



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"SIMULACION DEL PROCESO DE ELABORACION DE CEMENTO TOLTECA, PLANTA ATOTONILCO"

T E S I S
PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA :
JOSE PABLO CHAVEZ ZUÑIGA



MEXICO, D. F.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1994



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Prof. Carlos Escobar Toledo  
**Vocal:** Prof. Manuel Vazques Islas  
**Secretario:** Prof. Celestino Montiel Maldonado  
**1er. Suplente:** Prof. Sergio Trejo Martínez  
**2do. Suplente:** Prof. Manuel Jesus Aguilar Gómez



**SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:**

- Laboratorio de Simulación y Optimización de Procesos del Departamento de Ingeniería Química, Edificio "E", Facultad de Química, UNAM.
- Cementos Tolteca S.A. de C.V., Planta Atotonilco.

**Asesor del Tema:**



---

In~~e~~ Celestino Montiel Maldonado

**Sustentante:**



---

José Pablo Chávez Zúñiga

*A mis padres:*

*Por que siempre me apoyaron y me orientaron confiando en mí, por que significan una parte fundamental de éste logro y por que me han inculcado en todo momento un deseo de superación y amor a la vida además de ser un digno ejemplo a seguir.*

*Con cariño, respeto y gratitud.*

*Sra. Elena Zúñiga Montoya.*

*Sr. Pablo Chávez Ordoz.*

*A mi hermana:*

*Por que siempre a significado para mí la unión familiar.*

*Ma. Margarita Chávez Zúñiga*

*A mi hermano:*

*Le deseo de corazón que cumpla sus objetivos, los que está a punto de lograr.*

*Vicente Chávez Zúñiga.*

*A mi mamá lola:*

*A quien le admiro el deseo de luchar.*

*Sra. Dolores Montoya.*

*A la memoria de mis abuelitos:*

*Quienes estoy seguro que se sentirán orgullosos de éste logro.*

*Sra. Agripina Ordoz.*

*Sr. Francisco Chávez.*

*A mis familiares*

*A los que agradezco muy en especial, por que me ayudaron dándome la confianza y brindándome un lugar donde vivir, gracias a:*

*Sra. Margarita Mejía Zuñiga.*

*Sra. Ricarda Montoya.*

*A Edith Luz Verónica Hernández Martínez:*

*Por lo feliz que me hace brindándome su amor, cariño y amistad, y por que no encuentro palabras con que agradecerle todo; simplemente 'GRACIAS'.*

*Al Ing. Celestino Montiel*

*Agradeciéndole la ayuda, orientación y tiempo dedicado en la realización de éste trabajo.*

*Al Dr. Carlos Escobar*

*Por la atención prestada, además de sus sugerencias que ayudaron a una mejor presentación de éste trabajo.*

*Al Ing. Manuel Vazquez*

*Agradeciéndole el tiempo que dedicó para la revisión y orientación que brindó durante el desarrollo de éste trabajo.*

*A mis amigos:*

*Quienes me brindaron su amistad y con quienes traté de hacer amenos los ratos difíciles.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México*

*Por que es un orgullo pertenecer a la institución más prestigiada de México;  
" La máxima casa de estudios".*

*A Cementos Tolteca, Planta Atotonilco*

*Por darme la oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo durante el desarrollo de esta tesis, muy en especial al departamento técnico.*

*Al Ing. Fernando Hernández*

*Por su apoyo y confianza siempre presentes en la realización de éste trabajo.*

*Al Ing. Rafael Cueto*

*Por su sincera y valiosa cooperación, además de la atención prestada durante mi estancia en la planta.*

*Al Ing. Roberto Trujillo*

*Por la confianza que me brindó y el gran sentido del humor que nos contagia.*

*A todos y cada uno de las personas que de una u otra forma me brindaron su atención cuando la necesite para un mejor desarrollo de éste trabajo, mil gracias.*

*Ing. Cesar Navarro  
Ing. Antonio Rodríguez  
Ing. Jaime Cabrera.  
Ing. Rosalio Cruz  
Sr. Efraín Aguilar*

