,4
7	G<1_W08_125c_180	986,7	82,3	909,8	100,0	91,1
8	G<1_W13_075c_180	1060,0	88,4	906,0	99,6	94,0
9	G<3_W13_075c_180	1199,3	100,0	903,2	99,3	99,6
10	G<3_W13_075c_135	1052,1	87,7	893,0	98,2	92,9
11	G<1_W13_100c_180	823,7	68,7	886,8	97,5	83,1
12	G<3_W19_075c_180	1102,1	91,9	879,8	96,7	94,3
13	G<8_W13_100c_180	796,4	66,4	873,0	96,0	81,2
14	G<8_W13_075c_180	500,6	41,7	872,2	95,9	68,8
15	G<3_W08_125c_180	1008,1	84,1	868,2	95,4	89,7
16	G<8_W13_125c_180	689,4	57,5	866,1	95,2	76,3
17	G<1_W13_100c_135	606,7	50,6	863,4	94,9	72,7
18	G<1_W19_075c_180	693,2	57,8	863,2	94,9	76,3
19	G<1_W13_075c_135	710,4	59,2	863,2	94,9	77,1
20	G<1_W13_125c_180	601,2	50,1	857,4	94,2	72,2
21	G<1_W19_075c_135	610,2	50,9	852,6	93,7	72,3
22	G<3_W08_100c_180	1026,6	85,6	848,6	93,3	89,4
23	G<1_W19_100c_180	527,3	44,0	847,9	93,2	68,6
24	G<1_W08_100c_180	1023,1	85,3	844,6	92,8	89,1
25	G<3_W08_125c_135	848,8	70,8	837,8	92,1	81,4
26	G<1_W19_100c_135	420,1	35,0	834,8	91,8	63,4
27	G<3_W13_075c_090	648,7	54,1	833,5	91,6	72,8
28	G<1_W13_075c_090	531,5	44,3	832,3	91,5	67,9
29	G<3_W19_075c_135	831,6	69,3	829,6	91,2	80,3
30	G<1_W13_125c_135	499,4	41,6	827,3	90,9	66,3
31	G<1_W08_125c_090	762,5	63,6	822,0	90,4	77,0
32	G<3_W13_100c_180	736,5	61,4	817,7	89,9	75,6
33	G<8_W13_125c_135	511,2	42,6	817,7	89,9	66,2
34	G<3_W13_125c_180	788,3	65,7	816,0	89,7	77,7
35	G<3_W08_125c_090	966,3	80,6	814,6	89,5	85,1
36	G<8_W13_075c_135	372,3	31,0	810,0	89,0	60,0
37	G<3_W08_100c_090	542,0	45,2	806,9	88,7	66,9
38	G<1_W08_100c_135	662,5	55,2	803,8	88,3	71,8
39	G<1_W19_075c_090	378,7	31,6	802,8	88,2	59,9
40	G<1_W19_125c_135	341,3	28,5	802,7	88,2	58,3
41	G<3_W19_100c_090	439,5	36,6	800,0	87,9	62,3
42	G<3_W19_100c_180	617,5	51,5	799,9	87,9	69,7
43	G<8_W13_100c_135	525,8	43,8	795,7	87,5	65,7
44	G<3_W19_100c_135	432,7	36,1	793,6	87,2	61,7
45	G<1_W08_125c_135	499,6	41,7	789,4	86,8	64,2
46	G<3_W08_100c_135	735,0	61,3	788,7	86,7	74,0
47	G<8_W08_125c_180	336,0	28,0	788,1	86,6	57,3
48	G<3_W08_075c_180	775,3	64,6	787,7	86,6	75,6
49	G<3_W13_100c_090	480,0	40,0	781,8	85,9	63,0
50	G<3_W19_075c_090	502,2	41,9	779,7	85,7	63,8
51	G<8_W08_100c_090	128,0	10,7	779,0	85,6	48,1
52	G<8_W13_075c_090	341,3	28,5	778,4	85,6	57,0
53	G<1_W13_125c_090	322,4	26,9	773,3	85,0	55,9
54	G<3_W13_125c_135	510,7	42,6	771,9	84,8	63,7
55	G<1_W19_125c_180	375,7	31,3	771,7	84,8	58,1
56	G<1_W19_125c_090	249,2	20,8	767,1	84,3	52,5
57	G<8_W13_125c_090	450,1	37,5	760,9	83,6	60,6
58	G<3_W19_125c_180	392,6	32,7	745,8	82,0	57,4
59	G<1_W08_075c_180	417,5	34,8	745,3	81,9	58,4
60	G<3_W13_125c_090	420,7	35,1	743,8	81,8	58,4
61	G<1_W08_100c_090	521,2	43,5	743,2	81,7	62,6
62	G<3_W08_075c_135	609,6	50,8	743,1	81,7	66,3
63	G<8_W08_125c_135	337,7	28,2	737,2	81,0	54,6
64	G<8_W13_100c_090	499,7	41,7	736,7	81,0	61,3
65	G<1_W13_100c_090	459,3	38,3	724,1	79,6	58,9
66	G<8_W19_100c_180	502,9	41,9	720,6	79,2	60,6

67	G< 3_W13_100c_135	731,8	61,0	720,4	79,2	70,1
68	G< 3_W19_125c_135	258,8	21,6	718,8	79,0	50,3
69	G< 8_W19_125c_135	381,2	31,8	712,5	78,3	55,0
70	G< 8_W19_075c_135	456,4	38,1	706,1	77,6	57,8
71	G< 8_W19_125c_180	324,6	27,1	695,8	76,5	51,8
72	G< 8_W19_075c_090	410,2	34,2	693,5	76,2	55,2
73	G<1_W08_075c_135	334,5	27,9	689,0	75,7	51,8
74	G< 8_W08_100c_180	309,8	25,8	686,2	75,4	50,6
75	G< 8_W19_075c_180	535,4	44,6	680,9	74,8	59,7
76	G< 8_W08_075c_180	246,7	20,6	673,7	74,0	47,3
77	G< 3_W08_075c_090	366,8	30,6	670,4	73,7	52,1
78	G< 8_W19_100c_090	409,2	34,1	663,2	72,9	53,5
79	G< 3_W19_125c_090	114,3	9,5	636,3	69,9	39,7
80	G< 8_W08_125c_090	384,5	32,1	632,9	69,6	50,8
81	G< 8_W08_100c_135	220,0	18,3	630,7	69,3	43,8
82	G< 8_W19_125c_090	306,9	25,6	609,0	66,9	46,3
83	G< 8_W08_075c_135	192,1	16,0	594,1	65,3	40,7
84	G<1_W19_100c_090	290,4	24,2	573,1	63,0	43,6
85	G< 8_W19_100c_135	248,4	20,7	570,1	62,7	41,7
86	G<1_W08_075c_090	136,7	11,4	550,8	60,5	36,0
87	G< 8_W08_075c_090	116,1	9,7	523,1	57,5	33,6

Tabla 6.6: Resultados de carga de rotura ordenados por resistencia.

ordenados por resistencia a la compresión						
Nº de Orden	Espécimen	Resistencia a la compresión N	Resistencia a la compresión Normalizada al máximo	Densidad	Densidad Normalizada al máximo	semisuma de normalizados al máximo
1	G< 3_W08_200c_180	1283,1	107,0	1042,0	114,5	110,8
2	G< 8_W08_200c_180	1206,5	100,6	948,8	104,3	102,4
3	G< 3_W13_075c_180	1199,3	100,0	903,2	99,3	99,6
4	G< 3_W08_125c_300	1188,2	99,1	961,6	105,7	102,4
5	G< 3_W19_075c_180	1102,1	91,9	879,8	96,7	94,3
6	G<1_W13_075c_180	1060,0	88,4	906,0	99,6	94,0
7	G< 3_W13_075c_135	1052,1	87,7	893,0	98,2	92,9
8	G< 3_W08_100c_180	1026,6	85,6	848,6	93,3	89,4
9	G<1_W08_100c_180	1023,1	85,3	844,6	92,8	89,1
10	G< 3_W08_125c_180	1008,1	84,1	868,2	95,4	89,7
11	G<1_W08_125c_180	986,7	82,3	909,8	100,0	91,1
12	G< 3_W08_125c_090	966,3	80,6	814,6	89,5	85,1
13	G<1_W08_125c_300	893,2	74,5	1052,4	115,7	95,1
14	G< 3_W08_125c_135	848,8	70,8	837,8	92,1	81,4
15	G< 8_W08_125c_300	844,3	70,4	961,6	105,7	88,0
16	G< 3_W19_075c_135	831,6	69,3	829,6	91,2	80,3
17	G<1_W13_100c_180	823,7	68,7	886,8	97,5	83,1
18	G<1_W08_200c_180	804,6	67,1	966,3	106,2	86,6
19	G< 8_W13_100c_180	796,4	66,4	873,0	96,0	81,2
20	G< 3_W13_125c_180	788,3	65,7	816,0	89,7	77,7
21	G< 3_W08_075c_180	775,3	64,6	787,7	86,6	75,6
22	G<1_W08_125c_090	762,5	63,6	822,0	90,4	77,0
23	G< 3_W13_100c_180	736,5	61,4	817,7	89,9	75,6
24	G< 3_W08_100c_135	735,0	61,3	788,7	86,7	74,0
25	G< 3_W13_100c_135	731,8	61,0	720,4	79,2	70,1
26	G<1_W13_075c_135	710,4	59,2	863,2	94,9	77,1
27	G<1_W19_075c_180	693,2	57,8	863,2	94,9	76,3
28	G< 8_W13_125c_180	689,4	57,5	866,1	95,2	76,3
29	G<1_W08_100c_135	662,5	55,2	803,8	88,3	71,8
30	G< 3_W13_075c_090	648,7	54,1	833,5	91,6	72,8
31	G< 3_W19_100c_180	617,5	51,5	799,9	87,9	69,7
32	G<1_W19_075c_135	610,2	50,9	852,6	93,7	72,3
33	G< 3_W08_075c_135	609,6	50,8	743,1	81,7	66,3
34	G<1_W13_100c_135	606,7	50,6	863,4	94,9	72,7
35	G<1_W13_125c_180	601,2	50,1	857,4	94,2	72,2
36	G< 3_W08_100c_090	542,0	45,2	806,9	88,7	66,9
37	G< 8_W19_075c_180	535,4	44,6	680,9	74,8	59,7
38	G<1_W13_075c_090	531,5	44,3	832,3	91,5	67,9
39	G<1_W19_100c_180	527,3	44,0	847,9	93,2	68,6
40	G< 8_W13_100c_135	525,8	43,8	795,7	87,5	65,7
41	G<1_W08_100c_090	521,2	43,5	743,2	81,7	62,6
42	G< 8_W13_125c_135	511,2	42,6	817,7	89,9	66,2
43	G< 3_W13_125c_135	510,7	42,6	771,9	84,8	63,7
44	G< 8_W19_100c_180	502,9	41,9	720,6	79,2	60,6
45	G< 3_W19_075c_090	502,2	41,9	779,7	85,7	63,8
46	G< 8_W13_075c_180	500,6	41,7	872,2	95,9	68,8
47	G< 8_W13_100c_090	499,7	41,7	736,7	81,0	61,3
48	G<1_W08_125c_135	499,6	41,7	789,4	86,8	64,2
49	G<1_W13_125c_135	499,4	41,6	827,3	90,9	66,3
50	G< 3_W13_100c_090	480,0	40,0	781,8	85,9	63,0
51	G<1_W13_100c_090	459,3	38,3	724,1	79,6	58,9
52	G< 8_W19_075c_135	456,4	38,1	706,1	77,6	57,8
53	G< 8_W13_125c_090	450,1	37,5	760,9	83,6	60,6
54	G< 3_W19_100c_090	439,5	36,6	800,0	87,9	62,3
55	G< 3_W19_100c_135	432,7	36,1	793,6	87,2	61,7
56	G< 3_W13_125c_090	420,7	35,1	743,8	81,8	58,4
57	G<1_W19_100c_135	420,1	35,0	834,8	91,8	63,4
58	G<1_W08_075c_180	417,5	34,8	745,3	81,9	58,4
59	G< 8_W19_075c_090	410,2	34,2	693,5	76,2	55,2
60	G< 8_W19_100c_090	409,2	34,1	663,2	72,9	53,5
61	G< 3_W19_125c_180	392,6	32,7	745,8	82,0	57,4
62	G< 8_W08_125c_090	384,5	32,1	632,9	69,6	50,8
63	G< 8_W19_125c_135	381,2	31,8	712,5	78,3	55,0
64	G<1_W19_075c_090	378,7	31,6	802,8	88,2	59,9
65	G<1_W19_125c_180	375,7	31,3	771,7	84,8	58,1
66	G< 8_W13_075c_135	372,3	31,0	810,0	89,0	60,0

67	G< 3_W08_075c_090	366,8	30,6	670,4	73,7	52,1
68	G<1_W19_125c_135	341,3	28,5	802,7	88,2	58,3
69	G< 8_W13_075c_090	341,3	28,5	778,4	85,6	57,0
70	G< 8_W08_125c_135	337,7	28,2	737,2	81,0	54,6
71	G< 8_W08_125c_180	336,0	28,0	788,1	86,6	57,3
72	G<1_W08_075c_135	334,5	27,9	689,0	75,7	51,8
73	G< 8_W19_125c_180	324,6	27,1	695,8	76,5	51,8
74	G<1_W13_125c_090	322,4	26,9	773,3	85,0	55,9
75	G< 8_W08_100c_180	309,8	25,8	686,2	75,4	50,6
76	G< 8_W19_125c_090	306,9	25,6	609,0	66,9	46,3
77	G<1_W19_100c_090	290,4	24,2	573,1	63,0	43,6
78	G< 3_W19_125c_135	258,8	21,6	718,8	79,0	50,3
79	G<1_W19_125c_090	249,2	20,8	767,1	84,3	52,5
80	G< 8_W19_100c_135	248,4	20,7	570,1	62,7	41,7
81	G< 8_W08_075c_180	246,7	20,6	673,7	74,0	47,3
82	G< 8_W08_100c_135	220,0	18,3	630,7	69,3	43,8
83	G< 8_W08_075c_135	192,1	16,0	594,1	65,3	40,7
84	G<1_W08_075c_090	136,7	11,4	550,8	60,5	36,0
85	G< 8_W08_100c_090	128,0	10,7	779,0	85,6	48,1
86	G< 8_W08_075c_090	116,1	9,7	523,1	57,5	33,6
87	G< 3_W19_125c_090	114,3	9,5	636,3	69,9	39,7

