



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad

Técnicas de Calidad aplicadas en la disposición de residuos del trabajo de la *Ignimbrita riolítica* de la Empresa Jaramillo en Huichapan, Hidalgo, México

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener grado de
Maestro en Ingeniería de Calidad

Presenta:

L.Q. Rebeca Guadalupe Ortiz Mena

Dirigido por:

Dr. Miguel Galván Ruiz

SINODALES

Dr. Miguel Galván Ruiz
Presidente

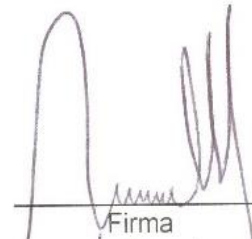
M. en I. Raúl Arroyo Martínez Fabre
Secretario

M. en I. Marcela Antonia Juárez Ríos
Vocal

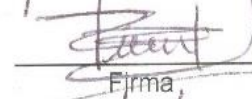
Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Suplente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Nombre y Firma
Director de la Facultad



Firma



Firma



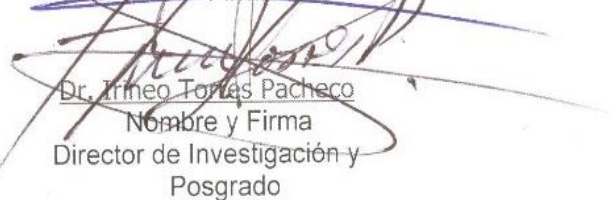
Firma



Firma



Firma



Dr. Aurelio Domínguez González
Nombre y Firma
Director de Investigación y
Posgrado

RESUMEN

En la industria de la cantera (*Ignimbrita riolítica*), dedicada principalmente a la extracción, corte y acabado de la piedra en piezas ornamentales, se generan como residuos lodos derivados de los procesos de corte y laminado de la materia prima, que una vez deshidratados se convierten en polvo. Canteras Jaramillo localizada en Rancho San José Dandó s/n Maney, Huichapan Hidalgo, México, ha almacenado paulatinamente sus polvos, los cuales interactúan con componentes naturales como aire y agua, provocando contaminación visual, entre otros aspectos. En la actualidad la empresa desea dar disposición a sus polvos con bases tecnológico-científicas, que le permitan emprender acciones para tal efecto. De este modo, se desarrolló la presente investigación, en la cual se aplicaron técnicas de calidad como Pareto, del cual se determinó que las principales causas por las cuales no se ha dado aplicación a estos residuos son: Falta de Información y adecuación a sus procesos para tener un producto redituable. El análisis mineralógico por medio Difracción de Rayos X (DRX) y Fluorescencia de Rayos X (FRX), determinó que la composición del lote está constituida en promedio de SiO₂ 75.9579%, Al₂O₃ 10.7956%, K₂O 8.5099%, CaO 2.4279%, Na₂O 0.9631% principalmente, entre otros minerales en forma minoritaria, por otro lado el análisis granulométrico efectuado a las muestras, clasificó el material como un limo inorgánico de baja compresibilidad, lo cual condujo a relacionar el contenido de minerales de los polvos y sus propiedades granulométricas con aplicaciones adecuadas al tipo de material. El uso de las herramientas de calidad Despliegue de la función de calidad (QFD), y Estratificación, confirieron la información necesaria para inferir en las recomendaciones que de modo sustentable permitirán disponer de los residuos del trabajo de la piedra cantera.

(Palabras clave: Canteras, Huichapan, residuo, Calidad, disposición)

SUMMARY

In the quarry industry (Ignimbrite rhyolitic), dedicated mainly to mining, cutting and finishing of stone in ornamental parts, sludge derived from cutting processes are generated as waste and raw, dehydrated once laminate turn to dust. Quarries Jaramillo located in Rancho San Jose Dandho s/n Maney, Huichapan, Hidalgo, Mexico, has gradually stored their powders, which interact with natural components such as air and water, causing visual pollution, among other aspects. Currently the company would like to provision their powders with technological - scientific databases, enabling it to take action to do so. Thus developed the present investigation, in which applied techniques of quality as Pareto, which determined that the main reasons which have not been given application to these residues are: lack of information and adaptation to your processes to have a profitable product. Mineralogical analysis by middle diffraction in X-ray (XRD) and fluorescence of X-ray (FRX), determined that the composition of the batch consists on average of SiO_2 75.9579%, Al_2O_3 10.7956%, K_2O 8.5099%, CaO 2.4279%, Na_2O 0.9631% mainly, among other minerals in the minority form, on the other hand the granulometric analysis samples, classified material as an inorganic slime of low compressibility which led to the mineral content of powders and granulometric properties with applications suitable to the type of material. The use of quality tools (QFD), and quality function deployment stratification, conferred the necessary information to infer on the recommendations which sustainable mode will allow to dispose of waste from the working of the stone quarry.

(Key words: quarries, Huichapan, residue, quality, layout)

DEDICATORIAS

Con todo mi Amor y Admiración a:

Mis Padres

Sr. Pablo Ortiz Z. y Sra. Enriqueta Mena L.

Mis Hermanos

Pablo y Fher, Pao y Alex

Mi pequeña familia

Daniel Gómez B.

Mi amado Ángel †

AGRADECIMIENTOS

- A Dios, por los momentos difíciles y los buenos momentos, por mi familia y los amigos, por los errores que he cometido, por todo lo que me has dado, por todo lo que está por venir, por resguardar mi Fe y permitirme siempre sentir tu sublime presencia.
- A mis padres y hermanos, por su ejemplo de fortaleza, inteligencia y perseverancia, por su amor y apoyo incondicional en cada reto, en cada tropiezo y en cada logro.
- A Daniel Gómez, por compartir alegrías, penas y logros, por acompañarme siempre y por los momentos que hemos hecho inolvidables. Tam,c.
- Al Dr. Miguel Galván Ruiz por su apoyo en la gestión de los recursos y la asesoría para el desarrollo de este proyecto.
- A Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, M. en I. Marcela A. Juárez Ríos, Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández y M. en I. Raúl Arroyo Martínez Fabre, por las observaciones y sugerencias realizadas en el desarrollo de esta Tesis
- Al M. en I. Marco Zaleta y el Dr. Rodrigo Velázquez, por su colaboración en los análisis de muestras.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 Justificación.....	4
I.2 Objetivos	4
General.....	4
Particulares	4
I.3 Hipótesis.....	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
II.1 Herramientas de calidad.....	6
II.1.1 Diagrama de Pareto	6
II.1.1.1 ¿Cuándo utilizarlo?.....	7
II.1.1.2 ¿Qué se requiere?.....	7
II.1.1.3 Beneficios.....	7
II.1.2 Diagrama de causa y efecto.....	7
II.1.2.1 Propósito	9
II.1.2.2 Cuando usarlo	9
II.1.3 Estratificación	9
II.1.3.1 Ejemplos de estratificación:.....	10
II.1.3.2 Recomendaciones.....	10
II.1.4 Despliegue de función de calidad (QFD).....	11
II.1.5 Herramientas estadísticas	13
II.1.5.1 Muestreo de aceptación por atributos	14
II.1.5.2 Prueba de normalidad	14
Técnica gráfica	14

Valor P.....	15
II.2 Caracterización mineralógica y química de polvos.....	15
II.2.1 Difracción de rayos X (DRX)	16
II.2.2 Fluorescencia de rayos X (FRX), generalidades	16
II.2.2.1 Aplicaciones	17
II.2.3 Granulometría por mallas	17
II.3 La cantera y su proceso de transformación.....	18
II.3.1 Cantera.....	18
II.3.1.1 Minas a cielo abierto.....	19
II.3.2 Proceso de extracción de la cantera	19
II.3.3 Residuos del proceso de transformación de la cantera.....	20
II.3.4 Clasificación de los polvos de piedra cantera como residuos.	20
II.3.5 Gestión ambiental de residuos de piedra cantera	21
II.3.5.1 Reutilización de estériles.....	22
II.3.5.2 Restauración de cavidades mineras.....	23
II.3.5.3 Restauración de escombreras.....	26
II.3.5.4 Remodelado de escombreras.	27
II.4 Estado del arte	31
II.4.1 Caso piedras Campaspero S.A.	34
II.4.2 Caso granito hermanos Prados Quemada S.L.	35
II.4.3 Caso granduero piedra Nova S.L.	36
II.4.4 Caso pizarras J. Bernardos S.L.....	37
II.4.5 Caso pizarrerías Bernardos S.L.	38
II.4.6 Caso areniscas Sierra de Palacios S.L.	39
II.4.7 Caso areniscas del Arlanza S.L.	40
II.4.8 Caso piedras naturales de castilla S.L. Pinacas.....	40
II.4.9 Caso areniscas hermanos Juanes SC	41
II.4.10 Composición química de los residuos generados en la elaboración y corte del mármol.....	41
II.4.11 Áridos	43
II.4.11.1 Usos	43
II.4.12 Descripción del manejo actual de los residuos de la construcción (RC) en el estado de México	43
II.4.13 Caso Brasil	44
II.4.13.1 Caso Londrina	44
III. METODOLOGÍA.....	47
III.1 Área de estudio	47

III.2 Muestreo	49
III.2.1 Análisis de muestras: Materiales y Métodos	50
III.2.1.1 Análisis de composición elemental.....	50
III.2.1.2 Análisis de concentración de los minerales	51
III.2.1.3 Análisis Granulométrico.....	52
III.3 Técnicas de calidad aplicadas.....	53
III.3.1 Pareto.....	53
III.3.2 Ishikawa	53
III.3.3 Estratificación	53
III.3.4 Despliegue de Función de la Calidad (QFD)	55
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
IV.1 Características del área de estudio.....	56
IV.2 Técnicas de Calidad aplicadas	62
IV.2.1 Pareto	62
IV.2.2 Ishikawa	67
IV.2.3 Estratificación.....	70
III.2.4 Despliegue de Función de la Calidad (QFD)	72
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES	85
LITERATURA CITADA.....	86
APÉNDICE	89

ÍNDICE DE CUADROS

Capítulo II	Página
TABLA II- 1 Clasificación de la piedra cantera como residuo (Ministro federal de cooperación económica y desarrollo, 2007)	21
TABLA II- 2 Composición química en % de los residuos secos de corte en el mármol (media de los análisis) (PINACAL, 2007)	42

Capítulo IV	Página
TABLA IV- 1 Tamaño de muestra definido por MINITAB 16, comprobado con fórmula	63
TABLA IV- 2 Resultados de las Encuestas Realizadas	64
TABLA IV- 3 Descripción: Determinación de límites líquido y plástico a suelo fino mediante copa de casa grande	76
TABLA IV- 4 Media de la concentración en % de compuestos en las muestras de polvos de Canteras Jaramillo	78
TABLA IV- 5 Resultados de Prueba de Normalidad a los Datos	79
TABLA IV- 6 Componentes y aplicaciones de Tipos de Vidrio (Brown, 1993)	80
TABLA IV- 7 Aplicaciones de SiO ₂ (Levien, 1981)	81
TABLA IV- 8 Áridos como parte de materia prima en diferentes materiales (Castells, 2000)	82
TABLA IV- 9 Destino y consumo de materiales a base de áridos (Castells, 2000)	82

ANEXOS	Página
TABLA 1 Concentración en % de los compuestos presentes en los polvos (CENAM, 2012)	91
TABLA 2 Tamaño de muestra determinado por el plan de muestreo MINITAB 16 y Comprobado con fórmula	92
TABLA 3 Resultados del análisis de granulometría	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo II

	Página
FIGURA II- 1 Diagrama QFD	13
FIGURA II- 2 Gráfica de Probabilidad de Datos Normales (MINITAB 16).....	15
FIGURA II- 3 Gráfica de probabilidad de Datos no Normales (MINITAB 16)	15
FIGURA II- 4 Restauración de cantera para áridos en Cabárceno (Cantabria, España) (Vadillo, 1995)	24
FIGURA II- 5 Restauración de cantera para áridos en Cabárceno (Cantabria, España) (GoogleMaps, 2014).....	24
FIGURA II- 7 Restauración de mina de carbón en Sheffield (Reino Unido) (GoogleMaps, 2014) ..	25
FIGURA II- 6 Restauración de mina de carbón en Sheffield (Reino Unido) (Vadillo, 1995).....	25
FIGURA II- 8 Ocultación de escombrera mediante una pantalla de tierra (arriba) y mediante combinación de pantalla de tierra y vegetación (abajo) (ITGE, 1988).....	27
FIGURA II- 9 Posibilidades de remodelación de escombreras, produciendo mayor o menor impacto visual y paisajístico (ITGE, 1988).....	28
FIGURA II- 10 Remodelado de escombrera mediante su extensión, para reducir su altura y su impacto paisajístico (ITGE, 1988)	29
FIGURA II- 11 Midiendo pH de lixiviados de escombrera (San Quintín, Cd. Real, España) (ITGE, 1995)	30
FIGURA II- 12 Impermeabilizado basal de escombrera Punitaqui (Chile) (ITGE, 1995).....	31
FIGURA II- 13 Restauración de la mina Emma, descubierta para carbón, localizada en Puertollano (Ciudad Real, España) (ITGE, 1987)	34
FIGURA II- 14 Piedras Campaspero S.A. (PINACAL, 2007)	35
FIGURA II- 15 Granito hermanos Prados Quemada S.L. (PINACAL, 2007)	36
FIGURA II- 16 Granduero Piedra Nova S.L. (PINACAL, 2007)	37
FIGURA II- 17 Pizarras J. Bernardos S.L. (PINACAL, 2007).....	38
FIGURA II- 18 Pizarrerías Bernardos S.L. (PINACAL, 2007)	39
FIGURA II- 19 Arseniscas Sierra de Palacios S.L. (PINACAL, 2007)	39
FIGURA II- 20 Areniscas del Arianza S.L. (PINACAL, 2007)	40

FIGURA II- 21 Piedras naturales de Castilla, Pinacas (PINACAL, 2007)	41
--	----

Capítulo III

	Página
FIGURA III- 1 Ubicación geográfica de Canteras Jaramillo	48
FIGURA III- 2 Residuos del trabajo de Piedra Cantera	49
FIGURA III- 3 Toma de muestras.....	50
FIGURA III- 4 Preparación de muestras en tamiz malla 120	50
FIGURA III- 5 Preparación de muestras en mortero para análisis	50
FIGURA III- 6 Equipo DRX	51
FIGURA III- 7 Equipo FRX	52
FIGURA III- 8 Formato de Captura de Datos	54

Capítulo IV

	Página
FIGURA IV- 1 Canteras Jaramillo	56
FIGURA IV- 2 Extracción de la Piedra	56
FIGURA IV- 3 Corte de la Piedra Cantera	57
FIGURA IV- 4 Laminado de la Piedra Cantera	58
FIGURA IV- 5 Producto para pisos de Cantera	58
FIGURA IV- 6 Lodos generados tras el trabajo de la Piedra	59
FIGURA IV- 7 Piletas para depósito de lodos	60
FIGURA IV- 8 Traslado de piletas a zona de depósito de residuos	61
FIGURA IV- 9 Presa de Lodos	61
FIGURA IV- 10 Residuos del trabajo de Piedra Cantera	62
FIGURA IV- 11 Pareto de causas en la no disposición de residuos.....	67
FIGURA IV- 12 Diagrama de Causa-Efecto.....	68
FIGURA IV- 13 Estratificación de la aplicación de los residuos.....	71
FIGURA IV- 14 QFD.....	74
FIGURA IV- 15 Curvas Granulométricas	75

FIGURA IV- 16 Difractograma Combinado de las 10 muestras..... 77

Anexos

	Página
FIGURA A- 1 Difractograma de la muestra 1a.....	89
FIGURA A- 2 Difractograma de la muestra 1b.....	89
FIGURA A- 3 Difractograma de la muestra 1c.....	89
FIGURA A- 4 Difractograma de la muestra 1d.....	89
FIGURA A- 5 Difractograma de la muestra 2a.....	89
FIGURA A- 6 Difractograma de la muestra 2b.....	89
FIGURA A- 7 Difractograma de la muestra 2c.....	90
FIGURA A- 8 Difractograma de la muestra 3a.....	90
FIGURA A- 9 Difractograma de la muestra 3b.....	90
FIGURA A- 10 Difractograma de la muestra 3c.....	90
FIGURA A- 11 Muestreo de Aceptación por atributos	92

I. INTRODUCCIÓN

En la empresa Canteras Jaramillo, con ubicación en Maney, Huichapan Hidalgo, México, dedicada a la extracción, acabado y comercialización de piedra cantera (*Ignimbrita riolítica*), se obtienen como residuos “lodos”, tras los procesos de corte y detallado de la materia prima, tal escenario se debe a que durante la línea de producción de la gran variedad de piezas de cantera, los discos que participan en los procesos mencionados utilizan agua como refrigerante, estos lodos se han acumulado paulatinamente irrumpiendo de forma innecesaria un espacio dentro de la empresa, al mismo tiempo que interactúan con componentes naturales como viento y agua.

No obstante se considera que con el paso del tiempo surjan otras consecuencias, tales como: que al ser lixiviados o arrastrados, obstruyan el flujo de mantos acuíferos o drenajes, así como también tras deshidratarse los lodos, el polvo generado propague partículas volátiles a componentes mecánicos de la maquinaria, provocándole un desgaste a corto plazo con lo cual se induciría un impacto negativo en la productividad y en los costos de mantenimiento.

Con la finalidad de sustentar las recomendaciones para la disposición de los polvos, se inició con un muestreo aleatorio en el lote de residuos para los análisis mineralógicos que se efectuaron por DRX (Difracción de Rayos X) en el laboratorio de Química del Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro, y FRX (Fluorescencia de Rayos X) en el Centro Nacional de Metrología en el estado de Querétaro. El resultado de los análisis determinó la siguiente composición en promedio: SiO_2 75.9579%, Al_2O_3 10.7956%, K_2O 8.5099%, CaO 2.4279%, Na_2O 0.9631% principalmente, entre otros minerales en forma minoritaria. Del mismo modo se efectuó un análisis granulométrico en el laboratorio de suelos de la UAQ el cual clasifico al material como limo inorgánico de baja compresibilidad.

Se diseñó el formato de captura de datos que permitió obtener la información a través de encuestas aplicadas a 14 diferentes empresarios en el ramo de la industria canterera, esto para determinar las causas más frecuentes por las cuales no se ha dispuesto en la empresa de los residuos, los datos fueron organizados y ubicados en un diagrama de Pareto, resultando que la falta de información en cuanto a uso sustentable de sus residuos y composición química y física de los mismos es la principal causa, ésta seguida de no resultarles económicamente redituables las acciones emprendidas.

Con base en los resultados se elaboró un diagrama de Ishikawa, detectando que los efectos que provocaban el que no resulte redituable son la aplicación inadecuada del residuo para los resultados esperados, ya que se ha considerado el residuo como CaO en mayor concentración, lo que con base en los análisis no es correcto.

Con los resultados obtenidos y tras realizar una investigación bibliográfica a nivel nacional e internacional respecto a las aplicaciones que se han ido procurando en casos similares, se realizó la estratificación acerca de la disposición que puede darse a estos polvos, en este punto resultó una gran cantidad de opciones que se priorizaron con la aplicación del QFD.

Para adaptar los datos a las condiciones de la empresa, se aplicó el Despliegue de Función de Calidad (QFD) donde los datos demuestran que las opciones con mayor relación entre las características fisicoquímicas del residuo y los requisitos de los canteros son: restauración topográfica de cantera, pinturas, hormigón, restauración de escombrera, fabricación de vidrio, mientras que ejercer acciones similares como en el caso del mármol, resulta inconveniente por la diferencia entre sus componentes principales, SiO₂ vs CaO.

Con estas bases e investigaciones bibliográficas sobre aplicación del SiO₂, se realizaron las propuestas y recomendaciones sobre la disposición de los residuos del trabajo de la piedra cantera.

En la estructura de esta tesis se presentan cuatro capítulos con las siguientes características principales:

Capítulo I: Introducción.

Definir justificación, objetivos e hipótesis.

Capítulo II: Revisión de literatura

Reunir información bibliográfica que justifique técnicas, conceptos y antecedentes aplicados en este proyecto.

Capítulo III: Metodología

Describir la metodología (materiales y métodos) seguida para el logro de los objetivos.

Capítulo IV: Resultados y Discusión

Presentar los resultados obtenidos y la discusión de los mismos.

Del mismo modo se presentan cuatro puntos después del capítulo IV, que incluyen las conclusiones sobre los resultados con relación a la hipótesis, recomendaciones, bibliografía citada y apéndice.