## INDICE

	Pag.
<b>1. INTRODUCCION</b>	1
<b>2. GENERALIDADES</b>	4
2.1 Análisis Síntesis y Optimización de procesos.	5
2.2 Simulación de procesos.	7
2.3 Modelos	11
2.4 Algoritmos	15
2.5 Software-Hardware	15
2.6 Interfase con el usuario	17
2.7 Simulación secuencial modular	18
2.8 Métodos orientados a ecuaciones	19
2.9 Métodos modulares simultáneos	20
2.10 Aplicaciones	22
<b>3. SIMULADOR ASPEN PLUS</b>	25
3.1 Modelos	30
3.2 Modelos termodinámicos	32
3.3 Banco de datos	33
3.4 Interfase con el usuario.	35
3.5 Soporte computacional.	37
<b>4. CEMENTO</b>	38
4.1 Proceso de producción	40
4.2 Microscopía	45
4.3 Teoría de Bogue	47
<b>5. SIMULACION DEL PROCESO DE ELABORACION DE CEMENTO</b>	56
5.1 Unidades	58
5.2 Componentes	61
5.3 Modelos termodinámicos	63
5.4 Topología del proceso	64
5.5 Corrientes de alimentación y de corte	65
5.6 Modelos y especificación de sus parámetros	71

<b>6. SIMULACION DEL PROCESO EN EXCEL</b>	<b>75</b>
<b>7. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS</b>	<b>84</b>
7.1 Resultados de la simulación con ASPEN PLUS.	85
7.2 Resultados de Excel	102
7.3 Análisis de Resultados	103
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>114</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>118</b>
<b>APENDICE A</b>	
A-1 Input para la simulación del proceso de elaboración de cemento tipo T-I	123
A-2 Input para la simulación del proceso de elaboración de cemento tipo C-2	133
<b>APENDICE B</b>	
B-1 Equivalencias en la distribución del tamaño de partícula	144
B-2 Propiedades termodinámicas alimentadas	144
<b>APENDICE C</b>	
" Conceptos, Características de Cementos T-I y C-2 "	146

## **RELACION DE TABLAS Y FIGURAS A LAS QUE SE HACE REFERENCIA**

### **CAPITULO 2**

- 2.1 Diseño de procesos.
- 2.2 Secuencia de actividades que se siguen durante la elaboración de un proceso.
- 2.3 Elementos esenciales para un sistema computacional para el análisis de ingeniería.
- 2.4 Modelo esquemático de una operación unitaria.
- 2.5 Etapas de construcción de un modelo matemático.
- 2.6 Algoritmo de doble rompimiento.

### **CAPITULO 3**

- 3.1 Métodos de convergencia.
- 3.2 Flujo de información en ASPEN PLUS.
- 3.3 Modelos de operación unitaria.
- 3.4 Modelos de propiedades termodinámicas en ASPEN PLUS.
- 3.5 Banco de datos de ASPEN PLUS.

### **CAPITULO 4**

- 4.1 Diagrama de bloques del proceso de elaboración de cemento.
- 4.2 Esquema de flujo de proceso.
- 4.3 Valores óptimos de los parámetros operativos.

### **CAPITULO 5**

- 5.1 Cambio de unidades.
- 5.2 Distribución del tamaño de partícula de las corrientes de proceso y de corte.
- 5.3 Diagrama de bloque para la simulación, para el caso del cemento T-I.
- 5.4 Diagrama de bloque para la simulación, para el caso del cemento C-2.
- 5.5 Composición de corrientes de alimentación.
- 5.6 Composición de corriente de crudo.
- 5.7 Composición de corriente de clinker.
- 5.8 Composición de corrientes de corte especificadas.
- 5.9 Determinación de la capacidad de hornos.
- 5.10 Determinación de la alimentación de Caliza, Arcilla, Fierro.
- 5.11 Determinación de Yeso y Puzolana.
- 5.12 Determinación del BWI especificado en los CRUSHER.
- 5.13 Relaciones aritméticas guías del Crudo.