Tabla 6.7: Resultados de carga de rotura ordenados por la semi-suma de D*R.

ordenados por la semi-suma de D*R						
Nº de Orden	Espécimen	Resistencia a la compresión N	Resistencia a la compresión Normalizada al máximo	Densidad	Densidad Normalizada al máximo	semisuma de normalizados al máximo
1	G< 3_W08_200c_180	1283,1	107,0	1042,0	114,5	110,8
2	G< 8_W08_200c_180	1206,5	100,6	948,8	104,3	102,4
3	G< 3_W08_125c_300	1188,2	99,1	961,6	105,7	102,4
4	G< 3_W13_075c_180	1199,3	100,0	903,2	99,3	99,6
5	G<1_W08_125c_300	893,2	74,5	1052,4	115,7	95,1
6	G< 3_W19_075c_180	1102,1	91,9	879,8	96,7	94,3
7	G<1_W13_075c_180	1060,0	88,4	906,0	99,6	94,0
8	G< 3_W13_075c_135	1052,1	87,7	893,0	98,2	92,9
9	G<1_W08_125c_180	986,7	82,3	909,8	100,0	91,1
10	G< 3_W08_125c_180	1008,1	84,1	868,2	95,4	89,7
11	G< 3_W08_100c_180	1026,6	85,6	848,6	93,3	89,4
12	G<1_W08_100c_180	1023,1	85,3	844,6	92,8	89,1
13	G< 8_W08_125c_300	844,3	70,4	961,6	105,7	88,0
14	G<1_W08_200c_180	804,6	67,1	966,3	106,2	86,6
15	G< 3_W08_125c_090	966,3	80,6	814,6	89,5	85,1
16	G<1_W13_100c_180	823,7	68,7	886,8	97,5	83,1
17	G< 3_W08_125c_135	848,8	70,8	837,8	92,1	81,4
18	G< 8_W13_100c_180	796,4	66,4	873,0	96,0	81,2
19	G< 3_W19_075c_135	831,6	69,3	829,6	91,2	80,3
20	G< 3_W13_125c_180	788,3	65,7	816,0	89,7	77,7
21	G<1_W13_075c_135	710,4	59,2	863,2	94,9	77,1
22	G<1_W08_125c_090	762,5	63,6	822,0	90,4	77,0
23	G< 8_W13_125c_180	689,4	57,5	866,1	95,2	76,3
24	G<1_W19_075c_180	693,2	57,8	863,2	94,9	76,3
25	G< 3_W13_100c_180	736,5	61,4	817,7	89,9	75,6
26	G< 3_W08_075c_180	775,3	64,6	787,7	86,6	75,6
27	G< 3_W08_100c_135	735,0	61,3	788,7	86,7	74,0
28	G< 3_W13_075c_090	648,7	54,1	833,5	91,6	72,8
29	G<1_W13_100c_135	606,7	50,6	863,4	94,9	72,7
30	G<1_W19_075c_135	610,2	50,9	852,6	93,7	72,3
31	G<1_W13_125c_180	601,2	50,1	857,4	94,2	72,2
32	G<1_W08_100c_135	662,5	55,2	803,8	88,3	71,8
33	G< 3_W13_100c_135	731,8	61,0	720,4	79,2	70,1
34	G< 3_W19_100c_180	617,5	51,5	799,9	87,9	69,7
35	G< 8_W13_075c_180	500,6	41,7	872,2	95,9	68,8
36	G<1_W19_100c_180	527,3	44,0	847,9	93,2	68,6
37	G<1_W13_075c_090	531,5	44,3	832,3	91,5	67,9
38	G< 3_W08_100c_090	542,0	45,2	806,9	88,7	66,9
39	G<1_W13_125c_135	499,4	41,6	827,3	90,9	66,3
40	G< 3_W08_075c_135	609,6	50,8	743,1	81,7	66,3
41	G< 8_W13_125c_135	511,2	42,6	817,7	89,9	66,2
42	G< 8_W13_100c_135	525,8	43,8	795,7	87,5	65,7
43	G<1_W08_125c_135	499,6	41,7	789,4	86,8	64,2
44	G< 3_W19_075c_090	502,2	41,9	779,7	85,7	63,8
45	G< 3_W13_125c_135	510,7	42,6	771,9	84,8	63,7
46	G<1_W19_100c_135	420,1	35,0	834,8	91,8	63,4
47	G< 3_W13_100c_090	480,0	40,0	781,8	85,9	63,0
48	G<1_W08_100c_090	521,2	43,5	743,2	81,7	62,6
49	G< 3_W19_100c_090	439,5	36,6	800,0	87,9	62,3
50	G< 3_W19_100c_135	432,7	36,1	793,6	87,2	61,7
51	G< 8_W13_100c_090	499,7	41,7	736,7	81,0	61,3
52	G< 8_W13_125c_090	450,1	37,5	760,9	83,6	60,6
53	G< 8_W19_100c_180	502,9	41,9	720,6	79,2	60,6
54	G< 8_W13_075c_135	372,3	31,0	810,0	89,0	60,0
55	G<1_W19_075c_090	378,7	31,6	802,8	88,2	59,9
56	G< 8_W19_075c_180	535,4	44,6	680,9	74,8	59,7
57	G<1_W13_100c_090	459,3	38,3	724,1	79,6	58,9
58	G< 3_W13_125c_090	420,7	35,1	743,8	81,8	58,4
59	G<1_W08_075c_180	417,5	34,8	745,3	81,9	58,4
60	G<1_W19_125c_135	341,3	28,5	802,7	88,2	58,3
61	G<1_W19_125c_180	375,7	31,3	771,7	84,8	58,1
62	G< 8_W19_075c_135	456,4	38,1	706,1	77,6	57,8
63	G< 3_W19_125c_180	392,6	32,7	745,8	82,0	57,4
64	G< 8_W08_125c_180	336,0	28,0	788,1	86,6	57,3
65	G< 8_W13_075c_090	341,3	28,5	778,4	85,6	57,0
66	G<1_W13_125c_090	322,4	26,9	773,3	85,0	55,9

67	G< 8_W19_075c_090	410,2	34,2	693,5	76,2	55,2
68	G< 8_W19_125c_135	381,2	31,8	712,5	78,3	55,0
69	G< 8_W08_125c_135	337,7	28,2	737,2	81,0	54,6
70	G< 8_W19_100c_090	409,2	34,1	663,2	72,9	53,5
71	G<1_W19_125c_090	249,2	20,8	767,1	84,3	52,5
72	G< 3_W08_075c_090	366,8	30,6	670,4	73,7	52,1
73	G<1_W08_075c_135	334,5	27,9	689,0	75,7	51,8
74	G< 8_W19_125c_180	324,6	27,1	695,8	76,5	51,8
75	G< 8_W08_125c_090	384,5	32,1	632,9	69,6	50,8
76	G< 8_W08_100c_180	309,8	25,8	686,2	75,4	50,6
77	G< 3_W19_125c_135	258,8	21,6	718,8	79,0	50,3
78	G< 8_W08_100c_090	128,0	10,7	779,0	85,6	48,1
79	G< 8_W08_075c_180	246,7	20,6	673,7	74,0	47,3
80	G< 8_W19_125c_090	306,9	25,6	609,0	66,9	46,3
81	G< 8_W08_100c_135	220,0	18,3	630,7	69,3	43,8
82	G<1_W19_100c_090	290,4	24,2	573,1	63,0	43,6
83	G< 8_W19_100c_135	248,4	20,7	570,1	62,7	41,7
84	G< 8_W08_075c_135	192,1	16,0	594,1	65,3	40,7
85	G< 3_W19_125c_090	114,3	9,5	636,3	69,9	39,7
86	G<1_W08_075c_090	136,7	11,4	550,8	60,5	36,0
87	G< 8_W08_075c_090	116,1	9,7	523,1	57,5	33,6

CAPÍTULO 7

ANALISIS DE CALIDAD EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS INDUSTRIALES

7.1. Introducción

En este capítulo se analizan los cambios y correlaciones entre los indicadores de calidad de las briquetas según los valores de ensayos de Densidad (D) y Resistencia a compresión (R) en función de los parámetros de fabricación industriales, tanto los parámetros tecnológicos como la presión de conformado (P) y temperatura de conformado (T), así también los parámetros de biomasa como el contenido de humedad (W) y su granulometría (G).

Para esto se analizan las gráficas y tablas presentadas en el capítulo anterior, obtenidas a partir de los ensayos realizados en el marco de esta tesis. Primero se analizó los cambios de calidad determinados por las variaciones de Densidad y Resistencia a la compresión para cada uno de los parámetros de fabricación de forma independiente, en conjunto a este análisis también se estudia como los cambios de los parámetros de fabricación en grupo o en conjunto inciden en los parámetros de calidad de las briquetas.

En la determinación de los valores óptimos de los parámetros de fabricación desde el punto de vista técnico económico, con el fin de ajustar la producción de briquetas a la mejorar la calidad posible respecto a las exigencias de la norma de referencia ISO 17225. De forma que este análisis se realizar comparando los resultados obtenidos en los ensayos de los especímenes conformados en los rangos nominales de los valores de los parámetros de fabricación (P, T, W y G) según la siguiente tabla, en conjunto con los resultados de los especímenes conformados para estudiar la tendencia de cambio de estos parámetros de forma puntual, los cuales son una presión de 300 MPa y una temperatura de 200°C.

Tabla 7.1: Rango y valores nominales de los parámetros de ensayos.

Parámetros	valores		
Humedad (W) %	8	13	19
Granulometría (G) mm	<1	< 3	< 8
Presión (P) MPa	90	135	180
Temperatura (T) °C	75	100	125

7.2. Estudio de la variación de Densidad y Resistencia a la compresión para cada Granulometría en función de Presión, Temperatura y Contenido de humedad

En este apartado se analizó y describirá los cambios de densidad y resistencia a la compresión para cada granulometría en las briquetas, respecto a la variación de los parámetros Humedad, Presión y Temperatura, agrupando estas variaciones de acuerdo con las granulometrías como se aprecia en las Figura 6.1 a Figura 6.9.

7.2.1. Análisis de los cambios de Densidad y resistencia a la compresión para la granulometría inferior a 1 mm

En la Figura 6.1 y en la Figura 6.4 se aprecian las variaciones de la Densidad y Resistencia respectivamente para los diferentes puntos de Presión 90, 135, 180 y 300 MPa para la granulometría inferior a 1 mm en la cual se analizará las curvas de fabricación a las diferentes Temperaturas de 75, 100 y 125 °C y el punto de estudio de tendencia a 200 °C en las humedades 8,13,19%.

Para realizar el análisis de estas variaciones en las figuras se separa en curvas a los gráficos de acuerdo con sus parámetros de fabricación: granulometría, humedad y temperatura, analizando los cambios entre los puntos de presión. Por ejemplo, la curva "G<1W8-T75" representa a las briquetas fabricadas con una granulometría inferior menor a un milímetro, con un contenido humedad del 8% a una temperatura de 75°C para todos los puntos de Presión.

7.2.1.1. Curva G<1-W8-T75

En la Figura 6.1 se puede observar que las variaciones de la Densidad son proporcionales a los cambios de Presión, logrando un incremento de la Densidad de 551,689 y 745 Kg/ m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de la Densidad para los cambios de Presión, alcanzando una variación del 35,2% cuando aumenta la presión P al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa

En la Figura 6.4 se puede observar que las variaciones de R son proporcionales a los cambios de Presión logrando un incremento de la Resistencia de 137, 334, 417 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión P desde 90 MPa hasta 180 MPa, la resistencia a compresión R se incrementa un 204,3%, pero al compáralo con el aumento de la Presión a partir de 135 MPa hasta los 180 MPa el incremento de Resistencia fue del 124%. Esta variación de la resistencia denota una asíntota baja debido a la poca liberación de lignina por la baja temperatura del proceso.

7.2.1.2. Curva G<1-W8-T100

En la Figura 6.1 se observa que las variaciones de Densidad son de forma directa respecto a los aumentos de la presión logrando un avance de la densidad de 743, 804 y 845 Kg/m³ para las

presiones de 90, 135 y 180 MPa. Al aumentar la P al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa la Densidad solo se incrementa un 13.7% por lo que los cambios de Densidad son menos sensibles esto se debe a que se parte de un valor superior de Densidad inicial.

En la Figura 6.4 se observa las variaciones de Resistencia son proporcionales a los aumentos presión logrando un incremento de Resistencia de 521, 663, 1023 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la Presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa de la R se incrementa un 96,3%. Por lo que se observa que esta curva muestra los mejores resultados para la humedad del 8% debido a la liberación de lignina.

7.2.1.3. Curva G<1-W8-T125

Al analizar la curva de densidad en la Figura 6.1 se observa que las variaciones de densidad son proporcionales a los cambios presión logrando un incremento de la densidad de 822, 789 y 910 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Se observa que al aumentar la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa la densidad se incrementa un 10.7%. Esto se debe a que los cambios de densidad son menos sensibles cuando se parte de un valor inicial inferior, ya que la mayor temperatura libera mejor la lignina con una baja presión. En este caso en el punto de los 180 MPa se alcanza una densidad mayor a los 900 Kg/m³ lo cual es necesario para los estándares de la ISO-17225 A2 y B.