I.1 Justificación

Cuando existe la posibilidad de dar aprovechamiento industrial y por ende económico a un “residuo”, se establece un modelo de investigación aplicado con la finalidad de encontrar las herramientas necesarias para la adecuación de los procesos que servirán para reincorporar los residuos como parte de la materia prima en la elaboración de un nuevo producto.

No obstante, combinar en forma sostenible el desarrollo industrial y la calidad ambiental, cumpliría sin duda alguna, el reto que enfrentan muchas empresas que en años recientes han hecho toda clase de esfuerzos e investigaciones por mantener este equilibrio.

Como consecuencia y considerando la situación a la que se enfrenta la empresa de la Cantera Jaramillo Maney, Huichapan Hidalgo, México, con sus residuos de la explotación de la *Ignimbrita riolítica*, se desarrolló este proyecto de investigación, en el cual a través de herramientas de calidad, estadísticas y diversas técnicas, se cuenta con la información necesaria para sustentar las recomendaciones que permitan darle una disposición a dichos residuos, y por ende un beneficio Industrial-Económico-Ambiental para la Empresa y la sociedad.

I.2 Objetivos

General

Aplicar técnicas de calidad que generen la información necesaria sobre el aprovechamiento de los beneficios Económico-Industrial-Ambiental a la empresa y a la sociedad, para disponer de modo sustentable los residuos de explotación de *Ignimbrita riolítica* en Huichapan Hidalgo, México.

Particulares

- Realizar la toma de muestras en el lote de residuos de la empresa Jaramillo para su caracterización química y granulométrica.

- Estratificar las aplicaciones del tipo de residuo en cuanto a sus características físico-químicas para encontrar la mayor relación entre estas y las expectativas de los canteros.
- Definir las opciones sustentables que propicien de acuerdo a las propiedades de los residuos de explotación de *Ignimbrita riolítica*, la mejor disposición de los mismos en Huichapan Hidalgo, México.

I.3 Hipótesis

La implementación de técnicas de calidad, genera información apropiada sobre los beneficios Económico-Industrial-Ambiental para la disposición sustentable de los residuos de explotación de *Ignimbrita riolítica*.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

II.1 Herramientas de calidad

Las herramientas de calidad aplicadas para el logro de los objetivos fueron: diagrama de Pareto, diagrama de causa-efecto (Ishikawa), estratificación y despliegue de la función de calidad (QFD).

II.1.1 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto se denomina así en honor al economista italiano Wilfredo Pareto, quien observó hace más de 100 años que casi toda la riqueza de Italia estaba controlada por unas cuantas familias que eran los principales motores detrás de la economía italiana (Gutiérrez, 2004)

El experto en calidad J.M. Juran aplicó esta noción al campo de la calidad al observar que la mala calidad puede a veces resolverse al atacar algunas causas principales que resultan en casi todos los problemas (Gutiérrez, 2004)

Una gráfica de Pareto, es un histograma de datos que incluye una serie de barras que indican la frecuencia de la ocurrencia de causas de un problema, están organizados de izquierda a derecha, las barras más altas indican mayor frecuencia en comparación con las barras de la derecha (Evans y Lindsay, 2005)

Se adiciona una curva de frecuencia acumulada que es una manera de identificar la magnitud relativa de los problemas e identificar las mayores áreas de mejora (Evans y Lindsay, 2005)

La gráfica de Pareto hace posible que quienes tomen decisiones en control de la calidad separen los defectos más importantes de los defectos triviales. (Principio de Pareto los “pocos vitales” de los “muchos triviales”) (Evans y Lindsay, 2005)

II.1.1.1 ¿Cuándo utilizarlo?

- Durante el proceso de solución de problemas.
- Puede ser usado para decidir cuál de todos los problemas atacar.
- Para seleccionar las causas principales del problema.
- El diagrama de Pareto es considerado una herramienta de planeación.
- Identificar habilidades que quieras obtener en tu equipo.
- Analizar necesidades de los clientes.
- Analizar proveedores.
- Analizar Inversiones (Evans y Lindsay, 2005)

II.1.1.2 ¿Qué se requiere?

- La frecuencia de las causas o problemas.

II.1.1.3 Beneficios

- Rompe los grandes problemas en piezas más pequeñas
- Proporciona la habilidad para enfocar recursos
- Seleccionar las áreas de mayor impacto
- Simplicidad e impacto visual
- Apariencia menos intimidante (Evans y Lindsay, 2005)

II.1.2 Diagrama de causa y efecto

Los diagramas de causa y efecto son una herramienta visual para identificar, explorar y mostrar gráficamente todas las posibles causas relacionadas con un problema o condición - en mayores niveles de detalle - para descubrir sus causas raíz (Evans, 2005)

Estos diagramas:

- Obligan al equipo a concentrarse en el contenido o naturaleza real del problema.
- Generan una imagen del conocimiento colectivo y del nivel de conciencia del equipo.
- Ayudan a crear un consenso sobre las causas raíz y a sustentar las soluciones que resulten.
- Concentran al equipo del proyecto en las causas, en vez de en los síntomas
- Muestra las diferentes influencias en un proceso a fin de identificar las causas raíz más probables de un problema (Evans, 2005)

Los diagramas de causa y efecto también se denominan diagramas de "espina de pescado"; al tiempo que el equipo investiga más a fondo en las posibles causas, el diagrama comienza a tener la apariencia del esqueleto de un pescado.

Los diagramas de espina de pescado muestran varias influencias en el proceso a fin de identificar las más probables causas raíz de un problema.

El "efecto" del problema se muestra en el cuadro en el encabezado. Las categorías principales de posibles causas se derivan directamente de la espina. Las causas ocultas se derivan de cada categoría principal de las posibles causas y el diagrama se desarrolla con niveles mayores de detalles hasta que se identifiquen las causas (Evans, 2005)

Pregunten "¿Por qué?" para identificar posibles causas raíz y agregarlas como ramas de los huesos principales

- Para comenzar a identificar las posibles causas que contribuyen al problema, pregunten "¿por qué?"
- ¿Por qué contribuye al problema una posible causa raíz en particular?
- La respuesta a cada uno de los "por qué" se convierte en otro nivel de mayor detalle en esa categoría.

- Pequeñas ramas a partir de los huesos grandes. (Evans, 2005)

II.1.2.1 Propósito

Proveer un método visual de todas las posibles causas de un problema específico.

II.1.2.2 Cuando usarlo

- Cuando queremos expandir el pensamiento y considerar todas las posibles causas.
- Para obtener la información de un grupo (Evans y Lindsay, 2005)

II.1.3 Estratificación

Análisis de problemas, fallas, quejas o datos clasificándolos o agrupándolos de acuerdo con los factores que se cree que pueden influir en la magnitud de los mismos, para localizar las mejores pistas para resolver el problema o mejorar procesos.

Estrategia de búsqueda para entender cómo influyen los factores en una situación.

Técnica utilizada para analizar-dividir un universo de datos en grupos homogéneos de datos recolectados acerca de algún problema o evento.

Incluye la revisión de información del proceso, categorización en diferentes niveles y análisis para observar los diferentes procesos que interactúan (Evans y Lindsay, 2005)

II.1.3.1 Ejemplos de estratificación:

- Tipo de falla
- Métodos de trabajo
- Maquinaria
- Turnos
- Obreros
- Materiales
- DOE sería un estratificador numérico y metódico

El método se aplica de alguna manera en herramientas como:

- Histograma
- Diagrama de Pareto
- Diagrama de causa-efecto
- Diagrama de dispersión
- Cartas control, etc. (Evans y Lindsay, 2005)

II.1.3.2 Recomendaciones

1. Fijar un objetivo claro y definir los factores a estratificar.
2. Elaborar un formato adecuado para la recolección, que incluya los factores seleccionados.
3. Utilizar las herramientas para recolección de datos y gráficos.
4. Estratificar características específicas de interés.
5. Estratificar hasta donde la inversión lo permita y sacar conclusiones (Evans y Lindsay, 2005)

II.1.4 Despliegue de función de calidad (QFD)

El despliegue de la función de calidad (o QFD, por sus siglas inglesas de *Quality Function Deployment*) es un método de diseño de productos y servicios que recoge las demandas y expectativas de los clientes y las traduce, en pasos sucesivos, a características técnicas y operación que satisfacen las demandas y expectativas del mercado (Wiebe, 1998)

El QFD se originó en el Japón en la década de 1960 y su metodología se consolidó y expandió geográficamente en las décadas siguientes. En el origen del QFD está la denominada matriz de la calidad, que es en esencia una tabla que relaciona la voz del cliente con los requerimientos que la satisfacen. La matriz de la calidad suele desplegarse para dar lugar a otras matrices que permiten hacer operativa a la voz del cliente. Las aplicaciones recientes del QFD trascienden a las industrias manufactureras y de los servicios y comprenden la formulación de la estrategia empresarial y el análisis organizacional en los sectores público y privado (Wiebe, 1998)

Las aplicaciones del QFD en empresas japonesas, han tenido los siguientes objetivos:

- Establecimiento de la calidad de diseño y la calidad planificada.
- Realización del *benchmarking* de productos de la competencia.
- Desarrollo de nuevos productos que posicionaran a la empresa por delante de la competencia.
- Acumulación y análisis de información sobre la calidad en el mercado.
- Comunicación a procesos posteriores de información relacionada con la calidad.
- Identificación de puntos de control para el piso de la planta (*genba*)
- Reducción del número de problemas iniciales de calidad.
- Reducción del número de cambios de diseño.
- Reducción del tiempo de desarrollo.

- Reducción de los costos de desarrollo y
- Aumento de la participación en el mercado (Wiebe, 1998)

Se destaca el valor integrador de la matriz de la calidad—núcleo del QFD— que, en un único gráfico, indica:

- Los requerimientos del cliente
- Establece las características técnicas capaces de satisfacerlos, y
- Brinda la posibilidad de comparar el producto de la propia empresa con otros de la competencia (Wiebe, 1998)

La metodología QFD consiste básicamente en transmitir “Qué desean los clientes” en “Cómo se puede satisfacer esa necesidad” aplicando sucesivamente a lo largo de toda la cadena de clientes externos e internos. Esta metodología aporta el mecanismo de traslación de “Qués” (o “necesidades”) a “Cómos” y su valoración relativa. En 6 Sigma , los “Cómos” se denominan habitualmente “CTQ” (Critical To Quality). Naturalmente, la identificación de los “Qués” y los “Cómos” (James, 2005)

El núcleo del QFD es un mapa conceptual que relaciona los requerimientos de los clientes (que abreviamos RC) con las características técnicas (CT) necesarias para satisfacerlos (Wiebe, 1998)

Estas relaciones se presentan en forma de una tabla elaborada llamada "matriz de la calidad" (Figura II-1).

Se toma en su conjunto, los RC definen la calidad de un producto y son las expresiones que los clientes utilizan para describir los productos y sus características deseables.

Asociada con cada CT existe una métrica, que se usa para determinar el grado de satisfacción de los clientes con cada uno de sus requerimientos. Esta medida es fundamental para la mejora continua.

Los RC se indican en la dimensión vertical de la matriz de la calidad; las CT, en la horizontal. Tanto los primeros como las segundas suelen ser numerosos

y se agrupan en varios niveles, según su grado de abstracción. Esta multiplicidad no es caprichosa. El gran número de los RC responde a las variadas dimensiones de la calidad y la cantidad de las CT es consecuencia de la creciente complejidad tecnológica de los productos modernos (Wiebe, 1998)

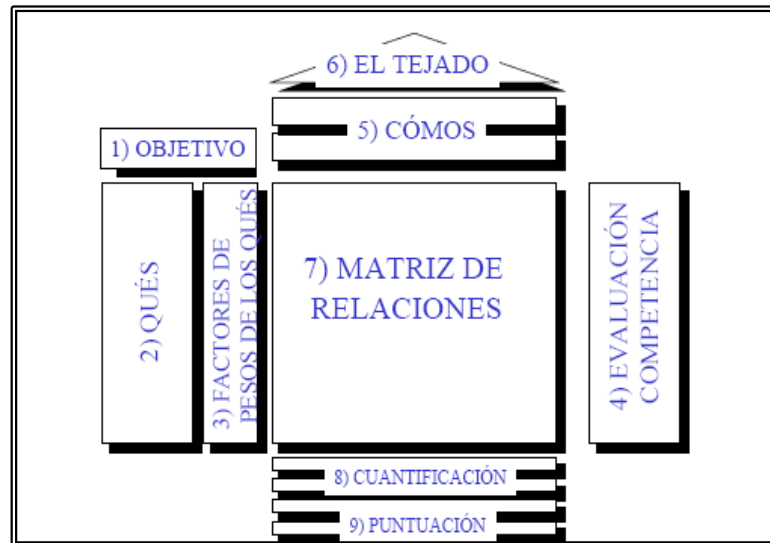


Figura II- 1 Diagrama QFD

La matriz de la calidad contiene otros elementos importantes:

- Una columna con la prioridad que los clientes asignan a cada RC
- Una columna que compara, para cada RC, a los productos de "nuestra empresa" con los de la competencia, según la evaluación del cliente
- Una fila que pondera numéricamente la importancia de cada CT con respecto a las demás
- Una evaluación técnica comparativa de las CT de "nuestro producto" con las CT de uno o varios productos de la competencia
- Un valor objetivo fijado para cada CT
- Un panel triangular que indica la correlación existente entre las distintas CT (Wiebe, 1998)

II.1.5 Herramientas estadísticas

Con la finalidad de observar la variabilidad de los resultados en cada muestra y poder inferir sobre el lote completo de residuos, se efectuó la prueba de

normalidad a los datos obtenidos de concentración de compuestos presentes en las muestras.

II.1.5.1 Muestreo de aceptación por atributos

Permite Crear un plan de muestreo para determinar un tamaño de muestra representativa y tomar una decisión en el sentido de si se aceptará o rechazará un lote entero (lotes de producto), según el número de defectuosos o defectos que se encuentren en esa muestra.

El muestreo de aceptación es un componente principal de control de calidad y es útil cuando el costo de la prueba es alto comparado con el costo de pasar un defecto o cuando la prueba destruye la muestra. Es un compromiso realizar entre el 100% de la inspección y no inspeccionar. El muestreo de aceptación puede hacerse en características de calidad medidas o por atributos (MINITAB 16)

II.1.5.2 Prueba de normalidad

Hipótesis de una muestra para determinar si la población de la cual extrajo su muestra es no normal. Muchos procedimientos estadísticos dependen de la normalidad de la población, de modo que recurrir a una prueba de normalidad para determinar si se rechaza este supuesto pudiera ser un paso importante en su análisis. La hipótesis nula para una prueba de normalidad establece que la población es normal. La hipótesis alternativa establece que la población es no normal. Para determinar si los datos de su muestra provienen de una población no normal (MINITAB 16)

Técnica gráfica

Usted puede evaluar la normalidad de una población con una gráfica de probabilidad normal, la cual genera de manera gráfica valores de datos ordenados en comparación con los valores que usted espera sean cercanos a los primeros, si

la población de la muestra está normalmente distribuida. Si la población es normal, los puntos de la gráfica conformarán una línea aproximadamente derecha (MINITAB 16)

Las figuras II-2 y II-3, ilustran las distribuciones normal y no normal,

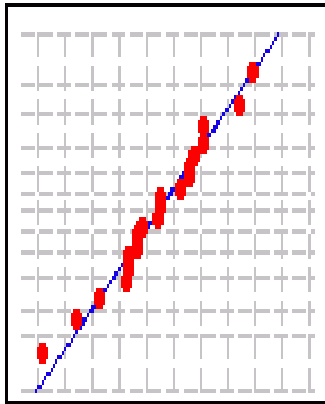


Figura II- 2 Gráfica de Probabilidad de Datos Normales (MINITAB 16)

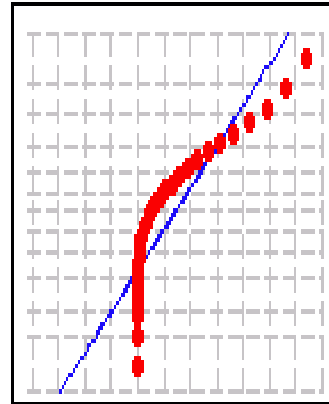


Figura II- 3 Gráfica de probabilidad de Datos no Normales (MINITAB 16)

Valor P

Determina si es adecuado rechazar la hipótesis nula en una prueba de hipótesis. Valores P que se encuentran en el rango de 0 a 1. Mientras menor sea el valor p, menor es la probabilidad de rechazar por equivocación una hipótesis nula. Antes de realizar cualquier análisis, determine un nivel de significancia (α). Un valor comúnmente utilizado es 0.05. Si el valor p de una estadística de prueba es menor que su nivel de significancia, rechace la hipótesis nula (MINITAB 16)

II.2 Caracterización mineralógica y química de polvos

Para la caracterización de las muestras se emplearon las siguientes técnicas: Difracción de Rayos X, Fluorescencia de Rayos X, Granulometría por mallas.

II.2.1 Difracción de rayos X (DRX)

La técnica de difracción de rayos X es una poderosa herramienta para determinar los parámetros de las estructuras cristalinas y las fases presentes en un material.

Entre estos parámetros encontramos el tamaño de la red, la posición atómica y la distribución electrónica.

En la teoría básica de difracción de R-X generalmente se asume que en el cristal se tiene una dispersión débil, implicando que la interacción entre el campo de la radiación incidente, el campo del cristal es una perturbación muy pequeña y la dispersión puede calcularse usando teoría de perturbación de primer orden (Brown, 1973).

II.2.2 Fluorescencia de rayos X (FRX), generalidades

La fluorescencia de Rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra (Melgarejo, 2010)

II.2.2.1 Aplicaciones

La FRX tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas porque permite hacerlos sin preparación de la muestra. El único requisito es que ésta tenga un tamaño inferior al del portamuestras. Están excluidos el H, Li, ${}^{61}\text{Pm}$, ${}^{43}\text{Tc}$, ${}^{84}\text{Po}$, ${}^{85}\text{At}$, los gases nobles (excepto el argón) y los actínidos del ${}^{89}\text{Ac}$ al ${}^{103}\text{Lr}$ (excepto ${}^{90}\text{Th}$ y ${}^{92}\text{U}$) (Melgarejo, 2010)

II.2.3 Granulometría por mallas

La técnica de granulometría por mallas permite determinar la composición por tamaños (granulometría) de las partículas que integran los materiales empleados para terracerías, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con la abertura más grande, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo, para así obtener la masa que se retiene en cada malla, calcular su porcentaje respecto al total y determinar el porcentaje de la masa que pasa (Normativa SCT, 2003)

El tamaño de los granos de un suelo se refiere a los diámetros de las partículas que lo forman, cuando es indivisible bajo la acción de una fuerza moderada. Las partículas mayores son las que se pueden mover con las manos, mientras que las más finas por ser tan pequeñas pueden ser observadas con un microscopio. De igual forma constituye uno de los fundamentos teóricos en los que se basan los diferentes sistemas de clasificación de los suelos, como el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) (Normativa SCT, 2003)

El análisis granulométrico es la distribución de tamaños de un suelo y normalmente se representa a través de la curva granulométrica. La curva

granulométrica suele dibujarse con porcentajes como ordenadas y tamaños de las partículas como abscisas. Las ordenadas se refieren a porcentaje, en peso, de las partículas menores que el tamaño correspondiente. La representación en escala semilogarítmica en el eje de las abscisas resulta preferible a la simple representación natural, pues en la primera se dispone de mayor amplitud en los tamaños finos y muy finos, que en escala natural resultan muy comprimidos, usando un módulo práctico de escalas.

El análisis granulométrico al cuál se somete un suelo es de mucha ayuda para la construcción de proyectos, tanto en estructuras como en carreteras porque con este se puede conocer la permeabilidad y la cohesión del suelo. También el suelo analizado puede ser usado en mezclas de asfalto o concreto.

Los resultados del análisis por mallas son generalmente expresados en términos de porcentaje total en peso de suelo seco que pasa a través de las diferentes mallas y representados gráficamente a través de la curva granulométrica que nos permite definir los porcentajes de las diferentes fracciones de suelo, como gravas, arenas y finos (CFE, 1983)

II.3 La cantera y su proceso de transformación

Los cambios involucrados en este proceso son físicos, *cambios de forma y tamaño*. Por lo que la composición de la materia prima desde la extracción hasta los residuos, no es alterada.

