

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**UTILIZACIÓN DEL POLVO RESIDUAL RECUPERADO DE LOS
FILTROS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CLINKER,
COMO ADICIÓN EN EL CEMENTO IP-30 EN LA FÁBRICA EL
PUENTE**

Por:

JESÚS GARNICA QUICANIA

Asesor: Ing. Nestor Yamil Romero

**Modalidad de graduación (TRABAJO DIRIGIDO) presentado a consideración
de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como
requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química.**

05 de abril de 2024

TARIJA-BOLIVIA

V°B°

M. Sc. Ing. Marcelo Segovia Cortez
DECANO

Ing. Gustavo Succi Aguirre
VIDECANO

TRIBUNAL:

Ing. Ignacio Velásquez Soza

Ing. Gustavo Morero Lopez

Ing. Maria Estela Sullca

Advertencia

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

Dedicatoria

A mi madre Nelly Quicania, a mi padre Juan Garnica y mi esposa Fatima Mejia, por apoyarme durante la carrera, sus consejos, por creer siempre en mí y motivarme día a día por ser mejor persona y especialmente por su amor incondicional que me demuestran permanentemente, a mis hijos Rodrigo y Sebastián y hermanos, porque quiero ser su orgullo y ejemplo a seguir.

Agradecimiento

A la fábrica de cemento El Puente, por brindarme su apoyo y colaboración con el suministro de materiales, insumos, acceso a sus instalaciones e información para llevar a cabo la realización del presente proyecto, con la colaboración de sus técnicos e ingenieros quienes me orientaron y brindaron su apoyo y experiencia.

A los docentes, asesores y tribunales por haberme brindado su tiempo, conocimiento y orientación.

ÍNDICE GENERAL

Advertencia.....	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Resumen	v
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES	1
OBJETIVOS.....	16
OBJETIVO GENERAL	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
JUSTIFICACIÓN.....	17
JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL	17
JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.....	18
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	20
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA FÁBRICA DE CEMENTO “EL PUENTE” SOBOCE S.A. 21	
1.1.1. Presentación de la fábrica de cemento El Puente	21
1.1.2. Localización	24
1.1.3. Estructura y organización	25
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	25
1.2.1. Explotación e internación de materias primas.....	26
1.2.2. Trituración de materias primas	30
1.2.3. Prehomogenización	32
1.2.4. Molienda de crudo	33
1.2.5. Homogeneización y almacenamiento del crudo.....	37
1.2.6. Proceso de calcinación – descarbonatación.....	38
1.2.7. Proceso de clinkerización	39
1.2.8. Molienda de cemento y dosificación	49
1.2.9. Parámetros de control de calidad en la molienda de cemento.....	55
CAPÍTULO II CONCEPCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	56
2.1. POLVO DE PURGA EN PLANTA EL PUENTE.....	57
2.1.1. Elementos volátiles en el horno.....	57
2.1.2. Los elementos alcalinos (Na_2O y K_2O).....	58
2.1.3. El elemento cloro.....	59
2.1.4. Ciclo de álcalis en la clinkerización.	59
2.1.5. Purga de polvo del filtro FLS en planta El Puente	67
2.1.6. Características del polvo purgado del filtro.....	69

