



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Ingeniería

Diseño de un concreto hidráulico puzolánico con PET como sustituto parcial de arena y su determinación del índice de calentamiento global

TESIS

Que para obtener el grado de
Maestra en Ciencias de la Ingeniería

PRESENTA

Raquel Alejandra Díaz Mendieta

Director de tesis:

Dr. J. Cuauhtémoc Palacios González

Co-director de tesis:

Dr. René Muciño Castañeda

Tutora:

Dra. Elena Colín Orozco



Agosto 2024

RESUMEN

El amplio uso del concreto hidráulico en la industria de la construcción, y consecuente impacto ambiental, motiva el desarrollo de la presente investigación en la cual, se muestra la caracterización física, mecánica y evaluación de impacto ambiental con metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la categoría de potencial de calentamiento global, de un concreto hidráulico puzolánico con pellet de PET reciclado de PETStar como sustituto parcial de arena; se realizó un diseño experimental trifactorial con el factor relación a/c en dos niveles 0.4 y 0.60, el factor sustitución de agregado fino por pellet en tres niveles 0%, 3%, 7% y el factor sustitución de cemento por puzolana en tres niveles 0%, 20%, 30%. Se efectuó un análisis de impacto ambiental con el software SimaPro versión 9.5.0.1 PhD, así como, se realizaron las pruebas físicas y mecánicas al concreto elaborado en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx “Javier Barros Sierra”, acreditado ante a Entidad Mexicana de Acreditación (EMA). Finalmente, se obtuvo un proporcionamiento de concreto con a una relación a/c de 0.40, una sustitución de cemento por puzolana en un 30% y un 7% de sustitución de arena por pellet, que disminuyó 26.56% el índice de potencial de calentamiento global total ($403.90 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$) comparado a su control ($545.59 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$), y con una resistencia a compresión simple media de 269.26 kg/cm^2 , tal que, es apta para su uso en elementos estructurales.

CONTENIDO

Lista de tablas	viii
Lista de figuras	xiii
Introducción	1
Hipótesis	2
Objetivo general	2
Objetivos particulares	2
Alcances y limitaciones	3
CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO	5
Introducción	5
1.1. Estado del Arte	5
1.2. Metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	6
1.2.1. Cambio climático	7
1.2.2. Ciclo del carbono	8
1.2.3. Índice de potencial de calentamiento global	10
1.3. Tereftalato de polietileno como agregado fino de concreto hidráulico	12
1.3.1. Tereftalato de polietileno	12
1.3.2. Manejo de residuos, impacto al medio ambiente y salud humana	14
1.3.3. Características geométricas de importancia de agregados para concreto hidráulico	16
1.4. Respuesta del concreto sometido a esfuerzos	18
1.4.1. Modelo de Powers	19

1.4.2.	Zona de interacción interfacial	20
1.4.3.	Modelo de falla propuesto en el concreto	22
1.4.4.	Modelo de mecánica de fractura, ecuación de Griffith	23
1.4.5.	Integral J, energía	26
CAPÍTULO 2 DISEÑO EXPERIMENTAL		30
Introducción		30
2.1.	Diseño experimental	30
2.2.	Hipótesis y modelo estadístico	33
CAPÍTULO 3 RESULTADOS		38
Introducción		38
3.1.	Mezclas de concreto	38
3.1.1.	Materiales	38
3.1.2.	Concreto en estado fresco	39
3.1.3.	Concreto en estado endurecido	40
3.2.	Evaluación de impacto ambiental con metodología de Análisis de Ciclo de Vida	44
3.2.1.	Unidad funcional y alcances	44
3.2.2.	Inventario	45
3.3.	Resultados de hipótesis estadísticas	50
3.3.1.	Índice de potencial de calentamiento global (GWP)	51
3.3.2.	Resistencia a compresión simple	53
3.3.3.	Energía de Integral J	55

3.3.4.	GWP fossil	57
3.3.5.	GWP land transformation	58
3.3.6.	GWP biogenic	60
3.3.7.	Revenimiento	62
3.3.8.	Contenido de aire	63
3.3.9.	Peso volumétrico en estado fresco	65
3.3.10.	Peso vol. en estado endurecido	67
3.3.11.	Velocidad de ultrasonido	69
3.3.12.	Absorción después de inmersión	71
3.3.13.	Absorción después de inmersión y ebullición	72
3.3.14.	Densidad seca global	74
3.3.15.	Densidad global después de inmersión	76
3.3.16.	Densidad global después de inmersión y ebullición	78
3.3.17.	Densidad aparente	80
3.3.18.	Volumen de vacíos, poros permeables	82
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		84
4.1.	Conclusiones	84
4.2.	Recomendaciones	87
Referencias		88
ANEXO 1		96

ANEXO 2	104
ANEXO 3	110
ANEXO 4	114
ANEXO 5	120
ANEXO 6	140
ANEXO 7	160

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Cuadro de triple entrada de diseño experimental</i>	30
Tabla 2 <i>Arreglo combinatorio de tratamientos</i>	31
Tabla 3 <i>Distribución completamente al azar de tratamientos</i>	32
Tabla 4 <i>Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica</i>	41
Tabla 5 <i>Etapas de proceso para 1 m³ de concreto hidráulico</i>	46
Tabla 6 <i>Etapas de transformación para 1 m³ de concreto hidráulico</i>	48
Tabla 7 <i>Escenario de residuos para 1 m³ de concreto hidráulico</i>	49
Tabla 8 <i>Valor p de efectos principales e interacciones para GWP total</i>	51
Tabla 9 <i>Prueba de Tukey para a/c de GWP total con una confianza de 95%</i>	52
Tabla 10 <i>Prueba de Tukey %Puzolana de GWP total con una confianza de 95%</i>	52
Tabla 11 <i>Prueba de Tukey %PET de GWP total con una confianza de 95%</i>	52
Tabla 12 <i>Valor p de efectos principales e interacciones para f'c</i>	54
Tabla 13 <i>Prueba de Tukey para a/c de f'c con una confianza de 95%</i>	54
Tabla 14 <i>Prueba de Tukey para %Puzolana de f'c con una confianza de 95%</i>	54
Tabla 15 <i>Prueba de Tukey para %PET de f'c con una confianza de 95%</i>	55
Tabla 16 <i>Valor p de efectos principales e interacciones para Integral J</i>	55
Tabla 17 <i>Prueba de Tukey para a/c de Integral J con una confianza de 95%</i>	56

Tabla 18 <i>Prueba de Tukey para %Puzolana de Integral J con una confianza de 95%</i>	56
Tabla 19 <i>Prueba de Tukey para %PET de Integral J con una confianza de 95%</i>	56
Tabla 20 <i>Valor p de efectos principales e interacciones para GWP fossil</i>	57
Tabla 21 <i>Prueba de Tukey para a/c de GWP fossil con una confianza de 95%</i>	57
Tabla 22 <i>Prueba de Tukey para % Puzolana de GWP fossil con una confianza de 95%</i>	58
Tabla 23 <i>Prueba de Tukey para % PET de GWP fossil con una confianza de 95%</i>	58
Tabla 24 <i>Valor p de efectos principales e interacciones para GWP land transformation</i>	59
Tabla 25 <i>Prueba de Tukey para a/c de GWP land transformation con una confianza de 95%</i>	59
Tabla 26 <i>Prueba de Tukey para %Puzolana de GWP land transformation con una confianza de 95%</i>	59
Tabla 27 <i>Prueba de Tukey para %PET de GWP land transformation con una confianza de 95%</i>	60
Tabla 28 <i>Valor p de efectos principales e interacciones para GWP biogenic</i>	60
Tabla 29 <i>Prueba de Tukey para a/c de GWP biogenic con una confianza de 95%</i>	61
Tabla 30 <i>Prueba de Tukey para %Puzolana de GWP biogenic con una confianza de 95%</i>	61
Tabla 31 <i>Prueba de Tukey para %PET de GWP biogenic con una confianza de 95%</i>	61
Tabla 32 <i>Valor p de efectos principales e interacciones para revenimiento</i>	62
Tabla 33 <i>Prueba de Tukey para a/c del revenimiento con una confianza de 95%</i>	62
Tabla 34 <i>Prueba de Tukey para %Puzolana del revenimiento con una confianza de 95%</i>	63
Tabla 35 <i>Prueba de Tukey para %PET del revenimiento con una confianza de 95%</i>	63
Tabla 36 <i>Valor p de efectos principales e interacciones para contenido de aire</i>	64
Tabla 37 <i>Prueba de Tukey para a/c del contenido de aire con una confianza de 95%</i>	64

Tabla 38 Prueba de Tukey para %Puzolana del contenido de aire con una confianza de 95%	64
Tabla 39 Prueba de Tukey para %PET del contenido de aire con una confianza de 95%	65
Tabla 40 Valor p de efectos principales e interacciones para peso vol. en estado fresco	65
Tabla 41 Prueba de Tukey para a/c del peso vol. fresco con una confianza de 95%	66
Tabla 42 Prueba de Tukey para %Puzolana del peso vol. fresco con una confianza de 95%	66
Tabla 43 Prueba de Tukey para %PET del peso vol. fresco con una confianza de 95%	67
Tabla 44 Valor p de efectos principales e interacciones para peso vol. en estado endurecido	68
Tabla 45 Prueba de Tukey para a/c del peso vol. endurecido con una confianza de 95%	68
Tabla 46 Prueba de Tukey para %Puzolana del peso vol. endurecido con una confianza de 95%	68
Tabla 47 Prueba de Tukey para %PET del peso vol. endurecido con una confianza de 95%	69
Tabla 48 Valor p de efectos principales e interacciones para velocidad de ultrasonido	69
Tabla 49 Prueba de Tukey para a/c de velocidad de ultrasonido con una confianza de 95%	70
Tabla 50 Prueba de Tukey para %Puzolana de velocidad de ultrasonido con una confianza de 95%	70
Tabla 51 Prueba de Tukey para %PET de velocidad de ultrasonido con una confianza de 95%	70
Tabla 52 Valor p de efectos principales e interacciones para absorción después de inmersión	71

Tabla 53 Prueba de Tukey para a/c de absorción después de inmersión con una confianza de 95%	71
Tabla 54 Prueba de Tukey para %Puzolana de absorción después de inmersión con una confianza de 95%	72
Tabla 55 Prueba de Tukey para %PET de absorción después de inmersión con una confianza de 95%	72
Tabla 56 Valor p de efectos principales e interacciones para absorción después de inmersión y ebullición	73
Tabla 57 Prueba de Tukey para a/c de absorción después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%	73
Tabla 58 Prueba de Tukey para %Puzolana de absorción después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%	74
Tabla 59 Prueba de Tukey para %PET de absorción después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%	74
Tabla 60 Valor p de efectos principales e interacciones para densidad seca global	75
Tabla 61 Prueba de Tukey para a/c de densidad seca global con una confianza de 95%	75
Tabla 62 Prueba de Tukey para %Puzolana de densidad seca global con una confianza de 95%	75
Tabla 63 Prueba de Tukey para %PET de densidad seca global con una confianza de 95%	76
Tabla 64 Valor p de efectos principales e interacciones para densidad global después de inmersión	76
Tabla 65 Prueba de Tukey para a/c de densidad global después de inmersión con una confianza de 95%	77

Tabla 66 Prueba de Tukey para %Puzolana de densidad global después de inmersión con una confianza de 95%	77
Tabla 67 Prueba de Tukey para %PET de densidad global después de inmersión con una confianza de 95%	78
Tabla 68 Valor <i>p</i> de efectos principales e interacciones para densidad global después de inmersión y ebullición	78
Tabla 69 Prueba de Tukey para <i>a/c</i> de densidad global después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%	79
Tabla 70 Prueba de Tukey para %Puzolana de densidad global después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%	79
Tabla 71 Prueba de Tukey para %PET de densidad global después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%	80
Tabla 72 Valor <i>p</i> de efectos principales e interacciones para densidad aparente	81
Tabla 73 Prueba de Tukey para <i>a/c</i> de densidad aparente con una confianza de 95%	81
Tabla 74 Prueba de Tukey para %Puzolana de densidad aparente con una confianza de 95%	81
Tabla 75 Prueba de Tukey para %PET de densidad aparente con una confianza de 95%	82
Tabla 76 Valor <i>p</i> de efectos principales e interacciones para volumen de vacíos	82
Tabla 77 Prueba de Tukey para <i>a/c</i> de volumen de vacíos con una confianza de 95%	83
Tabla 78 Prueba de Tukey para %Puzolana de volumen de vacíos con una confianza de 95%	83
Tabla 79 Prueba de Tukey para %PET de volumen de vacíos con una confianza de 95%	83
Tabla 80 Granulometría Pellet amorfo reciclado de PET de PETStar	101
Tabla 81 Granulometría de la grava	106

Tabla 82 <i>Granulometría de la arena</i>	108
Tabla 83 <i>Dosificaciones en masa (kg) para 1 m³ de concreto con relación a/c en masa de 0.40 (ACI, 2002)</i>	112
Tabla 84 <i>Dosificaciones en masa (kg) para 1 m³ de concreto con relación a/c en masa de 0.60 (ACI, 2002)</i>	113
Tabla 85 <i>Respuestas promedio por tratamiento</i>	116
Tabla 86 <i>Respuestas promedio por tratamiento. Continuación</i>	117
Tabla 87 <i>Respuestas promedio por tratamiento. Continuación</i>	118
Tabla 88 <i>Respuestas promedio por tratamiento. Continuación</i>	119
Lista de figuras	
Figura 1 <i>Ruta de impacto ambiental del calentamiento global</i>	11
Figura 2 <i>Fórmula estructural del monómero del PET</i>	13
Figura 3 <i>Cuadro visual para estimación de esfericidad y redondez</i>	18
Figura 4 <i>Zona de interacción interfacial</i>	21
Figura 5 <i>Análisis de esfuerzos en la partícula de agregado</i>	23
Figura 6 <i>Diagrama esfuerzo-deformación del concreto</i>	26
Figura 7 <i>Muesca en un campo de deformaciones planas</i>	27
Figura 8 <i>Configuración usada en donde la integral J se evalúa casi por inspección</i>	28
Figura 9 <i>Pellet amorfo de PET proporcionado por PETStar</i>	38
Figura 10 <i>Prueba de revenimiento de UE 18 Tratamiento 4</i>	39
Figura 11 <i>Prueba de velocidad de pulso ultrasónico</i>	40
Figura 12 <i>Prueba de compresión simple a espécimen #1 de UE 10 Tratamiento 16</i>	41
Figura 13 <i>Secado en horno de especímenes probados para prueba ASTM C 642-06</i>	42
Figura 14 <i>Especímenes probados</i>	43

Figura 15 <i>Límites del sistema para 1 m³ de concreto hidráulico</i>	45
Figura 16 <i>Elipse de acomodo del pellet de PET</i>	98
Figura 17 <i>Cuadro visual para estimación de esfericidad y redondez</i>	99
Figura 18 <i>Curva de pellet amorfo reciclado de PETStar</i>	102
Figura 19 <i>Curva granulométrica de grava TMA 1"</i>	107
Figura 20 <i>Curva granulométrica de arena</i>	109
Figura 21 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 1</i>	122
Figura 22 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 2</i>	123
Figura 23 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 3</i>	124
Figura 24 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 4</i>	125
Figura 25 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 5</i>	126
Figura 26 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 6</i>	127
Figura 27 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 7</i>	128
Figura 28 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 8</i>	129
Figura 29 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 9</i>	130
Figura 30 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 10</i>	131
Figura 31 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 11</i>	132
Figura 32 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 12</i>	133
Figura 33 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 13</i>	134
Figura 34 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 14</i>	135
Figura 35 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 15</i>	136
Figura 36 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 16</i>	137
Figura 37 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 17</i>	138
Figura 38 <i>Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 18</i>	139

Figura 39 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 1</i>	142
Figura 40 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 2</i>	143
Figura 41 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 3</i>	144
Figura 42 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 4</i>	145
Figura 43 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 5</i>	146
Figura 44 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 6</i>	147
Figura 45 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 7</i>	148
Figura 46 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 8</i>	149
Figura 47 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 9</i>	150
Figura 48 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 10</i>	151
Figura 49 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 11</i>	152
Figura 50 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 12</i>	153
Figura 51 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 13</i>	154
Figura 52 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 14</i>	155
Figura 53 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 15</i>	156
Figura 54 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 16</i>	157
Figura 55 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 17</i>	158
Figura 56 <i>Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 18</i>	159
Figura 57 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para el revenimiento</i>	162
Figura 58 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el revenimiento</i>	163
Figura 59 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para el contenido de aire</i>	164
Figura 60 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el contenido de aire</i>	165
Figura 61 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para el peso volumétrico en estado fresco</i>	166

Figura 62 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el peso volumétrico en estado fresco</i>	167
Figura 63 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para el peso volumétrico en estado endurecido</i>	168
Figura 64 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el peso volumétrico en estado endurecido</i>	169
Figura 65 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para la velocidad de pulso ultrasónico</i>	170
Figura 66 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la velocidad de onda ultrasónica</i>	171
Figura 67 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para la resistencia a compresión simple</i>	172
Figura 68 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la resistencia a compresión simple</i>	173
Figura 69 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para la energía de integral J</i>	174
Figura 70 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la energía de integral J</i>	175
Figura 71 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para la absorción después de inmersión</i>	176
Figura 72 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la absorción después de inmersión</i>	177
Figura 73 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para la absorción después de inmersión y ebullición</i>	178
Figura 74 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la absorción después de inmersión y ebullición</i>	179

Figura 75 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para la densidad seca global</i>	180
Figura 76 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la densidad seca global</i>	181
Figura 77 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para la densidad global después de inmersión</i>	182
Figura 78 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la densidad global después de inmersión</i>	183
Figura 79 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para la densidad global después de inmersión y ebullición</i>	184
Figura 80 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la densidad global después de inmersión y ebullición</i>	185
Figura 81 <i>Gráfica de efectos principales para la densidad aparente</i>	186
Figura 82 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la densidad aparente</i>	187
Figura 83 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para poros permeables</i>	188
Figura 84 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para poros permeables</i>	189
Figura 85 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para GWP total</i>	190
Figura 86 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para GWP total</i>	191
Figura 87 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para GWP fossil</i>	192
Figura 88 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para GWP fossil</i>	193
Figura 89 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para GWP land transformation</i>	194
Figura 90 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para GWP land transformation</i>	195
Figura 91 <i>Gráfica de efectos principales e interacciones para GWP biogenic</i>	196
Figura 92 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para GWP biogenic</i>	197

Introducción

El concreto es una mezcla de arena, grava u otros materiales sólidos unidos a una matriz por medio de una pasta de cemento y agua (McCormac & Brown, 2011). El cemento Portland se obtiene al calcinar mezclas de piedra caliza con arcillas a una temperatura aproximada de 1500 °C, el producto resultante que es el clinker, se pulveriza añadiendo una cantidad adecuada de yeso como regulador de fraguado (Vidaud, 2013).

Cada año, se producen más de 4 mil millones de toneladas de cemento, que generan alrededor del 8% de las emisiones globales de CO₂, un kilogramo de cemento Portland ordinario emite en promedio 0.93 kg de CO₂ equivalente (Lehne & Preston, 2018). El cemento Portland ordinario (CPO), cuenta con entre 90-95% de clinker y el resto de yeso en su composición, sin embargo, un bajo uso de materiales cementantes suplementarios como las puzolanas puede reducir en 20% el CO₂ equivalente para una mezcla de concreto de 30MPa (Tyler Ley, 2022).

Por otro lado, los plásticos son materiales compuestos de polímeros de origen sintético o natural combinados con aditivos (Askeland & Wright, 2016); por su comportamiento térmico-mecánico se pueden clasificar en termofijos y termoplásticos, estos últimos se deforman al ser sometidos a calor y presión, manteniendo esta deformación cuando endurecen (Muciño & Coyoli, 2009). Para el 2015, se habían generado aproximadamente, 6 300 millones de toneladas de plástico, alrededor del 9% de estos han sido reciclados, 12% incinerados y 79% acumulado en rellenos sanitarios o en el medio ambiente (Geyer et al., 2017). Entre los termoplásticos de origen sintético, de gran tonelaje, se encuentra el usado en envase de bebidas, tereftalato de polietileno o PET.

El impacto ambiental del mal manejo de residuos plásticos de PET de un solo uso no biodegradables, y la fabricación de concreto que involucra explotación de recursos

naturales y emisiones de gases de efecto invernadero, da como hipótesis, objetivo y alcances de la presente investigación:

Hipótesis

La mezcla de concreto hidráulico a elaborar con PET como sustituto parcial del agregado fino y una puzolana como cementante suplementario, tendrá una resistencia a compresión simple de 250 kg/cm^2 y logra reducir el CO_2 equivalente en 20% manteniendo constantes las variables.

Objetivo general

Elaborar un concreto hidráulico y estudiar sus propiedades en estado fresco y endurecido, usando PET como sustituto parcial del agregado fino y una puzolana como cementante suplementario, para disminuir el CO_2 equivalente del mismo y obtener una resistencia a compresión simple de 250 kg/cm^2 .

Objetivos particulares

1. Elaborar un concreto hidráulico con relación agua-cementante de 0.4 y 0.60; 0%, 3% y 7% de PET en masa como sustituto parcial del agregado fino; 0%, 20% y 30% de puzolana de la masa total del aglutinante.
2. Determinar las propiedades físicas de los materiales a utilizar en la mezcla de concreto.
3. Determinar las propiedades en estado fresco de la mezcla.
4. Estudiar las propiedades en estado endurecido: resistencia a compresión simple a la edad de 28 días, velocidad de onda ultrasónica, porosidad, peso volumétrico y energía de la integral J.
5. Comparar el índice de calentamiento global de las mezclas de concreto diseñadas.

Alcances y limitaciones

- Comparar el índice de calentamiento global analizando desde la extracción de materia prima hasta la disposición final de 1 m³ de concreto hidráulico a elaborar con un control, para elementos estructurales en el Valle de Toluca, con el software SimaPro versión 9.5.0.1 PhD y bases de datos de EcoInvent versión 3.9.1 data as system processes (results).
- Se diseñarán mezclas de concreto hidráulico con sustitución parcial en masa de agregado fino de arena con pellets reciclados de PET en porcentajes de 0%, 3% y 7%; con relaciones agua cementante de 0.40 y 0.60; revenimientos correspondientes a columnas y trabes; y además sustitución parcial del cemento Portland en masa de 0%, 20% y 30% por una puzolana.
- A los especímenes se les realizarán las correspondientes pruebas en estado fresco y endurecido a la edad de 28 días de acuerdo con las normas mexicanas, ACI o ASTM, en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx “Javier Barros Sierra”, acreditado ante a Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) No. Acreditación C-0084-013/12.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

Introducción

El presente capítulo contiene investigaciones consultadas, metodologías y teorías en la que se basa la actual investigación.

1.1. Estado del Arte

Saikia y De Brito (2013), usaron PET en forma de hojuela y de pellet en sustitución en volumen de agregado en 5%, 10% y 15% para reutilizar tal plástico, encontrando que para mantener determinado revenimiento fue necesario un mayor uso de agua con el PET en forma de hojuela, por lo que el desempeño en estado endurecido fue mejor en el agregado con forma de pellet, aunque, para todos los casos, la resistencia a compresión simple, tensión y flexión disminuyó a mayor cantidad de PET con respecto al control. Las pruebas en estado endurecido se realizaron a los 7, 28 y 91 días, encontrando un desarrollo de resistencia mayor a los 7 días en los concretos con PET que en el testigo.

Según Kangavar et al. (2022), el uso de gránulos de PET como agregado reciclado con forma sub-redondeada, textura más o menos lisa y tamaño menor a 4.75 mm como reemplazo de arena en 10%, 30% y 50% en volumen siguiendo una curva granulométrica dentro de los límites del AS2758.1, resultó que para un control de resistencia a compresión de 32 MPa disminuyó el peso volumétrico y módulo de elasticidad, incrementó la resistencia a compresión en 9.07% con el 10% de PET y decrementó 26.3% con el 50%, se mostró un comportamiento similar en las pruebas de tensión indirecta y flexión.

Qaidi et al. (2023) realizaron un experimento con 90 cilindros y 54 cubos de concreto sustituyendo 25% y 50% de arena por hojuelas de PET para su reutilización y relación en masa a/c de 0.40, 0.45 y 0.55, concluyendo en menor trabajabilidad, resistencia a

compresión simple, alta porosidad, mayor capacidad de deformación y peso volumétrico de concreto menor de 2000 kg/m^3 con el 50% de hojuelas de PET.

En el Análisis de Ciclo de Vida de la cuna a la puerta de De Brito y Silvestre (2018), para evaluar distintas categorías de impacto, entre ellas el índice de calentamiento global a 100 años de mezclas de 1 m^3 de concreto premezclado usando cemento Portland ordinario con fly ash como cementante suplementario en 30% y 60%, sustitución de agregado fino por reciclado en 50% y 100% y de agregado grueso de 100%, además del uso de superfluidificante en 1% para la zona centro de Lisboa, con el software SimaPro; encontró que el 87-96% de $\text{kg CO}_2\text{e/m}^3$ de concreto es debido al cemento, la incorporación de superfluidificante contribuyó en el aumento de 1% y el reemplazo de agregado grueso por reciclado tuvo mejor efecto de disminución del CO_2e que el fino, sin embargo, esto no fue muy significativo.

Sjunnesson (2005), realizó un análisis de ciclo de vida del concreto en Suecia, llegando a la conclusión de que la contribución de superplastificantes al índice de potencial de calentamiento global (GWP) es de 0.4% para las mezclas analizadas, tal que, concluye que este aditivo tiene un impacto ambiental limitado. Igualmente indica que la etapa de transformación de materiales para obtener las materias primas del concreto causó aproximadamente el 85% del GWP del total del ciclo de vida, siendo el cemento el mayor contribuyente a este.

1.2. Metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) mide cuantitativamente el impacto ambiental potencial y uso de recursos de un producto con una perspectiva de sistema para alrededor de 15 categorías de problemas medioambientales; evalúa cada parte de su vida, desde la extracción de materias primas, producción, uso, hasta el manejo de residuos. Sus etapas

son: objetivo y alcances, análisis de inventario, análisis de impacto e interpretación (Hauschild et al., 2017).

Su objetivo consiste en identificar soluciones, comparar y analizar cambios propuestos en un sistema para evitar que, al beneficiar a una categoría de impacto se vuelva un problema para otras. Su validez se basa típicamente en modelos aceptados y revisados por pares científicos adoptados para operar dentro de las condiciones de frontera del ACV (Hauschild y Huijbregts, 2015). Los resultados se calculan rastreando emisiones, usos y algunas veces localización geográfica concentrados en bases de datos (Hauschild et al., 2017).

Por lo tanto, no puede determinar el beneficio neto para el ambiente de la implementación de la solución elegida, no toma en cuenta riesgos de desastres como los existentes en plantas nucleares, es decir, únicamente mide el potencial de impacto, ya que trabaja con desempeños promedios entorno a procesos para obtener un producto o material (Hauschild et al., 2017).

1.2.1. Cambio climático

El clima en determinada región se define como el estado del tiempo medio durante un periodo de varios años. Los principales factores que lo determinan son la cantidad de radiación que entra en la atmósfera, la radiación infrarroja que deja la Tierra y los gases atmosféricos. El 30% de la radiación solar que entra a la Tierra es reflejada por la superficie terrestre y la atmósfera, es el albedo del planeta. Los cambios en el estado del tiempo se llevan a cabo en la tropósfera, la mayoría de la masa de la atmósfera se concentra ahí, es poco estable y adaptable, igualmente, hay un gran movimiento vertical de aire causado por el calentamiento de la superficie terrestre, tal que el balance de radiación de la Tierra se estudia en la parte superior de ella (Boeker & Van Grondelle, 2011).

La superficie terrestre pierde energía emitiendo radiación infrarroja, la cual es devuelta por la atmósfera en su mayoría, ya que la absorción de la última depende de su longitud de onda; el espectro de emisión del sol tiene un pico en la longitud de onda de 5 μm , mientras que el de la Tierra es de 10 μm , ambos pertenecientes al infrarrojo, donde varios de los gases atmosféricos incluyendo gases de efecto invernadero (GEI) absorben radiación, provocando que gran parte de la energía solar que llega a la superficie terrestre no pueda escapar (Boeker & Van Grondelle, 2011).

El cambio climático se define como el calentamiento de sistema climático debido a actividades humanas, la emisión de GEI es el principal contribuyente y el único agente considerado en el análisis de impacto ambiental por su forzamiento radiativo, es decir, la perturbación en el balance de energía del planeta (Hauschild y Huijbregts, 2015).

Los cuatro principales GEI resultantes de actividades antropogénicas son el dióxido de carbono (CO_2), óxido de nitrógeno (N_2O), metano (CH_4) y halocarburos. Su durabilidad en la atmósfera es mayor que el tiempo en que se mezclan gases en la tropósfera, que es alrededor de un año. El dióxido de carbono tiene una larga persistencia, y su presencia se atribuye principalmente a la quema de combustibles fósiles, y al cambio en la cantidad de carbono en plantas y suelo cuando hay un cambio de uso de terreno (Hauschild y Huijbregts, 2015).

1.2.2. Ciclo del carbono

El ciclo del carbono regula la concentración de CO_2 en la atmósfera, actuando como un termostato global. La transición de concentración de CO_2 atmosférico más clara proviene del último máximo glacial con 200 ppm, al Holoceno de 260 ppm 10 000 años después, seguido de un lento aumento a 280 ppm hasta 1750 y finalmente una abrupta subida a 390

ppm en la actualidad. 1 Gton de C en nuestra atmósfera cambia la concentración de CO₂ en alrededor de 0.5 ppm. La emisión de CO₂ proveniente de combustibles fósiles se da en medio de tres grandes sistemas estabilizadores del ciclo del carbono en la biósfera (intemperismo de rocas, homeostasis del oxígeno y el océano) (Archer, 2010).

Durante la intemperización de rocas, se absorbe carbono de la atmósfera y se transforma en carbonato de calcio (CaCO₃) presente en rocas sedimentarias, dando lugar a que éste regrese a la corteza terrestre en escalas de tiempo geológicas. Lo anterior se balancea con la liberación de CO₂ a la atmósfera mediante gases volcánicos y aguas termales. Este sistema de regulación se relaciona con la temperatura, a mayor temperatura hay una mayor presencia de vapor de agua agilizando el intemperismo en las rocas (Archer, 2010).

El plancton en el océano altera el ciclo del carbono al absorber el CO₂ de la superficie mediante fotosíntesis y lo lleva a sus profundidades al morir. Además, los rangos de temperatura del agua juegan un papel importante, una menor temperatura puede disolver y, por lo tanto, retener mayor cantidad de CO₂, mientras que, si se calienta, libera CO₂ a la atmósfera. Así, la variación de temperatura en la superficie del océano es responsable de manejar enormes entradas y salidas de CO₂ entre él y la atmósfera (Archer, 2010).

Las actividades antropogénicas suman una nueva entrada al ciclo del carbono natural, el cual, actualmente, nos ayuda disolviendo la mitad de nuestras emisiones en el océano y la superficie terrestre. La carga total antropogénica que añadimos al ciclo del carbono es de alrededor de 10 Gton C por año, proveniente de combustibles, deforestación y fuentes secundarias como la manufactura de cemento. Esto es menor al intercambio a gran escala de flujos de carbono en la biosfera, intercambio de gases en el océano y fotosíntesis con organismos terrestres y del océano, siendo cada uno de 100 Gton de C anuales, esto

significa que el ciclo es capaz de responder a las perturbaciones realizadas por los seres humanos (Archer, 2010).

Sin embargo, la analogía más cercana a la emisión de CO₂ antropogénica, es la desgasificación de la tierra que es de 0.1 Gton de C al año, 100 veces más pequeña que las emisiones causadas por la actividad humana. Es decir, la cantidad de CO₂ en la atmósfera-oceano y superficie terrestre aumentará, hasta que el intemperismo lo pueda regresar muy lentamente al suelo (Archer, 2010).

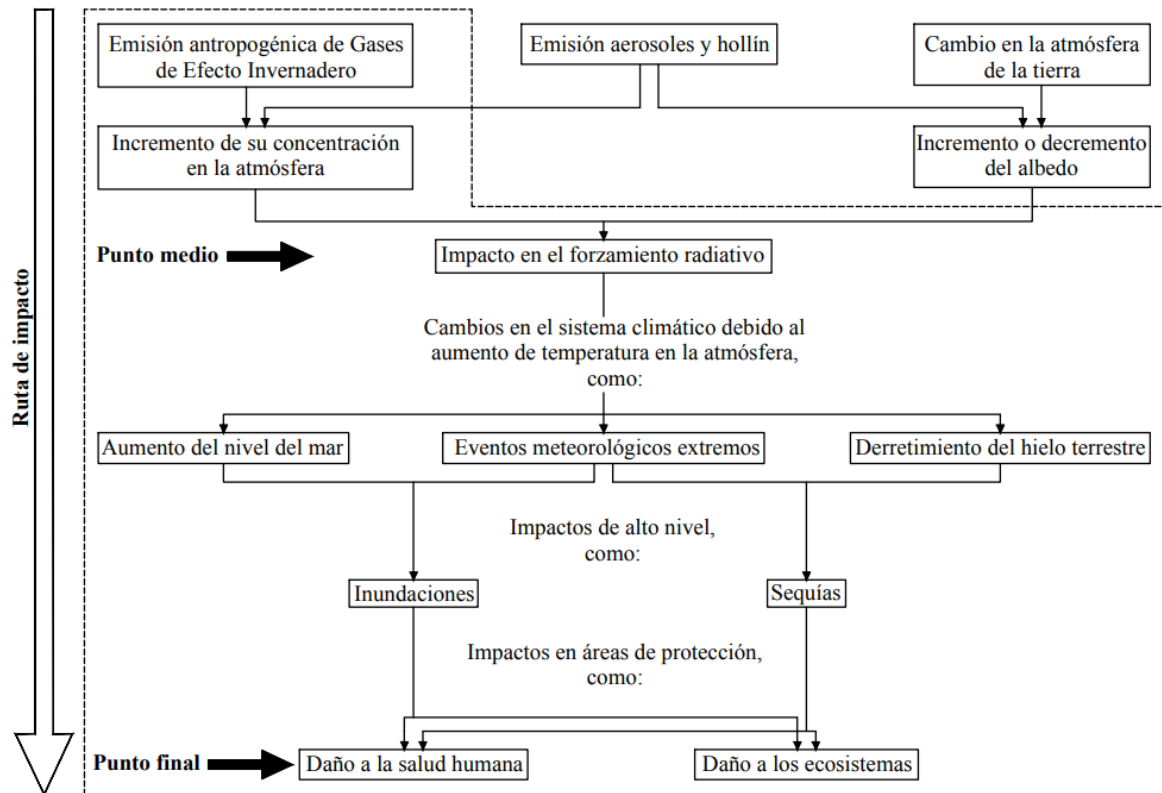
1.2.3. Índice de potencial de calentamiento global

La categoría de impacto relacionada al cambio climático es el índice de potencial de calentamiento global (GWP), cuya ruta de impacto se ilustra en la Figura 1, el área encerrada en la línea punteada es la evaluada, ya que corresponde a la contribución de actividades antropogénicas al incremento en el forzamiento radiativo causando aumento en la temperatura atmosférica. Es un factor de caracterización de punto medio, pues no evalúa el impacto asociado al sistema climático de un lugar en particular hasta llegar a la cuantificación de daños a áreas de protección, como lo son el daño a ecosistemas y salud humana. Su incertidumbre se estima de $\pm 35\%$ para un nivel de confiabilidad de 5-95% (Hauschild y Huijbregts, 2015).

Cuando la única categoría de impacto evaluada es el índice GWP, se considera un análisis para obtener la huella de carbono. El cambio climático es de impacto global, es decir, el incremento del forzamiento radiativo es igual independientemente del lugar de emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) (Hauschild y Huijbregts, 2015).

Figura 1

Ruta de impacto ambiental del calentamiento global



Fuente: Adaptación Hauschild et al., (2017) y Hauschild y Huijbregts (2015).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) se basa en el modelo del ciclo del carbono de Bern para calcular los potenciales de calentamiento global de GEI tomando en cuenta su absorción de radiación térmica y concentración después de determinado tiempo a partir de la emisión, como se muestra en la ecuación (1). Su unidad es, dióxido de carbono equivalente, sobre unidad funcional (Hauschild et al., 2017).

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i \cdot C_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} C_{CO_2}(t) dt} \dots (1)$$

donde:

GWP_i potencial de calentamiento global del gas i

a_i forzamiento radiativo debido al incremento en una unidad de abundancia en la atmósfera del gas i

$C_i(t)$ decremento dependiente del tiempo en la abundancia en la atmósfera del gas i

T tiempo de horizonte en el que realiza el cálculo

1.3.Tereftalato de polietileno como agregado fino de concreto hidráulico

1.3.1. Tereftalato de polietileno

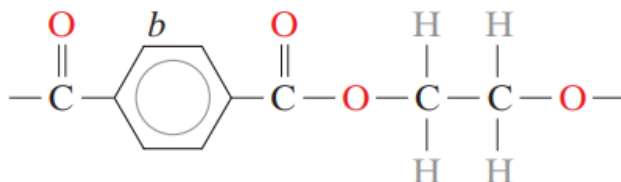
El plástico es un material formado por aditivos y unidades monoméricas unidas en largas cadenas con peso molecular mayores a 10000 g/mol. El tereftalato de polietileno o PET es semicristalino y de origen sintético debido a que se obtiene a partir de gas natural o nafta, pertenece a la familia del poliéster por tener grupos funcionales ésteres, además por su facilidad de producción a bajo costo se considera dentro de los plásticos de gran tonelaje, aunque por sus propiedades mecánicas también se le contempla dentro de los plásticos para ingeniería. Actualmente es usado como contenedor de alimentos y bebidas, fibras, película fotográfica, cintas para grabación y bolsas para hervir líquidos (Askeland & Wright, 2016).

Por su comportamiento termo-mecánico es un termoplástico, es decir, debido a que sus cadenas son lineales, no están conectadas rígidamente y son flexibles, a determinada temperatura se pueden deslizar entre sí dando un comportamiento dúctil, por tal motivo, presenta buena formabilidad, cuando se procesa a altas temperaturas y presiones (Askeland & Wright, 2016). Los enlaces entre monómeros son primarios y entre cadenas son secundarios, tal que, la resistencia transversal del polímero es una fracción de su resistencia longitudinal (Philleo, 1966).

A pesar de que el PET es obtenido de dos monómeros es un homopolímero, ya que su unidad de repetición es la misma a lo largo de las cadenas formadas, su unidad monomérica es $(C_{10}H_8O_4)_n$, expresada en forma estructural en la Figura 2.

Figura 2

Fórmula estructural del monómero del PET



Fuente: Callister & Rethwisch, (2007)

En la actualidad existen dos métodos de polimerización del PET, ambos por condensación; el proceso de trans-esterificación entre el dimetil tereftalato y etilenglicol (DMT), poco usado por su impacto ambiental, ya que, el alcohol metílico es el subproducto y puede causar más emisiones de compuestos orgánicos volátiles. El de esterificación directa del ácido tereftálico con etilenglicol (TPA), es el más usado en la actualidad, su subproducto es agua. En ambos procesos se produce un monómero intermedio, el bis hidroxí etil tereftalato que es el que se polimeriza en PET (Prieto et al., 2022).

Debido a que las moléculas formadas no tienen la misma longitud de cadena y por tanto, mismo peso molecular, los anteriores se expresan mediante una distribución para obtener el peso molecular medio másico, peso molecular medio numérico, grado de polimerización medio másico y grado de polimerización medio numérico (Callister & Rethwisch, 2007).

Lo anterior está relacionado con las propiedades del polímero, por ejemplo, entre más grande es la cadena aumenta su resistencia a tensión, pero dificulta su procesamiento pues aumenta su punto de fusión (Callister & Rethwisch, 2007). De acuerdo con las

mediciones de Farah et al. (2015) con el método de Mark-Houwink y con el size-exclusion chromatography (SEC) el peso molecular medio másico de botellas de PET reciclado es menor al de aquellas con resina virgen, es decir las cadenas del polímero reciclado son más cortas.

1.3.2. Manejo de residuos, impacto al medio ambiente y salud humana

Según la Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C. [ANIPAC], (2022), en 2021 el consumo aparente de plásticos en México fue de 6,667,000 ton, estimando que el 45.4% fue utilizado para envases y empaques (aproximadamente 3,026,818 ton).

Los potenciales riesgos al ambiente de la presencia de plásticos son la modificación de la estructura del suelo desestabilizando sus agregados y diversidad microbiana, reducción de fertilidad, alteraciones específicas de flora y fauna en función de su especie, así como, el ingreso a la cadena alimenticia, ya que se alojan principalmente en el sistema digestivo de los animales. En el medio marino mexicano se estima que, de los 52 sitios muestreados, al menos el 60% de residuos son plásticos, siendo los de mayor proporción: tapas, botellas, bolsas, desechables, contenedores de alimentos y cubiertos, es decir, artículos de un solo uso (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2023).

De acuerdo con SEMARNAT, (2023), otro perjuicio del mal manejo de residuos plásticos es su eventual fragmento en piezas más pequeñas convirtiéndose en microplásticos, facilitando su entrada no solamente a ecosistemas, también al cuerpo humano por medio de ingestión, inhalación y en menor medida por absorción a través de la piel. Aunque aún no se conocen todas las consecuencias a largo plazo, los posibles daños asociados son:

1. Daño físico a los tejidos por abrasión y bloqueo.

2. Presencia de aditivos que, si no están enlazados a la matriz polimérica se deslavan, y contienen compuestos que se considera que alteran las funciones hormonales (como ftalatos o bisfenol) y potencialmente cancerígenos (polifluorados y polibromados).
3. Contribución a toxicidad ya que los microplásticos pueden adsorber sustancias como compuestos poliaromáticos, metales, antibióticos, entre otros.
4. Capacidad de actuar como vectores de organismos patógenos en el ambiente.

Un punto crítico de contaminación plástica por ser fuente potencial de fugas al medio ambiente en México, son los sitios de disposición final (SDF) de residuos sólidos urbanos, se registran 2,215 en el país, clasificados por los municipios como sitios controlados o no controlados (tiraderos a cielo abierto), estos últimos son el 94% del total (2,071). Además, los 20 sitios más grandes no cuentan con recubrimiento, característica cuya finalidad es evitar escape de basura. El SDF inapropiado más grande del país es el “Relleno municipal de Santa María Chiconautla” en Ecatepec, Estado de México (SEMARNAT, 2023).

Debido a los daños a ecosistemas y a la salud humana del mal manejo de plásticos, en diciembre de 2019 se firmó en el senado el Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico en México, en el cual empresas se comprometieron a cumplir diversas metas, entre las que destacan que para el 2030 se busca que un 30% de material reciclado sea usado para manufacturar nuevos artículos de plástico y lograr un acopio de 80% para PET (ANIPAC, 2021), siendo que, actualmente se tiene el 59% de tasa de recuperación de este (ANIPAC, 2022).

La legislación existente en México respecto a la gestión de residuos es la NOM-161-SEMARNAT-2011 Criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo, la cual define el plan de manejo como:

Un instrumento a través del cual se busca minimizar la generación y maximizar el aprovechamiento de los residuos en los que se aplica, por lo que al lograr su implementación se incrementaría la cantidad de residuos aprovechados, y como consecuencia se disminuye la carga sobre los recursos naturales y sobre la vida útil de los sitios de disposición final donde se disponen (SEMARNAT, 2011).

En su Anexo Normativo de listado de residuos que requieren plan de manejo se encuentra el PET, únicamente cuando se generan más de 10 ton/año en diversas actividades económicas (SEMARNAT, 2011).

1.3.3. Características geométricas de importancia de agregados para concreto hidráulico

Los agregados constituyen la parte mayoritaria de la estructura en que intervienen, brindan estabilidad volumétrica dando funcionalidad al concreto, y además son concentradores de esfuerzos. Se clasifican como gruesos cuando su tamaño se encuentra entre 4.75 mm y 10 cm; y finos si su diámetro está entre 75 μm y 4.75 mm. (Muciño & Coyoli, 2009).

Diferencias en la forma y textura superficial afectan el contenido de vacíos y fricción de los agregados, por tal, las proporciones de ingredientes, propiedades mecánicas y economía de las mezclas de concreto en estado fresco. En estado endurecido, la resistencia a compresión y flexión, la elasticidad, y la distribución de esfuerzos son en parte resultado de la orientación de partículas, el grado de adhesión entre estas y la pasta de cemento, además del comportamiento mecánico de la zona de interacción interfacial. Esas propiedades son

influidas en conjunto e individualmente por factores geométricos, textura superficial, área superficial y recubrimientos en los agregados (Ozol, 1978).

Los factores geométricos de interés en agregados para concretos en donde no solamente importa la relación agua-cemento son:

- Esfericidad, de acuerdo con Ozol, (1978), es la medida de que tan parejas son las tres dimensiones de una partícula respecto a una esfera circunscrita con diámetro igual a la mayor dimensión de esta, se determina con la ecuación (2):

$$\psi = \sqrt[3]{\frac{V_p}{V_{cs}}} \dots (2)$$

donde

ψ esfericidad

V_p volumen de la partícula

V_{cs} volumen de la esfera circunscrita

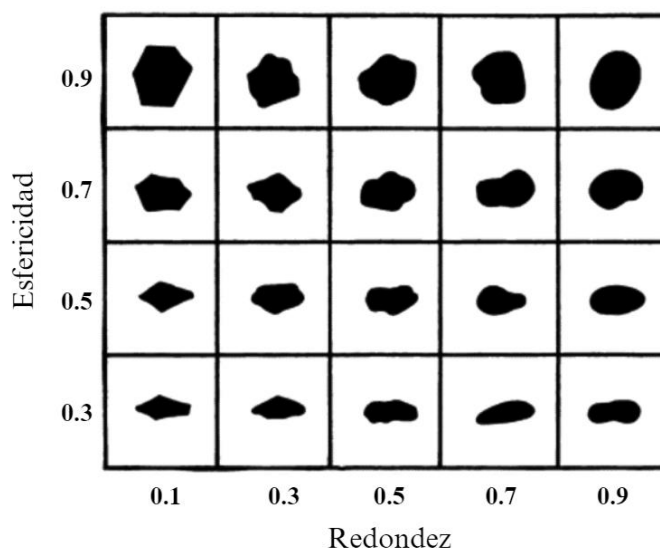
- Redondez, mide la similitud entre la angularidad de los bordes y esquinas del contorno del agregado con respecto a un círculo inscrito en esta con el mayor radio posible (Ozol, 1978). Según Krumbein et al., (1951), se expresa en dos dimensiones colocando la partícula de tal forma que proyecta la mayor área posible, por definición, es la ecuación (3):

$$Redondez = \frac{Radio\ promedio\ de\ los\ bordes\ y\ esquinas}{Radio\ del\ máximo\ círculo\ inscrito} \dots (3)$$

El valor máximo de la esfericidad y la redondez es de 1.0. También pueden ser estimadas mediante la Figura 3:

Figura 3

Cuadro visual para estimación de esfericidad y redondez



Fuente: Krumbein et al. (1951)

- Forma, relaciona los ejes corto, medio y largo de las partículas para obtener factores de forma con los cuales se puede distinguir que tan alargada y plana es la partícula (Ozol, 1978).

Si los agregados presentan recubrimiento de alguna sustancia, se puede afectar su estabilidad química y la adherencia con la matriz (Ozol, 1978). En el Anexo 1 se encuentra la caracterización del pellet de PET como agregado para concreto hidráulico usado en la presente investigación.

1.4. Respuesta del concreto sometido a esfuerzos

La durabilidad del concreto es considerada como su característica más valiosa, aunque en muchos casos son otras, como la resistencia, impermeabilidad y estabilidad volumétrica (Neville & Brooks, 1998), cuenta con una vida útil de 50, 100 o más años, especialmente en cimentaciones. En el concreto, 60% a 75% del volumen total se compone de agregados y 25-40% de pasta de cemento (Kosmatka et al., 2004).

La composición de cemento consta del 75% del peso constituido por el silicato de tricálcico y el silicato dicálcico, los cuales reaccionan con el agua para formar hidróxidos de calcio y silicatos de calcio hidratados, estos últimos los más importantes para el fraguado, resistencia y estabilidad dimensional (Kosmatka et al., 2004). Las puzolanas son materiales silicosos o con sílice y alúmina, que por sí mismas no tiene capacidad cementante, sin embargo, al reaccionar con cal apagada y agua, generan compuestos aglomerantes tales como hidratos y silicatos de calcio, por lo que son consideradas materiales cementantes suplementarios. La ceniza volcánica fue la primer puzolana, las cenizas volantes (fly ash) producto de combustiones y pumicita también entran en este grupo (Neville & Brooks, 1998).

1.4.1. Modelo de Powers

El contenido de vacíos en el concreto está formado por poros gel o vacíos gel, poros capilares y aire atrapado (Muciño & Coyoli, 2009). La estructura de los poros (tamaños y distribución) en el concreto tiene influencia en sus propiedades físicas y mecánicas, además de controlar la durabilidad del material. La resistencia a compresión y elasticidad se ven afectadas principalmente por el volumen total de poros (Aligizaki, 2006).

En esta investigación, se usa el modelo de Powers para modelar la pasta de cemento y sus correspondientes vacíos (poros gel y poros capilares) incluyendo al material cementante suplementario usado, el cual de acuerdo con Neville & Brooks, (1998), se basa en las siguientes suposiciones:

1. El volumen total de productos de hidratación es igual al volumen de cemento seco más el volumen de agua
2. El agua que reacciona químicamente con el cemento, es decir, el agua no evaporable es entre el 21% y 24% de peso del cemento seco

3. El volumen de sólidos de hidratación es igual al volumen del cemento seco más el agua no evaporable menos el 25% del agua no evaporable
4. Los poros gel o vacíos gel son propiedad del concreto/mortero/pasta, estos tienen una porosidad del 28% sin importar cuándo se fabricó el cemento, estos poros deben estar llenos de agua para que la hidratación del cemento continúe (agua gel).
5. La cantidad de vacíos formados por poros gel y capilares determinan la resistencia.

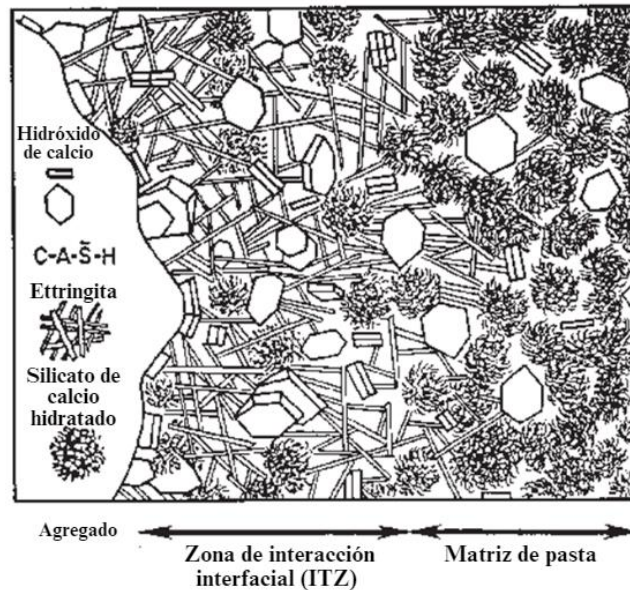
A partir de las cuales se sabe que el volumen de productos de hidratación producido por 1 cm³ de cemento hidratado es de 2.14 cm³; para que el volumen de vacíos capilares sea cero debe existir una fuente inagotable de agua; las relaciones agua cemento en masa deben estar entre 0.36 y 0.42 para que todo el cemento se hidrate, si la relación es menor, este no se hidratará y funcionará como agregado; es necesario el espacio para la formación de los productos de hidratación y la presencia de agua gel para que la hidratación continúe; finalmente, entre mayor sea la cantidad de agua en la pasta, esta tendrá mayor cantidad de vacíos (Philleo, 1966).

1.4.2. Zona de interacción interfacial

La unión más crítica en el concreto es la zona de interacción interfacial (ITZ) entre la matriz (pasta de cemento) y el mismo agregado, es en donde comienza el micro agrietamiento (Muciño & Coyoli, 2009). Tiene espesor de entre 20-40 μm que envuelve al agregado grueso en la cual la estructura de la pasta de cemento tiene menos cemento hidratado, mayor porosidad respecto a la matriz de cemento, grandes cristales orientados de hidróxido de calcio y aumento en la concentración de ettringita como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Zona de interacción interfacial



Fuente: Mindess et al., (2003).

Aunque la ITZ tiene un espesor pequeño, se estima que ocupa entre el 20-40% del volumen total de la matriz cementante, cuenta con menor resistencia al agrietamiento que cualquiera de los agregados o pasta de cemento hidratada, por lo tanto, la fractura ocurre preferentemente 10-20 μm dentro de esta zona. No hay métodos estandarizados para medir su resistencia o la resistencia de adherencia entre el agregado y la ITZ. La adherencia depende generalmente de las características de la superficie de las partículas de agregado, entre mayor sea, la resistencia de la zona incrementa, y la resistencia del concreto también aumenta, ya sea en tensión, flexión o compresión, en un rango de 5-40%, con mejoras en la resistencia a tensión mayores que en compresión (Mindess et al., 2003).

Cómo se mencionó anteriormente, la presencia de recubrimiento en el agregado afecta la adherencia, significando inexistencia de ITZ, es decir, el concreto contará con micro agrietamientos desde un inicio (Muciño & Coyoli, 2009).

1.4.3. Modelo de falla propuesto en el concreto

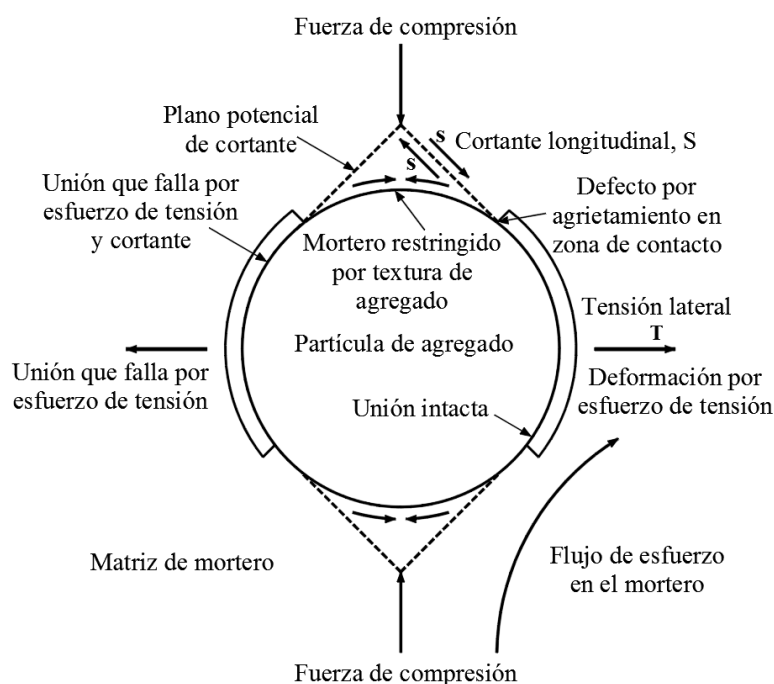
Para el caso de materiales frágiles como el concreto, su fractura ocurre sin una deformación plástica y/o reducción en la sección transversal apreciables y en un plano perpendicular a la dirección de la tensión, este tipo de falla es Modo I: por apertura (Timoshenko, 1947).

Mindess et al., (2003), indica que cuando el concreto se somete a esfuerzos de compresión existirán regiones alrededor del agregado sujetas a un esfuerzo de tensión secundario, cuando se alcanza el esfuerzo de resistencia a tensión comenzarán a formarse fisuras, la falla por compresión se debe a este agrietamiento progresivo paralelo al eje de carga. Para el caso usual en el que la partícula de agregado es más rígida que la matriz, el análisis de esfuerzos muestra el siguiente orden de falla (ver Figura 5):

1. Falla por esfuerzo a tensión y cortante en la unión
2. Falla en unión por cortante
3. Falla de la matriz de mortero por esfuerzos a tensión
4. Ruptura ocasional en agregado

Figura 5

Análisis de esfuerzos en la partícula de agregado



Fuente: Adaptación de Mindess et al., (2003).

1.4.4. Modelo de mecánica de fractura, ecuación de Griffith

Se ha asumido que los sólidos son cuerpos sin discontinuidades o defectos para los cuales funciones continuas pueden ser aplicadas, obteniendo buenos resultados en el cálculo de deformaciones y esfuerzos en el rango elástico del material, teniendo por causas directas fuerzas externas, cuyos efectos son casi idénticos entre dos partículas contiguas del cuerpo, además, cada partícula influye al resto de manera continua. Sin embargo, tales suposiciones concluyen en resultados poco exactos para el estudio de resistencia y fractura de materiales (Philleo, 1966).

Para modelar la falla de sólidos elásticos lineales tomando en cuenta discontinuidades en el material se usa el enfoque termodinámico de Griffith (1921), que emplea como punto de partida el principio de la mínima energía potencial total, en el que, al deformar

elásticamente un sólido con cargas en su superficie, este buscará el equilibrio del sistema, siendo ese punto en donde se tiene la mínima energía potencial total.

La ecuación (4) muestra el equilibrio termodinámico del sistema, destacando la liberación de energía potencial de deformación al formarse una grieta y un aumento en la energía potencial por formación de superficies (Wei, 2010):

$$U = U_0 - U_s + U_\gamma \dots (4)$$

U energía potencial del sistema

U_0 energía potencial antes de introducir una grieta

U_s energía potencial de deformación

U_γ energía potencial por la formación de superficies

Lo anterior, bajo las siguientes condiciones de acuerdo con Griffith, (1921):

- Una fisura forma parte de la superficie del cuerpo con espesor unitario en estado sin deformar.
- La grieta es más ancha que el radio de acción molecular excepto muy cerca de sus esquinas para calcular con suficiente exactitud el incremento en la energía de superficie debida a la propagación de la fisura.
- Superficie sin tracción para la determinación de esfuerzos a lo largo de la fisura excepto cerca de sus esquinas.

Así, en un cuerpo elástico sólido, deformado por determinadas cargas aplicadas en su superficie, la suma de la energía potencial de las fuerzas aplicadas y la energía de deformación del cuerpo sólo disminuye o se mantiene inalterada por la presencia de una fisura cuyas superficies son libres de tracción (Griffith, 1921).

Además, si el cuerpo se somete a cargas constantes del estado sin deformar, a un estado de equilibrio, la disminución total de energía potencial total debida a la formación de una grieta de longitud $2c$ es: el cambio en la energía potencial de deformación, menos el cambio en la energía superficial como se muestra en la ecuación (5) (Griffith,1921):

$$U = U_s - U_\gamma = \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} - 4cT \dots (5)$$

donde

U energía potencial total

U_s energía potencial de deformación

U_γ energía por formación de superficie

c mitad de longitud de la fisura

σ esfuerzo

E módulo de elasticidad

T energía superficial específica

Griffith, (1921), señala que la condición en la que se extiende la fisura es cuando la energía está en condición estacionaria, entonces:

$$\frac{\partial}{\partial c}(U_s - U_\gamma) = 0 \dots (6)$$

De donde, se obtiene el esfuerzo crítico que causará propagación de la fisura:

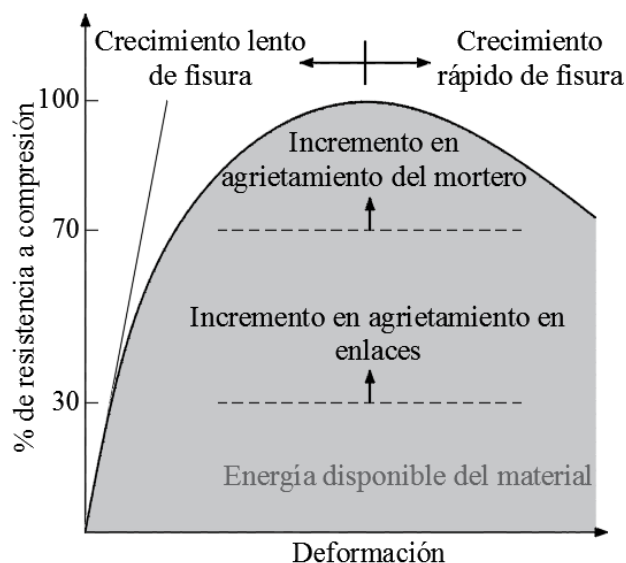
$$\sigma = \sqrt{\frac{2ET}{\pi c}} \dots (7)$$

En la Figura 6, se observa el comportamiento de propagación de grietas en concreto sometido a compresión, donde a partir de que el material alcanza el 30% de su resistencia inicia el agrietamiento de manera estable, al alcanzar el 100%, es decir, el esfuerzo crítico,

la propagación de grietas será más rápida causando fractura y la subsecuente falla del espécimen de concreto (Mindess et al., 2003).