## CAPITULO 6

### 6.1 Secuencia para la hoja de cálculo EXCEL.

## CAPITULO 7

### 7.1 Resultados de la Simulación

- 7.1.1 Cemento Tipo T-I
  - 7.1.a. Subcorriente Cisolid.
  - 7.1.b Subcorriente Mixed.
  - 7.1.c Subcorriente Cisolid y Mixed.
- 7.1.2 Cemento Tipo C-2
  - 7.1.d Subcorriente Cisolid.
  - 7.1.f Subcorriente Cisolid yMixed.

### 7.2 Resultados de la Simulación en Excel

- 7.2.1 Composición de la sección de Trituración
- 7.2.2 Composición de la sección de Reacción
- 7.2.3 Composición de la sección de Molienda

### 7.3 Análisis de resultados

- 7.3.A Resultados del análisis de las fotografías
  - 7.3.1.A Porcentaje promedio de los componentes del Clinker.
  - 7.3.1.B Comparación de la composición de Bogue Vs. real.
  - 7.3.1.C Gráfica de la composición de Bogue Vs. real.
  - 7.3.1.D Porcentaje de variación teórica de Bogue Vs. real
- 7.3.2. Composición cemento tipo T-I y C-2.
- 7.3.3. Composición de cementos tipo T-I y C-2 resultado de la simulación ASPEN PLUS Vs EXCEL
- 7.3.4. Especificaciones en la Norma Oficial Mexicana.

## NOMENCLATURA UTILIZADA

AT= Area total

\* A/F= Viscosidad del fundente, cuyo valor es de  $1.7 \pm 0.2$

\* BWI= Bond Work Index.

C3S=  $3\text{CAO.SIO}_2$ -Silicato Tricálcico.

C2S=  $2\text{CAO.SIO}_2$ -Silicato Dicálcico.

C4AF=  $4\text{CAO.AL}_2\text{O}_3.\text{FE}_2\text{O}_3$ - Ferroaluminato Tetracálcico.

C3A=  $3\text{CAO.AL}_2\text{O}_3$  - Aluminato Tricálcico.

\* FSC= Factor de Saturación de Cal, cuyo valor es de  $98 \pm 2$ .

\* S/R= Cantidad de fundente, cuyo valor es de  $2.6 \pm 0.2$

TPH= Toneladas por Hora.

\* C-2= Cemento Portland Puzolánico.

\* T-I= Cemento Portland Tipo I.

YESO=  $\text{CASO}_4.2\text{H}_2\text{O}$

C= Cantera

T= Trituradora

M= Molino

\* Consultar el Apéndice.

## **CAPITULO 1**

### **INTRODUCCION**

El Ingeniero de Proceso requiere actualmente de herramientas modernas que le permitan realizar su trabajo en forma eficiente. Los simuladores de proceso resultan ser una de estas herramientas, ya que mediante su utilización adecuada, reducen el tiempo de trabajo.

En el presente trabajo se utilizó el Simulador de Procesos ASPEN PLUS ( Advanced System for Process Engineering ).

En éste trabajo se lleva a cabo la simulación de un proceso en fase sólida, como es el caso del proceso de elaboración de cemento; sabiendo de antemano que este proceso surgió a principios de siglo y que con el tiempo se fué perfeccionando hasta llegar a ser como lo es hoy en día, se procede a la elaboración del trabajo pues hasta estas fechas no se ha realizado un trabajo similar, en donde se maneje únicamente la fase sólida, además de esto se pretende probar los alcances y limitaciones del Simulador ASPEN PLUS en el manejo de sólidos en un proceso, comparando los resultados con los reales.

El trabajo está conformado de los capítulos que a continuación se describen:

Capítulo 2: En éste capítulo se hace una síntesis de lo que es un simulador de procesos, el diseño de procesos, alcances, usos; así como también la forma en que estos operan utilizando los modelos matemáticos y propiedades termodinámicas para representar una operación unitaria o proceso unitario lo más cercano posible a la realidad.

Capítulo 3: En éste capítulo se describe el Simulador de Procesos ASPEN PLUS debido a que es la herramienta fundamental utilizada en la elaboración de éste trabajo, explicandose cada una de sus partes principales.