II.3.1 Cantera

Bajo la denominación de piedra natural, se incluyen aquellos productos de naturaleza pétreo utilizados tradicionalmente por el hombre en la industria de la construcción (Solís, 1995)

Cabe mencionar que el término *cantera* es empleado también para designar al lugar de donde se extrae piedra para construcción (Solís, 1995)

La forma en cómo se extrae la piedra cantera depende del lugar, del tipo de material en cuanto a su dureza, de los recursos con los que cuenta el pedrero para la extracción así como de la enseñanza que le ha sido transmitida por sus antepasados (Solís, 1995)

Las canteras son bastante similares a las minas a cielo abierto, y el equipo empleado es el mismo. La diferencia es que los materiales extraídos suelen ser minerales industriales y materiales de construcción. En general, casi todo el material que se obtiene de la cantera se transforma en algún producto, por lo que hay bastante menos material de desecho (Solís, 1995)

II.3.1.1 Minas a cielo abierto

Son minas de superficie que adoptan la forma de grandes fosas en terraza, cada vez más profundas y anchas. Los ejemplos clásicos de minas a cielo abierto son las minas de diamantes de Sudáfrica, en las que se explotan las chimeneas de kimberlita, depósitos de mineral en forma cilíndrica que ascienden por la corteza terrestre. A menudo tienen una forma más o menos circular (Solís, 1995)

II.3.2 Proceso de extracción de la cantera

La extracción empieza con la perforación y voladura de la roca. Ésta se carga en camiones con grandes palas eléctricas o hidráulicas, o con excavadoras de carga frontal, y se retira del foso. El tamaño de estas máquinas llega a ser tan grande que pueden retirar 50 m³ de rocas de una vez, pero suelen tener una capacidad de entre 5 y 25 m³. La carga de los camiones puede ir desde 35 hasta 220 toneladas. Un avance de la minería moderna consiste en que las palas descarguen directamente en una trituradora móvil, desde la que se saca de la mina la roca triturada en cintas transportadoras (Sanchez, 2005)

II.3.3 Residuos del proceso de transformación de la cantera

En México, la acción minera es una de las actividades económicas de mayor tradición, la cual se ha desarrollado por casi cinco siglos. Es importante mencionar que esta actividad se ha beneficiado con la evolución tecnológica. Sin embargo, esta actividad también conlleva un problema de actualidad, la acumulación de residuos (jales y terreros) que se ha producido durante este período (Moreno, 1998)

El manejo inadecuado y la disposición de estos residuos, ha generado problemas de tipo ambiental en todo el mundo. Entre los cuales se pueden mencionar la falla en estructuras de retención (diques) de los depósitos de los jales (presas y/o embalses), ocasionando por su naturaleza (tamaño de partícula, plasticidad y contenido de agua) avalanchas que se desplazan a las partes más bajas de valles y algunas veces se depositan en los cauces de los ríos (Kelly, 1990), la dispersión eólica asociada al tamaño de partícula, siendo el mineral muy fino fácilmente transportado por el viento, siempre y cuando el depósito no alcance una cierta consolidación o el jal sea removido de su depósito original y la contaminación visual que se aprecia en las zonas que en la actualidad han sido urbanizadas, dando un aspecto deprimente debido a la ausencia de medidas de restauración de estos depósitos (Caldwell, 1982)

II.3.4 Clasificación de los polvos de piedra cantera como residuos.

A partir de la publicación de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, los residuos de la construcción son considerados como residuos de **manejo especial**; textualmente su definición es:

“Residuos de Manejo Especial: Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como

peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.” (LGPGIR, 2003)

En la Tabla II-1 se localizan los residuos de cantera, y sus aplicaciones.

Tabla II- 1 Clasificación de la piedra cantera como residuo (Ministro federal de cooperación económica y desarrollo, 2007)

Actividad	Objeto	Componentes principales	Observaciones
Demolición	Viviendas	Antiguas: mampostería, ladrillo, madera, yeso, tejas, adobe. Recientes: ladrillo, hormigón, hierro, acero, metales y plásticos.	Los materiales dependen de la edad del edificio y del uso concreto del mismo en el caso de los de servicios
	Otros edificios	Industriales: hormigón, acero, ladrillo, mampostería. Servicios: Hormigón, ladrillo, mampostería, hierro, madera.	
	Obras públicas	Mampostería, hierro, acero, hormigón armado.	Los materiales dependen mucho de la edad y el tipo de infraestructura a demoler. No es una actividad frecuente.
Construcción	Excavación Edificación	Tierras y rocas. Hormigón, hierro, acero, ladrillos, bloques, tejas, materiales cerámicos.	Normalmente se reutilizan en gran parte en las mismas obras o en otras que requieran el material. Originados básicamente por recortes, materiales rechazados por su inadecuada calidad y roturas por deficiente manipulación. Generación de residuos poco significativa en el caso de edificación.
	Obras Públicas	Plásticos, materiales no férricos.	
	Mantenimiento y Remodelación	Suelo, roca, hormigón, productos vitaminosos. Viviendas: cal, yeso, madera, tejas, materiales cerámicos, pavimentos, ladrillo. Otro: hormigón, acero, mampostería, ladrillo, yeso,	

II.3.5 Gestión ambiental de residuos de piedra cantera

La minería de la piedra natural genera un volumen de residuos considerable, no solamente de material estéril o no aprovechable de la cantera, sino de los lodos de corte, procedentes de los procesos de transformación.

Hoy en día, falta, quizás, una voluntad decidida, por parte de todas las partes implicadas, para desarrollar planes de reciclado integrales, que aporten soluciones globales a este problema.

Desde el punto de vista técnico, el reciclado de estos residuos es perfectamente viable teniendo sus principales aplicaciones en la industria de los áridos para la construcción, sin olvidar la industria cerámica, y la de los productos prefabricados de cemento como los terrazos, tejas de hormigón, etc. (López, 2007)

Desde hace tiempo en la sociedad se ha creado conciencia en todo lo que concierne a la conservación del medio ambiente, por lo que se han multiplicado de forma considerable las investigaciones sobre el desarrollo de nuevas tecnologías y energías alternas enfocadas a producir menor cantidad de residuos, así como a encontrar soluciones que permitan su reciclado.

En cualquier caso, los efectos a corto plazo de la actividad minera tienden a ser destructivos e irrecuperables, y por tanto, es deseable minimizarlos en lo posible. Se deben generar acciones para recuperar las áreas afectadas, ya sea porque afectan al paisaje, o porque afecten al medio, por ejemplo, contaminación de suelos, aguas, etc. y los parámetros que lo definen en un momento dado: cobertera edáfica, vegetación, fauna, etc. (Vadillo, 1995)

Para tal efecto, es posible diferenciar tres aspectos: la **prevención** del impacto (que se desarrollará antes o durante las labores de explotación), la **restauración** del terreno, que consiste básicamente en devolverle en lo posible su aspecto original, y la **remediación**, que pretenderá solucionar los problemas de mayor calado, no solucionables mediante la simple restauración (Vadillo, 1995)

II.3.5.1 Reutilización de estériles

Una cuestión previa al planteamiento del problema de la restauración y la remediación suele ser la posibilidad de que los estériles que se produzcan en el proceso (ya sean las escombreras de la propia mina, o de lavadero) tengan alguna utilidad, lo que evidentemente reducirá en parte los problemas posteriores. Aplicaciones posibles para estos materiales serían:

- Áridos. Se aprovechan sobre todo los procedentes de **canteras de rocas ornamentales**. Los desechos de mayor tamaño se utilizan como áridos de machaqueo, mientras que la arena granítica de los recubrimientos de la cantera, y procedentes del corte en telar pueden servir como arenas silíceas más o menos impuras. En otros casos, la aplicabilidad de la roca no útil a efectos de la explotación podrá ser más o menos adecuada para los diversos fines a que se destinan estos materiales: balasto, base y sub-base de carreteras, morteros, hormigones, firmes de carretera, etc. A este respecto, conviene recordar que muchas escombreras de minas de sulfuros de plomo-cinc han sido utilizadas para la fabricación de cementos y firmes asfálticos, con resultados desastrosos, debido a la reacción de los sulfuros presentes en las rocas de la escombrera con el aglomerante, ya sea cemento o asfalto. A este respecto se plantean dos problemas: 1) reacciones exotérmicas en los sulfuros, con aumento de volumen; y 2) generación de ácido sulfúrico por oxidación de los mismos.
- Materiales cerámicos. Los recubrimientos arcillosos, o de pizarras fuertemente alteradas, pueden tener aplicación en la industria cerámica, en función de su composición concreta (Vadillo, 1995)

II.3.5.2 Restauración de cavidades mineras

- Las cavidades producidas por la minería a cielo abierto tienen su principal problemática en su efecto sobre el paisaje, sin descartar otras considerables, como su peligrosidad para personas y ganado, la pérdida de terrenos para su aprovechamiento agrícola, y la posibilidad de formación de aguas ácidas en su fondo.

- La restauración de cavidades producidas por la minería a **cielo abierto** se basa normalmente en el relleno del mismo. No obstante, en cavidades antiguas, en explotaciones no afectadas por las condiciones legales más recientes, a menudo esto resulta inviable por el altísimo coste que representa el proceso de carga y transporte necesario para ello: grandes cortas (*pits*) de la Faja Pirítica, o las grandes minas de cobre de Chile. Por ello, a menudo los planes de restauración para este tipo de cortas se basan en el relleno final con agua, para generar un lago artificial, solución que en el caso de la minería metálica a menudo es inadecuada, por razones obvias (acidificación). No obstante, existen ejemplos muy característicos de explotaciones para áridos en zonas de ribera, o de yacimientos de carbón, que han permitido implantar este tipo de soluciones de forma muy acertada (Figura II-4) (Vadillo, 1995)

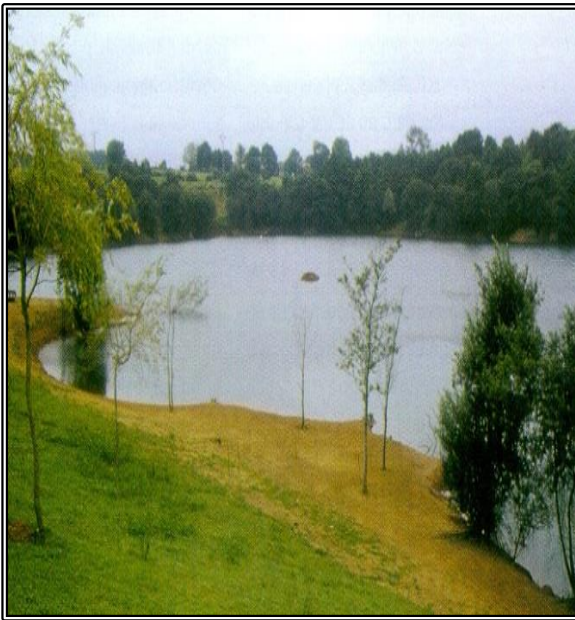


Figura II- 4 Restauración de cantera para áridos en Cabárceno (Cantabria, España) (Vadillo, 1995)



Figura II- 5 Restauración de cantera para áridos en Cabárceno (Cantabria, España) (GoogleMaps, 2014)

En el relleno de la cavidad (Figura II-6), la cuestión de mayor interés es la recuperación en lo posible del “impacto visual”: conseguir que el área quede integrada con su entorno desde el punto de vista paisajístico, e incluso, en lo posible, recuperar los usos agrícolas o ganaderos anteriores a la minería. Para ello sin duda lo más importante es la recuperación de la cobertura edáfica, que ha debido ser dispuesta separadamente del resto del material extraído de la mina durante el periodo productivo. En caso contrario, sería necesario traerla de otras áreas, afectando a éstas de la misma problemática. Evidentemente, todo este proceso puede producir una pérdida muy considerable de la calidad del suelo, que hay que regenerar “in situ” tras extenderlo sobre el terreno, mediante plantaciones adecuadas y abonado. También es importante que la base sobre la que se va a extender el suelo no quede totalmente apelmazada, para facilitar su aireación e intercambio con el nivel edáfico repuesto (Vadillo, 1995)

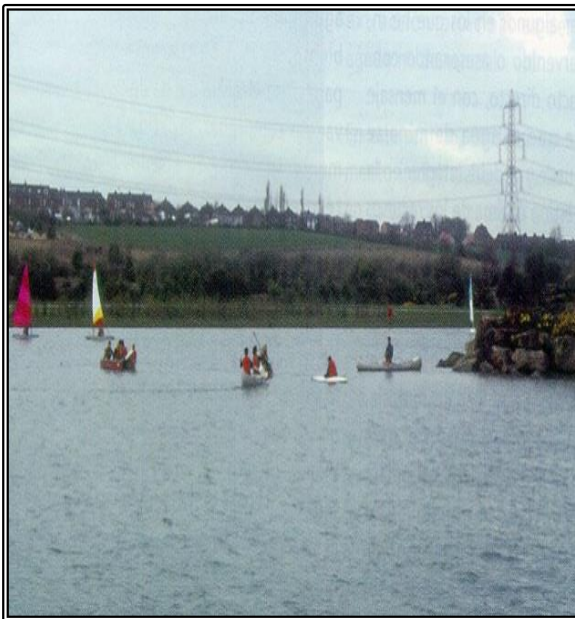


Figura II- 7 Restauración de mina de carbón en Sheffield (Reino Unido) (Vadillo, 1995)



Figura II- 6 Restauración de mina de carbón en Sheffield (Reino Unido) (GoogleMaps, 2014)

II.3.5.3 Restauración de escombreras

Las escombreras tienen su principal problemática en el diseño inicial. Cuando éste es adecuado, se procura evitar su impacto visual, ya sea por localización, o por integración paisajística. Los criterios de localización serán los que eviten que la escombrera sea vista desde las zonas pobladas o de tránsito, y solo será posible si la zona tiene una cierta orografía. Los de integración paisajística a menudo requieren también topografía abrupta, puesto que en zonas llanas pretender la integración supone aplanar mucho la escombrera, afectando a una superficie mucho mayor. Un parámetro vital a ser considerado es el del aislamiento físico-químico, que evite los problemas de dispersión de contaminantes químicos por lixiviación y posterior transporte, por infiltración o por escorrentía. No obstante, el principal problema lo suelen plantear las escombreras ya existentes, emplazadas y construidas sin criterio medioambiental (ITGE, 1988)

Así, desde el punto de vista medioambiental, la escombrera minera debe cumplir dos criterios fundamentales: 1) quedar integrada en la medida de lo posible en el paisaje; y 2) evitar el transporte de sus productos y lixiviados.

Lo que se refiere a la **integración paisajística**, pasa por varias posibilidades:

- Ocultación de la escombrera: Consiste en evitar la visión de la misma desde los puntos o áreas más significativos, como pueden ser poblaciones, carreteras, etc. Para ello puede aprovecharse la naturaleza del terreno, vaguadas, resaltes, etc., o pueden construirse pantallas o barreras, ya sean de vegetación o de materiales de acopio: figura II-8. Normalmente esta posibilidad se aplica en el diseño de escombreras nuevas, puesto que en escombreras ya existentes y de cierto tamaño puede ser mucho más costoso de llevar a cabo, puesto que implica su traslado (ITGE, 1988)

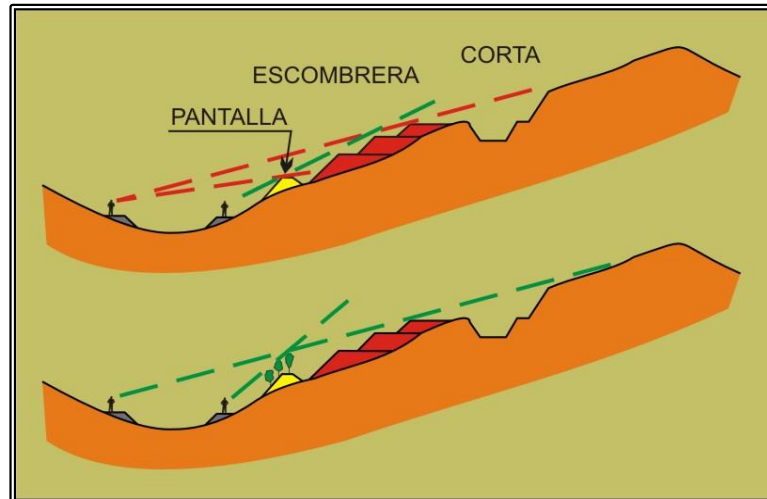


Figura II- 8 Ocultación de escombrera mediante una pantalla de tierra (arriba) y mediante combinación de pantalla de tierra y vegetación (abajo) (ITGE, 1988)

II.3.5.4 Remodelado de escombreras.

Se aplica en escombreras antiguas que producen un importante impacto visual. Algunas reglas visuales al respecto son las siguientes:

- El ojo percibe más las dimensiones verticales que las horizontales, por lo que impactará menos una masa alargada y de poca altura que otra estrecha y alta.
- La distribución del material sobre una ladera en pendiente hace que en la parte más alejada del espectador se aprecie una menor masa aparente.
- Se debe evitar que la altura de la escombrera sobrepase la cota altitudinal del entorno, para que así no destaque en la línea del horizonte.
- Las líneas curvas sobre superficies suaves producen una intrusión visual menor que las líneas y cortes rectos sobre superficies planas, las cuales no hacen sino acentuar formas y volúmenes.

- En terrenos abruptos el efecto visual disminuye si las escombreras se apoyan en laderas, y si se reproducen en lo posible las pendientes, formas y líneas naturales del terreno.
- Las litologías con colores fuertes y llamativos (por ejemplo, intensos recubrimientos con limonitas) intensifican y agravan las sensaciones ópticas de los observadores, al contrastar con el colorido suave y vistosidad natural de los suelos y vegetación (por ejemplo, regiones mediterráneas) (ITGE, 1988)

Por lo tanto, resulta fundamental identificar los rasgos característicos del entorno, de forma que la integración sea lo más positiva posible, tanto en el caso de la ocultación como del remodelado. Todo esto, con el fin de reproducir la forma natural de las estructuras geomorfológicas para alcanzar la máxima integración: figura II-9.

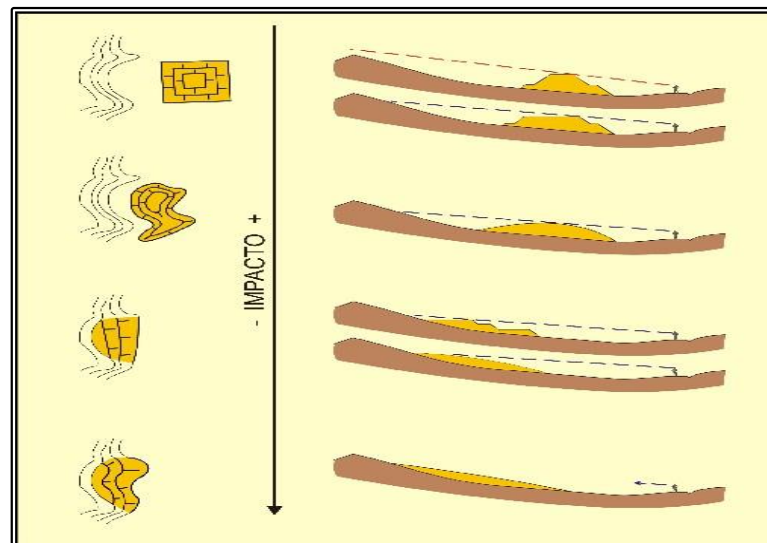


Figura II- 9 Posibilidades de remodelación de escombreras, produciendo mayor o menor impacto visual y paisajístico (ITGE, 1988)

Una de las actuaciones más frecuentes en el modelado de escombreras es la reducción de su altura, que como ya se ha mencionado, es uno de los caracteres de mayor impacto. Eso implica siempre un aumento de la superficie

afectada, por lo que la remodelación debe llevarse a cabo retirando previamente la tierra vegetal del área a afectar, que se extenderá sobre el conjunto resultante al término del proceso (figura II-10) (ITGE, 1988)

Las terrazas o bermas de gran anchura en la escombrera producen el máximo efecto visual negativo, por lo que desde el punto de vista estético hay que procurar evitarlas. No obstante, como suelen ser necesarias, tanto por condicionantes “constructivos” como por otros imperativos de control de la erosión, estabilidad y accesibilidad a diferentes áreas, se recomienda seguir los siguientes criterios básicos:

- Ser lo más estrechas posible, para permitir el paso de vehículos auxiliares, y equipos de hidrosiembra cuando la altura es grande.
- Tener los bordes redondeados.
- No ser equidistantes o totalmente paralelas.
- Hacer que las bermas desaparezcan gradualmente, para evitar que atraviesen toda la superficie de la escombrera (ITGE, 1988)

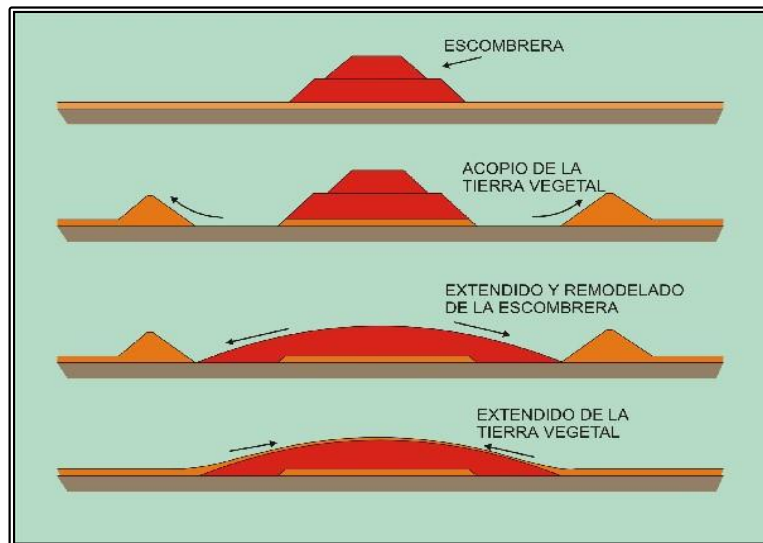


Figura II- 10 Remodelado de escombrera mediante su extensión, para reducir su altura y su impacto paisajístico (ITGE, 1988)

Para evitar la dispersión de sus productos y lixiviados hay que considerar dos aspectos: el aislamiento del suelo, y de la atmósfera. El aislamiento del suelo tendrá por objeto tanto impedir la infiltración de los lixiviados, como que éstos se dispersen por escorrentía (Figura II-11). Por tanto, en condiciones ideales esto se llevará a cabo mediante un impermeabilizante diseñado de tal forma que los lixiviados se concentren en un punto en que podamos actuar sobre ellos (ITGE, 1995)



Figura II- 11 Midiendo pH de lixiviados de escombrera (San Quintín, Cd. Real, España) (ITGE, 1995)

No hay que olvidar que estos materiales se degradan con el tiempo (Figura II-12), así que si queremos que el aislamiento sea efectivo y duradero, hay que realizar un diseño y utilizar materiales de cierto coste, incluyendo no solo el material impermeabilizante más o menos sintético (plásticos: PVC de alta densidad), sino también materiales naturales (arcillas, normalmente especiales, de forma que produzcan un máximo efecto impermeabilizante y de sorción de los posibles lixiviados) y materiales mixtos. Por otra parte, un diseño adecuado del recubrimiento minimizará esta cuestión (ITGE, 1995)

El recubrimiento puede llevarse a cabo de dos formas principales: mediante un suelo, más o menos natural, o mediante un impermeabilizado completo.