2.1.7. Características del cemento El Puente IP-30.....	70
2.1.8. Concepción y definición de la problemática del polvo del filtro en planta El Puente 72	
CAPÍTULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL	74
3.1. PLANIFICACIÓN PARTE EXPERIMENTAL	75
3.1.1. Objeto de la parte experimental.....	75
3.1.2. Variables.....	76
3.1.3. Hipótesis	77
3.2. PROCESAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE MUESTRAS	78
3.2.1. Diseño de la muestra	78
3.2.2. Características del muestreo	80
3.2.3. Obtención de muestras del polvo de purga.....	81
3.2.4. Obtención de muestras de cemento estándar IP-30.....	81
3.2.5. Granulometrías materias primas obtenidas	83
3.2.6. Homogenización y dosificación de muestras	84
3.3. ENSAYOS FÍSICOS Y QUÍMICOS	86
3.3.1. Análisis químicos	86
3.3.2. Análisis físicos del cemento IP-30 con adición de PVF.....	91
3.4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	100
3.4.1. Análisis estadístico de resultados de ensayos químicos	100
3.4.2. Análisis estadístico resultados de ensayos físicos	106
3.5. CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO IP-30 CON ADICIÓN DE PVF.....	117
3.5.1. Consumo de agua del cemento con PVF	117
3.5.2. Tiempo de fraguado del cemento IP-30 con PVF	118
3.5.3. Efecto químico del CaCO ₃ del PVF	120
3.5.5. Resistencias a la compresión de los cementos con adición de PVF	122
3.5.6. Estabilidad de volumen del cemento con adición de PVF	124
3.5.7. Porcentaje de cloruros en el PVF	124
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE COSTOS	126
4.1. IDENTIFICACIÓN DE COSTOS	127
4.1.1. Situación actual del polvo purgado del filtro.....	127
4.1.2. Sistema planteado para la adición del PVF a cemento.....	127
4.2. BENEFICIO FINANCIERO	129
4.3. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO	133
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	134
5.1. CONCLUSIONES.....	135
5.2. RECOMENDACIONES	137
BIBLIOGRAFÍA	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla -1 Resistencia de cemento con adición de polvo de purga.....	9
Tabla -2 Control de pruebas de cemento con adición de polvo de purga.....	10
Tabla I-1 Características químicas de piedra caliza La Tablada	27
Tabla I-2 Características químicas de piedra caliza La Constancia	28
Tabla I-4 Características químicas de arcilla El Salto.....	28
Tabla I-3 Características químicas de yeso y toba en LA SOLUCIÓN	29
Tabla I-5 Clasificación de calizas (según prueba de carbonatos totales)	29
Tabla I-6 Composición química de la materia prima en los bancos.....	30
Tabla I-7 Los análisis físicos y mecánicos que se realizan en laboratorio del polvo crudo.....	36
Tabla I-8 Composición química del polvo crudo óxidos	36
Tabla I-10 Relación del polvo crudo de alimentación al horno	44
Tabla I-9 Parámetros químicos HEH	45
Tabla I-11 Parámetros químicos del clinker.....	45
Tabla I-12 Comportamiento de los componentes mineralógicos en el cemento.....	46
Tabla I-13 Información técnica del molino CPW	54
Tabla II-1 Efecto de concentración de elementos circulantes en la alimentación.....	60
Tabla II-2 Obstrucción en el precalentador del horno FLS, composiciones en el ciclón.....	68
Tabla II-3 Purga en el filtro del horno FLS, composiciones en el ciclón 4.....	68
Tabla II-4 Características físicas del polvo purgado	69
Tabla II-5 Características químicas del polvo purgado	69
Tabla II-6 Dosificación IP-30 y química de materiales.....	70
Tabla II-7 Parámetros del cemento IP-30 El Puente	71
Tabla III-1 Valores estandarizados en función del grado de confiabilidad.....	79
Tabla III-2 Valores de la probabilidad de la población que no presenta las características.....	79
Tabla III-3 Análisis clinker dosificación	82
Tabla III-4 Análisis toba dosificación	82
Tabla III-5 Análisis yeso dosificación.....	83
Tabla III-6 Dosificación de polvo del filtro al cemento IP-30	85
Tabla III-7 Composición Química del polvo purgado del filtro.....	88
Tabla III-8 Análisis Químico cemento IP-30	89
Tabla III-9 Análisis Químico del cemento IP-30 con 3 % de adición.....	89
Tabla III-10 Análisis Químico del cemento IP-30 con 5 % de adición.....	90