Capítulo 4: Aquí se relata brevemente el origen de la planta de cementos Tolteca, también se da la descripción del proceso y los diagramas de bloques y de proceso para la elaboración de cemento. Además se realiza un estudio sobre la corroboración de la teoría de Bogue ayudado por fotografías a nivel microscópico y cuyo método de análisis se describe en su momento.

Capítulo 5: En éste capítulo se especifican todos y cada uno de los criterios que se deben de considerar para que se lleve a cabo la simulación como lo es la especificación de unidades, componentes, equipos, modelos termodinámicos y por último la especificación de las corrientes de alimentación y de corte.

Capítulo 6: Este capítulo surgió de una necesidad real, representando en una hoja de cálculo la variación de la composición de materias primas, y como se ve afectada la composición de las corrientes de proceso como son: crudo\*, clinker\*, y los cementos Tipo T-1\* y C-2\*.

Capítulo 7: En éste capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación del proceso de elaboración de cemento, mostrando la composición de las corrientes de proceso, así como sus propiedades termodinámicas, subcorrientes y distribución del tamaño de partículas, además de presentar los resultados obtenidos de la hoja de cálculo Excel referente al proceso.

Capítulo 8: Por último se analizan los resultados obtenidos en la simulación del proceso de elaboración de cemento comparandolos con los obtenidos en la hoja de cálculo Excel; y el análisis de la teoría de Bogue, mencionando también los alcances y limitaciones del simulador ASPEN PLUS en el manejo de sólidos y la forma con la que el simulador se acercó a la realidad.

\* consultar el Apéndice C

## **CAPITULO 2**

### **GENERALIDADES**

Cuando las computadoras empezaron a tener un gran avance en su tecnología surgió la idea y debido a lo que podrían ofrecer dichas máquinas surgió el interés del ingeniero encargado de las transformaciones físicas y químicas que sufren las materias durante el proceso, en un control automático, es decir, poseer un cerebro electrónico capaz de asimilar el mensaje de todos los instrumentos de medición, analizarlos y en caso necesario aplicar acciones correctivas, o en su defecto aplicar la más correcta.

La computadora se convirtió así en un elemento fabuloso en el momento de realizar cálculos complicados y largos como los surgidos cuando se trabaja en el diseño de procesos. Diseñar una columna de destilación multicomponente con el auxilio de una computadora reduce considerablemente el tiempo, además no sólo se podría diseñar la columna, sino también, una planta entera en poco tiempo comparada con el tiempo que tardaría en ser construída .

## **2.1 ANALISIS, SINTESIS Y OPTIMIZACION DE PROCESOS**

En la actualidad la Ingeniería de Procesos se encarga de la planeación, diseño, operación y control de cualquier operación unitaria o proceso químico.

El análisis, síntesis y optimización de procesos son las etapas que comprende el diseño de procesos, debido a que los procesos químicos están compuestos por varias operaciones unitarias surge la necesidad de realizar un estudio detallado de combinaciones y secuencias factibles técnica y económicamente por lo que el diseño de procesos toma una importancia fundamental en los procesos de ingeniería. (Fig.2.1)

*Síntesis de procesos:* Teniendo la inquietud de satisfacer las necesidades del hombre y apoyando firmemente de forma económica, surge la idea de transformar las materias primas para el beneficio del hombre, aquí se deciden la unidades de proceso requeridas y su interconexión.

El *Análisis de procesos* consiste en la elaboración de un estudio de factibilidad económica y técnica basándose en las bases de diseño del proceso, y estrategias de diseño que consiste en asignar los valores a las variables independientes o manipulables del proceso y en determinar los métodos de convergencia para desarrollar el balance de materia y energía.

En la *Optimización de procesos* se evalúan los datos de la etapa de análisis y variando los parámetros de diseño y operación se puede mejorar el proceso.

Ver bibliografía " Simulación de procesos a estado estacionario", Mariano Ramos.