La primera posibilidad se emplea cuando no se pretende un aislamiento completo de la escombrera, porque ésta no contiene materiales lixiviables nocivos. En este caso, el recubrimiento edáfico permitirá la entrada y salida de agua de lluvia, y lo que ello implica. Por otra parte, también permitirá la plantación sobre la escombrera de plantas autóctonas o la implantación agrícola y/o ganadera, favoreciendo la integración paisajística, tanto de la zona restituida como de la escombrera del hueco inicial (ITGE, 1995)



Figura II- 12 Impermeabilizado basal de escombrera Punitaqui (Chile)
(ITGE, 1995)

II.4 Estado del arte

En el marco de las actividades que se llevan a cabo para promover el desarrollo sustentable, se ha reconocido el papel fundamental de la minería, en la economía de numerosos países, tanto desarrollados como en desarrollo. A la vez, se le identifica como una industria colosal desde la perspectiva de la cantidad de materiales que este sector remueve de la tierra, los cuales superan con mucho los que son removidos por la erosión natural que provocan los ríos. A lo anterior, se

agrega el hecho de que la cantidad de desechos mineros rebasa en exceso al total acumulado producido por otras fuentes industriales. La escala de la actividad minera es lo que plantea consecuencias ambientales tanto locales como globales de grandes dimensiones, y constituye un desafío en cuanto a convertirla en una actividad sustentable (UNEP, 1996)

Se reconoce también, el cambio rápido que está manifestando la industria minera, orientado a mejorar, hacer más limpios y seguros sus procesos, ante las presiones sociales y gubernamentales para que prevenga los impactos adversos sobre el ambiente que provocan sus actividades. Sin embargo, aún queda mucho por hacer, en particular en el caso de las pequeñas operaciones mineras en países en desarrollo cuyo desempeño ambiental es precario. Uno de los desencadenantes de la presión pública hacia la industria minera, ha sido la ocurrencia de desastres como consecuencia del derrame de grandes cantidades de residuos, jales o relaves mineros como consecuencia de la ruptura o desplazamiento de las presas o depósitos en los que se encontraban contenidos, acompañados de muerte, destrucción de propiedades y severa contaminación ambiental (UNEP, 1996)

Al respecto, el proceso vitro-cerámico se perfila como una alternativa real y útil para el reciclado de residuos industriales y urbanos. Este método implica la nucleación y cristalización controlada de vidrios especiales a través de tratamientos térmicos diseñados, produciendo materiales con una microestructura densa y de grano fino, lo que les confiere propiedades superiores con respecto al vidrio base (Álvarez, 2006)

En el ámbito nacional destaca el trabajo realizado en la Universidad de Guanajuato por Zárraga (2006) quien realizó un estudio sobre la composición mineralógica de las rocas piroclásticas del Eje Volcánico Transmexicano y cómo afectan éstas a las propiedades físicas tales como dureza, color, cohesión y porosidad en las piedras de cantera.

Internacionalmente se destacan trabajos como el de Pardo (2010) que plantea una solución a los problemas que pueden ocasionar el desecho minero y los lodos de depuradora, mediante el almacenaje y la acumulación de estas dos materias primas que posteriormente no se reutilizan.

Por su parte Carvalho (2008) realizó una investigación sobre las herramientas avanzadas de exploración geológica y metodologías que se necesitan para responder a desafíos como el descubrimiento de nuevos yacimientos cercanos a la superficie, la baja eficiencia de la explotación, las enormes cantidades de residuos producidos y las condiciones de accesibilidad a las minas.

Un caso muy didáctico es el de la Mina de carbón Emma, en Puertollano (Ciudad Real, España), operada por la empresa ENCASUR, que se lleva a cabo en condiciones ideales. Allí se realiza una minería de transferencia, en la que no hace falta mantener “almacenado” el suelo, sino que éste se transfiere de la zona de apertura de corta a la de restauración. El problema en estos casos de minería de transferencia es el de la escombrera (y el correspondiente suelo) que resulta de la excavación inicial (Figura II-13) (ITGM, 1987)



Figura II- 13 Restauración de la mina Emma, descubierta para carbón, localizada en Puertollano (Ciudad Real, España) (ITGE, 1987)

1: Hueco inicial. 2: Escombrera exterior. 3: Zona restaurada. 4: Cavity intermedia (mina Emma). 5: Puertollano. 6: Complejo Petroquímico REPSOL-YPF.

II.4.1 Caso piedras Campasero S.A.

Destacar la implantación de un sistema de generación eléctrica de 5 Kw. en el perímetro de la fábrica aprovechando el espacio existente, la potencia de su transformador y la línea de evacuación de media tensión que sirve para suministro habitual. La valorización de los estériles permite una optimización del recurso; se han realizado acciones para la venta de los subproductos que son considerados estériles inertes y han servido para restauración topográfica de la cantera. Esta actividad es implantable fácilmente a través de acuerdos con empresas de áridos o su venta directa mediante la implantación de sistemas propios (PINACAL, 2007)



Figura II- 14 Piedras Campaspero S.A. (PINACAL, 2007)

II.4.2 Caso granito hermanos Prados Quemada S.L.

Hermanos Prados Quemada S.L. ha desarrollado en el marco de este proyecto interesantes actuaciones de estudio de valorización de los lodos de elaboración de granito. El resultado de los estudios para su valorización no ha sido positivo en cuanto al ratio de inversión precisa para separar las partículas de hierro de los flejes de los lodos de granito (feldespato, sílice y mica). Si ha sido positiva la acción emprendida de establecer una línea completa de elaboración de bloques de tamaños no comerciales para hacer gruesos destinados a pavimentos y fachadas (incluso cizalla para mampostería) lo cual ha mejorado el rendimiento (PINACAL, 2007)



Figura II- 15 Granito hermanos Prados Quemada S.L. (PINACAL, 2007)

II.4.3 Caso granduero piedra Nova S.L.

Piedra Nova S.L. elabora bloques de granito que suministra desde sus propias canteras explotadas por Granduero SL. El problema de lodos y serrín de tratamiento superficial ha sido acometido en el proyecto para su uso en el entorno agrícola y ganadero con las siguientes acciones:

- Uso en mejoras edáficas: extensión de los lodos mineralizados en terrenos de cultivo y pastos
- Uso para sellado de vertederos por su elevado porcentaje de finos arcillosos
- Mejora de la curva granulométrica de las zahorras de un fabricante de áridos cercanos (PINACAL, 2007)

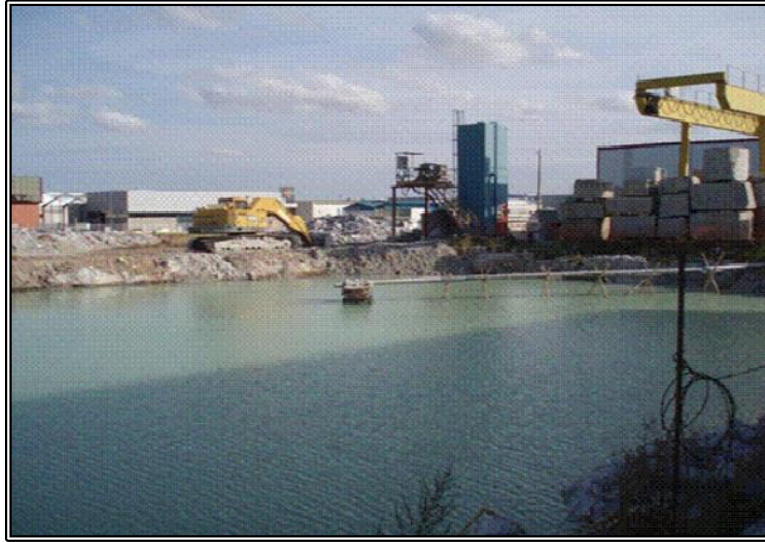


Figura II- 16 Granduero Piedra Nova S.L. (PINACAL, 2007)

II.4.4 Caso pizarras J. Bernardos S.L.

Pizarras J. Bernardos S.L. ha desarrollado la valorización del material manipulado en sus instalaciones. Es destacable el desarrollo que ha iniciado para implantar la comercialización de estos formatos especiales mediante labores de marketing necesarias en el mercado de revestimientos decorativos que por su cuenta desea realizar durante el año 2008 tras pasando el proyecto y superando su participación. Los lodos estudiados son utilizables para tras su desecado fabricación de piezas cerámicas en la cercana población de Carbonero el Mayor con una importante limitación de precio y porcentaje en la masa total (PINACAL, 2007)



Figura II- 17 Pizarras J. Bernardos S.L. (PINACAL, 2007)

II.4.5 Caso pizarrerías Bernardos S.L.

Pizarrerías Bernardos S L a través de su comercial Natur piedra ha sido pionera en utilizar la pizarra de Bernardos que históricamente no se ha utilizado para cubiertas para su uso como “filita” para ello ha precisado invertir en procesos de aserrado de los bloques lejanos de los tradicionales sistemas de lajado. El envejecido y pulido ha permitido atraer una importante cuota de demanda de diseño arquitectónico sobre todo en el entorno geográfico de Madrid.

Los lodos estudiados son utilizables para tras su desecado fabricación de piezas cerámicas en la cercana población de carbonero el Mayor con una importante limitación de precio y porcentaje en la masa total.

Destaca la importante inversión en optimización de transporte intermedio en el entorno de la fábrica (PINACAL, 2007)



Figura II- 18 Pizarrerías Bernardos S.L. (PINACAL, 2007)

II.4.6 Caso areniscas Sierra de Palacios S.L.

Los lodos estudiados son utilizables tras su ciclonado y separación de finos arcillosos y posterior desecado para su comercialización de arenas silícico feldespáticas para morteros de construcción con una importante limitación de precio y porcentaje en la masa total (PINACAL, 2007)



Figura II- 19 Areniscas Sierra de Palacios S.L. (PINACAL, 2007)

II.4.7 Caso areniscas del Arlanza S.L.

Destacar el compromiso empresarial con el medio ambiente plasmado en la implantación de la ISO 14.000 en sus gestiones minero-industriales.

Es reseñable el uso de mampostería y gruesos tradicionales para la valoración de los semibloques no comerciales (PINACAL, 2007)



Figura II- 20 Areniscas del Arlanza S.L. (PINACAL, 2007)

II.4.8 Caso piedras naturales de castilla S.L. Pinacas

PINACAS ha sido pionera en procesado completo de aguas de aserrado. Fruto de su participación se ha estudiado e implantado una prensa de lodos tras la etapa de espesado. Estos lodos han sido estudiados para plantear una valorización como arenas para crear morteros de cemento y su uso en morteros coloreados con aspectos y tonos de la arenisca. Dicho proyecto se deberá completar en anualidades venideras para establecer los procesos de ciclonado y separación.

La implantación de hilo diamantado en la cantera sustituyendo a los explosivos durante el año 2007 es un objetivo que mejora la recuperación del macizo y reservas explotables naturales. La separación de los estériles según su

granulometría permite valorizar de manera más eficaz los rechazos ornamentales (PINACAL, 2007)

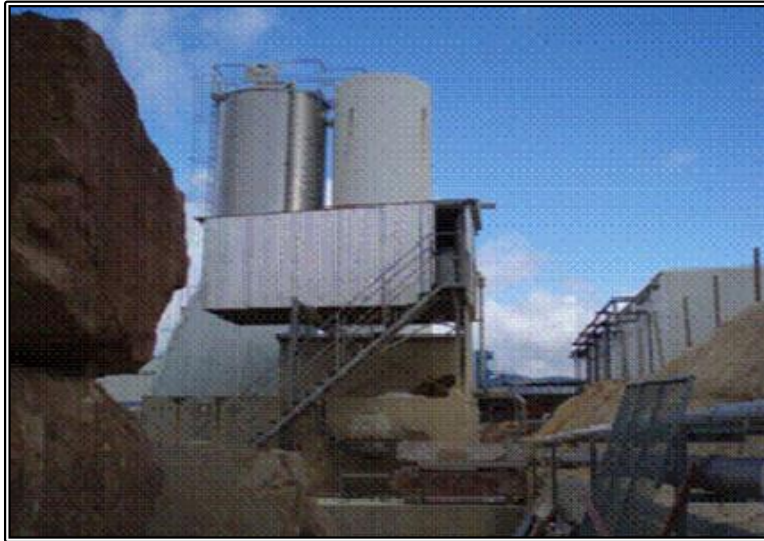


Figura II- 21 Piedras naturales de Castilla, Pinacas (PINACAL, 2007)

II.4.9 Caso areniscas hermanos Juanes SC

La empresa Hnos Juanes tras la participación en el proyecto ha empleado las indicaciones estudiadas en el nuevo establecimiento minero de aserrado que proyecta implantar en el polígono industrial de Palacios.

Destacar un telar de última generación y posibles paneles solares en la cubierta de la nave (PINACAL, 2007)

II.4.10 Composición química de los residuos generados en la elaboración y corte del mármol

Los residuos procedentes del corte del mármol carecen de elementos tóxicos o nocivos desde un punto de vista químico, ya que están constituidos mineralógicamente por calcita de manera mayoritaria, su composición química se puede ver en la Tabla II-2 (PINACAL, 2007)

Tabla II- 2 Composición química en % de los residuos secos de corte en el mármol (media de los análisis) (PINACAL, 2007)

Mármol Mácael		Mármol Blanco Marfil	
Análisis 1		Análisis 2	
CaO	54.88%	CaO	55.20%
CO ₂	43.65%	CO ₂	43.20%
MgO	0.99%	MgO	1.15%
Fe ₂ O ₃	0.14%	SiO ₂	0.20%
SiO ₂	0.08%	Al ₂ O ₃	0.10%
Otros	0.26%	Otros	0.15%

Los residuos generados en la elaboración del mármol, están formados básicamente por caliza, la cual es usada como materia prima en un amplio rango de aplicaciones industriales:

- Caliza Triturada para uso químico
- Caliza Triturada para agregado.
- Caliza Molida en tamaño grueso a mediano para cargas de bajo valor.
- Caliza Molida en tamaño grueso a mediano para cargas no funcionales de valor medio.
- Caliza Molida en tamaño fino a ultra fino para cargas funcionales de valor medio.
- Caliza Molida en tamaño fino a ultra fino de alto valor.
- Caliza Calcinada con arcillas para la fabricación de cemento.
- Cal Hidratada
- Cal Quemada
- Cal con CO₂
- Carbonato de Calcio Precipitado (CCP) (PINACAL, 2007)

II.4.11 Áridos

Los áridos son partículas de roca que, unidas con o sin ligante, constituyen una parte o la totalidad de una obra civil (Castells, 2000)

II.4.11.1 Usos

- Construcción
- Corrección de suelos
- Control de emisiones en centrales térmicas
- Fabricación de vidrio, cerámicas, pinturas, plásticos (Castells, 2000)

II.4.12 Descripción del manejo actual de los residuos de la construcción (RC) en el estado de México

El manejo actual de los Residuos de Construcción (RC) en el Estado de México no se encuentra regularizado completamente, con excepción de los instrumentos legales con que cuentan los municipios y algunos como el caso de Tlalnepantla y Cuautitlán Izcalli que tienen formatos específicos para el manejo de RC, aun así se encuentran rebasados por falta de actualización, por otro lado los instrumentos normativos en materia estatal, aún no han sido utilizados o generados los instrumentos de control, salvo la excepción de los instrumentos en materia de impacto ambiental, esto ha provocado que el generador no tenga las obligaciones debidas relativas al manejo de sus residuos a través de un plan de manejo, los transportistas por su parte no expiden en ocasiones garantías al generador de que los RC fueron dispuestos de manera adecuada en sitios autorizados, provocando en algunas ocasiones la disposición clandestina en terrenos, barrancas, tiros clandestinos entre otros. Asimismo se observó que en algunos municipios, los sitios de disposición final no se reciben RC, se encontraron predios particulares (minas explotadas y predios) que se desconoce si son sitios autorizados por la SMAGEM (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México) para el depósito de RC, en los que se tiene una

cuota de acuerdo al volumen que se deposita, de acuerdo con lo establecido en el Código Financiero.

A continuación se realiza una descripción del manejo de RC de acuerdo al tipo de residuo clasificado anteriormente, la información que se presenta es de una muestra tipo efectuada a 36 municipios del Estado de México:

- **Residuos de excavación:** en este caso el material es separado y un gran porcentaje se reusa en la obra como nivelación y relleno, la recolección y transporte se realiza por prestadores de servicio público o privado, frecuentemente se mezcla con los residuos sólidos urbanos y es depositado en sitios autorizados o no autorizados para el depósito de RC, el aprovechamiento que se le da a los residuos de excavación básicamente es para la nivelación y relleno de predios, si los RC van mezclados con residuos sólidos urbanos se realiza la pepena y venta los materiales re- aprovechables, cuando existe una gran mezcla del material de excavación, mezclado con residuos sólidos, este pierde su potencial de aprovechamiento, depositándolo en sitios clandestinos o de disposición final (IFOMEGEM, 2005)

II.4.13 Caso Brasil

En Brasil existen casos que sobresalen por la búsqueda del desarrollo sustentable a continuación se presenta uno.

II.4.13.1 Caso Londrina

En Londrina, el suelo público situado en los valles y en los arroyos ha sido siempre susceptible de ser ocupado por los barrios de chabolas. Durante muchos años, la mayoría de estas zonas, que se situaban en las cuatro microcuencas (estos valles ocupan una superficie de 25 millones de m²) estaban abandonadas y no se habían incorporado con eficacia a la vida de la ciudad. Las zonas de

chabolas estaban llenas de maleza, de basura, de materiales de desecho y de otros muchos materiales contaminantes. La gente que vivía allí no podía acceder una vivienda ni podía permitirse pagar un alquiler. Al mismo tiempo, estas zonas no se utilizaban como lugares de recreo ni estaban siendo protegidas.

La política ambiental en Londrina considera como una prioridad la recuperación de los valles y la creación de cuatro parques en estas zonas. Uno de estos valles es el llamado "Cambezinho", con 8.493 m² y en el que se sitúan los barrios de chabolas de Cativa y Nova Conquista.

El *Living Better Jardim*, nombre que se ha dado al programa de urbanización de los barrios de chabolas y de regularización agraria, patrocinado por la *Compañía para la Vivienda de Londrina, COHAB-LD*, está mejorando la construcción de viviendas mediante el sistema "mutirao" (todos los vecinos trabajan un día gratuitamente para cada uno de ellos, que es el que paga los gastos de ese día) y el uso de bloques fabricados en la *Oficina Central de Molido de Escombros*. El proceso es muy útil ya que los residuos procedentes de la construcción que se iban a verter en los valles y en otras zonas, se convierten en bloques que a su vez se transforman en viviendas para la gente pobre.