Tabla III-11 Análisis Químico del cemento IP-30 con 7 % de adición.....	90
Tabla III-12 Métodos normalizados ensayos físicos	91
Tabla III-13 Pesos específicos	91
Tabla III-14 Resultados de superficie específica por el permeabilímetro (Blaine)	92
Tabla III-15 Determinación de la Consistencia Normal.....	93
Tabla III-16 Resultados determinación del Tiempo de Fraguado Inicial y Final.....	94
Tabla III-17 Resultados determinación estabilidad de volumen Le Chatelier	96
Tabla III-18 Resultados Fluidez y relación agua cemento	97
Tabla III-19 Resultados determinación de la resistencia la compresión 3 días	98
Tabla III-20 Resultados determinación de la resistencia la compresión 3 días.....	99
Tabla III-21 Resultados determinación de la resistencia la compresión 28 días.....	99
Tabla III-22 Análisis de Varianza (MgO)	101
Tabla III-23 Estadísticos descriptivos (MgO)	101
Tabla III-24 Análisis de Varianza (SO ₃)	102
Tabla III-25 Estadísticos descriptivos (SO ₃)	103
Tabla III-26 Análisis de Varianza (LOI)	104
Tabla III-27 Estadísticos descriptivos (LOI)	104
Tabla III-28 Análisis de Varianza (RI).....	105
Tabla III-29 Estadísticos descriptivos (RI).....	105
Tabla III-30 Análisis de Varianza (Blaine)	106
Tabla III-31 Estadísticos descriptivos (Blaine)	107
Tabla III-32 Análisis de Varianza Tiempo de Fraguado inicial	108
Tabla III-33 Estadísticos descriptivos (Fraguado inicial).....	108
Tabla III-34 Análisis de Varianza Tiempo de Fraguado final.....	109
Tabla III-35 Estadísticos descriptivos (Fraguado final)	109
Tabla III-36 Análisis de Varianza Le Chatelier NB643	111
Tabla III-37 Estadísticos descriptivos (Le Chatelier NB643)	111
Tabla III-38 Análisis de Varianza resistencia la compresión a 3 días NB 470	113
Tabla III-39 Estadísticos descriptivos (resistencia la compresión a 3 días NB 470)	113
Tabla III-40 Análisis de Varianza resistencia la compresión a 7 días NB 470	114
Tabla III-41 Estadísticos descriptivos (resistencia la compresión a 7 días NB 470)	115
Tabla III-42 Análisis de Varianza resistencia la compresión a 28 días NB 470	116
Tabla III-43 Estadísticos descriptivos (resistencia la compresión a 28 días NB 470)	116

Tabla III-44 Reacciones de hidratación del cemento	120
Tabla III-45 Aporte de los componentes del cemento en el endurecimiento	122
Tabla III-46 Balance de contenido de cloruros en el cemento IP-30 adicionado.....	125
Tabla IV-1 Presupuesto para la adición PVF al cemento	129
Tabla IV-2 Dosificación media del cemento IP-30.....	129
Tabla IV-3 Dosificación media del cemento IP-30 con 3% PVF	130
Tabla IV-4 Cuantificación del beneficio del flujo financiero 3% PVF.....	130
Tabla IV-5 Dosificación media del cemento IP-30 con 5% PVF	131
Tabla IV-6 Cuantificación del beneficio del flujo financiero 5% PVF.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura -1 EP+POLVELEC 1996, 9no. Ensayo de resistencia vs porcentaje	11
Figura -2 EP+POLVELEC 1996, 9no. Ensayo de resistencia vs. Tiempo.....	11
Figura 1-1 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de cemento.....	26
Figura 1-2 Denominación de la cantera.....	29
Figura 1-3 Diagrama de flujo del proceso de chancado	31
Figura 1-4 Control de formación de pilas con analizador en línea CB OMNI.....	33
Figura 1-5 Diagrama de flujo de molienda de crudo I	35
Figura 1-6 Diagrama de flujo de molienda de crudo II	35
Figura 1-7 Reacciones en el proceso de clinkerización.....	40
Figura 1-8 Diagrama del horno Fuller	47
Figura 1-9 Diagrama de flujo del horno FLS	48
Figura 1-10 Variables básicas de operación del horno.....	49
Figura 1-11 Tamaño de partícula cemento	50
Figura 1-12 balanzas dosificadoras MERRICK.....	51
Figura 1-13 Diagrama de flujo premolienda y molienda de cemento	52
Figura 1-14 Prensa de rodillos.....	53
Figura 1-15 Elementos mecánicos del molino de cemento	54
Figura 2-1 Ejemplo de enriquecimiento de elementos volátiles.....	58
Figura 2-2 Circulación de elementos volátiles en el sistema de clinkerización	60
Figura 2-3 Límites de elementos volátiles Holcim.....	61
Figura 2-4 Gráficas de elementos volátiles SO ₃ ciclón 4 vs clinker	62
Figura 2-5 Gráficas de elementos volátiles K ₂ O	62