Figura 6

Diagrama esfuerzo-deformación del concreto



Fuente: Adaptación Mindess et al., (2003).

1.4.5. Integral J, energía

De acuerdo con Rice, (1967), la integral J tiene el mismo valor para todas las trayectorias que se encuentran alrededor una clase de muesca en campos de deformación bidimensionales de materiales elásticos lineales o no lineales, con las siguientes suposiciones y aplicaciones básicas:

1. Estimaciones aproximadas de la concentración de deformaciones en esquinas redondeadas de muescas en materiales elásticos y elastoplásticos.
2. Una solución general de la separación de la esquina de una grieta en el modelo de Barenblatt-Dugdale, llevando a probar la teoría de Griffith y el modelo de cohesión de Barenblatt para fractura elástica frágil, además de la inclusión del

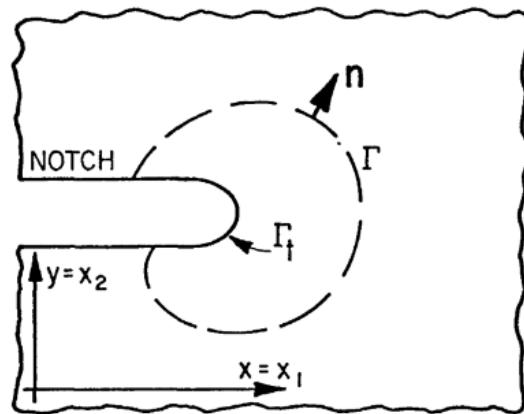
comportamiento de endurecimiento en la deformación del modelo de Dugdale para fluencia en esfuerzos planos.

3. Una aproximación de deformaciones planas perfectamente plásticas basado en la teoría del campo de línea de deslizamiento, en la esquina afilada o redondeada de una grieta.

Considera un cuerpo homogéneo de un material elástico lineal o no lineal libre de fuerzas de cuerpo y sujeto a un campo de deformación en dos dimensiones (deformaciones planas), de tal manera que los esfuerzos σ_{ij} depende únicamente de dos coordenadas cartesianas $x_1(=x)$ y $x_2(=y)$. Tal cuerpo contiene una muesca redondeada con superficies paralelas al eje x como la de la Figura 7 (Rice, 1967). Debido a que el concreto es una material inelástico no lineal en tensión y compresión (Mindess et al., 2003), en la presente investigación se usa este modelo para caracterizar las unidades experimentales.

Figura 7

Muesca en un campo de deformaciones planas



Fuente: Rice, (1967)

Así, de acuerdo con Rice, (1967) la integral J se define con la ecuación (8):

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - \bar{T} \cdot \frac{d\bar{u}}{dx} ds) \dots (8)$$

donde:

Γ trayectoria alrededor de la esquina de la muesca evaluada en sentido antihorario iniciando en la superficie inferior de la muesca

W es la densidad de energía de deformación definida por: $W(x_1, x_2) = W(\bar{\epsilon}) = \int_0^{\bar{\epsilon}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$

$\bar{\epsilon} = [\epsilon_{ij}]$ es el tensor deformación infinitesimal

$\bar{T}$ es el vector tracción definido por: $T_i = \sigma_{ij} n_j$

n_j normal exterior a lo largo de Γ

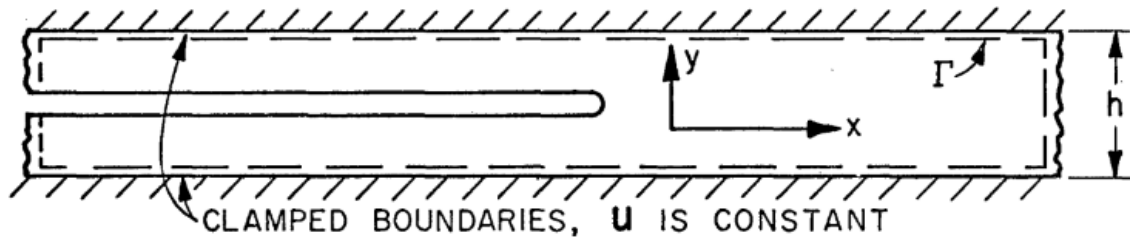
$\bar{u}$ vector desplazamiento

ds es un elemento de longitud de arco de Γ

Rice, (1967), expone dos configuraciones especiales en donde la integral J se evalúa casi por inspección, modelando una tira infinita de superficie plana de altura h , con una muesca semi-infinita y trayectoria Γ . En la presente investigación se usa la configuración con cargas aplicadas en superficies sujetas superior e inferiormente, de tal manera que el vector desplazamiento $\bar{u}$ es constante en cada frontera fija (Rice, 1967), como se muestra en la Figura 8:

Figura 8

Configuración usada en donde la integral J se evalúa casi por inspección



Fuente: Rice, (1967)

Así, no hay contribución a la integral J en la porción Γ a lo largo de las superficies sujetas, es decir, $dy = 0$ y $\frac{d\bar{u}}{dx} = 0$. También, en $x = -\infty$, $W = 0$ y $\frac{d\bar{u}}{dx} = 0$, por lo que toda la contribución se encuentra en la parte de Γ en $x = \infty$ con $\frac{d\bar{u}}{dx} = 0$ (Rice, 1967), entonces:

$$J = W_{\infty} h \dots (9)$$

donde

W_{∞} es la densidad de energía constante en $x = \infty$

Según Rice, (1967) debido a que la integral J es independiente de su trayectoria, se le puede atribuir una interpretación física en términos de energía comparando muescas de tamaño similar. Lo anterior, considerando deformaciones en el plano para un cuerpo con área transversal A' y trayectoria alrededor de la muesca Γ' , además Γ'' como una porción de Γ' en donde las tracciones establecidas no desaparecen, entonces el potencial de energía por espesor unitario se define como:

$$P = \int_{A'} W \, dx dy - \int_{\Gamma''} \bar{T} \cdot \bar{u} \, ds \dots (10)$$

Rice, (1967) supone que en la Figura 7, la esquina de la grieta se encuentra en $x = \ell$ y se denota el potencial de energía como $P(\ell)$; se compara con un cuerpo con el extremo de muesca en $x = \ell + \Delta\ell$, con la misma geometría, mismo radio de curvatura de la discontinuidad, distribución de deformaciones y/o tracciones en sus límites con potencial de energía $P(\ell + \Delta\ell)$, entonces la integral J se puede definir como:

$$J = - \lim_{\Delta\ell \rightarrow 0} \frac{P(\ell + \Delta\ell) - P(\ell)}{\Delta\ell} = - \frac{\partial P}{\partial \ell} \dots (11)$$

Es decir, la razón de decremento de potencial de energía con respecto a la longitud de la muesca bajo valores de frontera establecidos. Para la configuración mostrada en la Figura 8, el potencial de energía es igual a la energía de deformación (Rice, 1967).

CAPÍTULO 2

DISEÑO EXPERIMENTAL

Introducción

En este capítulo se explica y justifica el diseño experimental empleado para las pruebas en el concreto en estado fresco, estado endurecido y análisis de impacto ambiental de la investigación.

2.1. Diseño experimental

El experimento es exploratorio y comparativo, sus variables son cuantitativas y continuas, además la unidad experimental es el concreto hidráulico (Kuehl, 2001). Se usa el diseño factorial, pues se analizan tres factores de manera individual y simultánea (dos y tres factores) con distintos tratamientos (niveles) cada uno, ver Tabla 1 (Reyes Castañeda, 1982).

Tabla 1

Cuadro de triple entrada de diseño experimental

Diseño trifactorial

Experimento exploratorio con variables cuantitativas y continuas

Unidad experimental: Concreto hidráulico

Respuesta		Sustitución en masa de puzolana						Factor
		0%		20%		30%		Niveles
		Relación agua-cementante						Factor
		0.40	0.60	0.40	0.60	0.40	0.60	Niveles
Sustitución en masa de PET	0%	1	2	3	4	5	6	
	3%	7	8	9	10	11	12	
	7%	13	14	15	16	17	18	

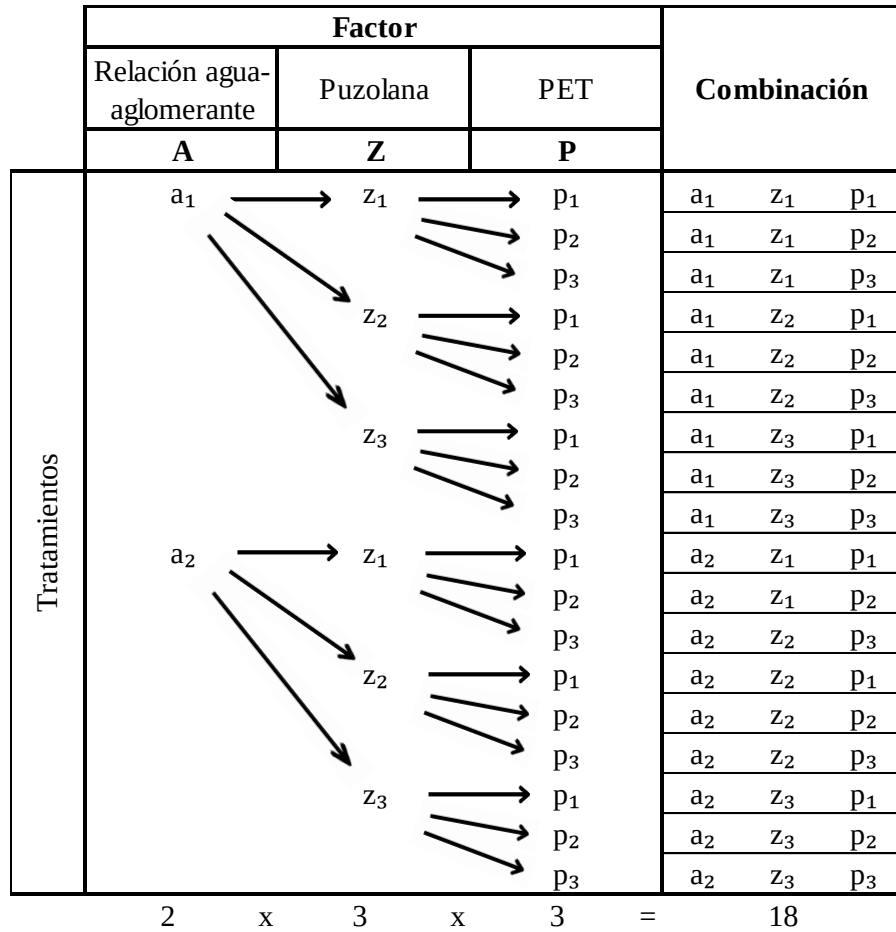
Factor Niveles
Elaboración propia.

Variable dependiente
Variable independiente
Tratamiento

Para estudiar con la misma precisión cada uno de los factores, se utiliza un arreglo combinatorio ver Tabla 2 (Reyes Castañeda, 1982).

Tabla 2

Arreglo combinatorio de tratamientos



Elaboración propia.

Se designa el número de observaciones experimentales por tratamiento para obtener una distribución normal de la muestra, así como, para mejorar la precisión de las estimaciones de las medias de los tratamientos y la potencia de las pruebas estadísticas para detectar las diferencias entre medias de grupos de tratamientos (Kuehl, 2001), usando la ecuación (12):

$$r \geq 2 \left[z_{\frac{\alpha}{2}} + z_{\beta} \right]^2 \left(\frac{CV}{\delta} \right)^2 \dots (12)$$

Elaboración propia.

2.2. Hipótesis y modelo estadístico

A continuación, se enumeran las hipótesis estadísticas para cada factor, e interacción:

Para el factor: Relación a/c (A)

Hipótesis de interés		Expresión
$H_{0A}:$	La relación a/c no presenta diferencias significativas en las propiedades mecánicas del concreto/ potencial de calentamiento global	$H_{0A}: a_1 = a_2 = 0$
$H_1:$	Al menos una es diferente	$H_1: \text{al menos una } a_i \neq 0$

Para el factor: Puzolana (Z)

Hipótesis de interés		Expresión
$H_{0Z}:$	La sustitución parcial en masa de cemento con puzolana no presenta diferencias significativas en las propiedades mecánicas del concreto/ potencial de calentamiento global	$H_{0Z}: z_1 = z_2 = z_3 = 0$
$H_1:$	Al menos una es diferente	$H_1: \text{al menos una } z_i \neq 0$

Para el factor: PET (P)

Hipótesis de interés		Expresión
H_{0P} :	La sustitución parcial en masa de agregado con PET no presenta diferencias significativas en las propiedades mecánicas del concreto/ potencial de calentamiento global	$H_{0P}: p_1 = p_2 = p_3 = 0$
H_1 :	Al menos una es diferente	$H_1: \text{al menos una } p_i \neq 0$

Para la interacción: Relación a/c - Puzolana (AZ)

Hipótesis de interés		Expresión
H_{0AZ} :	La interacción AZ no presenta diferencias significativas en las propiedades mecánicas del concreto/ potencial de calentamiento global	$H_{0AZ}: (az)_{11} = \dots = (az)_{23} = 0$
H_1 :	Al menos una es diferente	$H_1: \text{al menos una } (az)_{ij} \neq 0$

Para la interacción: Relación a/c - PET (AP)

Hipótesis de interés		Expresión
H_{0AP} :	La interacción AP no presenta diferencias significativas en las propiedades	$H_{0AP}: (ap)_{11} = \dots = (ap)_{23} = 0$

	mecánicas del concreto/ potencial de calentamiento global	
H_1 :	Al menos una es diferente	H_1 : <i>al menos una</i> $(ap)_{ik} \neq 0$

Para la interacción: Puzolana - PET (ZP)

Hipótesis de interés/ potencial de calentamiento global		Expresión
H_{0ZP} :	La interacción ZP no presenta diferencias significativas en las propiedades mecánicas del concreto	$H_{0ZP}: (zp)_{11} = \dots = (zp)_{33} = 0$
H_1 :	Al menos una es diferente	H_1 : <i>al menos una</i> $(zp)_{jk} \neq 0$

Para la interacción: Relación a/c – Puzolana - PET (AZP)

Hipótesis de interés		Expresión
H_{0AZP} :	La interacción AZP no presenta diferencias significativas en las propiedades mecánicas del concreto	$H_{0AZP}: (azp)_{111} = \dots = (azp)_{233} = 0$
H_1 :	Al menos una es diferente	H_1 : <i>al menos una</i> $(azp)_{ijk} \neq 0$

El modelo estadístico del diseño de tres factores de acuerdo con Montgomery y Runger (2003), es:

$$y_{ijkl} = \mu + A_i + Z_j + P_k + (AZ)_{ij} + (AP)_{ik} + (ZP)_{jk} + (AZP)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \dots (13)$$

donde:

y_{ijkl} observación

μ media conjunta

A_i relación a/c

Z_j puzolana

P_k PET

$(AZ)_{ij}$ interacción relación a/c, puzolana

$(AP)_{ik}$ interacción relación a/c, PET

$(ZP)_{jk}$ interacción puzolana, PET

$(AZP)_{ijk}$ interacción relación a/c, puzolana y PET

ϵ_{ijkl} error

$i = 1, 2$ niveles del factor A

$j = 1, 2, 3$ niveles del factor Z

$k = 1, 2, 3$ niveles del factor P

$l = 1, 2, 3$ repeticiones

Se analiza la existencia de diferencias significativas entre tratamientos con un Análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, y de ser aceptada la hipótesis alternativa, se realizará una prueba de significación de Tukey para ver los tratamientos cuyas medias son distintas (Reyes Castañeda, 1982).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

Introducción

En este capítulo se presentan las condiciones bajo las cuales se evaluaron las unidades experimentales, así como el análisis de las respuestas obtenidas al someterlas a los tratamientos correspondientes.

3.1. Mezclas de concreto

3.1.1. Materiales

En la presente investigación, el pellet de PET reciclado proporcionado por la empresa recicladora PETStar es un agregado fino, siendo que el porcentaje de masa retenida en la malla #8 (2.36 mm) es de 17%, y en la malla #16 (1.18 mm) el 83%, ver Anexo 1.

Figura 9

Pellet amorfo de PET proporcionado por PETStar



Fuente: Elaboración propia.

El cemento es de marca Cooperativa La Cruz Azul, S.C.L. tipo CPC, fabricado en la planta de Puebla, cumple con la NMX-C-414-ONNCCE-2017 (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE], 2017). La puzolana es de tipo N usada como cementante suplementario con un tamaño máximo de 45 μm de acuerdo con proveedor.

La grava es una mezcla de mármol natural (aristas boleadas) y triturado (aristas angulares), la arena es natural, sus características físicas para el diseño de las mezclas de concreto se encuentran en los Anexos 1 y 2.

3.1.2. Concreto en estado fresco

Para los tratamientos de control de cada relación agua cemento se fijó un revenimiento de 150 mm correspondiente a elementos estructurales (trabes y columnas) para brindar funcionalidad en estado fresco. Las dosificaciones por m^3 de concreto realizadas de acuerdo con la norma ACI 211.1-91, (American Concrete Institute [ACI], 2002) para todos los tratamientos, ver Anexo 3.

Figura 10

Prueba de revenimiento de UE 18 Tratamiento 4



Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron las pruebas de peso volumétrico, revenimiento según la NMX-C-156-ONNCCE-2010 (ONNCCE, 2010) ver Figura 10 y contenido de aire con método de presión con un medidor de aire tipo B de acuerdo con la NMX-C-157-ONNCCE-2006 (ONNCCE, 2006). Los especímenes fueron elaborados y curados según la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016 (ONNCCE, 2016).

3.1.3. Concreto en estado endurecido

Las pruebas en estado endurecido descritas a continuación se realizaron a edad de 28 días para todos los tratamientos.

Para obtener la clasificación cualitativa de la condición del concreto de acuerdo con la velocidad de onda de pulso ultrasónico obtenida (ver Tabla 4) se usó el equipo V-Meter Mark III de James Instruments Inc. con transductores cuya frecuencia de pulso es de 54 kHz, ver Figura 11. La prueba se realizó como indica la norma ASTM C597-09 (American Society for Testing and Materials International [ASTM], 2009)

Figura 11

Prueba de velocidad de pulso ultrasónico



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4

Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica

CONDICIÓN GENERAL	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)
Excelente	> 4575
Bueno	$3660 < v < 4575$
Cuestionable	$3050 < v < 3660$
Pobre	$2125 < v < 3050$
Muy Pobre	< 2125

Fuente: Vidaud & Vidaud, (2016)

La resistencia a compresión simple f'_c se realizó de acuerdo con la NMX-C-083-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014), así mismo, se usaron anillos metálicos y extensómetros para obtener las curvas esfuerzo-deformación de cada espécimen, ver Figura 12, de las cuales, se obtiene el valor de la Integral J (ver Anexo 5).

Figura 12

Prueba de compresión simple a espécimen #1 de UE 10 Tratamiento 16



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtuvieron la absorción después de inmersión, absorción después de inmersión y ebullición, densidad seca global, densidad global después de inmersión, densidad global después de inmersión y ebullición, densidad aparente, así como, volumen de vacíos (poros permeables) de todas las unidades experimentales ver Figura 13, según la norma ASTM C642-06 (ASTM, 2006).

Todas las respuestas promedio por tratamiento se encuentran en el Anexo 4.

Figura 13

Secado en horno de especímenes probados para prueba ASTM C 642-06



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14

Especímenes probados



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Evaluación de impacto ambiental con metodología de Análisis de Ciclo de Vida

3.2.1. Unidad funcional y alcances

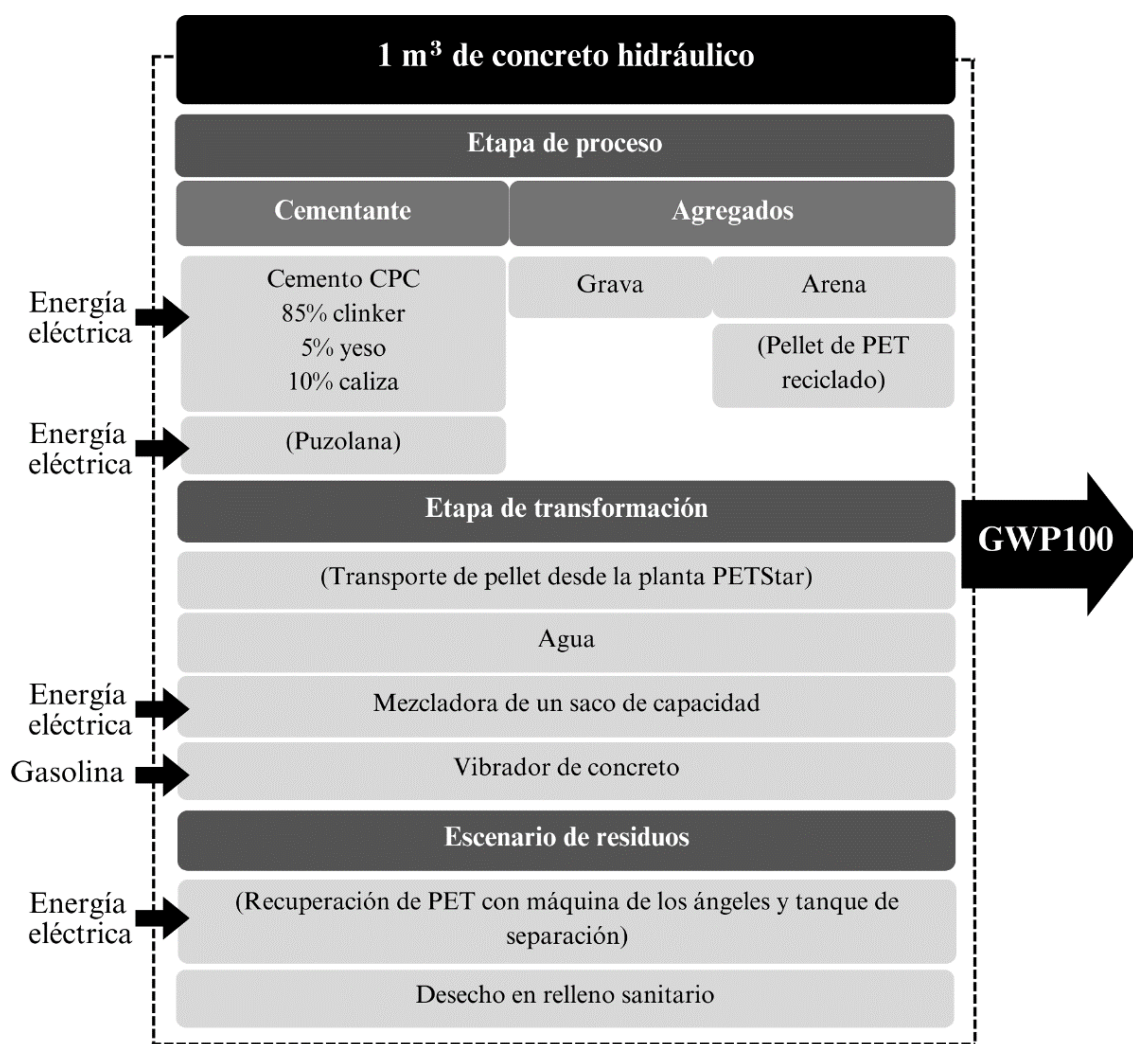
La evaluación de impacto ambiental se realiza con el método del IPCC 2021 GWP100 V1.02, para obtener la acumulación de forzamiento radiativo en 100 años de los GEI en el ciclo de vida (desde la extracción de materias primas hasta su disposición final). Lo anterior para distintos tratamientos a los que se sometió a las unidades experimentales, con unidad funcional de 1 m³ de concreto hidráulico en la región de Toluca, Estado de México, México.

Se analizan las etapas de proceso, transformación y escenario de residuos; los cálculos usan las dosificaciones en masa de los 18 tratamientos expuestos en la Tabla 1 del Capítulo 2, con el software SimaPro versión 9.5.0.1 PhD y bases de datos de EcoInvent versión 3.9.1 data as system processes (results).

Los límites de los sistemas se muestran en la Figura 9, se supone concreto elaborado in situ, los materiales y actividades entre paréntesis pueden o no tomarse en cuenta, de acuerdo con el tratamiento evaluado.

Figura 15

Límites del sistema para 1 m³ de concreto hidráulico



Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Inventario

3.2.2.1. Proceso

En esta etapa se toman como entradas los materiales de grava, arena, pellet amorfo de PET reciclado, cemento Portland compuesto (CPC) y pumicita como puzolana tipo N según corresponda el tratamiento, ver Tabla 5. Se describen las características de cada uno a continuación:

Tabla 5

Etapa de proceso para 1 m³ de concreto hidráulico

MATERIAL Entradas/Salidas

PRODUCTOS		
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Unidad
Concreto puzolánico con PET como sustituto parcial de arena, materiales {MX}	1	m ³
ENTRADAS		
Entradas conocidas a la tecnósfera (materiales/combustibles)	Unidad	
Clinker		
<i>Clinker {RoW} market for clinker Cut-off, S</i>	kg	
Yeso		
<i>Gypsum, mineral {RoW} market for gypsum, mineral Cut-off, S</i>	kg	
Caliza		
<i>Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed Cut-off, S</i>	kg	
Pumicita		
<i>Pumice {GLO} market for pumice Cut-off, S</i>	kg	
Grava		
<i>Gravel, crushed {RoW} market for gravel, crushed Cut-off, S</i>	kg	
Arena		
<i>Sand {RoW} market for sand Cut-off, S</i>	kg	
Entradas conocidas a la tecnósfera (electricidad/calor)	Unidad	
Electricidad para fabricación de cemento		
<i>Electricity, medium voltage {MX} market for Cut-off, S</i>	kWh	
Electricidad para molienda de puzolana		
<i>Electricity, high voltage {MX} market for Cut-off, S</i>	kWh	

Fuente: Elaboración propia.

Para el pellet reciclado se usa el análisis de emisión de CO₂e por tonelada de pellet reciclado proporcionado por PETStar, el desglose de su informe de sustentabilidad incluye

transporte de recolección, proceso de plantas de acopio, transporte de pacas a plantas de reciclado, créditos por otras pacas, proceso planta reciclado, créditos por poliolefina y otros, energía eólica, créditos por energía eólica, cogeneración, créditos por cogeneración de energía y créditos por cogeneración calor recuperado (PETStar, 2016), desde el 2020, su huella de carbono es neutra (PETStar, 2021) y se encuentra a 20 km del centro de Toluca.

Para analizar el cemento CPC se supone un 5% de yeso y 10% de caliza (PCA America's Cement Manufacturers & ASTM International, 2021), además, actualmente el cemento en México tiene un 85% de clinker, (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2018), estando así, dentro de los parámetros marcados por la NMX-C-414-ONNCCE-2017 (ONNCCE, 2017). La Agencia de Energía Internacional (IEA), (2018), reporta el uso de 99 kWh de electricidad para la producción de una tonelada de cemento para el área de América Latina.

La puzolana proviene de Yacimientos y Derivados S.A. de C.V.; donde se extrae la piedra pómez y se muele con maquinaria que usa energía eléctrica con rendimiento de 250 toneladas semanales y un consumo de 20,154 kWh intermedios mensuales, de acuerdo con los datos proporcionados por la empresa.

Las bases de datos usadas corresponden a arena, agua potable, grava triturada, yeso, caliza triturada y limpia, piedra pómez y clinker; de acuerdo con EcoInvent, (2021), los datos de la categoría “market for” conectan a los proveedores con los consumidores agrupando los productores e importaciones relevantes del producto en una misma área geográfica, toma en cuenta el transporte a los consumidores y desperdicios significativos en los procesos; para el clinker, considera una temperatura máxima de calcinación de 1450 °C, por lo que la energía térmica ya está incluida en el DataSet correspondiente.

De acuerdo con los diagramas de árbol, ver Anexo 6, esta etapa representa entre el 87.77%-94.71% del índice de potencial de calentamiento global total. Además, las flechas rojas de mayor espesor indican que el clinker es el principal contribuyente a las emisiones.

3.2.2.2.Transformación

En esta etapa (mezcla de concreto y puesta en obra), se analiza un vibrador para concreto de gasolina de 6.5 HP y una mezcladora de concreto de un saco de capacidad.

Tabla 6

Etapas de transformación para 1 m³ de concreto hidráulico

TRANSFORMACIONES Entradas/Salidas

PRODUCTOS		
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Unidad
Concreto puzolánico con PET, mezcla y puesta en obra {MX}	1	m ³
ENTRADAS		
Entradas conocidas a la tecnósfera (materiales/combustibles)	Unidad	
Transporte de pellet <i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 Cut-off, S</i>	tkm	
Agua potable <i>Tap water {RoW} market for Cut-off, S</i>	kg	
Entradas conocidas a la tecnósfera (electricidad/calor)	Unidad	
Mezcladora de concreto un saco de capacidad <i>Electricity, low voltage {MX} market for Cut-off, S</i>	kWh	
Vibrador para concreto <i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for diesel, burned in building machine Cut-off, S</i>	MJ	

Fuente: Elaboración propia.

El vibrador de gasolina de concreto tiene un rendimiento de 0.5 l/m³ para elementos estructurales, el poder calorífico de la gasolina según la Secretaría de Energía [SENER] y la

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE], (2022) es de 5.269 MJ/barril, y en un barril hay 159 litros de gasolina.

La mezcladora de concreto consume 373 Watts, voltaje de 110-120V y rendimiento de 5m³/hora, referencia obtenida del equipo del laboratorio de materiales “Javier Barros Sierra” de la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx.

Debido a que la puesta en obra se considera en Toluca, únicamente se analiza el transporte de pellet desde PETStar, trayecto de 20 km, ver Tabla 6.

Según los diagramas de árbol, ver Anexo 6, la etapa de transformación contribuye al índice de potencial de calentamiento global total entre 0.07%-0.24%.

3.2.2.3. Escenario de residuos

Finalmente, para el escenario de residuos, se propone un proceso que consta en la separación de pellet y del concreto usando la máquina de los ángeles, así como, un tanque de separación sedimentación-flotación, tal que, el plástico sea reciclado y/o puesto a disposición para otro uso según aplique en el tratamiento analizado, y el concreto se desecha en un relleno sanitario.

La máquina de los ángeles usa 750 Watts de electricidad, voltaje de 110-120V y rendimiento de 0.1667 m³/hora, referencia obtenida del equipo del laboratorio de materiales “Javier Barros Sierra” de la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx.

El tanque de separación flotación-sedimentación consume en promedio 1.3 kW de electricidad total y su rendimiento es de aproximadamente 1 m³/hora para el modelo con dimensiones de tanque de separación de 2000 x 800 mm, lo anterior, de acuerdo con la ficha técnica de Herbold Meckesheim, (2013), ver Tabla 7.

Tabla 7

Escenario de residuos para 1 m³ de concreto hidráulico

ESCENARIO DE RESIDUOS Entradas/Salidas

PRODUCTOS		
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Unidad
Concreto puzolánico con PET, residuo {MX}	1	m³
ENTRADAS		
Entradas conocidas a la tecnósfera (electricidad/calor)	Unidad	
Máquina de los ángeles <i>Electricity, low voltage {MX} market for Cut-off, S</i>	kWh	
Tanque de separación sedimentación-flotación <i>Electricity, low voltage {MX} market for Cut-off, S</i>	kWh	
SALIDAS		
Materiales y/o tipos de residuo separados del flujo de residuos	Porcentaje	
PET <i>PET (waste treatment) {GLO} recycling of PET Cut-off, S</i>		
Flujos de residuo remanentes después de separación	Porcentaje	
Concreto <i>Waste concrete, not reinforced {RoW} market for waste concrete, not reinforced Cut-off, S</i>		
Fuente: Elaboración propia.		

Fuente: Elaboración propia.

Los diagramas de árbol del Anexo 6, señalan que la etapa de escenario de residuos genera entre el 5.23% y 12.06% del potencial de calentamiento global total.

3.3. Resultados de hipótesis estadísticas

En las respuestas obtenidas no hubo un coeficiente de variación mayor al 20% entre réplicas de un mismo tratamiento, siendo en su mayoría menores a 15%, tal que tienen una distribución normal y por tanto se pudo realizar el ANOVA. Se presentan el valor p para un nivel de significancia de 0.05 de cada respuesta con sus correspondientes efectos principales e interacciones, también, para cada factor se realizó la prueba de Tukey para distinguir las medias que son significativamente diferentes entre sí. Lo anterior, con el

programa MiniTab 2018. Los efectos, interacciones y diferencias entre medias significativas se resaltan de negro y fuente blanca.

Las gráficas de efectos estandarizados de Pareto, efectos principales, e interacciones, así como las ecuaciones de regresión lineal con su coeficiente de determinación, para cada respuesta se encuentran en Anexo 7.

Se colocan también los casos particulares de los índices GWP que fueron obtenidos mediante un programa computacional, tal que, se tiene una sola réplica. Igualmente, para el revenimiento y contenido de aire se realizó una sola prueba por tratamiento con una muestra significativa de la mezcla de concreto tomada mediante cuarteo.

3.3.1. Índice de potencial de calentamiento global (GWP)

La relación agua cemento disminuyó significativamente la huella de carbono en un 35.06%, ver Tabla 9; al sustituir 20% de cemento en masa por puzolana hay una disminución del 17.15% y de 25.72% con un 30% de sustitución, ambos con respecto al concreto convencional (sin puzolana) ver Tabla 10. El uso de PET no afecta significativamente, ver Tabla 11.

Tabla 8

Valor p de efectos principales e interacciones para GWP total

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$		
Índice de	a/c	Puzolana	PET
potencial de			
calentamiento	0.0000	0.0000	0.5510
global (GWP)			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9*Prueba de Tukey para a/c de GWP total con una confianza de 95%*

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.4	36	467.4	0.6 - 0.4	-163.7	(-187.4; -140.1)	0.000
0.6	36	303.67				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10*Prueba de Tukey %Puzolana de GWP total con una confianza de 95%*

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	449.8	20 - 0	-77.1	(-135.6; -18.6)	0.007
20	24	372.7	30 - 0	-115.7	(-174.2; -57.2)	0.000
30	24	334.1	30 - 20	-38.6	(-97.1; 20.0)	0.261

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11*Prueba de Tukey %PET de GWP total con una confianza de 95%*

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
3	24	387.0	3 - 0	3.7	(-63.9; 71.4)	0.990
7	24	386.4	7 - 0	3.2	(-64.5; 70.8)	0.993
0	24	383.2	7 - 3	-0.6	(-68.2; 67.1)	1.000

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Resistencia a compresión simple

En concordancia con el modelo de Powers, al aumentar la relación a/c la resistencia disminuye, en este caso 127.10 kg/cm^2 , es decir, un 43.47%, ver Tabla 13. Además, un 30% puzolana, reduce la resistencia 84.4 kg/cm^2 en comparación de un concreto convencional, ver Tabla 14.

En este caso, la Tabla 12 nos indica que el uso de PET como sustituto de arena, presenta diferencias significativas en la resistencia del concreto, sin embargo, la prueba de Tukey presenta lo contrario, siendo que para una sustitución de arena por PET de 3% disminuye 8.20% o 19.8 kg/cm^2 ; un 7% de PET disminuye 16.5 kg/cm^2 ambos respecto al concreto sin pellet, ver Tabla 15. Se considera significativa la diferencia de medias de 3%-0%, ya que, supera la variabilidad permitida de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México (Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda [SEDUVI] & Secretaría de Obras y Servicios [SOBSE], 2017) para concreto clase 2 $f_c' \geq 200 \text{ kg/cm}^2$:

Para el concreto clase 2, se admitirá que la resistencia del concreto cumple con la resistencia especificada, f_c' , si ninguna muestra da una resistencia inferior a $f_c' - 50 \text{ kg/cm}^2$, y, además, si ningún promedio de resistencias de todos los conjuntos de tres muestras consecutivas, pertenecientes o no al mismo día de colado, es menor que $f_c' - 17 \text{ kg/cm}^2$. (p. 535)

Tabla 12

Valor p de efectos principales e interacciones para f'c

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
f'c	0.0000	0.0000	0.00002	0.6140
	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
	0.0347	0.0681	0.0044	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13

Prueba de Tukey para a/c de f'c con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.4	36	292.37	0.6 - 0.4	-127.10	(-145.65; -108.55)	0.000
0.6	36	165.27				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Prueba de Tukey para %Puzolana de f'c con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	271.5	20 - 0	-43.5	(-90.2; 3.2)	0.073
20	24	228.0	30 - 0	-84.4	(-131.1; -37.7)	0.000
30	24	187.0	30 - 20	-40.9	(-87.6; 5.8)	0.097

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15

Prueba de Tukey para %PET de $f'c$ con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	240.9	3 - 0	-19.8	(-72.1; 32.6)	0.639
7	24	224.4	7 - 0	-16.5	(-68.8; 35.9)	0.732
3	24	221.1	7 - 3	3.3	(-49.0; 55.6)	0.987

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Energía de Integral J

La energía de la integral J se vio disminuida 55.72% (3.295 J/cm²) al aumentar la relación agua cemento (ver Tabla 16), en la diferencia de niveles de 30%-0% fue de un decremento de 1.961 J/cm² (23.87%), ver Tabla 17. Aunque la Tabla 16 del ANOVA trifactorial indica diferencias significativas entre medias para el PET, sin embargo, se toma en cuenta la prueba de Tukey, la cual indica que el PET no presenta diferencias significativas en ningún nivel (ver Tabla 18).

Tabla 16

Valor p de efectos principales e interacciones para Integral J

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
Energía de	0.0000	0.0000	0.0041	0.0001
Integral J	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
	0.0000	0.0024	0.0000	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17

Prueba de Tukey para a/c de Integral J con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.4	36	5.914	0.6 - 0.4	-3.295	(-4.029; -2.561)	0.000
0.6	36	2.619				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18

Prueba de Tukey para %Puzolana de Integral J con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	5.345	20 - 0	-1.276	(-2.763; 0.212)	0.107
20	24	4.069	30 - 0	-1.961	(-3.448; -0.473)	0.007
30	24	3.384	30 - 20	-0.685	(-2.172; 0.802)	0.515

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19

Prueba de Tukey para %PET de Integral J con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	4.621	3 - 0	-0.300	(-1.879; 1.278)	0.892
3	24	4.320	7 - 0	-0.763	(-2.342; 0.816)	0.482
7	24	3.857	7 - 3	-0.463	(-2.042; 1.116)	0.763

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. GWP fossil

La relación agua cemento y contenido de puzolana presentan diferencias significativas en el índice de potencial de calentamiento global fósil, ya que a menor relación agua-cemento, hay un mayor uso de cemento aumentando la huella de carbono fósil, y ésta se mitiga con la sustitución de cemento por puzolana ver Tabla 20. Así, según las pruebas de Tukey para cada factor, al aumentar la relación a/c, la respuesta disminuyó 163.6 kg CO₂e/m³ (35.03%), para la diferencia de niveles de puzolana de 20%-0% el GWP fossil decrece 17.16% (77.1 kg CO₂e/m³) y 25.72% (115.6 kg CO₂e/m³) para el nivel 30%-0%, ver Tabla 22. El uso de pellet de PET no contribuye significativamente en esta categoría.

Tabla 20

Valor p de efectos principales e interacciones para GWP fossil

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$		
GWP fossil	a/c	Puzolana	PET
	0.0000	0.0000	0.5504

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21

Prueba de Tukey para a/c de GWP fossil con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.4	36	466.9	0.6 - 0.4	-163.6	(-187.2; -140.0)	0.000
0.6	36	303.35				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22

Prueba de Tukey para % Puzolana de GWP fossil con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	449.4	20 - 0	-77.1	(-135.5; -18.6)	0.007
20	24	372.3	30 - 0	-115.6	(-174.1; -57.1)	0.000
30	24	333.8	30 - 20	-38.5	(-97.0; 19.9)	0.261

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23

Prueba de Tukey para % PET de GWP fossil con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
3	24	386.6	3 - 0	3.7	(-63.9; 71.3)	0.990
7	24	386.0	7 - 0	3.2	(-64.4; 70.8)	0.993
0	24	382.9	7 - 3	-0.6	(-68.2; 67.1)	1.000

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. GWP land transformation

La relación agua cemento y contenido de puzolana presentan diferencias significativas en el índice de potencial de calentamiento global por transformación de terreno, ya que contribuyen a disminuirlo, mientras que el uso de PET no afecta significativamente, ver Tabla 24. De acuerdo con las pruebas de Tukey, al aumentar la relación agua-cemento, la respuesta disminuyó 36.03% (0.12504 kg CO₂e/m³); en cuanto a

las puzolana, en los niveles 20%-0% decrece 17.96% (0.060 kg CO₂e/m³) y para 30%-0%, un 26.92% (0.0901 kg CO₂e/m³).

Tabla 24

Valor p de efectos principales e interacciones para GWP land transformation

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$		
GWP land transformation	a/c	Puzolana	PET
	0.0000	0.0000	0.9882

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25

Prueba de Tukey para a/c de GWP land transformation con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.4	36	0.34705	0.6 – 0.4	-0.12504	(-0.14345; -0.10663)	0.000
0.6	36	0.22200				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26

Prueba de Tukey para %Puzolana de GWP land transformation con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	0.3346	20 – 0	-0.0600	(-0.1047; -0.0153)	0.005
20	24	0.2745	30 – 0	-0.0901	(-0.1348; -0.0454)	0.000
30	24	0.2445	30 – 20	-0.0300	(-0.0747; 0.0147)	0.248

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27

Prueba de Tukey para %PET de GWP land transformation con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
3	24	0.2848	3 – 0	0.0004	(-0.0515; 0.0523)	1.000
7	24	0.2844	7 – 0	0.0001	(-0.0519; 0.0520)	1.000
0	24	0.2844	7 – 3	-0.0004	(-0.0523; 0.0516)	1.000

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.6. GWP biogenic

Todos los efectos principales presentan diferencias significativas en el índice de potencial de calentamiento global biogénico contribuyendo a su disminución de acuerdo con el ANOVA trifactorial, ver Tabla 28. Para la prueba de Tukey se obtiene que la relación agua-cemento reduce el GWP biogenic 0.016107 kg CO₂e/m³ o un 14.65% (ver Tabla 29), mientras que los niveles de contenido de puzolana de 20%-0% un 6% (0.00644 kg CO₂e/m³) y 30%-0% un 9.02% (0.00967 kg CO₂e/m³), ver Tabla 30. El pellet de PET no es significativo para la respuesta, ver Tabla 31.

Tabla 28

Valor p de efectos principales e interacciones para GWP biogenic

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$		
	a/c	Puzolana	PET
GWP biogenic	0.000	0.000	0.0105

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29

Prueba de Tukey para a/c de GWP biogenic con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.4	36	0.109914	0.6 - 0.4	-0.016107	(-0.018091; -0.014122)	0.000
0.6	36	0.093807				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30

Prueba de Tukey para %Puzolana de GWP biogenic con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	0.10723	20 - 0	-0.00644	(-0.01219; -0.00070)	0.024
20	24	0.10079	30 - 0	-0.00967	(-0.01541; -0.00392)	0.000
30	24	0.09756	30 - 20	-0.00322	(-0.00897; 0.00252)	0.376

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31

Prueba de Tukey para %PET de GWP biogenic con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	0.10221	3 - 0	-0.00016	(-0.00656; 0.00625)	0.998
3	24	0.10205	7 - 0	-0.00090	(-0.00730; 0.00551)	0.940
7	24	0.10131	7 - 3	-0.00074	(-0.00714; 0.00566)	0.959

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia

3.3.7. Revenimiento

La relación agua cemento y contenido de puzolana presentan diferencias significativas en el revenimiento, ya que contribuyen a disminuir el revenimiento, es decir el concreto es menos trabajable, ver Tabla 32. Según la prueba de Tukey la relación agua cemento presenta cambios significativos en la respuesta, pues al aumentar el revenimiento aumenta 1.944 cm, sin embargo, recordando que el diseño de los controles de concreto es para un revenimiento de 15 cm y de acuerdo con la NMX-C-156-ONNCCE-2010 (ONNCCE, 2010) hay un tolerancia de ± 3.5 cm para un revenimiento nominal mayor a 10 cm, por lo que las únicas diferencias significativas son para los niveles de puzolana de 20%-0% reduce 5.417 cm el revenimiento y el nivel 30%-0% 7.75cm, ver Tabla 34.

Tabla 32

Valor p de efectos principales e interacciones para revenimiento

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$		
Revenimiento	a/c	Puzolana	PET
	0.0001	0.0000	0.2573

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33

Prueba de Tukey para a/c del revenimiento con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.6	36	13.167	0.6 - 0.4	1.944	(0.145; 3.744)	0.035
0.4	36	11.222				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34

Prueba de Tukey para %Puzolana del revenimiento con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	16.583	20 - 0	-5.417	(-6.943; -3.891)	0.000
20	24	11.167	30 - 0	-7.750	(-9.276; -6.224)	0.000
30	24	8.833	30 - 20	-2.333	(-3.859; -0.807)	0.001

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35

Prueba de Tukey para %PET del revenimiento con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	12.583	3 - 0	-0.25	(-2.99; 2.49)	0.974
3	24	12.333	7 - 0	-0.92	(-3.66; 1.83)	0.703
7	24	11.667	7 - 3	-0.67	(-3.41; 2.08)	0.830

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia

3.3.8. Contenido de aire

El contenido de puzolana y pellet de PET presentan diferencias significativas en el contenido de aire en el concreto, ver Tabla 36. Las diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey de niveles de puzolana de 0%-20% aumentó el porcentaje de contenido de aire 0.475%, y 30%-20% lo disminuyó 0.417%, ver Tabla 38. El Pellet de PET redujo 0.417% en el nivel 7%-3%, ver Tabla 39.

Tabla 36

Valor p de efectos principales e interacciones para GWP total

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$		
	a/c	Puzolana	PET
Contenido de aire	0.1427	0.0000	0.0002

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37

Prueba de Tukey para a/c del contenido de aire con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.4	36	2.1944	0.6 - 0.4	-0.117	(-0.317; 0.083)	0.249
0.6	36	2.0778				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 38

Prueba de Tukey para %Puzolana del contenido de aire con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
20	24	2.433	20 - 0	0.475	(0.216; 0.734)	0.000
30	24	2.0167	30 - 0	0.058	(-0.201; 0.318)	0.852
0	24	1.9583	30 - 20	-0.417	(-0.676; -0.157)	0.001

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39

Prueba de Tukey para %PET del contenido de aire con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
3	24	2.333	3 - 0	0.175	(-0.099; 0.449)	0.283
0	24	2.1583	7 - 0	-0.242	(-0.516; 0.032)	0.094
7	24	1.9167	7 - 3	-0.417	(-0.691; -0.143)	0.001

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.9. Peso volumétrico en estado fresco

El contenido de pellet e interacción a/c*Puzolana*PET presentan diferencias significativas en peso volumétrico en estado fresco disminuyéndolo, ver Tabla 40. La prueba de Tukey indica que la diferencia significativa de niveles de PET de 3%-0% reduce el peso volumétrico 25.33 kg/m³ (1.09%) y el nivel 7%-0% un 39.92 kg/m³ (1.72%), ver Tabla 43.

Tabla 40

Valor p de efectos principales e interacciones para peso vol. en estado fresco

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
Peso vol. en estado fresco	0.0794	0.6081	0.0000	0.4258
	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
	0.5059	0.1313	0.0165	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41

Prueba de Tukey para a/c del peso vol. fresco con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.6	36	2307.22	0.6 - 0.4	9.28	(-4.23; 22.80)	0.175
0.4	36	2297.93				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42

Prueba de Tukey para %Puzolana del peso vol. fresco con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	2305.09	20 - 0	-6.10	(-26.32; 14.12)	0.751
30	24	2303.64	30 - 0	-1.46	(-21.68; 18.76)	0.984
20	24	2298.99	30 - 20	4.64	(-15.58; 24.86)	0.847

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43

Prueba de Tukey para %PET del peso vol. fresco con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	2324.33	3 - 0	-25.33	(-41.96; -8.71)	0.001
3	24	2298.99	7 - 0	-39.92	(-56.54; -23.30)	0.000
7	24	2284.40	7 - 3	-14.59	(-31.21; 2.03)	0.096

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.10. Peso vol. en estado endurecido

La relación agua cemento, contenido de puzolana, pellet e interacción Puzolana*PET presentan diferencias significativas en el peso volumétrico en estado endurecido, ver Tabla 44. Según la Prueba de Tukey, a mayor relación agua-cemento el peso volumétrico en estado endurecido aumenta 13.67 kg/m³, ver Tabla 45. Para la diferencia de niveles de contenido de puzolana de 30%-0% la respuesta decrece 21.36 kg/m³ (0.93%), ver Tabla 46; en cuanto al contenido de PET como sustituto de arena, en el nivel 7%-0% disminuye la respuesta 28.56 kg/m³ (1.24%) y 3%-7% un 19.68 kg/m³ (0.86%), ver Tabla 47.

Tabla 44

Valor p de efectos principales e interacciones para peso vol. en estado endurecido

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha= 0.05$			
Peso vol. en estado endurecido	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
	0.0000	0.0000	0.0000	0.1067
	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
	0.9822	0.0002	0.2985	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45

Prueba de Tukey para a/c del peso vol. endurecido con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.6	36	2290.65	0.6 - 0.4	13.67	(4.37; 22.98)	0.005
0.4	36	2276.98				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46

Prueba de Tukey para %Puzolana del peso vol. endurecido con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	2294.88	20 - 0	-11.83	(-25.07; 1.42)	0.089
20	24	2283.05	30 - 0	-21.36	(-34.60; -8.12)	0.001
30	24	2273.52	30 - 20	-9.54	(-22.78; 3.71)	0.203

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47

Prueba de Tukey para %PET del peso vol. endurecido con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	2296.30	3 - 0	-8.88	(-20.81; 3.05)	0.183
3	24	2287.42	7 - 0	-28.56	(-40.49; -16.63)	0.000
7	24	2267.73	7 - 3	-19.68	(-31.61; -7.75)	0.001

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.11. Velocidad de ultrasonido

Todos los efectos e interacciones, exceptuando a la interacción a/c*Puzolana*PET, contribuyen a disminuir la velocidad de pulso (ver Tabla 48), de acuerdo con la clasificación de la Tabla 4, la condición general de todos los especímenes es buena. Las pruebas de Tukey indican que el PET no tiene un efecto significativo en la respuesta; al aumentar la relación agua-cemento la velocidad de pulso se redujo 118.5 m/s (2.9%), ver Tabla 49; en la diferencia de niveles de % de puzolana de 30%-0% , disminuye 94.5 m/s (2.33%), ver Tabla 50.

Tabla 48

Valor p de efectos principales e interacciones para velocidad de ultrasonido

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
Velocidad de ultrasonido	0.0000	0.0000	0.0172	0.0082
	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
	0.0102	0.0066	0.0978	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 49

Prueba de Tukey para a/c de velocidad de ultrasonido con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.4	36	4084.6	0.6 - 0.4	-118.5	(-156.2; -80.8)	0.000
0.6	36	3966.1				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50

Prueba de Tukey para %Puzolana de velocidad de ultrasonido con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	4068.8	20 - 0	-35.7	(-99.9; 28.4)	0.381
20	24	4033.0	30 - 0	-94.5	(-158.7; -30.4)	0.002
30	24	3974.2	30 - 20	-58.8	(-123.0; 5.4)	0.079

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 51

Prueba de Tukey para %PET de velocidad de ultrasonido con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	4048.2	3 - 0	-20.8	(-89.2; 47.7)	0.748
3	24	4027.5	7 - 0	-48.0	(-116.4; 20.5)	0.220
7	24	4000.3	7 - 3	-27.2	(-95.7; 41.2)	0.609

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.12. Absorción después de inmersión

Se acepta la hipótesis nula, ningún efecto e interacción son significativos en la absorción después de inmersión para el ANOVA trifactorial (ver Tabla 52), ni en las pruebas de Tukey de cada factor, ver Tabla 53, Tabla 54 y Tabla 55.

Tabla 52

Valor p de efectos principales e interacciones para absorción después de inmersión

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
	0.7681	0.2459	0.0613	0.5724
	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
Absorción después de inmersión	0.8790	0.2849	0.3923	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 53

Prueba de Tukey para a/c de absorción después de inmersión con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.6	36	0.07918	0.6 - 0.4	0.00071	(-0.00418; 0.00560)	0.773
0.4	36	0.07847				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 54

Prueba de Tukey para %Puzolana de absorción después de inmersión con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
20	24	0.08152	20 - 0	0.00490	(-0.00222; 0.01201)	0.232
30	24	0.07831	30 - 0	0.00168	(-0.00544; 0.00879)	0.839
0	24	0.07663	30 - 20	-0.00322	(-0.01033; 0.00390)	0.527

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 55

Prueba de Tukey para %PET de absorción después de inmersión con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
7	24	0.08281	3 - 0	-0.00165	(-0.00862; 0.00531)	0.837
0	24	0.07765	7 - 0	0.00516	(-0.00180; 0.01212)	0.185
3	24	0.07600	7 - 3	0.00682	(-0.00015; 0.01378)	0.056

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.13. Absorción después de inmersión y ebullición

Se acepta la hipótesis nula, ningún efecto e interacción son significativos en la absorción después de inmersión y ebullición para el ANOVA trifactorial (ver Tabla 56), ni en las pruebas de Tukey de cada factor, ver Tabla 57, Tabla 58 y Tabla 59.

Tabla 56

Valor p de efectos principales e interacciones para absorción después de inmersión y ebullición

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
Absorción	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
después de	0.9266	0.2236	0.0736	0.6797
inmersión y	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
ebullición	0.5190	0.2825	0.2943	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 57

Prueba de Tukey para a/c de absorción después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.4	36	0.08260	0.6 - 0.4	-0.00022	(-0.00517; 0.00472)	0.929
0.6	36	0.08237				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58

Prueba de Tukey para %Puzolana de absorción después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
20	24	0.08476	20 - 0	0.00507	(-0.00211; 0.01225)	0.215
30	24	0.08301	30 - 0	0.00332	(-0.00386; 0.01050)	0.512
0	24	0.07969	30 - 20	-0.00175	(-0.00893; 0.00543)	0.829

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 59

Prueba de Tukey para %PET de absorción después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
7	24	0.08582	3 - 0	-0.00373	(-0.01079; 0.00333)	0.419
0	24	0.08268	7 - 0	0.00313	(-0.00393; 0.01019)	0.540
3	24	0.07895	7 - 3	0.00686	(-0.00020; 0.01392)	0.058

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.14. Densidad seca global

El contenido de pellet de PET presenta diferencias significativas disminuyendo la densidad seca global, ver Tabla 60. La prueba de Tukey indica que la diferencia de niveles de 7%-0% reduce la respuesta 0.0394 g/cm³ (1.86%) y 7%-3% un 2.02% o 0.0429 g/cm³, ver Tabla 63.

Tabla 60

Valor p de efectos principales e interacciones para densidad seca global

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
Densidad	0.2881	0.0757	0.0069	0.9067
seca global	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
	0.5952	0.2556	0.4534	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 61

Prueba de Tukey para a/c de densidad seca global con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.6	36	2.1182	0.6 - 0.4	0.0126	(-0.0126; 0.0378)	0.321
0.4	36	2.10563				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 62

Prueba de Tukey para %Puzolana de densidad seca global con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	2.1304	20 - 0	-0.0328	(-0.0691; 0.0036)	0.086
30	24	2.10781	30 - 0	-0.0226	(-0.0589; 0.0138)	0.303
20	24	2.09762	30 - 20	0.0102	(-0.0262; 0.0466)	0.781

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 63

Prueba de Tukey para %PET de densidad seca global con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
3	24	2.12743	3 - 0	0.0036	(-0.0315; 0.0386)	0.968
0	24	2.1239	7 - 0	-0.0394	(-0.0744; -0.0043)	0.024
7	24	2.0845	7 - 3	-0.0429	(-0.0780; -0.0079)	0.012

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.15. Densidad global después de inmersión

El contenido de puzolana y PET presentan diferencias significativas en la densidad global después de inmersión, ver Tabla 64. Según las pruebas de Duncan de cada factor, la diferencia de niveles de contenido de puzolana 20%-0% decrece 0.0247 g/cm³ (ver Tabla 66), mientras que el nivel de contenido de PET de 7%-0% disminuye 1.39% o 0.0317 g/cm³, así como, el nivel 7%-3% un 1.40% o 0.321 g/cm³, ver Tabla 67. La relación a/c no presenta diferencias significativas, ver Tabla 64 y Tabla 65.

Tabla 64

Valor p de efectos principales e interacciones para densidad global después de inmersión

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
Densidad	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
global	0.0692	0.0324	0.0018	0.6678
después de	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
inmersión	0.4359	0.2130	0.4824	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 65

Prueba de Tukey para a/c de densidad global después de inmersión con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.6	36	2.28526	0.6 - 0.4	0.01475	(-0.00301; 0.03251)	0.102
0.4	36	2.27051				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 66

Prueba de Tukey para %Puzolana de densidad global después de inmersión con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	2.29289	20 - 0	-0.0247	(-0.0504; 0.0011)	0.063
30	24	2.27256	30 - 0	-0.0203	(-0.0461; 0.0054)	0.148
20	24	2.26821	30 - 20	0.0044	(-0.0214; 0.0301)	0.914

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 67

Prueba de Tukey para %PET de densidad global después de inmersión con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
3	24	2.28872	3 - 0	0.0004	(-0.0242; 0.0250)	0.999
0	24	2.28833	7 - 0	-0.0317	(-0.0564; -0.0071)	0.008
7	24	2.25661	7 - 3	-0.0321	(-0.0568; -0.0075)	0.007

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.16. Densidad global después de inmersión y ebullición

El contenido de pellet de PET y puzolana presentan diferencias significativas, ver Tabla 68. Sin embargo, las pruebas de Tukey indican que únicamente el PET muestra diferencias significativas entre medias en el nivel 7%-0% disminuyendo la densidad global después de inmersión y ebullición 0.03611 g/cm³ o 1.57% y en el nivel 7%-3% decrece 0.03213 g/cm³ o 1.40%, ver Tabla 71.

Tabla 68

Valor p de efectos principales e interacciones para densidad global después de inmersión

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
Densidad	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
global	0.1091	0.0419	0.0007	0.8486
después de inmersión y ebullición	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
	0.6657	0.2397	0.5554	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 69

Prueba de Tukey para a/c de densidad global después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.6	36	2.29203	0.6 - 0.4	0.01284	(-0.00473; 0.03041)	0.149
0.4	36	2.27919				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 70

Prueba de Tukey para %Puzolana de densidad global después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	2.29941	20 - 0	-0.0244	(-0.0499; 0.0010)	0.062
30	24	2.28245	30 - 0	-0.0170	(-0.0424; 0.0085)	0.253
20	24	2.27498	30 - 20	0.0075	(-0.0180; 0.0329)	0.762

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 71

Prueba de Tukey para %PET de densidad global después de inmersión y ebullición con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	2.29898	3 - 0	-0.00398	(-0.02782; 0.01986)	0.916
3	24	2.29500	7 - 0	-0.03611	(-0.05995; -0.01227)	0.002
7	24	2.26287	7 - 3	-0.03213	(-0.05597; -0.00829)	0.005

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.17. Densidad aparente

El ANOVA trifactorial indica que la relación agua cemento, contenido de puzolana, PET e interacción a/c*Puzolana presentan diferencias significativas en la densidad aparente, ver Tabla 72. Según la prueba de Tukey a mayor relación a/c la densidad aumenta 0.01577 g/cm^3 , la puzolana no tiene un efecto significativo, pero todos los niveles de PET presentan diferencias significativas: el nivel 3%-0% disminuye 0.01892 g/cm^3 , 7%-0% un 0.03776 g/cm^3 y 7%-3% un 0.01885 g/cm^3 .