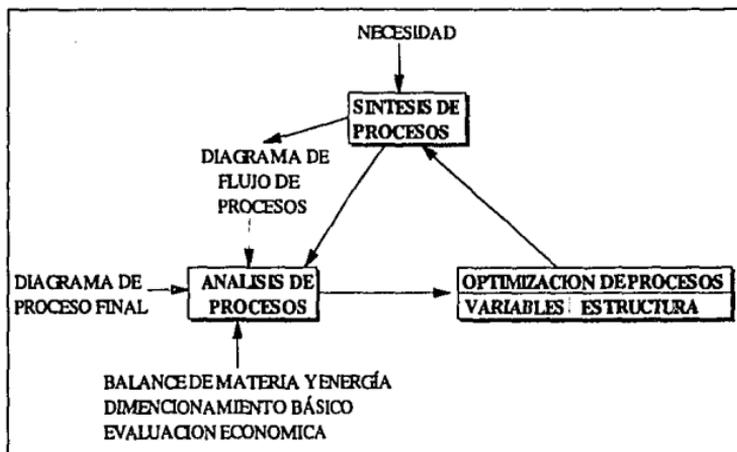


FIG 2.1 Diseño de procesos

## 2.2 SIMULACION DE PROCESOS

Westerberg (1979) , en su libro define a un sistema de simulación (flowsheeting) como: " El uso de la computadora para realizar el balance de masa y energía, dimensionamiento de equipo y cálculos de costos para un proceso a estado estacionario". Una definición más amplia de la simulación de procesos, se define como la representación de un proceso químico, ayudados por modelos matemáticos; estos modelos matemáticos son resueltos para obtener la información sobre el comportamiento del proceso químico, con el objeto de observar el efecto producido al modificar las condiciones de operación, un sistema de simulación de procesos debe aceptar como entrada, la información acerca de un proceso, a un nivel de diagrama de flujo y que realice análisis que son utilizados en el desarrollo, diseño u operación de procesos.

Este modelo matemático es generalmente un programa de computadora, conocido como programa de simulación, comúnmente escrito en lenguaje de alto nivel (FORTRAN ), con una interfase con el usuario que permite al ingeniero concentrarse en los componentes y especificaciones del proceso. Un simulador de procesos no es sólo el agrupamiento de una serie de modelos matemáticos capaces de representar las diferentes operaciones unitarias, sino que es una interrelación precisa de los módulos, conteniendo las operaciones unitarias, las propiedades termodinámicas y las herramientas de cálculo.

El ingeniero es la persona indicada en alimentar los equipos así como sus especificaciones a la computadora, que ésta los entienda, los ejecute y despliegue los resultados, y que el ingeniero los interprete, y ejecute las acciones correctivas, con lo que se logrará mejorar considerablemente la eficiencia del proceso. En la actualidad la gran mayoría de las plantas en donde se lleve a cabo una transformación química y física que son diseñadas, son simuladas a través de los modelos matemáticos o programas de computadora, conocido generalmente como "Simulador de Procesos". Para la creación de un proceso se sigue una secuencia de actividades las cuales se ilustran en la Fig.2.2.

La simulación de procesos comenzó su desarrollo a mitad de los años 50's, logrando hasta la fecha un desarrollo considerable con ayuda de las computadoras que de igual forma y gracias a la tecnología han alcanzado un gran avance.

Hubo que rebasarse una etapa de convencimiento, por parte de los industriales para que aceptaran al simulador como una herramienta muy útil en muchos aspectos. Esto ocurrió por los años 60's; los puntos importantes que lo hicieron factibles fueron los siguientes:

- 1.- El empleo de correlaciones para las propiedades físicas cada vez más rigurosas y seguras, y que se permitieron instalar en las computadoras, con lo que disminuyó el tiempo de solución de las correlaciones para las propiedades físicas.
- 2.- La codificación de los programas en un lenguaje de alto nivel, como por ejemplo el FORTRAN.
- 3.- Implementar el sistema para un fácil manejo por parte del usuario y sin necesidad de la intervención de un experto.

Cuando la simulación de procesos fue reconocida como un agente importante en el desarrollo industrial, comenzó la etapa de refinamiento de los programas de computadora. (Ver bibliografía "Simulación de procesos a estado estacionario", Mariano Ramos.).