La *Oficina Central de Molido de Escombros* ha conseguido que se eliminen 400 "bota-foras" (sitios de disposición de residuos procedentes de la construcción). Las compañías que recogen con carros los residuos, trasladan estos materiales a la *Oficina de Molido de Escombros*. Allí, los materiales se seleccionan, se trituran y se convierten en subproductos como gravas 2 y 3, piedra y arena. La piedra de granizo y la arena se mezclan con cemento y mediante un proceso de prensado se convierten en bloques y en baldosas. Las baldosas se usan para pavimentar las plazas y los bloques se utilizan para construir las viviendas. La capacidad de producción de la *Oficina Central de Molido de Escombros* es de 2.500 bloques al día. Los bloques miden 20x40 cm.

Estos bloques se hacen con los residuos reciclados procedentes de la construcción y se están utilizando en el sistema "mutirao" del *Programa Living Better*, en el que 70 casas embrión de 25 m² están siendo construidas por los futuros residentes en propiedad compartida cerca de los dos barrios de chabolas.

El material representa un ahorro del 20% del coste total de la vivienda si se compara con el sistema tradicional de construcción. Los "mutirantes" (la gente que trabaja en el sistema "mutirao") trabajan 44 horas a la semana y a través del *Sindicato de trabajadores de la industria de la construcción civil* y del *Servicio Nacional de Formación Industrial (SENAI)* reciben la formación en los trabajos manuales de la construcción civil. Cuando se finaliza la construcción, se ofrece a los residentes un plan de ampliación de las casas embrión. Para las 70 unidades (1.750 m² construidos) se utilizarán 280 toneladas de residuos "in natura" procedentes de la construcción. Por cada 100 viviendas (2.500 m²) se recogerán en Londrina 400 toneladas de residuos "in natura" procedentes de la construcción. Como consecuencia de este proyecto, la ciudad puede proteger más valles y espacios para el ocio, mientras que los residuos procedentes de la construcción se convierten en viviendas para aquellas personas que viven en las zonas de los valles (IFOMEGEM, 2005)

III. METODOLOGÍA

III.1 Área de estudio

Canteras Jaramillo es una empresa familiar joven dedicada a la extracción, procesamiento y comercialización de cantera y otras piedras naturales con el fin de elaborar productos de alta calidad, transformando la roca en productos que crean ambientes agradables para sus clientes, localizada en Rancho San José Dandho s/n Maney, Huichapan Hidalgo, México. Se encuentra asentada en la porción norte del eje neovolcánico, caracterizada por la presencia de numerosos conos piroclásticos. Las rocas predominantes de origen volcánico, están representadas por varias unidades constituidas por derrames y tobas, que dan lugar a prominencias circundadas por extensas mesetas que son bifurcadas por arroyos de origen tectónico, conformando barrancas de profundas a poco profundas (Jaramillo, 2004)

La figura III-1 la ubicación geográfica de la Canterera Jaramillo.

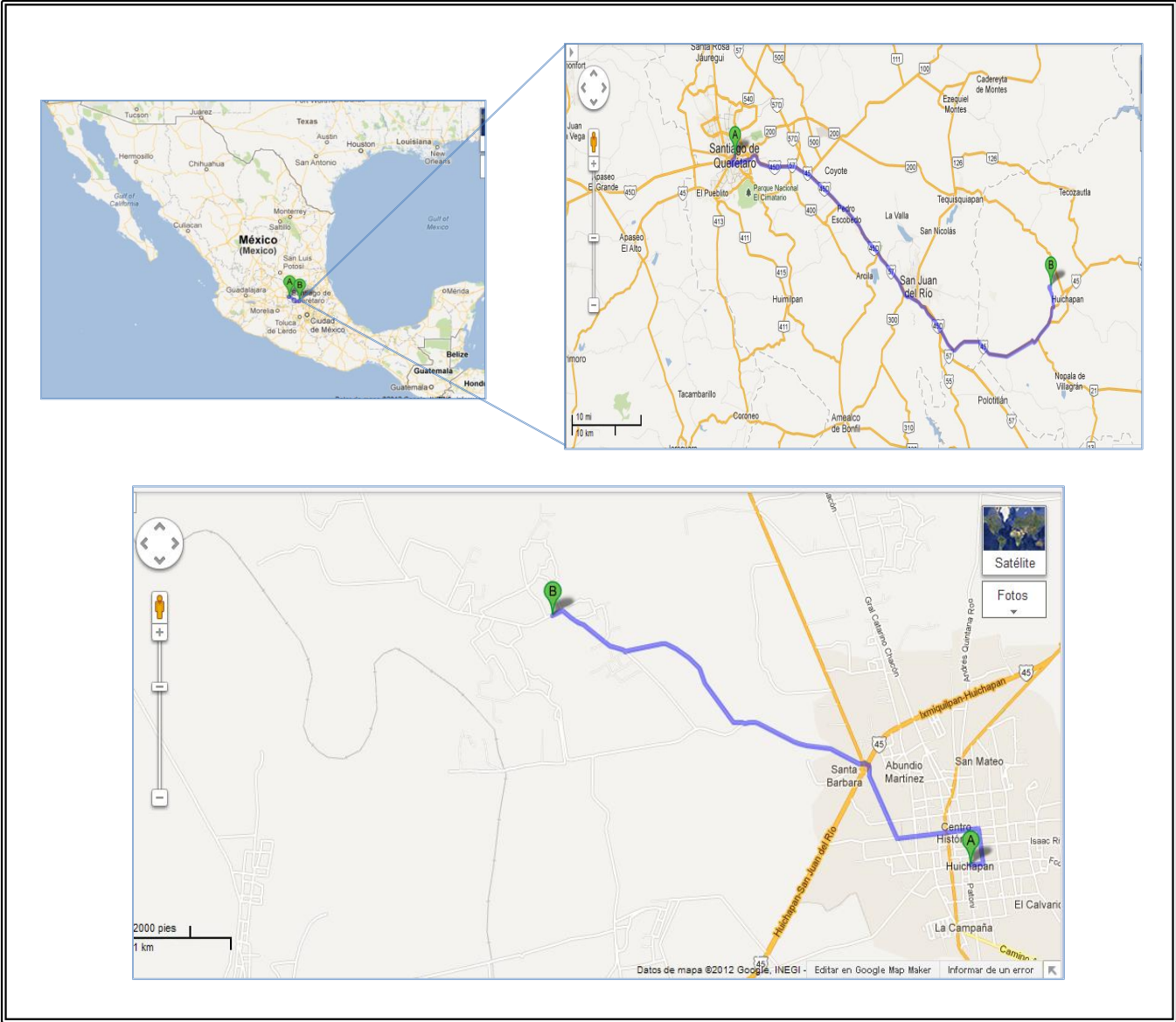


Figura III- 1 Ubicación geográfica de Canteras Jaramillo

- La Figura III-2 muestra la imagen del residuo al cual se pretende dar disposición Económico-Ambiental.



Figura III- 2 Residuos del trabajo de Piedra Cantera

En los siguientes puntos se describen las acciones realizadas para el logro de los objetivos planteados,

III.2 Muestreo

- Se realizó un muestreo aleatorio en el lote de depósito de los residuos. (Fig. III-3)
- Recolectando 10 muestras las cuales para su primer análisis fueron deshidratadas en mufla a 50 °C aproximadamente, morteradas (Fig. III-5) y tamizadas en malla 120 μ (Fig. III-4), especificaciones necesarias para introducir las muestras en el equipo de DRX.



Figura III- 3 Toma de muestras

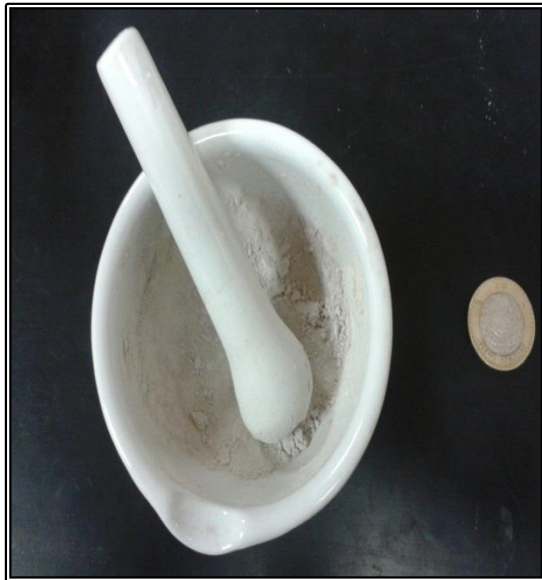


Figura III- 5 Preparación de muestras en mortero para análisis



Figura III- 4 Preparación de muestras en tamiz malla 120

III.2.1 Análisis de muestras: Materiales y Métodos

III.2.1.1 Análisis de composición elemental.

La caracterización mineralógica para la determinación de especies minerales primarias (asociaciones minerales del yacimiento), se realizó por difracción de rayos-X (DRX), en el laboratorio de química del centro de

Investigaciones multidisciplinario, campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Descripción del equipo:

- Bruker D8-Advance con espejo Göebel (muestras no planas)
- Con cámara de alta temperatura (hasta 900°C)
- Con un generador de rayos-x KRISTALLOFLEX K 760-80F
- (Potencia: 3000W, Tensión: 20-60KV y Corriente: 5-80mA)
- Y un Seifert modelo JSO-DEBYEFLEX 2002 que está provisto de un cátodo de cobre y un filtro de níquel.
- Desde el ordenador se controlan las condiciones de medida obteniéndose así el difractograma.
- Se dispone además de una base de datos JCPDS

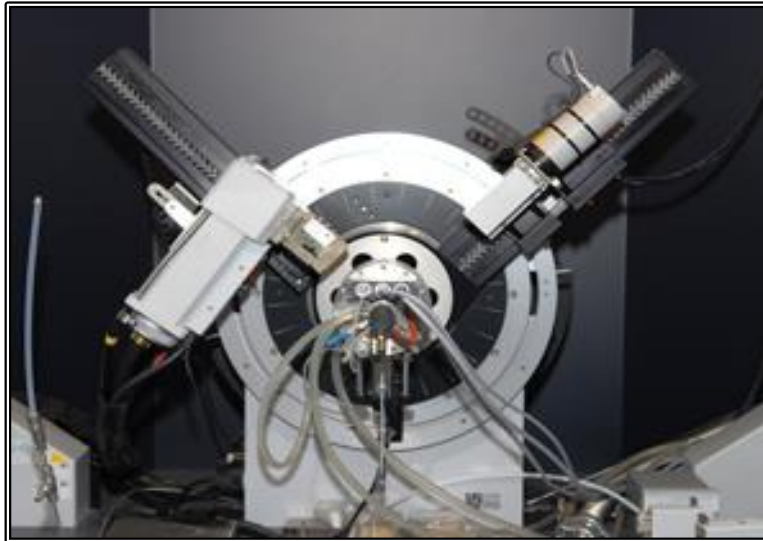


Figura III- 6 Equipo DRX

III.2.1.2 Análisis de concentración de los minerales

Los análisis químicos de sólidos (polvos), se realizaron en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) en la Ciudad de Querétaro, Qro., México, el equipo utilizado fue un analizador de Fluorescencia de Rayos X,

Descripción del equipo:

- La marca lo caracteriza como uno de los más completos en el mercado,
- Cuenta con cristales analizadores
- Trabaja con un tubo con ánodo de Rodio
- Dependiendo del elemento y su concentración es el cambio de potencia que se administra (KV-mA)



Figura III- 7 Equipo FRX

II.2.1.3 Análisis Granulométrico

El análisis de granulometría se realizó en el laboratorio de suelos de la facultad de Ingeniería de la Universidad autónoma de Querétaro.

Descripción de los materiales:

- | | |
|-----------------------|----------------------------|
| ▪ Juego de mallas | ▪ Flaneras |
| ▪ Báscula de 2.5 Kg | ▪ Vidrio de reloj |
| ▪ Regla de cuarteo | ▪ Vaso de aluminio |
| ▪ Cucharón de ½ Kg | ▪ Varilla de punta de bala |
| ▪ Brocha | ▪ Cubeta |
| ▪ Charolas y cápsulas | ▪ Pizeta |
| ▪ Horno | |

III.3 Técnicas de calidad aplicadas.

Las técnicas de calidad aplicadas para alcanzar los objetivos planteados fueron, Pareto, Ishikawa, Estratificación y Despliegue de la función de calidad (QFD).

III.3.1 Pareto

Con la finalidad de determinar las causas por las cuales la industria canterera no ha dado disposición de sus lodos, se diseñó el cuestionario ilustrado en la Figura III-8, el cual fue aplicado a manera de entrevista a una muestra de Canteros en la región, esta muestra fue elegida de una población de 60, el tamaño de la muestra se determinó con base en la herramienta de calidad: plan de muestreo, contenido en el software MINITAB 16.

III.3.2 Ishikawa

Una vez identificadas las causas de mayor frecuencia que inciden en la problemática, se analizaron a mayor nivel de detalle en un diagrama de causa-efecto para descubrir la causa raíz y sustentar las soluciones que resultaran, la información resultó de las entrevistas efectuadas.

III.3.3 Estratificación

Para localizar las mejores pistas para resolver el problema se dividió el universo de información recabada en este documento en grupos homogéneos, categorizando las diferentes aplicaciones del tipo de residuo, con lo que se encontraron semejanzas entre las características Químicas y Físicas de nuestros polvos con algunas aplicaciones que existen.

CUESTIONARIO

EMPRESA			
NOMBRE DEL EMPRESARIO			
E-MAIL			

1.	¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN DE LA PIEDRA? EN PROMEDIO, ¿QUÉ VOLUMEN (EN METROS CÚBICOS) PRODUCE MENSUALMENTE LA EMPRESA?
	R:

2.	¿QUÉ SUCEDE CON LOS LODOS GENERADOS EN SUS PROCESOS?
	R:

3.	¿CUÁNTAS PILETAS UTILIZAN PARA EL DEPÓSITO DE LODOS? ¿QUÉ DIMENSIONES TIENEN?
	R:

4.	¿CON QUÉ FRECUENCIA DESALOJAN EL LODO DE LAS PILETAS? (DÍAS)
	R:

5. ¿CUANTIFICAN LA CANTIDAD DE LODO DESALOJADO? (marque con una X)			
SI		NO	
¿CUÁL ES LA CANTIDAD?		¿POR QUÉ?	

6.	¿A DÓNDE SE DIRIGE EL LODO DESALOJADO DE LAS PILETAS?
	R:

7.	¿QUÉ DIFICULTADES SE HAN TENIDO CON ESTE RESIDUO?
	R:

8.	¿SE HA INTENTADO UTILIZAR EL RESIDUO DE ALGUNA MANERA? ¿EL RESULTADO HA SIDO SATISFACTORIO? ¿POR QUÉ?
	R:

9. ¿CONOCE ALGUNA APLICACIÓN DE ESTOS LODOS? (marque con una X)			
SI		NO	
EN CASO DE SER SI, MENCIONE CUAL O CUALES:			

10. INDIQUE CUAL O CUALES DE LAS SIGUIENTES CIRCUNSTANCIAS LE HAN DIFICULTADO LA REUTILIZACIÓN DE SUS LODOS. (marque con una X)	
a) FINANCIAMIENTO	<input type="checkbox"/>
b) FALTA DE INFORMACIÓN	<input type="checkbox"/>
c) NO ES REDITUABLE	<input type="checkbox"/>
d) NO ME INTERESA	<input type="checkbox"/>
e) OTRA	<input type="checkbox"/>
EN CASO DE SER OTRA ESPECIFIQUE:	

POR SU ATENCIÓN

GRACIAS

Figura III- 8 Formato de Captura de Datos

III.3.4 Despliegue de Función de la Calidad (QFD)

El objetivo de aplicar esta metodología fue construir un sistema detallado para transformar las necesidades y deseos del cliente (Canteros y medio ambiente) en requisitos de diseños del producto (Aplicaciones).

Considerando como voz del cliente a los canteros, el diseño de la casa de la calidad se basó en los requerimientos de éstos para la disposición de sus polvos, se elaboró con catorce de ellos una lista de las principales características que desean de un posible producto a base de sus polvos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1 Características del área de estudio

La figura IV-1 muestra el espacio geográfico de donde se extrae la materia prima (piedra de cantera) para la empresa, se puede apreciar la profundidad de la barranca, que se anega a un arroyo de agua.



Figura IV- 1 Canteras Jaramillo

La extracción de la fracción requerida de piedra para llevar a corte y laminado, se realiza por medio de cuñas (calzas de metal) que delimitan el volumen a extraer, ejerciendo presión manualmente con martillos hasta lograr el extirpe del material. (Fig. IV-2)



Figura IV- 2 Extracción de la Piedra

Hasta la fecha no se ha utilizado dinamita como medio para la extracción de la cantera, las diversas razones en esta decisión van desde legislación hasta los costos involucrados con el método.

Una vez transportados los bloques de piedra a la zona de proceso, inicia el corte de los mismos, posteriormente el laminado, las dimensiones finales de la piedra en ambos procesos depende del producto terminado a comercializar, (piezas ornamentales, material para pisos (Fig. IV-5), etc.)

Tanto el corte (Fig. IV-3) como el laminado (Fig. IV-4) del material utilizan agua como medio refrigerante de la maquinaria.



Figura IV- 3 Corte de la Piedra Cantera

Las porciones de cantera extraídas de la mina se envían a proceso para formar bloques de forma regular y así elaborar los productos acabados.

Para ello se utilizan discos que emplean en el corte un chorro de agua, este método de corte consiste en cierto caudal de agua altamente presurizado a través de un orificio de un diámetro muy pequeño (tobera). Este chorro impacta el material con una gran fuerza en un área muy reducida.

El bloque se recibe y se corta en láminas que suelen tener un espesor de 2 a 4 cm, aunque se pueden elaborar de cualquier grosor. De igual forma que en el corte, el laminado incluye discos con el caudal de agua.



Figura IV- 4 Laminado de la Piedra Cantera

En la figura IV-5 se aprecia uno de los productos elaborados por Canteras Jaramillo. Bloques para pisos de cantera, aquí podemos observar tres de sus estilos en color y textura, de izquierda a derecha, *Chocolate Huichapan, Rosa, Blanco.*



Figura IV- 5 Producto para pisos de Cantera

Al final del proceso de transformación de la piedra natural resulta un efecto por el empleo de agua como refrigerante de las máquinas de corte y laminado, esto es la generación de lodos.

La disposición que hasta el momento tienen los lodos en la empresa llega al almacenamiento.

Para evitar la acumulación en la zona de corte se han acondicionado canaletas (Figura IV-6) para dirigir el agua mezclada con el polvo de cantera y depositarla en piletas (Fig. IV-7).



Figura IV- 6 Lodos generados tras el trabajo de la Piedra

Se han acondicionado las piletas a modo que el agua fluya de una a otra decantando el lodo y así recuperar el agua por decantación para que esta vuelva a entrar a los procesos de corte y laminado.

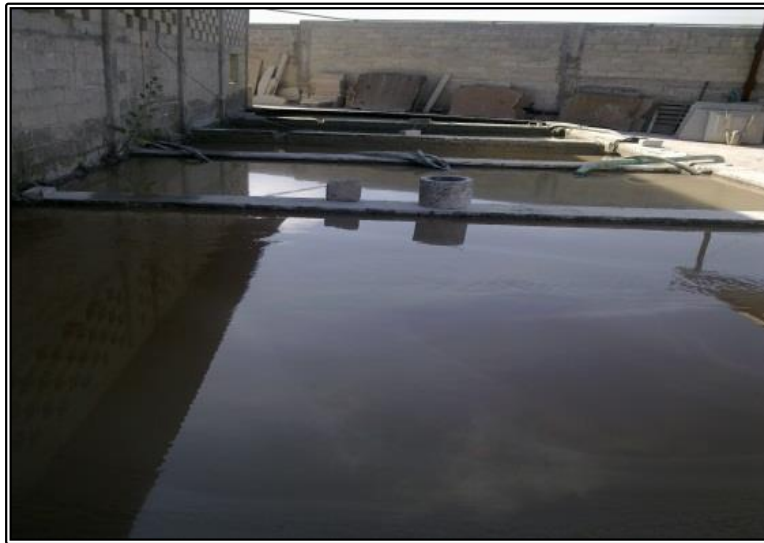


Figura IV- 7 Piletas para depósito de lodos

- La empresa cuenta con cinco piletas (Fig. IV-7) cuya capacidad es equivalente a 60 m^3 c/u, su distribución está diseñada con la finalidad de que el líquido fluya de un depósito a otro mientras el sólido decanta para ser retirado de los mismos.
- Con esto se observa que la última pileta tendrá líquido sin residuo, de esta manera tendrá la capacidad y condiciones físicas de entrar nuevamente como refrigerante en el proceso.
- Una vez retirado el residuo de las piletas, se traslada a lo que la empresa denomina presa de lodos (Fig. IV-8).