Tabla 72

Valor p de efectos principales e interacciones para densidad aparente

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
Densidad	0.0001	0.0161	0.0000	0.0185
aparente	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
	0.8859	0.2272	0.4816	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 73

Prueba de Tukey para a/c de densidad aparente con una confianza de 95%

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.6	36	2.56360	0.6 - 0.4	0.01577	(0.00475; 0.02679)	0.006
0.4	36	2.54783				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 74

Prueba de Tukey para %Puzolana de densidad aparente con una confianza de 95%

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	2.56344	20 - 0	-0.01362	(-0.03041; 0.00316)	0.134
30	24	2.55388	30 - 0	-0.00957	(-0.02635; 0.00722)	0.364
20	24	2.54982	30 - 20	0.00406	(-0.01273; 0.02084)	0.832

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 75

Prueba de Tukey para %PET de densidad aparente con una confianza de 95%

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0	24	2.57461	3 - 0	-0.01892	(-0.03231; -0.00552)	0.003
3	24	2.55569	7 - 0	-0.03776	(-0.05115; -0.02437)	0.000
7	24	2.53684	7 - 3	-0.01885	(-0.03224; -0.00545)	0.003

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.18. Volumen de vacíos, poros permeables

Se acepta la hipótesis nula, ningún efecto e interacción son significativos en el volumen de vacíos para el ANOVA trifactorial (ver Tabla 76), ni en las pruebas de Tukey de cada factor, ver Tabla 77, Tabla 78 y Tabla 79.

Tabla 76

Valor p de efectos principales e interacciones para volumen de vacíos

Respuesta	Valor p de efectos principales e interacciones para un $\alpha = 0.05$			
Volumen de vacíos, poros permeables	a/c	Puzolana	PET	a/c*Puzolana
	0.9568	0.2463	0.0958	0.5770
	a/c*PET	Puzolana*PET	a/c*Puzolana*PET	
	0.4835	0.2909	0.2705	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 77*Prueba de Tukey para a/c de volumen de vacíos con una confianza de 95%*

a/c	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
0.6	36	0.17379	0.6 - 0.4	0.00022	(-0.00820; 0.00864)	0.958
0.4	36	0.17357				

Nivel de confianza individual = 95.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 78*Prueba de Tukey para %Puzolana de volumen de vacíos con una confianza de 95%*

Puzolana	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
20	24	0.17736	20 - 0	0.00832	(-0.00392; 0.02056)	0.240
30	24	0.17464	30 - 0	0.00560	(-0.00664; 0.01784)	0.520
0	24	0.16904	30 - 20	-0.00272	(-0.01496; 0.00952)	0.856

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 79*Prueba de Tukey para %PET de volumen de vacíos con una confianza de 95%*

PET	N	Media	Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	IC de 95%	Valor p ajustado
7	24	0.17836	3 - 0	-0.00755	(-0.01961; 0.00452)	0.298
0	24	0.17511	7 - 0	0.00325	(-0.00882; 0.01531)	0.796
3	24	0.16757	7 - 3	0.01079	(-0.00128; 0.02286)	0.089

Nivel de confianza individual = 98.08%

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El diseño y elaboración de especímenes de concreto para caracterizarlos mecánicamente, y además obtener su huella de carbono nos permite llegar a las siguientes conclusiones:

1. Recordando el objetivo general e hipótesis de la presente:

El tratamiento que cumple con ambos es el 9 con una relación a/c 0.40, sustitución de cemento por puzolana en un 30%, 7% de sustitución de arena por pellet y huella de carbono total de 403.90 kg CO₂e/m³, ya que, disminuyó 25.97% el índice de potencial de calentamiento global total comparado al control de 545.59 kg CO₂e/m³, y además logró una resistencia a compresión simple promedio de 269.26 kg/cm².

2. El tratamiento 7 correspondiente a una relación a/c 0.40 y sustitución de cemento por puzolana en un 30%, disminuyó 26.56% el índice de potencial de calentamiento global total (400.66 kg CO₂e/m³) comparado al control (545.59 kg CO₂e/m³), y resistencia a compresión simple media de 260.16 kg/cm².
3. A lo largo del ciclo de vida del concreto, la etapa de proceso (obtención de materias primas) es la que más contribuye a la huella de carbono total con entre el 87.77% y 94.71%, siendo el clinker el principal emisor con entre 71.6% al 84% del GWP total.
4. El potencial de calentamiento global fósil representa la mayor parte del total con un 99.90%, mientras que el debido al cambio de terreno entre 0.02%-0.03% y el biogénico 0.07%-0.08%.

5. El factor que más influyó en las características del concreto fue la puzolana, al usarla como sustituto del cemento en un 30%, disminuye el GWP total y fossil 25.72%, GWP land transformation un 26.92% ($0.0901 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$) y un 9.02% ($0.00967 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$) el GWP biogenic. Reduce la resistencia a compresión simple 84.4 kg/cm^2 (31.12%), la energía de la integral J de 1.961 J/cm^2 (23.87%), revenimiento en 7.75 cm, el peso volumétrico en estado endurecido 21.36 kg/m^3 (0.93%) y la velocidad de pulso 94.5 m/s (2.33%). Es decir, son mezclas poco trabajables, más ligeras, menos resistentes, con menor huella de carbono y que conservan una calidad “buena” de acuerdo con su velocidad de pulso ultrasónico.
6. El 20% de puzolana decrementa el GWP total en 17.15%, GWP fossil 17.16% ($77.1 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$), el GWP land transformation decrece 17.96% ($0.060 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$) y el GWP biogenic un 6% ($0.00644 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$). Disminuye 5.417 cm el revenimiento (mezclas poco trabajables), la densidad global después de inmersión 0.0247 g/cm^3 y aumentó el porcentaje de contenido de aire 0.475%.
7. El reemplazo de arena por PET no contribuye ambientalmente a mitigar la huella de carbono del concreto, sin embargo, en un 7% reduce el peso volumétrico fresco 1.72%, el peso volumétrico en estado endurecido 1.24% la densidad seca global 1.86%, densidad global después de inmersión 1.39% y la densidad global después de inmersión y ebullición 1.57%. La sustitución de agregado fino por PET en 3% disminuye la resistencia un 8.20%, el peso volumétrico en estado fresco 1.09% y la densidad aparente 1.47%. Se obtienen mezclas que conservan trabajabilidad y son más ligeras, a pesar de la baja absorción del pellet, este no tuvo efecto significativo en los especímenes probados.

8. El aumento de 0.4 a 0.6 de la relación agua cemento disminuye un 35.06% la huella de carbono total, un 35.03% el potencial de calentamiento global fósil, 36.03% el GWP por transformación de terreno y 14.65% el GWP biogénico. También, la resistencia a compresión simple decrece un 43.47%, la energía de la integral J un 55.72%, y la velocidad de pulso ultrasónico 2.9% (aunque la calidad permanece como “buena”).
9. En la categoría de impacto ambiental de potencial de calentamiento global no se justifica el uso de PET en concreto pues, no contribuye significativamente a su disminución, al menos que se realice con la finalidad de disponer temporalmente del PET cuyas propiedades y /o características dificulten o dejen de ser aptas para reciclaje y, además, que la distancia con el proveedor no represente una carga ambiental importante debido al transporte. Lo anterior, únicamente si se usa pellet y una vez terminada la vida útil del concreto, se realicen los correspondientes procesos de separación, puesto que, si se usa material triturado (polvos de PET) no es posible su separación y, entonces, en el futuro será causa de fugas al ambiente.

4.2.Recomendaciones

1. Se recomienda analizar el resto de las categorías de impacto ambiental con la misma metodología de ACV para una correcta toma de decisiones respecto al uso o no de PET y puzolana en el concreto en términos ambientales.
2. Extender las pruebas de caracterización mecánica del concreto con pellet de PET y puzolanas, para evaluar su uso bajo los requisitos de desempeño de cada obra civil.
3. Realizar pruebas del índice de actividad puzolánica ASTM C 311 de las puzolanas disponibles en las distintas zonas del país, así como el diagrama ternario de los componentes SiO_2 , CaO y Al_2O_3 . También, caracterizar su desarrollo de resistencia a diferentes edades.
4. Investigar métodos para acelerar el desarrollo de resistencia para puzolanas, sin comprometer la estabilidad química del concreto, ya que los tiempos en obra se reflejan en el costo de esta.
5. En caso de justificar el uso de pellet de PET, ya sea ambientalmente y/o por desempeño, cuidar la cantidad de agua usada en mezcla para evitar que flote. Además, de asegurar que, al terminar su vida útil, se separe el concreto del pellet para evitar su fuga al ambiente.

Referencias

- Aligizaki, K. K. (2006). *Pore Structure of Cement-Based Materials: Testing, interpretation and requirements: Vol. 12 Modern Concrete Technology series* (1.a ed.). Taylor & Francis Group.
- American Concrete Institute. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, HeavyWeight, and Mass Concrete* (ACI 211.1-91)
- American Society for Testing and Materials International. (2006). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. (ASTM C642-06)
- American Society for Testing and Materials International. (2009). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. (ASTM C597-09)
- American Society for Testing and Materials International. (2019). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. (ASTM C-33/C33M-18)
- Archer, D. (2010). *The global Carbon Cycle* (1.^a ed.). Princeton University Press.
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales*. (7.a ed.). CENGAGE Learning.
- Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C. (2021). 2o Informe del Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico en México. En ANIPAC.
<https://anipac.org.mx/wp-content/uploads/2021/12/2o-INFORME-Acuerdo-Nal-Plasticos-6-12-21.pdf>
- Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C. (2022). 3er Informe del Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico en México. En ANIPAC.
<https://www.conmexico.com.mx/wp-content/uploads/2023/01/3er-informe-Acuerdo-Nacional-plasticos.pdf>

- Boeker, E., & Van Grondelle, R. (2011). *Environmental Physics: Sustainable Energy and Climate Change*. John Wiley & Sons.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- De Brito, J., & Silvestre, J. D. (2018). Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. *Resources Conservation and Recycling*, 139, 407-417. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.004>
- EcoInvent. (2021). *Clinker {RoW}| market for clinker | Cut-off, S* [Conjunto de datos]. EcoInvent, market for, cut-off system, ecoinvent database version 3.9.1.
- Farah, S., Kunduru, K. R., Basu, A., & Domb, A. J. (2015). Molecular Weight Determination of Polyethylene Terephthalate. *Poly(Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites*, 143-165. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-31306-3.00008-7>
- Geyer, R., Jambeck, J., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Griffith, A. A. (1921). VI. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 221(582-593), 163-198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
- Hauschild, M. Z., & Huijbregts, M. A. (2015). *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment: Life Cycle Impact Assessment*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3>
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2017). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer.

Herbold Meckesheim. (2013). Tanque de separación (Tanque de sedimentación-flotación).

En *Herbold Meckesheim* (Hoja de información n° 50).

https://www.herbold.com/wp-content/uploads/pdf/information/50_information-es.pdf

Kangavar, M. E., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W., & Frigione, M. (2022).

Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. *Case Studies in Construction*

Materials, 16, e00934. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00934>

Kosmatka, S. H. A., Kerkhoff, B. A., Panarese, W. C. A., & Tanesi, J. A. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association (PCA).

Kuehl, R. O. (2001). *Diseño de experimentos principios estadísticos de diseño y análisis de investigación* (2.a ed.). Thomson Learning.

Krumbein, W. C., Sloss, L. L., & Department of Geology, Northwestern University.

(1951). *Stratigraphy and sedimentation*. W. H. Freeman and Company.

Lehne, J., & Preston, F. (2018). *Making Concrete Change Innovation in Low-carbon*

Cement and Concrete. Chatham House, The Royal Institute of International Affairs

<https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston.pdf>

Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (1999). *Materials for Civil and Construction Engineers* (1.a ed.). Addison Wesley.

McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2011). *Diseño de Concreto Reforzado* (8.a ed.). Alfaomega.

Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Pearson.

- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (3.^a ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Muciño, R., & Coyoli, E. A. (2009). *Materiales para ingeniería civil* (1.a ed.). Kali-Xotl.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1998). *Tecnología del concreto* (1.a ed.). Trillas.
- Ozol, M. A. (1978). Shape, Surface Texture, Surface Area, and Coatings. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials, ASTM Special Technical publication 169 B*, 584-628.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2004). *Industria de la construcción. Agregados. Masa volumétrica. Método de ensayo* (NMX-C-073- ONNCCE-2004)
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2006). *Industria de la construcción. Concreto. Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión*. (NMX-C-157- ONNCCE-2006)
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2010). *Industria de la construcción. Concreto. Determinación del revenimiento en el concreto fresco*. (NMX-C-156- ONNCCE-2010)
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *Industria de la construcción. Agregados. Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino. Método de ensayo*. (NMX-C-165- ONNCCE-2014)
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *Industria de la construcción. Agregados. Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso. Método de ensayo*. (NMX-C-164- ONNCCE-2014)

- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
(2014). *Industria de la construcción. Concreto. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes. Método de ensayo*. (NMX-C-083- ONNCCE-2014)
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
(2016). *Industria de la construcción. Concreto. Elaboración y curado de especímenes de ensayo*. (NMX-C-159-ONNCCE-2016)
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
(2017). *Cementantes hidráulicos, especificaciones y métodos de ensayo*. (NMX-C-414- ONNCCE-2017)
- PCA America's Cement Manufacturers & ASTM International. (2021). *Environmental Product Declaration Portland cement* (EPD 195).
- Philleo, R. E. (1966). The Origin of Strength of Concrete. *Symposium on structure of Portland cement paste and concrete. Highway Research Board Special Report, 90*, 175-185.
- Prieto, M. A. M. C., Cedillo García, R. C. G., & López Rivera, J. L. R. (2022, 11 septiembre). *Detrás de la producción del PET*. *Plastics Technology México*.
<https://www.pt-mexico.com/articulos/detras-de-la-produccion-del-pet>
- Qaidi, S. M., Al-Kamaki, Y., Hakeem, I., Dulaimi, A. F., Özkılıç, Y., Sabri, M., & Sergeev, V. (2023). Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates. *Frontiers in Materials*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1101146>
- Reyes Castañeda, P. (1982, septiembre). *Diseño de experimentos aplicados* (2.a ed.). Trillas.

- Rice, J. R. (1967). A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. En *Brown University Providence, R.I.* (ARPA SD-86 Report E39 Contract SD-86). Department of Defense Advanced Research Projects Agency, Material Research Program.
- Saikia, N., & De Brito, J. (2013). Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete. *Materials Research-ibero-american Journal of Materials*, 16(2), 341-350.
<https://doi.org/10.1590/s1516-14392013005000017>
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda [SEDUVI] & Secretaría de Obras y Servicios [SOBSE]. (2017). *Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México* (NTC2017). <https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf>
- Secretaría de Energía [SENER] & Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE]. (2022). Lista de combustibles y sus poderes caloríficos 2022 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias de petróleo. En *Gobierno de México*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707880/lista_de_combustibles_y_poderes_calorificos_2022.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recurso Naturales. (2011). *Norma oficial Mexicana que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuales estan sujetos a Plan de Manejo*. (NOM-161-SEMARNAT-2011)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recurso Naturales [SEMARNAT]. (2023). Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica (INFCP). En *Gobierno de México*. Recuperado 1 de diciembre de 2023, de

[https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2023/NFCP_2023.p](https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2023/NFCP_2023.pdf)

[df](#)

Sjunnesson, J. (2005). *Life Cycle Assessment of Concrete* [Master thesis]. Lund University.

Timoshenko, S. (1947). *Strength of Materials: Part II Advanced Theory and Problems* (2.^a ed.). D. Van Nostrand Company, Inc.

Tyler Ley. (2022, 2 marzo). *How to get sustainable concrete* [Video]. YouTube.

https://www.youtube.com/watch?v=hYF3Zvv8vmo&list=LL&index=6&t=680s&ab_channel=TylerLey

Vidaud, E. (2013). *De la historia del cemento. Construcción y tecnología en concreto*, 3(8), 20–23.

Vidaud, E., & Vidaud, I. (2016). Ultrasonido: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico. *Construcción y tecnología del concreto*, 32-35.

Wei, R. P. (2010). *Fracture Mechanics: Integration of Mechanics, Materials Science and Chemistry*. Cambridge University Press.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., (2016). *The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230.

Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>

<https://ecoinvent.org/offerings/faqs/#1629117984453-fd08d97d-4512>

ANEXO 1

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE PELLET AMORFO DE PET DE PETSTAR COMO AGREGADO DE CONCRETO HIDRÁULICO Y SUS PROPIEDADES FÍSICAS

Dimensiones

Las medidas mostradas a continuación tienen un coeficiente de variación porcentual menor al 10%

Lado corto (s): 1.85 mm

Lado medio (i): 2.70 mm

Lado largo (l): 2.84 mm

Ecuaciones paramétricas del modelo de cilindro de pellet con elipse como directriz

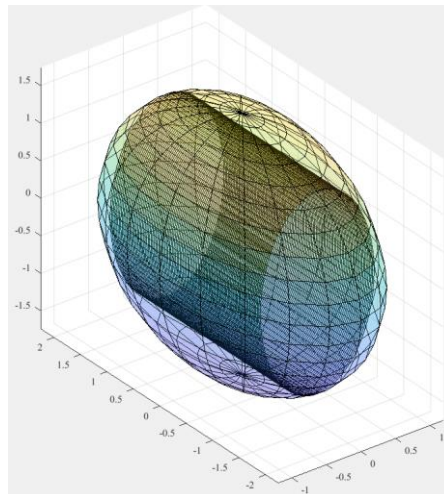
$$\begin{matrix} \theta [0, 2\pi] \\ v [-1.42, 1.42] \end{matrix} \begin{cases} x = 0.925 \cos\theta \\ y = v \\ z = 1.350 \sin\theta \end{cases} \dots (14)$$

Ecuaciones paramétricas de elipsoide de acomodo

$$\begin{matrix} \theta [0, 2\pi] \\ \alpha \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \end{matrix} \begin{cases} x = 1.1989 \cos\alpha \cos\theta \\ y = 2.2473 \cos\alpha \sin\theta \\ z = 1.74178 \sin\alpha \end{cases} \dots (15)$$

Figura 16

Elipse de acomodo del pellet de PET



Fuente: Elaboración propia.

Esfericidad

De la ecuación (2):

$$\psi = \sqrt[3]{\frac{V_p}{V_{cs}}} = \sqrt[3]{\frac{11.13}{31.50}} = 0.71$$

donde

ψ esfericidad

V_p volumen de la partícula en mm^3

V_{cs} volumen de la esfera circunscrita en mm^3

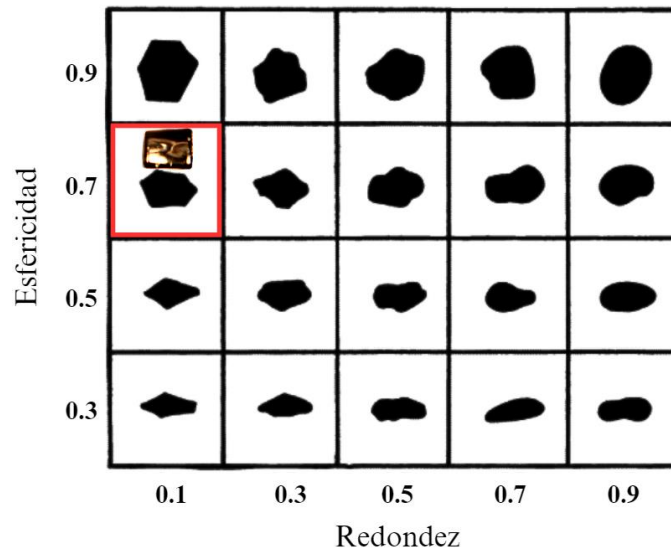
Redondez

De la ecuación (3):

$$\text{Redondez} = \frac{\text{Radio promedio de los bordes y esquinas}}{\text{Radio del máximo círculo inscrito}} = \frac{0.29}{1.35} = 0.22$$

Figura 17

Cuadro visual para estimación de esfericidad y redondez



Fuente: Adaptación de Krumbein et al. (1951)

Factor de forma

Factor de elongación:

$$q = \frac{i}{l} = \frac{2.70}{2.84} = 0.95 \dots (16)$$

donde:

q factor de elongación

i lado medio

l lado largo

Factor de aplanamiento:

$$p = \frac{s}{i} = \frac{1.85}{2.70} = 0.69 \dots (17)$$

donde:

p factor de aplanamiento

s lado corto en mm

i lado medio en mm

Factor de forma:

$$F = \frac{p}{q} = \frac{0.69}{0.95} = 0.72 \dots (18)$$

donde

F factor de forma

p factor de aplanamiento

q factor de elongación

De acuerdo con Ozol, (1978), como $F < 1$, entonces el lado medio es casi igual al largo

Propiedades físicas

De acuerdo con la NMX-C-165- ONNCCE-2014, (ONNCCE, 2014):

Densidad relativa: 1.3293 g/cm³ según

Absorción: 0.90%

De acuerdo con la NMX-C-073- ONNCCE-2004, (ONNCCE, 2004):

Peso volumétrico suelto: 793.11 kg/m³

Peso volumétrico compacto: 809.63 kg/m³

Granulometría

De acuerdo con la ASTM C-33/C33M-18 (ASTM, 2019):

Tabla 80

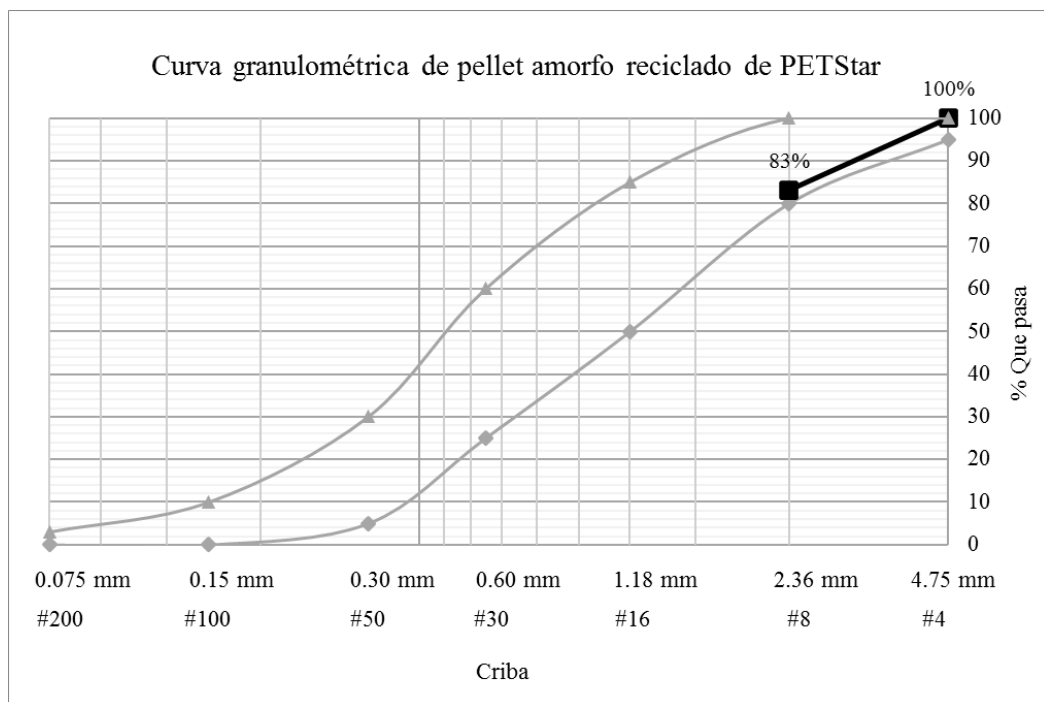
Granulometría Pellet amorfo reciclado de PET de PETStar

Criba (abertura en mm)	Criba (No.)	Masa retenida (g)	% Masa retenida	% Acumulado	% Que pasa
4.75	4	0	0	0	100
2.36	8	83	17	17	83
1.18	16	417	83	100	0
0.60	30	0	0	100	0
0.30	50	0	0	100	0
0.15	100	0	0	100	0
0.075	200	0	0	100	0
Charola		0	0	100	0
Sumatorias		500	100		
Módulo de Finura		4.17			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 18

Curva de pellet amorfo reciclado de PETStar



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 2

PROPIEDADES FÍSICAS DE AGREGADOS MINERALES

Propiedades físicas de la grava

De acuerdo con la NMX-C-164- ONNCCE-2014, (ONNCCE, 2014):

Densidad relativa: 2.35 g/cm^3

Absorción: 2.18%

De acuerdo con la NMX-C-073- ONNCCE-2004, (ONNCCE, 2004):

Peso volumétrico suelto: 1575.38 kg/m^3

Peso volumétrico compacto: 1592.48 kg/m^3

Granulometría

De acuerdo con la ASTM C-33/C33M - 18 (ASTM, 2019):

Tabla 81

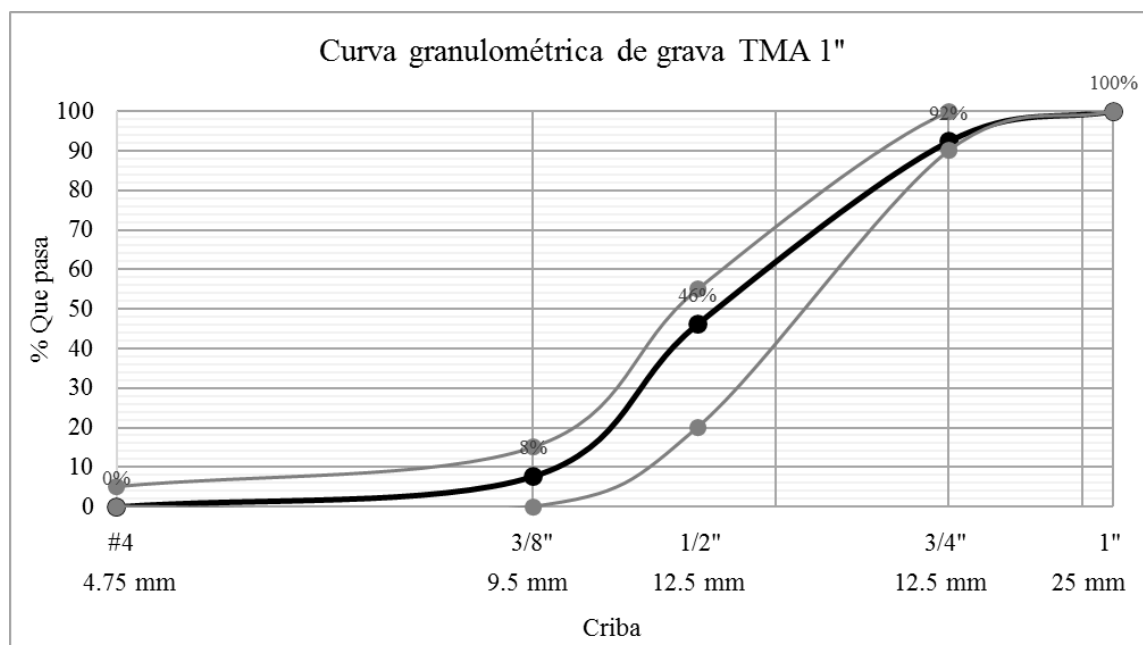
Granulometría de la grava

Criba (mm)	Criba (No.)	Masa retenida (g)	% Masa retenida	% Acumulado	% Que pasa
75	3"	0	0	0	100
50	2"	0	0	0	100
37.5	1 ½ "	0	0	0	100
25	1"	0	0	0	100
19	¾ "	77	8	8	92
12.5	½ "	462	46	54	46
9.5	3/8"	385	38	92	8
4.75	4	77	8	100	0
Sumatorias		1000	100		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19

Curva granulométrica de grava TMA 1"



Fuente: Elaboración propia.

Propiedades físicas de arena

De acuerdo con la NMX-C-165- ONNCCE-2014, (ONNCCE, 2014):

Densidad relativa: 2.55 g/cm^3

Absorción: 5.60 %

De acuerdo con la NMX-C-073- ONNCCE-2004, (ONNCCE, 2004):

Peso volumétrico suelto: 1525.27 kg/m^3

Peso volumétrico compacto: 1688.64 kg/m^3

Granulometría

De acuerdo con la ASTM C-33/C33M - 18 (ASTM, 2019):

Tabla 82

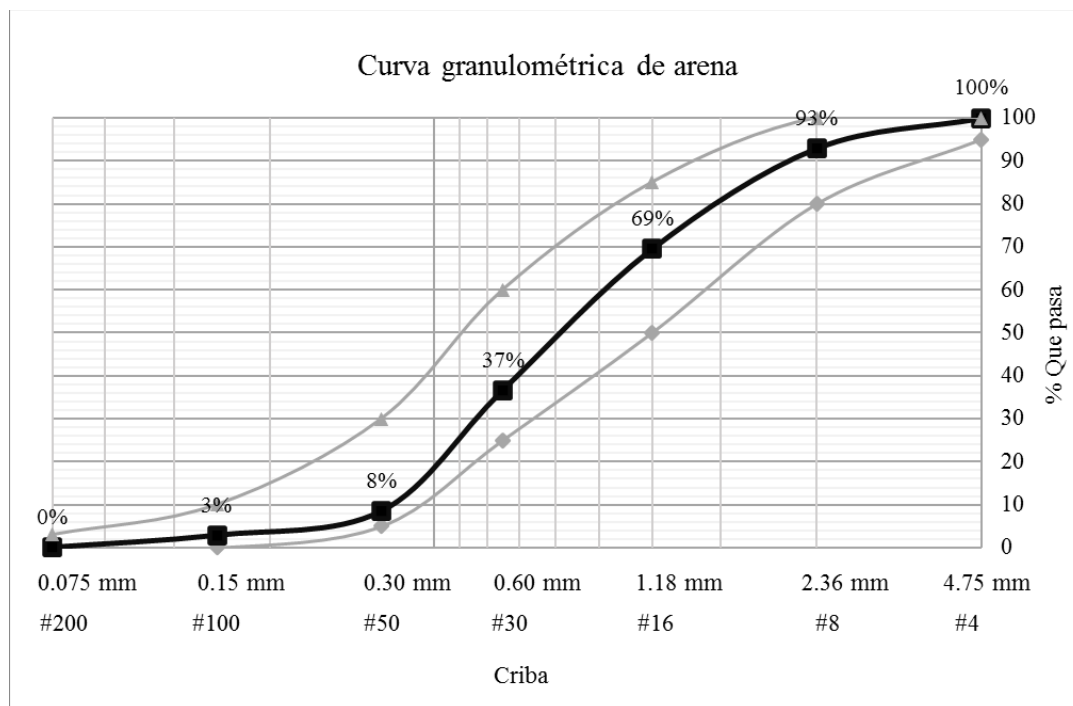
Granulometría de la arena

<i>Criba (abertura en mm)</i>	<i>Criba (No.)</i>	<i>Masa retenida (g)</i>	<i>% Masa retenida</i>	<i>% Acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
4.75	4	0	0	0	100
2.36	8	35	7	7	93
1.18	16	117	23	31	69
0.60	30	164	33	63	37
0.30	50	141	28	92	8
0.15	100	28	6	97	3
0.075	200	14	3	100	0
	<i>Charola</i>	0	0	100	0
	<i>Sumatorias</i>	500	100		
	<i>Módulo de Finura</i>	2.90			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 20

Curva granulométrica de arena



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3

DOSIFICACIONES DE CONCRETO POR M³

Tabla 83

Dosificaciones en masa (kg) para 1 m³ de concreto con relación a/c en masa de 0.40 (ACI, 2002)

	Control	Puzolana 30%	Puzolana 20%	PET 7%	PET 3%	Puzolana 20% PET 3%	Puzolana 20% PET 7%	Puzolana 30% PET 3%	Puzolana 30% PET 7%
a/c	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Agua	228	228	228	228	228	228	228	228	228
Cemento	569	398	455	569	569	455	455	398	398
Puzolana	0	171	114	0	0	114	114	171	171
Cementante total	569	569	569	569	569	569	569	569	569
Grava	788	788	788	788	788	788	788	788	788
Arena	654	654	654	608	634	634	608	634	608
PET	0	0	0	24	10	10	24	10	24

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 84

Dosificaciones en masa (kg) para 1 m³ de concreto con relación a/c en masa de 0.60 (ACI, 2002)

	Control	Puzolana 30%	Puzolana 20%	PET 7%	PET 3%	Puzolana 20% PET 3%	Puzolana 20% PET 7%	Puzolana 30% PET 3%	Puzolana 30% PET 7%
a/c	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Agua	204	204	204	204	204	204	204	204	204
Cemento	339	237	271	339	339	271	271	237	237
Puzolana	0	102	38	0	0	68	68	102	102
Cementante total	339	339	339	339	339	339	339	339	339
Grava	917	917	917	917	917	917	917	917	917
Arena	761	761	761	708	739	739	708	739	708
PET	0	0	0	28	12	12	28	12	28

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 4

RESPUESTAS PROMEDIO DE CADA TRATAMIENTO

Tabla 85

Respuestas promedio por tratamiento

Unidad Experimental	Tratamiento	Relación a/c	% Puzolana	% PET	Revenimiento (cm)	Contenido de aire (%)	Peso volumétrico, estado fresco (kg/m³)	Peso volumétrico, estado endurecido (kg/m³)	Resistencia a compresión simple f'c (kg/cm²)
11	1	0.4	0	0	18	2.25%	2,309.34	2,303.53	357.50
12	2	0.4	0	3	18	2.00%	2,301.38	2,286.64	318.40
9	3	0.4	0	7	17	2.00%	2,285.46	2,278.04	322.53
18	4	0.4	20	0	7	2.80%	2,306.16	2,289.21	305.47
16	5	0.4	20	3	9	2.50%	2,302.97	2,292.98	288.68
8	6	0.4	20	7	10	2.10%	2,264.77	2,254.45	281.46
6	7	0.4	30	0	7	2.20%	2,356.29	2,275.49	260.16
2	8	0.4	30	3	8	2.30%	2,274.32	2,263.12	227.85
4	9	0.4	30	7	7	1.60%	2,280.69	2,249.36	269.26
17	10	0.6	0	0	15.5	2.10%	2,334.80	2,323.12	223.69
14	11	0.6	0	3	16	1.70%	2,298.20	2,288.80	195.34
3	12	0.6	0	7	15	1.70%	2,301.38	2,289.14	211.30
13	13	0.6	20	0	17	1.90%	2,326.85	2,299.63	167.18
5	14	0.6	20	3	13	3.40%	2,310.93	2,301.60	168.50
15	15	0.6	20	7	11	1.90%	2,282.28	2,260.45	156.49
10	16	0.6	30	0	11	1.70%	2,312.52	2,286.81	131.36
7	17	0.6	30	3	10	2.10%	2,306.16	2,291.37	128.02
1	18	0.6	30	7	10	2.20%	2,291.83	2,274.97	105.52

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 86

Respuestas promedio por tratamiento. Continuación

Unidad Experimental	Tratamiento	Relación a/c	% Puzolana	% PET	Velocidad de onda ultrasónica (m/s)	Condición general	Integral J (J/cm²)	Absorción después de inmersión (%)	Absorción después de inmersión y ebullición (%)
11	1	0.4	0	0	4,034.58	Buena	9.62	7.75%	8.08%
12	2	0.4	0	3	4,104.32	Buena	6.83	7.75%	8.07%
9	3	0.4	0	7	4,153.84	Buena	6.20	7.91%	8.21%
18	4	0.4	20	0	4,154.66	Buena	5.75	8.10%	8.43%
16	5	0.4	20	3	4,098.55	Buena	4.27	7.29%	7.62%
8	6	0.4	20	7	4,072.00	Buena	5.67	8.76%	9.06%
6	7	0.4	30	0	4,094.96	Buena	5.83	7.57%	8.90%
2	8	0.4	30	3	4,006.81	Buena	5.74	7.63%	7.88%
4	9	0.4	30	7	4,041.40	Buena	3.31	7.85%	8.10%
17	10	0.6	0	0	4,055.63	Buena	3.06	6.78%	7.12%
14	11	0.6	0	3	4,050.17	Buena	2.58	7.18%	7.51%
3	12	0.6	0	7	4,014.00	Buena	3.78	8.60%	8.82%
13	13	0.6	20	0	3,976.14	Buena	2.28	8.82%	9.15%
5	14	0.6	20	3	3,976.06	Buena	4.84	7.59%	7.81%
15	15	0.6	20	7	3,920.73	Buena	1.61	8.36%	8.79%
10	16	0.6	30	0	3,973.51	Buena	1.19	7.57%	7.93%
7	17	0.6	30	3	3,929.05	Buena	1.67	8.16%	8.49%
1	18	0.6	30	7	3,799.65	Buena	2.58	8.20%	8.51%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 87

Respuestas promedio por tratamiento. Continuación

Unidad Experimental	Tratamiento	Relación a/c	% Puzolana	% PET	Densidad seca global (g/cm³)	Densidad global después de inmersión (g/cm³)	Densidad global después de inmersión y ebullición (g/cm³)	Densidad aparente (g/cm³)	Volumen de vacíos, poros permeables (%)
11	1	0.4	0	0	2.1361	2.3014	2.3084	2.5806	17.23%
12	2	0.4	0	3	2.1215	2.2852	2.2918	2.5570	17.03%
9	3	0.4	0	7	2.1114	2.2779	2.2842	2.5525	17.29%
18	4	0.4	20	0	2.0990	2.2689	2.2758	2.5498	17.68%
16	5	0.4	20	3	2.1334	2.2888	2.2959	2.5473	16.25%
8	6	0.4	20	7	2.0523	2.2320	2.2381	2.5208	18.58%
6	7	0.4	30	0	2.0933	2.2516	2.2795	2.5722	18.62%
2	8	0.4	30	3	2.1139	2.2748	2.2801	2.5352	16.62%
4	9	0.4	30	7	2.0898	2.2539	2.2589	2.5151	16.91%
17	10	0.6	0	0	2.1857	2.3337	2.3412	2.5880	15.55%
14	11	0.6	0	3	2.1473	2.3010	2.3080	2.5581	16.07%
3	12	0.6	0	7	2.0803	2.2581	2.2629	2.5445	18.26%
13	13	0.6	20	0	2.0848	2.2680	2.2749	2.5742	19.01%
5	14	0.6	20	3	2.1392	2.3014	2.3060	2.5674	16.68%
15	15	0.6	20	7	2.0770	2.2502	2.2591	2.5394	18.22%
10	16	0.6	30	0	2.1443	2.3063	2.3141	2.5829	16.97%
7	17	0.6	30	3	2.1093	2.2812	2.2882	2.5692	17.90%
1	18	0.6	30	7	2.0963	2.2675	2.2739	2.5487	17.76%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 88

Respuestas promedio por tratamiento. Continuación

Unidad Experimental	Tratamiento	Relación a/c	% Puzolana	% PET	GWP total (CO₂ e)	GWP fossil (CO₂ e)	GWP land trans (CO₂ e)	GWP biogenic (CO₂ e)
11	1	0.4	0	0	545.59	545.07	0.4096	0.1169
12	2	0.4	0	3	549.35	548.82	0.4100	0.1168
9	3	0.4	0	7	548.84	548.31	0.4096	0.1161
18	4	0.4	20	0	448.97	448.53	0.3343	0.1089
16	5	0.4	20	3	452.72	452.28	0.3348	0.1088
8	6	0.4	20	7	452.21	451.77	0.3344	0.1081
6	7	0.4	30	0	400.66	400.26	0.2967	0.1048
2	8	0.4	30	3	404.41	404.01	0.2971	0.1047
4	9	0.4	30	7	403.90	403.50	0.2968	0.1040
17	10	0.6	0	0	349.43	349.07	0.2593	0.0982
14	11	0.6	0	3	353.13	352.77	0.2596	0.0980
3	12	0.6	0	7	352.53	352.17	0.2593	0.0972
13	13	0.6	20	0	291.80	291.49	0.2144	0.0934
5	14	0.6	20	3	295.50	295.19	0.2148	0.0932
15	15	0.6	20	7	294.89	294.58	0.2144	0.0924
10	16	0.6	30	0	262.98	262.69	0.1920	0.0910
7	17	0.6	30	3	266.68	266.40	0.1923	0.0908
1	18	0.6	30	7	266.07	265.79	0.1920	0.0900

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5

GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN POR TRATAMIENTO

Tratamiento 1

Unidad experimental 11

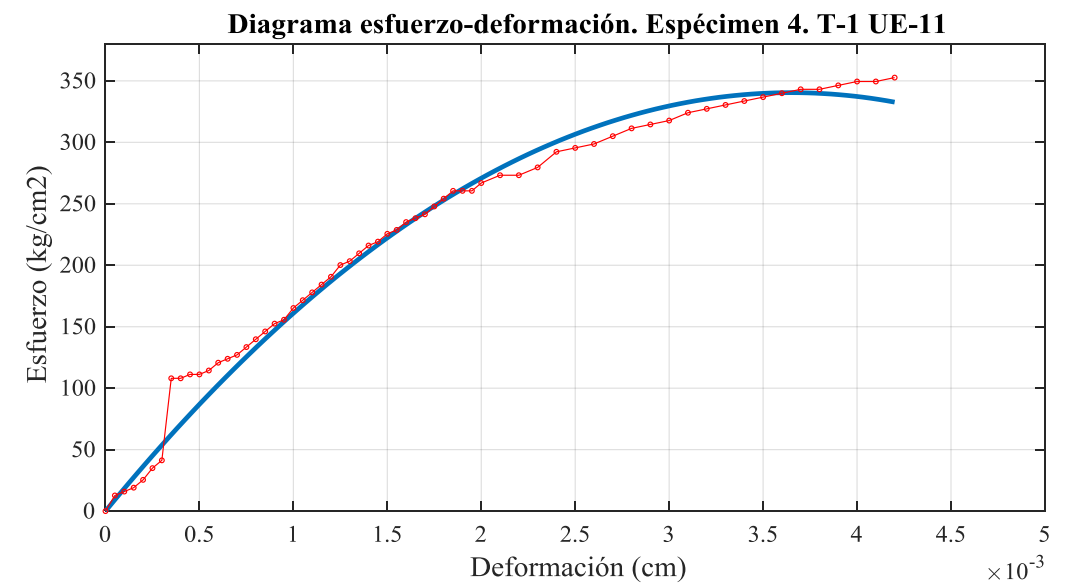
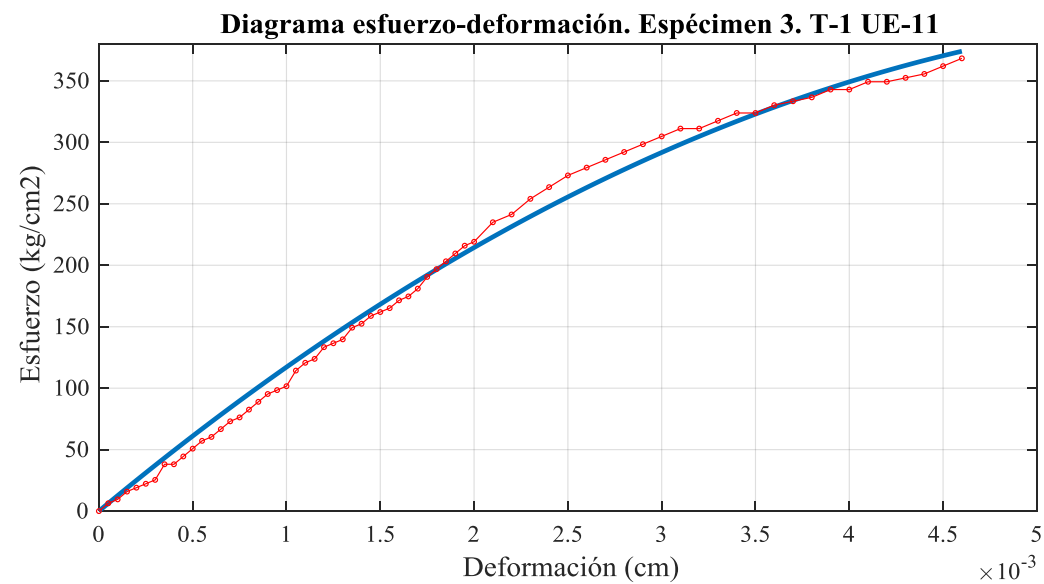
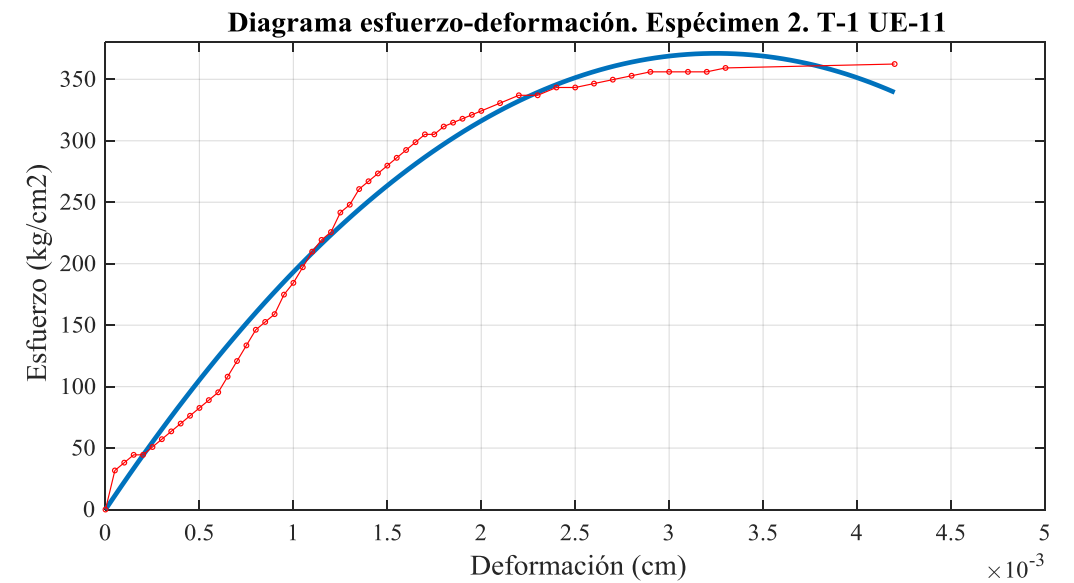
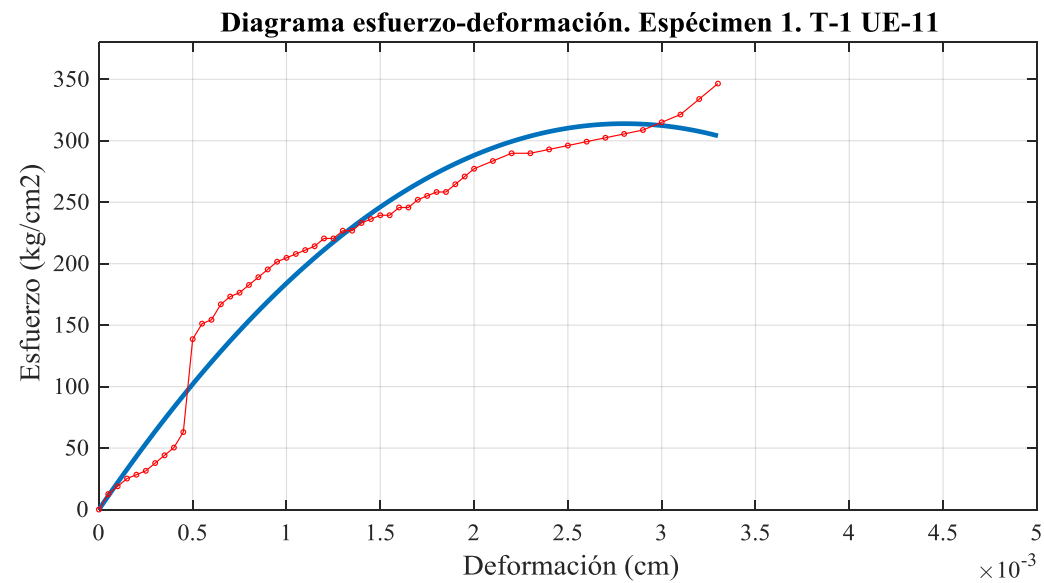
Relación a/c= 0.40

% Puzolana= 0%

% PET= 0%

Figura 21

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 1



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 2

Unidad experimental 12

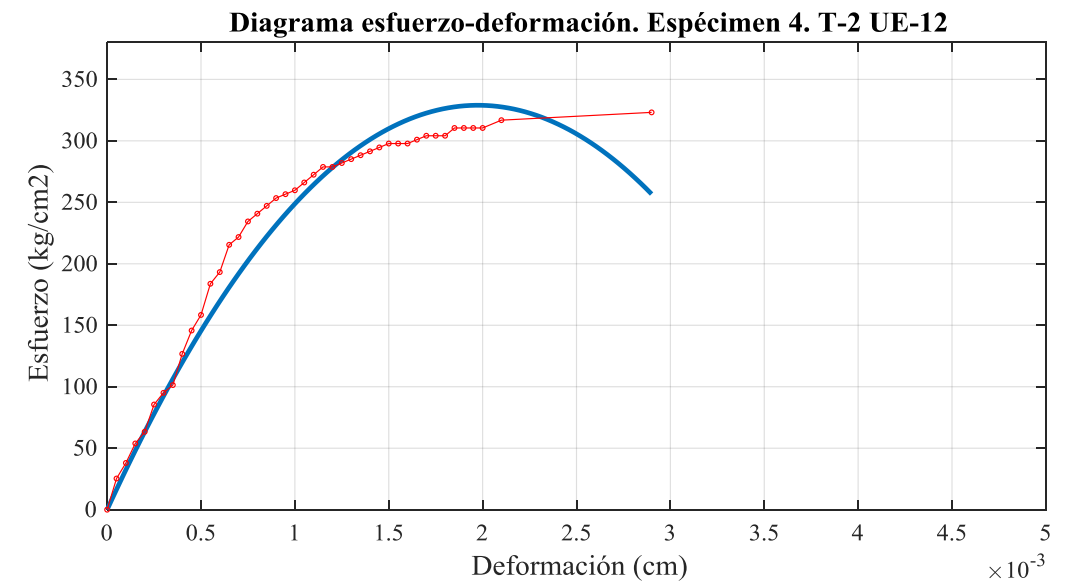
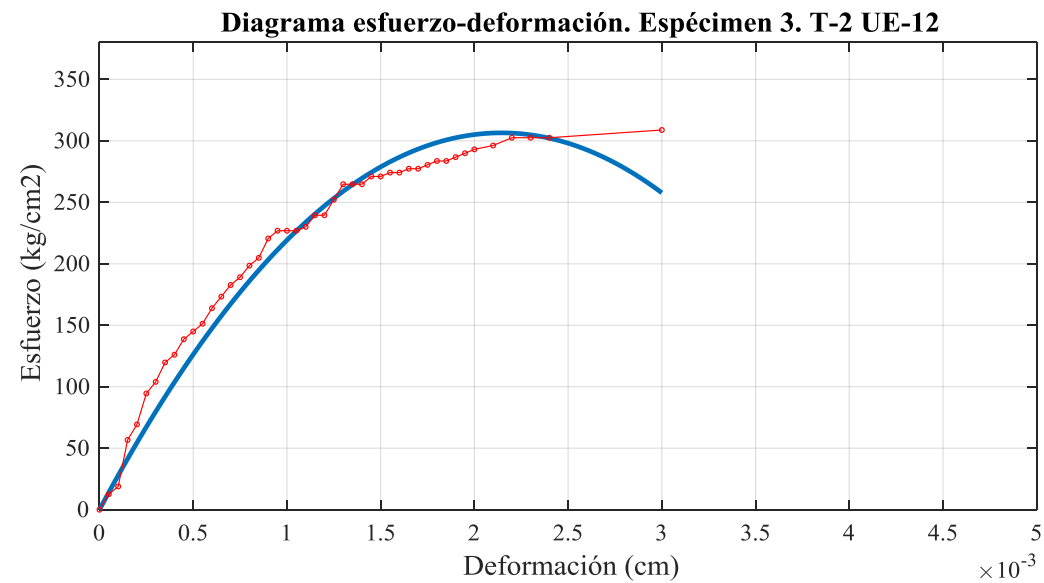
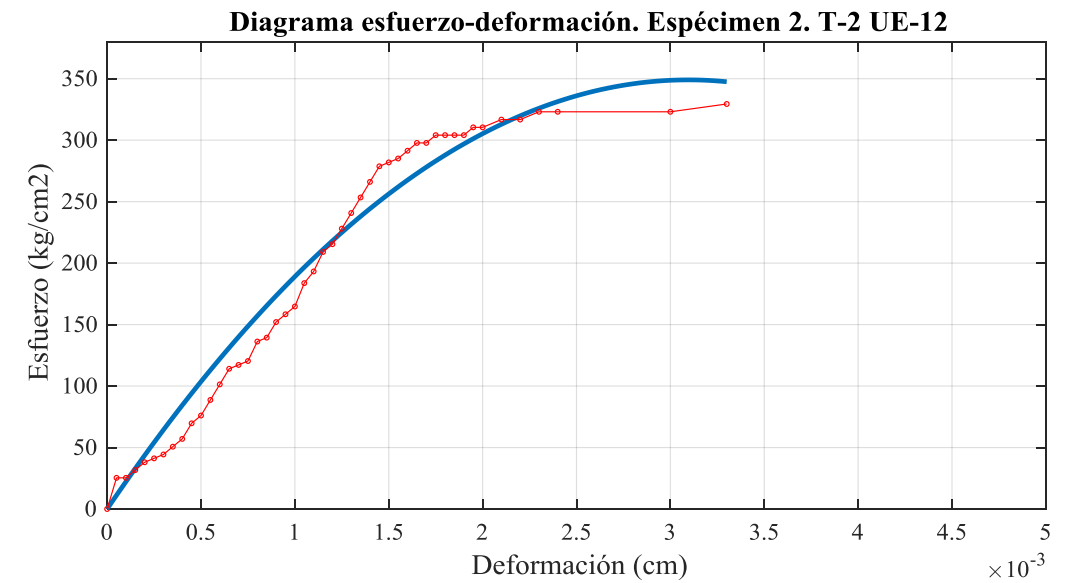
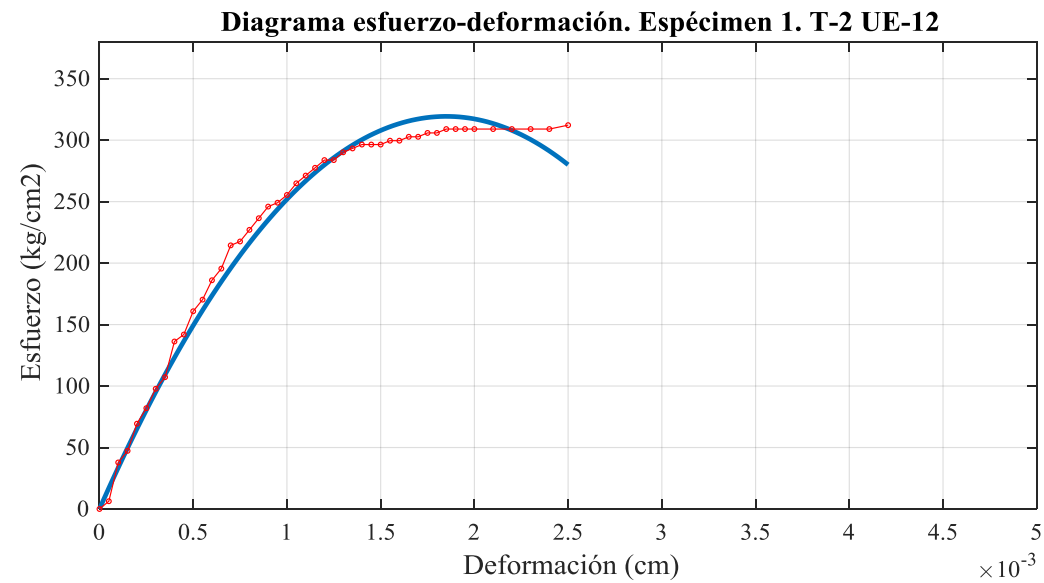
Relación a/c= 0.40

% Puzolana= 0%

% PET= 3%

Figura 22

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 2



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 3

Unidad experimental 9

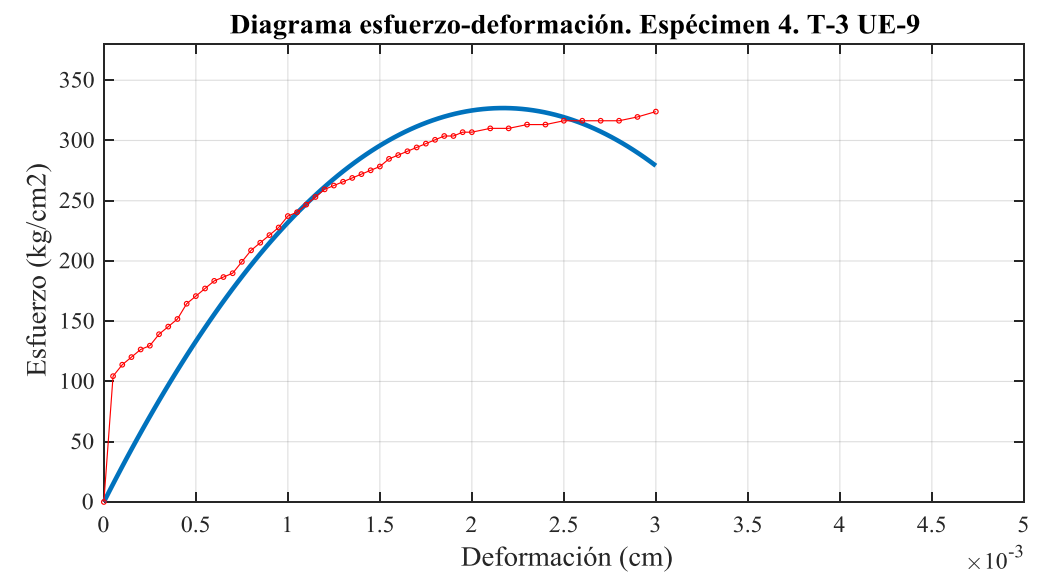
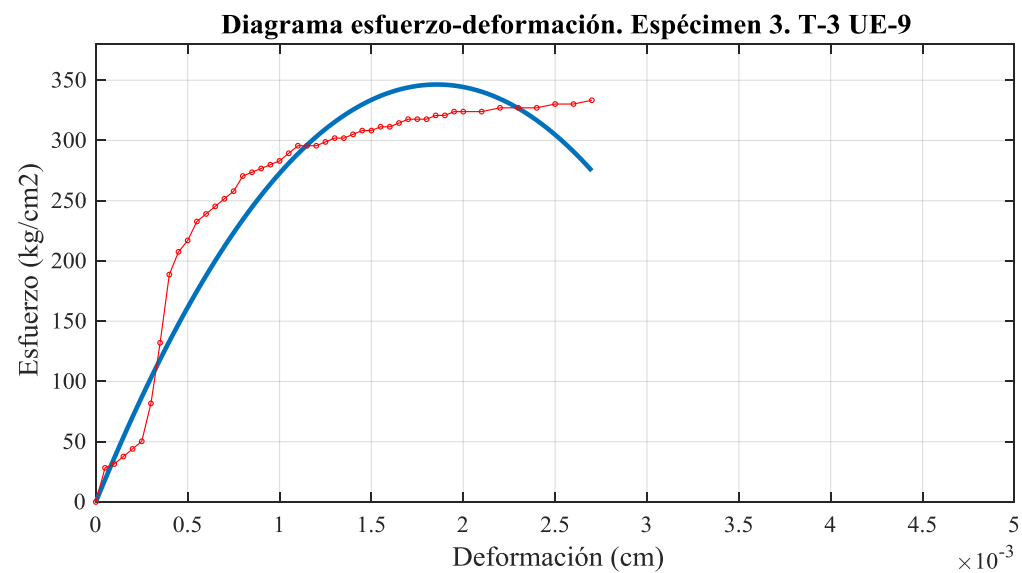
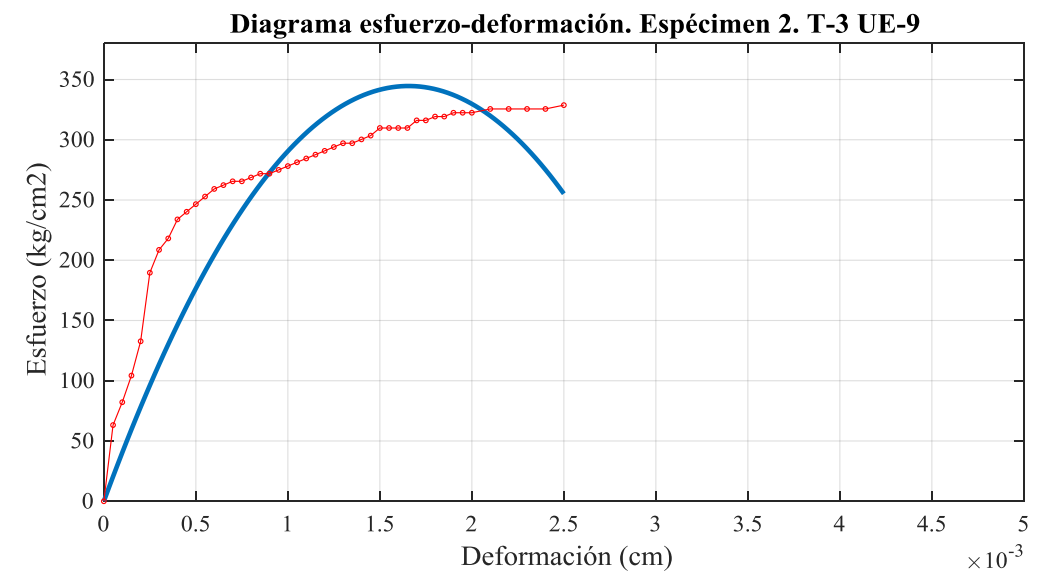
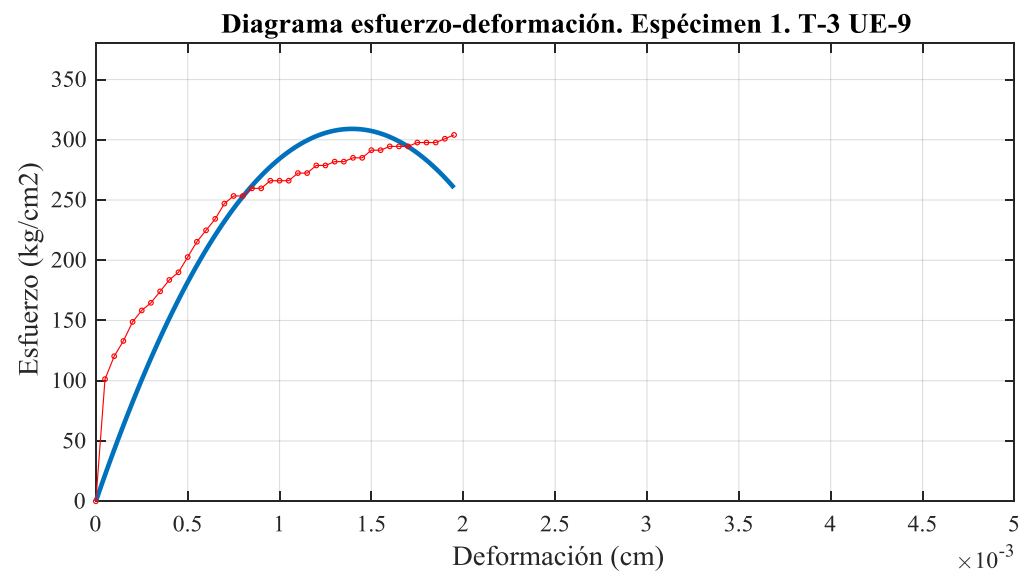
Relación a/c= 0.40