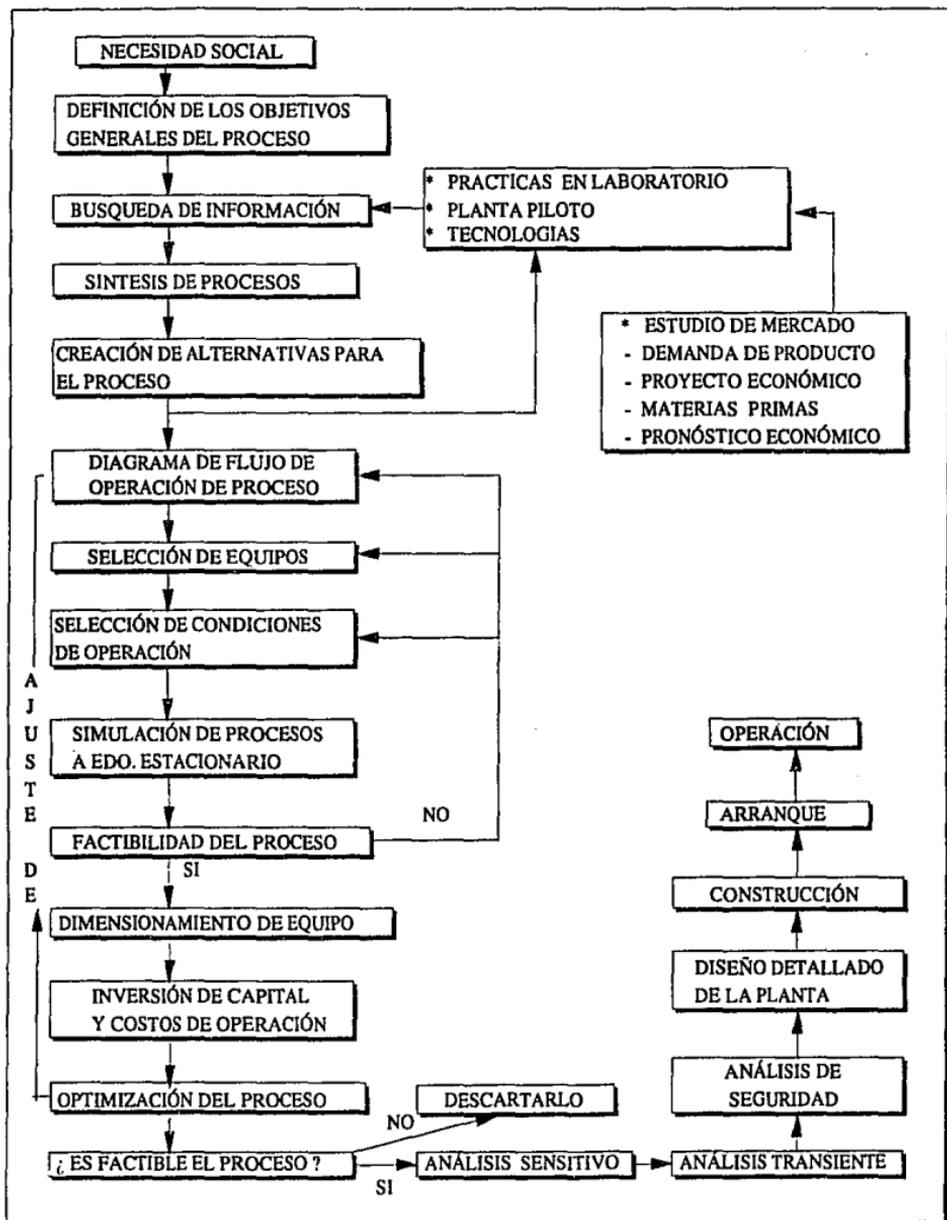


Fig 2.2 Secuencia de actividades que se desarrollan en la elaboración de un proceso.

## ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE SIMULACION

Los elementos esenciales de cualquier sistema de simulación en el análisis de ingeniería, y que deben de especificarse para que los procesos puedan ser simulados se muestran en la Fig. 2.3

Las partes que conforman sistema de simulación son:

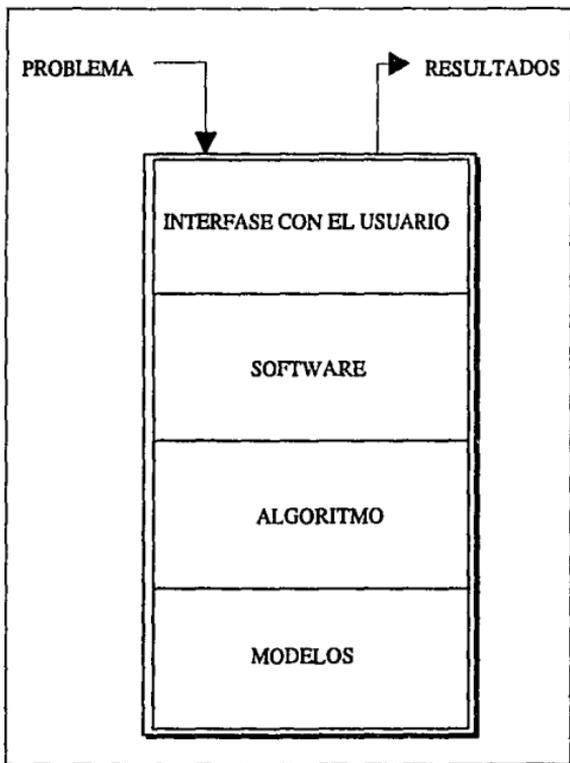


Fig. 2.3

Elementos esenciales para un sistema computacional para el análisis de ingeniería.

## 2.3 MODELOS

Un sistema de simulación de procesos tiene en su parte medular los modelos de las operaciones unitarias que, a su vez constituyen la base del análisis.

Un modelo matemático se deriva a partir de las leyes de conservación, ecuaciones de velocidad, relaciones de propiedades físicas, termodinámicas, de transporte y de las restricciones de diseño y control.

Los modelos proveen una serie de relaciones algebraicas y diferenciales que describen el proceso. Una de las propiedades más importantes de los modelos matemáticos es de que estos deben ser adaptativos, de tal manera que puedan ser modificados conforme se avanza en el conocimiento del sistema, que sean lo más apropiados para su uso en términos de rigor, nivel de detalle, exactitud, validez y generalidad.

Generalmente los modelos generan un conjunto de relaciones algebraicas no lineales de la forma:

$$\text{Variable de salida} = f(\text{variables de entrada})$$

en donde las variables de entrada son las variables de corrientes de entrada y los parámetros del modelo ( que son las variables requeridas para especificar la función de la operación unitaria ); y las variables de salida, son las variables de corrientes de salida, ejecución y dimensionamiento ( como puede ser el calor requerido por un cambiador de calor o el número de etapas de compresión para el caso de un compresor), y las variables internas o de retención ( tal como las temperaturas de cada etapa y los valores de  $K_i$  en una columna de destilación ). Fig 2.4

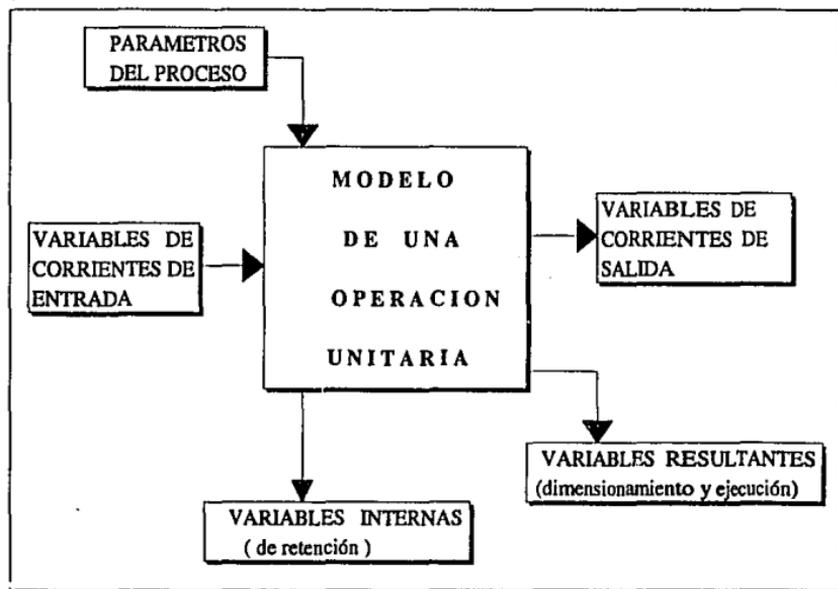


Fig. 2.4 Modelo esquemático de una operación unitaria

## ETAPAS PARA LA CONSTRUCCION DE UN MODELO MATEMÁTICO

La primera etapa es la de decidir el tipo de sistema que va a ser modelado.