Figura IV- 8 Traslado de piletas a zona de depósito de residuos

- Una vez deshidratados, con maquinaria especial se desazolva la presa hacia los lados formando las montañas de polvo y dejando espacio para depositar más lodo (Fig. IV-9)
- Este proceso se ha realizado durante un periodo de 8 años aproximadamente, el área que abarca el depósito de éste residuo se acerca a los 1800 m².



Figura IV- 9 Presa de Lodos

- Como puede observarse en la imagen anterior, existe un impacto visual en el paisaje natural de la región, el cual gradualmente ira empeorando si no se dispone de estos polvos.
- La Figura IV-10 muestra la imagen del residuo al cual se pretende dar disposición Económico-Ambiental.



Figura IV- 10 Residuos del trabajo de Piedra Cantera

IV.2 Técnicas de Calidad aplicadas

IV.2.1 Pareto

El cuestionario diseñado para la recolección de datos en las entrevistas, se aplicó a 14 canteros, tamaño de muestra que fue determinado por el plan de muestreo en MINITAB 16, con un 95% de confianza, que se comprobó también por fórmula (Tabla, IV-1), esto permitió recolectar los datos útiles para el diseño del diagrama de Pareto así como información adicional que resultó de utilidad en las demás herramientas de calidad aplicadas, para atacar la problemática.

Tabla IV- 1 Tamaño de muestra definido por MINITAB 16, comprobado con fórmula

MUESTREO DE ACEPTACIÓN POR ATRIBUTOS					FÓRMULA	
Tipo de medición: Pasa/No pasa					Tamaño de muestra (Pita, 1996)	
Tamaño del lote: 60						
Nivel de calidad aceptable (AQL)		0.15			$n = \frac{N * k^2 * p * q}{(e^2 * (N - 1)) + (k^2 * p * q)}$	
Riesgo del productor (Alfa)		0.05				
Nivel de calidad rechazable (RQL o LTPD)		0.5			N= tamaño de la población K= constante que depende del nivel de confianza, (probabilidad de que los resultados de la investigación sean ciertos, en este caso para 90% es de 1.65) p= proporción esperada q= 1-p e= error muestral	
Riesgo del consumidor (Beta)		0.1				
Planes generados						
Tamaño de la muestra 14					$n = \frac{60 * 1.65^2 * 0.05 * 0.95}{(0.085^2 * (60 - 1)) + (1.65^2 * 0.05 * 0.95)}$	
Número de aceptación 4						
Aceptar el lote si los elementos defectuosos en una muestra de 14 \leq 4; De lo contrario, rechazarlo.						
Proporción de elementos defectuosos						
	Probabilidad de aceptación	Probabilidad de rechazo	AOQ	ATI	$n = \frac{60 * 1.65^2 * 0.05 * 0.95}{(0.085^2 * (60 - 1)) + (1.65^2 * 0.05 * 0.95)}$	
0.15	0.953	0.047	0.10962	16.2		
0.50	0.090	0.910	0.03442	55.9		
Límite de calidad saliente promedio (AOQL) = 0.14213 en una proporción de defectuosos de 0.25086.						
					$n = 13.965 \approx 14$	

Los puntos que se consideraron para la elaboración del formato de captura de datos fueron: registro de datos en forma sencilla, fácil de analizar, que proporcionara Información confiable,

El formato del cuestionario contiene 10 preguntas, las cuales se aplicaron en forma de entrevista lo que permitió profundizar en el tema.

Las variables a analizar de este cuestionario para nuestro estudio serán:

- a) Destino final de los residuos.
- b) Problemáticas identificadas por parte de los canteros por la generación y acumulación de sus residuos.
- c) Aplicaciones conocidas por los canteros a partir del uso de los residuos
- d) . Aplicaciones emprendidas en las canteras.
- e) . Causas por las cuales no se dispone de los residuos
- f) Cantidad de residuo generado mensualmente.

Los resultados se organizan en la tabla IV-2

Tabla IV- 2 Resultados de las Encuestas Realizadas

Datos de encuestas a Canteros de la Región												
Empresa	Producción mensual m ³	Número de piletas	Volumen de la pileta m ³	Periodo de desalojo de piletas	Volumen m ³ de desalojo mensual	Cuantificado	Destino del residuo	Efecto de la acumulación del residuo	Disposición de residuos			
									Conocimiento		Aplicación	
									Si (¿Cuáles?)	No	Si	No (¿Por qué?)
C. Arrevillague	75	8	19.2	Semanal	76.8	No	Relleno de Cavidad	C. Visual, Espacio	Caminos		X	Falta de Información, No es Redituable
C. Jaramillo	250	5	60	Mensual	60	No	Almacén	C. Visual, Espacio		X		Falta de Información
C. Realstone	12	6	12.8	Trimestral	4.3	No	Almacén	C. Visual		X		No es redituable
C. Huichapan	125	8	90	Mensual	90	No	Almacén	C. Visual		X		No es redituable
C. Maldonado	60	4	8	Quincenal	16	No	Almacén	Espacio		X		Falta de información
Arte y cantera H	37	4	9.375	Semanal	37.5	No	T. Baldío	Espacio, talco	Bloques, mezclado con cemento, pzas. Por moldeo.		X	Falta Aglutinante
Alta calidad en Cantera	6500 m ²	4	18	2 veces/sem	144	No	Bordo	Ninguno		X		Falta de información
C. Medelyn	80 m ²	7	9	Semanal	36	No	Milpa. Bordo	Ninguno		X		Falta de información
C. Uribe	11	2	3	Mensual	3	No	Almacén	Ninguno		X		Falta de información
C. Pérez	---	4	4.335	Mensual	4.335	No	Almacén	Espacio		X		Falta de información
C. Olvera	4	3	3	Mensual	3	No	Terrenos	Polvo se inhala	Resanador de las mismas piezas			Falta de información
C. Jiménez	1200 m ²	5	22.5	Semanal	90	No	Terreno	Polvo, espacio	Caminos, cultivar			Falta de información
C. Arquitectónicas de Hgo.	250	12	30	Mensual	360	No	Tiraderos varios	C. Visual, obstrucción				No interesa
C. San Sebastián S.P. de R. L.	1200	3	22.5	Mensual	67.5	No	Almacén	Contaminación				Falta de información

Los datos obtenidos tras realizar las entrevistas a los catorce Canteros con apoyo del cuestionario III-8, indican:

- a) La mayoría de las Cantereras tienen sus polvos almacenados en terrenos propios y colindantes con la empresa, sin embargo algunas más desalojan en diferentes puntos aledaños a la comunidad, son pocos los que empiezan a emprender acciones en beneficio de la reestructuración de terrenos, como es el caso de la Canterera Arrevillague y Jiménez que han utilizado sus residuos para rellenar cavidades.
- b) Entre los efectos identificados por los canteros a consecuencia de la acumulación de los polvos están: el espacio limitado para el depósito de éstos, algunos indicaron que ya no les otorgan los permisos para tal efecto, la incomodidad que provocan con los vecinos a la cantera por la propagación de polvo, los mismos trabajadores se incomodan al estar inhalando el polvo, la contaminación visual y la obstrucción que provoca el apilamiento del residuo.
- c) 29% de los encuestados, mostró conocimiento de la utilidad del residuo, como es en restauración de caminos, elaboración de bloques, piezas por moldeo, resanador, mezcla con cemento. No obstante existe la visión por parte de algunos canteros de agregar algún aglutinante al producto, el cual pudiera compactar el material y formar estructuras con bajos costos de producción lo que les permitiría ofrecer precios más baratos en piezas que son del mismo material y calidad, solo que formadas por diferente proceso, aglutinante que a la fecha no se ha encontrado.
- d) 14% ha emprendido acciones en la disposición de sus residuos, esto hacia la restauración de caminos.
- e) Las causas mencionadas, por las cuales no se ha dispuesto de este material fueron, la falta de información, el que no sea redituable, falta de interés.
- f) No llevan un control de registro en cuanto a la cantidad de lodos generados por periodo determinado, sus razones fueron que no se requiere en su línea

de proceso ya que para ellos no es un material útil, sin embargo se puede calcular aproximadamente con los datos proporcionados sobre el volumen y número de piletas evacuadas y el periodo de desalojo, de esta manera los datos indican grandes diferencias en sus cantidades, esto se debe a que no todos las cantereras laminan el material y sus catálogos de piezas fabricadas son diferentes en cuanto a volumen y tipo, por lo tanto también varían sus periodos de desalojo de piletas que van desde semanal, mensual o trimestral.

De esta información se priorizaron las causas por las cuales no se ha dispuesto de los residuos, este objetivo se logró con la ayuda del diagrama de Pareto ilustrado en la figura IV-11

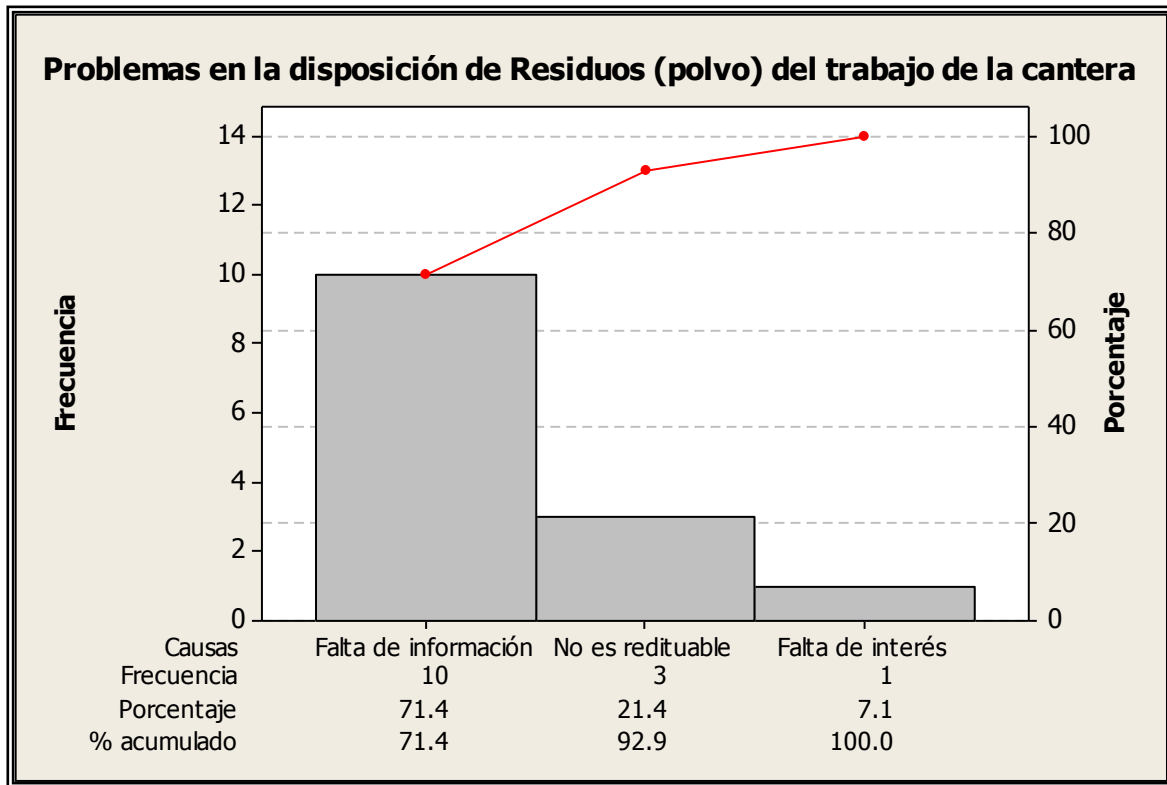


Figura IV- 11 Pareto de causas en la no disposición de residuos

Los datos en este diagrama nos indican que la falta de información y el que las aplicaciones que se conocen no les sean redituables, han provocado que el residuo siga acumulándose sin tener un destino que mejore su condición.

IV.2.2 Ishikawa

En cuanto a la causa de que no sea redituable, se analizó a un mayor nivel de detalle también a través de la encuesta, esta información se ilustra en el diagrama de Causa-efecto de la Figura IV-12.

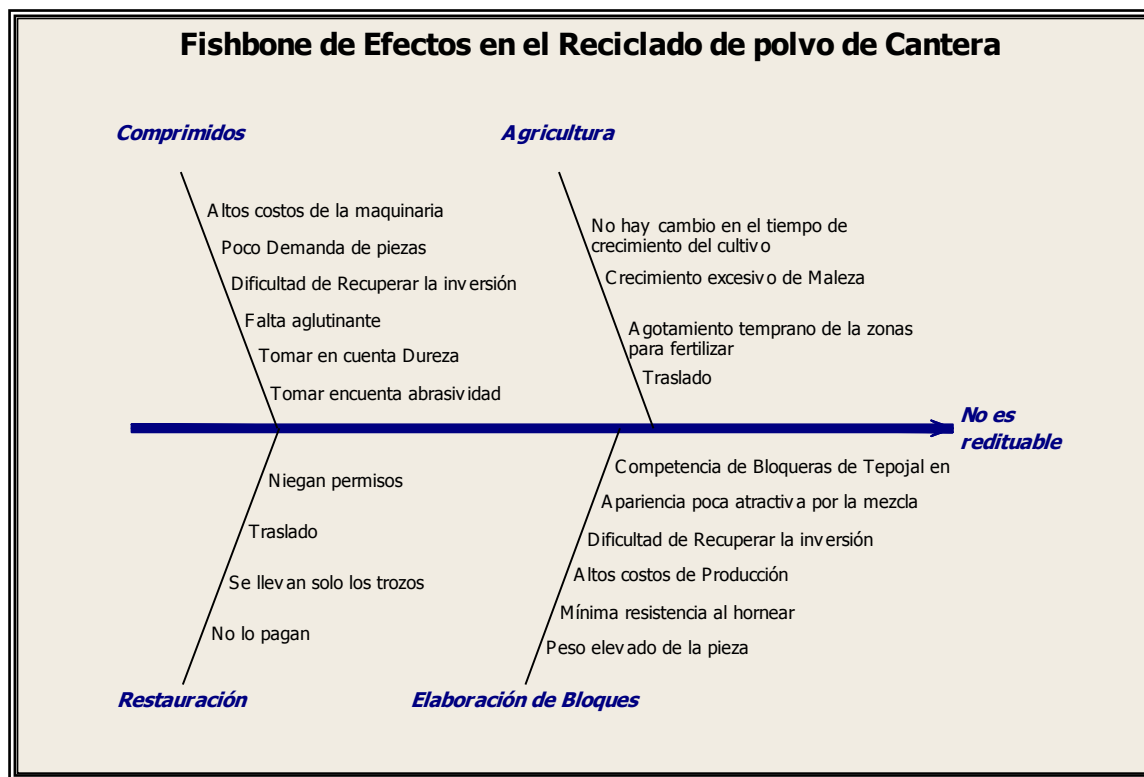


Figura IV- 12 Diagrama de Causa-Efecto

Los datos en el diagrama indican cuatro destinos hacia los que se han dirigido los polvos para un uso; en cuanto a los materiales comprimidos se hacía énfasis en la presencia de un aglutinante que favorezca el proceso, y reducir los costos de producción.

En otro punto, cuando han destinado el material en los terrenos de cultivo, observan crecimiento excesivo de maleza junto con el producto de interés, aunado a que esta solución no es muy factible ya que en comparación con la cantidad de residuo generado, los terrenos disponibles no cubrirían la demanda.

En la elaboración de bloques de alta densidad, se involucra un alto costo de producción, y por ende altos precios de comercialización del producto, por lo que la mayoría de los clientes prefieren los bloques de tepojal que hay en la región y que son más baratos. En este punto se indicó que al intentar fabricar ladrillo, el

material no resistió el proceso de horneado, ya que no se incorporaba la mezcla como el proceso lo requiere.

Ya se han emprendido acciones en torno a la restauración de terrenos, sin embargo los clientes no siempre quieren pagar el material, o prefieren trozos de desperdicio en lugar de polvo, no se cuenta con recurso para el traslado del residuo y en ocasiones se ha negado el permiso para depositarlos en algunos terrenos.

Tras analizar esta información, con los datos obtenidos de DRX y FRX sobre el contenido elemental de los polvos y la información bibliográfica presentada, se observada un punto importante que identifica una causa de la problemática, los polvos muestran un porcentaje cercano al 76% en peso de SiO_2 , mientras que de CaO solo un 2.4, entre otros compuestos, para el caso de la fertilidad de suelos, la concentración elevada de SiO_2 no lo favorece por sí solo.

En el caso de los bloques, el material que se utiliza en mayor concentración es CaO , lo que en nuestros polvos no se encuentra en esta cantidad.

Se ha utilizado el residuo sin conocer con exactitud el contenido de minerales lo cual los ha llevado a aplicarlo de manera inadecuada.

Hay dos consideraciones en este aspecto:

1. El residuo se puede adecuar combinándolo en ciertas proporciones con otros materiales para lograr los resultados esperados.
2. El residuo se puede emplear considerando el componente o componentes de mayor concentración existente en su estructura y su granulometría.

En ambos casos se debe considerar que no se encuentra en forma pura y que se debe combinar con otros compuestos en las proporciones necesarias para obtener el producto esperado.

IV.2.3 Estratificación

De la información bibliográfica recopilada en este documento, se realizó una estratificación para localizar las mejores acciones en la disposición de los residuos. La Figura IV-13 muestra las diferentes opciones existentes en este ámbito.

Se observa que existe una fuerte relación entre la protección ambiental y el potencial económico deseado.

Por un lado se desea aplicar los residuos para evitar otros problemas de mayor efecto, y de no encontrarse esta utilidad se recomienda utilizarlos para reestructurar las zonas explotas así como otros terrenos.

De esta estratificación se puede observar que no se puede aplicar el residuo tal y como se ha hecho con los residuos del mármol, si se compara la Tabla II-2 contra la IV-3, existe una gran diferencia en el contenido de CaO el cual es el principal participante en las aplicaciones para el caso del mármol.