% Puzolana= 0%

% PET= 7%

Figura 23

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 3



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 4

Unidad experimental 18

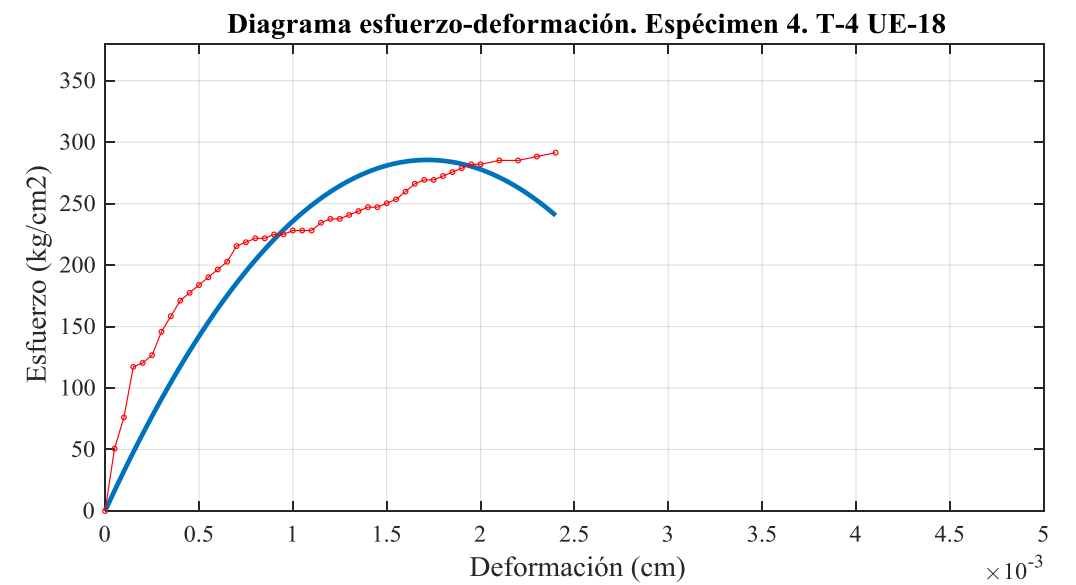
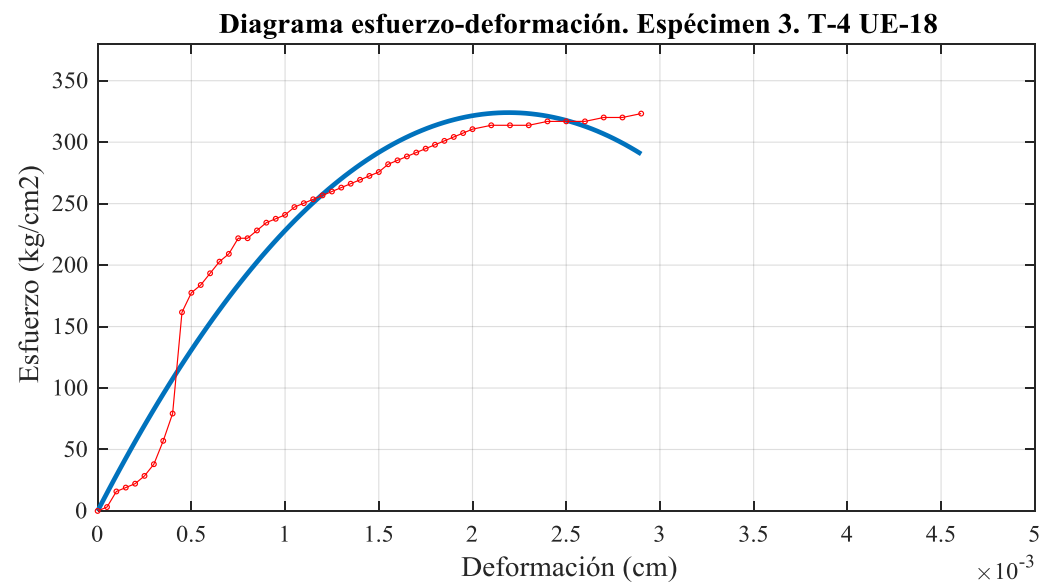
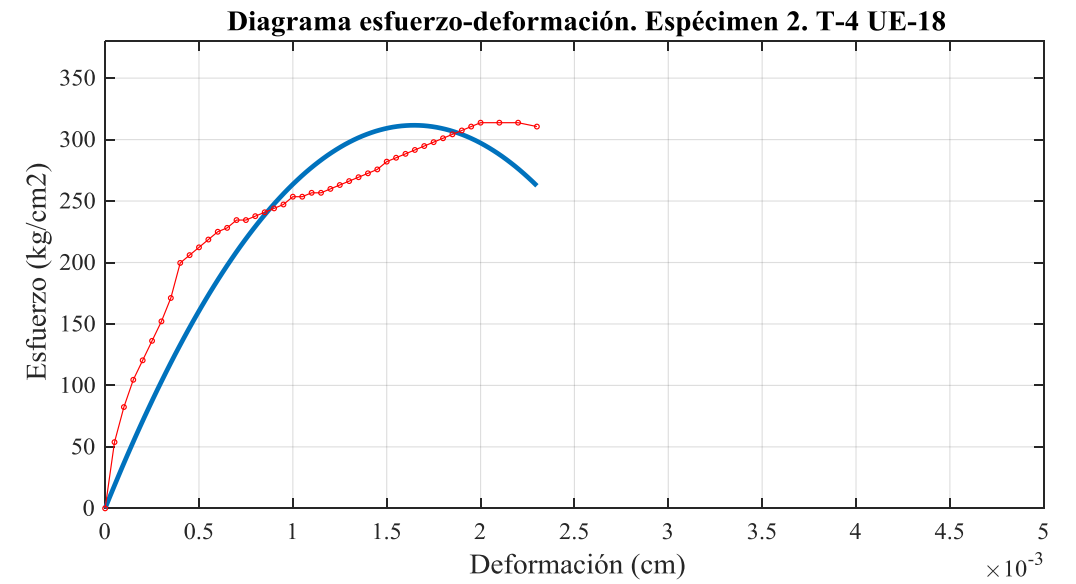
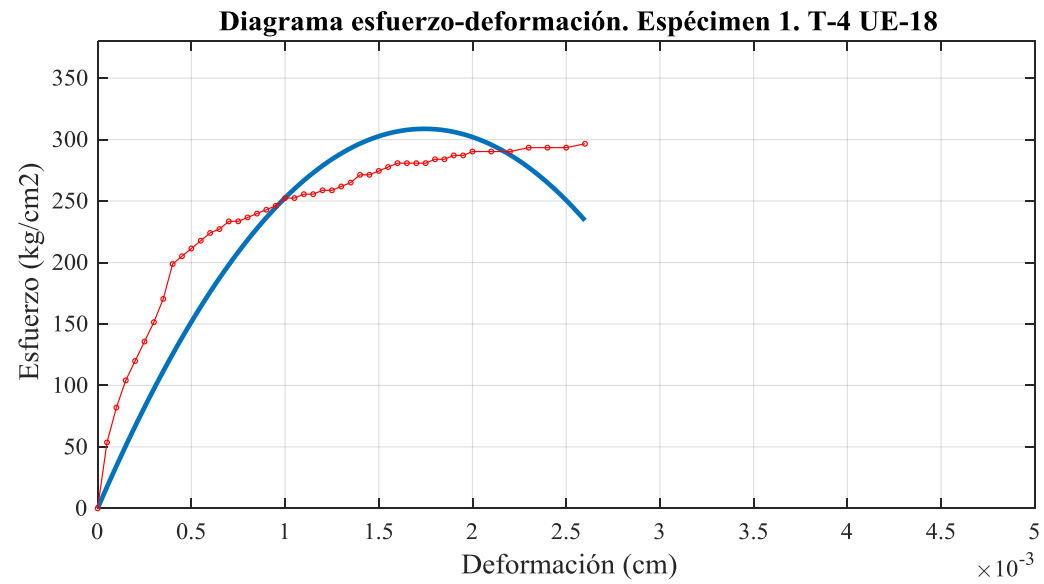
Relación a/c= 0.40

% Puzolana= 20%

% PET= 0%

Figura 24

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 4



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 5

Unidad experimental 16

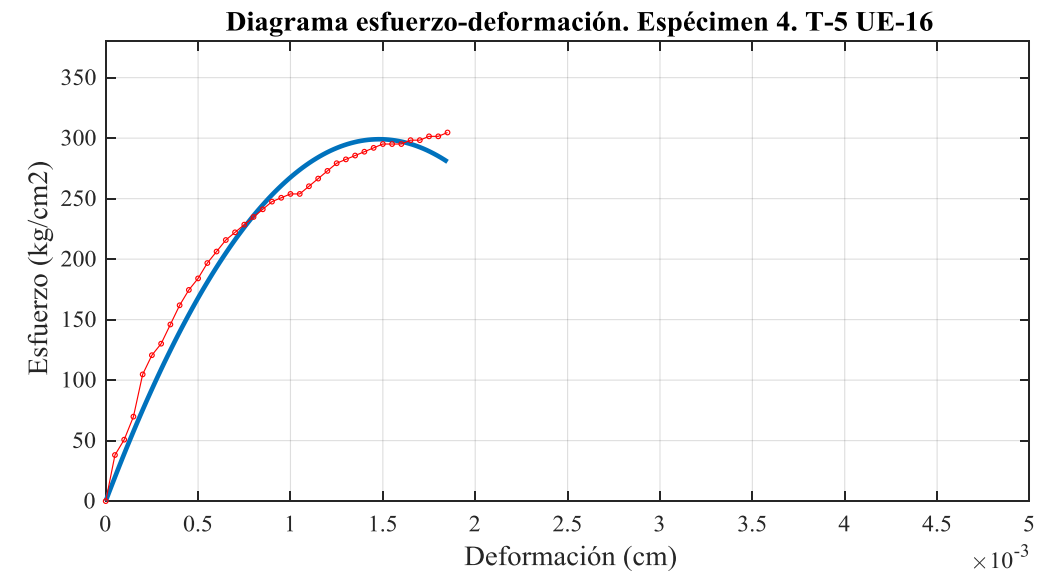
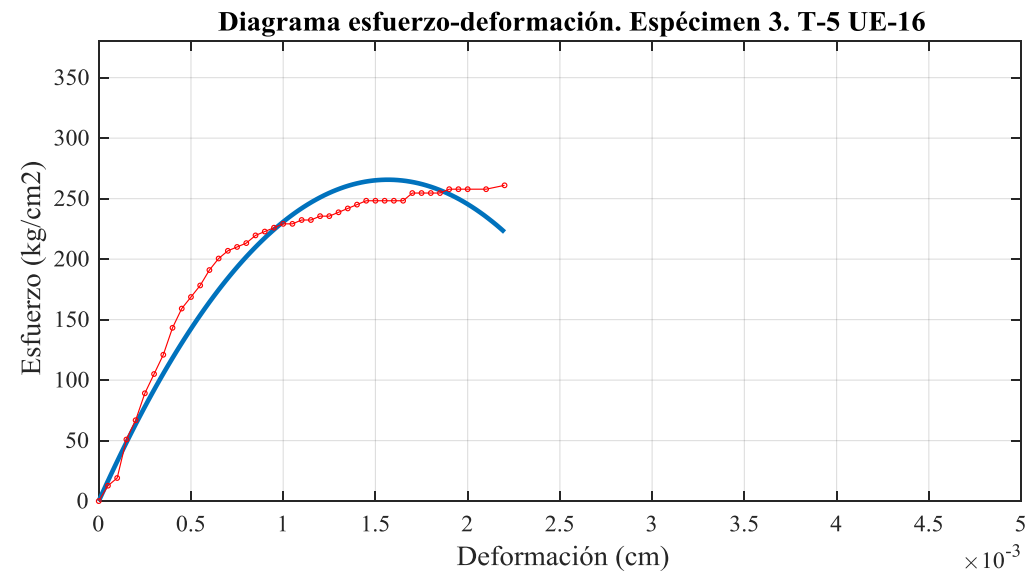
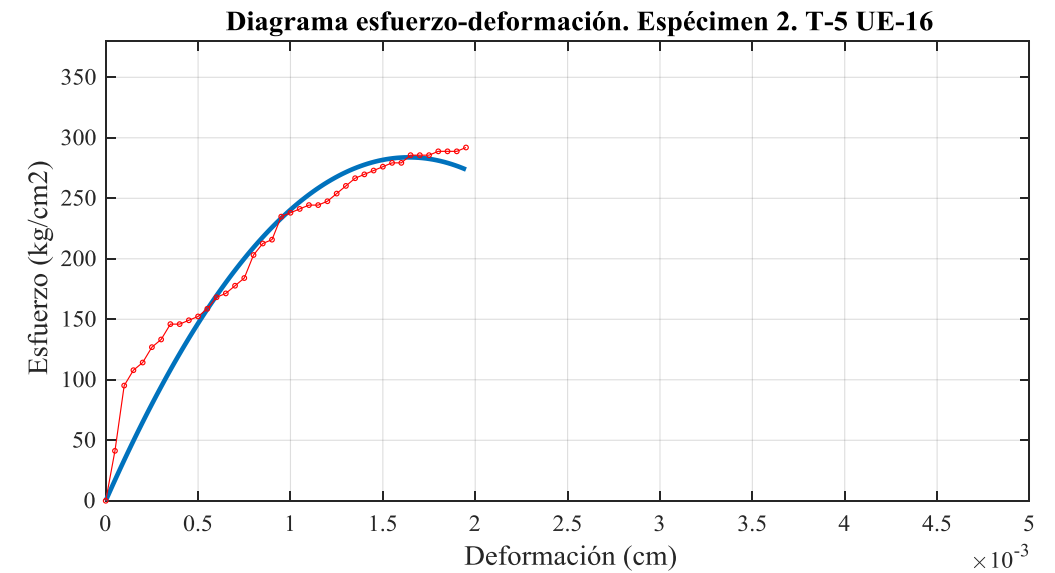
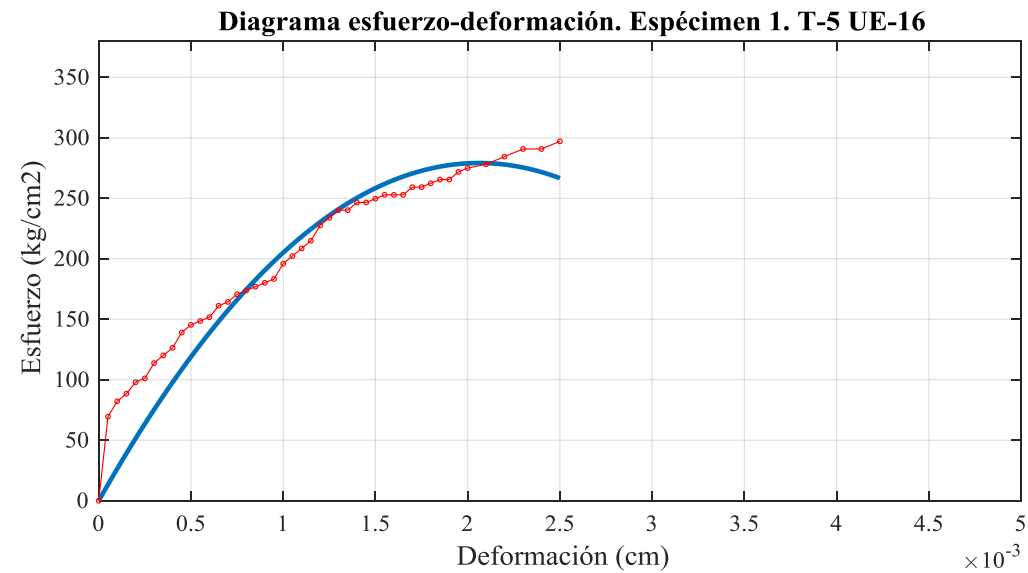
Relación a/c= 0.40

% Pozolana= 20%

% PET= 3%

Figura 25

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 5



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 6

Unidad experimental 8

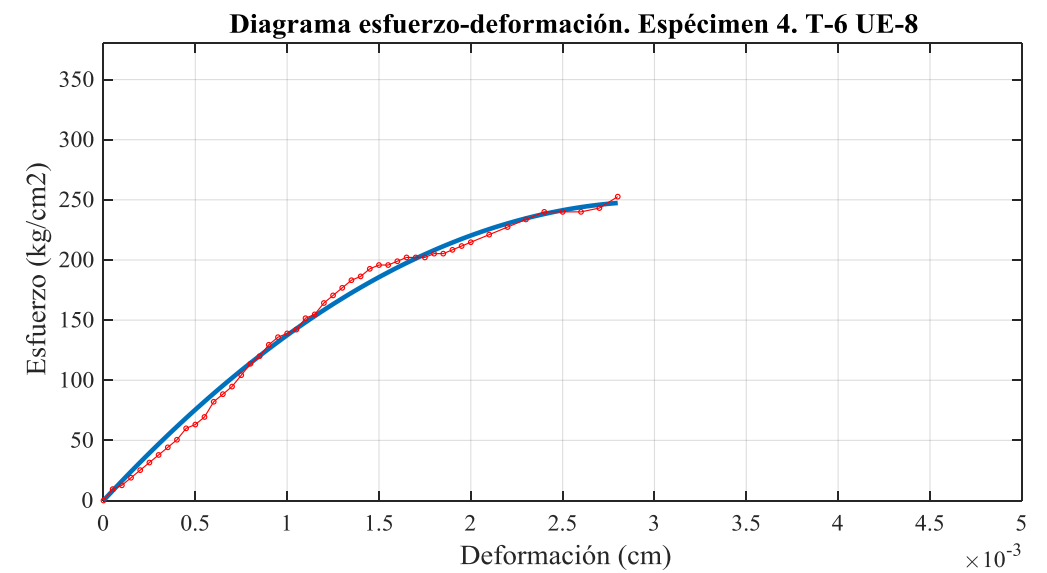
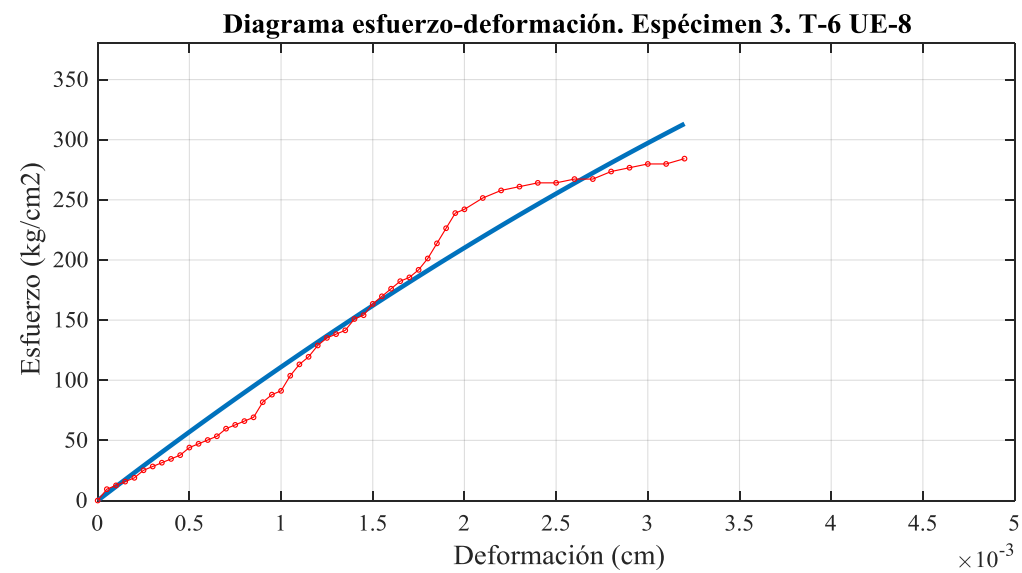
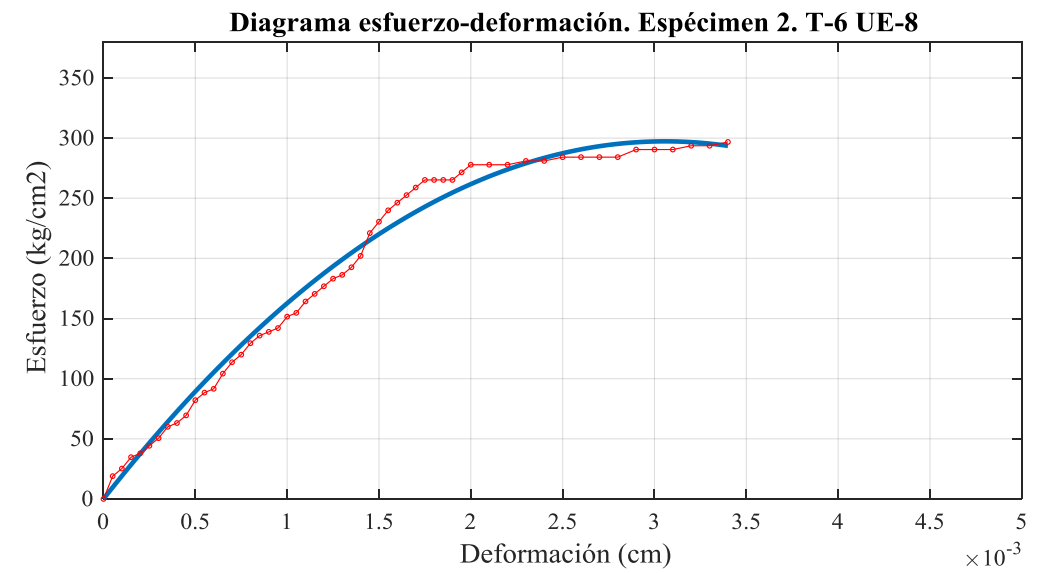
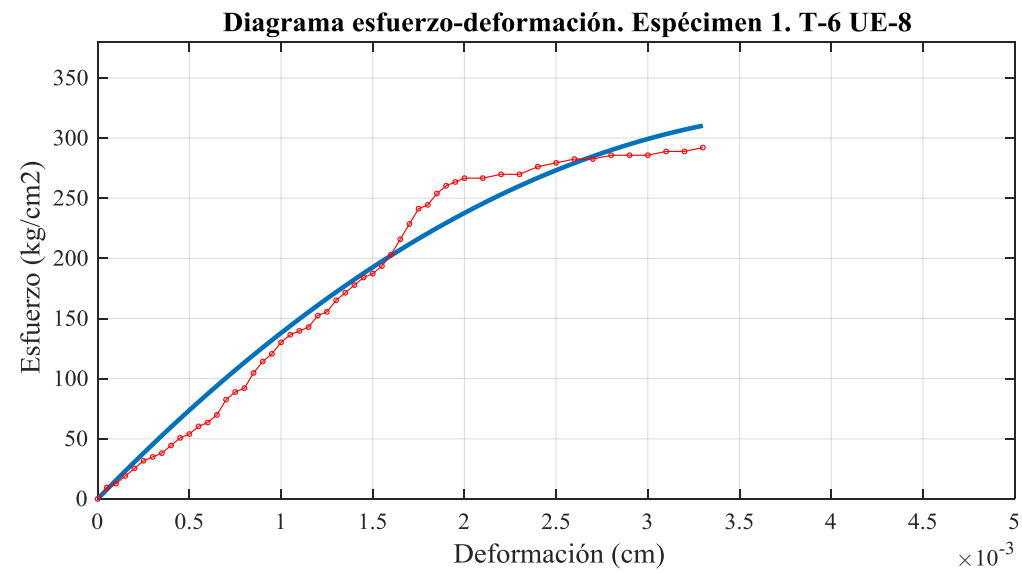
Relación a/c= 0.40

% Pozolana= 20%

% PET= 7%

Figura 26

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 6



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 7

Unidad experimental 6

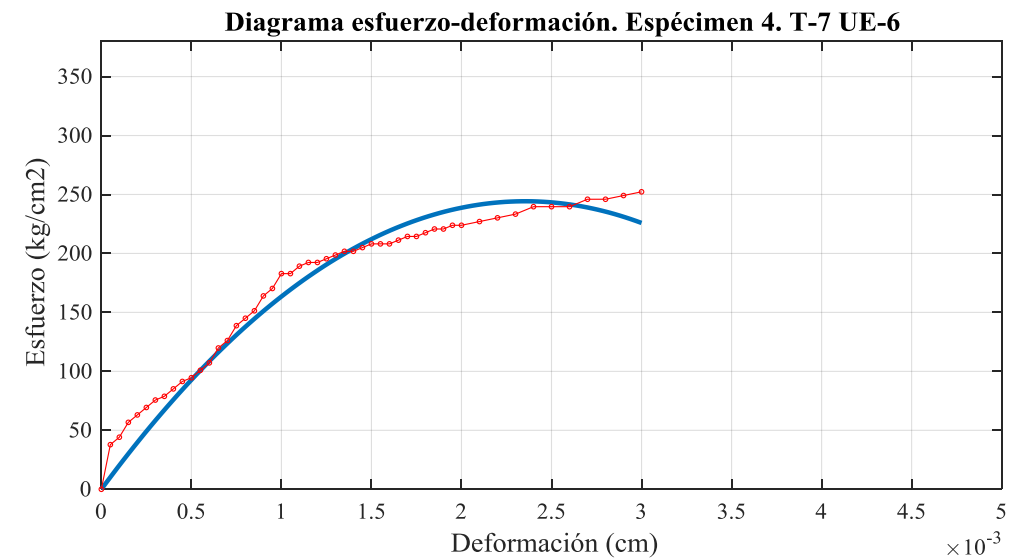
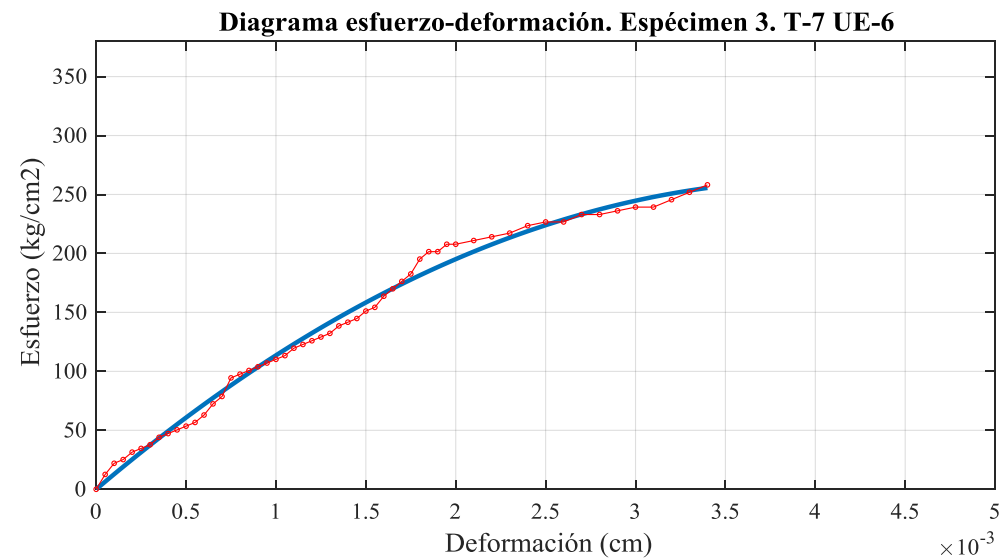
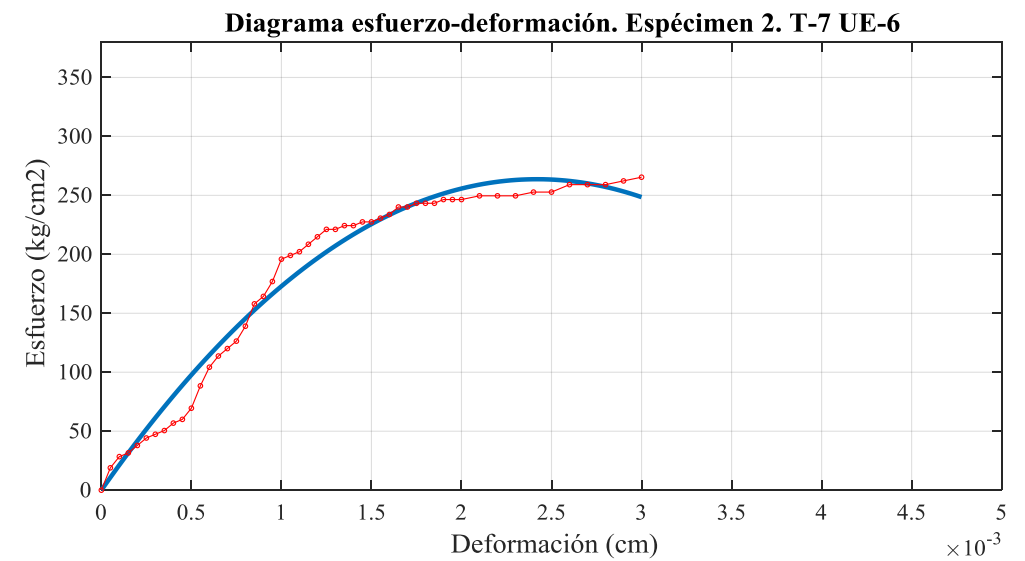
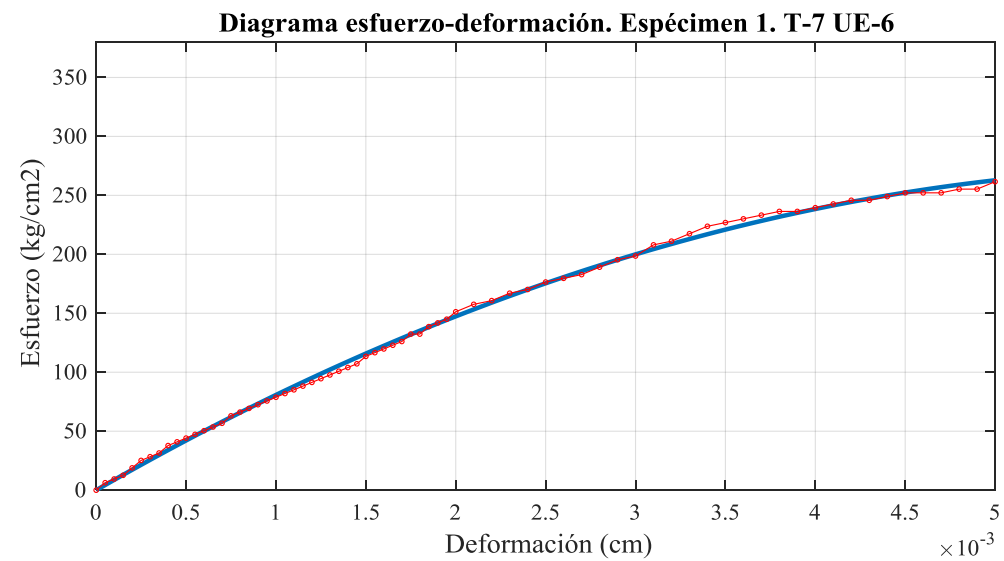
Relación a/c= 0.40

% Puzolana= 30%

% PET= 0%

Figura 27

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 7



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 8

Unidad experimental 2

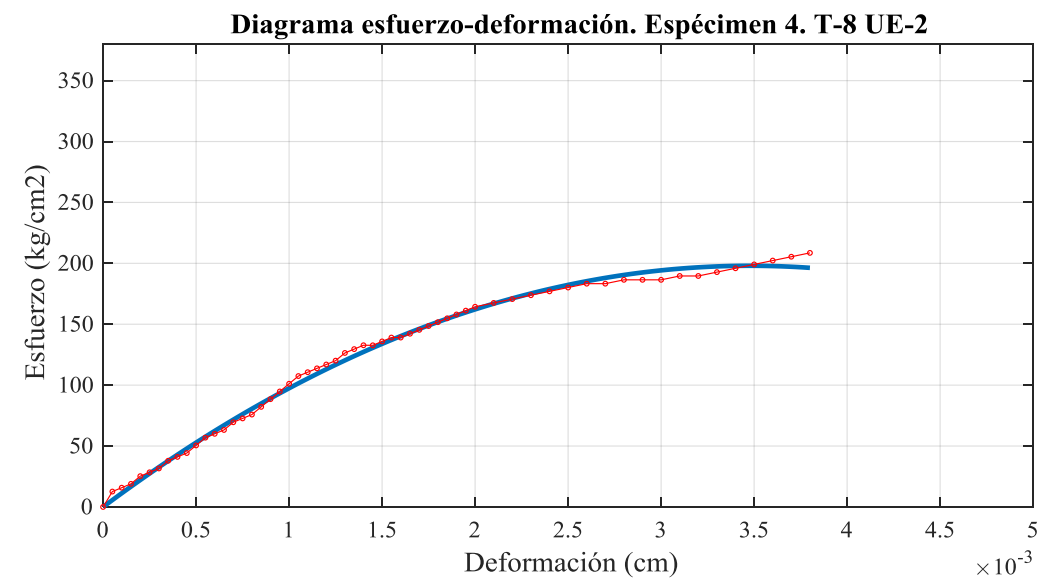
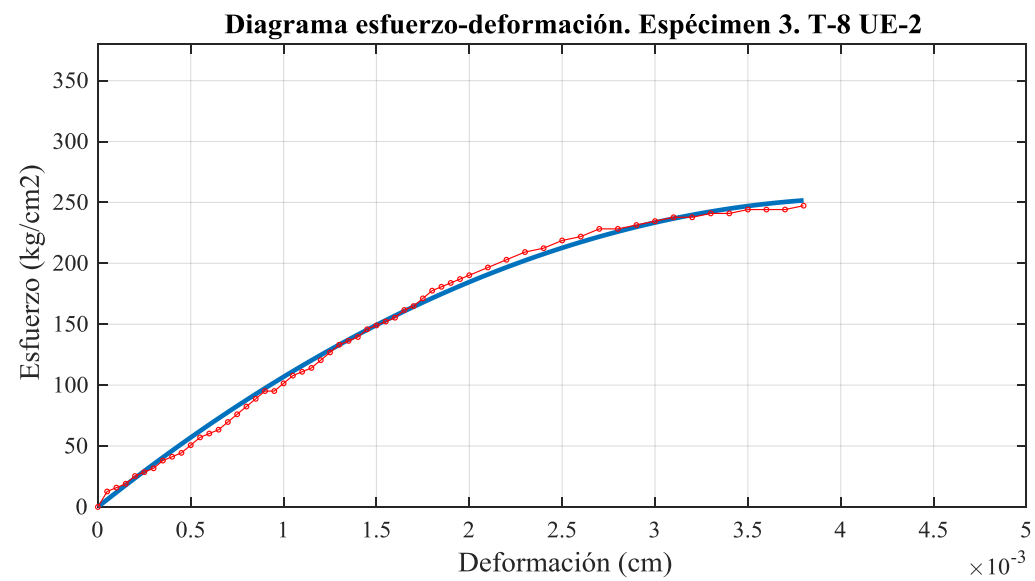
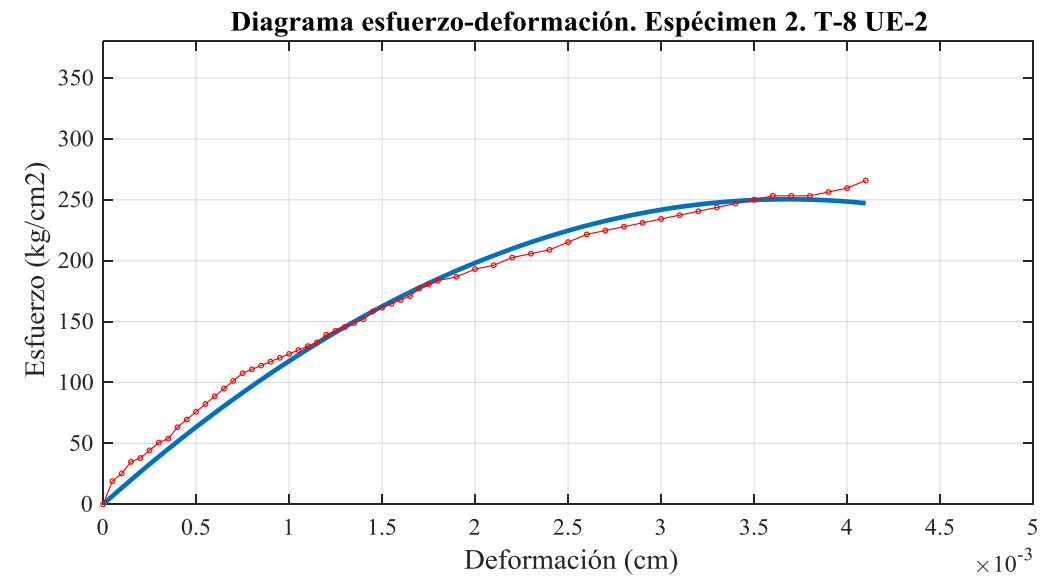
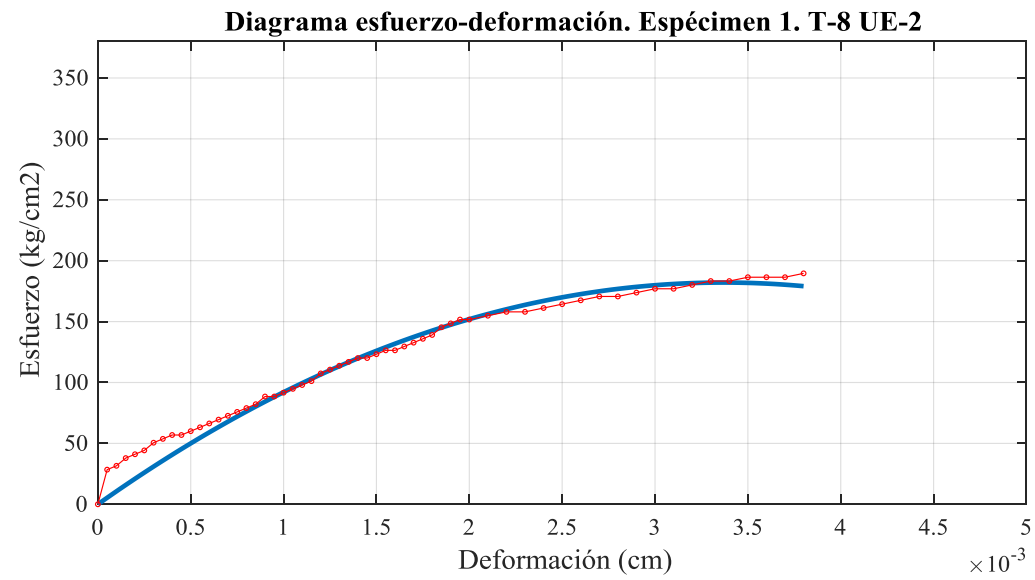
Relación a/c= 0.40

% Puzolana= 30%

% PET= 3%

Figura 28

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 8



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 9

Unidad experimental 4

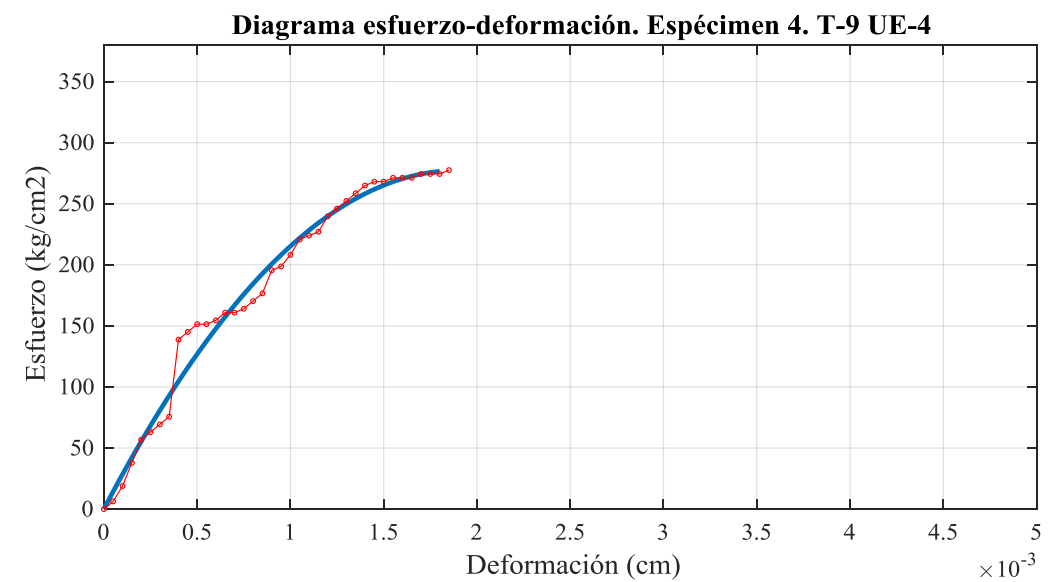
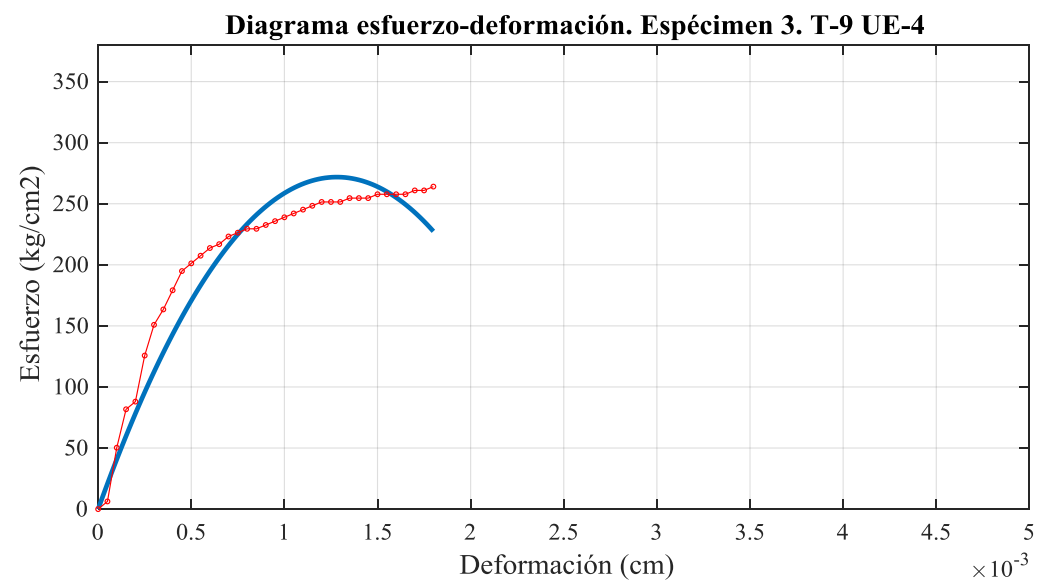
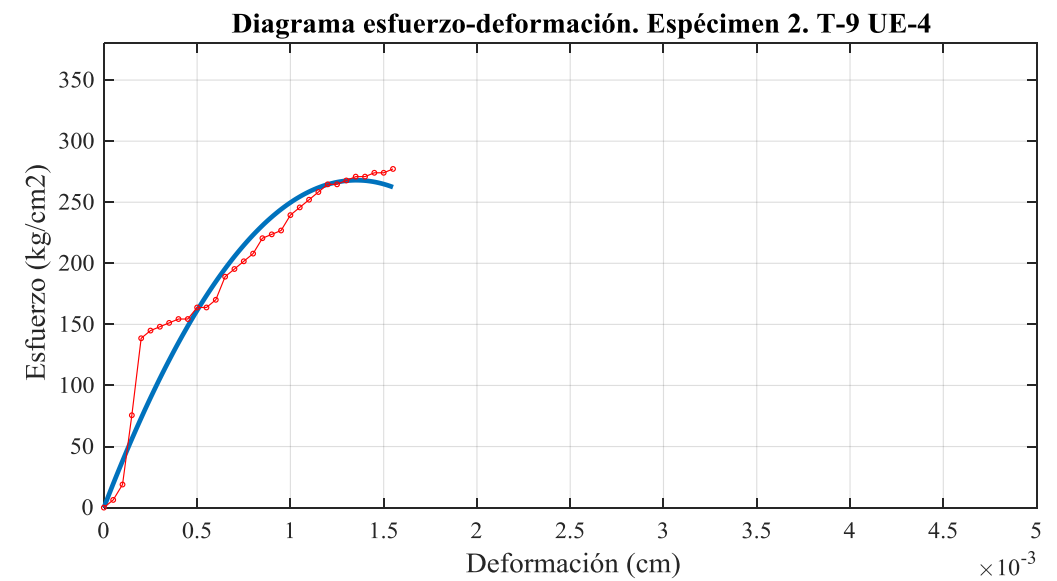
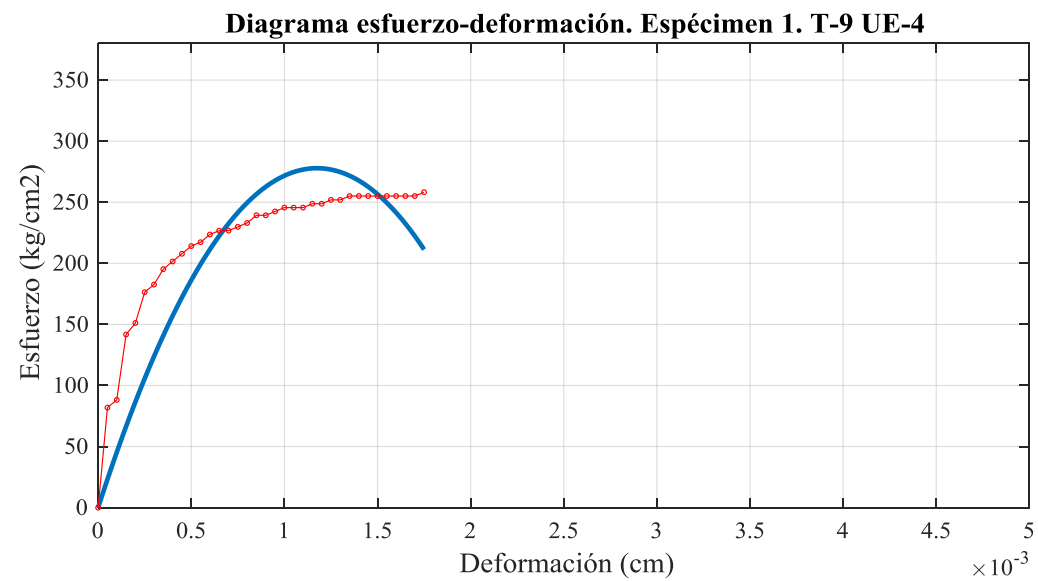
Relación a/c= 0.40

% Puzolana= 30%

% PET= 7%

Figura 29

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 9



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 10

Unidad experimental 17

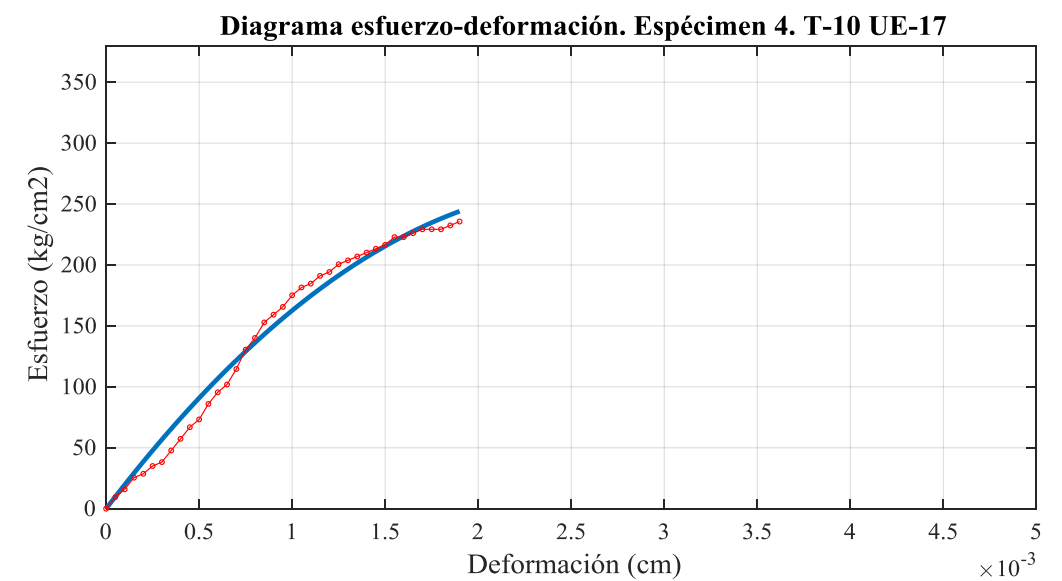
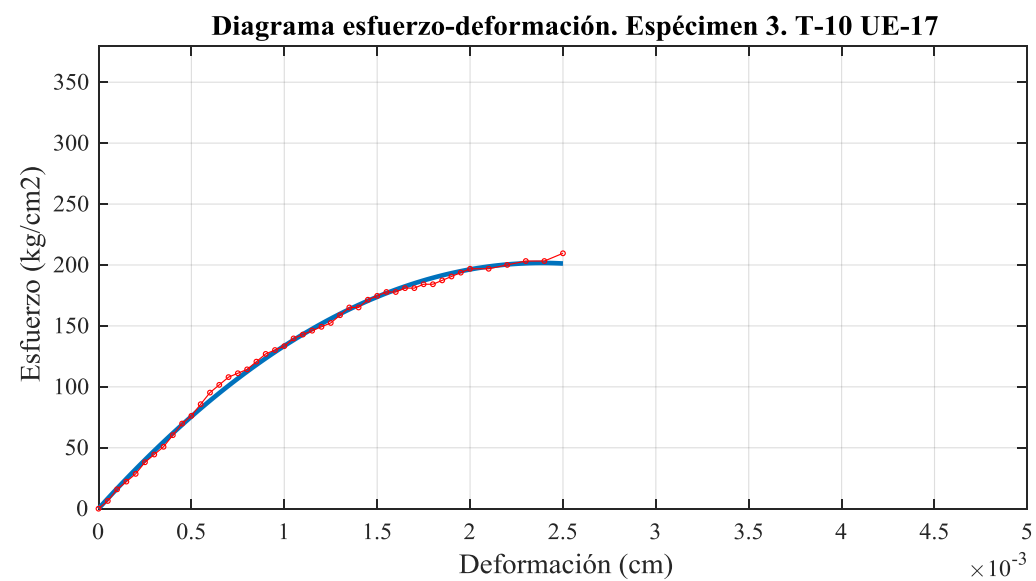
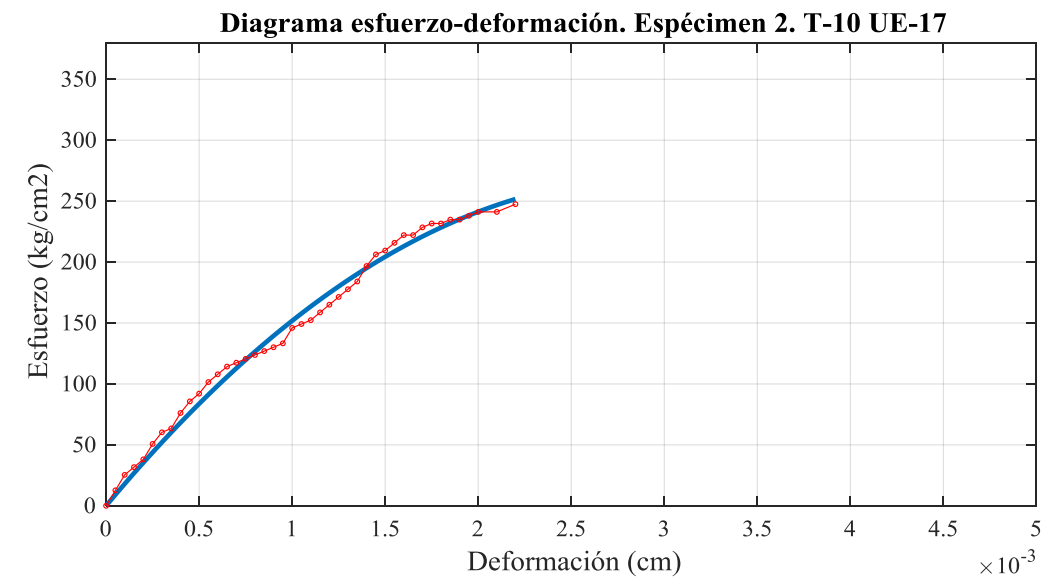
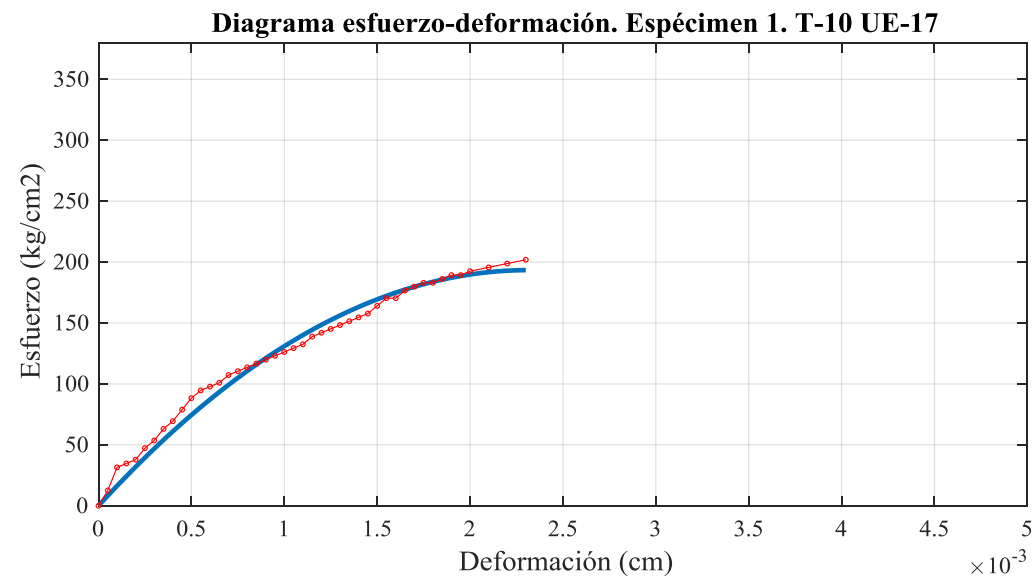
Relación a/c= 0.60