Para el punto de 135 MPa en la curva se observa que para el incremento de la presión en un 50% este punto, respecto a los 90 MPa la densidad se redujo un a un 96%. Este fenómeno se explica en que los incrementos de presión traen aparejados aumentos de la temperatura lo que provoca el aumento de la fricción interna en la cámara de briqueteado, lo que conlleva una degradación de estructura de las briquetas, al compararse con el punto anterior de menor presión, ya que, a esta presión mayor no se logra reordenar la estructura interna de las briquetas de forma más compacta, lo cual concluye en una briqueta con menos densidad. Esta tendencia se mantiene para todos los especímenes de los puntos en estudio de G<1-W8-T125-P90 y G<1-W8-T125-P135 como se observa en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: comparación de densidad entre los puntos G<1-W8-T125-P90 y G<1 W8-T125-P135.

Espécimen	Densidad	Promedio
G<1_W08_125c_090_1	969	762
G<1_W08_125c_090_2	724	
G<1_W08_125c_090_3	595	
G<1_W08_125c_135_1	623	500
G<1_W08_125c_135_2	473	
G<1_W08_125c_135_3	402	

No obstante, se aprecia que la tendencia de la curva “G<1-W8-T125” muestra que mientras mayor presión mayor será la densidad como se aprecia en los puntos G<1-W8-T125-P180 y G<1-W8-T125-P300.

En el estudio de tendencia al ampliar la curva a 300 MPa se obtuvo una densidad de 1052 Kg/m³ valor el cual indica que para un aumento de la presión de 333.3% para un aumento de la densidad de 27.9 %. Por lo que con este valor de presión se supera los 1000 Kg/m³ lo que permite alcanzar el estándar de A1 de la norma ISO-17225. Esta tendencia confirma la hipótesis de que al aumentar la presión se incrementa la densidad. No obstante, en algunos puntos esto no se cumple debido a que los aumentos de presión no conforman una estructura más compacta y rígida debido a la degradación de la briqueta provocada por la sobre fricción la cual perjudica a la conformación de la estructura de las briquetas, además generan una sobre temperatura en la parte exterior de la briqueta lo que en el caso de baja humedad provoca el recalentamiento que provoca partículas lo cual las carboniza disminuyendo la calidad de las briquetas.

En el análisis de la curva de la resistencia de la compresión en la Figura 6.4 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios presión, logrando un avance de la resistencia de 762, 500, 987, 893 N para las presiones de 90, 135, 180 y 300MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa la resistencia se incrementa un 29,5 %. Esta curva muestra la falta de tendencia ya que en los 135 y 300 MPa la R disminuye respecto a su punto anterior. Esto se debe a la que la estructura de las briquetas pierde rigidez debido a la sobre temperatura instantánea la cual no permite la liberación de lignina, pero si crea un exceso de fricción, el cual debilita estructura las briquetas debido a carbonización de las partículas. Además, en este caso no se libera la lignina debido a la falta de contenido de humedad la cual es fundamental para transportar calor el cual libere la lignina, la cual aglomera y solidifica a la estructura de la briqueta.

7.2.1.4. Curva G<1-W13-T75

En la curva de análisis de la densidad en la Figura 6.1 se puede observar los que las variaciones de la densidad son proporcionales a los cambios presión logrando un incremento de la densidad de 832, 863, 906 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa la densidad se incrementa un 8,9% por lo que las mejoras en la densidad son menores que para el caso de 8% de humedad. Esto se debe a que las condiciones iniciales son mejores ya que el contenido de humedad ayuda a transferir el calor, calor que libera la lignina la cual consolida y mejora la estructura interna de las briquetas. Por lo que en el punto de 180 MPa los especímenes superan los 900 Kg/m³ lo cual es necesario para alcanzar los estándares de la ISO-17225 A2 y B.

En la curva de la resistencia de la compresión en la Figura 6.4 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios presión logrando unos incrementos de la

resistencia del 531, 710, 1060 N para las Presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa de la resistencia se incrementa un 99,6%. Siendo esta curva es la de mejores resultados para esta granulometría y humedad ya que en este caso se puede transportar el calor y liberar lignina fortaleciendo la estructura de las briquetas.

7.2.1.5. Curva G<1-W13-T100

En la Figura 6.1 se observa que los incrementos de densidad son proporcionales a los cambios de la presión logrando un incremento de presión de 807, 863, 887 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presiones desde los 90 MPa hasta 180 MPa la densidad se incrementó un 9,9% por lo que las mejoras en la densidad son menores que para el caso del 8% de humedad. Esto se debe a que a bajas presiones el mayor contenido de humedad da mejores resultados iniciales y el incremento es menor para el aumento de presión.

En la Figura 6.4 se observa que los incrementos de la resistencia son proporcionales a los cambios presión logrando un incremento de 459, 607, 824 N para las Presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa de la resistencia se incrementa un 79,5%. Por lo que en esta curva se observa que el calor excesivo reduce la calidad de la briqueta comparada con el caso de 75°C para un contenido de humedad del 13%.

7.2.1.6. Curva G<1-W13-T125

En la Figura 6.1 se puede observar que los incrementos de la densidad son proporcionales a los cambios de la presión logrando un incremento de la densidad de 773, 827, 857 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa la densidad se incrementa un 10,8%. en esta curva se observa como el aumento de la temperatura disminuye la calidad de las briquetas con respecto a la curva G<1-W13-T100 debido a la evaporación de la humedad interna la cual genera poros.

En la Figura 6.4 se observa que los aumentos de la resistencia son proporcionales a los cambios presión logrando un incremento de la resistencia de 322, 499, 601 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa la resistencia se incrementa un 86,6%. Esta curva se puede apreciar como el trabajo con altas temperaturas generar poros en contenidos medios de humedad, poros los cuales degradan la estructura de la briqueta disminuyendo de la resistencia.

7.2.1.7. Curva G<1-W19-T75

En la Figura 6.1 se observa que los cambios incrementos de densidad son proporcionales a los cambios presión logrando un incremento de la densidad de 803, 853, 863 Kg/m³ para las Presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa la

densidad se incrementa un 7.4%. Se observa que se mantiene la tendencia de los incrementos de la densidad para los incrementos presión. Pero a su vez se puede observar a que se tiene a una asíntota muy baja ya que en el aumento desde los 135 a los 180 MPa solo se mejoró un 1.01% para un aumento de la presión de un 50%.

En la Figura 6.4 se observa que los incrementos de la resistencia son proporcionales a los cambios presión logrando un incremento de 379, 610, 693 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presiones desde los 90 MPa hasta los 180 MPa de la resistencia se incrementa un 82,8%. En este caso, esta curva es la de mejores resultados para esta humedad y granulometría debido a que la sobre temperatura en los casos de 100 y 125°C reduce la rigidez de las briquetas en los casos de altos contenidos de humedad.

7.2.1.8. Curva G<1-W19-T100

En la Figura 6.1 se observa que los incrementos de la densidad son proporcionales a los cambios de presión logrando un incremento de 779, 835, 848 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa la densidad se incrementa un 9.7%. Se puede observar una gran ganancia inicial de la densidad, pero en este caso también se observa un aumento de la densidad con una asíntota baja o techo de la densidad bajo, ya que al aumentar la presión desde los 135 a los 180 MPa de solo 1.5% para un aumento de la presión de un 50%.

En la Figura 6.4 se observa los incrementos de resistencia son proporcionales a los cambios de la presión logrando un incremento de la resistencia de 290, 420, 527 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa la resistencia se incrementa un 81,7%. En esta curva se observa como al incrementar la temperatura en altos contenidos de Humedad la resistencia disminuye en lugar de aumentar a causa de las expansiones de las partículas de agua.

7.2.1.9. Curva G<1-W19-T125

En la Figura 6.1 se observa las variaciones de la densidad no tienen una tendencia definida respecto a los cambios presión logrando unos avances de la densidad de 767, 803, 772 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta 180 MPa la densidad se incrementó un 0.06%, aunque hasta el punto medio se observó un incremento del 4.6%. En esta curva se ratifica la hipótesis que mientras mayor temperatura menor es la densidad a causa de las expansiones de las partículas de agua. Además, en el punto de mayor presión se puede observar un degradamiento de la briqueta a una densidad inferior al punto medio. Esto se debe a que los efectos secundarios de los aumentos de la presión como el aumento de la fricción y a una sobre temperatura. Aunque se espera que, con mayor número de puntos de

análisis, aumente la densidad para aumentos de la presión como en el caso de la curva G<1-W8-T125

En la Figura 6.4 se observa los incrementos de la resistencia son proporcionales a los cambios presión logrando un incremento de 249, 341, 376 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa la resistencia se incrementa un 51%. En esta curva se puede apreciar como la temperatura en lugar de liberar lignina provoca la evaporación de las partículas de agua las cual genera poros los cuales debilitan la estructura de las briquetas.

7.2.1.10. Punto de estudio de tendencia G<1-W8-T200-P180

En este punto de estudio de tendencia de la densidad en la Figura 6.1, se observa como para los bajos contenidos de humedad a medida que aumenta la temperatura, aumenta la densidad debido a la liberación de la lignina la cual consolida compacta la estructura de la briketa, por lo que al comparar la densidad entre los de puntos de 75°C y los 200°C se aprecia un incremento de la densidad de 29,6% (966 Kg/ m³ / 745Kg/ m³). Y un avance del 6,1% al comparar la densidad desde los 125°C hasta los 200°C, todos estos puntos estudiados a una presión de 180 MPa.

Este incremento de la densidad al aumentar la temperatura desde 125°C hasta los 200 °C es equivalente a conformar una briketa con 246 MPa y una temperatura de 125 °C si se considera una proyección lineal de la densidad de la curva G<1-W8-T125 como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7.3: Proyección lineal de la densidad para G<1-W8

$y_0 = y_1 + m(x_0 - x_1)$		$m = (y_0 - y_1) / (x_0 - x_1)$	
$y_0 - y_1 = m(x_0 - x_1)$		m	1,18
X0	180	y2	966
x1	300	$x_2 = x_0 - (y_0 - y_2) / m$	
y0	910	x2	228
y1	1052		

En este punto de estudio de tendencia de la resistencia a la compresión en la Figura 6.4, se observa que al comparar este punto con los tres restantes que se fabricaron con una humedad del 8% y una presión de 180 MPa, se aprecia serva que hay un punto óptimo próximo a los 100 °C. Ya que por arriba de este punto la resistencia desciende desde 1023N para 100°C hasta los 805 N para 200 °C lo que implica una reducción al 78,6 % debido a la fricción y carbonización de las partículas las cual reducen rigidez a la briketa.

7.2.1.11. Resumen del análisis de la densidad y resistencia a la compresión para una granulometría inferior a 1 mm:

Se observa al analizar la Figura 6.1 que en las curvas de menor contenido de humedad, es decir las curvas del 8% de humedad, la densidad se incrementa con el incremento de la temperatura. Mientras que para las curvas de mayor contenido de humedad y mayor temperatura menor es la densidad, ya que al aumento de temperatura provoca que las partículas de agua se expandan creando poros, los cuales reducen la densidad de las briquetas. Esto se correlaciona directamente con el tamaño del grano ya que según sea la estructura de la briketa la expansión y transmisión del calor inciden en diferentes tasas.

Por lo que las variaciones sean tanto incrementos como las reducciones del contenido de humedad y temperatura son parámetros que inciden en la calidad de la briketa de forma conjunta. Por lo que el incremento de la temperatura no siempre causa un incremento en la calidad de las briquetas ya que es necesario conocer el contenido de humedad previo al aumento de la temperatura para aumentar la densidad.

En el caso del incremento de la presión de conformado de las briquetas, mostro que en todos los casos analizados siempre incrementa la calidad de las briquetas, aunque en algunos puntos no se cumpla, por efectos secundarios como la fricción o sobre temperatura no homogénea. No obstante, en casi todos los casos se mantiene la tendencia general de que los aumentos de presión incrementan la calidad de las briquetas.

En los casos de un contenido de humedad del 8% se muestra un inicio de los valores bajos debido a la falta de agua, la cual transmite el calor y libere de la lignina, componente que incrementa la rigidez de la briketa por lo que a los 100°C se observan los valores más altos, ya que al incrementarse la temperatura y alcanzar los 125°C y los 200°C a causa de los bajos contenidos de humedad y al no tener una buena transmisión de calor entre las partículas de las briquetas, las partículas del exterior se carboniza disminuyendo la calidad de las briquetas.

Para los contenidos de humedad del 13% se observa que los mejores resultados se dan a bajas temperaturas ya que para esta granulometría a partir desde los 100°C en adelante el incremento de la temperatura degrada la calidad de las briquetas por la expansión de las partículas de agua. Ocurriendo de igual forma para en contenido de humedad del 19%.

El incremento de la presión de conformado de las briquetas es un parámetro el cual al incrementarse causan en la mayoría de los casos un incremento de la resistencia a la compresión de las briquetas, aunque en algunos puntos no se cumpla, por efectos secundarios como la fricción o sobre temperatura no homogénea. Se aprecia que la tendencia en general es que antes los incrementos de la presión se incremente la resistencia a la compresión.

7.2.2. Análisis de los cambios de Densidad y resistencia a la compresión para la granulometría inferior a 3 mm

En la Figura 6.2 y en la Figura 6.5 se observan las variaciones de la densidad y la resistencia a la compresión para los diferentes puntos de presión 90, 135, 180 y 300 MPa para la granulometría inferior a 3 mm. En estas graficas se analiza las curvas de fabricación a diferentes temperaturas 75, 100 y 125 °C y puntos de tendencia 200°C para los contenidos de humedad del 8,13 y 19% con el fin de evaluar los cambios de calidad ante los diferentes cambios en los parámetros de fabricación. Este análisis se realizará de forma sistemática analizando la curva de fabricación de la densidad y luego de la resistencia a la compresión.

7.2.2.1. Curva G3-W8-T75.

En la Figura 6.2 se observa que los incrementos de la densidad son proporcionales a los incrementos de la presión, apreciando un incremento de 670, 743 y 787 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, alcanzando un incremento del 17.4 % para un aumento del doble de la presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. Siendo esta curva la de menor calidad para este contenido de humedad debido a la baja liberación de lignina a causa de la baja temperatura.