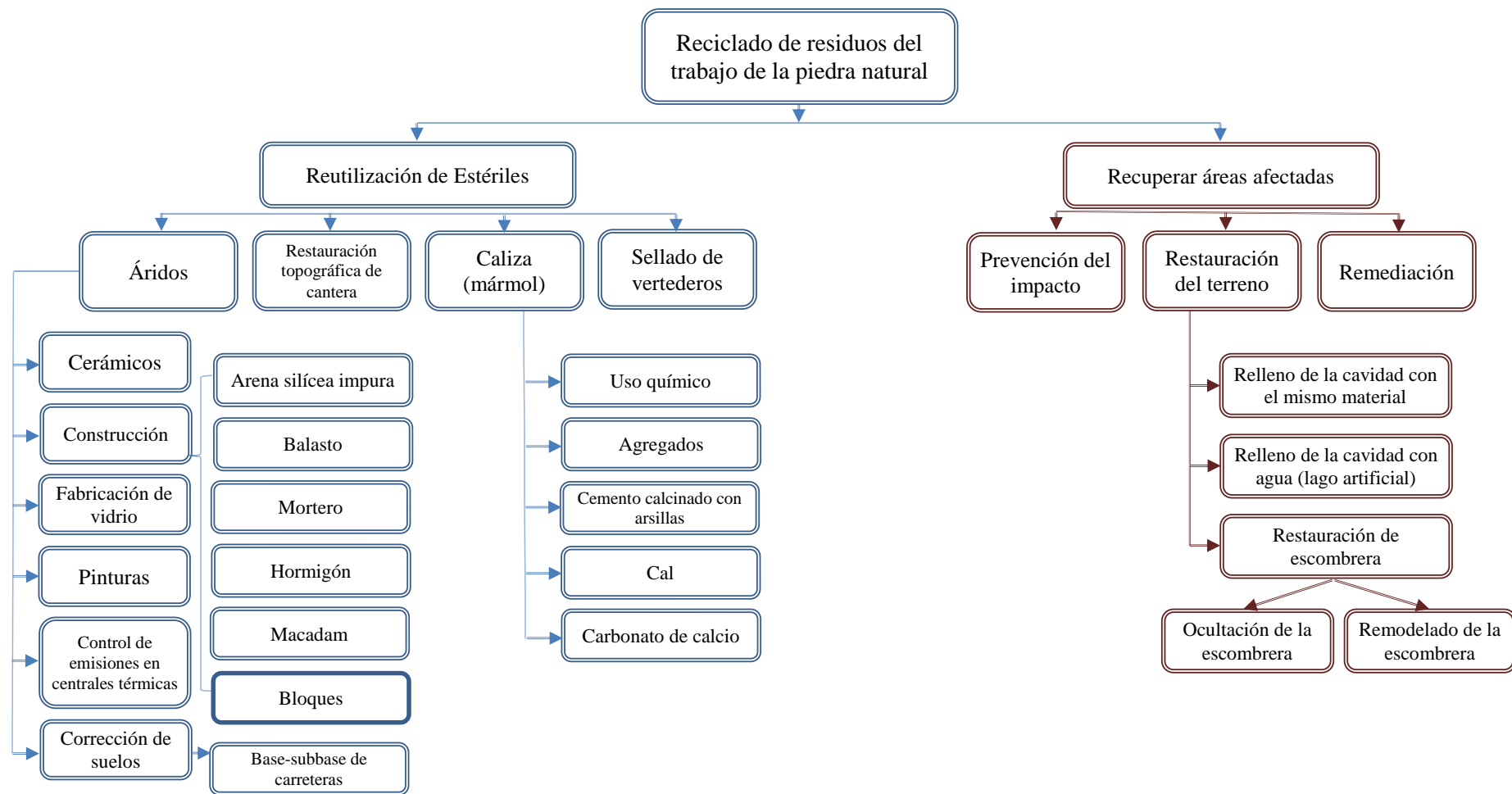


Figura IV- 13 Estratificación de la aplicación de los residuos

III.2.4 Despliegue de Función de la Calidad (QFD)

Considerando como voz del cliente a los canteros, el diseño de la casa de la calidad se basó en los requerimiento de éstos para la disposición de sus polvos, se elaboró con una muestra de catorce la lista de las principales características que desean de un posible producto a base de sus polvos, cada uno asignó un nivel de grado de importancia (0,1,3,5) de menor a mayor, posteriormente como características de calidad se enlistaron las aplicaciones de los residuos existentes en este documento, que se encuentran estratificadas, y se relacionaron con la siguiente numeración: 0,1,3,5, de menor a mayor relación entre la demanda del cliente y la aplicación del residuo, con esto fue posible descartar los usos que no corresponden a las características según FRX de los polvos y la granulometría, y considerar cual característica es la de mayor importancia para la aplicación.

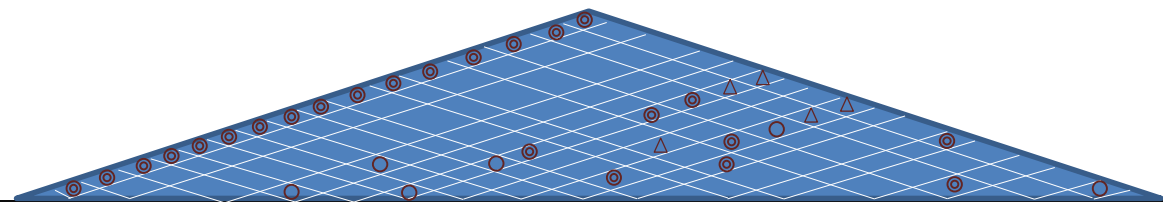
Para identificar cuál de las opciones mostradas en la estratificación realizada es la más viable a las condiciones de las empresas y el aspecto del residuo, se contó con la Figura IV-14, esta matriz de relación entre las requerimientos de los canteros y las posibles aplicaciones conforme al tipo de compuestos en los residuos reveló que se pueden considerar las siguientes opciones por grado de relación:

1. Restauración topográfica de cantera
2. Pinturas
3. Hormigón
4. Restauración de escombrera
5. Fabricación de vidrio
6. Plásticos
7. Base-subbase de carreteras
8. Mortero
9. Relleno de cavidad
10. Arena silíceo

11. Control de emisión en centrales térmicas

Dentro de las que se pueden descartar por la poca relación existente en orden de prioridad:

1. Balasto
2. Caliza
3. Ladrillo
4. Bloques de alta densidad
5. Macadam
6. Cerámicos



CTQ	DOI	Arena silícea	Pinturas	Control de emisiones en centrales térmicas	Fabricación de Vidrio	Plásticos	Hormigón	Mortero	Cerámicos	Balasto	Macadam	Base-Subbase de Carreteras	Caliza	Restauración Topográfica de Cantera	Relleno de Cavidad	Restauración de Escombrera	Ladrillo	Bloque de Alta densidad	Peso de la calidad (y)	Peso de la calidad normalizado	sales point
Redituable	66	3	3	3	3	3	3	1	1	0	1	3	0	5	1	1	0	0	2046	8.01	3
Adecuado a la composición química	55	5	5	5	5	5	3	3	3	0	3	5	0	5	3	5	1	3	3245	12.70	5
Adecuado a la granulometría.	70	3	3	3	3	3	5	5	3	0	5	5	0	5	5	5	1	1	3850	15.07	5
Costos de inversión accesibles	56	5	3	3	3	3	5	5	3	0	3	3	0	3	3	3	0	0	2520	9.86	3
Atractivo	46	1	3	1	5	5	3	3	3	0	1	1	3	5	3	3	3	3	2116	8.28	3
Resistente	45	3	3	3	5	3	1	1	1	1	1	1	0	3	3	3	0	0	1440	5.64	1
No genere residuos en exceso	43	1	5	1	3	3	5	5	3	1	1	5	0	3	5	5	3	3	2236	8.75	3
Beneficio Ecológico	52	3	3	5	3	3	3	3	3	0	3	5	0	1	5	5	0	0	2340	9.16	3
Confiable en apariencia	42	3	3	3	5	3	3	3	3	0	3	3	0	3	3	3	0	0	1722	6.74	1
Aplicación en el área de la construcción	49	5	5	1	1	3	5	5	5	5	5	3	5	3	1	1	5	5	3087	12.08	5
Novedoso	35	1	3	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1	945	3.70	1
		1749	1971	1615	1885	1879	1953	1821	1483	368	1445	1865	418	1977	1777	1887	672	782	25547	100	
		Peso de la Característica																			

Figura IV- 14 QFD

El análisis granulométrico y la determinación de los límites líquido y plástico realizados a las muestras, proporcionó el siguiente resultado:

Identificación de campo: Material con baja tenacidad nula y dilatancia lenta, presenta muy baja resistencia en estado seco. No se percibe olor. El color del material se observa en tonos claros del café al blanco

Clasificación SUCS

Observaciones:

Suelo limoso o polvo de roca con poco contenido de arcilla inorgánica ligeramente plástica, por debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad, de baja plasticidad con alto contenido de finos. Más del 90% del material pasa la malla 200. LL de 24.98, LP de 21.25 e IP = 0.4 en promedio.

Clasificación: ML Limo inorgánico de baja compresibilidad.

Con estos resultados se establece entre otros aspectos, que el residuo tiene un mejor comportamiento químico que mecánico.

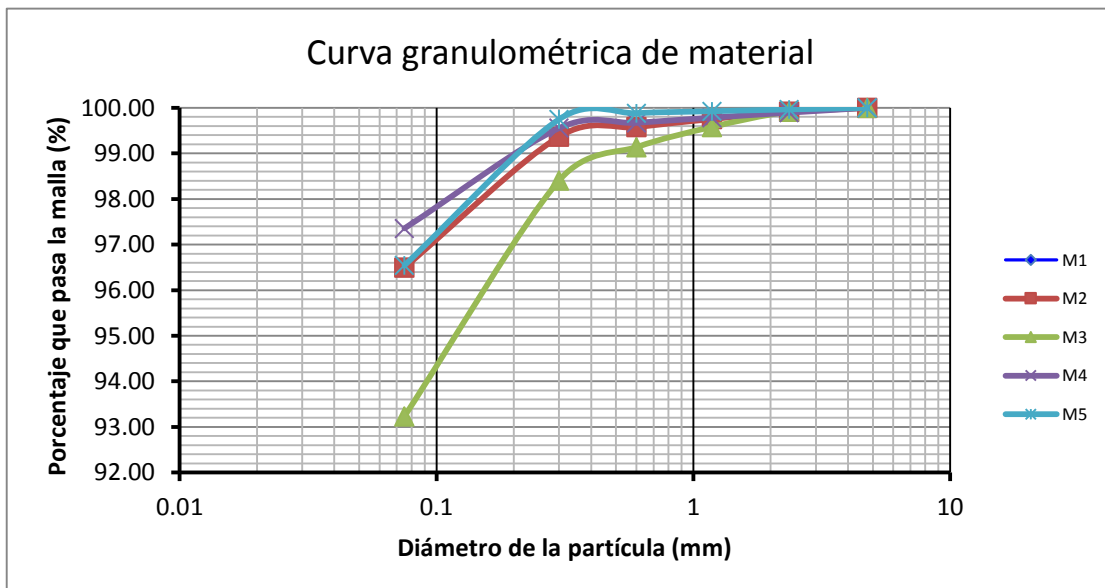


Figura IV- 15 Curvas Granulométricas

Tabla IV- 3 Descripción: Determinación de límites líquido y plástico a suelo fino mediante copa de casa grande

Muestra	Tara	Tara + suelo húmedo	Tara + Suelo seco	Peso del agua	Peso del suelo seco	Contenido de agua	Promedio
	g	g	g	g	g	%	%
Límite Líquido LL							
4	121.12	153.7	146.35	7.35	25.23	29.132	
3	126.55	146.18	142.54	3.64	15.99	22.764	
2	126.55	148.93	144.74	4.19	18.19	23.035	
						LL	24.977
Limite plástico LP							
	121.39	121.96	121.87	0.09	0.48	18.750	
	130.15	130.86	130.73	0.13	0.58	22.414	
	121.49	122.63	122.42	0.21	0.93	22.581	
							LP
Índice de plasticidad IP							
		IP					
		10.38					
		0.35					
		0.45					
						IP	0.40

Tras analizar cada una de las diez muestras por el método de análisis estructural de difracción de polvo, en el DRX, con la finalidad de identificar los minerales presentes por su estructura cristalina, se obtuvieron los siguientes difractogramas, los cuales permitirán, según el método, indirectamente estimar la composición de las muestras.

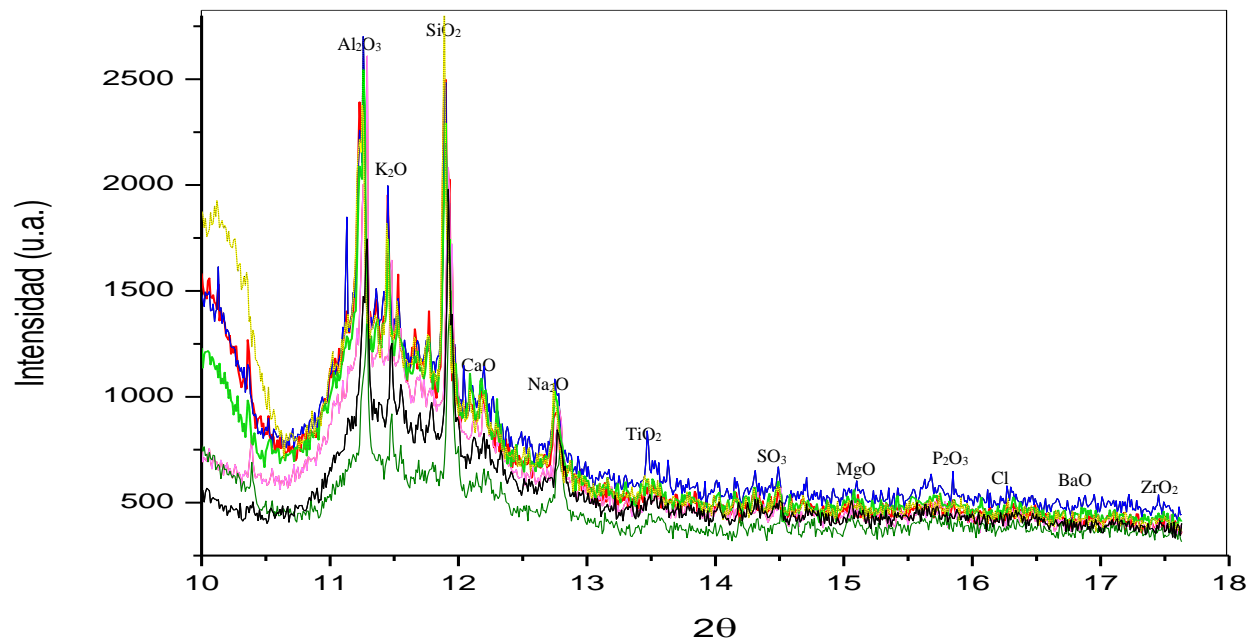


Figura IV- 16 Difractograma Combinado de las 10 muestras

En la figura IV-15, se muestra el difractograma de cada una de las 10 muestras, los máximos de difracción indican prioritariamente la presencia de SiO₂, característico del tipo de roca, se puede observar por la posición de los picos que la composición de las muestras analizadas coinciden entre las 10 muestras en el contenido de elementos mayoritarios, lo que indica que el lote de residuos es aproximadamente homogéneo en contenido de sustancias.

Los resultados del contenido de elementos presentes en las muestras analizadas por FRX se muestran en la siguiente tabla

Tabla IV- 4 Media de la concentración en % de compuestos en las muestras de polvos de Canteras Jaramillo

Fracción masa % (w/w)	
Compuestos	Media de las muestras
SiO ₂	75.9579
Al ₂ O ₃	10.7956
K ₂ O	8.5099
CaO	2.4279
Na ₂ O	0.9631
TiO ₂	0.4791
SO ₃	0.323
MgO	0.1486
Cl	0.1144
P ₂ O ₃	0.0567
BaO	0.0541
ZrO ₂	0.0536
Rb ₂ O	0.0307
ZnO	0.0256
SrO	0.0209
Y ₂ O ₃	0.0172
CeO ₂	0.0169
Ga ₂ O ₃	0.0023
Nb ₂ O ₃	0.0021
MnO	0
Fe ₂ O ₃	0
CuO	0

Para analizar si estos promedios se pueden considerar como distribuidos en el lote se realizó un prueba de normalidad, los resultados obtenidos se muestran en la tabla IV-3

Tabla IV- 5 Resultados de Prueba de Normalidad a los Datos

Análisis Estadístico de los Datos			
Compuestos	Media de las muestras	Desv. Est.	Valor P
SiO ₂	75.9579	0.8163	0.533
Al ₂ O ₃	10.7956	0.422	0.247
K ₂ O	8.5099	0.2117	0.789
CaO	2.4279	0.3199	0.042
Na ₂ O	0.9631	0.04001	0.223
TiO ₂	0.4791	0.07207	0.744
SO ₃	0.323	0.3686	0.045
MgO	0.1486	0.04308	0.519
Cl	0.1144	0.01002	0.3
P ₂ O ₃	0.0567	0.01751	0.711
BaO	0.0541	0.01995	0.005
ZrO ₂	0.0536	0.0054	0.449
Rb ₂ O	0.0307	0.001418	0.113
ZnO	0.0256	0.002757	0.024
SrO	0.0209	0.003635	0.863
Y ₂ O ₃	0.0172	0.006161	0.005
CeO ₂	0.0169	0.03585	0.005
Ga ₂ O ₃	0.0023	0.003713	0.005
Nb ₂ O ₃	0.0021	0.002234	0.005

Los datos sombreados son los que indican mucha dispersión en el lote, por lo que no pueden ser considerados como componentes prioritarios en la aplicación de todo el lote de residuo, por lo tanto los compuestos que aportan características para las aplicaciones son SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O.

Con base en los resultados se realizó una investigación bibliográfica sobre las aplicaciones del SiO₂, que también se pueden sugerir en esta investigación y que se muestran en las siguientes tablas:

Tabla IV- 6 Componentes y aplicaciones de Tipos de Vidrio (Brown, 1993)

Tipos de vidrio	Composición en peso	Propiedades y usos
Sosa-Cal	76% SiO ₂ 12% Na ₂ O 12% CaO	Vidrios para ventanas botellas.
Aluminosilicatos	55% Si ₂ O 20% Al ₂ O ₃ 10% MgO 10% CaO 5% B ₂ O ₃	Alto punto de fusión; empleado para utensilios de cocina.
Plomo álcali	70%Si ₂ O 20% PbO 10% Na ₂ O	Alto índice de refracción; empleado en lentes, vidrios decorativos.
Borosilicato	76%Si ₂ O 16% B ₂ O ₃ 5% Na ₂ O 3% CaO	Bajo coeficiente de expansión térmica; empleado en cristalería para laboratorio, utensilios de cocina.
Biovidrio	46%Si ₂ O 24% Na ₂ O 24% CaO 6% P ₂ O ₅	Compatible con los huesos; empleado como recubrimiento en implantes quirúrgicos.

La composición del lote de polvos se asemeja más a la composición que contienen los Aluminosilicatos.

Tabla IV- 7 Aplicaciones de SiO₂ (Levien, 1981)

No.	Aplicación	Observaciones
1	Adhesivos	Dichos adhesivos estructurales permitirán la unión de distintos materiales como el acero, el aluminio, el magnesio y el plástico, El dióxido de silicio no sólo mejora las propiedades mecánicas y reológicas, sino que también actúa como contraria a la solución de los agentes que mejoran la estabilidad de almacenamiento y procesamiento de los adhesivos y selladores.
2	industria alimenticia	La adición del dióxido de silicio ayuda a evitar la aglomeración de manera eficiente, permitiendo a los productores de polvos ofrecer permanentemente un producto de alta calidad en todo el mundo, por lo anterior, los productos alimenticios tratados con dióxido de silicio muestran estabilidad y largo almacenamiento.
3	industria farmacéutica	. La mejoría de las propiedades de flujo de los materiales necesarios para la moderna fabricación de tabletas y capsulas son nada más un ejemplo de las ventajas obtenidas por el uso del dióxido de silicio.
4	Pinturas y tintas	El dióxido de silicio se utiliza principalmente en las pinturas y recubrimientos para control de las características reológicas, como agente tixotrópico, como contraria a la solución de agente y para ayudar en la prevención de la oxidación y la corrosión, estos productos deben añadirse en las concentraciones de 0.5% - 2%.
5	Vidrio, cerámicas y cemento	También en cinta adhesivas de colores.
6	Gel de sílice	Es un desecante, es decir que quita la humedad del lugar en que se encuentra.
7	Aparatos ópticos, electrónicos	
8	Fibras ópticas	Compuesto de sílice de alta pureza
9	Malla de fibra de sílice.	Para el aislamiento térmico
10	Arena de cuarzo (sílice).	Como materia prima principal para la producción de vidrio comercial

En la tabla IV-5 se presentan diversas aplicaciones del SiO₂, que pueden ser consideradas si se desea emprender un tipo específico de mercado, según las necesidades y expectativas de la empresa.

En la tabla IV-7 se presentan productos elaborados para el área de la construcción, a partir de la adición en diferentes proporciones del residuo con otros compuestos.

Tabla IV- 8 Áridos como parte de materia prima en diferentes materiales (Castells, 2000)

Cemento	Hormigón	Mortero	Macadam
<p>Mezcla de caliza (marga y/o arcilla) Cocción a elevada temperatura: clinker Molienda del clinker Adiciones (yeso, cenizas, escorias...)</p>	<p>75% de áridos 11% de cemento 14% de agua potable Aditivos químicos: plastificantes, acelerantes, retardantes, oclusores de aire.</p>	<p>• Mezcla de áridos, cemento y agua, en distintas proporciones</p>	<p>Roca machacada y empaquetada mecánicamente por medio de apisonadoras, unidas mediante piedra fina y agua. El macadam bituminoso está unido por ligante bituminoso.</p> <p>Ligante Cualquier agente cementante de suelos o áridos: agua, arcilla, cemento, cal, bitumen, resinas sintéticas.</p>

Tabla IV- 9 Destino y consumo de materiales a base de áridos (Castells, 2000)

Destino y consumo	
Hormigón preparado	27.5%
Hormigón en obra	14.5%
Prefabricados	12.9%
Morteros	27.1%
Carreteras, balastos	18%

CONCLUSIONES

El implementar estas técnicas de calidad, resolvió atacar la falta de información y efectos no redituables; causas principales que resultan en el problema de la disposición de polvos en la zona canterera de Huichapan Hgo., permitió además identificar las áreas de oportunidad, plasmadas en la estratificación. Como herramientas de planeación, generaron una imagen del conocimiento colectivo y del nivel de conciencia del grupo de canteros de la región, al crear un consenso sobre las causas raíz y al sustentar las soluciones resultantes de la relación entre la voz del cliente (canteros) con los requerimientos que la satisfacen (características fisicoquímicas de los polvos) derivadas en esta investigación. Por lo tanto la hipótesis planteada, se acepta.