% Puzolana= 0%

% PET= 0%

Figura 30

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 10



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 11

Unidad experimental 14

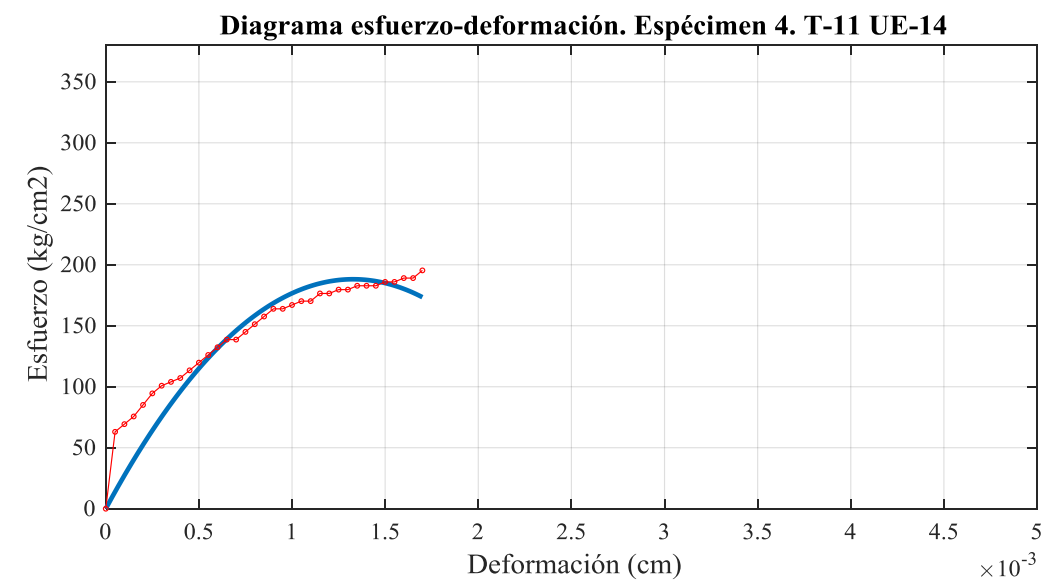
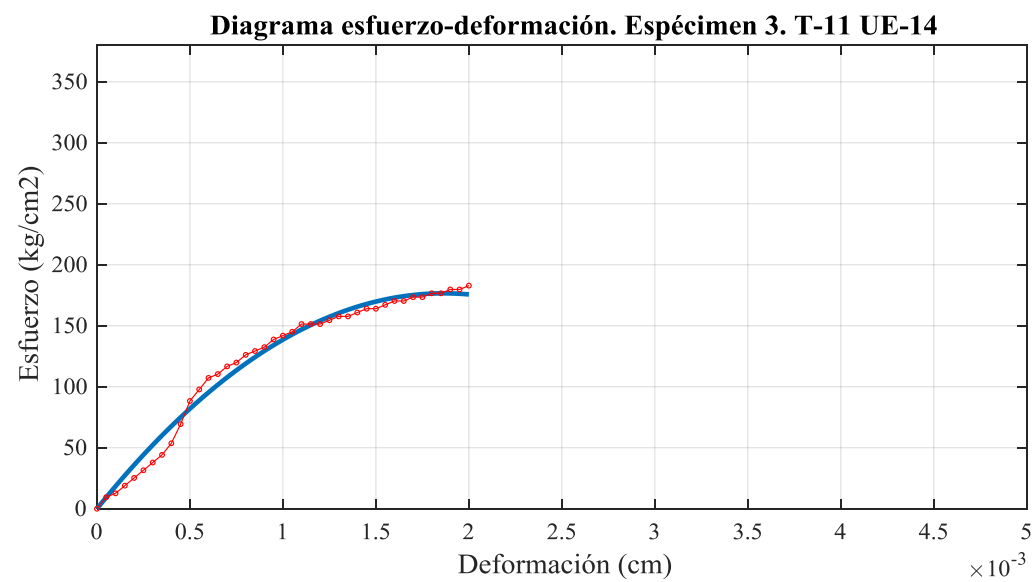
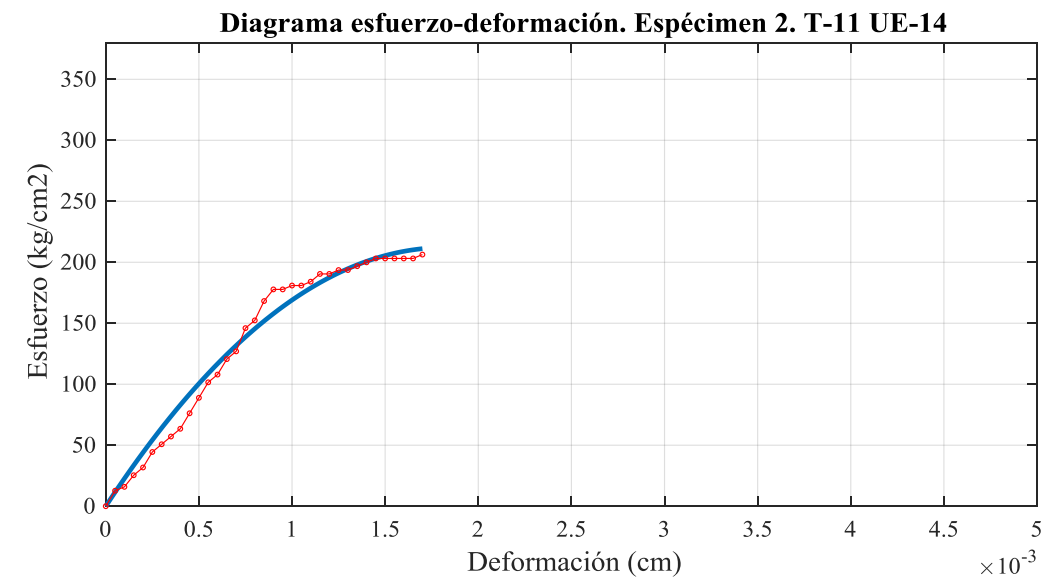
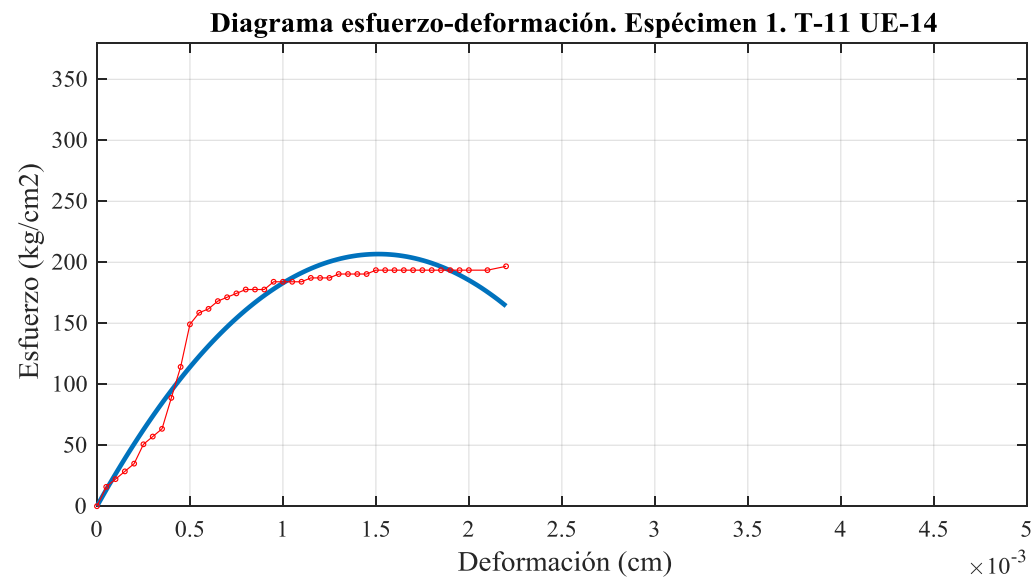
Relación a/c= 0.60

% Puzolana= 0%

% PET= 3%

Figura 31

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 11



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 12

Unidad experimental 3

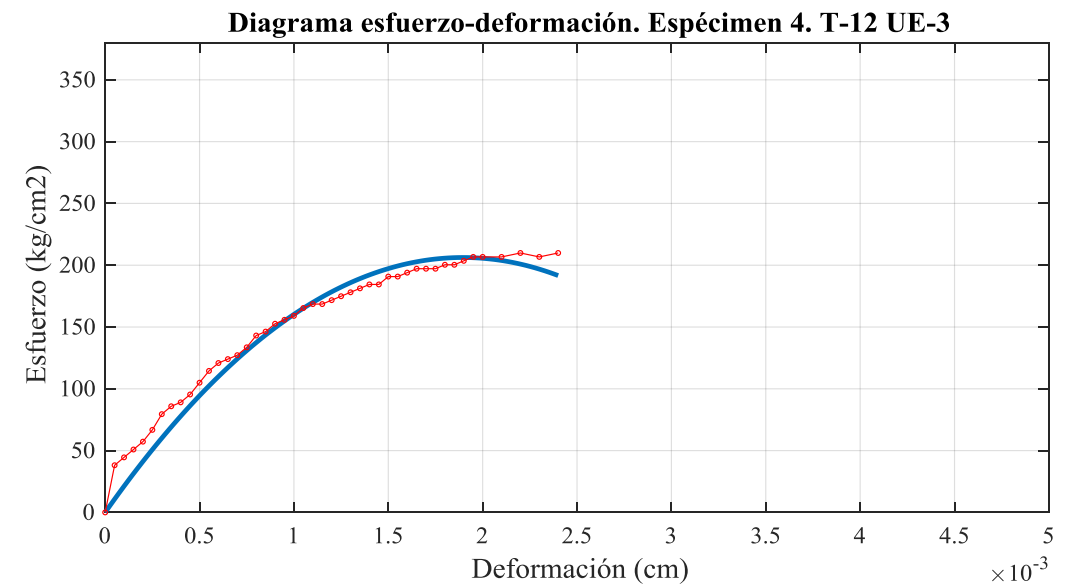
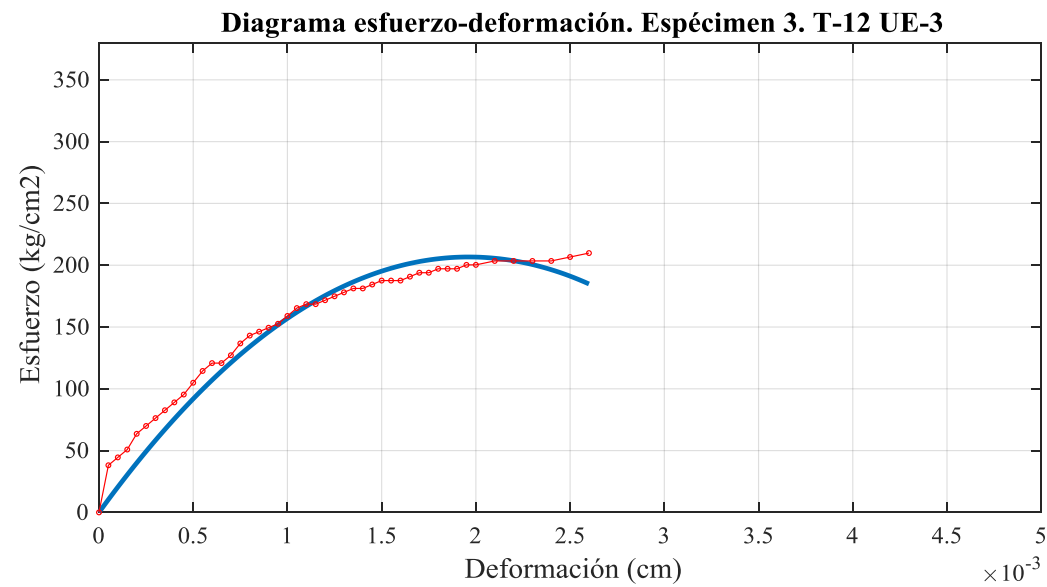
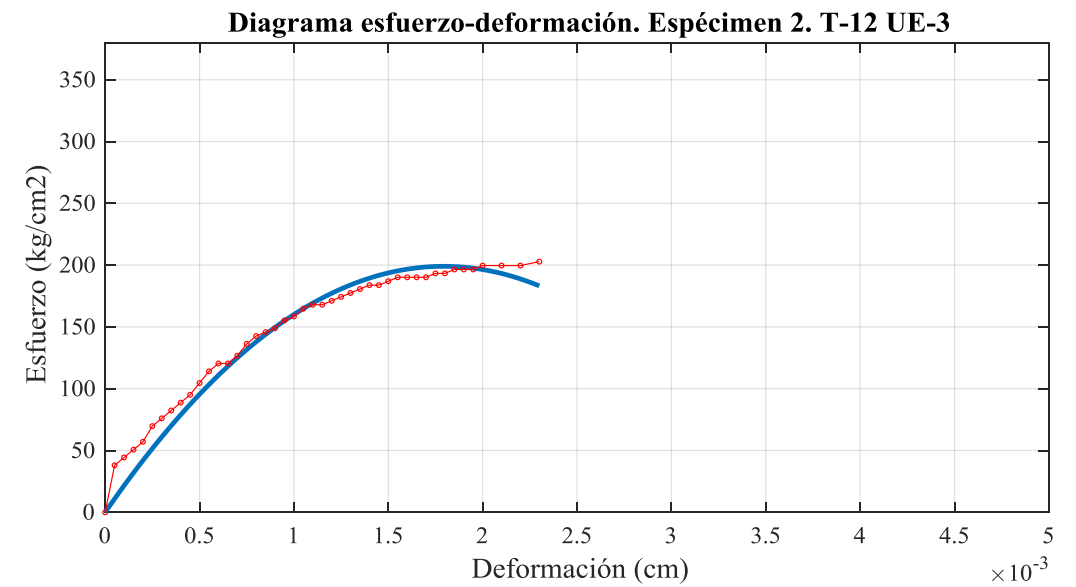
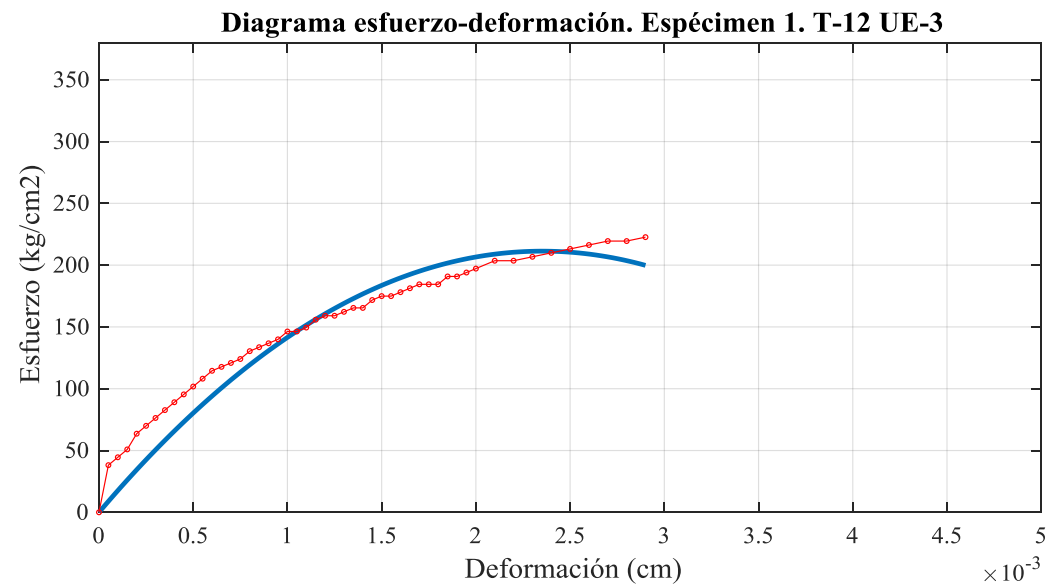
Relación a/c= 0.60

% Puzolana= 0%

% PET= 7%

Figura 32

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 12



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 13

Unidad experimental 13

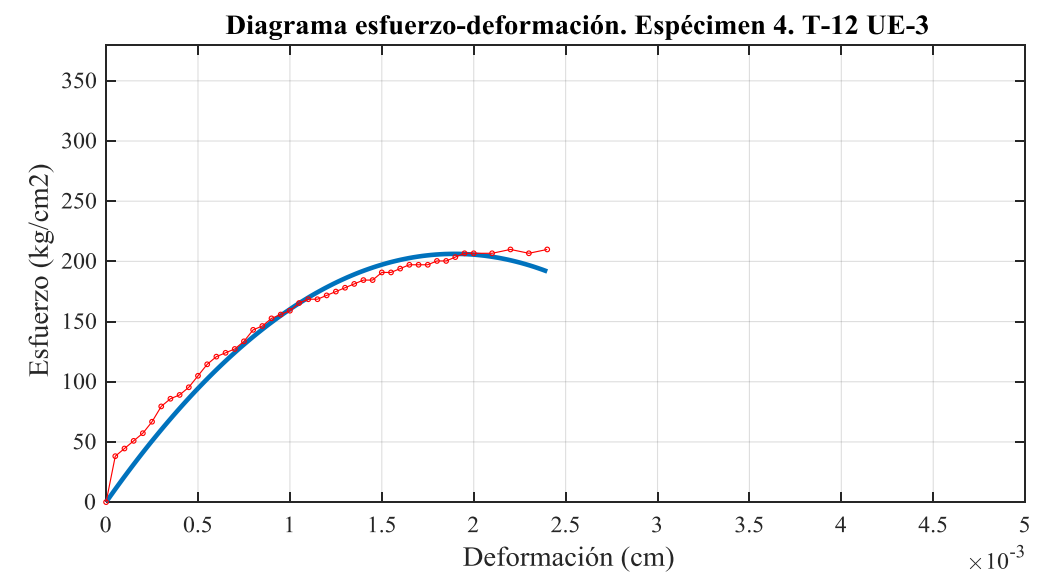
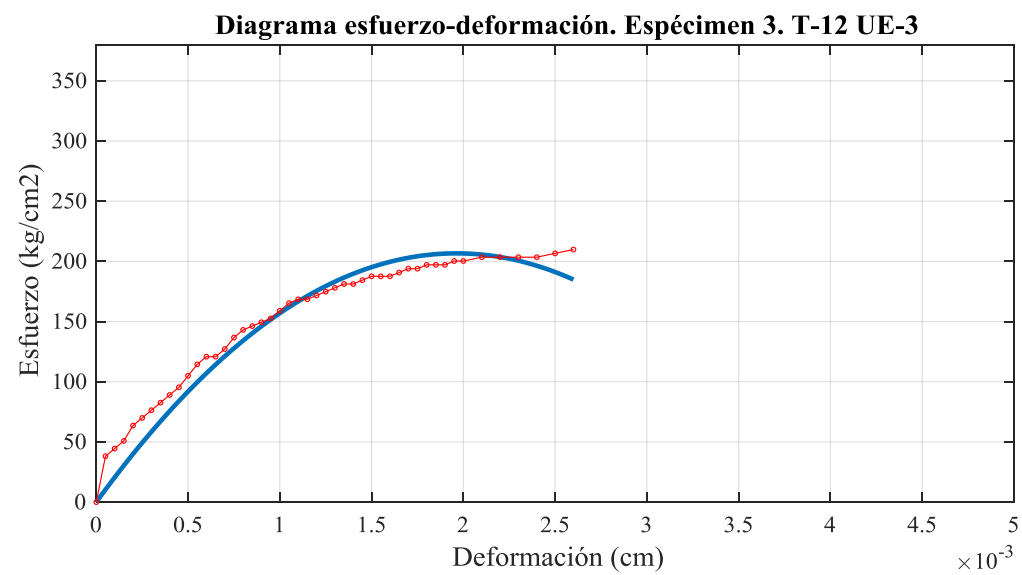
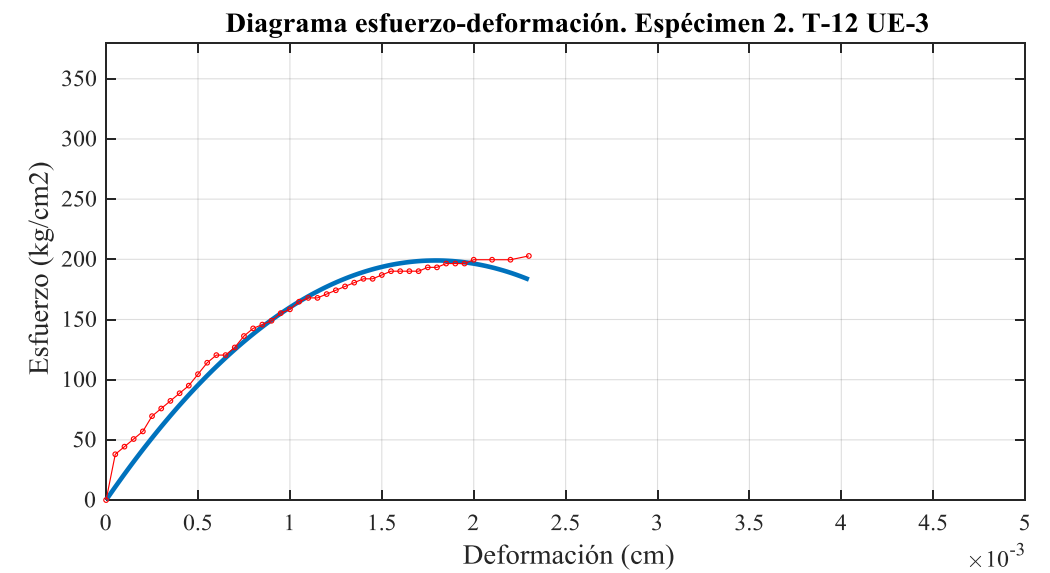
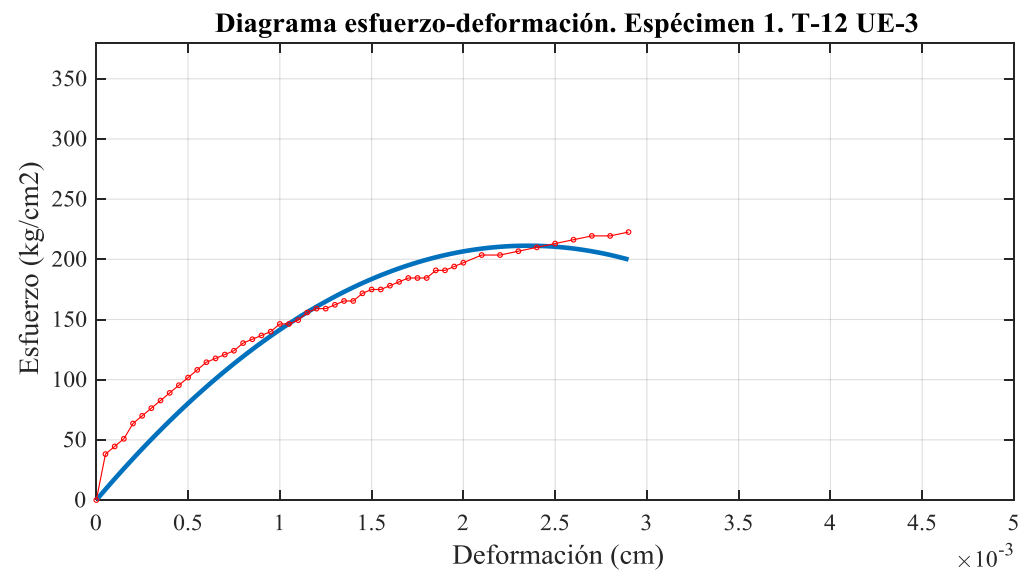
Relación a/c= 0.60

% Puzolana= 20%

% PET= 0%

Figura 33

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 13



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 14

Unidad experimental 5

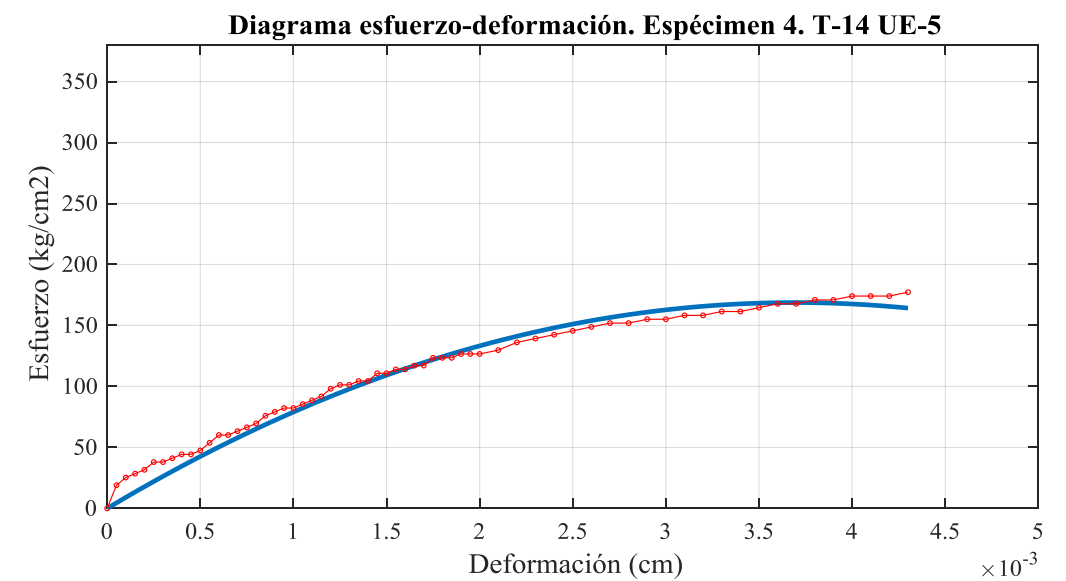
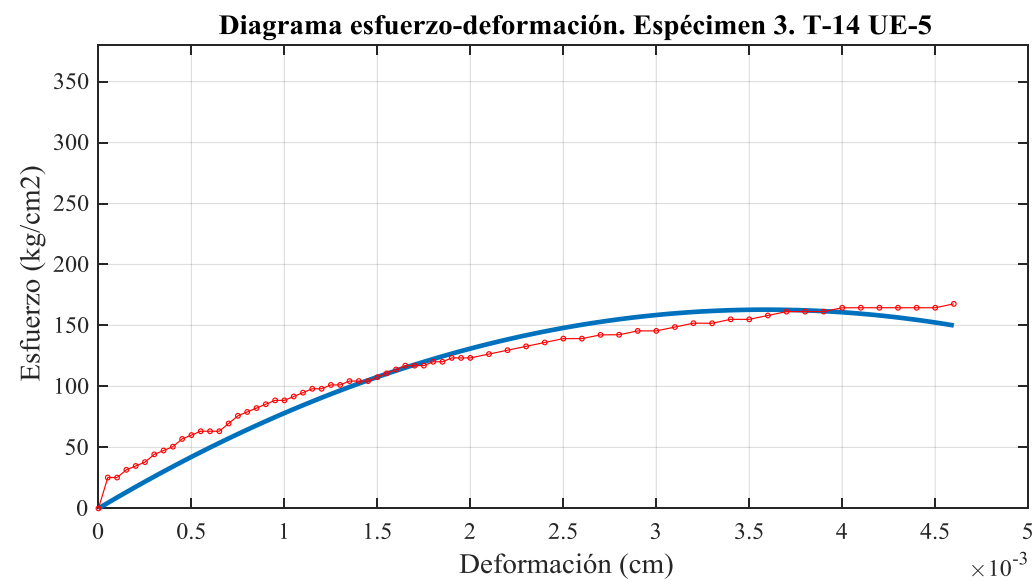
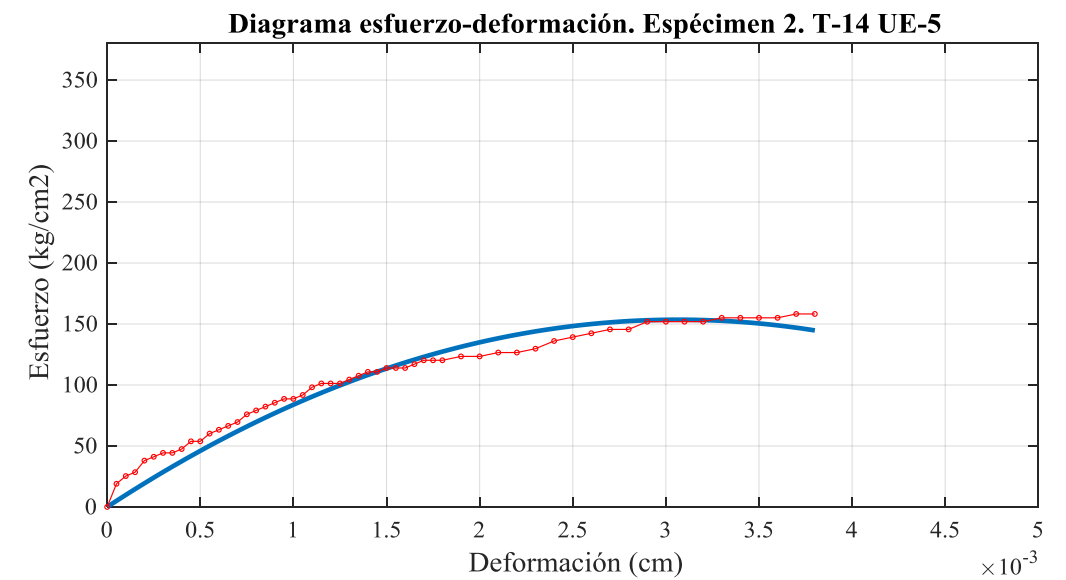
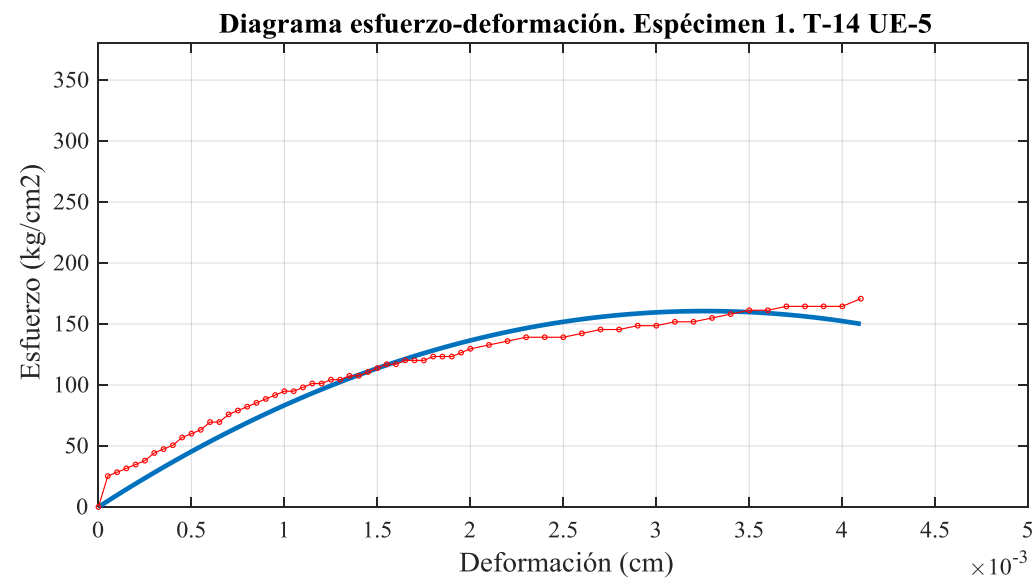
Relación a/c= 0.60

% Pozolana= 20%

% PET= 3%

Figura 34

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 14



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 15

Unidad experimental 15

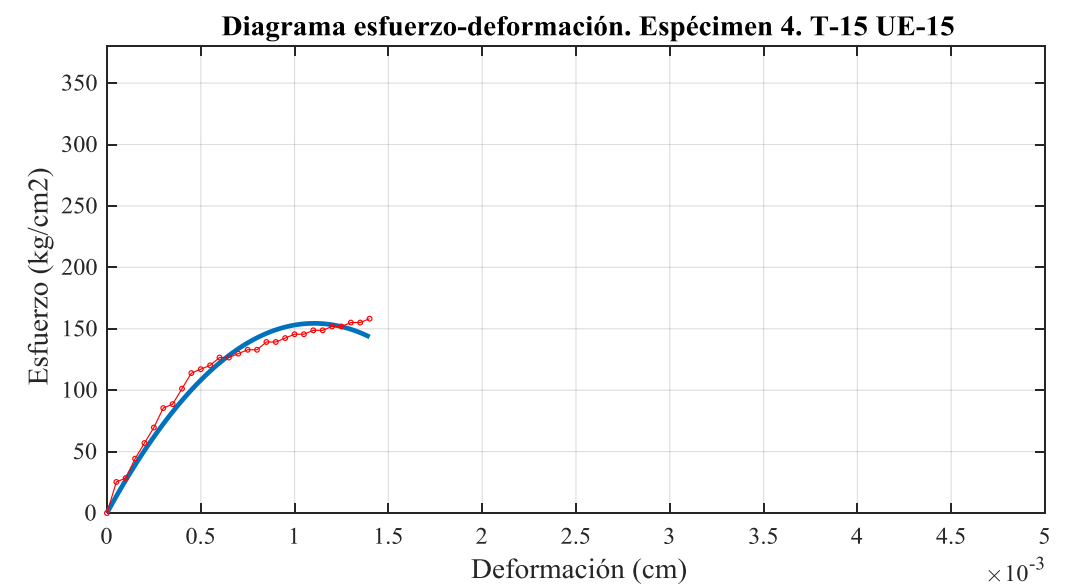
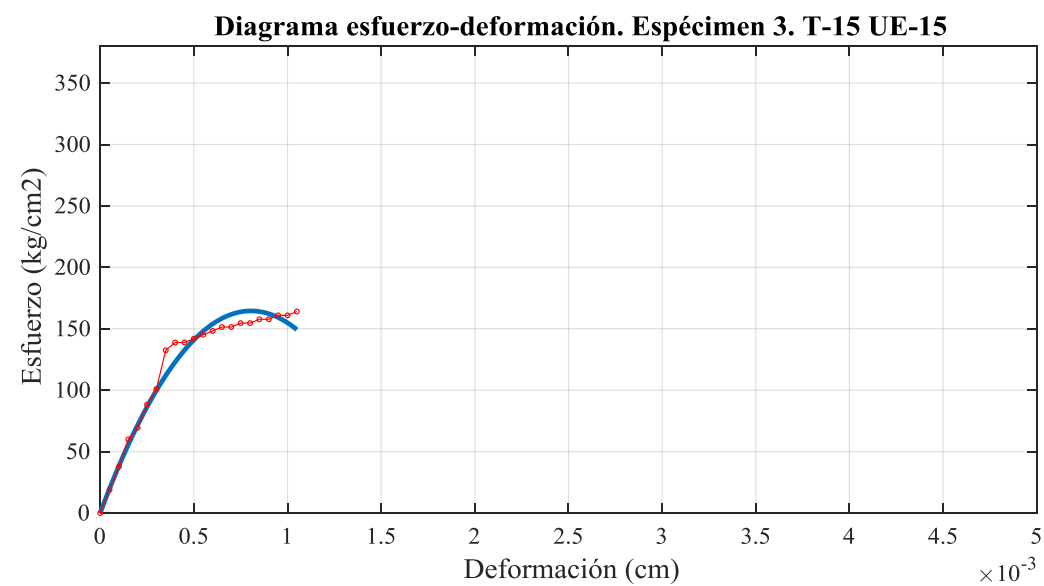
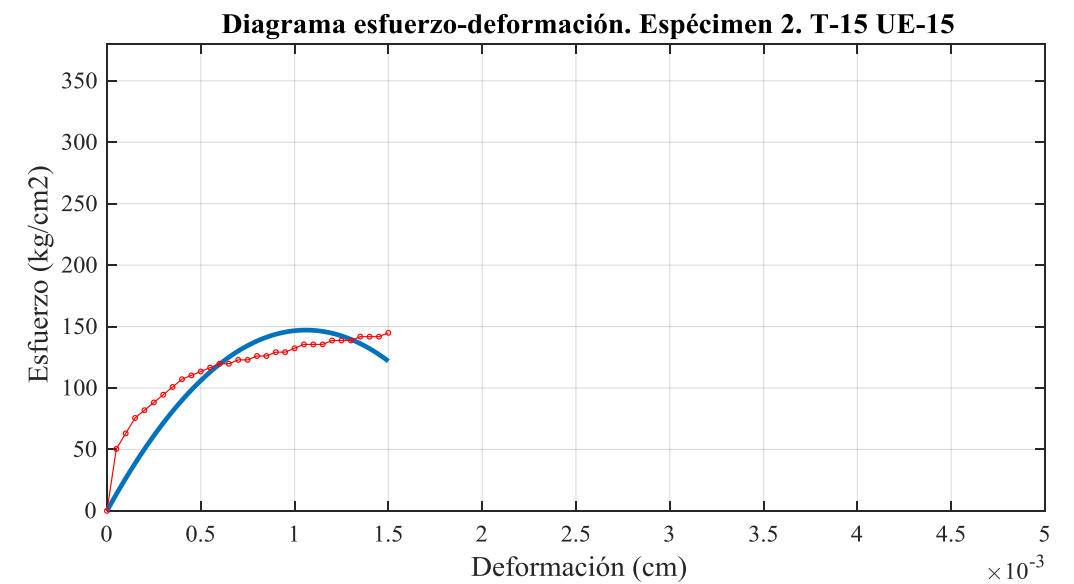
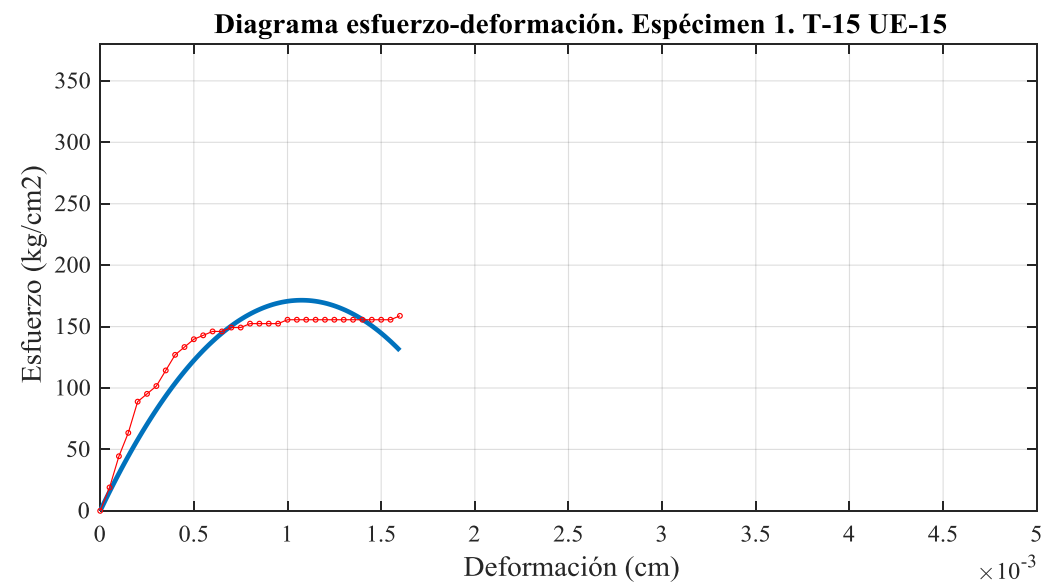
Relación a/c= 0.60

% Puzolana= 20%

% PET= 7%

Figura 35

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 15



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 16

Unidad experimental 10

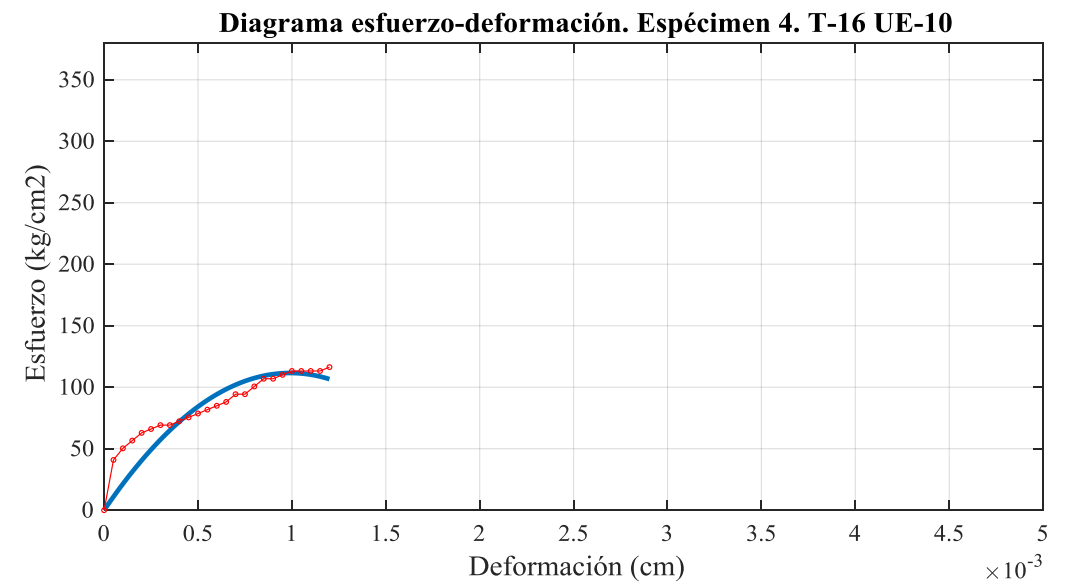
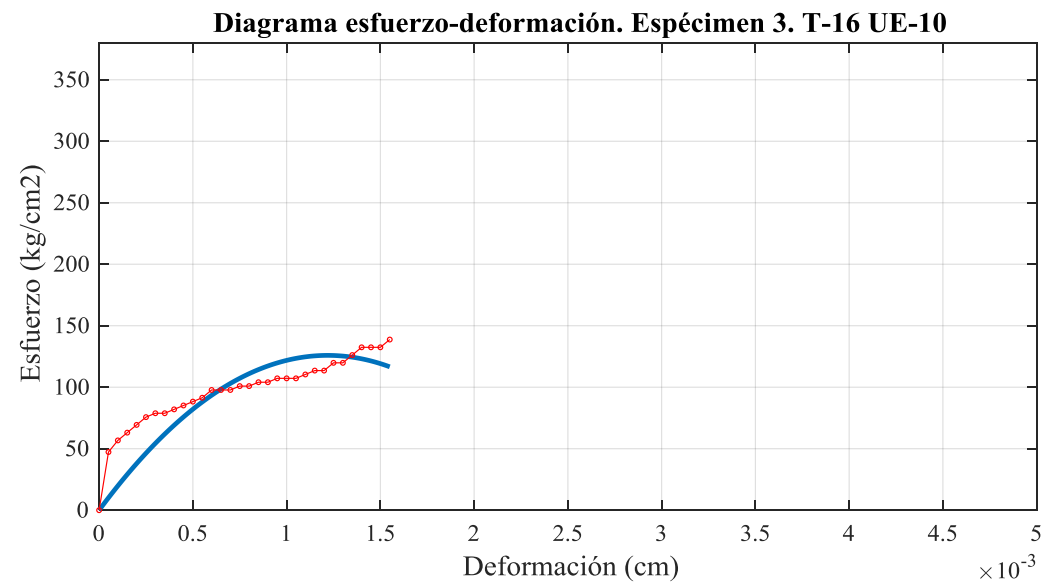
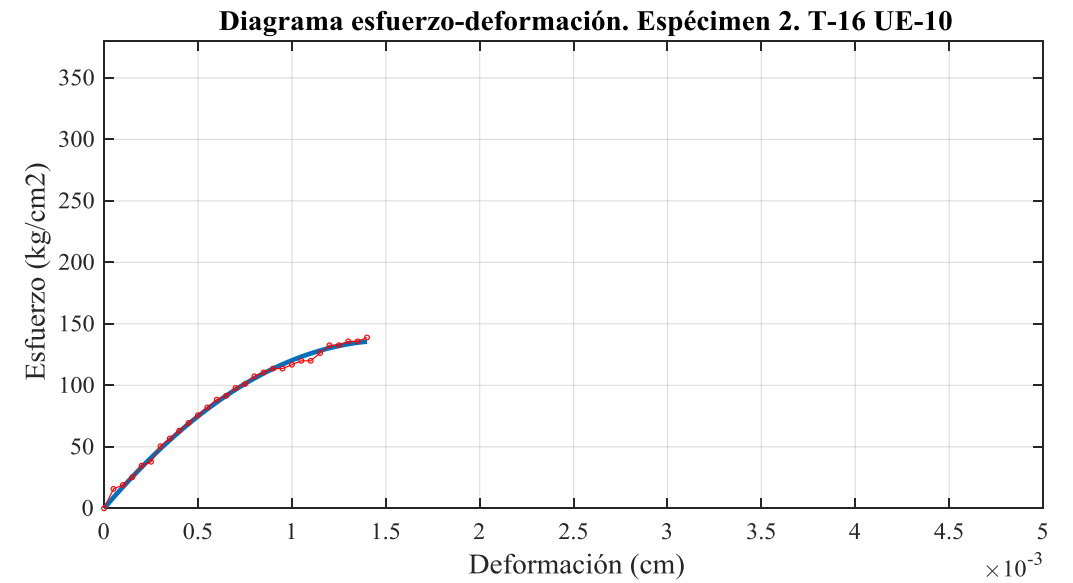
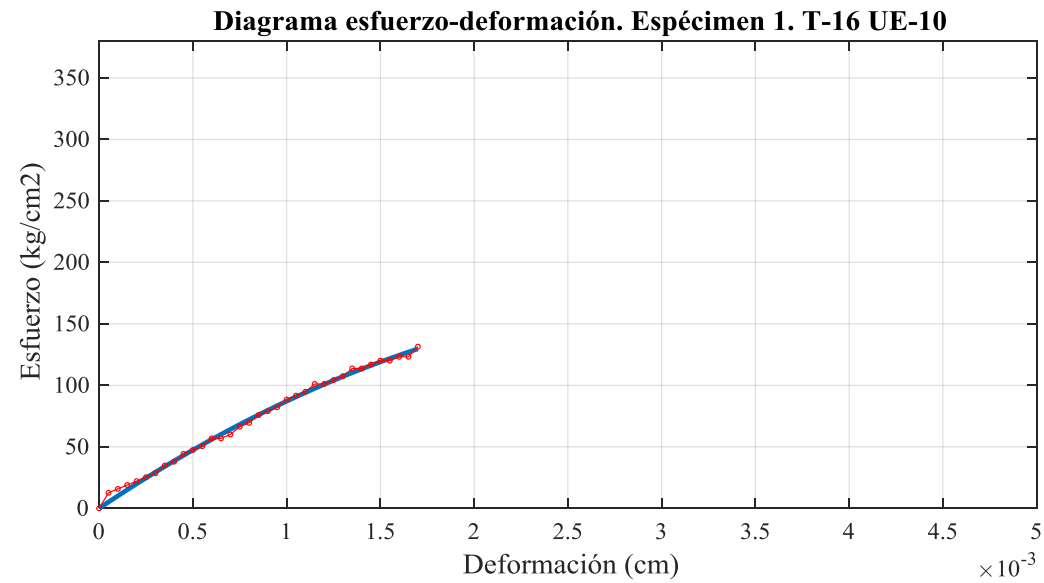
Relación a/c= 0.60

% Puzolana= 30%

% PET= 0%

Figura 36

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 16



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 17

Unidad experimental 7

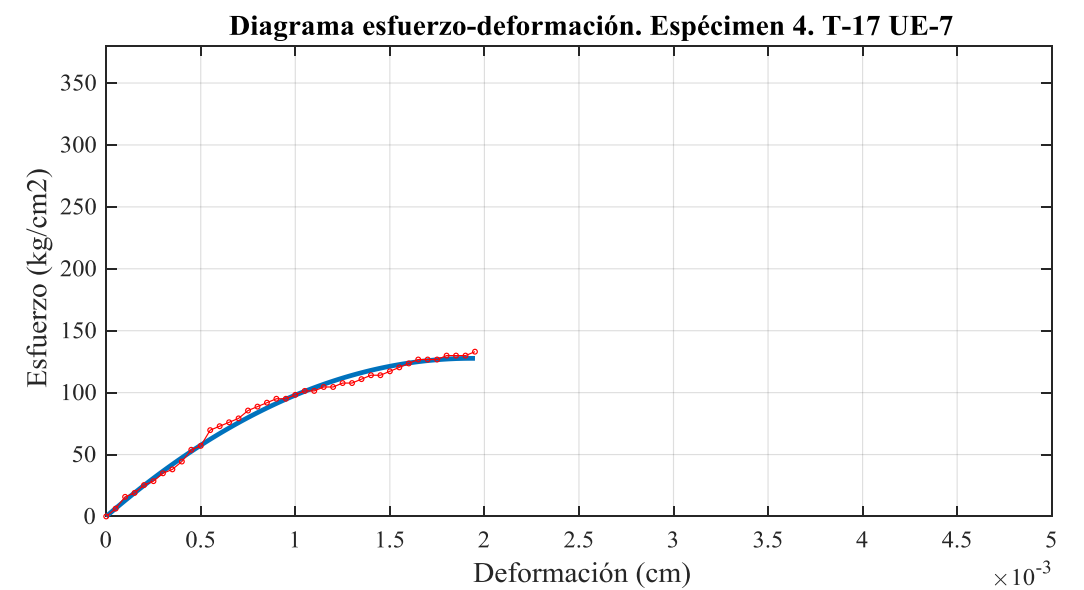
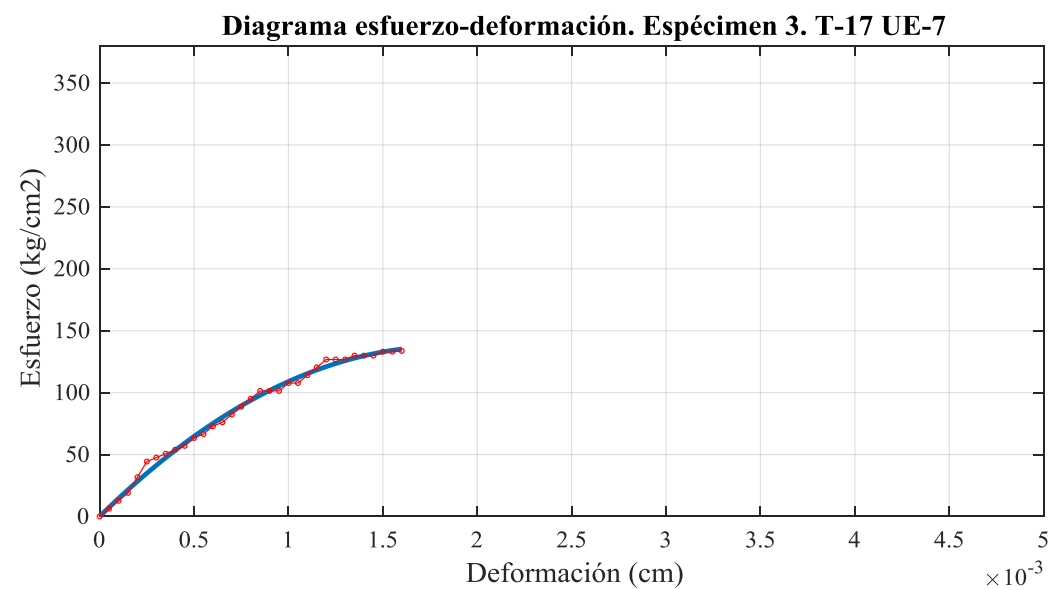
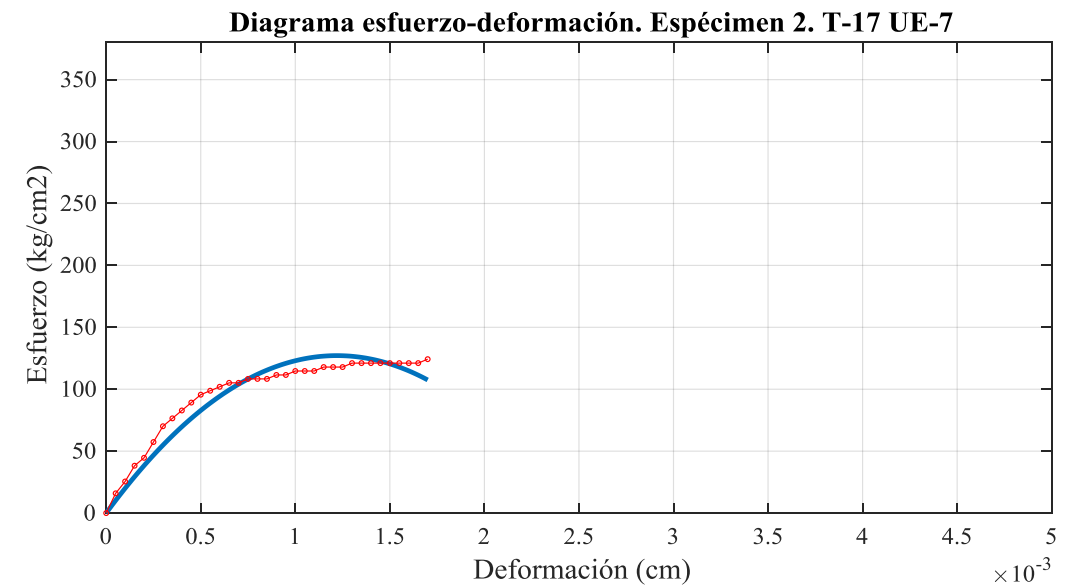
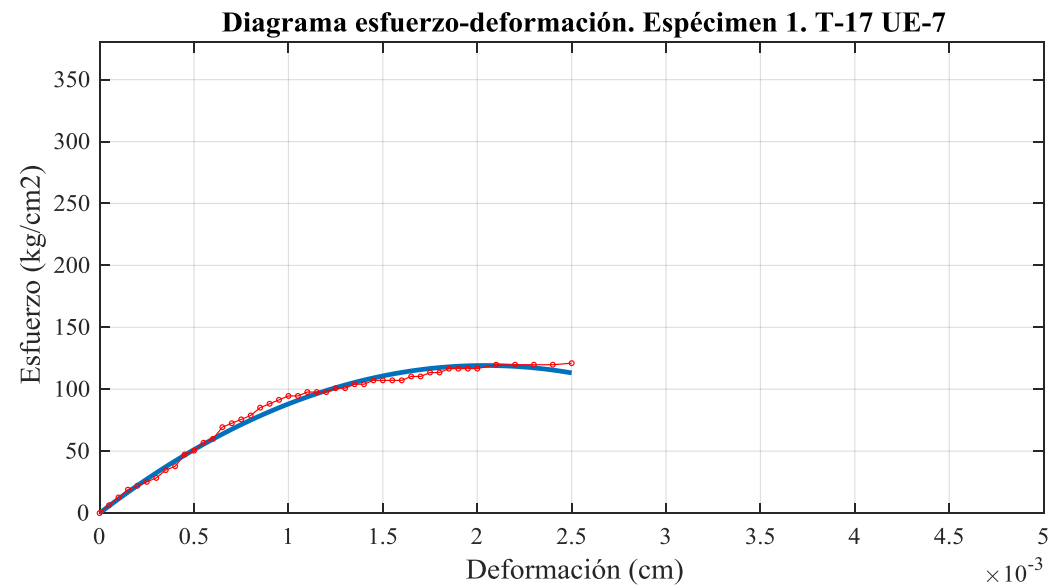
Relación a/c= 0.60

% Pozolana= 30%

% PET= 3%

Figura 37

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 17



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 18

Unidad experimental 1

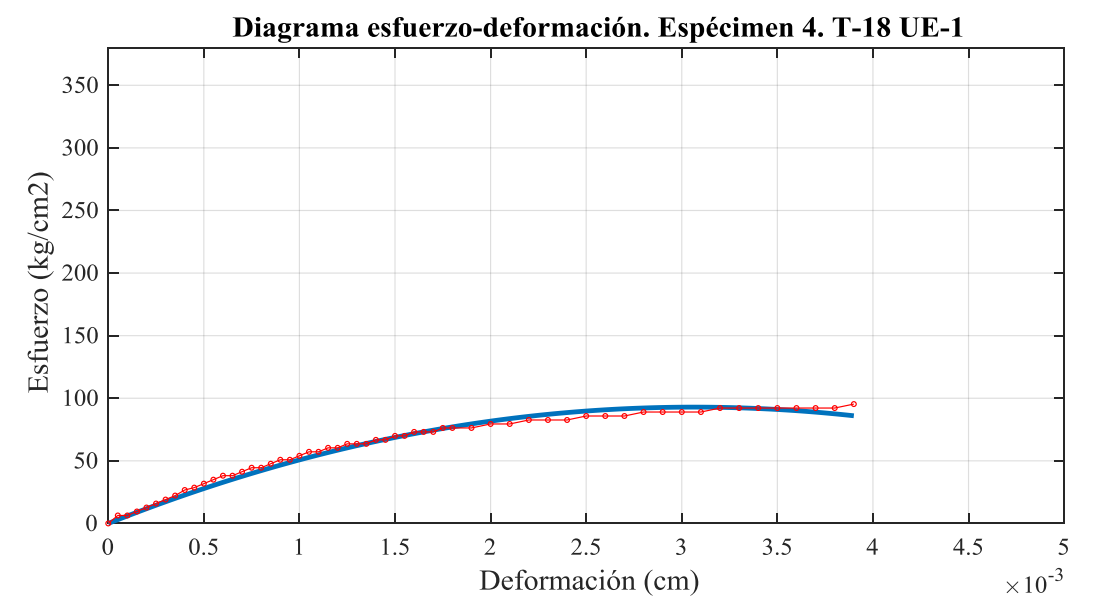
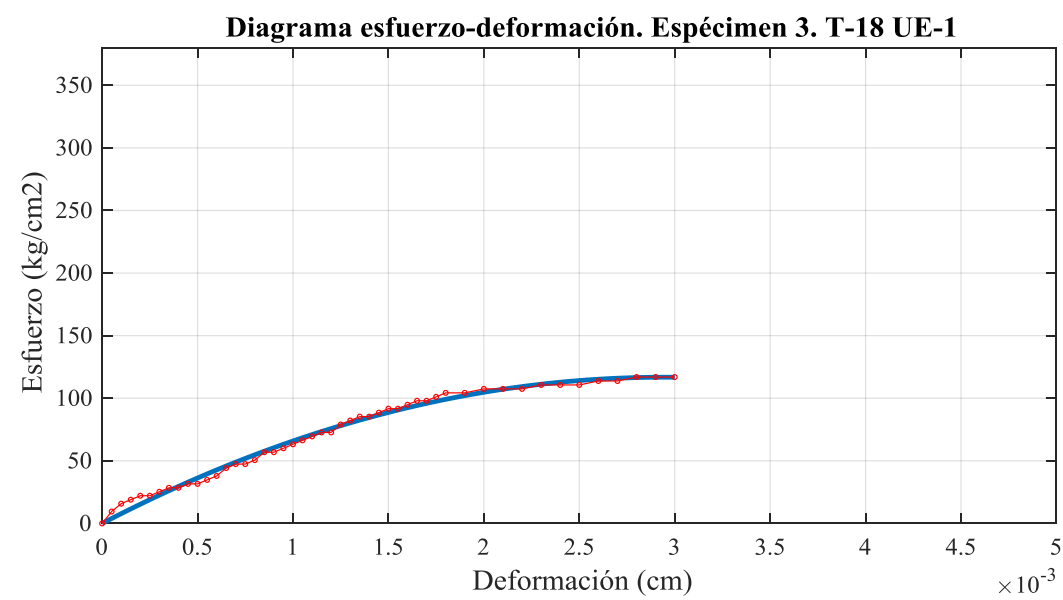
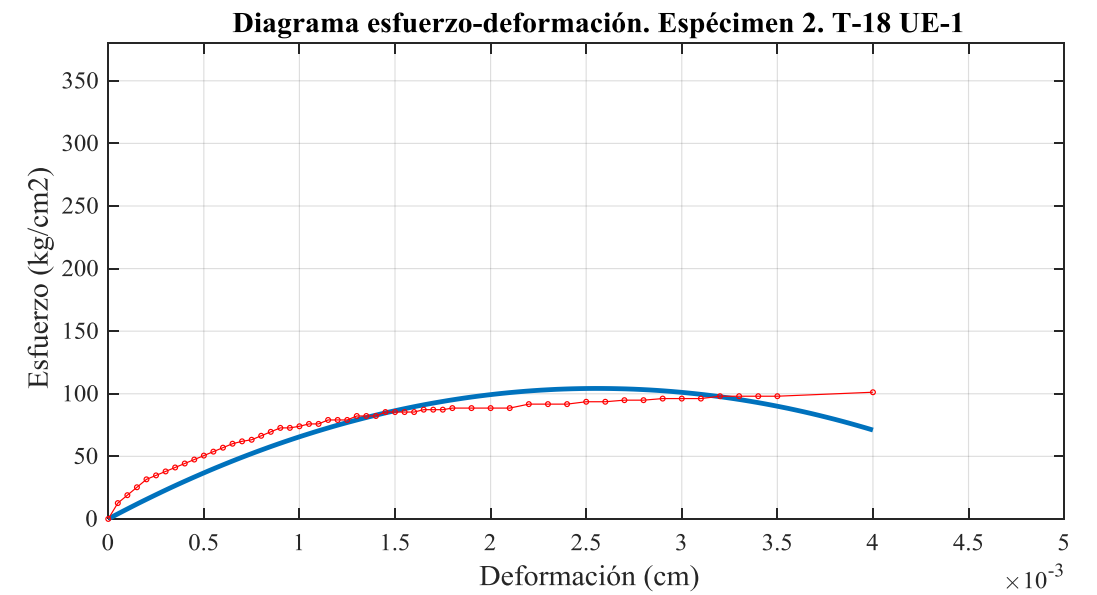
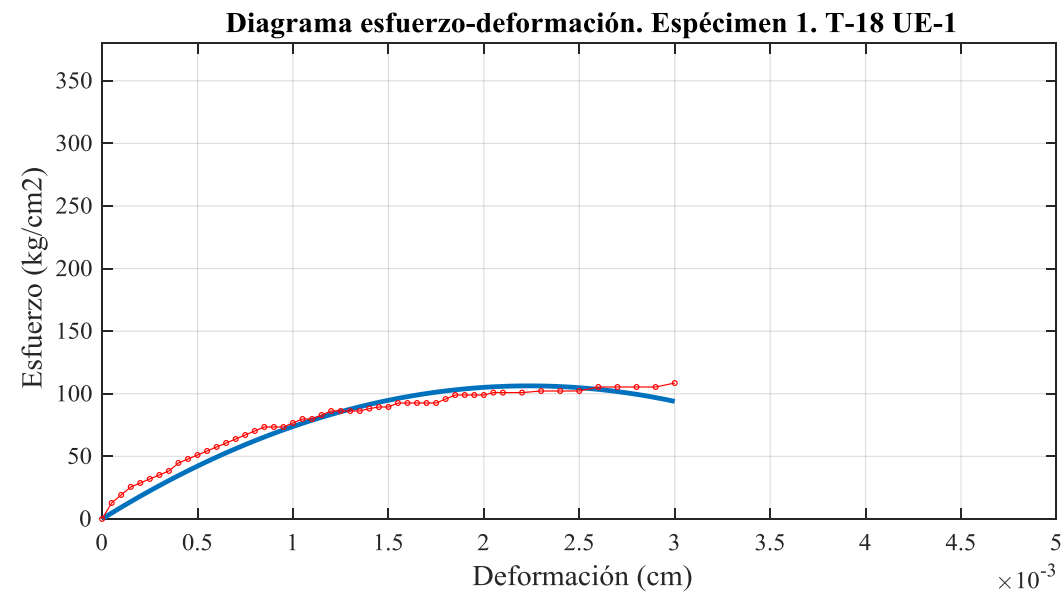
Relación a/c= 0.60