En la Figura 6.5 se observa que las variaciones de la resistencia a la compresión son proporcionales a los incrementos de presión logrando un incremento de 116, 192, y 246 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa, la resistencia a compresión se incrementa un 112%. siendo esta curva la de menor resistencia debido a la falta liberación de lignina por la baja temperatura.

7.2.2.2. Curva G< 3W8T100

En la Figura 6.2 se observa que las variaciones de la densidad son proporcionales a los incrementos de la presión, logrando un incremento de 806, 788 y 848 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión de conformado, alcanzando una variación del 5,2% para un aumento de la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. No obstante para el aumento desde 90 a 135 MPa la densidad disminuyó al 97 % del valor a los 90 MPa, lo cual se debe a que el aumento de presión no logra reestructurar las partículas de la briqueta de forma compacta sino al contrario debido a los efectos negativos del aumento de presión como el aumento de fricción la densidad disminuye.

En la Figura 6.5 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los incrementos de presión logrando un avance de 128, 220 y 309,8 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta 180 MPa, la resistencia se incrementa un 141,4 %. Por lo que se observa que la curva de resistencia es sensible ante los incrementos de presión de forma directa.

7.2.2.3. Curva G3-W8-T125.

En la Figura 6.2 se observa que las variaciones de la densidad son proporcionales a los incrementos de la presión, logrando un incremento de 814, 837, 868, 961 Kg/m³ para las presiones de 90, 135, 180 y 300 MPa. Esto muestra la sensibilidad de la densidad a los cambios de presión, alcanzando un incremento del 18 % para un aumento del 233% de la presión desde 90 MPa hasta 300 MPa.

En la Figura 6.5 se observa que la variación de la resistencia es función la presión logrando un avance de 384, 337, 336 y 1188 N para las presiones de 90, 135, 180 y 300 MPa. Ya que al aumentar la presión un 233% desde los 90 MPa hasta 300 MPa, la resistencia se incrementó un 109,3%. En este aumento entre los puntos extremos de la curva no implica un aumento punto a punto de la resistencia, ya que en los puntos intermedios se muestra una degradación de la resistencia debido a la sobre temperatura la cual no se transfiere a toda la briqueta debido al bajo contenido de humedad, lo que causa en carbonicen las partículas disminuyendo su resistencia.

7.2.2.4. Curva G3-W13-T75.

En la Figura 6.2 se observa que las variaciones de la densidad son proporcionales a los cambios de la presión, logrando un avance de 833, 893 y 903 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, alcanzando un incremento del 8.4% cuando aumenta la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. Siendo este el caso de mejores resultados para esta granulometría y contenido de humedad. Por lo que entes caso se alcanza el mínimo requerido por la norma ISO 17225 para las briquetas de clases A2 y B.

En la Figura 6.5 se observa que los incrementos de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un incremento de 648, 1052 y 1199 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta 180 MPa, la resistencia se incrementa un 85%. Siendo este el mejor caso para esta humedad y granulometría ya que el aumento de la temperatura disminuye tanto a la resistencia como a la densidad.

7.2.2.5. Curva G3-W13-T100

En la Figura 6.2 se observa que las variaciones de la densidad son proporcionales a los cambios de presión, logrando un incremento de 782, 720 y 818 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de la presión, alcanzando un incremento del 4.6% para un aumento de presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa lo cual es bajo para un aumento del 100% de la presión. Aunque para el punto de 135 MPa se observa una reducción al 90% respecto el valor a 90 Mpa. No obstante, se cumple la tendencia general de que los incrementos de presión de conformado aumentan la densidad de las briquetas.

En la Figura 6.5 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un incremento de 480, 732 y 737 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Al aumentar al doble la presión desde 90 MPa hasta los 180 MPa, la resistencia se incrementa un 53,5%. Por lo que en esta curva se observa una asíntota baja ya que al aumentar la presión desde 135 a 180 MPa la resistencia aumento un 0.6%.

7.2.2.6. Curva G3-W13-T125

En la Figura 6.2 se observa que las variaciones de la densidad son proporcionales a los cambios de presión, logrando un avance de la densidad de 744, 772 y 816 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, alcanzando una variación del 9.6% para un aumento de la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. Por lo que se puede apreciar que en este caso la densidad siempre se incrementa para los aumentos de presión, aunque esta curva no es la de mejores resultados para esta granulometría y contenido de humedad.

En la Figura 6.5 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los incrementos de presión logrando un incremento de la resistencia de 421, 511 y 788 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Al aumentar al doble la presiones desde 90 MPa hasta los 180 MPa, la resistencia se incrementa un 87%.

7.2.2.7. Curva G3-W19-T75

En la Figura 6.2 se observa que los incrementos de la densidad son proporcionales a los incrementos de la presión, logrando un avance de la densidad de 780, 830 y 880 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, alcanzando una variación del 12.8% cuando aumenta la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. Siendo esta la curva de mayores valores de densidad para el contenido de humedad del 19% ya que los incrementos de temperatura disminuyen la densidad de las briquetas.

En la Figura 6.5 se observa que los incrementos de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un incremento de 502, 832 y 1102 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Ya que al aumentar al doble la presión desde 90 MPa hasta los 180 MPa la resistencia se incrementa un 119,5%. Siendo esta la curva la de mayores valores de resistencia para la humedad del 19%, ya que para temperaturas superiores el agua se transforma en vapor que crean poros los cuales debilitan a la estructura de la briqueta.

7.2.2.8. Curva G3-W19-T100

En la Figura 6.2 se observa que los incrementos de presión provocan variaciones poco sensibles en los valores de la densidad. Por lo que en la curva los valores de la densidad tienen un valor de 800, 794 y 800 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. En este caso no se aprecian

cambios tangibles en la por lo que en este caso la curva no responde a los aumentos de la presión para el rango de los ensayos nominales.

En la Figura 6.5 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un avance de la resistencia de 439, 433 y 618 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Ya que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta 180 MPa la resistencia se incrementa un 40.7%. En este caso se observa que al aumentar la presión un 50% desde los 90 MPa a los 135 MPa la densidad no se incrementó por lo que se confirma que esta curva es poco sensible a los aumentos de la presión. No obstante, se cumple la tendencia en general de que los incrementos de presión generan una resistencia mayor en las briquetas.

7.2.2.9. Curva G3-W19-T125

En la Figura 6.2 se observa que los incrementos de la densidad son proporcionales a los incrementos de presión, logrando un avance de 636, 719 y 746 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de la densidad a los cambios de presión, alcanzando una variación del 17.2% para un aumento de la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. Por lo que para esta granulometría y contenido de humedad el incremento de la temperatura provoca un descenso de la densidad, debido a la expansión de las partículas de agua genera poros los cuales disminuyen la densidad.

En la Figura 6.5 se observa que los incrementos de resistencia son proporcionales a los cambios de la presión logrando un avance de 114, 259 y 393 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Ya que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa, la resistencia se incrementa un 244,7%. Por lo que para esta granulometría y contenido de humedad el incremento de la temperatura provoca un descenso de la densidad, debido a la expansión de las partículas de agua genera poros los cuales debilitan la estructura de las briquetas disminuyendo la resistencia.

7.2.2.10. Punto de estudio de tendencia G3-W8-T200-P180

En este punto de estudio de tendencia en la Figura 6.2 se observa como para los bajos contenidos de humedad a medida que aumenta la temperatura aumenta la densidad debido a la liberación de la lignina. Por lo que al comparar la densidad obtenida entre los de 75°C y los 200°C se muestra un incremento de la densidad de 32.4% (1042 Kg/M³ / 787Kg/M³). Y un incremento del 20% al comparar la densidad con los valores obtenidos entre los 125°C hasta los 200°C (siendo todos estos puntos estudiados a 180 MPa de presión de conformado).

Por lo que para el incremento de la densidad al aumentar la temperatura desde los 125°C hasta los 200 °C equivale a conformar una briketa a 403 MPa de presión de conformado y una temperatura de 125 °C si se considera una proyección lineal de la densidad como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7.4: Proyección lineal de la densidad para G< 3-W8

$y_0 = y_1 + m(x_0 - x_1)$		$m = (y_0 - y_1) / (x_0 - x_1)$	
$y_0 - y_1 = m(x_0 - x_1)$		m	0,78
X0	180	y2	1042,035079
x1	300	$x_2 = x_0 - (y_0 - y_2) / m$	
y0	868,18948	x2	403
y1	961,57359		

Al comparar este punto con los tres restantes que se fabricaron al 8% de humedad. Se verifica la tendencia que mientras mayor temperatura mayor resistencia tendrá debido a la liberación de la lignina, compuesto que solidifica la estructura de la briqueta.

Ya que en los casos de un contenido de humedad del 8% tienen menor resistencia que los de mayor contenido de humedad, a causa de que no hay agua que transporte el calor. Pero si se incrementa la temperatura hasta el punto de la liberación de la lignina en bajos contenidos de humedad se logran los mayores valores para esta granulometría y contenido de humedad.

7.2.2.11. Resumen del análisis de la densidad y resistencia a la compresión para una granulometría inferior a 3 mm:

Al analizar la Figura 6.2 y la Figura 6.5, se observa que para los puntos de menor contenido de humedad es decir del 8% la densidad se presenta una tendencia en general de que los incrementos de presión y/o temperatura la densidad de las briquetas aumenta. Aunque en el caso de curva de G3-W8-T100 no se cumple esto en dos puntos, no obstante, en general se cumple la tendencia de que al aumentar presión y la temperatura se incrementa la densidad.

Mientras que para los casos de mayor contenido de humedad se observa que la densidad de las briquetas aumenta en general con los aumentos de la presión en distintas tasas. Pero en estos casos los valores más altos de densidad se dan a bajas temperaturas debido a que el contenido de humedad reacciona de forma negativa a los incrementos de temperatura.

También se observa que para el rango de los ensayos nominales sin considerar los 300 MPa y los 200°C los mejores resultados se muestran para la humedad del 13% ya que para estos casos se da una buena transferencia de calor y liberación de lignina y no se produce la evaporación de partículas de agua que generen la aparición de poros.

Además, en este análisis se observó que los mejores resultados se dieron en el punto G3-W8-T200-P180 ya que este punto equivale a un punto G3-W8-T125-P315 (315MPa) siendo este incremento de la temperatura más económico que la aumentar la presión a y mantener la temperatura de 125°C.

En el caso de la resistencia a la compresión se observa que para los puntos de menor humedad es decir del 8% la densidad en general tiene un comportamiento de mientras sé que al incrementar la presión y/o temperatura la resistencia de las briquetas aumentara. Aunque en el caso de G3-W8-T125 no se cumple esto en dos puntos, pero en general en la mayoría de los casos la resistencia aumenta con los incrementos de presión.

Mientras que para los casos de mayor contenido de humedad (13 y 19%) se observa que la resistencia de las briquetas aumenta en general con los aumentos la presión de conformado en distintas tasas. En conjunto en estos casos los mejores resultados de resistencia se dan a bajas temperatura debido a que el contenido de humedad reacciona de forma negativa a los incrementos de temperatura.

También se observa que para el rango de los ensayos nominales sin considerar los 300 MPa y los 200°C los mejores resultados se obtuvieron para la humedad del 13% ya que para estos casos se da una buena transferencia de calor y liberación de lignina y no se produce la evaporación que provoca la aparición de poros.

En grafica los mejores resultados de resistencia se dan para los 200°C y con una humedad del 8% ya que este aumento de temperatura permite la liberación de la lignina contenida en la madera la cual trabaja en estructura de la briketa como aglutinante entre las partículas.

7.2.3. Análisis de los cambios de Densidad y resistencia a la compresión para la granulometría inferior a 8 mm

En la Figura 6.3 y en la Figura 6.6 se observan las variaciones de la densidad y la resistencia a la compresión para los diferentes puntos de presión 90, 135, 180 y 300 MPa para la granulometría inferior a 3 mm. En esta graficas se analiza las curvas de fabricación a diferentes temperaturas 75, 100 y 125 °C y puntos de tendencia 200°C para los contenidos de humedad del 8,13 y 19% con el finde evaluar los cambios de calidad ante los diferentes cambios en los parámetros de fabricación. Este análisis se realizará de forma sistemática analizando la curva de fabricación de la densidad y luego de la resistencia a la compresión.

7.2.3.1. Curva G8-W8-T75.

En la Figura 6.3 se observa que las variaciones de la densidad son proporcionales a los cambios de presión, logrando un incremento de 523, 594 y 674 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de la densidad ante los cambios de la presión, alcanzando un aumento del 28.8 % cuando aumenta la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. Siendo esta curva la de menor calidad para esta granulometría y contenido de humedad debido a la baja liberación de lignina por la baja temperatura y contenido de humedad.

En la Figura 6.6. se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un incremento de 116, 192 y 247 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Al aumentar al doble la presión desde 90 MPa hasta los 180 MPa, la resistencia se incrementa un 112,9%. Siendo esta curva la de menor calidad para esta granulometría y contenido de humedad debido a la baja liberación de lignina por la baja temperatura y contenido de humedad.

7.2.3.2. Curva G8-W8-T100.

En la Figura 6.3. se observa que las variaciones de la densidad son proporcionales a los cambios de presión, logrando un descenso de 779, 631 y 686 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra que la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, alcanzando una reducción al 88 % del valor inicial cuando aumenta la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180MPa. Por lo que en esta curva se ven los mejores resultados al inicio y luego se presenta un descenso al 81% del valor inicial al aumentar la presión. En esta curva no se cumple la tendencia en general de que los incrementos de presión generan un incremento en la densidad. Esto se debe a los efectos adversos de la sobre fricción y la sobre temperatura en una estructura granular irregular.

En la Figura 6.6 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un incremento de 128, 220 y 310 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta los 180 MPa, la

resistencia se incrementa un 142%. Por lo que en esta curva se observa que mientras mayor sea la resistencia mayor será la resistencia a la compresión a diferencia de la curva de la densidad.