La toma de muestras para el análisis de los residuos, se cumplió al 100% sin incidentes relevantes, contando con la disposición y apoyo de personal de la empresa.

El equipo y material utilizados en la caracterización química y mineralógicamente de los residuos, resultaron suficientes y adecuados para culminar satisfactoriamente este objetivo.

Las opciones que de modo sustentable, propician la mejor disposición de los residuos de explotación de *Ignimbrita riolítica* en Huichapan Hidalgo, México, se enuncian y sustentan en las siguientes conclusiones:

El material de desecho muestra un porcentaje de 76% en peso de SiO₂, Dióxido de Silicio, normalmente distribuido en el lote.

En porcentaje de solo el 2.4% se encontró CaO, con base en los resultados de prueba de normalidad, existe dispersión en las muestras.

Con base en los resultados del análisis de la gráfica de Pareto, se observa que dentro de las causas más frecuentes han impedido a la industria de la cantera dar disposición sustentable a los polvos se encuentran en orden de frecuencia: La falta de información (la cual se solventa con la presente investigación) y no resultar redituables las acciones emprendidas

El diagrama de Ishikawa revela que los efectos en el resultado de no ser redituable, en este caso la elaboración de bloques y ladrillos, radican en el empleo equivocado del residuo para el fin esperado, ya que la elaboración de estos productos se logra con altas concentraciones de CaO, lo que los polvos no contienen en esta proporción.

Existen aplicaciones como por ejemplo fabricación de vidrio, restauración de canteras, pinturas, etc. que se adecuan más por el contenido de Dióxido de silicio presente, entre otras que muestran la estratificación y el QFD.

No resulta adecuado emprender acciones similares a las de la industria del mármol, ya que en comparación con nuestros polvos, sus residuos contienen CaO en concentraciones elevadas.

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos, se observa que la mejor aplicación para los lodos generados tras el corte y laminado de la Ignimbrita Riolítica es la restauración de canteras, fabricación de vidrio, pinturas o plásticos, Ya que contienen SiO_2 en mayor cantidad.

No considerar el residuo como componente puro para materia prima en la elaboración de un producto, contemplar que deberá adecuarse para mejores resultados agregando otros componentes.

Para la elaboración de cualquier producto, tener en cuenta que las proporciones en las que se mezclen los compuestos cambia los resultados.

Tomar decisiones que favorezcan al medio ambiente.

Haciendo referencia al trabajo de investigación del Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, *PIEDRA PÓMEZ-CEMENTO PORTLAND*, en donde la piedra contiene alta contenido de SiO_2 , su trabajo determinó que la mezcla de cemento+pómez presenta un mejor comportamiento mecánico que los arrojados por un cemento Portland, con ello, se tienen las pruebas convincentes de que este material dará buenos resultados en su aplicación en la industria de la construcción. Otra gran ventaja es que por cada kilo de material se utiliza solamente el 60% de cemento Portland, lo que implica un ahorro económico y una disminución de la contaminación ambiental debido a que disminuiría el volumen de la fabricación del cemento Portland. (cita: dato pendiente)

Hacer un consenso entre las partes involucradas para encontrar la mejor aplicación y solución de la problemática.

LITERATURA CITADA

- Álvarez, M., Torres G. A. y Luis, C. «Síntesis y Caracterización de Vitrocerámicos a partir de residuos sólidos inorgánicos industriales.» *Ciencia UANL*, 2006: 143-148.
- Brown, P.J., Forsyth J.B. *The Crystal Structure of solids*. R. Coles: Bryan, 1973.
- Brown, Theodore L, Eugene Le May H, y Bruce E Bursten. «Química la Ciencia central.» En *Química La ciencia central*, 958. México: Prentice-Hall, 1993.
- Caldwell, J.A., Welsh, J.D. *Tailings Disposal in rugged, high precipitation environments: an overview and comparative assessment*. Marine Tailings disposal-Ann Arbor Science, 1982.
- Carvalho, J. H. «Decision criteria for the exploration of ornamental stone deposits: Application to the marbles of the Portuguese Estremoz Anticline.» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008: 1306-1319.
- Castells, Diaz de Santos. «Reciclaje de Residuos Industriales.» España, 2000.
- CFE. «Comisión Federal de Electricidad.» *Manual de diseño de obras civiles. Geotecnia. B2.2. Propiedades físicas y mecánicas de los suelos*. México, D.F: Instituto de Investigaciones Electricas, 1983.
- Evans, R James. *The Magnament and Control of Quality*. Thompson, 2005.
- Evans, R James, y M William Lindsay. *Administración y Control de la Calidad*. Thomson, 2005.
- Gutiérrez, Pulido Humberto. *Control Estadístico de calidad y Seis Sigma*. México: Mc Graw-Hill, 2004.
- IFOMEGEM. *Anuario estadístico de la minería en el Estado de México*. Edición 2006, Estado de México: Instituto de fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México, 2005.
- ITGE. «Contaminación y Depuración de suelos.» *Publicaciones del ITGE*. España, 1995.

- «Criterios geoambientales para la restauración de canteras, graveras y explotación a cielo abierto en la Comunidad de Madrid.» *Instituto Geológico y Minero de España*. 1987.
- «Minería y Medio Ambiente.» *Instituto Geológico y Minero de España*. España, 1988.

James, R.E., Lindsay W.M. *Administración y control de calidad*. Thomson, 2005.

Jaramillo, Miguel A. «canterasjaramillo.com.» 03 de Agosto de 2004. [Http://canterasjaramillo.com/yacimientos.html](http://canterasjaramillo.com/yacimientos.html) (último acceso: 29 de Noviembre de 2011).

Kelly, E.G., Spottiswod, D.J. *Introducción al Procesamiento de Minerales*. Limusa, 1990.

Levien, L, y C T Prewitt. «High-pressure crystal atructure and compressibility of coesite.» *American Mineralogist*, 1981: 324.

LGPGIR. «Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.» *Diario Ofical de la Federación*. México: Cámara de Diputados del H. consejo de la Unión, 08 de Octubre de 2003.

López, Gonzalez-Mesones Fernando. *La Piedra Natural. El recorrido de los minerales*. Madrid: Dirección General de Industria, Energía y Minas. Consejería de Economía e Innovación Tecnológica, 2007.

Melgarejo, Juan Carles, Joaquín A Proenzal, Salvador Galíl, y Salvador Llovet. «Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera.» *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, 2010: Volúmen 62.

Ministro federal de Cooperación económica y desarrollo. *Diagnóstico básico de residuos de la construcción del Estado de México*. Programa de cooperación técnica de México-Alemania. Gestión ambiental y manejo sustentable de recursos naturales., Estado de México: Secretaría del Medio Ambiente. Dirección General de prevención y control de la contaminación del agua, suelo y residuos, 2007.

MINITAB. *Glosario Electrónico de MINITAB 16*. 16.

Montgomery, D.C. *Desing and Analysis of Experimentos*. John Wiley, 2001.

Moreno, R. «Caracterización mineralógica y Química de desechos mineros (jales) aplicada a la recuperación de valores económicos en Zimapán y Pachuca, Edo. de Hidalgo.» *Instituto Politécnico Nacional, México.*, 1998: 89.

- Normativa SCT. «M-MMP-1-06/03.» *Métodos de muestreo y prueba de materiales. suelos y materiales para terracería. Granulometría de materiales compactables para terracerías.* 2003.
- Pardo, F.B. «Restauración Edáfica y Vegetal de una Cantera: Nociones para minimizar el cambio climático.» *REDISA*, 2010.
- PINACAL. *Planes de Competitividad, Innovación y Entorno.* Valladolid: Unión Europea, 2007.
- Pita, Fernández S. *Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística.* Complejo Hospitalario Universitario de A. Coruña, CAD ATEN PRIMARIA, 1996.
- Sanchez, P. «Propuesta de implementación de un sistema de adquisiciones para la industria canterera de la región de Huichapan.» Huichapan, Hidalgo, México, 2005.
- Solís, A. *Explotación de Cantera de Piedra Caliza.* Mexico, D.F.: México, 1995.
- UNEP. «Environmental and Safety Incidents Concerning Tailing Dams at Mines mining.» *Journal Research Services*, 1996.
- Vadillo Fernandez, L, C López Jimeno, J González Cañibano, A González Santos, E Navarro Moreno, y A Vazquez García. «Manual de reutilización de residuos de la Industria Minera, Siderometalurgica y Termoeléctrica.» *Ingeniería Geoambiental.* ITGME, 1995.
- Wiebe, A. Henry. «Quality Function Deployment: A tool for Packaging Design.» *Packaging Technology & Engineering Vol. 7*, 1998.
- Zárraga, R., Cervantes, J., Álvarez, D., Reyez, V. y Salzar M. «La Investigación Científica en la Conservación de Monumentos de Cantera.» *Acta Universitaria*, 2006: 38-50.

APÉNDICE

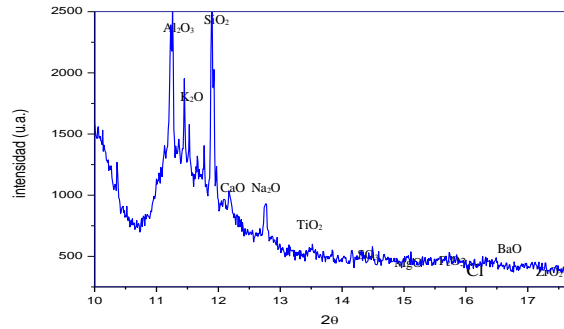


Figura A- 1 Difractograma de la muestra 1a

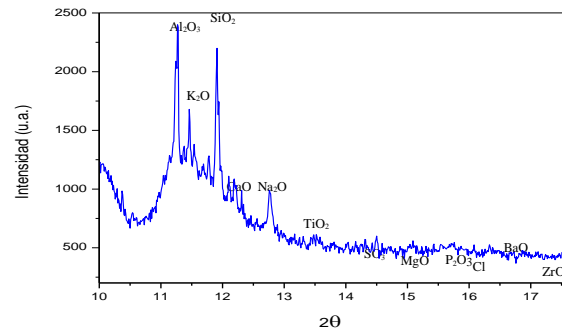


Figura A- 2 Difractograma de la muestra 1b

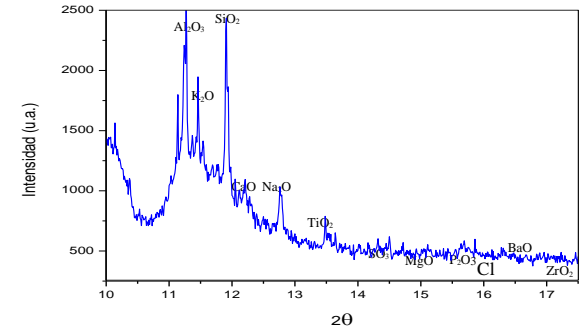


Figura A- 3 Difractograma de la muestra 1c

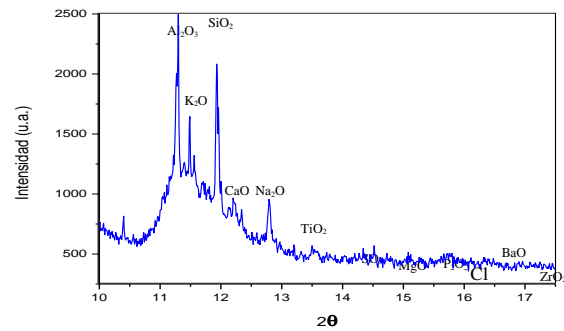


Figura A- 4 Difractograma de la muestra 1d

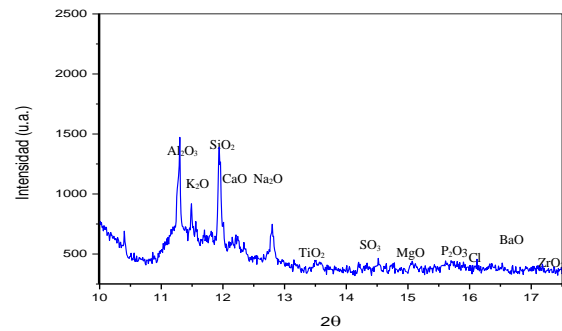


Figura A- 5 Difractograma de la muestra 2a

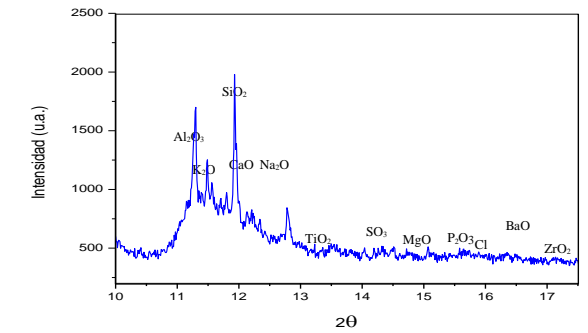


Figura A- 6 Difractograma de la muestra 2b

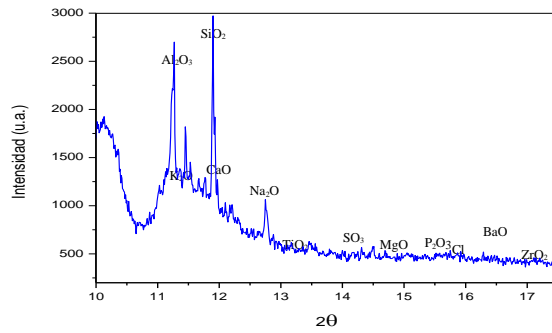


Figura A- 7 Difractograma de la muestra 2c

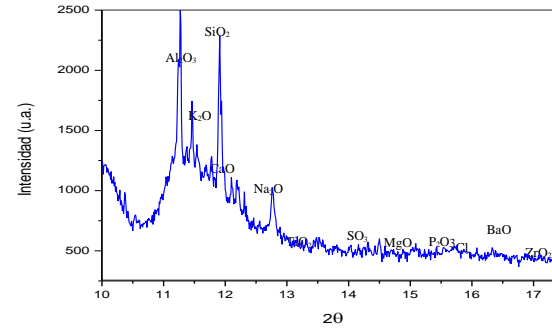


Figura A- 8 Difractograma de la muestra 3a

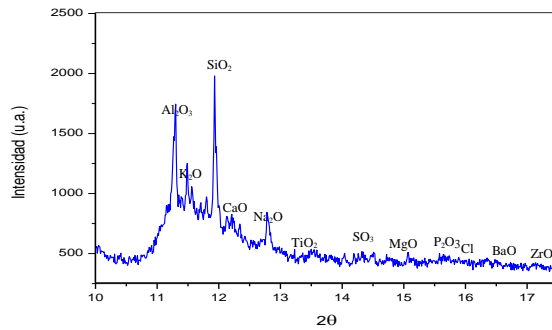


Figura A- 9 Difractograma de la muestra 3b

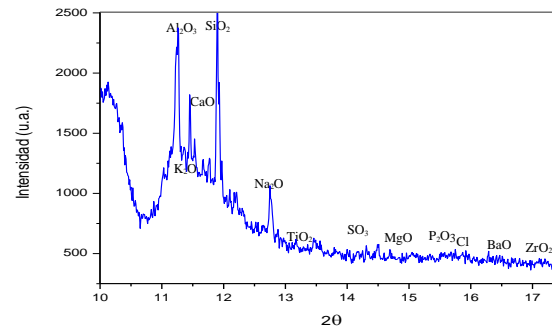


Figura A- 10 Difractograma de la muestra 3c

Tabla 1 Concentración en % de los compuestos presentes en los polvos (CENAM, 2012)

Compuestos	Fracción masa (% w/w)										Media de las muestras
	1a	1b	1c	1d	2a	2b	2c	3a	3b	3c	
SiO ₂	77.116	75.485	77.207	74.746	75.891	75.239	76.538	75.562	75.461	76.334	75.958
Al ₂ O ₃	10.432	10.673	9.883	10.915	10.903	11.46	10.961	11.115	10.92	10.694	10.796
K ₂ O	8.587	8.526	8.624	8.492	8.937	8.353	8.426	8.369	8.66	8.125	8.5099
CaO	2.031	2.675	1.985	2.735	2.217	2.777	2.048	2.534	2.615	2.662	2.4279
Na ₂ O	0.946	0.939	0.896	0.95	0.937	1.011	0.993	1.023	0.994	0.942	0.9631
TiO ₂	0.361	0.461	0.384	0.459	0.497	0.6	0.46	0.552	0.527	0.49	0.4791
SO ₃	0	0.744	0.575	1.102	0.058	0.057	0	0.229	0.244	0.221	0.323
MgO	0.151	0.117	0.084	0.141	0.198	0.158	0.108	0.21	0.2	0.119	0.1486
Cl	0.125	0.118	0.126	0.107	0.097	0.107	0.121	0.125	0.106	0.112	0.1144
P ₂ O ₃	0.034	0.051	0.032	0.054	0.055	0.089	0.046	0.068	0.07	0.068	0.0567
BaO	0.067	0.059	0.052	0.056	0.056	0	0.073	0.059	0.057	0.062	0.0541
ZrO ₂	0.057	0.052	0.059	0.053	0.054	0.042	0.049	0.052	0.058	0.06	0.0536
Rb ₂ O	0.032	0.032	0.031	0.03	0.032	0.028	0.031	0.029	0.032	0.03	0.0307
ZnO	0.023	0.025	0.022	0.025	0.025	0.026	0.028	0.025	0.025	0.032	0.0256
SrO	0.016	0.02	0.017	0.022	0.019	0.028	0.018	0.022	0.024	0.023	0.0209
Y ₂ O ₃	0.022	0.019	0.019	0.019	0.019	0.018	0.018	0.018	0	0.02	0.0172
CeO ₂	0	0	0	0.093	0	0	0.076	0	0	0	0.0169
Ga ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0.008	0	0.007	0	0.008	0.0023
Nb ₂ O ₃	0	0.004	0.004	0	0.004	0	0.004	0	0.005	0	0.0021
MnO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CuO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3 Resultados del análisis de granulometría

		Muestra 1					Muestra 2				
Malla		Masa retenida	Retenido parcial	Retenido acumulado	Pasa	Material que pasa	Masa retenida	Retenido parcial	Retenido acumulado	Pasa	Material que pasa
N° / plg.	mm	(g)	(%)	(g)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(g)	(%)
1	25.4										
3/4	19										
1/2	12.5										
3/8	9.5										
4	4.75	0	0.00	0	341.46	100.00	0	0.00	0	439.64	100.00
8	2.36	0.13	0.04	0.13	341.33	99.96	0.38	0.09	0.38	439.26	99.91
16	1.18	0.57	0.17	0.7	340.76	99.79	0.7	0.16	1.08	438.56	99.75
30	0.6	0.74	0.22	1.44	340.02	99.58	0.78	0.18	1.86	437.78	99.58
50	0.3	0.97	0.28	2.41	339.05	99.29	0.92	0.21	2.78	436.86	99.37
200	0.075	17.87	5.23	20.28	321.18	94.06	12.62	2.87	15.4	424.24	96.50
Pasa 200		321.18	94.06	341.46	0.00	0.00	424.24	96.50	439.64	0.00	0.00
Suma	g	341.46					439.64				
	%		100.00					100.00			

Muestra 3					Muestra 4					Muestra 5				
Masa retenida	Retenido parcial	Retenido acumulad	Pasa	Material que pasa	Masa retenida	Retenido parcial	Retenido acumulad	Pasa	Material que pasa	Masa retenida	Retenido parcial	Retenido acumulad	Pasa	Material que pasa
(g)	(%)	(g)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(g)	(%)
0	0.00	0	338.10	100.00	0	0.00	0	456.82	100.00	0	0.00	0	615.11	100.00
0.29	0.09	0.29	337.81	99.91	0.48	0.11	0.48	456.34	99.89	0.21	0.03	0.21	614.90	99.97
1.13	0.33	1.42	336.68	99.58	0.5	0.11	0.98	455.84	99.79	0.25	0.04	0.46	614.65	99.93
1.5	0.44	2.92	335.18	99.14	0.52	0.11	1.5	455.32	99.67	0.26	0.04	0.72	614.39	99.88
2.47	0.73	5.39	332.71	98.41	0.53	0.12	2.03	454.79	99.56	0.82	0.13	1.54	613.57	99.75
17.49	5.17	22.88	315.22	93.23	10.05	2.20	12.08	444.74	97.36	19.72	3.21	21.26	593.85	96.54
315.22	93.23	338.1	0.00	0.00	444.74	97.36	456.82	0.00	0.00	593.85	96.54	615.11	0.00	0.00
Suma		338.1			456.82					615.11				
		100.00			100.00					100.00				