Figura 2-6 Gráficas de elementos volátiles cloro horno FLS.....	63
Figura 2-7 Límites de cloro	63
Figura 2-8 Gráficas de K ₂ O y Cl de la HEH FLS	64
Figura 2-9 RAS en Harina caliente FLS.....	65
Figura 2-10 Módulos de control y finura horno FLS	65
Figura 3-1 Diagrama de Flujo de las etapas del desarrollo experimental	75
Figura 3-2 Variables parte experimental	77
Figura 3-3 Granulometría Laser polvo purgado del filtro horno FLS 08/2023.....	83
Figura 3-4 Granulometría Laser cemento EL Puente IP-30, 08/2023.....	84
Figura 3-5 Resumen método ISO 29581-2 (MgO, SO ₃)	86
Figura 3-6 Resumen método NB 061 Determinación de las pérdidas por calcinación.....	87
Figura 3-7 Resumen método NB 061 Determinación de residuos insolubles.....	87
Figura 3-8 Resumen método NB 472 (Blaine).....	92
Figura 3-9 Determinación del tiempo de fraguado.....	94
Figura 3-10 NB 643 estabilidad de volumen Le Chatelier.....	95
Figura 3-11 NB 470. Resumen método determinación de la resistencia la compresión.....	98
Figura 3-12 Grafica Análisis químico ISO 29581-2 (MgO)%	101
Figura 3-13 Grafica Análisis químico ISO 29581-2 (SO ₃) %	102
Figura 3-14 Determinación de las pérdidas por calcinación (LOI) %.....	103
Figura 3-15 Determinación de residuos insolubles (RI) %	105
Figura 3-16 Determinación de la Superficie Específica Blaine (cm ² /g)	106
Figura 3-17 Determinación del Tiempo de Fraguado inicial (min).....	108
Figura 3-18 Determinación del Tiempo de Fraguado final (min)	109
Figura 3-19 Determinación estabilidad del volumen Le Chatelier NB643 (mm)	111
Figura 3-20 Desarrollo de las resistencias de las fases mineralógicas	112
Figura 3-21 Resistencia la compresión a 3 días NB 470 (Mpa).....	113
Figura 3-22 Resistencia la compresión a 7 días NB 470 (Mpa).....	114
Figura 3-23 Resistencia a la compresión a 28 días NB 470 (Mpa)	115
Figura 3-24 Reacciones de hidratación del cemento	119
Figura 4-1 Sistema planteado para la adición del PVF a cemento	128