7.2.3.3. Curva G8-W8-T125.

En la Figura 6.3 se observa las variaciones de la densidad son proporcionales a los cambios de presión, logrando un incremento de 633, 737, 788 y 961 Kg/m³ para las presiones de 90, 135, 180 y 300 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, logrando un aumento del 24,4% al aumentar la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa, y un aumento del 51,8% al comparar los resultados desde los 90 MPa hasta los 300 MPa.

En la Figura 6.6 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un incremento de 385, 338, 336 y 844 N para las presiones de 90, 135, 180 y 300 MPa. Por lo que al aumentar al doble la presión desde los 90 MPa hasta 180 MPa, la resistencia a compresión resistencia se disminuye al 87.2%. No obstante, para un aumento de la presión desde los 90 MPa hasta los 300 MPa se medió un incremento del 119.2%. Por lo que se cumple la tendencia de que los incrementos de presión aumentan la resistencia. No obstante, en los casos anterior en esta granulometría y humedad no se cumple esta tendencia en general debido a las irregularidades de la su granulometría.

7.2.3.4. Curva G8-W13-T75

En la Figura 6.3 se observa las variaciones de la densidad son proporcionales a los cambios de presión, alcanzando un incremento de 778, 810 y 872 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, alcanzando un incremento del 12 % para un aumento de la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. Esta curva la de mejor calidad para esta granulometría y humedad.

En la Figura 6.6 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un incremento de 341, 372 y 501 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Ya que al aumentar al doble la presión desde 90 MPa hasta 180 MPa, la resistencia a compresión se incrementa un 46,9 %. Siendo esta curva la de menor calidad para esta humedad y granulometría.

7.2.3.5. Curva G8-W13-T100

En la Figura 6.3. se observa que las variaciones de la densidad son proporcionales a los cambios de presión, logrando un avance de 737, 796 y 873 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, alcanzando una variación del 18.4 % cuando aumenta la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. Además, se aprecia que para esta humedad y granulometría no se registran grandes variaciones sensibles ante los cambios de temperatura.

En la Figura 6.6 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un incremento de 500, 526 y 796 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa, ya que al aumentar al doble la presión desde 90 MPa hasta los 180 MPa, la resistencia se incrementa un 59.2 %. Siendo esta curva la de mejor valor para esta granulometría y humedad.

7.2.3.6. Curva G8-W13-T125

En la Figura 6.3 se observa las variaciones de la densidad son proporcionales a los cambios de presión, logrando un incremento de 761, 818 y 866 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de la densidad a los cambios de presión, alcanzando una variación del 13.7 % cuando aumenta la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa.

En la Figura 6.6 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un incremento de 450, 511 y 689 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Ya que al aumentar al doble la presión desde 90 MPa hasta los 180 MPa, la resistencia a compresión se incrementa un 53.1%. Esta curva se encuentra por debajo de los valores de la de 100 °C por lo que se ve que la resistencia disminuye con los aumentos de temperatura por encima de los 100 °C.

7.2.3.7. Curva G8-W19-T75

En la Figura 6.3 se observa los incrementos de presión no conllevan incrementos sensibles en la densidad, ya que se aprecia un avance de la densidad de 693, 706 y 681 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, ya que la densidad se redujo al 98.2% del valor inicial cuando aumenta la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. Por lo que se ve que tanto en el punto de 135 y de 180 MPa la densidad no cumple la tendencia de aumentar su valor para los aumentos de presión, aunque se espera que con un rango de mayores se espera que se cumpla la tendencia de los aumentos de densidad para los aumentos de presión.

En la Figura 6.6 se observa que las variaciones de la resistencia son proporcionales a los cambios de presión logrando un avance de 410, 456 y 535 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Al aumentar al doble la presión desde 90 MPa hasta 180 MPa, la resistencia se incrementa un 30.4%. Siendo esta la curva de mayores valores para esta granulometría y humedad, ya que los incrementos de temperatura creando poros que debilitan la estructura de las briquetas reduciendo su resistencia a la compresión.

7.2.3.8. Curva G8-W19-T100

En la Figura 6.3. se observa como las variaciones de la presión provocan variaciones en densidad, por lo que densidad toma los valores de 663, 570 y 721 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, ya que la

densidad se incrementó un 8.7% del valor inicial cuando aumenta la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. En esta curva al considerar el estado final e inicial se ve la tendencia de que la densidad aumenta con los aumentos de presión, aunque en el punto de 135 MPa no se cumple una tendencia esta tendencia.

En la Figura 6.6 se observa como las variaciones de la presión provocan variaciones en la resistencia, por lo que la resistencia toma los valores de 409, 248 y 503 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Ya que al aumentar al doble la presión desde 90 MPa hasta 180 MPa, la resistencia a compresión se incrementa un 22.9%. En esta curva al considerar el estado final e inicial se ve la tendencia de que la resistencia a la compresión aumenta con los aumentos de presión, aunque en el punto de 135 MPa no se cumple una tendencia esta tendencia.

7.2.3.9. Curva G8-W19-T125

En la Figura 6.3 se observa como las variaciones de la presión provocan variaciones en densidad, por lo que la densidad toma valores de 609, 712 y 696 Kg/m³ para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Esto muestra la sensibilidad de densidad a los cambios de presión, ya que la densidad se incrementó un 14.2% del valor inicial cuando aumenta la presión al doble desde los 90 MPa hasta los 180 MPa. Esta curva es la de menor valor inicial más, para esta granulometría y humedad. Por lo que la curva muestra un aumento de densidad ante los aumentos de presión, aunque luego se presente una reducción debido a la sobre temperatura y fricción a causa del incremento de la presión. Aunque la tendencia es que ante un aumento de presión la densidad aumente en consecuencia para un rango más amplio de presión.

En la Figura 6.6 se observa como las variaciones de la presión provocan variaciones en resistencia, por lo que resistencia toma valores de 307, 381 y 325 N para las presiones de 90, 135 y 180 MPa. Al aumentar al doble la presión desde 90 MPa hasta 180 MPa, la resistencia se incrementa un 5.8%. Esta curva es la de peor valor inicial y final para esta granulometría y humedad. No obstante, la curva presenta aumentos de la resistencia para los aumentos de la presión, aunque para el punto de presión de 180 MPa la densidad disminuye, se espera que la resistencia se incremente para rangos de presiones mayores.

7.2.3.10. Punto de estudio de tendencia G8-W8-T200-P180

En este punto de estudio de tendencia de la densidad en la Figura 6.3 se observa que para los bajos contenidos de humedad a medida que aumenta la temperatura, aumenta la densidad debido a la liberación de la lignina, por lo que al comparar la densidad entre los de 75°C y los 200°C se observa un incremento de la densidad de 81.4% (949 Kg/m³ / 523 Kg/M³). Y un incremento de 20.4% al comparar la densidad desde los 125°C hasta los 200°C. (siendo todos estos puntos estudiados a 180 MPa de presión de conformado).

Este incremento de la densidad al aumentar la temperatura desde los 125°C desde los 200 °C equivale a conformar una briqueta con 291 MPa y una temperatura de 125 °C si se considera una proyección lineal de la curva de la densidad para el aumento de la presión como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7.5: Proyección lineal de la densidad para G< 8W8

$y_0 = y_1 + m(x_0 - x_1)$		$m = (y_0 - y_1) / (x_0 - x_1)$	
$y_0 - y_1 = m(x_0 - x_1)$		m	1,45
X0	180	y2	949
x1	300	$x_2 = x_0 - (y_0 - y_2) / m$	
y0	788	x2	291
y1	962		

Siendo esta la forma más económica de llegar a los 900 Kg/m³ que requiere la calidad A2 y B1 de la norma ISO 17225

Al analizar la resistencia del punto en la curva en la Figura 6.6, se verifica la tendencia de que ante un incremento de temperatura se presenta un incremento resistencia debido a la liberación de la lignina. En los casos de las briquetas conformadas al 8% se cumple que, mientras mayor sea la tempera de conformado mayor será la resistencia de la briqueta.

7.2.3.11. Resumen:

Se observa que para los puntos de menor contenido de humedad es decir del 8% la densidad tiende a en general a incrementarse para los incrementos de presión y temperatura. Aunque en el caso de G8-W8-T100 y G8-W8-T125 no se cumple esto en dos puntos debido a contra efectos de los aumentos de presión y temperatura con la fricción y resecamiento o carbonización.

Para los casos de 13% de contenido de humedad se observa que los aumentos presión traen aparejados un aumento de la densidad con tasas similares para distintos valores de temperatura, siendo las curvas poco sensibles a las variaciones de la temperatura.

En los casos del 19% contenido de humedad se observa, la falta de una tendencia en general, ya que los veneficios y prejuicios de los incrementos de presión y temperatura se contraponen por lo que al trabajar con altos contenidos de humedad no se puede definir si los

incrementos de presión y temperatura mejoran la calidad de la briqueta por la falta de homogeneidad en la estructura de los granos que componen a las briquetas.

Los estudios de tendencia realizados al 8% de humedad muestran que para alcanzar los 900 Kg/m³ (exigidos como mínimo por norma) es conveniente incrementar la temperatura antes que la presión ya que se alcanzan valores similares con un mejor costo energético y tecnológico.

Se observa que para los puntos de bajo contenido de humedad es decir del 8% la resistencia a la compresión tiende en general a incrementarse para los aumentos de presión y temperatura. Aunque en la curva G8-W8-T125 no se cumple esto en dos puntos, pero en general la resistencia tiende a aumentar para los incrementos de presión y temperatura.

Para los casos de 13% de contenido de humedad se observa que los aumentos presión traen consigo un aumento de la resistencia, con tasas de aumentos y valores similares para las temperaturas de 100 y 125 °C mostrándose los mejores resultados para 100°C ya que para temperaturas superior el contenido de humedad causa poros debido a la expansión de las partículas de agua y no se libera lignina la cual fortalece la estructura de la briqueta.

En los casos del 19% de contenido de humedad se observa una falta de tendencia ya que los beneficios y prejuicios de los incrementos de presión y temperatura se contraponen por lo que al trabajar humedades altas no se puede mejorar la calidad con incrementos de presión y/o temperatura. No obstante, los mejores resultados se presentaron a 75°C debido a que en esta temperatura el contenido de humedad no tiene contra efecto

Los estudios de tendencia realizados al 8% de humedad muestran que es conveniente para aumentar la resistencia incrementar la temperatura que la presión ya que de esta forma se alcanzan mayores valores de resistencia con menores costo energético y tecnológicos.

7.3. Estudio de la variación de Densidad y Resistencia a la compresión para cada Contenido de humedad en función de Granulometría, Presión y Temperatura

En este apartado se analizará y describirá los cambios de densidad y resistencia a la compresión para cada contenido de humedad en las briquetas respecto a la variación de los parámetros Granulometría, Presión y Temperatura, agrupando estas variaciones de acuerdo con los contenidos de humedad como se aprecia en Figura 6.7 a Figura 6.12.

En la Figura 6.7 se observan las variaciones de la densidad para el contenido de humedad del 8%. En el análisis de esta figura se aprecian las curvas y puntos de estudio de tendencia con el fin de evaluar los cambios de calidad evaluados en los valores la densidad ante los diferentes cambios en los parámetros de fabricación granulometría, temperatura y presión. Se puede apreciar que existe una tendencia general de que a mayor presión de conformado y/o Temperatura se incrementa la densidad obtenida. Ya que en solo dos casos la densidad no incrementa con los aumentos de presión y/o temperatura.

En cuanto a la granulometría se puede apreciar que la mayor calidad es decir valores de densidad altos se da para los casos de granulometría <1 mm y la granulometría <3 mm al comparar estos 2 casos se puede observar que la granulometría <1 mm tiene los mejores resultados para 180 MPa con 125°C y a 300 MPa con 125°C superando los 900 y 1000 Kg/m³ respectivamente siendo los valores más elevados densidad para el contenido de humedad del 8%. No obstante, en el punto de estudio de tendencia de G3-W8-T200-P180 supera los 1000 Kg/m³ siendo este caso más económico que los anteriores a 300 MPa de presión ya que tiene menor costo incrementar la temperatura que la presión. También se aprecia que la granulometría < 3 mm es la que mejor responde a los aumentos de temperatura, mientras que la granulometría <1mm responde mejor a los incrementos de presión. Mientras que para la granulometría <8 mm se observa que es más económico alcanzar los 900 Kg/m³ incrementando la T que la P.

En la Figura 6.10 se observan las variaciones de la resistencia a la compresión para el contenido de humedad del 8%. En el análisis de esta figura se aprecian las curvas y puntos de estudio de tendencia con el fin de evaluar los cambios de calidad evaluados en los valores la resistencia a la compresión ante los diferentes cambios en los parámetros de fabricación granulometría, temperatura y presión.

Por lo que en la figura podemos apreciar como la granulometría incide en la calidad de las briquetas, por lo que al ordenar los valores de resistencia de mayor a menor según la granulometría se ordenan de la siguiente forma <1mm, <3 mm y <8 mm para los valores de presión comprendidos entre los 90 y 180 MPa y una temperatura entre 75 a 125 °C. Pero en los casos de estudios de tendencia es decir 300 MPa y 125°C se puede ordenar de mayor a menor en el siguiente orden de granulometría <3 mm, <1 mm y <8 mm y en el caso de 180 MPa con 200 °C se ordenan <3 mm, <8 y <1 siendo el punto de estudio de tendencia el de mayor interés ya que se obtiene los valores más elevados de resistencia a la compresión con menores costos energéticos.

En cuanto a la temperatura de proceso se puede observar que los resultados más elevados de resistencia se dan para las temperaturas de 100 y 125 °C para las distintas granulometrías. Por lo que en el punto de estudio de tendencia a 200°C se confirma la tendencia de que ante los aumentos de temperatura la R se incrementa para las diferentes granulometrías. Además, se confirma la tendencia en general de que ante los incrementos de presión la resistencia a la compresión se incrementa para todas las granulometrías en general.