% Puzolana= 30%

% PET= 7%

Figura 38

Diagrama esfuerzo-deformación. Tratamiento 18



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 6

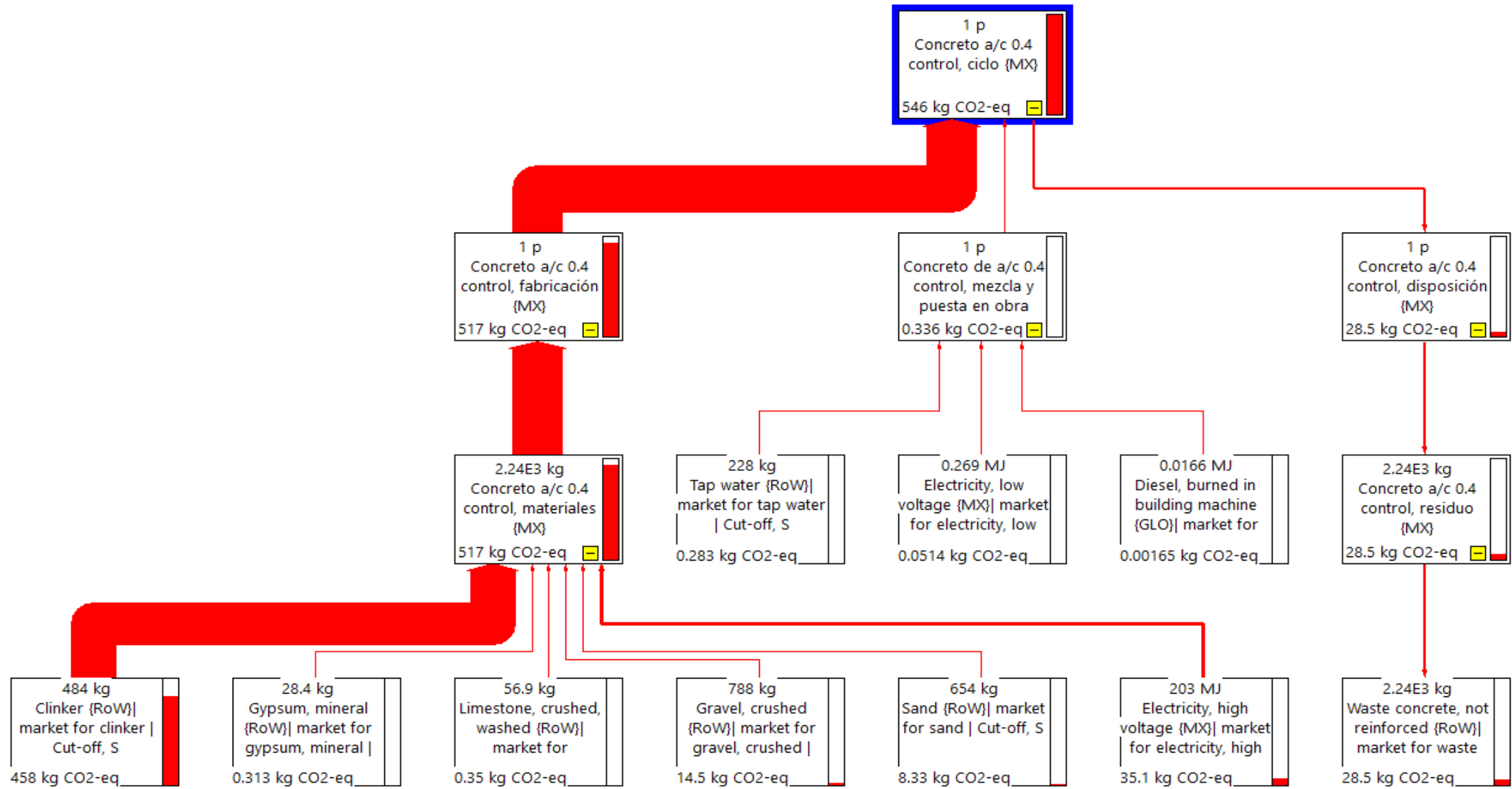
DIAGRAMAS DE ÁRBOL POR TRATAMIENTO GENERADOS EN SIMAPRO

Tratamiento 1

Unidad experimental 11

Figura 39

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 1



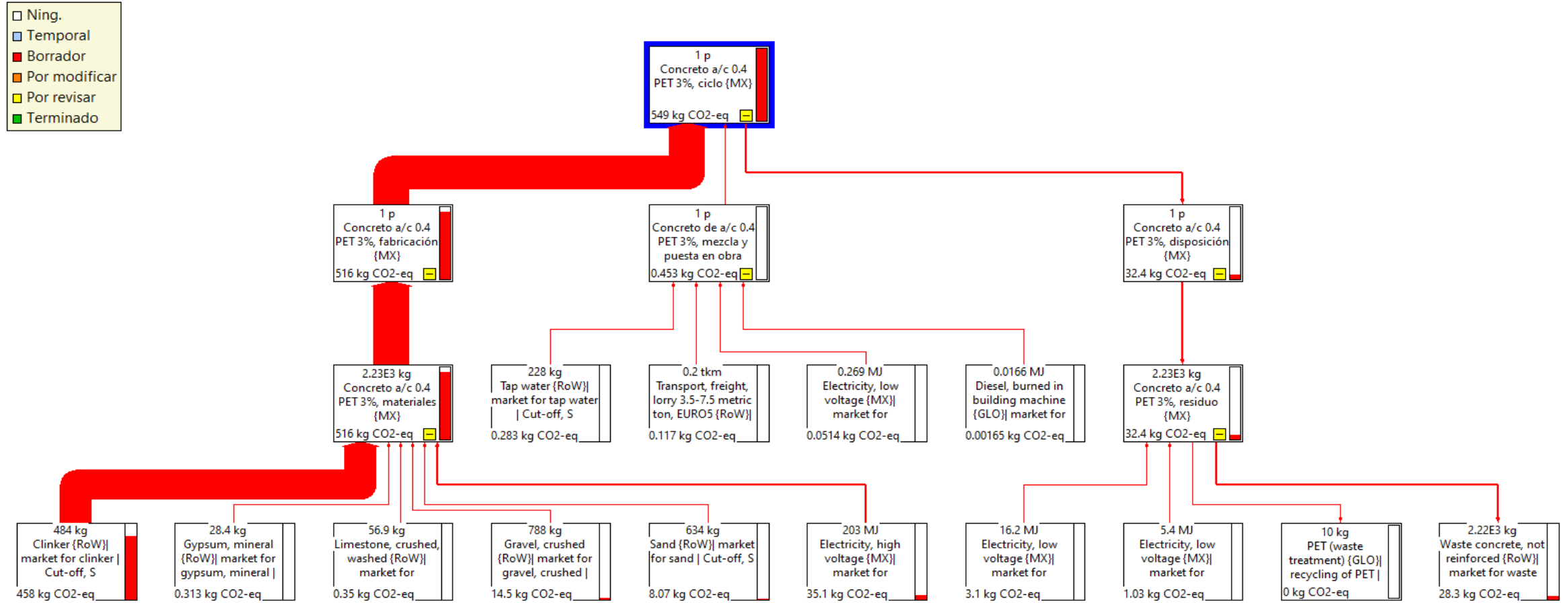
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 2

Unidad experimental 12

Figura 40

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 2



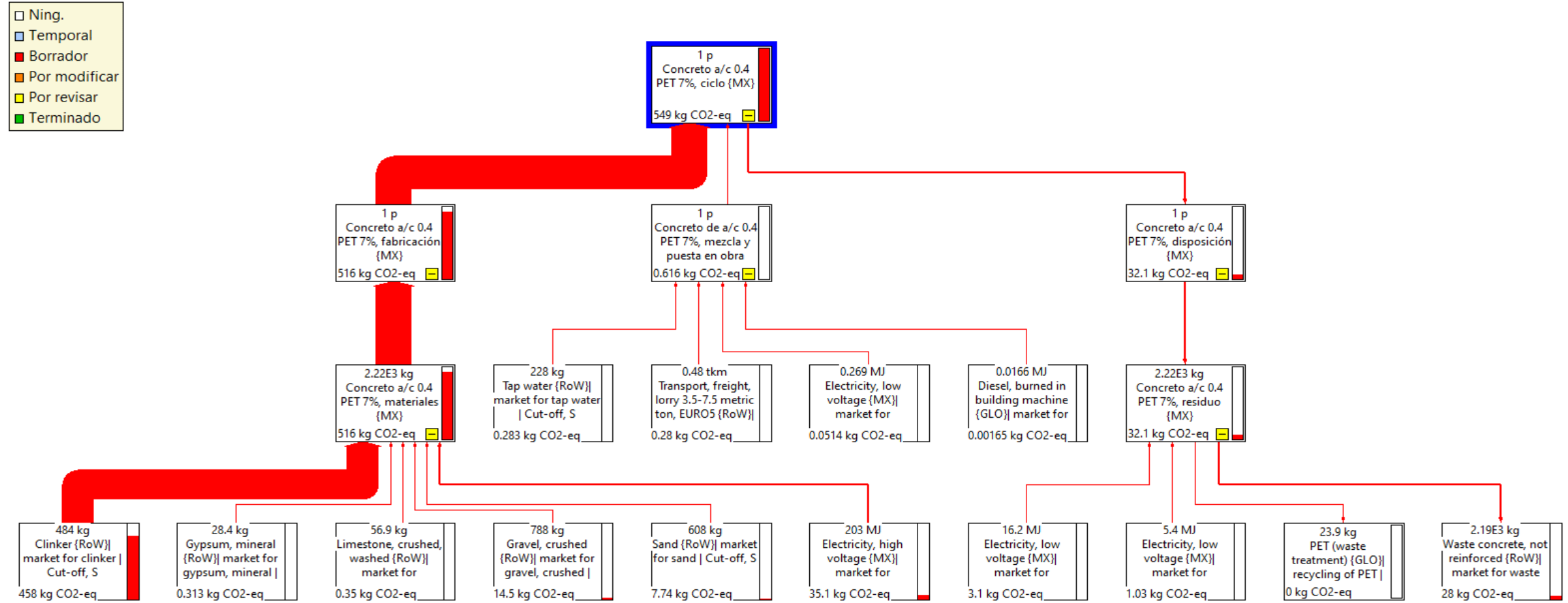
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 3

Unidad experimental 9

Figura 41

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 3



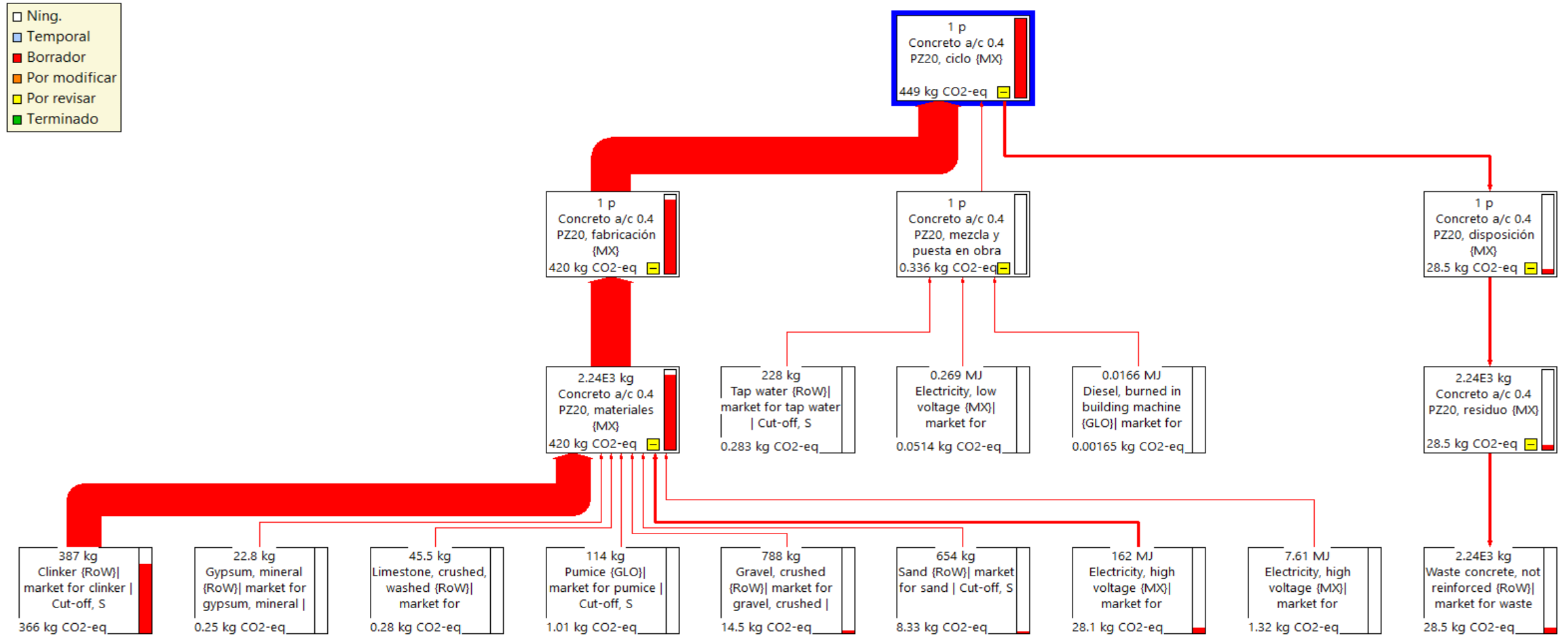
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 4

Unidad experimental 18

Figura 42

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 4



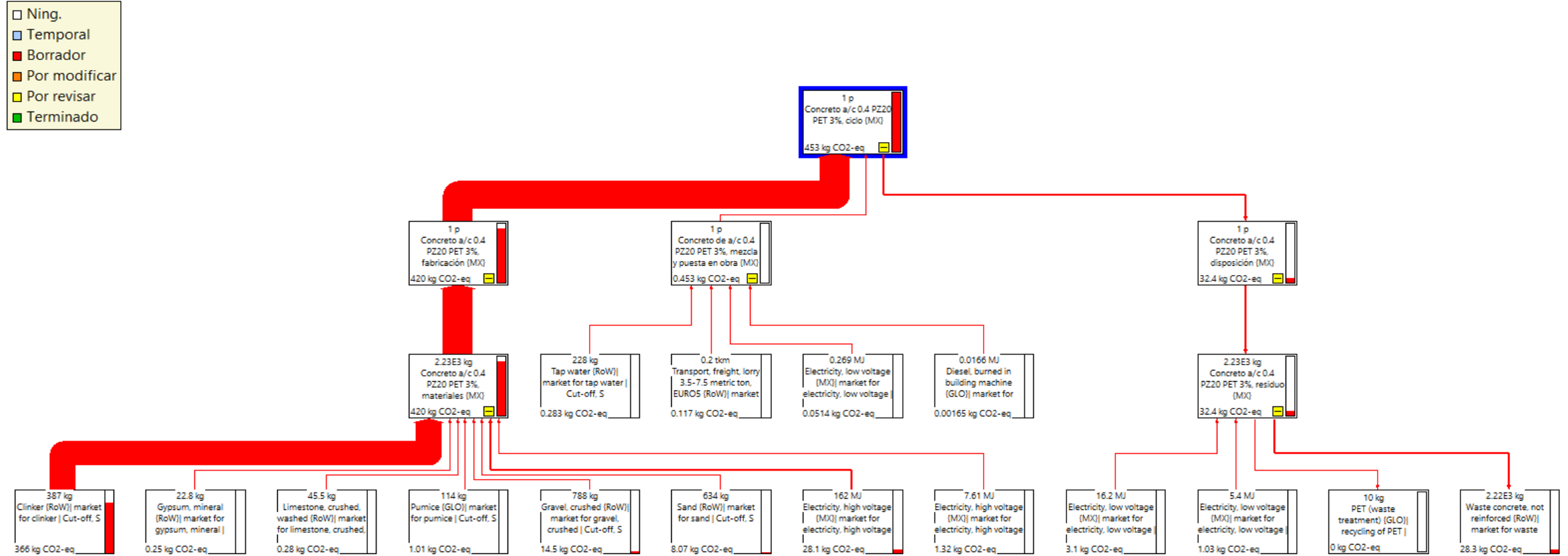
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 5

Unidad experimental 16

Figura 43

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 5



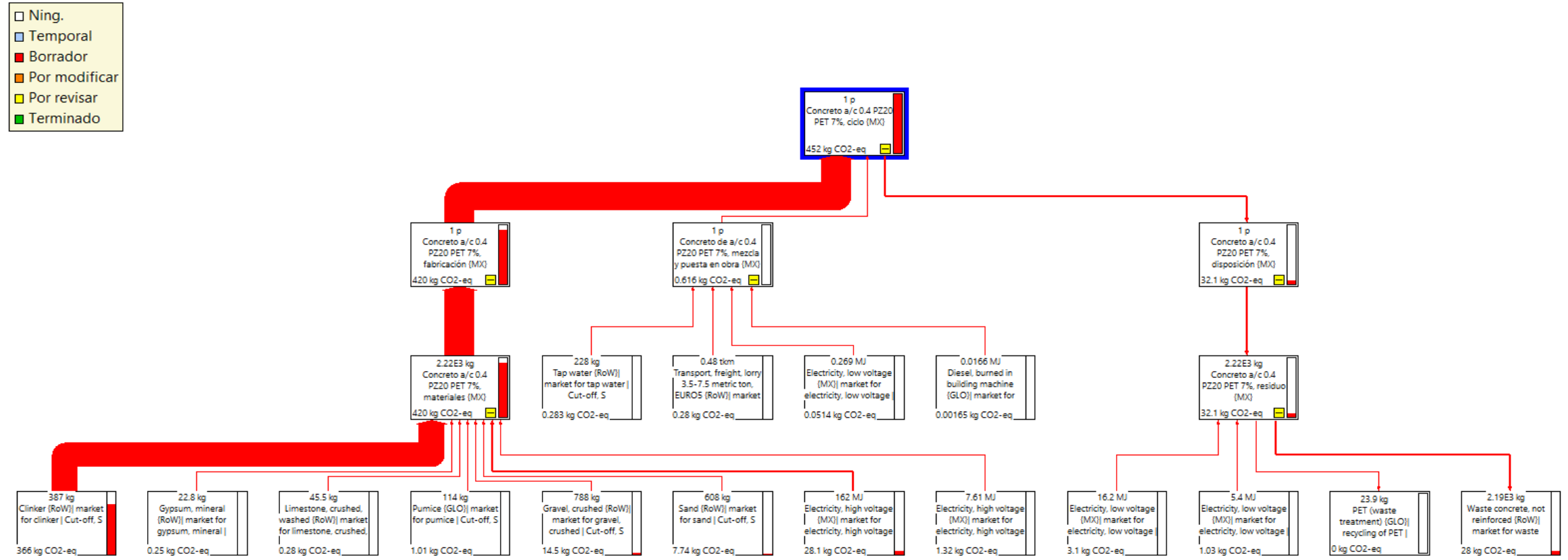
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 6

Unidad experimental 8

Figura 44

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 6



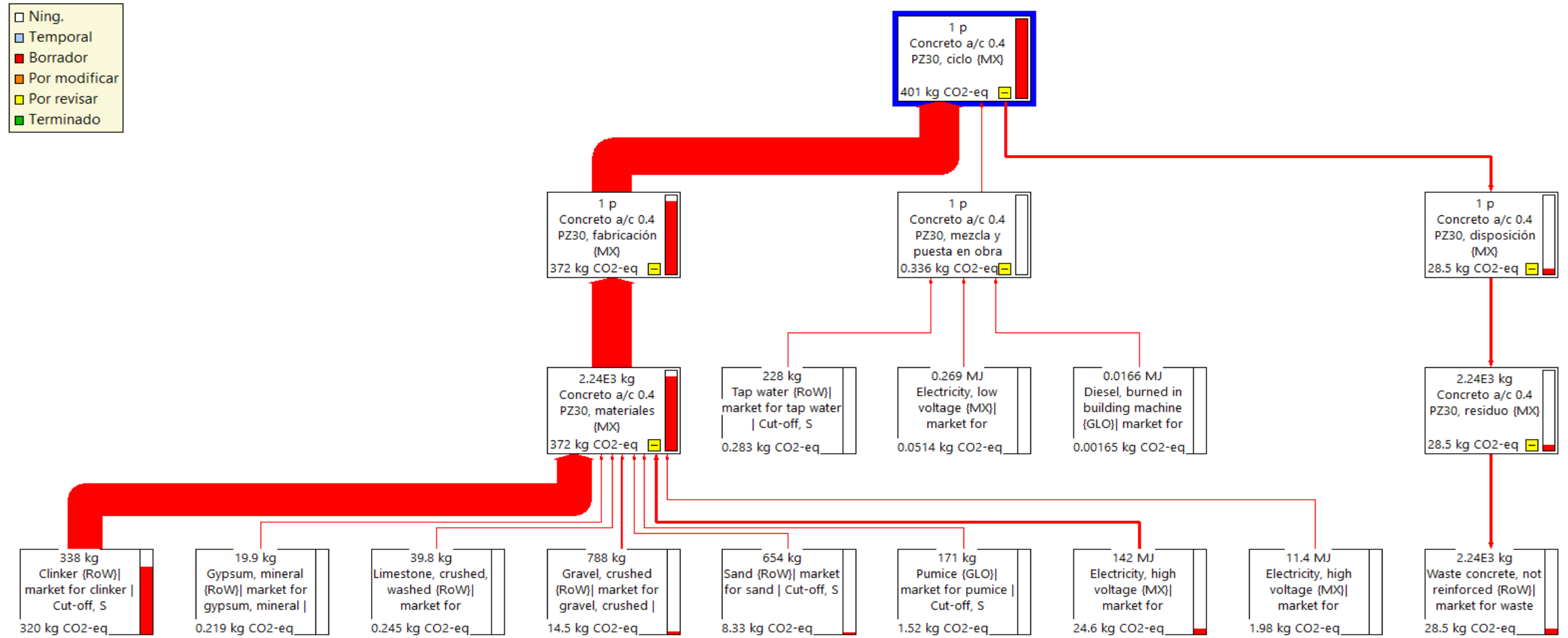
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 7

Unidad experimental 6

Figura 45

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 7



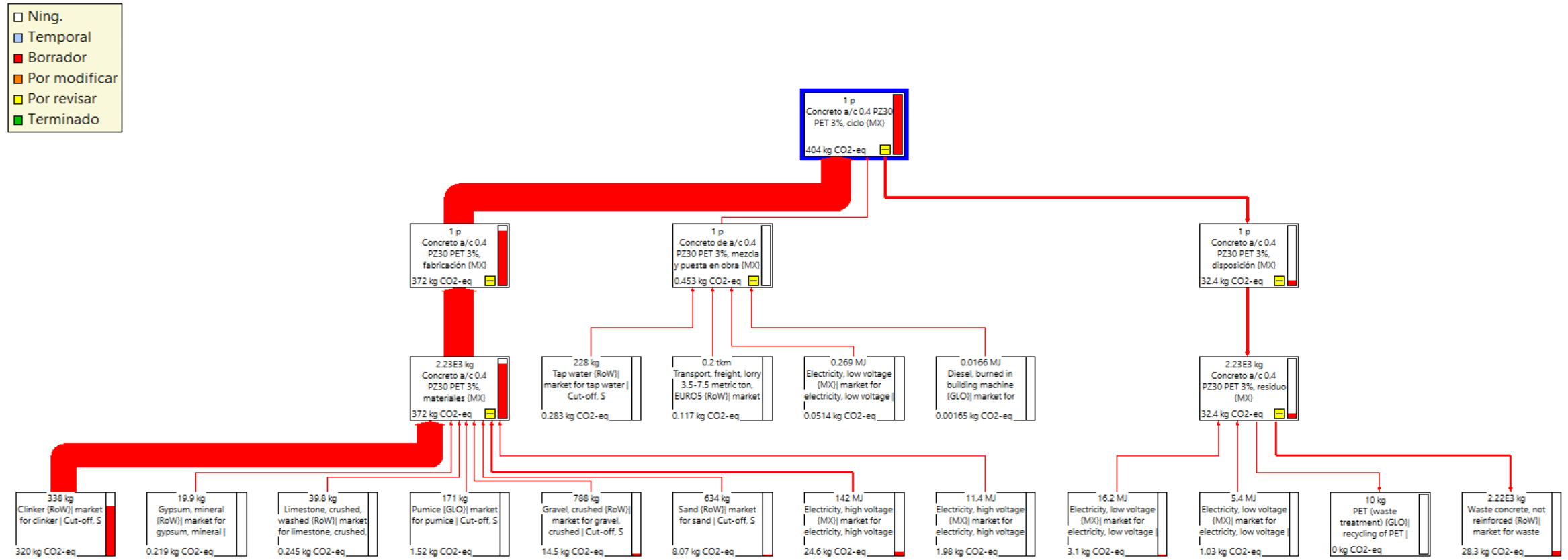
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 8

Unidad experimental 2

Figura 46

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 8



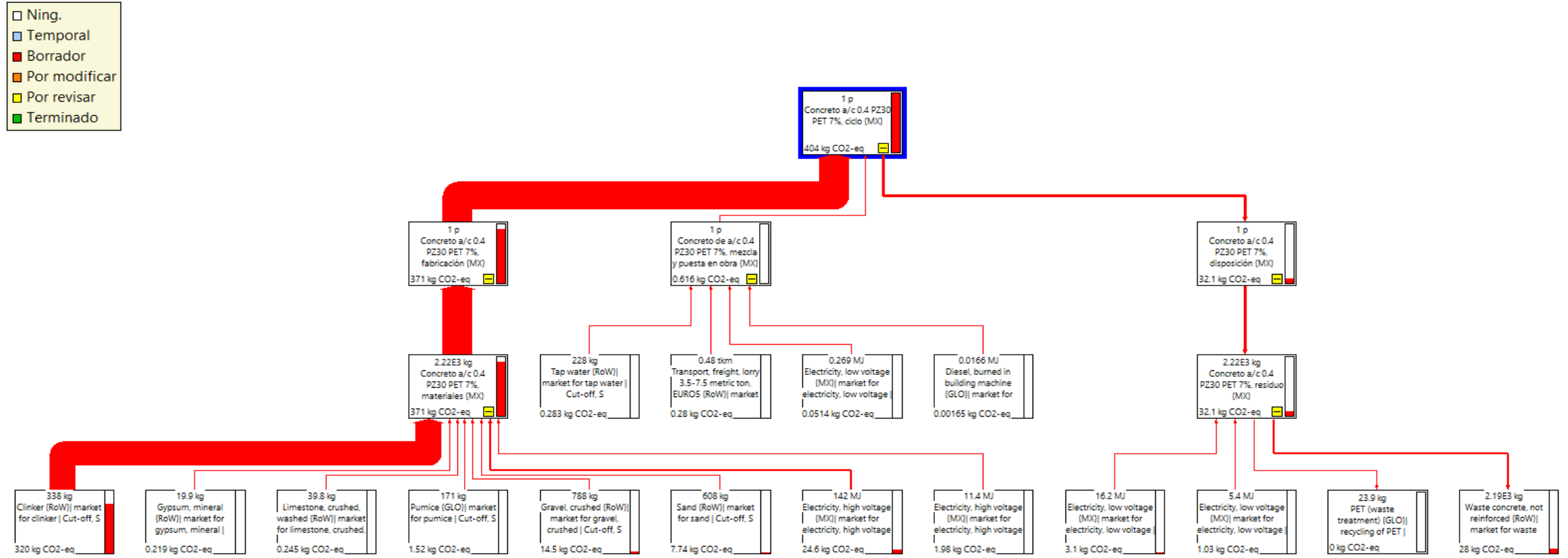
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 9

Unidad experimental 4

Figura 47

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 9



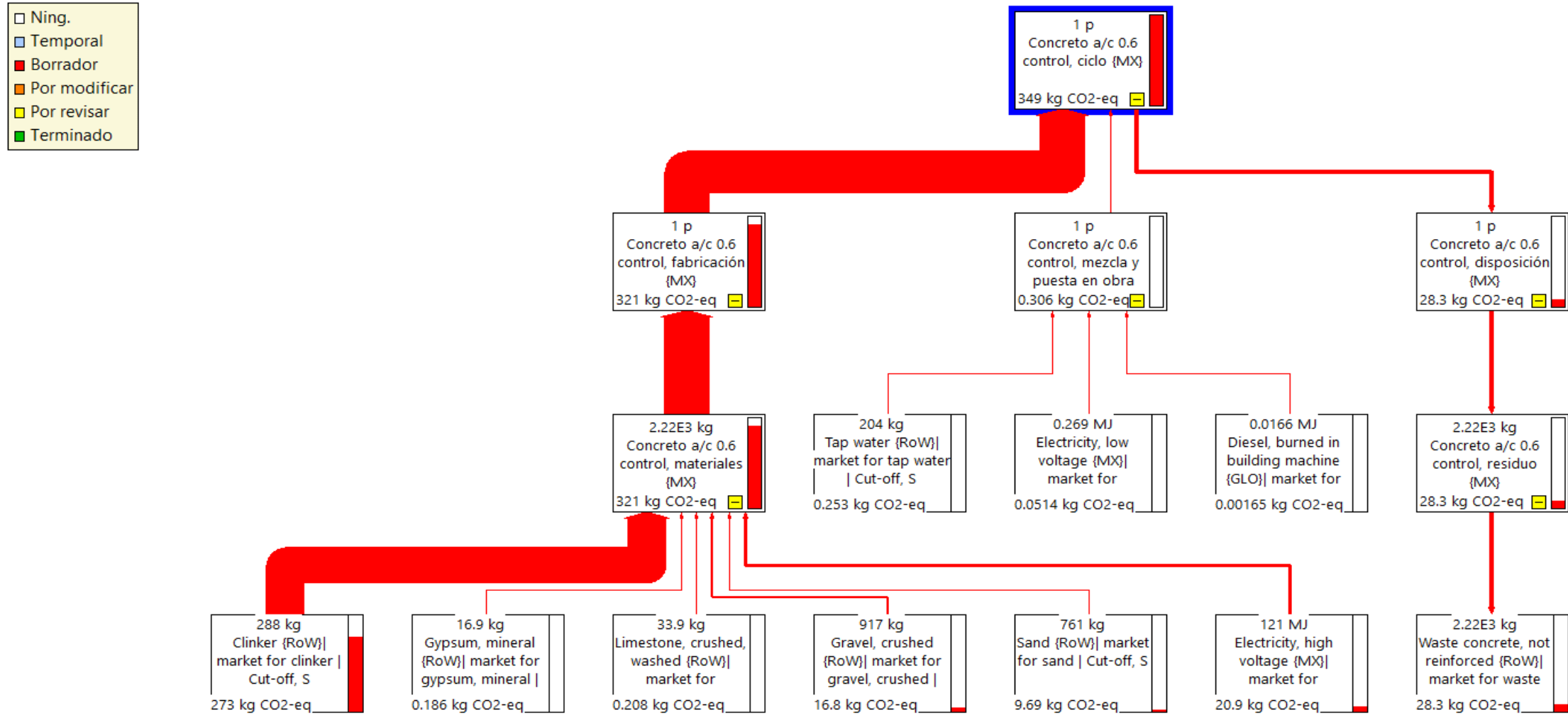
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 10

Unidad experimental 17

Figura 48

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 10



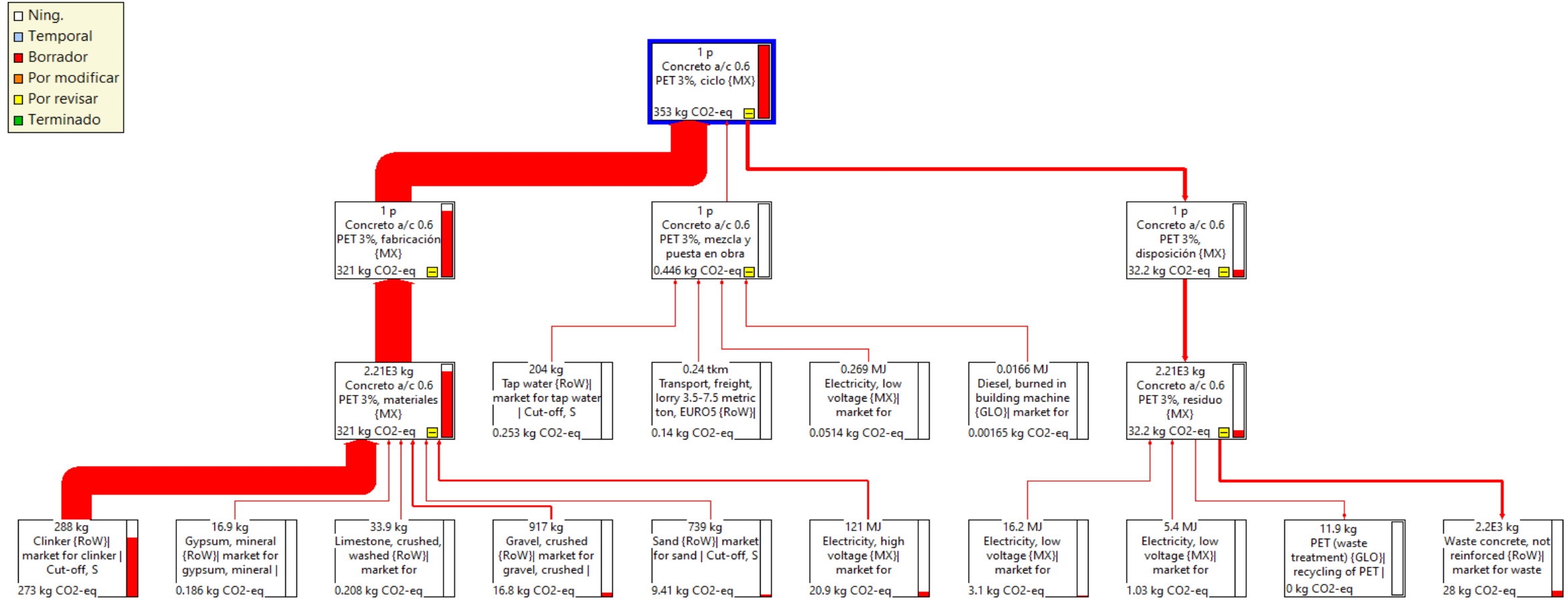
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 11

Unidad experimental 14

Figura 49

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 11



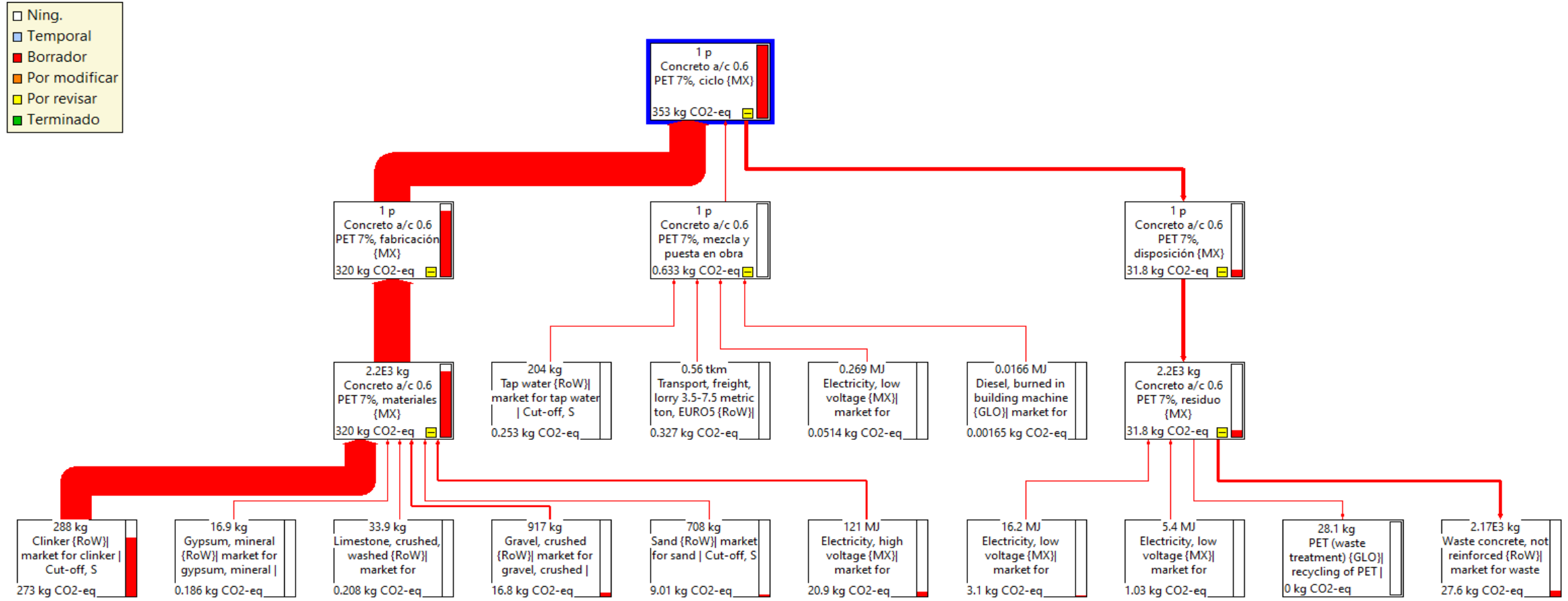
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 12

Unidad experimental 3

Figura 50

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 12



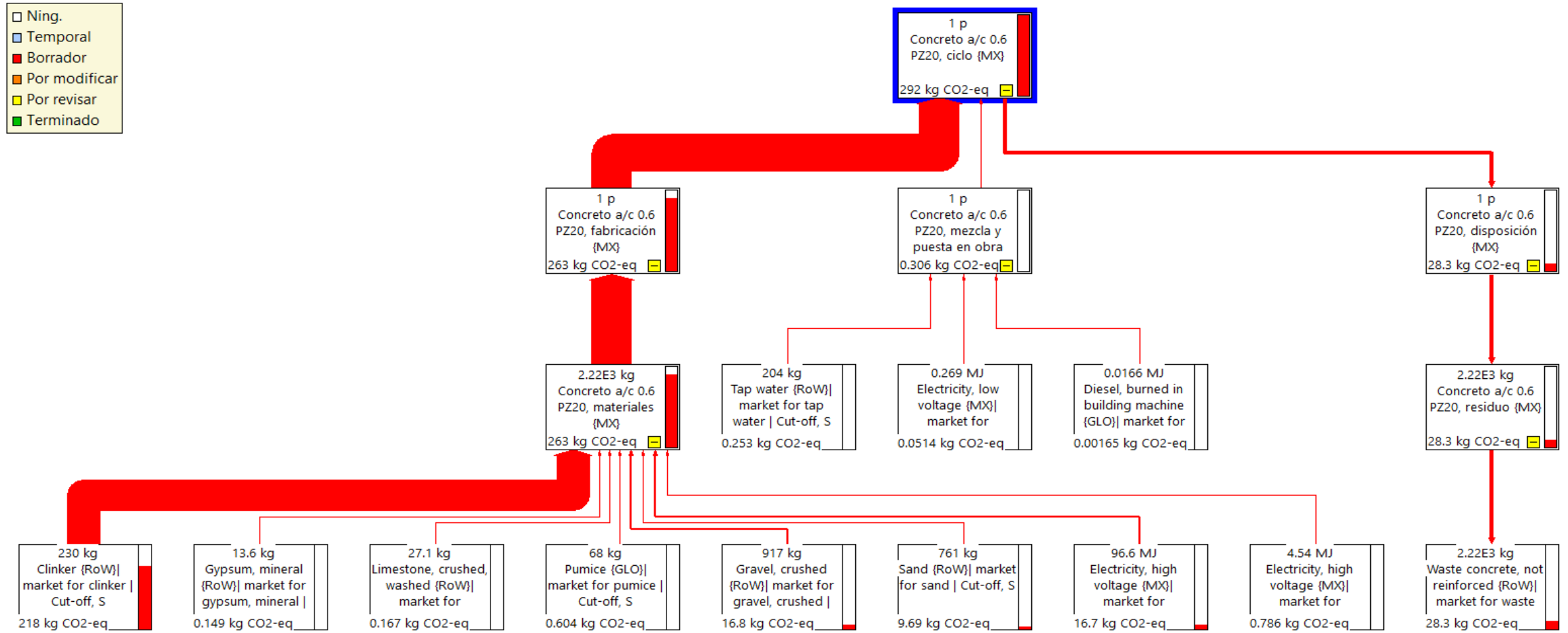
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 13

Unidad experimental 13

Figura 51

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 13



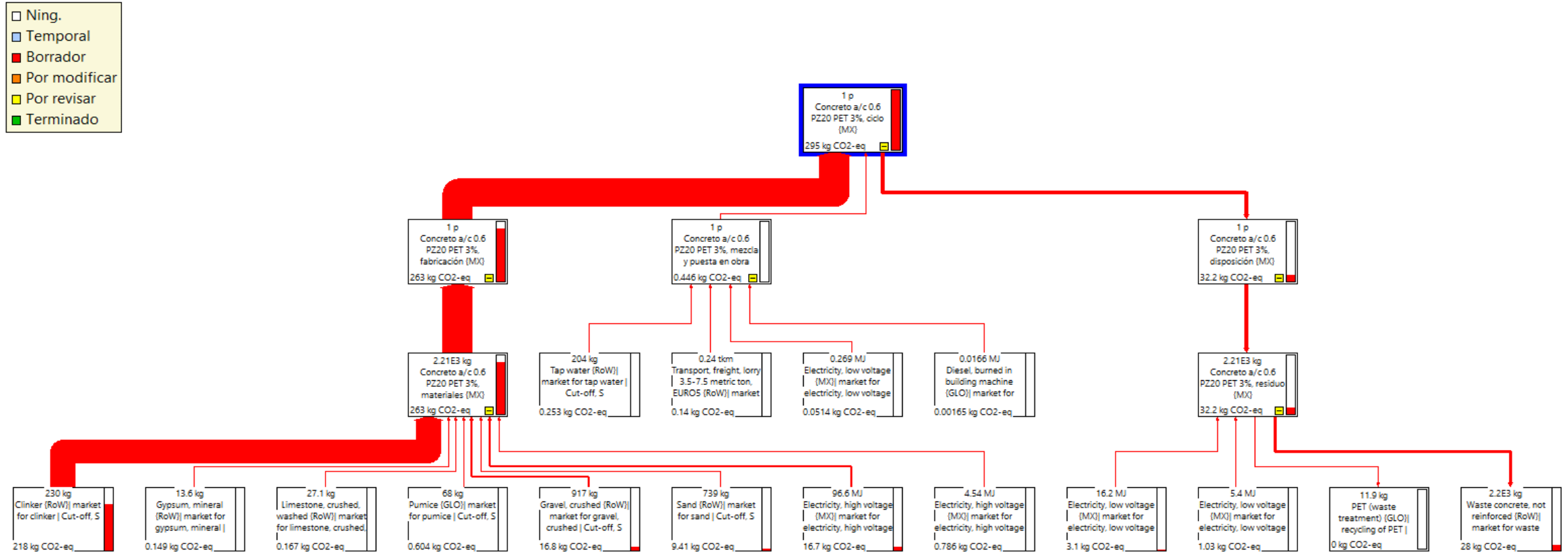
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 14

Unidad experimental 5

Figura 52

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 14



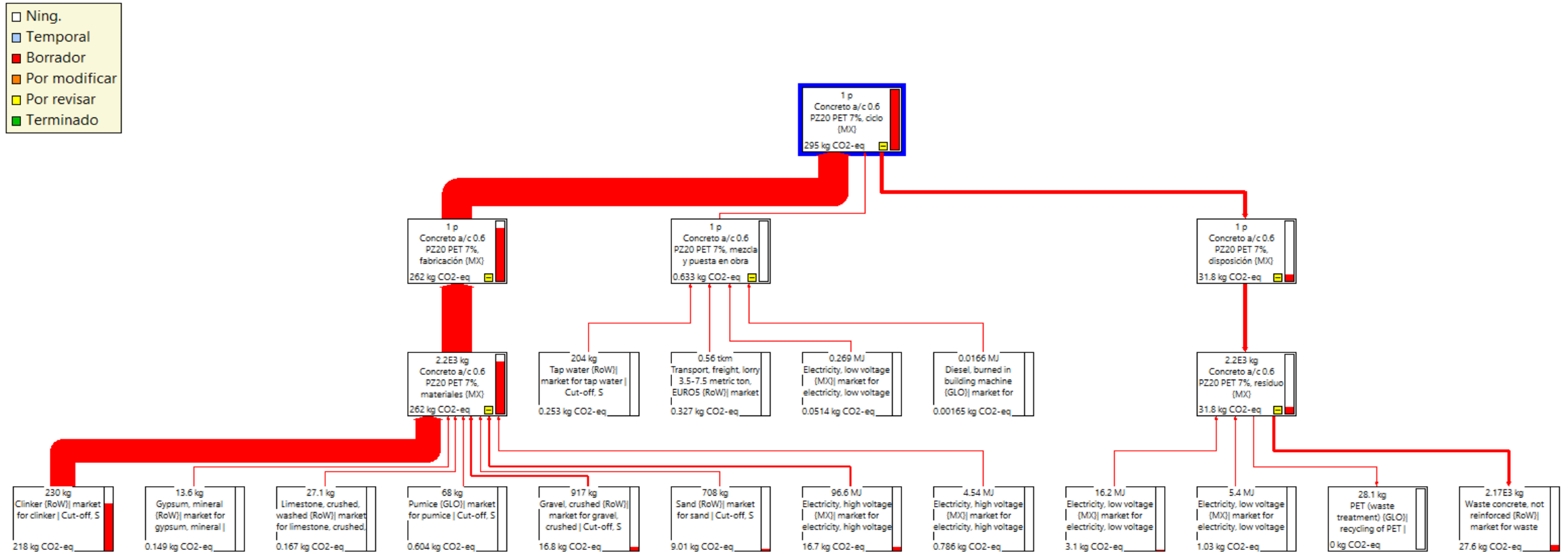
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 15

Unidad experimental 15

Figura 53

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 15



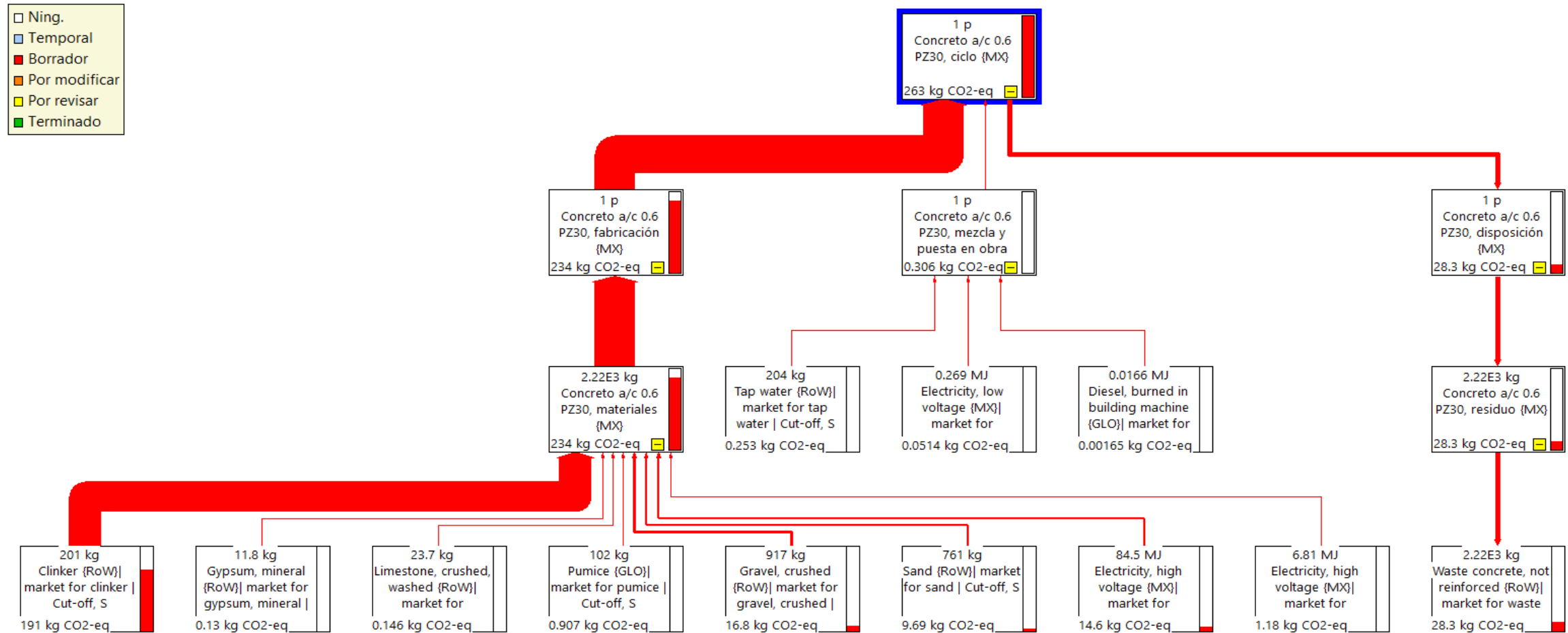
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 16

Unidad experimental 10

Figura 54

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 16



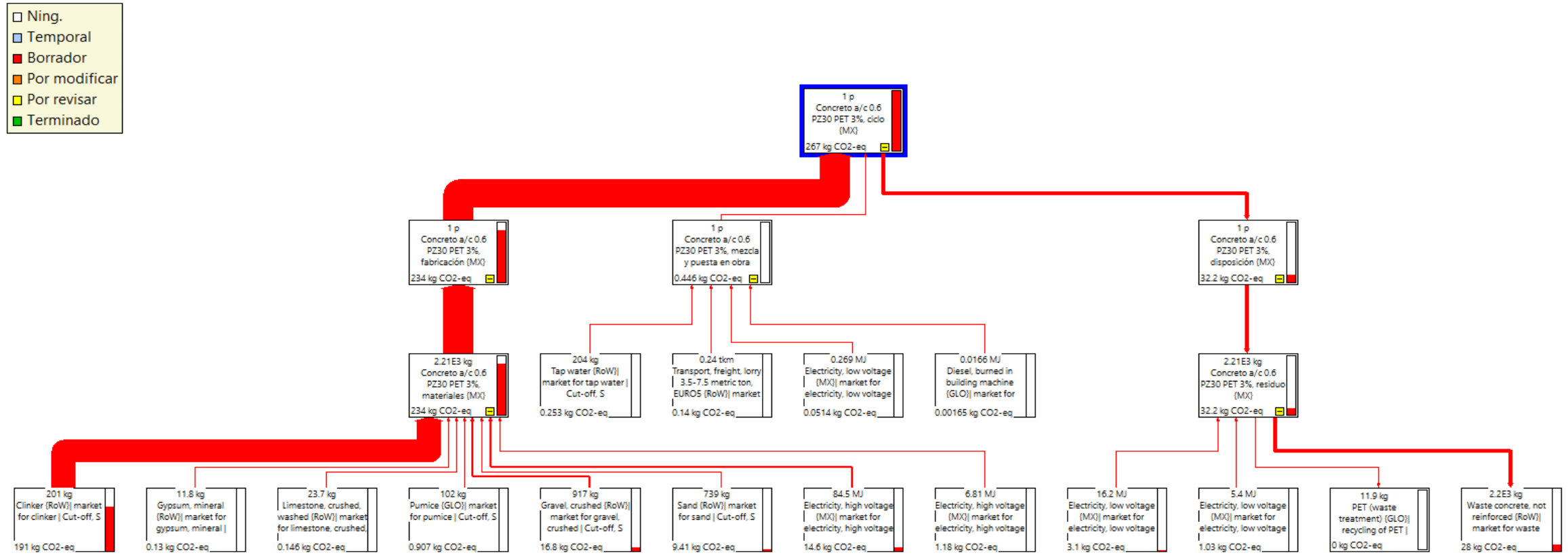
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 17

Unidad experimental 7

Figura 55

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 17



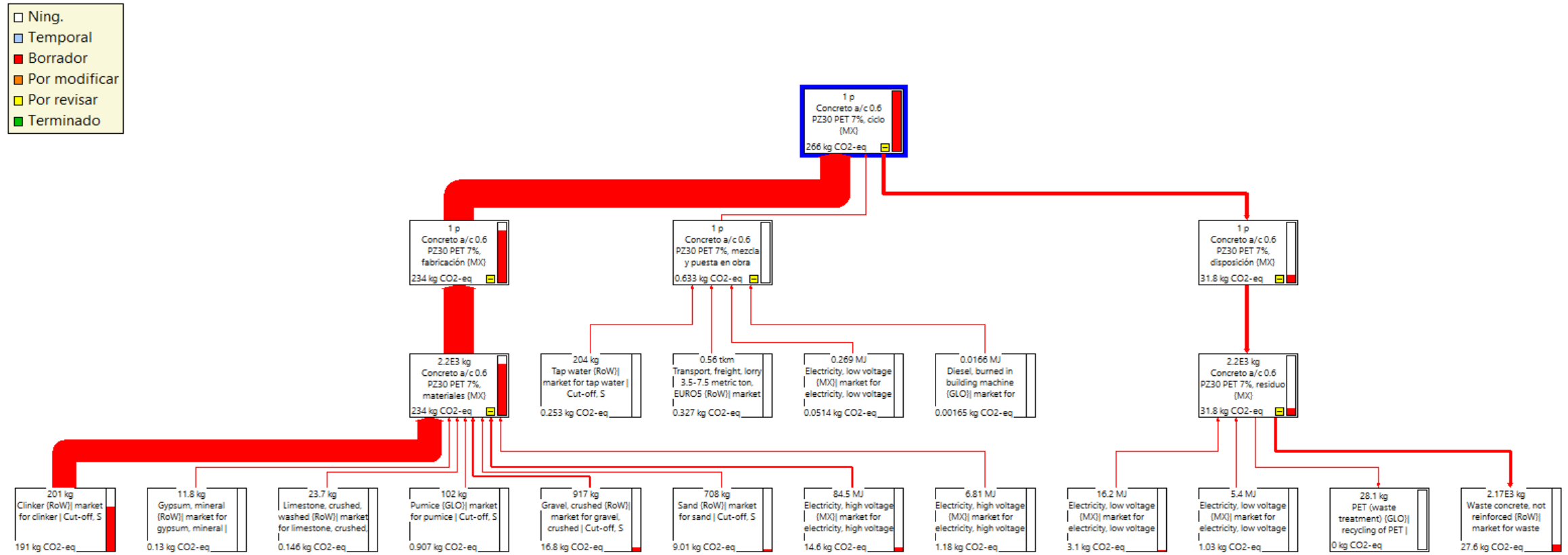
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento 18

Unidad experimental 1

Figura 56

Árbol del ciclo de vida. Tratamiento 18



Fuente: Elaboración propia.

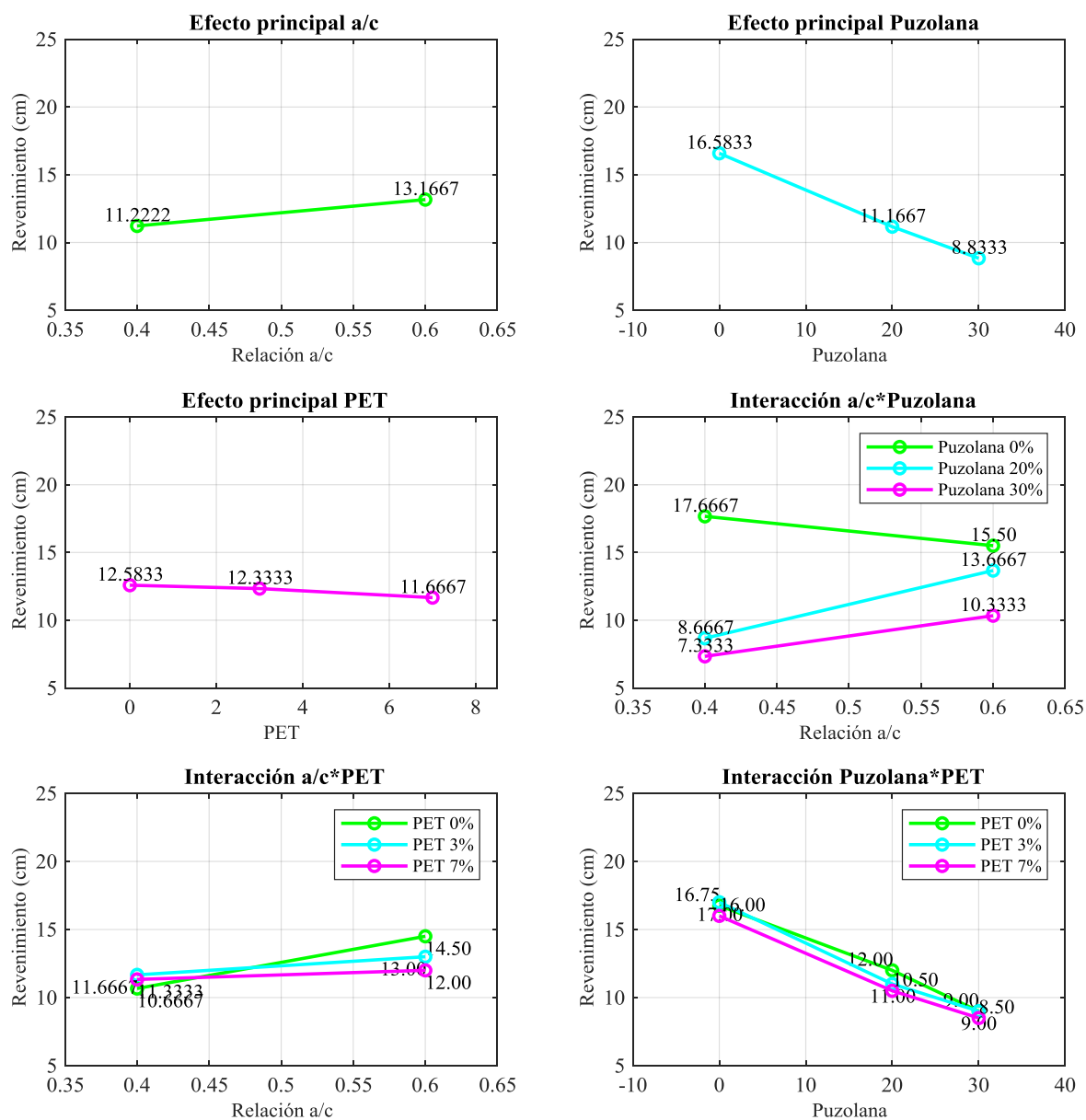
ANEXO 7

RESULTADOS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE CADA RESPUESTA

Respuesta: Revenimiento (cm)

Figura 57

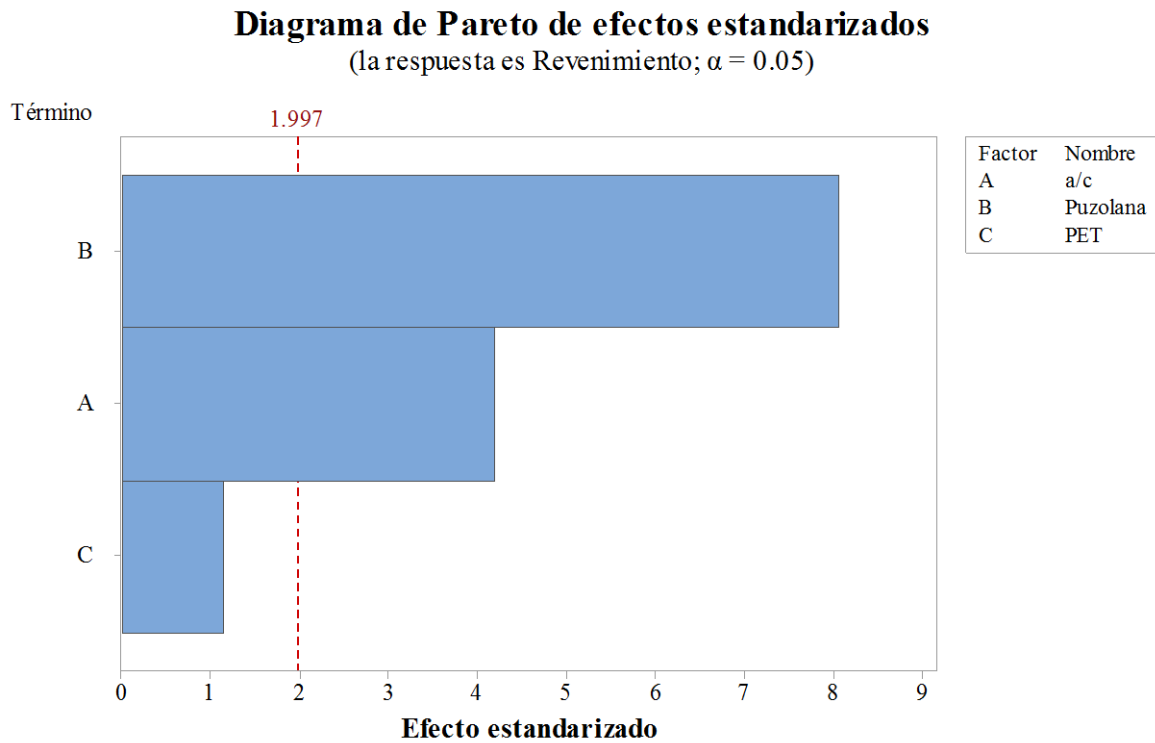
Gráfica de efectos principales e interacciones para el revenimiento



Fuente: Elaboración propia.