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 DIAGRAMA DEL PROCESO	142
ANEXO 2 UBICACIÓN DE LA FÁBRICA.....	143
ANEXO 3 NORMAS INTERNAS DE MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS	144
ANEXO 4 INFORME FOTOGRÁFICO POLVO PURGADO DEL FILTRO DEL HORNO	145
ANEXO 5 NB 011 CEMENTO- DEFINICIONES Y ESPECIFICACIONES DE CEMENTO	146
ANEXO 6 REGLAMENTO TECNICO DEL CEMENTO – ESPECIFICACIONES FÍSICAS Y QUÍMICAS	154
ANEXO 7 LAY OUT LABORATORIO PLANTA EI PUENTE	155
ANEXO 8 ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD AL CEMENTO	156
ANEXO 9 ESTRUCTURA Y ORGANIZACIÓN	166
ANEXO 10 FOTOGRAFÍAS DE OBSTRUCCIÓN EN EL PRE-CALENTADOR DEL HORNO FLS	168
ANEXO 11 FOTOGRAFÍAS DEL MUESTREO EN LA LINEA DE CEMENTO Y MATERIALES EN DOSIFICACIÓN	169
ANEXO 12 INFORME FOTOGRÁFICO ENSAYOS QUÍMICOS	170
ANEXO 13 INFORME FOTOGRÁFICO ENSAYOS FÍSICOS	172
ANEXO 14 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS SOFTWARE MINITAB	174
ANEXO 15 EXIGENCIAS QUÍMICAS. NORMA EUROPEA EN- 197-1	196
ANEXO 16 CONSESIONES DE MATERIA PRIMA Y CONFORMACIÓN EN CANTERA	197

ABREVIATURAS

XRF	Fluorescencia de Rayos X
XRD	Difracción de rayos X
CO ₂	Dióxido de carbono
°C	Grados Celsius
Ca SO ₄	Sulfato de calcio
MgO	Óxido de magnesio
3CaO.SiO ₂	Silicato tricálcico (C ₃ S)
2CaO.SiO ₂	Silicato dicálcico (C ₂ S)
3CaO.Al ₂ O ₃	Aluminato tricálcico (C ₃ A)
4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	Ferroaluminato tetracálcico (C ₄ AF)
Ca(OH) ₂	Hidróxido de calcio (CH) => Portlandita
5CaO.6SiO ₂ .5H ₂ O	Silicatos cálcicos hidratados (S-C-H) => Tobermorita
Fe ₂ O ₃	Óxido Férrico (F)
Al ₂ O ₃	Alumina (A)
SiO ₂	Óxido de silicio - Sílice (S)
CaO	Óxido de calcio (C)
SO ₃	Trióxido de azufre
CaSO ₄ .2H ₂ O	Sulfato de calcio dihidratado - Yeso
CaCO ₃	Carbonato de calcio
NaOH	Óxido de sodio
C ₃ A.3CS.32H	Ettringita
C ₃ A.3CC.32H	Tricarboaluminato de calcio hidratado
C ₃ A.CC.11H	Monocarboaluminato de calcio hidratado
C ₃ A.CS.12H	Monosulfoaluminato de calcio hidratado
HCl	Ácido clorhídrico
Na ⁺	Catión de sodio
g	gramos
kg	Kilógramos
t	Tonelada
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
h	Hora
min	Minutos
s	Segundos
ml	Mililitros
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
Kw	Kilowatt
Hz	Hertz
MPa	Mega pascales
Psi	Libra de fuerza por pulgada cuadrada

d50	Tamaño medio de partículas
rpm	Revoluciones por minuto
M. LSF	Módulo de saturación de la Cal
M. SIM	Módulo del silicio
M. ALM	Módulo de fundentes
LOI	Pérdidas por calcinación (PPF)
HEH	Harina de entrada al horno
USD	Dólares Americanos
Bs.	Bolivianos
ASTM	American Society for Testing and Materials
NB	Norma Boliviana
RM MDPyEP N°261.2018	Reglamento técnico del cemento
PVF	Polvo purgado del filtro
SOBOCE S.A.	Sociedad Boliviana de Cemento Sociedad Anónima
ESMICAL S.A.	Especialistas en Minerales Calizos