7.3.1. Cambio de D y R para el contenido de humedad del 13%

En la Figura 6.8 se observan las variaciones de la densidad para el contenido de humedad del 13%. En el análisis de esta figura se aprecian las curvas y puntos de estudio de tendencia con el fin de evaluar los cambios de calidad evaluados en los valores la densidad ante los diferentes cambios en los parámetros de fabricación granulometría, temperatura y presión. Se puede apreciar

que para este contenido de humedad existe una tendencia en general que los aumentos de presión conllevan un incremento de en la densidad en todas las curvas excepto un punto, aunque la curva que contiene este punto cumple la tendencia de que para un incremento de presión superior la densidad se incrementa.

En cuanto a la temperatura para este contenido de humedad se observar que los mejores resultados se dan a 75°C ya que las partículas de agua se expanden creando poros que disminuyen la densidad, para los valores de temperatura de 100 y 125°C. Aunque no se aprecia una tendencia definida si los resultados que siguen a los de 75 °C se dan a 100°C o ah 125°C ya que esto varía entre las diferentes curvas. Por lo que para un Granulometría <1 mm la curva que le sigue en valores a la de 75°C es la de 100°C. Mientras que para la granulometría <3 mm los valores de la densidad no tienen una tendencia definida ya que la curva a 100°C tiene mejores resultados para a baja presiones, mientras que la curva a 125°C tiene menor valores para media presiones es decir 135 MPa, aunque ambos tienen valores similares para 180 MPa. Para la Granulometría <8 mm la curva que le sigue en valores a la de 75°C es la de 125°C y por último 100°C ya que la liberación de lignina prevalece frente a la sobre temperatura que deteriora la estructura de la briqueta. Esta falta de tendencia se debe a que cada granulometría tiene una estructura diferente en las cuales la humedad incide de forma diferente según la temperatura. En especial la Granulometría <8 mm ya que por su falta de homogeneidad no muestra una tendencia definida.

En cuanto a la granulometría se puede aprecia que existe una tendencia de que le los valores más altos de densidad se encuentran en la Granulometría <1 mm. Luego no se muestra una tendencia defina por los que los mejores valores de densidad para 75°C los tiene las Granulometría <3 mm. Mientras para Granulometría <8 mm tienen una baja sensibilidad a los cambios de temperatura ya que los resultados no muestran diferencias definida como en las otras dos granulometrías mostrando los mejores resultados que la granulometría <3 mm para las temperaturas desde 100°C.

En la Figura 6.11 se observan las variaciones de la resistencia a la compresión para el contenido de humedad del 13%. En el análisis de esta figura se aprecian las curvas y puntos de estudio de tendencia con el finde evaluar los cambios de calidad evaluados en los valores la resistencia a la compresión ante los diferentes cambios en los parámetros de fabricación granulometría, temperatura y presión.

Al analizar esta figura podemos observar que los valores más elevados de la resistencia a la compresión se dan para la granulometría de <3 mm seguidos por los valores alcanzados con una granulometría <1 mm y por último los valores obtenidos con una granulometría <8 mm. Presentándose una tendencia en general de que ante los aumentos de la presión de conformado la resistencia a la compresión se incrementa a diferentes tasas diferentes tasas para las diferentes curvas granulométricas y temperatura.

En cuanto a las temperaturas los mejores resultados se dieron a se dieron a 75 °C para las granulometrías <3 mm y <1 mm respectivamente, seguidos por los valores obtenidos a 100°C y por ultimo los valores obtenidos a 125°C por lo que los efectos contraproducentes del incremento de la temperatura sobre el contenido de humedad superan a los veneficios de alta temperatura a los cuales se libera la lignina a causa de la temperatura.

En cuanto a las briquetas conformadas con una granulometría <8 mm los mejores resultados se dieron a 100°C seguidos por los de 125°C y por ultimo los de 75°C esto se debe a que la humedad se comporta de distintas maneras según la estructura de la briqueta la cual la confiere la granulometría y en especial en el caso de la granulometría <8 mm por su falta de homogeneidad.

7.3.2. Cambio de D y R para el contenido de humedad del 19%

En la Figura 6.9 se observan las variaciones de la densidad para el contenido de humedad del 19%. En el análisis de esta figura se aprecian las curvas y puntos de estudio de tendencia con el finde evaluar los cambios de calidad evaluados en los valores la densidad ante los diferentes cambios en los parámetros de fabricación granulometría, temperatura y presión.

Por lo que en figura se observa para este contenido de humedad para la fabricación de las briquetas, existe una tendencia en general de que los incrementos de la presión de conformado conllevan incrementos de la densidad, aunque esta tendencia se da a menor tasa que para los contenidos de humedad inferiores (8 y 13%). No obstante, en algunos puntos de las curvas esta tendencia no se cumple la tendencia, aunque se espera que para rangos superior de incrementos de presión la densidad se incremente como se observa en los estudios de tendencia a 300 MPa.

En cuanto a la granulometría se puede observar que los mejores resultados se dan para la granulometría <1 mm y seguidos de forma muy próxima por la granulometría <3 mm y por último la granulometría <8mm. Este orden de resultados de acuerdo con la granulometría también está en función de la temperatura ya que en cada caso de temperatura las curvas se conforman de distinta forma.

Al analizar las temperaturas se puede apreciar que los valores más altos de densidad se dan para las granulometrías <1mm y <3mm en la temperatura de 75°C seguidos de los valores de 100°C y por ultimo los valores a 125°C. En cuanto a la granulometría a <8mm los resultados no tienen una tendencia definida ya que el calor se transfiere de forma diferente en esta granulometría debido a su estructura poco homogénea, lo que provoca que los que los efectos favorables y contra efectos del aumento de temperatura no tenga un resultado definido para estas curvas. Por lo que para una granulometría del <8 mm y una humedad del 19% conviene la fabricación a menor temperatura ya que los resultados son similares con menores gatos energéticos.

En la Figura 6.12 se observan las variaciones de la resistencia a la compresión para el contenido de humedad del 19%. En el análisis de esta figura se aprecian las curvas y puntos de

estudio de tendencia con el fin de evaluar los cambios de calidad evaluados en los valores la resistencia a la compresión ante los diferentes cambios en los parámetros de fabricación granulometría, temperatura y presión.

En el análisis de esta figura podemos observar que existe una tendencia en general de que los incrementos de la presión de conformado conllevan un incremento de la resistencia, aunque en algunos puntos de las curvas esto no se cumpla. No obstante, los estudios de tendencia mostraron que para un rango de presiones mayor la tendencia se cumple.

En cuanto al analizar las temperaturas se puede observar que los valores más altos de resistencia se dan para las temperaturas de 75°C seguidos por los valores de 100 °C y por ultimo los valores obtenidos a 125°C para todas las granulometrías.

En cuanto a la granulometría los valores de resistencia más altos se dan para la granulometría <3 mm seguidos por los valores obtenidos con una granulometría <1 mm y por ultimo los valores obtenidos con la granulometría <8 mm. Aunque los resultados para la granulometría <3 mm en 125°C se den malos resultados ya que al tener mejor transferencia de calor en esta granulometría los contras efectos del aumento de calor con la expansión del contenido de humedad la cual debilita la estructura de la briqueta.

7.4. Análisis de Correlación entre los resultados obtenidos de la Densidad y Resistencia a la Compresión

En este apartado se analiza si los incrementos o decrementos de la Densidad están correlacionados con la resistencia a la compresión. Además, se buscará comprender si los valores más altos de densidad corresponden con valores más altos de Resistencia a la compresión y como estos varían entre sí. Analizando si una estructura más compacta tiene mayor rigidez.

Por lo que en este análisis estudiaremos las Figura 6.13, Figura 6.14, Figura 6.15, Figura 6.16, Figura 6.17, Figura 6.18, Figura 6.19, Figura 6.20 y Figura 6.21 en las cuales se deja fijan la granulometría y los valores de humedad. En las cuales se representa en el eje vertical la resistencia a la compresión y densidad y en el horizontal la presión, mostrando las distintas curvas de resistencia a la compresión y densidad para cada temperatura de fabricación.

7.4.1. Correlación entre la Densidad y la Resistencia a la compresión para la granulometría <1 mm y una humedad del 8%

En el análisis de la Figura 6.13 se estudia la correlación entre la densidad y la resistencia a la compresión obtenidas para las distintas curvas de conformado de las briquetas a las distintas temperaturas analizando punto a punto de presión (90, 135, 180 y 300 MPa)

- 90 MPa: En este punto observamos como tanto la Densidad como la Resistencia se incrementan a medida que aumenta la temperatura a causa de la liberación de la lignina la

cual compacta y rigidiza la estructura de la briqueta. Por lo que el incremento de temperatura favorece tanto a la Densidad como la Resistencia.

- 135 MPa: Para este punto podemos apreciar que para los casos de temperaturas de 75 y 100°C los incrementos de presión como los de temperaturas conllevan un incremento de densidad y la resistencia. Mientras que para el caso de 125°C la tanto densidad como resistencia disminuyen respecto del punto anterior por los contras efectos de los aumentos de presión.
- 180MPa: En este punto se observa que los incrementos de temperatura y presión conlleven un aumento de la densidad y resistencia en todas las curvas de temperaturas. Mientras que para los puntos de estudio de tendencia de a 200°C a 180 MPa se aprecia un aumento en la densidad, pero una disminución de la resistencia.
- 300MPa: Para este punto de estudio de tendencia a 300 MPa y 125°C se observa que el mismo fenómeno que para el punto de 200°C con 180 MPa ya que para este punto se incrementa la Densidad, pero no la resistencia a la compresión.

Resumen: En este caso de Granulometría <1 mm y un contenido de humedad del 8% se puede apreciar que en general los aumentos de Presión y Temperatura conllevan aumentos de densidad y resistencia, aunque en algunos puntos esto no se cumple, no obstante en los puntos de estudio de tendencia tanto de a 200°C como de 300 MPa esta no se cumple ya que en ambos casos se incrementa la densidad y pero no la resistencia.

7.4.2. Correlación entre la Densidad y la Resistencia a la compresión para la granulometría <3 mm y una humedad del 8%

En el análisis de la Figura 6.14 se estudia la correlación entre la densidad y la resistencia a la compresión obtenidas para las distintas curvas de conformado de las briquetas a las distintas temperaturas analizando punto a punto de presión (90, 135, 180 y 300 MPa)

- 90 MPa: En este punto observamos como tanto la densidad como la resistencia se incrementan a medida que aumenta la temperatura a causa de la liberación de la lignina la cual compacta y rigidiza la estructura de la briqueta. Por lo que el incremento de temperatura favorece tanto a la densidad como la resistencia.
- 135 MPa: En este punto también se observa que los incrementos de temperatura conllevan un mejor resultado tanto de densidad con resistencia. No obstante se puede apreciar que en el caso de las curvas de 125°C los aumentos de densidad no conllevan a un incremento de resistencia, aunque en los restantes puntos de las curvas se cumple la tendencia de que el incremento de presión causa un incremento de la densidad y de la resistencia. En el caso la curva de 100°C la densidad presenta un decremento parcial respecto al punto anterior, aunque la resistencia se incrementa.

- 180 MPa: Para este punto se presenta en una tendencia en general de que los incrementos de presión causan un incremento en la densidad y resistencia, no obstante esta tendencia no se cumple para la curva de la resistencia de 125°C aunque esta curva en su análisis de tendencia tiende a aumentar la resistencia con el aumento los aumentos de presión. Este decremento parcial no se produce para la densidad, ya que esta aumenta constantemente para los incrementos de presión. Para este caso también los aumentos de temperatura conllevan un aumento de densidad y resistencia, por lo que en el estudio de tendencia los mejores resultados se dan a 200°C.
- 300 MPa: En el punto de estudio de tendencia se aprecia que los incrementos de presión conllevan en general un aumento tanto de densidad como de resistencia.

Resumen: Para el caso de una granulometría <3 mm y un contenido de humedad del 8% se presenta en general un incremento de la densidad y de la resistencia para los incrementos de presión y/o temperatura. A su vez se observa que en los casos que esto no se cumple son casos puntuales y no la tendencia en generales.

7.4.3. Correlación entre la Densidad y la Resistencia a la compresión para la granulometría <8 mm y una humedad del 8%

En el análisis de la Figura 6.15 se estudia la correlación entre la densidad y la resistencia a la compresión obtenidas para las distintas curvas de conformado de las briquetas a las distintas temperaturas analizando punto a punto de presión (90, 135, 180 y 300 MPa)

- 90 MPa: En este punto se observa que los valores de densidad se ordenan de mayor a menor para los valores obtenidos a las temperaturas de 100, 125 y 75°C mientras que para la resistencia los resultados se ordenan 75, 125 y 100°C por lo que no se puede describir que a una temperatura se obtenga los mejores resultados de densidad y resistencia en conjunto.
- 135 MPa: Para este punto en cuanto a la resistencia se mantiene el orden de resultados según las temperaturas del punto anterior a 90 MPa. Mientras que la densidad se ordena con los valores ordenados de mayor a menor de para las temperaturas de 125, 75 y 100°C respectivamente. por lo que no se puede describir que a una temperatura se obtenga los mejores resultados de densidad y resistencia en conjunto. No obstante, en este punto si se puede apreciar todos los valores tanto de Densidad como de Resistencia se incrementaron con el aumento de presión.
- 180 MPa: En este punto se observa que las variaciones de la densidad no van acompañadas de forma directa por las variaciones de la resistencia. Ya que los valores más elevados de

resultados de densidad ordenados de mayor a menor se dan en el siguiente orden 200, 125, 100 y 75°C mientras que para la resistencia los valores más elevados de los resultados de mayor a menor tienen el siguiente orden 200, 100, 125 y 75°C. Por lo que en este estudio de tendencia se aprecia que en un rango superior de temperaturas se obtienen los mejores resultados de densidad y resistencia. Además, se observa que todos los valores tanto de densidad como de resistencia se incrementaron sus valores con el aumento de presión.

- 300 MPa: En el estudio de estudio de tendencia se aprecia que los valores tanto de densidad con de resistencia se incrementan, mostrando que se cumple la tendencia en general de que los aumentos de presión mejoran la calidad de la briqueta.