Figura 58

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el revenimiento



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

Revenimiento

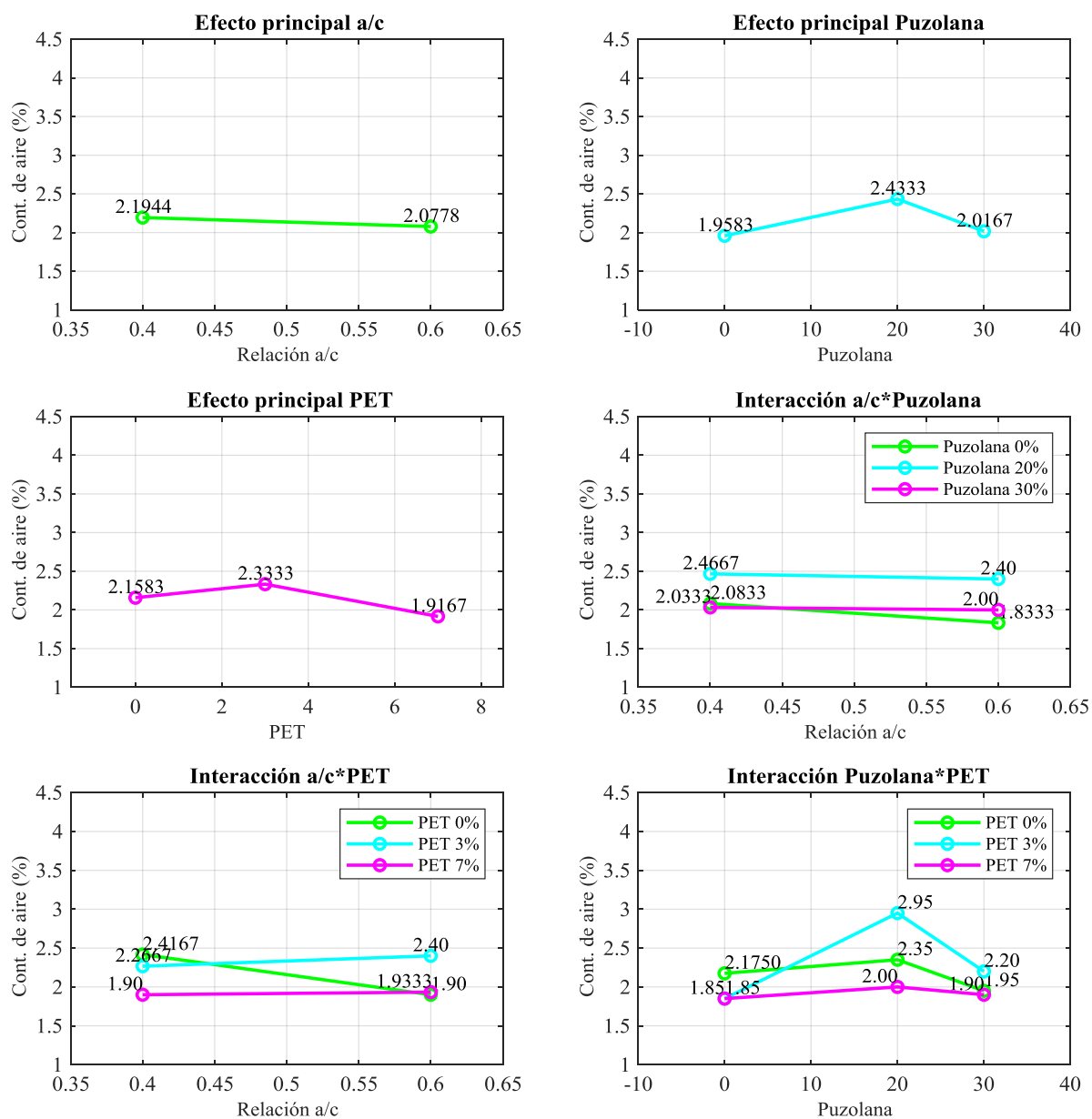
$$\begin{aligned} &= 12.194 - 0.972 a/c_{0.4} + 0.972 a/c_{0.6} + 4.389 Puzolana_0 \\ &- 1.028 Puzolana_{20} - 3.361 Puzolana_{30} + 0.389 PET_0 \\ &+ 0.139 PET_3 - 0.528 PET_7 \end{aligned}$$

$$R^2 = 76.54\%$$

Respuesta: *Contenido de aire (%)*

Figura 59

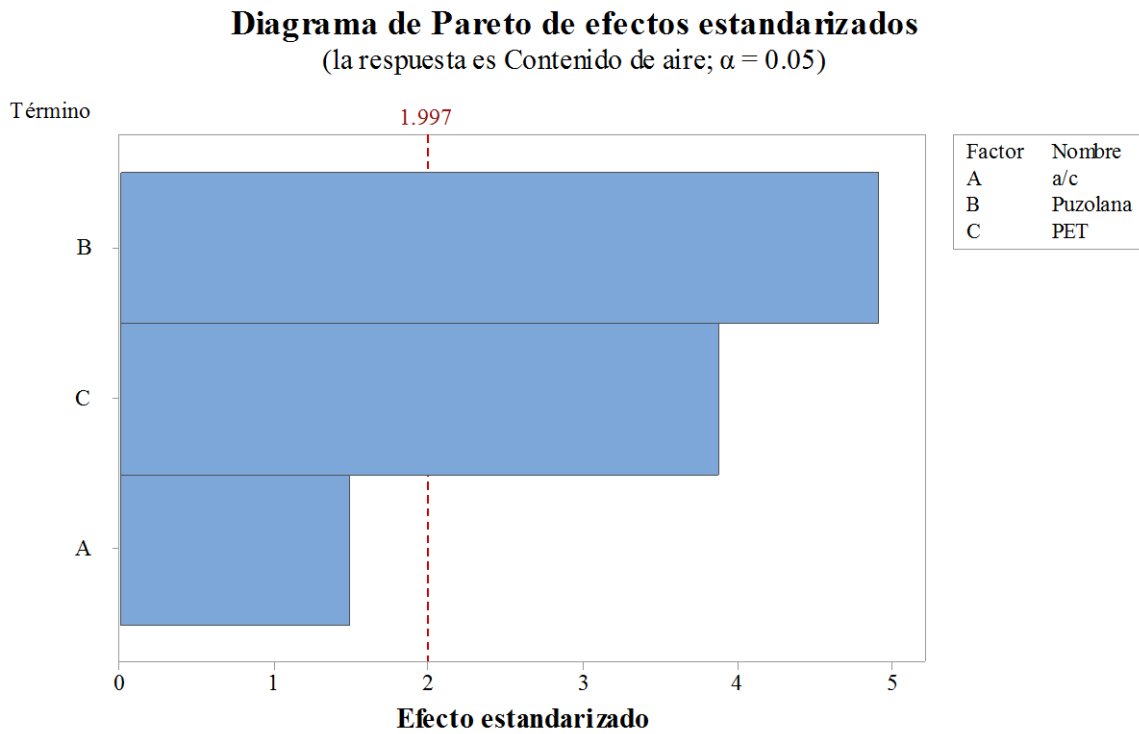
Gráfica de efectos principales e interacciones para el contenido de aire



Fuente: Elaboración propia.

Figura 60

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el contenido de aire



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

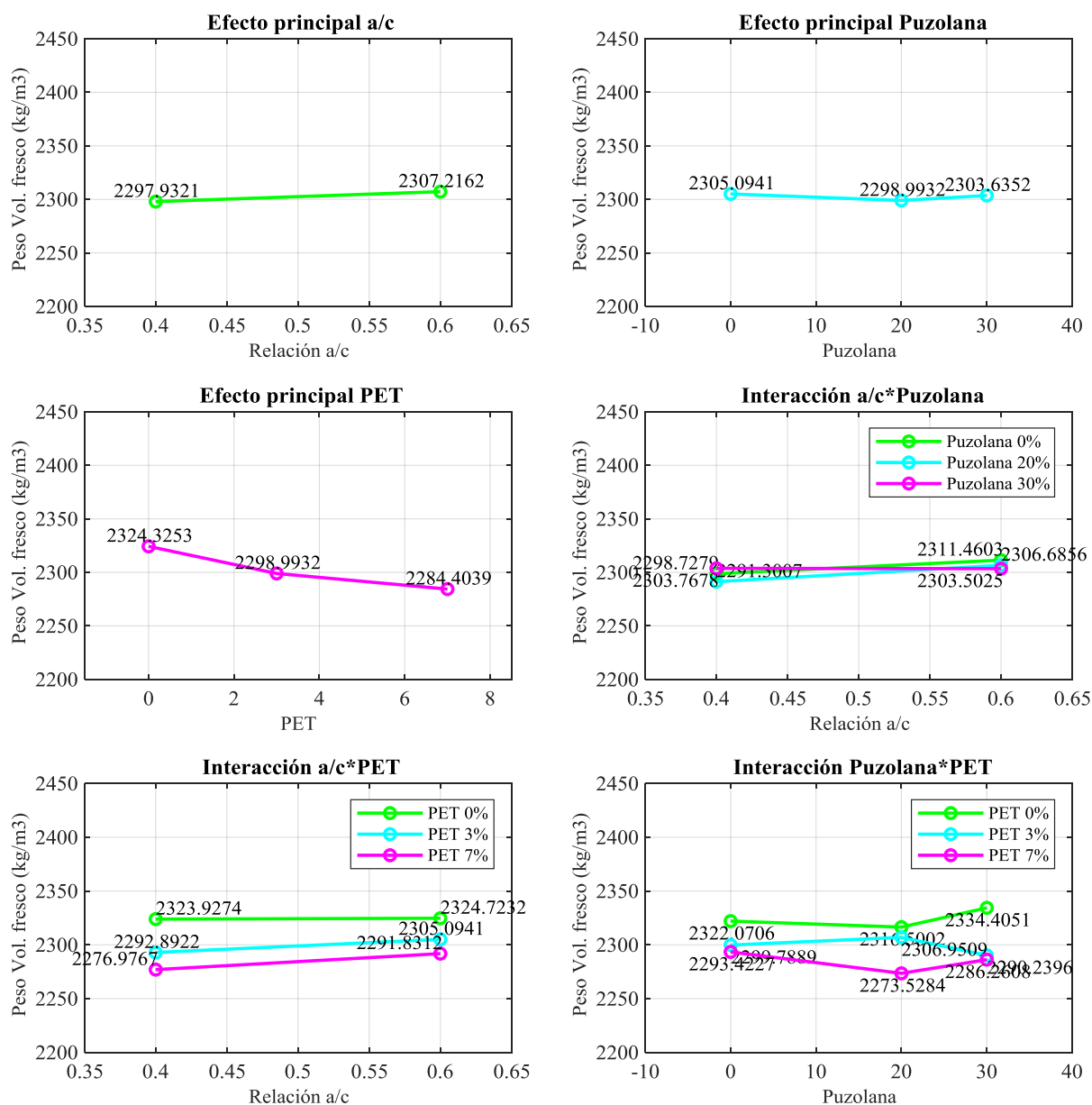
$$\begin{aligned} \text{Cont. de aire} = & 2.1361 + 0.0583 a/c_{0.4} - 0.0583 a/c_{0.6} - 0.1778 \text{Puzolana}_0 \\ & + 0.2972 \text{Puzolana}_{20} - 0.1194 \text{Puzolana}_{30} + 0.0222 \text{PET}_0 \\ & + 0.1972 \text{PET}_3 - 0.2194 \text{PET}_7 \end{aligned}$$

$$R^2 = 43.10 \%$$

Respuesta: *Peso volumétrico en estado fresco (kg/m^3)*

Figura 61

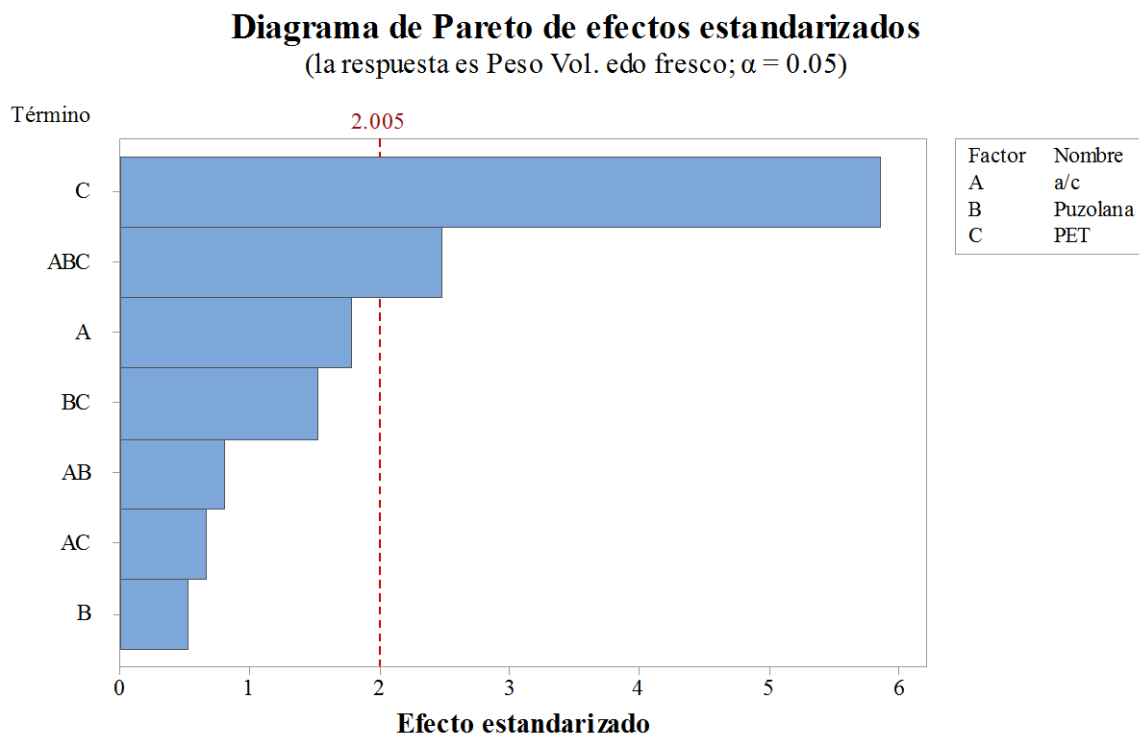
Gráfica de efectos principales e interacciones para el peso volumétrico en estado fresco



Fuente: Elaboración propia.

Figura 62

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el peso volumétrico en estado fresco



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

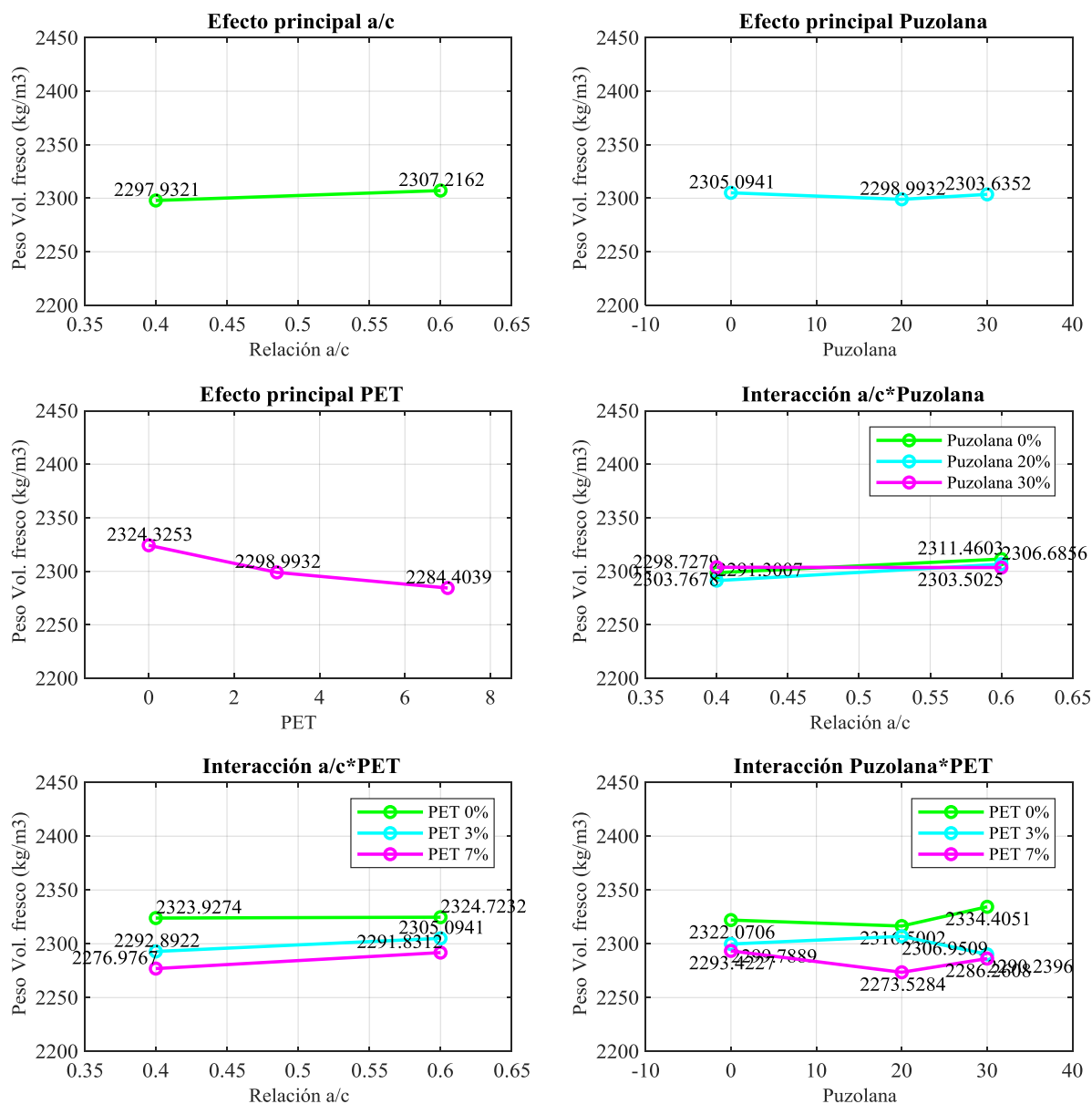
$$\gamma_{fresco} = 2302.57 - 4.64 a/c_{0.4} + 4.64 a/c_{0.6} + 2.52 Puzolana_0 - 3.58 Puzolana_{20} \\ + 1.06 Puzolana_{30} + 21.75 PET_0 - 3.58 PET_3 - 18.17 PET_7$$

$$R^2 = 36.40\%$$

Respuesta: *Peso volumétrico en estado endurecido (kg/m^3)*

Figura 63

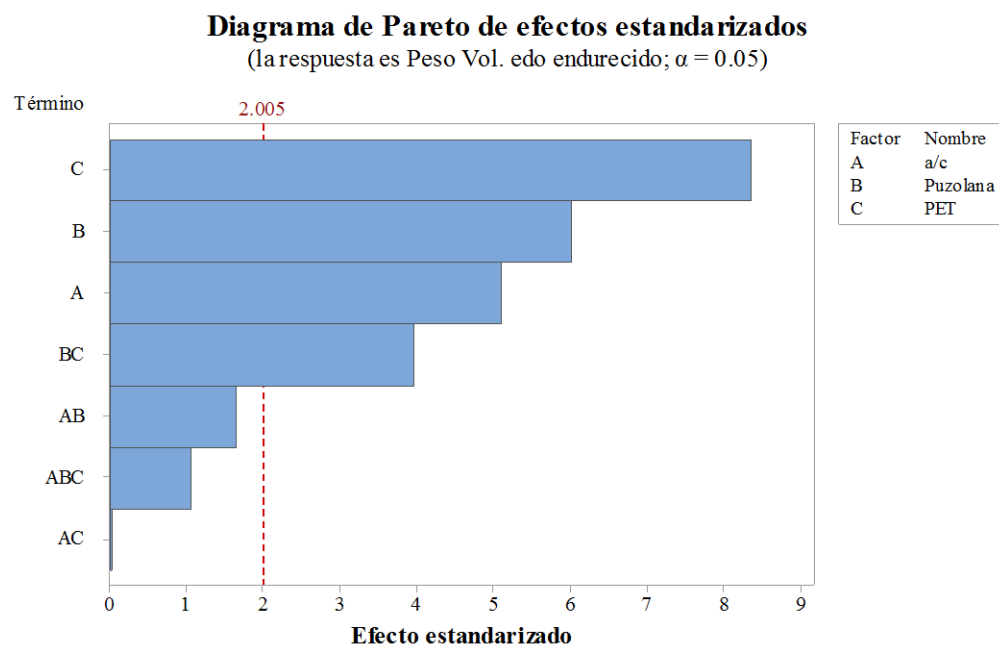
Gráfica de efectos principales e interacciones para el peso volumétrico en estado endurecido



Fuente: Elaboración propia.

Figura 64

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el peso volumétrico en estado endurecido



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

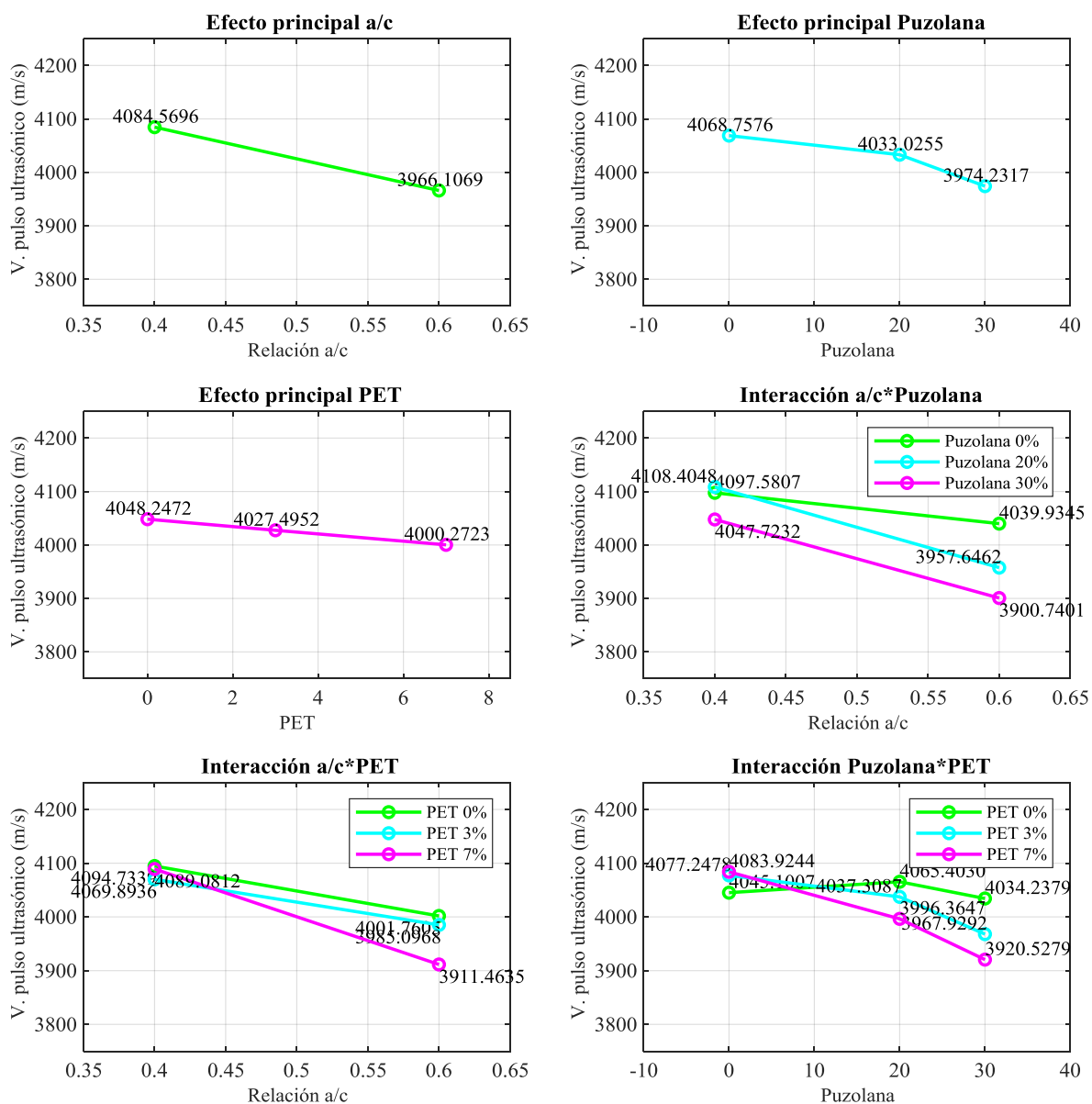
$$\begin{aligned}
 Y_{\text{endurecido}} = & 2283.82 - 6.84 a/c_{0.4} + 6.84 a/c_{0.6} + 11.06 Puzolana_0 \\
 & - 0.76 Puzolana_{20} - 10.30 Puzolana_{30} + 12.48 PET_0 + 3.60 PET_3 \\
 & - 16.08 PET_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 62.13\%$$

Respuesta: Velocidad de onda ultrasónica (m/s)

Figura 65

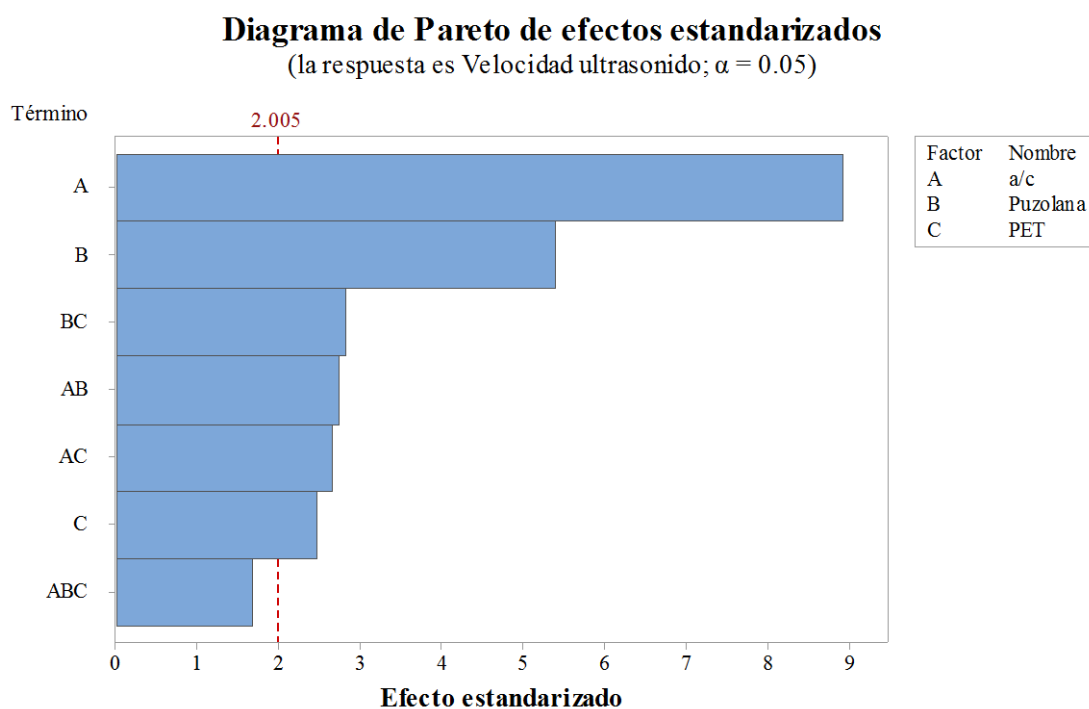
Gráfica de efectos principales e interacciones para la velocidad de pulso ultrasónico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 66

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la velocidad de onda ultrasónica



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

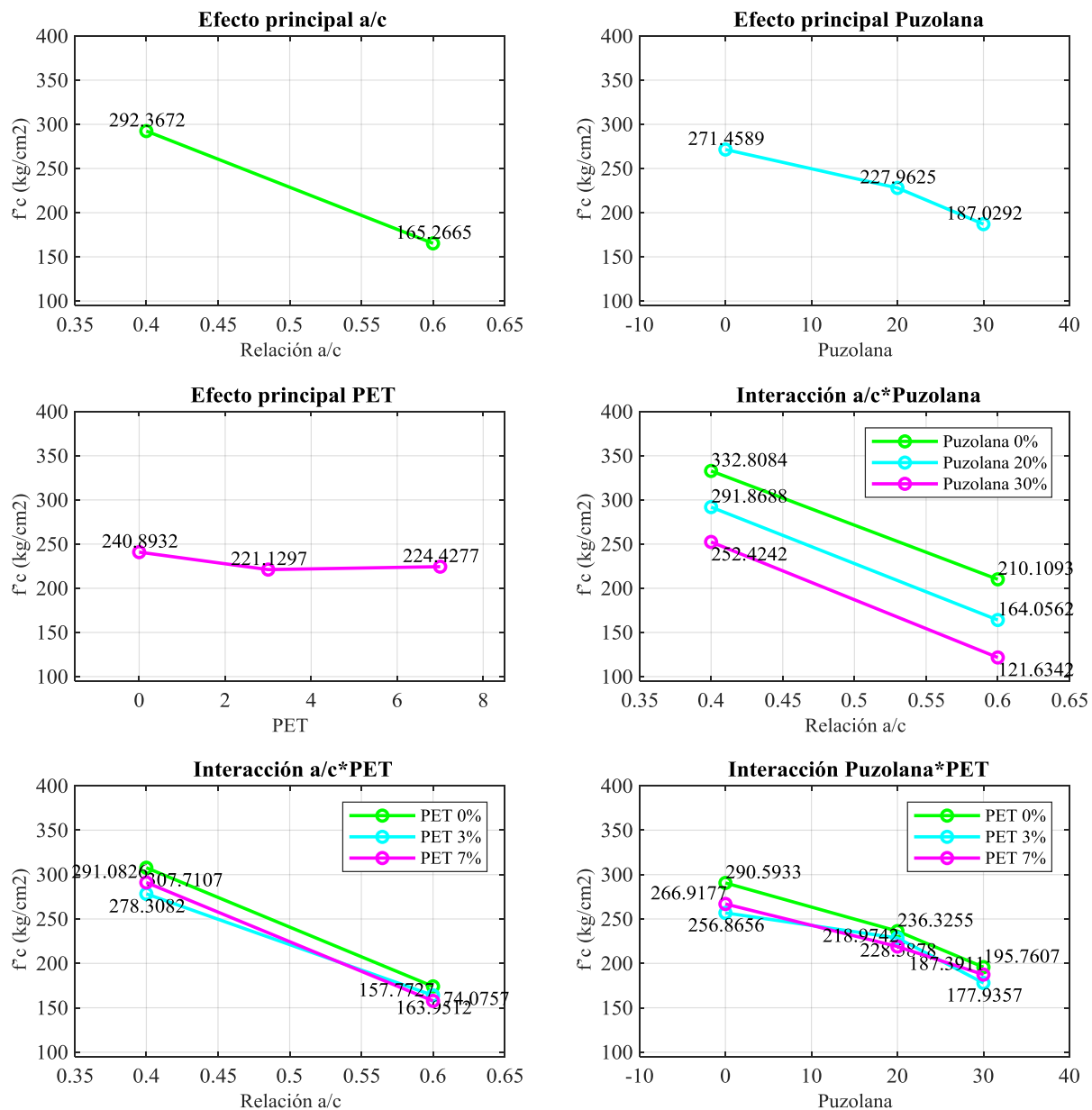
$$\begin{aligned}
 V_{ultrasonido} = & 4025.34 + 59.23 a/c_{0.4} - 59.23 a/c_{0.6} + 43.4 Puzolana_0 \\
 & + 7.7 Puzolana_{20} - 51.1 Puzolana_{30} + 22.9 PET_0 + 2.2 PET_3 \\
 & - 25.1 PET_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 55.46\%$$

Respuesta: Resistencia a compresión simple (kg/cm^2)

Figura 67

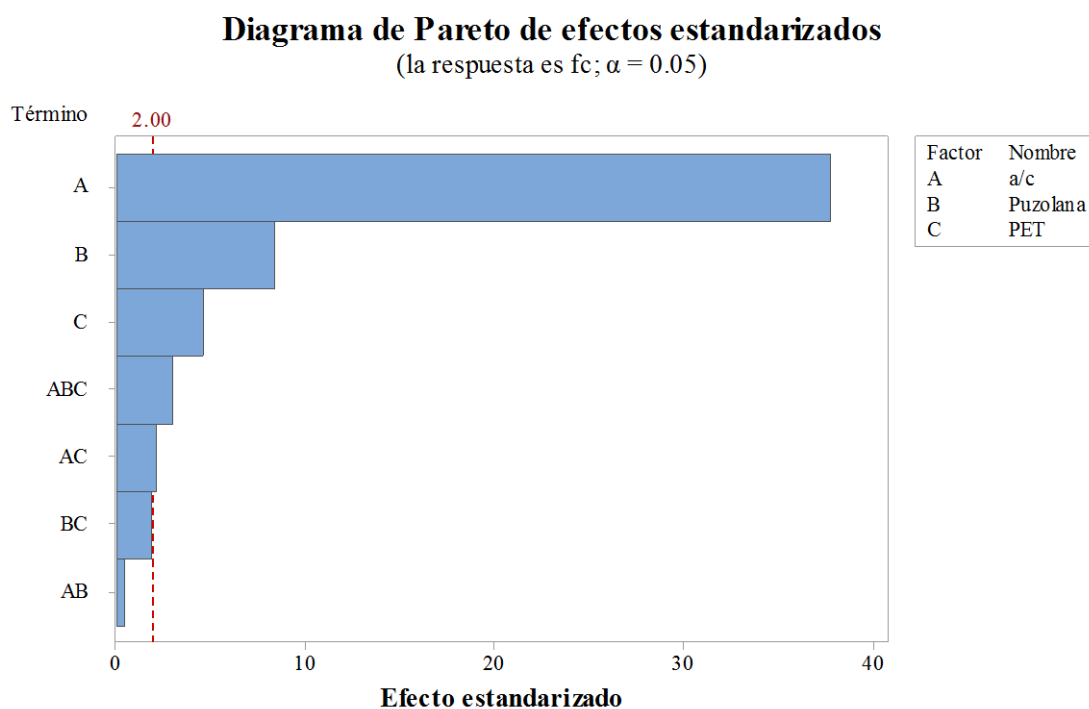
Gráfica de efectos principales e interacciones para la resistencia a compresión simple



Fuente: Elaboración propia.

Figura 68

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la resistencia a compresión simple



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

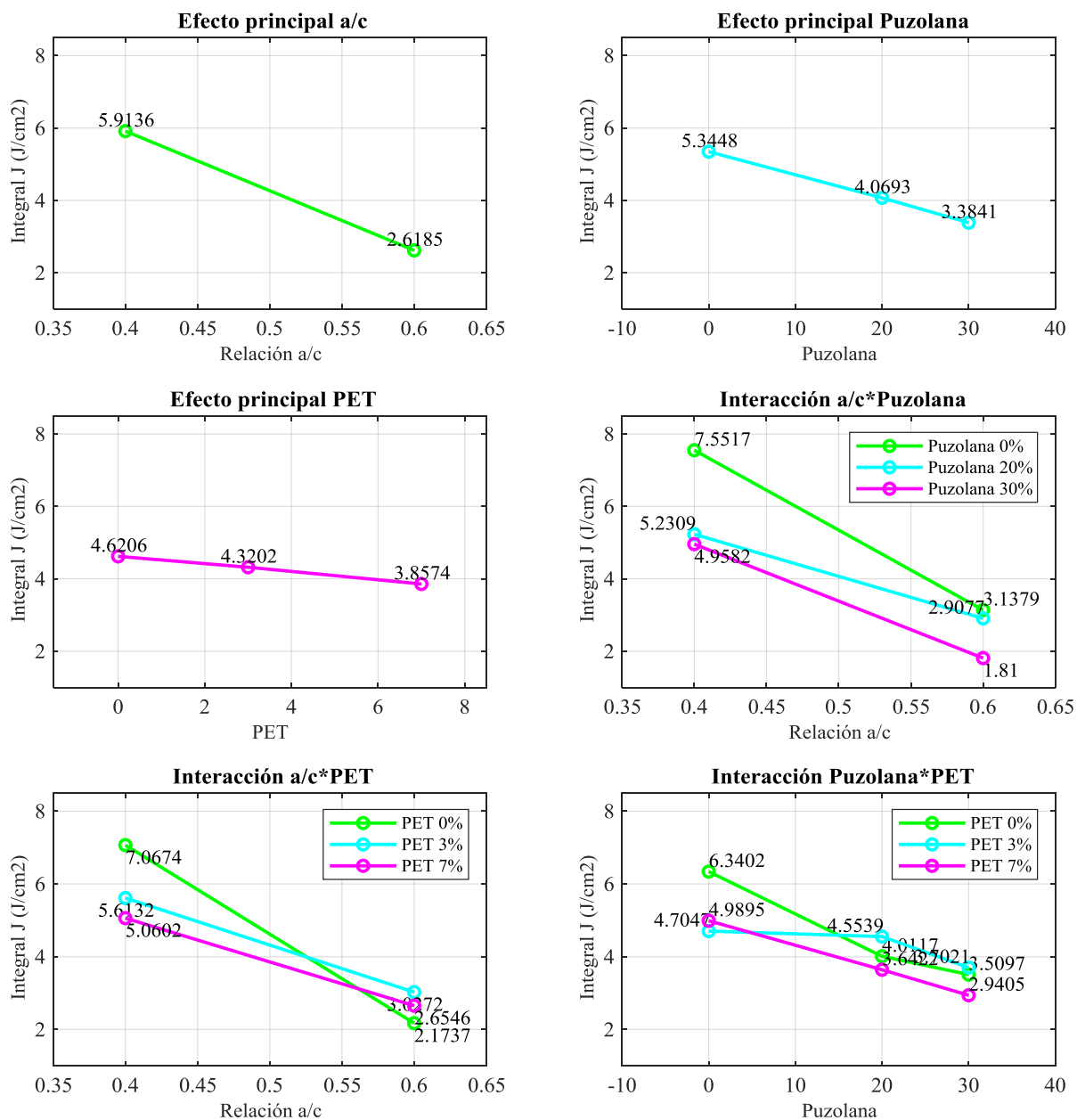
$$\begin{aligned}
 f'c = & 228.82 + 63.55 a/c_{0.4} - 63.55 a/c_{0.6} + 42.64 Puzolana_0 \\
 & - 0.85 Puzolana_{20} - 41.79 Puzolana_{30} + 12.08 PET_0 - 7.69 PET_3 \\
 & - 4.39 PET_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 95.48\%$$

Respuesta: Energía de integral J (Joule/cm²)

Figura 69

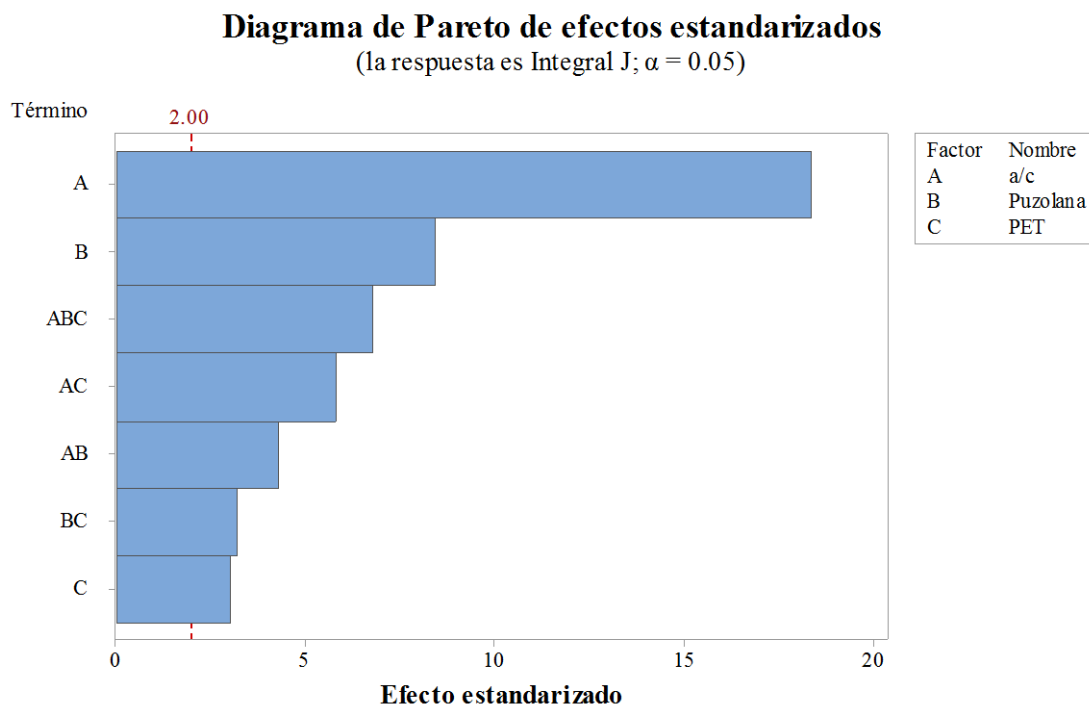
Gráfica de efectos principales e interacciones para la energía de integral J



Fuente: Elaboración propia.

Figura 70

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la energía de integral J



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

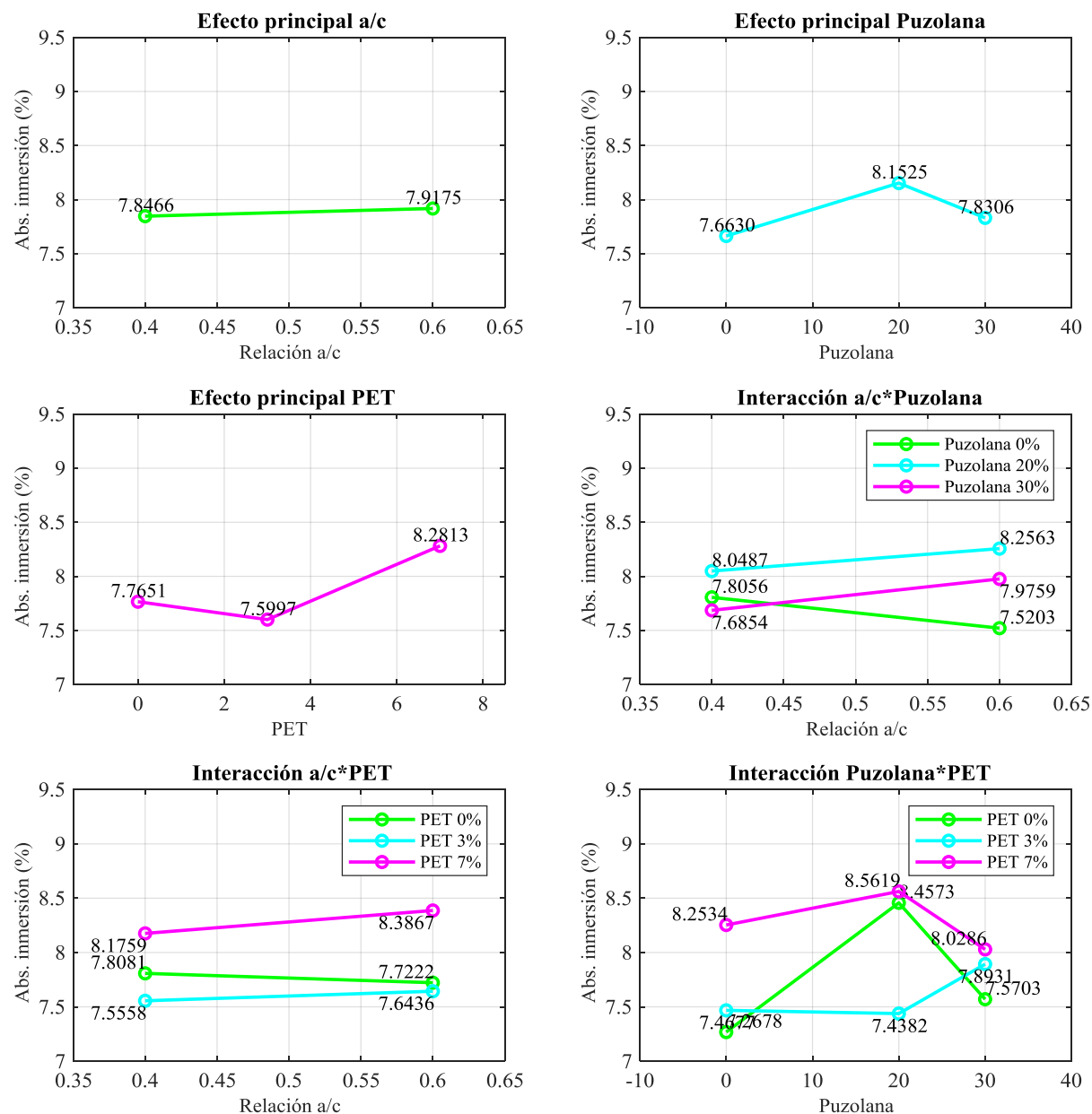
$$J = 4.266 + 1.648 a/c_{0.4} - 1.648 a/c_{0.6} + 1.079 Puzolana_0 - 0.197 Puzolana_{20} \\ - 0.882 Puzolana_{30} + 0.354 PET_0 + 0.054 PET_3 - 0.409 PET_7$$

$$R^2 = 68.28\%$$

Respuesta: Absorción después de inmersión (%)

Figura 71

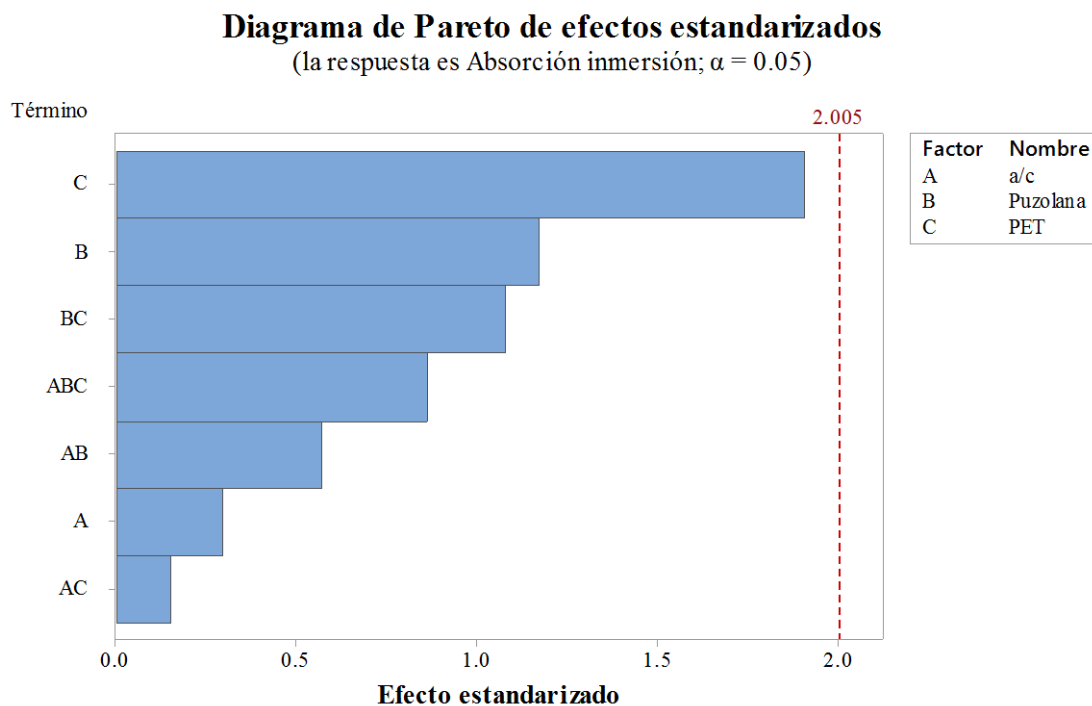
Gráfica de efectos principales e interacciones para la absorción después de inmersión



Fuente: Elaboración propia.

Figura 72

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la absorción después de inmersión



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

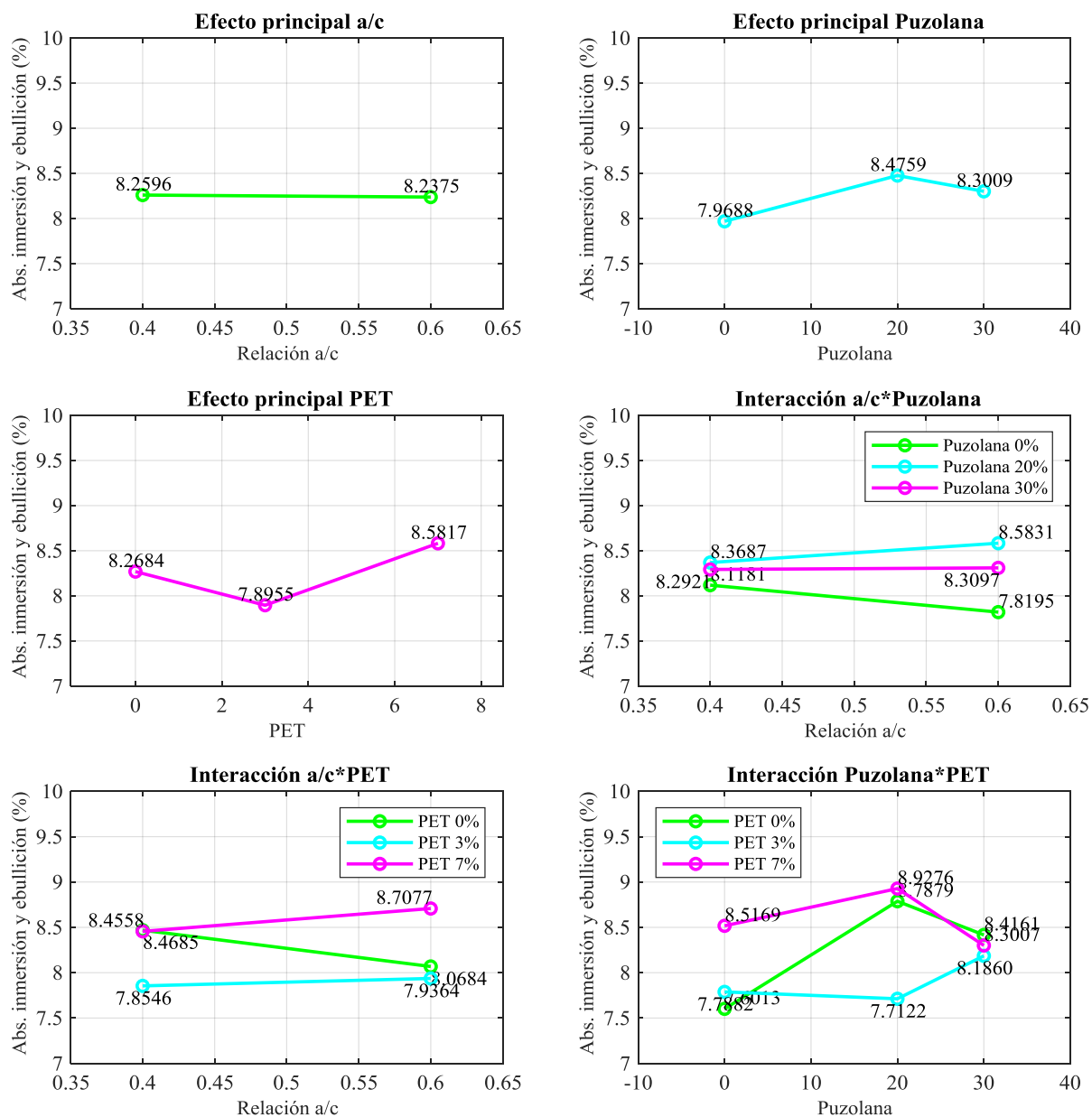
$$\begin{aligned}
 Abs.inm. = & 0.07882 - 0.00035 a/c_{0.4} + 0.00035 a/c_{0.6} - 0.00219 Puzolana_0 \\
 & + 0.00270 Puzolana_{20} - 0.00051 Puzolana_{30} - 0.00117 PET_0 \\
 & - 0.00282 PET_3 + 0.00399 PET_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 12.03\%$$

Respuesta: Absorción después de inmersión y ebullición (%)

Figura 73

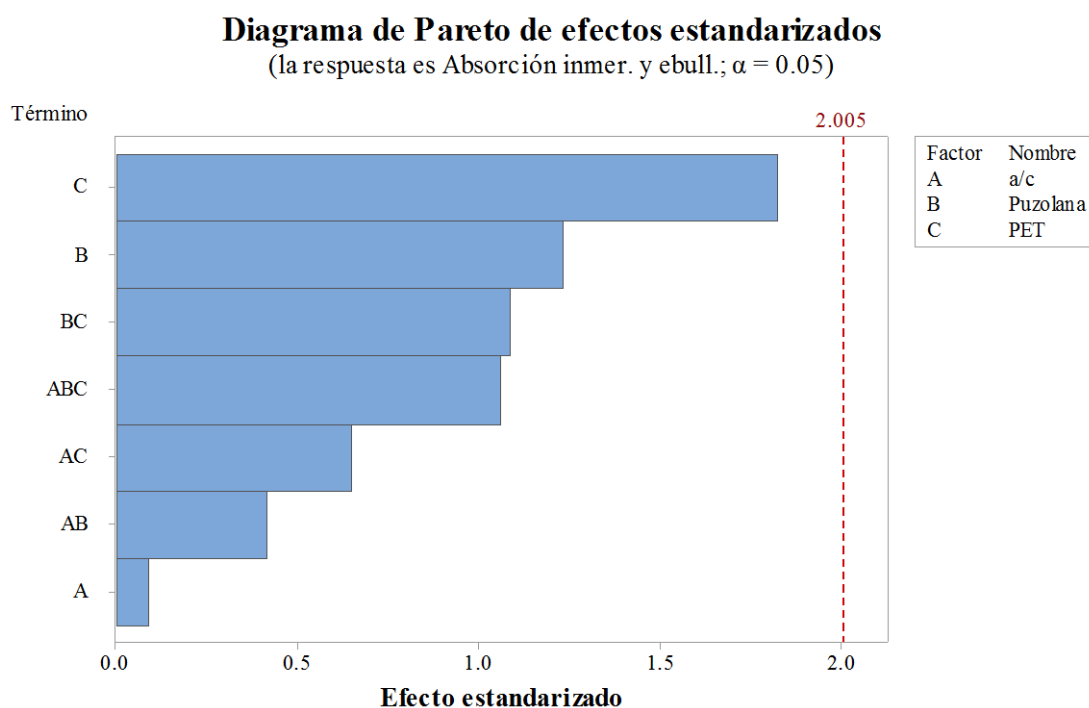
Gráfica de efectos principales e interacciones para la absorción después de inmersión y ebullición



Fuente: Elaboración propia.

Figura 74

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la absorción después de inmersión y ebullición



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

Abs.inm. ebul.