Resumen: Para el caso de la granulometría < 8 mm y un contenido de humedad del 8% los aumentos de densidad acompañan a los incrementos resistencia y viceversa. A su vez se presenta en general un incremento de densidad y resistencia para los incrementos de presión. Mientras que para el caso de la temperatura no se puede apreciar una tendencia definida, no obstante, el estudio a de tendencia a 200°C muestra los mejores resultados.

7.4.4. Correlación entre la Densidad y la Resistencia a la compresión para la granulometría <1 mm y una humedad del 13%

En el análisis de la Figura 6.16 se estudia la correlación entre la densidad y la resistencia a la compresión obtenidas para las distintas curvas de conformado de las briquetas a las distintas temperaturas analizando punto a punto de presión (90, 135, 180 y 300 MPa)

- 90MPa: En este punto se observa que los valores de la densidad y resistencia se reducen con el aumento de temperatura por lo que los valores más altos se dan a 75°C seguidos por los de 100°C y al final los de 125°C.
- 135MPa: Para este punto continua la tendencia del decremento de la de los valores de densidad y resistencia para los incrementos de temperatura. En Cuanto a la presión se observa que en todos los casos se incrementa tanto la densidad como la resistencia para los incrementos de presión.
- 180MPa: En este punto continua la tendencia del decremento de la de los valores de la densidad y resistencia para los incrementos de temperatura. Manteniéndose la tendencia de que para los incrementos de presión se incrementa tanto la densidad como la resistencia a la compresión.

Resumen: Para el caso de la granulometría <1 mm y contenido de humedad del 13% se presenta una tendencia de que para los incrementos de presión se incrementa los valores de la densidad y

la resistencia, mientras que para los incrementos de temperatura reducen tanto densidad como resistencia respectivamente, por lo que los mejores resultados se dan a la menor temperatura.

7.4.5. Correlación entre la Densidad y la Resistencia a la compresión para la granulometría <3 mm y una humedad del 13%

En el análisis de la Figura 6.17 se estudia la correlación entre la densidad y la resistencia a la compresión obtenidas para las distintas curvas de conformado de las briquetas a las distintas temperaturas analizando punto a punto de presión (90, 135, 180 y 300 MPa)

- 90 MPa: En este punto observamos que los valores de densidad y resistencia se reducen con el aumento de temperatura por lo que los valores más altos se dieron a 75 °C seguidos por los de 100 °C y al final los de 125°C.
- 135 MPa: Para este punto continua la tendencia del decremento de la de los valores de densidad y resistencia para los incrementos de temperatura. En cuanto a la presión se observa que en todos los casos se incrementa tanto la densidad como la resistencia para los incrementos de presión. Aunque la única curva que no cumple esta tendencia es la curva de densidad a 100°C ya que la misma se disminuye su valor para el incremento de presión no obstante la tendencia es que los valores de densidad se incrementan para los incrementos presión.
- 180MPa: En este punto continua la tendencia del decremento de la de los valores de densidad y resistencia para los incrementos de temperatura. A la vez que se mantiene la tendencia de que para los incrementos de presión se incrementa tanto la densidad como la resistencia. Esta tendencia se cumple para todas las curvas no obstante las tasas de incremento varían en cada en los distintos incrementos de presión además los incrementos de densidad y resistencia se dan a diferente tasa.

Resumen: Para el caso de la granulometría <3 y un contenido de humedad W13% se observa que para las temperaturas de 125 y 75 °C los cambios de la densidad y resistencia van acoplados a diferencia de la curva de 100 °C en las cuales los valores de densidad y resistencia, una aumenta y la otra se reduce. Mientras que para los incrementos de temperatura reducen tanto los valores de densidad como de resistencia se reducen respectivamente, por lo que los mejores resultados se dan a la menor temperatura.

7.4.6. Correlación entre la Densidad y la Resistencia a la compresión para la granulometría <8 mm y una humedad del 13%

En el análisis de la Figura 6.18 se estudia la correlación entre la densidad y la resistencia a la compresión obtenidas para las distintas curvas de conformado de las briquetas a las distintas temperaturas analizando punto a punto de presión (90, 135, 180 y 300 MPa)

- 90 MPa: En este punto se observa que los valores de densidad se reducen con el aumento de la temperatura por lo que los valores más altos se dieron a 75°C seguidos por los de 100°C y al final los de 125°C. En cambio, la resistencia se comporta de forma distinta ya que los resultados de mayor a menor se dan para las temperaturas de 100, 125 y 75 °C por lo que la Densidad y Resistencia responden de diferente forma y no de forma acopladas.
- 135 MPa: Para este punto se presentan un incremento tanto de la densidad como de resistencia con respecto al punto de presión anterior a diferentes tasas. Los resultados de resistencia se mantienen de igual manera que en el punto anterior en cuanto a orden en función de la temperatura. Mientras los resultados de la densidad se orden de mayor a menor según su temperatura de fabricación es 100, 75 y 125 °C. Por lo que las curvas responden a diferente tasa para los incrementos de presión. todos positivos.
- 180 MPa: En este punto continua la tendencia mostrada en el punto anterior para la Resistencia a la compresión manteniéndose el orden de los resultados, pero los incrementos se dan a diferentes tasas para este incremento. En cuanto a la densidad los resultados se ordenan de mayor a menor de para las temperaturas de la siguiente forma 100, 75 y 125°C siendo la diferencia entre los resultados del orden del 0.8% por lo que la variación en las curvas ante el aumento de presión se da a diferentes tasas.

Resumen: Para el caso de granulometría < 8 y un contenido de humedad del 13% se presenta una tendencia de que para los incrementos de presión se incrementa tanto la densidad como la resistencia, siendo estos incrementos a diferentes tasas. En cuanto a la temperatura el orden de los resultados se mantiene en el mismo orden para la resistencia en todos los puntos de presión. Mientras que densidad se muestra a bajas presiones los valores más alto a la menor temperatura. Pero a altas Presiones los resultados son similares para todas las temperaturas.

7.4.7. Correlación entre la Densidad y la Resistencia a la compresión para la granulometría <1 mm y una humedad del 19%

En el análisis de la Figura 6.19 se estudia la correlación entre la densidad y la resistencia a la compresión obtenidas para las distintas curvas de conformado de las briquetas a las distintas temperaturas analizando punto a punto de presión (90, 135, 180 y 300 MPa)

- 90 MPa: En este punto de presión se observa que los valores de densidad y resistencia más altos se dan a menor temperatura por lo que los resultados se ordenan de según su curva de temperatura de la siguiente temperatura, 75, 100 y 125°C. A esta tendencia en general solo se exceptúa un punto el cual está en la curva de la densidad de 100°C a 90 MPa de la no obstante la curva luego de este punto cumple la tendencia en general.
- 135 MPa: Para este punto se presentan un incremento tanto de densidad como de resistencia para los incrementos de presión en diferentes tasas de aumento. En conjunto se cumple la tendencia en general de que los mayores valores de densidad y resistencia se dan a las menores temperaturas.
- 180 MPa: En este punto continúa manteniéndose las dos tendencias descritas en el punto anterior tanto para la presión y temperatura en su forma de incidir en densidad y resistencia. aunque para esta tendencia no se cumple para el punto de 180 MPa para la curva de 125°C aunque se espera que esta curva tienda a incrementar su valor para los incrementos de presión superior.

Resumen: Para el caso la granulometría < 1 mm y la humedad del 19% se presenta una tendencia en general de que los valores tanto de densidad como de resistencia se incrementan para el aumento de presión y se reducen para el incremento de la temperatura. Siendo esto incrementos a diferentes tasas para cada incremento tanto de presión como de temperatura. Esta tendencia en general no se cumple en todos los puntos, aunque luego en estas curvas en el estudio de tendencia si se cumple la tendencia en un rango mayor de Presión.

7.4.8. Correlación entre la Densidad y la Resistencia a la compresión para la granulometría < 3 mm y una humedad del 19%

En el análisis de la Figura 6.20 se estudia la correlación entre la densidad y la resistencia a la compresión obtenidas para las distintas curvas de conformado de las briquetas a las distintas temperaturas analizando punto a punto de presión (90, 135, 180 y 300 MPa)

- 90 MPa: En este punto de presión se observa que los valores de la densidad se ordenan de mayor a menor de a menor en el siguiente orden según sus curvas de temperatura 100, 75 y 125 °C. Mientras que la resistencia se ordena de la mayor a menor conforme las temperaturas se reducen, por lo que los mayores valores de Resistencia se dan a las menores temperaturas. Por lo que los resultados de la densidad y resistencia no se ordenan de igual forma para las diferentes temperaturas.
- 135 MPa: Para este punto se presenta la tendencia en general la cual indica que a menor temperatura mejores resultados tanto de densidad como de resistencia por lo que los mejores resultados se dan a 75 °C seguidos por los de 100 °C y por ultimo los de 125°C. En

cuanto a la P los mismos tiene a incrementarse a diferente tasa, exceptuando los resultados de densidad y resistencia para la curva de 100 °C para la cual los resultados disminuyen a una tasa muy baja, pero de forma conjunta.

- 180 MPa: En este punto se mantiene la tendencia en general de para elevados contenidos la cual indica que densidad y resistencia se incrementan para los incrementos de la presión y para los descensos de la temperatura, siendo estos aumentos a distintas tasas para cada curva.

Resumen: Para el caso de la granulometría < 1 mm y una humedad del 19% se cumple la tendencia en general para altos contenidos de humedad la cual muestra que ante los aumentos de presión los valores de densidad y resistencia se incrementan a diferentes tasas. Mientras que los valores más altos de densidad y resistencia para las curvas de menor temperatura en general salvo para el primer punto de presión (90 MPa) la densidad y resistencia de en la curva de 100°C. Aunque los demás puntos de esta curva cumplan la tendencia anteriormente descrita.

7.4.9. Correlación entre la Densidad y la Resistencia a la compresión para la granulometría < 8 mm y una humedad del 19%

En el análisis de la Figura 6.21 se estudia la correlación entre la densidad y la resistencia a la compresión obtenidas para las distintas curvas de conformado de las briquetas a las distintas temperaturas analizando punto a punto de presión (90, 135, 180 y 300 MPa)

- 90 MPa: En este punto de presión se observa que se cumple la tendencia en general para elevados contenidos de humedad, los valores de la densidad más altos se dan para las menores al igual que para resistencia, solo que los puntos de 75 y 100°C se encuentran muy cerca siendo el resulta a 75°C un 0.2% más grande que el de 100°C.
- 135 MPa: Para este punto se observa que para el incremento de presión las curvas de 75 °C y 125 °C muestran un incremento tanto de la densidad como de la resistencia para el aumento de presión en distintas tasas de tal forma que la curva de 125°C supera en el valor a 75°C de la densidad. Mientras que la curva de 100°C muestra un decremento para el incremento de presión.
- 190 MPa: En este punto se aprecia que la curva de 75°C responde de diferente forma para densidad y resistencia ya que densidad se reduce para el incremento de la presión y la resistencia se incrementa para este incremento. En cuanto a la curva de 100 °C muestra un aumento tanto para de la resistencia como para la densidad. En cuanto a la curva de 125°C se reduce tanto para densidad como de la resistencia para el incremento de la presión.

Resumen: Para este caso no existe una tendencia definida en general, ya que todas las curvas responden de diferente forma para la densidad y resistencia ante los aumentos de la presión y

temperatura en la mayoría de los casos de los casos de forma en conjunta, pero a diferente tasa debido a la falta de homogeneidad en la estructura de las briquetas. Aunque en el incremento de 135 a 180 MPa algunas curvas de densidad y resistencia desciende y la otra se incrementa respectivamente de forma desacoplada como se ve en la Figura 6.20.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Introducción

En la presente tesis se realizó un estudio experimental con el fin de caracterizar la incidencia en la calidad de las briquetas a los cambios o variaciones en los parámetros de producción industrial; presión y temperatura de conformado y contenido de humedad y granulometría de la biomasa. El análisis de los parámetros de los parámetros de fabricación industrial se realizó dentro de los valores recomendados por la bibliografía. La evaluación de los cambios de parámetros de fabricación se realizó de forma individual y conjunta, dado que estos parámetros actúan en conjunto un parámetro en función del otro y no de forma disociada.

Como el objetivo principal de esta tesis fue encontrar los valores de los parámetros de fabricación, con los valores de calidad más altos y las combinaciones que cumplan con los requisitos de calidad estipulados por las Normas ISO 17225 se obtuvo las briquetas de mejor calidad con menores costos.

En conjunto con el objetivo principal de la tesis, se busca analizar la relación entre los valores obtenidos de densidad y resistencia a la compresión analizando si estos dos valores están vinculados o acoplados entre sí y en qué casos de valores de los parámetros de producción industrial tienen relación. Ya que estos dos parámetros son los de mayor trascendencia en cuanto a calidad físico-mecánica de las briquetas.

8.2. comportamiento de la calidad en función de los parámetros de fabricación

En este apartado se describe el comportamiento de la calidad briqueta para las distintas variaciones de los parámetros de fabricación, analizando la variación de cada uno de estos por separado y luego en conjunto, tomando los valores obtenidos de densidad y resistencia a la compresión como los indicadores de la calidad.

8.2.1. Variación de la calidad en función de la presión de conformado

En el caso la presión de conformado este parámetro es el único que presenta una clara tendencia general de que para los aumentos de presión conllevan en general un aumento tanto la densidad como la resistencia a la compresión. Aunque en algunos puntos de algunas curvas de

fabricación esta tendencia no se cumpla, aunque al analizar la curva completa o plantear un rango mayor de presión se observa que la tendencia de los aumentos de calidad se corresponde con los incrementos de presión. Siendo este el único parámetro que provoca un aumento de la calidad de forma independiente de los valores de los demás parámetros, aunque la tasa del aumento de la calidad depende del valor de los otros parámetros.