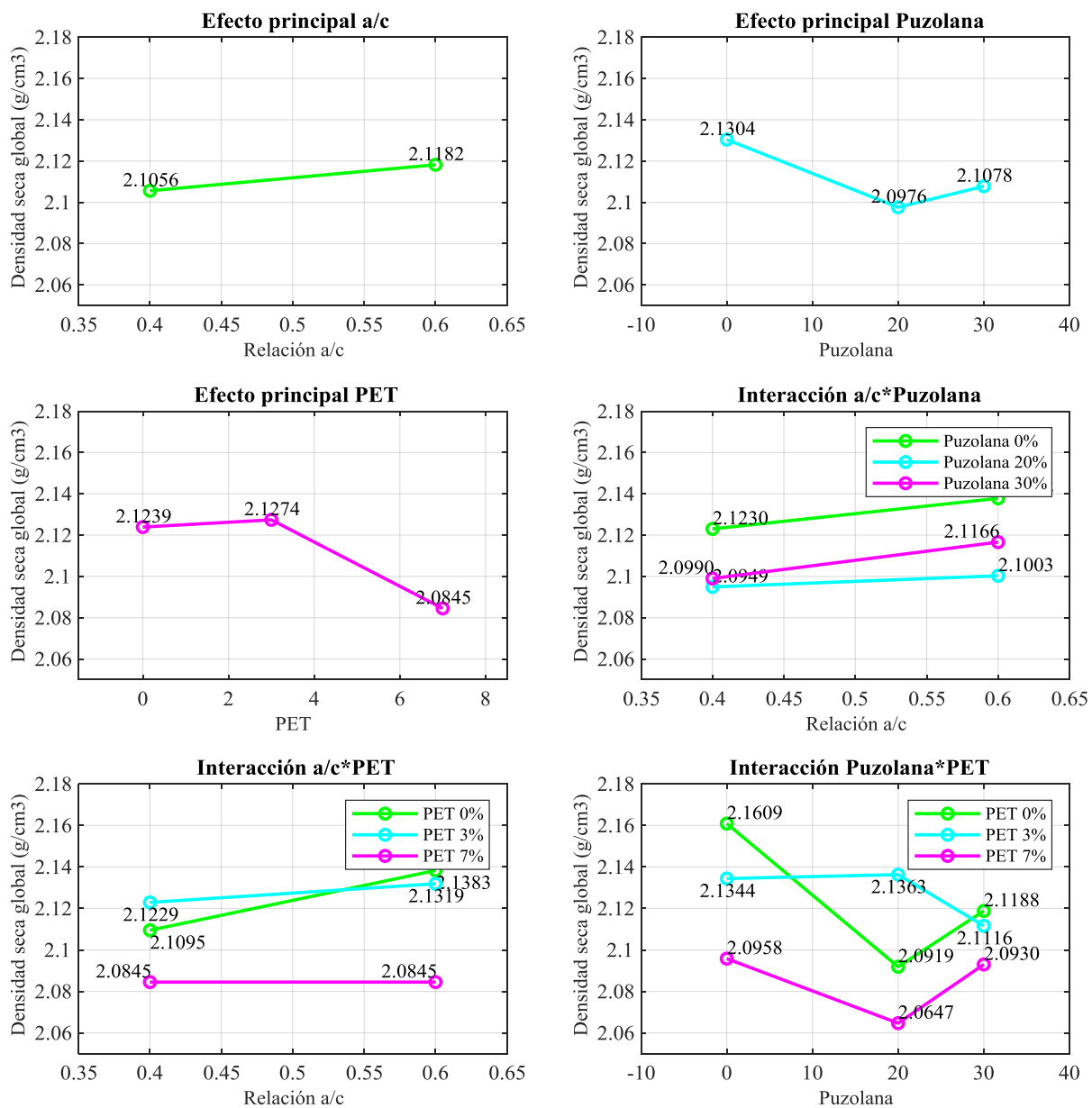
$$\begin{aligned}
 &= 0.08249 + 0.00011 a/c_{0.4} - 0.00011 a/c_{0.6} - 0.00280 Puzolana_0 \\
 &+ 0.00227 Puzolana_{20} + 0.00052 Puzolana_{30} + 0.00020 PET_0 \\
 &- 0.00353 PET_3 + 0.00333 PET_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 11.43\%$$

Respuesta: Densidad seca global (g/cm³)

Figura 75

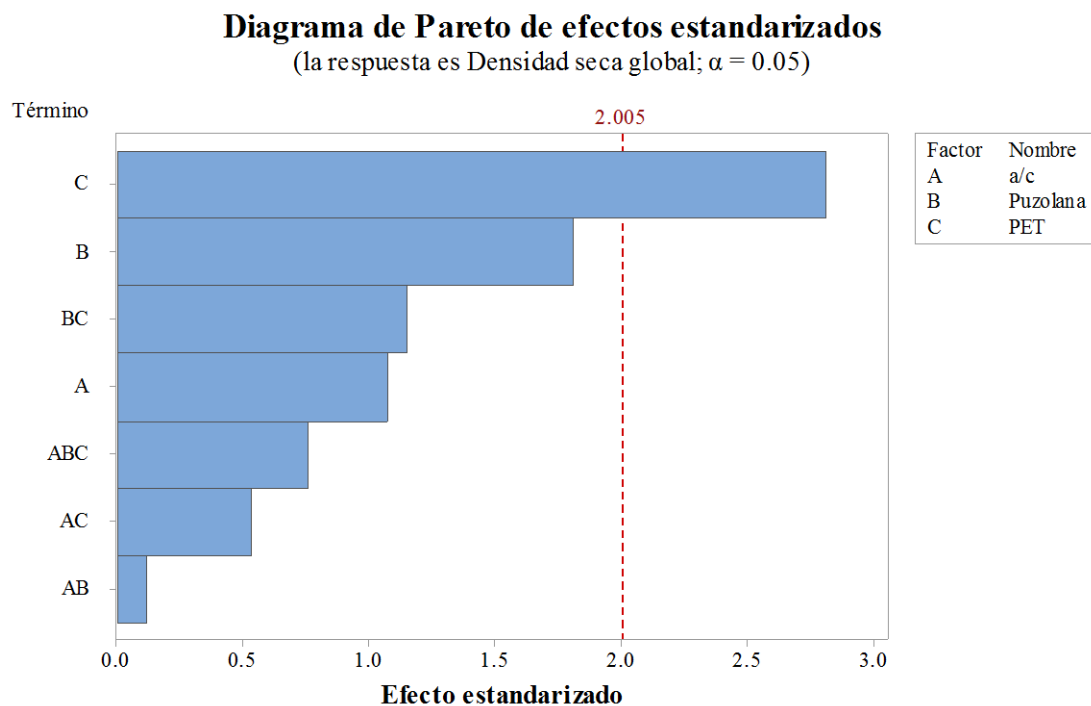
Gráfica de efectos principales e interacciones para la densidad seca global



Fuente: Elaboración propia.

Figura 76

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la densidad seca global



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

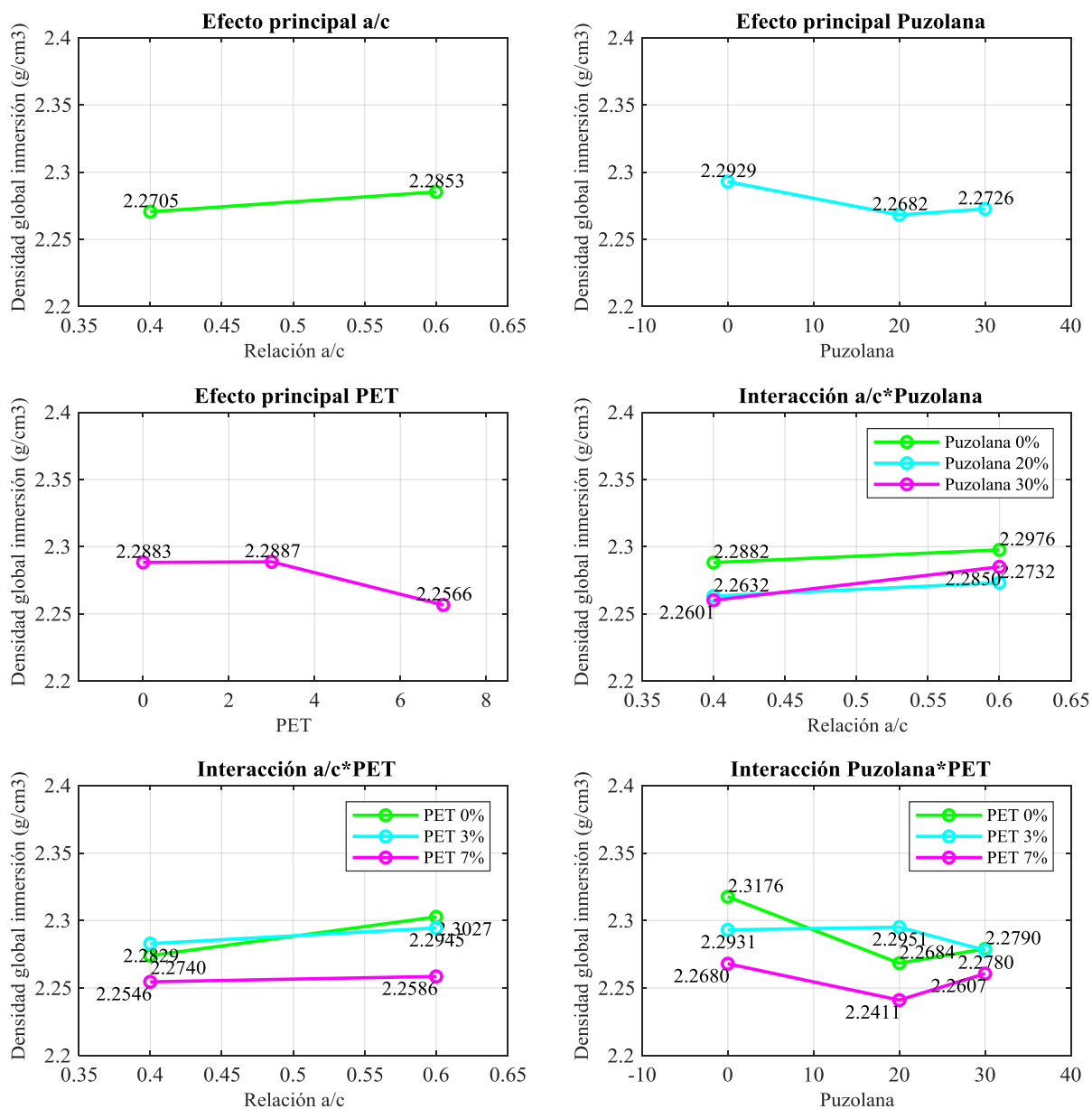
$$\begin{aligned} \rho_{seca\ global} = & 2.11194 - 0.00631\ a/c_{0.4} + 0.00631\ a/c_{0.6} + 0.01844\ Puzolana_0 \\ & - 0.01432\ Puzolana_{20} - 0.00412\ Puzolana_{30} + 0.01193\ PET_0 \\ & + 0.01550\ PET_3 - 0.02743\ PET_7 \end{aligned}$$

$$R^2 = 21.36\%$$

Respuesta: Densidad global después de inmersión (g/cm^3)

Figura 77

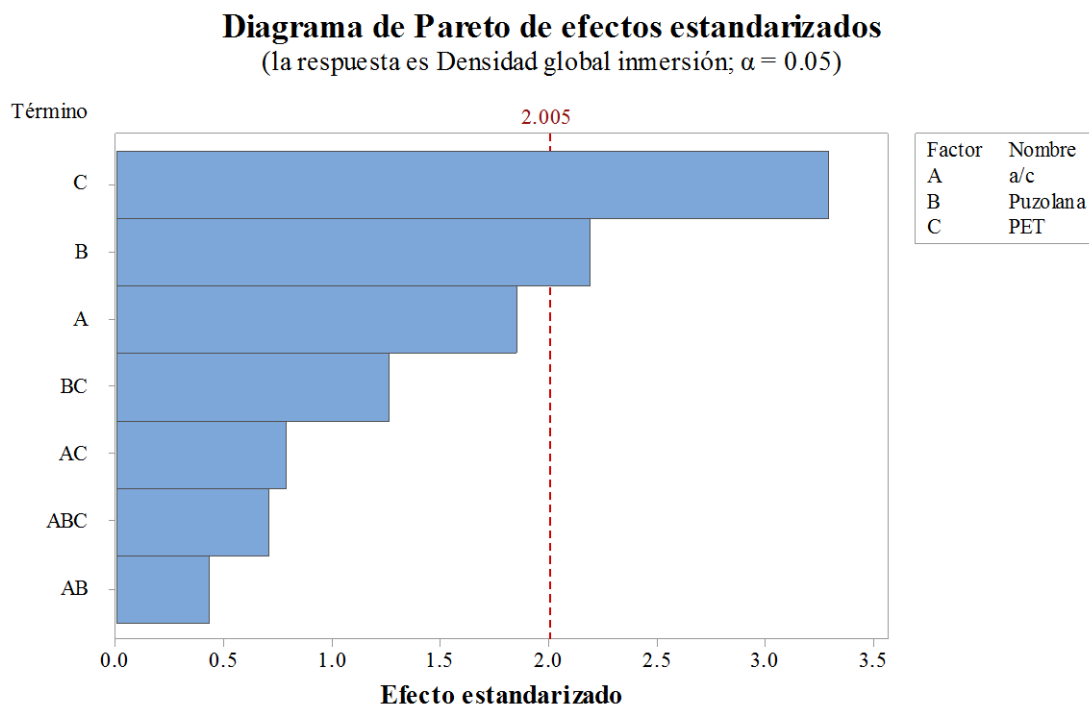
Gráfica de efectos principales e interacciones para la densidad global después de inmersión



Fuente: Elaboración propia.

Figura 78

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la densidad global después de inmersión



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

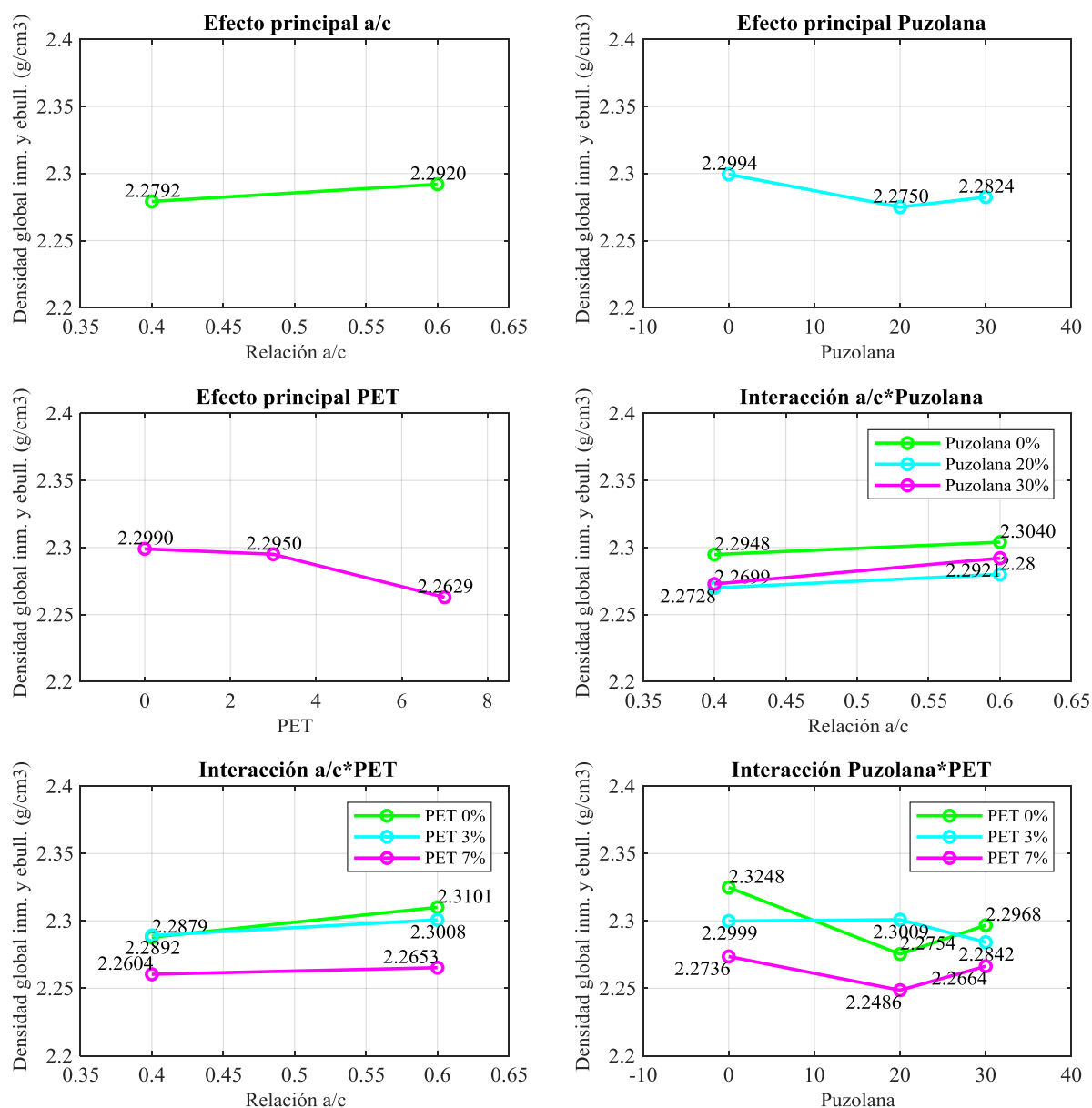
$$\begin{aligned} \rho_{global\ inm.} = & 2.27789 - 0.00737 a/c_{0.4} + 0.00737 a/c_{0.6} + 0.01501 Puzolana_0 \\ & - 0.00968 Puzolana_{20} - 0.00533 Puzolana_{30} + 0.01044 PET_0 \\ & + 0.01084 PET_3 - 0.02128 PET_7 \end{aligned}$$

$$R^2 = 27.50\%$$

Respuesta: Densidad global después de inmersión y ebullición (g/cm^3)

Figura 79

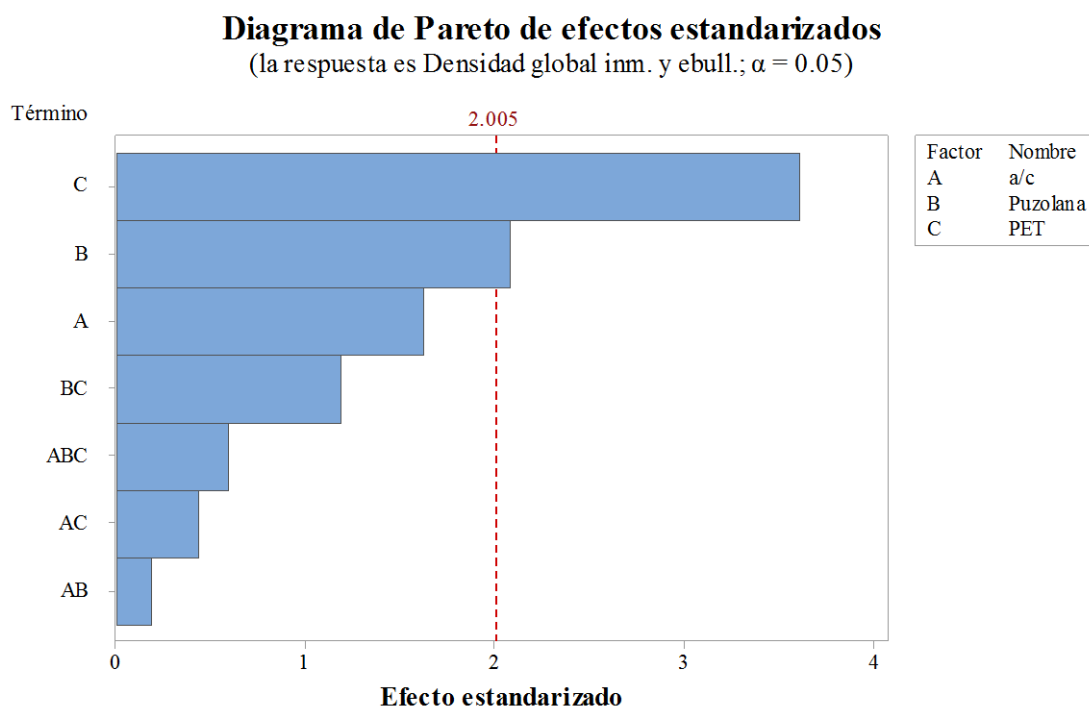
Gráfica de efectos principales e interacciones para la densidad global después de inmersión y ebullición



Fuente: Elaboración propia.

Figura 80

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la densidad global después de inmersión y ebullición



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

$\rho_{\text{global inm. ebul.}}$

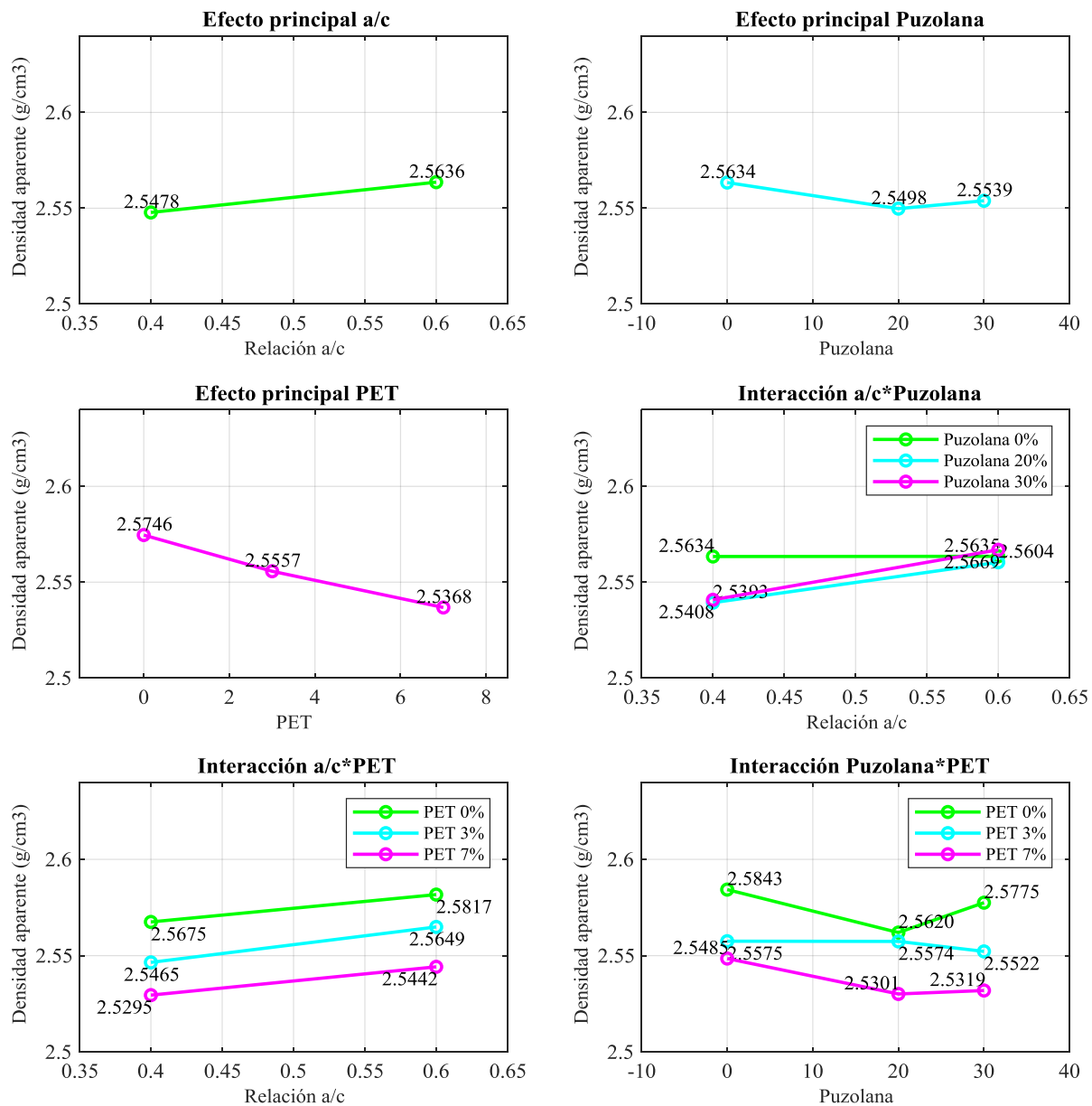
$$\begin{aligned}
 &= 2.28561 - 0.00642 a/c_{0.4} + 0.00642 a/c_{0.6} + 0.01380 \text{Puzolana}_0 \\
 &- 0.01064 \text{Puzolana}_{20} - 0.00316 \text{Puzolana}_{30} + 0.01336 \text{PET}_0 \\
 &+ 0.00938 \text{PET}_3 - 0.02275 \text{PET}_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 29.10\%$$

Respuesta: Densidad aparente (g/cm^3)

Figura 81

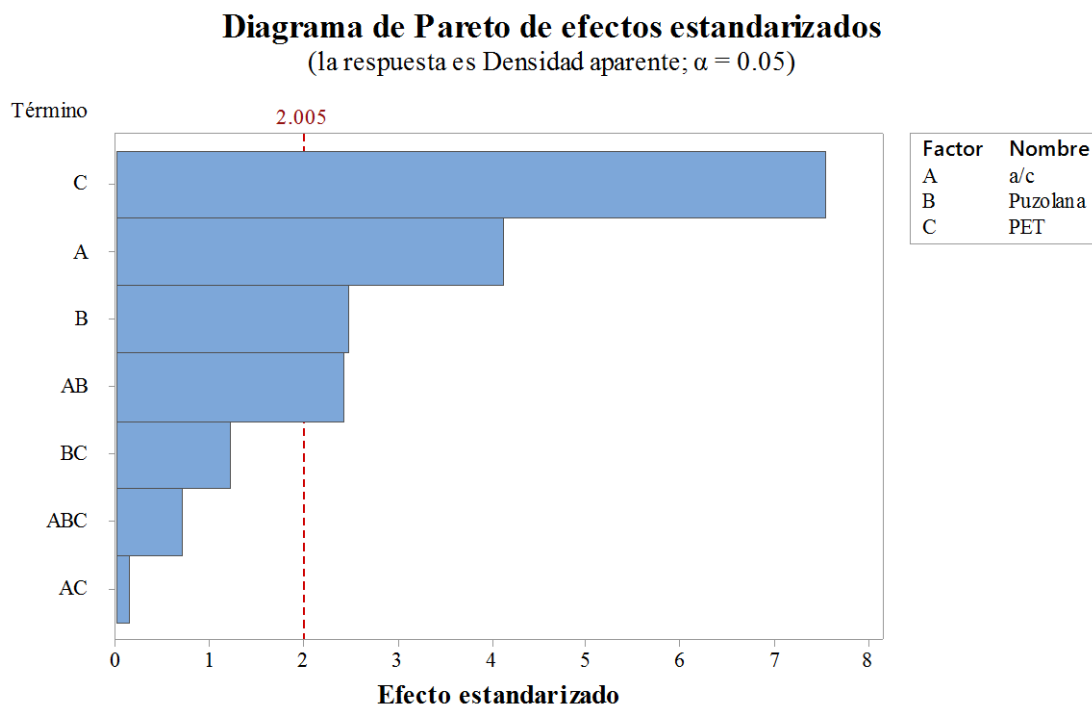
Gráfica de efectos principales para la densidad aparente



Fuente: Elaboración propia.

Figura 82

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la densidad aparente



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

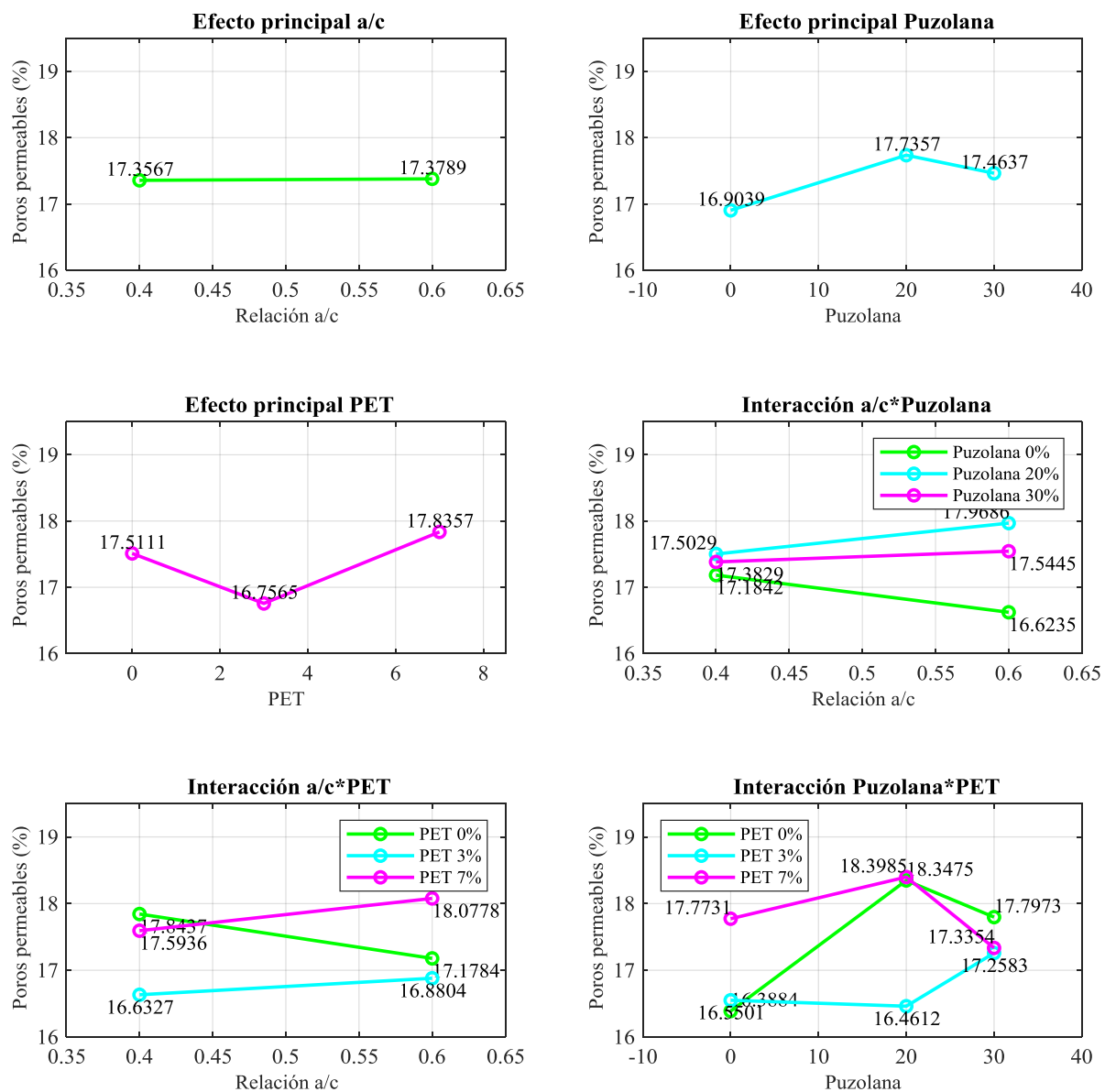
$$\begin{aligned} \rho_{aparente} = & 2.55571 - 0.00788 a/c_{0.4} + 0.00788 a/c_{0.6} + 0.00773 Puzolana_0 \\ & - 0.00589 Puzolana_{20} - 0.00184 Puzolana_{30} + 0.01889 PET_0 \\ & - 0.00002 PET_3 - 0.01887 PET_7 \end{aligned}$$

$$R^2 = 55.73\%$$

Respuesta: Volumen de vacíos, poros permeables (%)

Figura 83

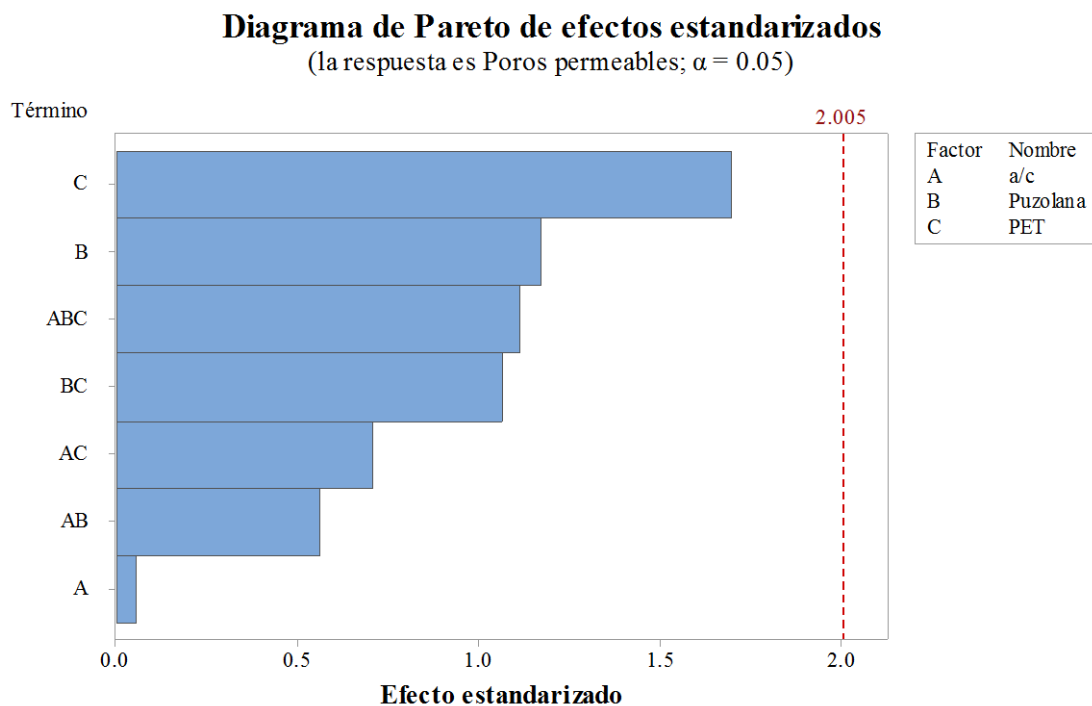
Gráfica de efectos principales e interacciones para poros permeables



Fuente: Elaboración propia.

Figura 84

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para poros permeables



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

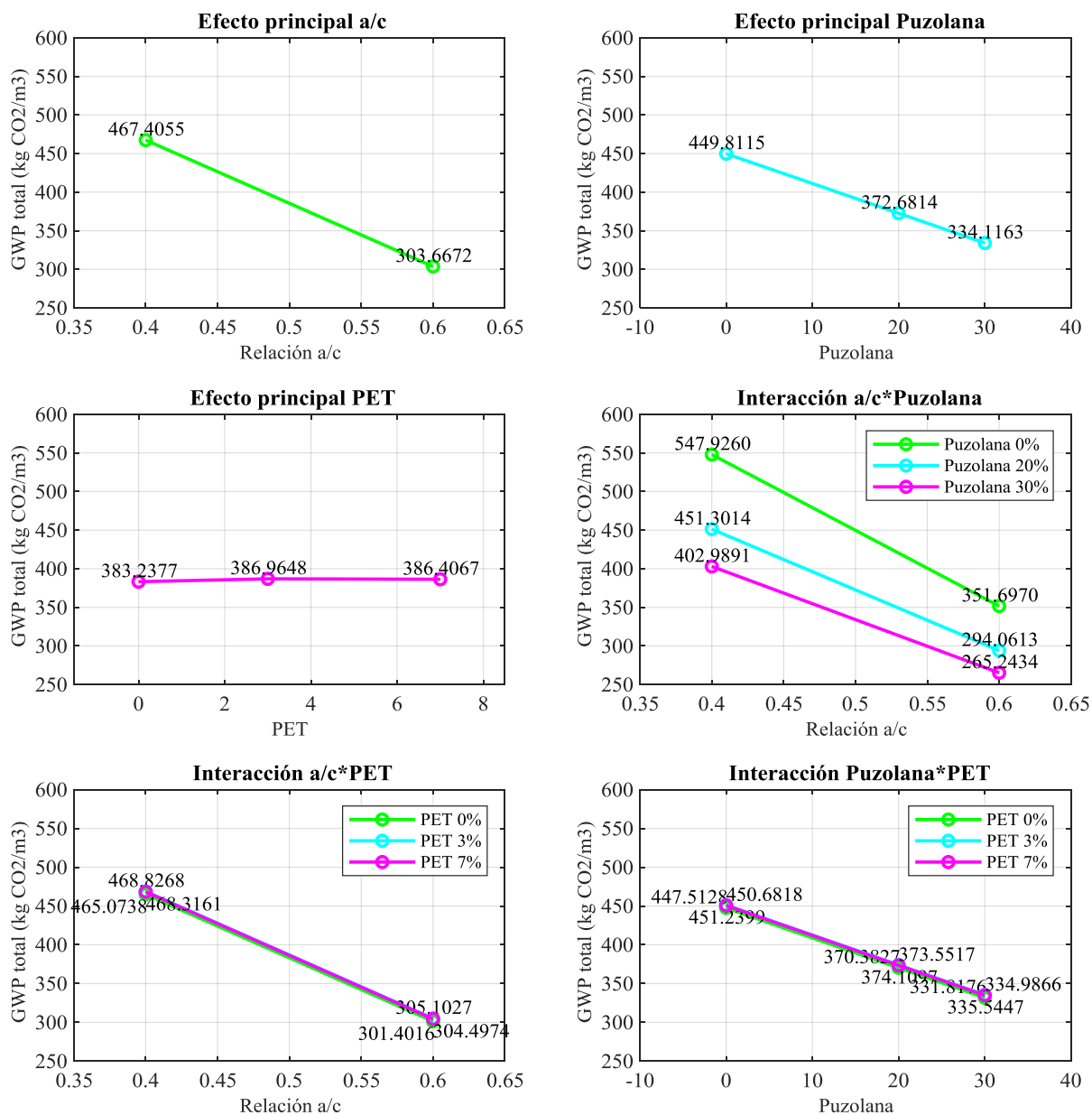
$$\begin{aligned}
 Vol. vacíos = & 0.17368 - 0.00011 a/c_{0.4} + 0.00011 a/c_{0.6} - 0.00464 Puzolana_0 \\
 & + 0.00368 Puzolana_{20} + 0.00096 Puzolana_{30} + 0.00143 PET_0 \\
 & - 0.00611 PET_3 + 0.00468 PET_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 10.40\%$$

Respuesta: *GWP (Global Warming Potential) total ($\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^3$)*

Figura 85

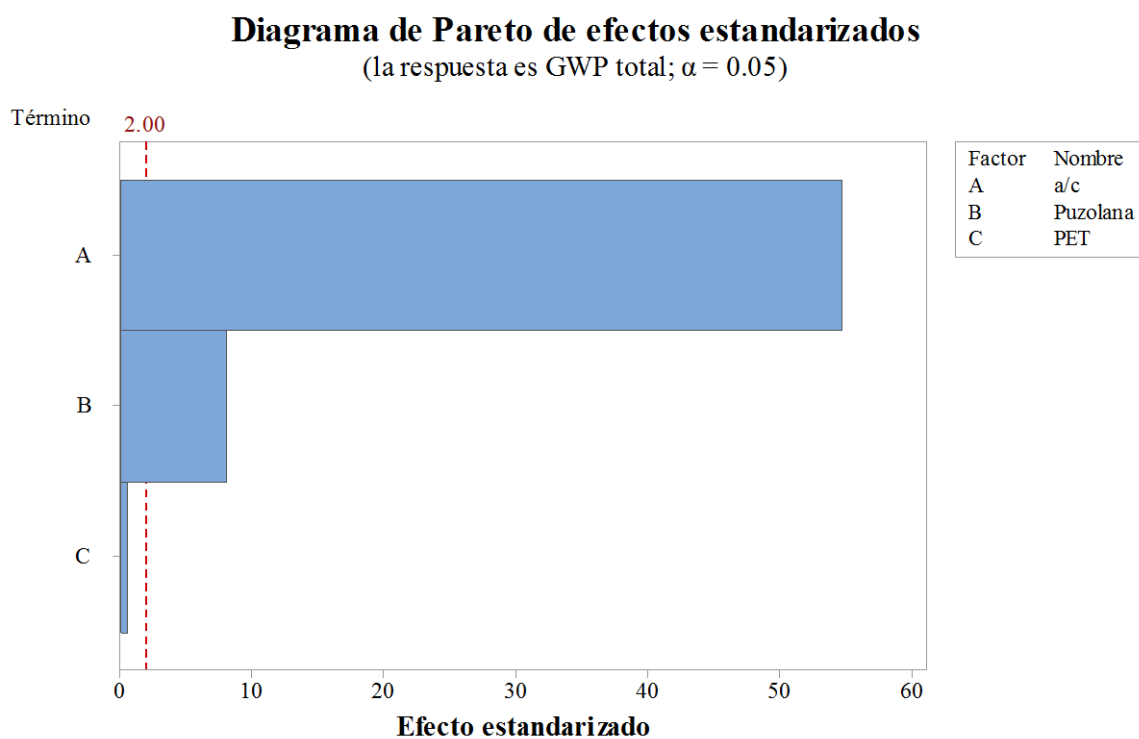
Gráfica de efectos principales e interacciones para GWP total



Fuente: Elaboración propia.

Figura 86

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para GWP total



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

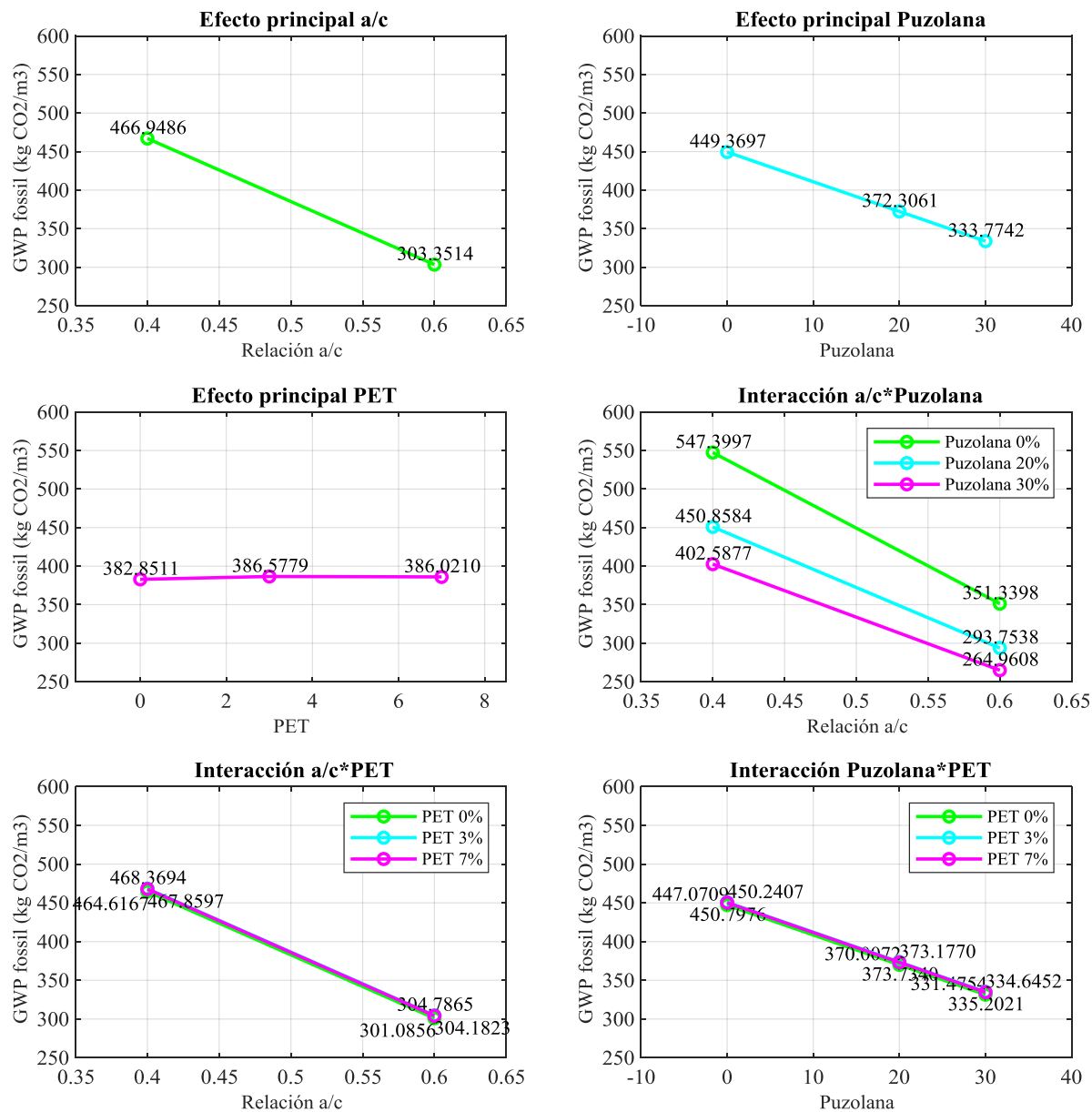
$$\begin{aligned}
 GWP_{total} = & 385.54 + 81.87 a/c_{0.4} - 81.87 a/c_{0.6} + 64.28 Puzolana_0 \\
 & - 12.86 Puzolana_{20} - 51.42 Puzolana_{30} - 2.30 PET_0 + 1.43 PET_3 \\
 & + 0.87 PET_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 98.39\%$$

Respuesta: *GWP (Global Warming Potential) fossil ($\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^3$)*

Figura 87

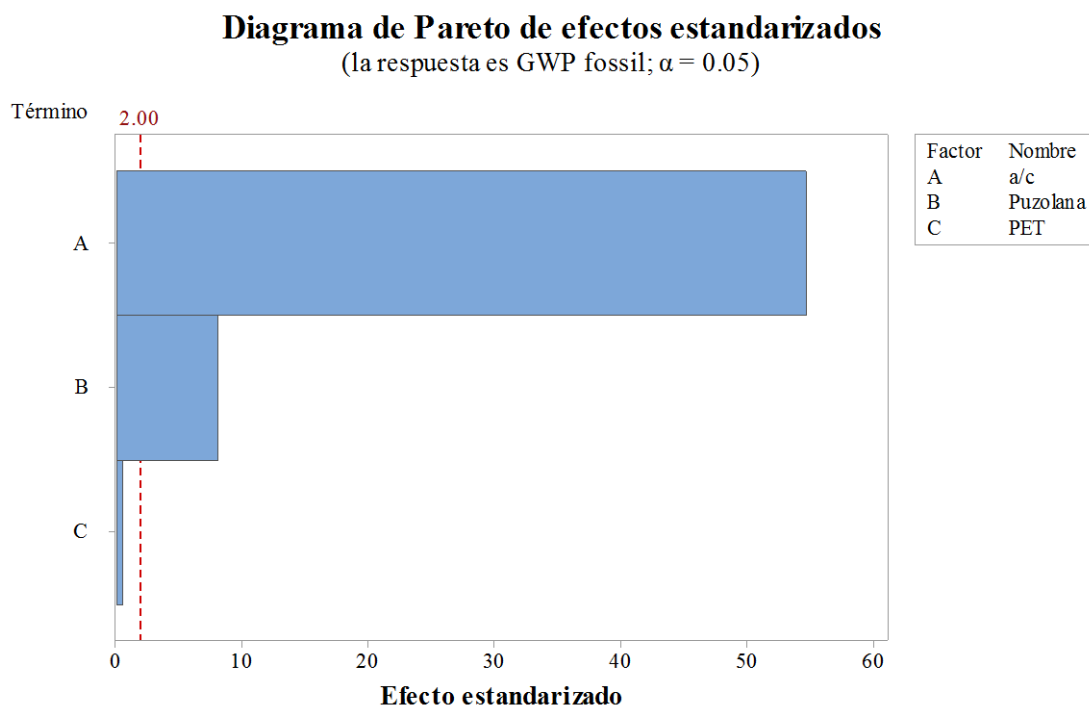
Gráfica de efectos principales e interacciones para GWP fossil



Fuente: Elaboración propia.

Figura 88

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para GWP fossil



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

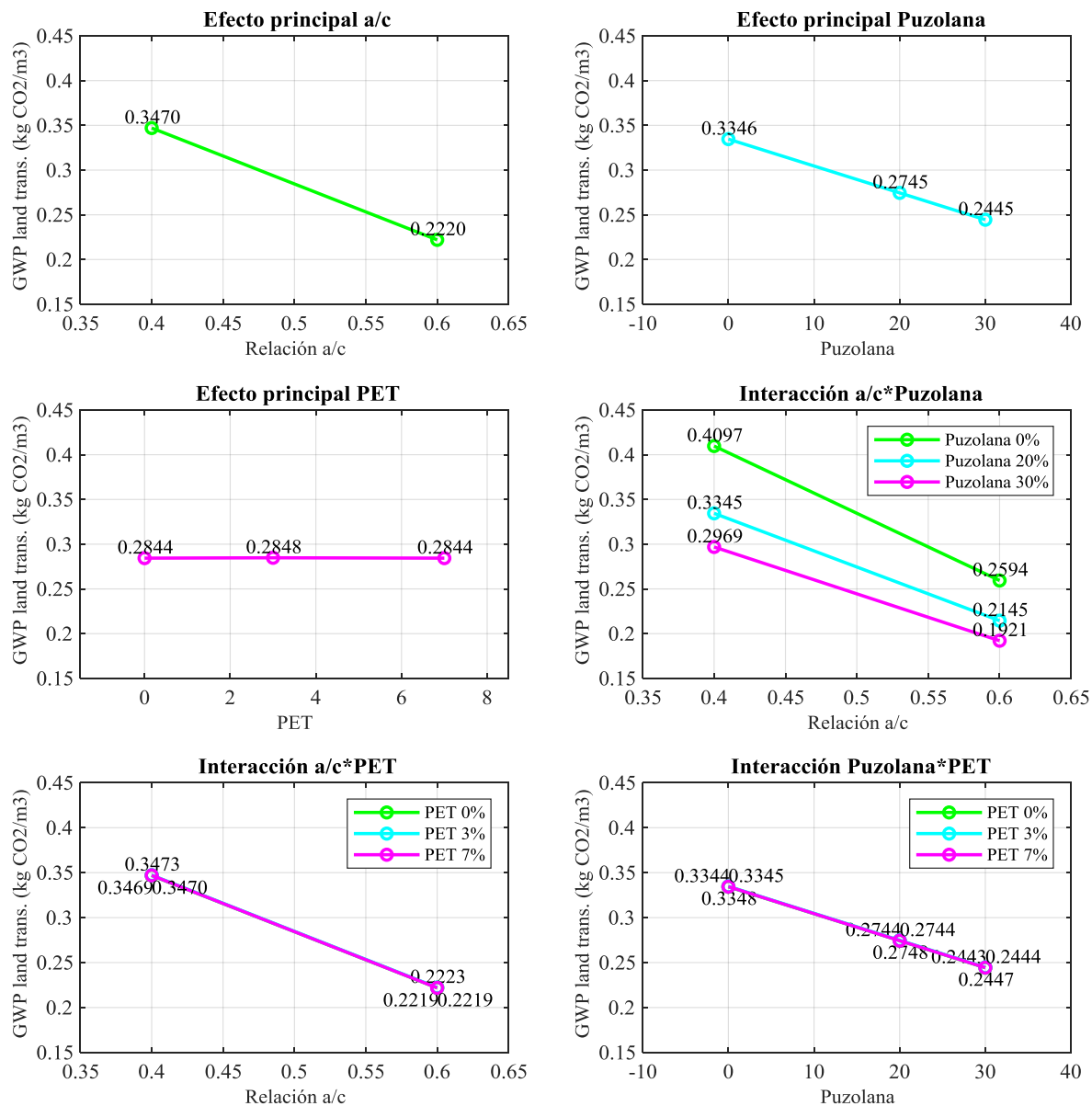
$$\begin{aligned}
 GWP_{fossil} = & 385.15 + 81.80 a/c_{0.4} - 81.80 a/c_{0.6} + 64.22 Puzolana_0 \\
 & - 12.84 Puzolana_{20} - 51.38 Puzolana_{30} - 2.30 PET_0 + 1.43 PET_3 \\
 & + 0.87 PET_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 98.39\%$$

Respuesta: *GWP (Global Warming Potential) land transformation ($\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^3$)*

Figura 89

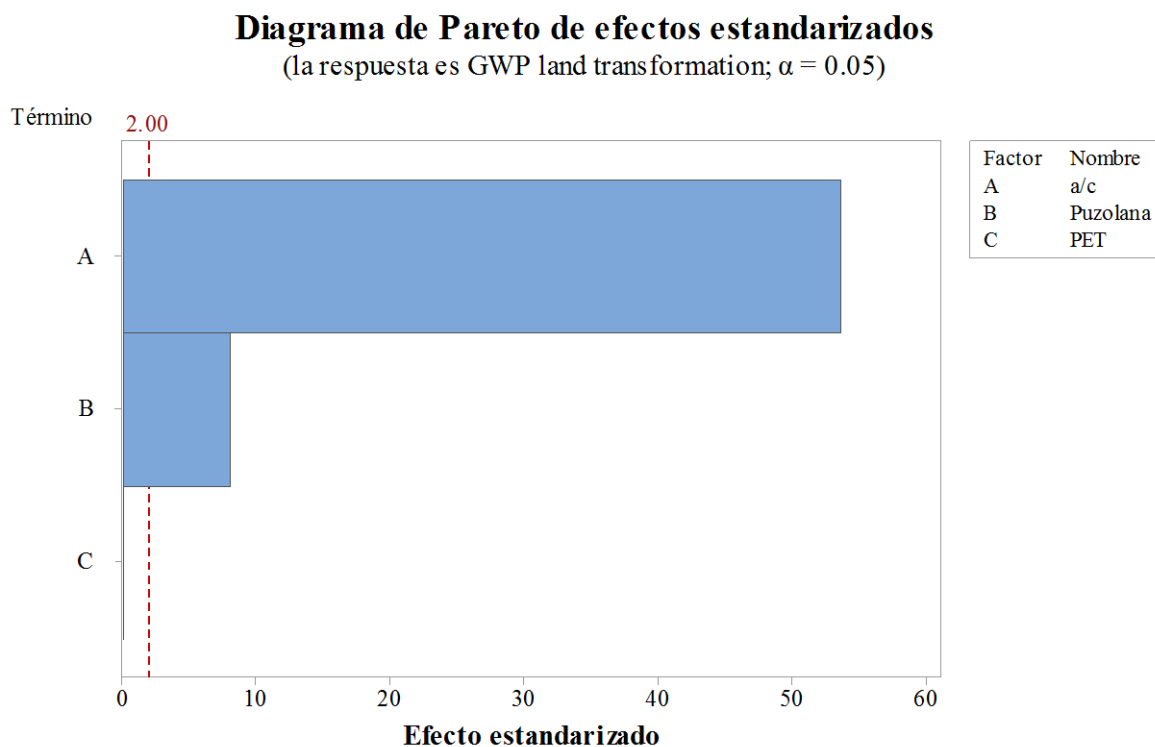
Gráfica de efectos principales e interacciones para GWP land transformation



Fuente: Elaboración propia.

Figura 90

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para GWP land transformation



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

$GWP_{land\ transformation} =$

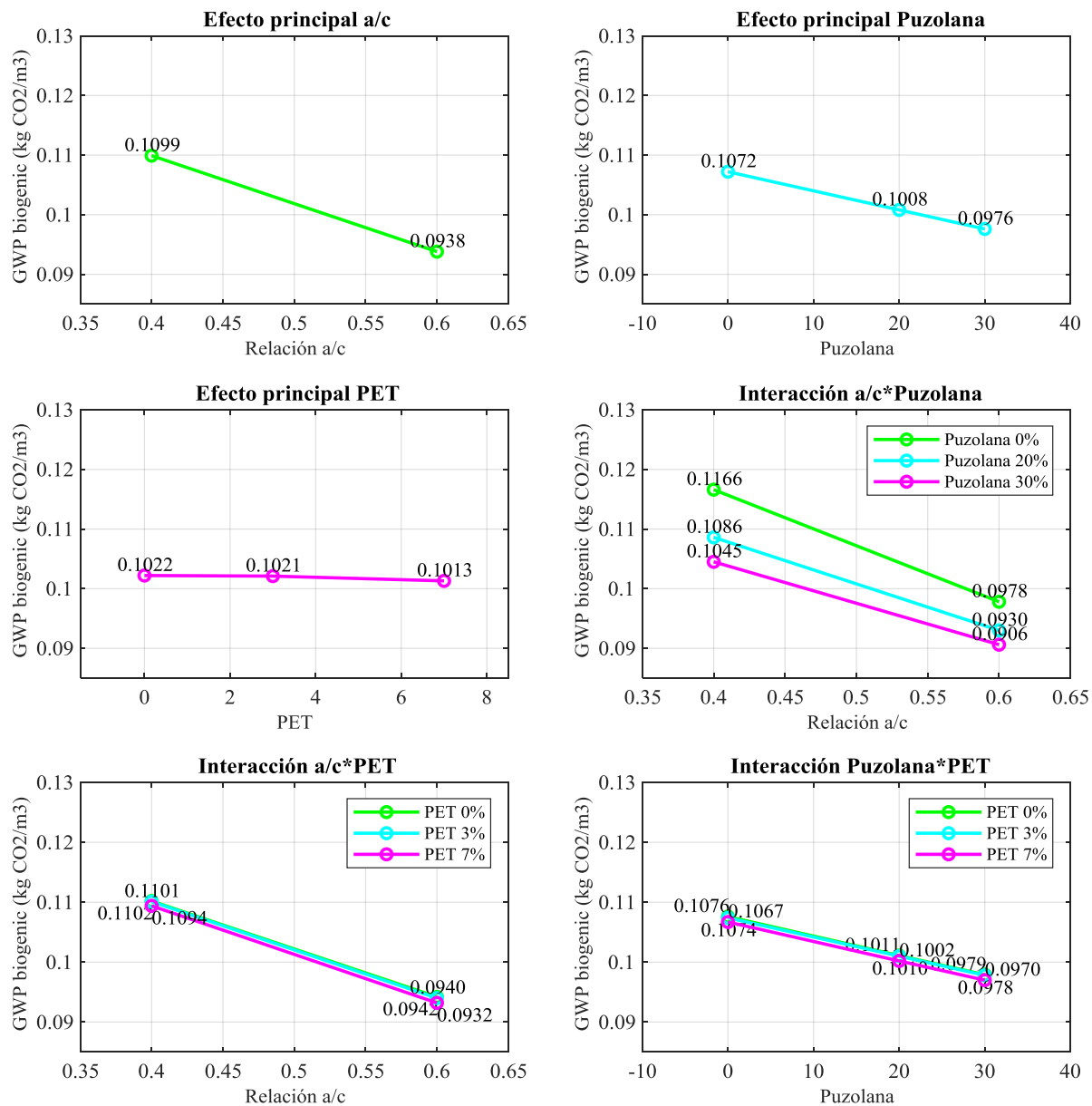
$$\begin{aligned}
 &0.28452 + 0.06252 a/c_{0.4} - 0.06252 a/c_{0.6} + 0.05003 Puzolana_0 \\
 &\quad - 0.01001 Puzolana_{20} - 0.04003 Puzolana_{30} - 0.00015 PET_0 \\
 &\quad + 0.00025 PET_3 - 0.00010 PET_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 98.34\%$$

Respuesta: *GWP (Global Warming Potential) biogenic ($\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^3$)*

Figura 91

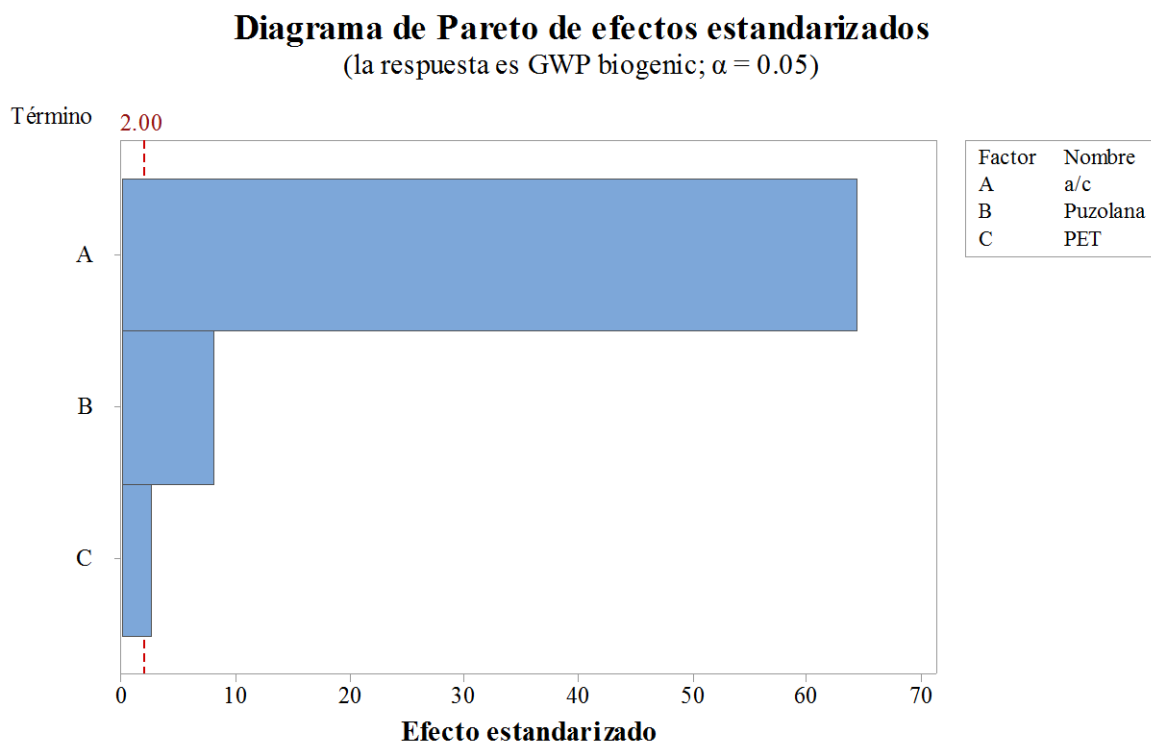
Gráfica de efectos principales e interacciones para GWP biogenic



Fuente: Elaboración propia.

Figura 92

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para GWP biogenic



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión:

$$\begin{aligned}
 GWP_{biogenic} = & 0.101860 + 0.008053 a/c_{0.4} - 0.008053 a/c_{0.6} \\
 & + 0.005370 Puzolana_0 - 0.001074 Puzolana_{20} \\
 & - 0.004296 Puzolana_{30} + 0.000351 PET_0 + 0.000195 PET_3 \\
 & - 0.000546 PET_7
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 98.74\%$$