8.2.2. Variación de la calidad en función de la temperatura de conformado

En el caso de la temperatura de conformado, este parámetro actúa en las briquetas de diferente forma en función del contenido de humedad, y de forma independientemente de los valores presión y granulometría. Los incrementos de temperatura para los contenidos de humedad bajos es decir del 8% mejoran la calidad de la briketa tanto en los valores densidad como de resistencia a la compresión. Siendo estos aumentos de la temperatura los que generan los mayores resultados de calidad ya que al comparar los valores entre las briquetas fabricadas a 125°C con 300 MPa y 200°C con 180 MPa, los mejores resultados las briquetas fabricadas se dan a menor presión con mayor temperatura, esto se debe a que la liberación de la lignina a altas temperaturas logra una estructura más compacta y rígida en las briquetas en comparación con logrados por aumentos presión.

No obstante, los aumentos de temperatura para las humedades medias y altas es decir del 13% al 19% son perjudiciales, ya que estos aumentos de presión en lugar de liberar la lignina provocan que el contenido de humedad se expanda y transforme en vapor generando poros los cuales debilitan la estructura de la briketa y la vuelven menos compacta.

8.2.3. Variación de la calidad en función del contenido de humedad

El comportamiento de calidad de las briquetas para el contenido de humedad, este asociado a la temperatura. Ya que al evaluar los resultados hasta la temperatura de 125°C se aprecia los valores más elevados de densidad y resistencia se dan para contenidos de humedades 12% en temperaturas bajas 75°C, seguidos por los valores a 100 °C y por ultimo los valores de 125°C debido a la expansión del contenido de humedad. En cambio, para temperaturas elevadas de 125°C los valores más altos se dan para los contenidos de humedad bajos del 8% de humedad. En contraparte para los contenidos bajos de humedad se tiene baja transferencia de calor por lo que para liberar la lignina se requiere de altas temperaturas.

8.2.4. Variación de la calidad en función de la granulometría

En el caso de la granulometría se puede apreciar que los resultados de mayores valores se dan a para la granulometría < 1 mm seguida de forma próxima por la granulometría < 3 mm no apreciándose mejores de densidad o resistencia la compresión las cuales justifiquen la reducción

de la granulometría de < 3 a < 1 , y por último se encuentran los valores de los especímenes producidos con una granulometría < 8 mm.

Siendo el caso de la granulometría el parámetro de producción industrial el cual menores cambios mostro respecto a la humedad, temperatura y presión. No obstante, el trabajo con una granulometría alta muestra una pronunciada diferencia de valores entre ensayos y una gran irregularidad entre los resultados debido a la falta de homogeneidad en la estructura de los granos que conforman a la briqueta. Y en el caso de las granulometrías alta y un alto contenido de humedad los valores de densidad y resistencia se tornan inestables, ya que incluso ante los aumentos de presión los valores de calidad no mejoran.

8.3. Relación general entre la densidad y la resistencia a la compresión

En este apartado se describe la conclusión de la relación cualitativas y cuantitativas entre la densidad y la resistencia compresión, ya que en la producción industrial se evalúa las características físico-mecánicas de las briquetas a partir de los valores de la densidad.

Del análisis de Figura 6.13, Figura 6.14, Figura 6.15, Figura 6.16, Figura 6.17, Figura 6.18, Figura 6.19, Figura 6.20 y Figura 6.21 en conjunto con el análisis de los valores de Tabla 6.5, Tabla 6.6 y Tabla 6.7 en las cuales se ordena los valores de los resultados de los valores obtenidos en los ensayos de densidad y resistencia en orden de mayor a menor para cada uno de estos parámetros y por último ordenados según un promedio normalizado de ambos parámetros por el valor máximo de cada parámetro, se presentan las siguientes conclusiones:

- De la evaluación del comportamiento de tendencia de las curvas de fabricación en las figuras anteriormente mencionadas se aprecia que de un total de 87 puntos de comparación entre la densidad y la resistencia se tiene 81 puntos en los cuales los valores de resistencia están acoplados a los incrementos o reducciones en los valores de densidad. Por lo que en el 93.10% de los casos estudiados, los resultados de los dos parámetros de calidad están asociados. Por lo que se puede concluir que un aumento de la densidad está asociada a un incremento de la resistencia de la compresión y viceversa.
- De la evaluación de los rangos de valores obtenidos en los ensayos tanto de densidad como de resistencia a la compresión, se aprecia que los valores menores de densidad se corresponden con los valores menor resistencia los cuales en general los menores valores de densidad están alrededor de los 500 a 600 kg/m³ los cuales se corresponden generalmente a valores de resistencia entre 200 a 300 kN y los valores más elevados se dan en casi todas las curvas a las mayores presiones toman valores para la densidad valor aproximado entre 700 a 800 kg/m³ la resistencia 800 y 1000 kN. Teniendo una gran variabilidad de resultados ya que los incrementos tanto de presión como los demás parámetros de fabricación inciden en diferentes tasas en función de la granulometría de la briqueta, ya que la estructura interna de la briqueta difiere sustancialmente en función de la granulometría. En conjunto con lo anteriormente

menciona la transmisión de calor también se ve afectada por la estructura granular de la briqueta y por su contenido de humedad por lo que hay gran variabilidad entre los resultados.

8.4. Recomendaciones generales en los parámetros de fabricación industrial para la mejora de la calidad en las briquetas

En el siguiente punto se describirán las recomendaciones en los cambios y variaciones en los parámetros de fabricación para mejorar la calidad desde un punto de vista técnico económico en el cual se contemplan las condiciones de producción industrial, considerando como base los valores de referencia propuestos por la bibliografía para los parámetros industriales.

En el caso de los parámetros de fabricación tecnológicos es decir la presión y la temperatura, se tiene dos recomendaciones generales que se aplican para todo el rango de los bibliográficos de los parámetros biomásicos (Granulometría y Contenido de Humedad). Para la mayoría de los casos de los aumentos de presión en el proceso de fabricación generan un incremento tanto en la densidad como en la resistencia a la compresión, no obstante, en los casos de altos contenidos de humedad y granulometrías superiores a 3 mm los incrementos tanto en la densidad como en resistencia no son significativos ni constantes.

En el caso de la temperatura, el incremento de este parámetro causa incrementos o reducciones en función del contenido de humedad. Ya que para bajos contenidos de humedad es decir del 8% para abajo los incrementos de temperatura generan un incremento en la densidad y resistencia a causa de la liberación de la lignina, obteniendo los valores más elevados de densidad en los ensayos alcanzando los requisitos de calidad de la clase más alta de la norma ISO 17225 a un menor costo energético si se compara el incremento de la temperatura versus el incremento de la presión. No obstante, para los contenidos de humedad medios y elevados es decir del 12% en adelante los incrementos de temperatura reducen la calidad de la briqueta debido a que los incrementos de la temperatura generan la evaporación del contenido de humedad generando poros los cuales debilitan la estructura de las briquetas y la vuelven menos compacta, por lo que si trabaja con altos contenido de humedad se debe tener especial cuidado con los valores de temperatura de trabajo.

Para el caso de los parámetros biomásicos se propone las siguientes recomendaciones en función de los valores obtenidos en los ensayos realizados. En el caso de la granulometría, se recomienda el trabajo con granulometrías < 3 mm ya que al trabajar con esta granulometría se obtuvieron los valores más elevados de densidad y resistencia, al comparar estos valores respecto a los de granulometrías superiores. Aunque no hay diferencia de calidad que justifique la reducción de la granulometría desde valores < 3mm a granulometrías < 1 mm. En conjunto con los mayores valores de calidad el trabajo con las granulometrías < 3 mm muestran que los resultados obtenidos en los incrementos de presión y temperatura producen aumentos en calidad de forma consistente. Mientras que para las granulometrías superiores a las < 3 mm es decir de para < 8 mm los resultados

ante los incrementos de presión y temperatura no muestran incrementos consistentes en los valores de los indicadores de calidad.

En cuanto a la humedad se recomienda trabajar con humedades bajas es decir al 8% ya que tantos los aumentos de presión y temperaturas conllevan incrementos en la calidad estructural de la briqueta, en especial el caso de los incrementos de temperatura los cuales son más económicos y logran elevados valores de densidad y resistencia de acuerdo a los estándares requeridos por las ISO 17225 en comparación con los incrementos de temperatura, a causa de la liberación de la lignina la cual fortalece la estructura de la briqueta.

Aunque si trabaja con dispositivos de baja tecnología con limitaciones de temperatura y presión los mejores resultados se obtiene con humedades del 12% y 19% siempre que se cuide no superar los 100°C en el proceso, ya que la evaporación del contenido de humedad provoca poros los cuales debilitan la estructura y la vuelven menos compacta y rígida.

8.5. Aportes al desarrollo de los biocombustibles

Los resultados y conclusiones obtenidos en el desarrollo de esta tesis contribuyen al desarrollo de las economías regionales de nuestro país, por su aporte a la mejora de la calidad de los biocombustibles que se producen en nuestra región. En conjunto contribuye al cuidado del ambiente al brindar medios para la producción, transporte y uso eficiente de los biocombustibles, ya que estos son una de las principales fuentes de energías limpias al producir de fuentes renovables como es la biomasa.

Los cambios y regulaciones en los parámetros industriales de producción de los biocombustibles descritos en las tesis están destinados a servir directamente a los productores de biocombustibles sólidos para la mejora de la calidad de forma eficiente y económica. Teniendo en meta la mejora de la calidad con el fin de alcanzar los estándares que demanda la norma de referencia de calidad de biocombustibles IRAM ISO 17225. Siendo el cumplimiento de esta norma el punto de partida para la exportación de los biocombustibles a mercados como Europa en donde el precio y la rentabilidad de los biocombustibles es superior al del mercado local.

8.6. Futuras líneas de investigación

Esta tesis se limitó a determinar la incidencia de los cambios y regulaciones en los parámetros industriales de fabricación de las briquetas (presión y temperatura de prensa y humedad y granulometría de la biomasa) en búsqueda de la mejora de la calidad de las briquetas medida en densidad y resistencia a la compresión, para briquetas fabricadas con residuos de pino local *elliottii*. Consecuentemente, se pueden distinguir numerosos frentes de investigación para el futuro:

- I. Desarrollo de un modelo matemático el cual permita determinar las variaciones de en los parámetros de fabricación para el cambio de una calidad obtenida a la calidad requerida de forma eficiente, para un proceso de fabricación de características preestablecidas.

- II. Desarrollo de un modelo matemático el cual permita estimar el gasto energético para la producción de briquetas en una determinada calidad, partiendo de biomásas en condiciones específicas y un proceso de fabricación determinado. Este tipo de desarrollo permitirá el estudio técnico económico con precisión de la factibilidad de la producción industrial de briquetas.
- III. Ampliar los estudios de calidad de los biocombustibles en función de los parámetros de producción industrial para otras biomásas de carácter industrial, como el eucalipto y álamo, ya que estas biomásas ocupan un gran porcentaje en la matriz de producción forestal del país. También será de gran trascendencia ambiental desarrollar estos estudios y caracterizaciones para residuos de poda urbanas y residuos de aserraderos locales que trabajan con biomásas como autóctonas como el algarrobo los cuales producen grandes cantidades de residuos que contaminan el ambiente y pueden ser transformado en biocombustibles de alta calidad.

- Agencia andaluza de la energía, glosario biocombustibles sólidos, biocarburantes y biocombustibles limpios alternativos, 2011.
- Norma ISO 17225, Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles, 2014
- Barro, R. (2008). Calidad de los biocombustibles. Sevilla: CIEMAT.
- Borrega, B. G. (29 de octubre de 2018). Buendianoticia.com/. Obtenido de <https://buendianoticia.com/nota/11901/-un-paso-clave-para-el-desarrollo-de-la-bioenergia-en-la-argentina>
- Demirbas, A. (2000). Resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemical. Energy conversion and management 42, 1357-1378.
- Energiasdemipais.edu.ar. (2012). La matriz energética argentina y su evolución en las últimas décadas. Obtenido de.
- Estandarización, O. I. (s.f.). www.iso.org/standard/. Obtenido de www.iso.org/standard/.
- Gaber M., H. M. (2014). Manual de la biomasa, Sistemas de garantía de calidad y medidas de control de calidad. www.biomassstradecentreii.eu.
- Kofman, P. D. (2016). Review of worldwide standards. COFORD.
- Križan, P. (2014). The Densification Process of Wood Waste . Warsaw/Berlin: De Gruyter Open Ltd.
- M. Rönnbäck, A. S. (2012). Report on the labelling concept. Mixbiopells, 15.
- M.Y. Recalde, D. B. (2015). Limitaciones para el desarrollo de la energíasmrenovables en Argentina. Problemas del desarrollo, 89-114.
- Maginot, N. H., Rähim, F., ARTEMIO, C.-P., & Lidia, S. C. (2015). Conceptualización y caracterización de los pellets madereros en el marco del desarrollo sustentable. Researchgate.
- Ministerio de Energía y Minería de Argentina. (2106). RENOVAR. <https://www.minem.gob.ar>.
- M'ollerstena, K., & *, J. Y. (2003). Potential market niches for biomass energy with CO2 capture. Biomass and Bioenergy , 273 – 285.
- P. Križan, M. M. (2011). Briquetting of municipal solid waste by different technologies in order to evaluate its quality and properties. Biosystem Engineering Special Issue, 115-123.
- Parikka, M. (2003). Global biomass fuel resources. ELSEIVER.
- R. Saidura, E. A. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. ELSEIVER.
- Ricardo Baettig P., M. Y. (2010). Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. BOSQUE 31, 89-99.
- Roveda, E. B., & Trossero, M. (2009). Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina WISDOM Argentina. Buenos Aires: PROBIOMASA.
- Salinas Callejas, E., & Gasca Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. El Cotidiano, núm. 157, 75-82.

- Sánchez, J. M. (2015). Optimización de metodologías para la caracterización de biocombustibles sólidos procedentes de la industria del olivar. 2015, ctaer.
- Standardization, E. C. (2014). European Committee for Standardization.
- TRANSBIOMA. (2012). Biomasa, Biocombustibles y Sustentabilidad. Madrid: Graficolor-Palencia S.L. 2012.
- Wolfgang, H., & Rainer, J. (2011). Solidstandards, Enhancing the implementation of quality and sustainability standards and certification schemes for solid biofuels. Munich, Germany: WIP Renewable Energies.