Algunos procesos son por naturaleza dependientes del tiempo, mientras que otros se pueden considerar como operaciones de estado estacionario. Sin embargo la mayoría de los casos se encuentran entre esos límites, y los ingenieros deben de responder a la pregunta relativa al estado estacionario de las operaciones en cuanto a la variación de las condiciones de operación del proceso con respecto al tiempo.

En un programa de simulación se puede trabajar tanto para estado estacionario como para un estado dinámico.

Una vez que se ha decidido la forma del modelo matemático, la siguiente etapa es la de considerar todas las ecuaciones matemáticas que representen al sistema con el objeto de construir el modelo.

- a.- Tipos de ecuaciones: algebraicas, diferenciales ordinarias (EDO) y diferenciales parciales.
- b.- Características de las ecuaciones: Lineales, No lineales ( Trascendentales, Discontinuas, Implícitas, Discretas, Enteras ).

Dependiendo del sistema que se este estudiando se escogerá el tipo y características de las ecuaciones antes mencionadas.

La siguiente etapa es combinar el tipo y características de las ecuaciones que constituyen el modelo, de tal manera que se puedan resolver y, de ésta forma poder obtener las respuestas requeridas por el mismo.

Un modelo matemático puede ser expresado:

$$f(u, x, y, z, r) = 0$$

Donde:  $u$ = Vector de parámetros del modelo.

$x$ = Variables de corriente de entrada.

$y$ = Variables de corrientes de salida.

$z$ = Variables internas ( o de retención ).

$r$ = Variables resultantes ( ejecución y dimensionamiento ).

Cuando se lleva a cabo la simulación de un proceso, el número de ecuaciones es igual a la suma del número de variables de corrientes de salida variables internas y variables resultantes y, el número de grados de libertad, es igual a la suma de los parámetros de los modelos y de las

variables de corrientes de entrada. El número total de ecuaciones es más grande que el número de grados de libertad debido a que existe una gran cantidad de variables internas, se habla de variables internas por ejemplo cuando en una columna de destilación se habla de la temperatura de cada etapa, composiciones, entalpías, valores de  $K_i$ , densidades, etc.

En la Fig. 2.5 se muestran las etapas que se deben considerar en la construcción de un modelo matemático.

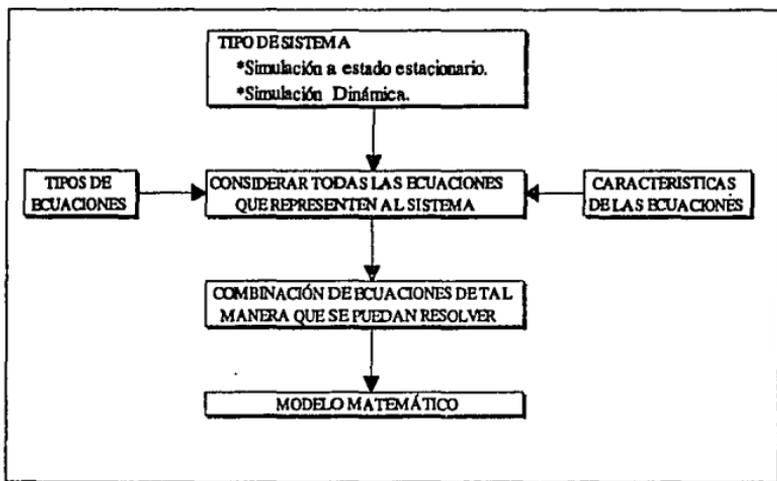


FIG No 25 Etapas de construcción de un Modelo matemático

## 2.4 ALGORITMOS

La estructura de éste programa de simulación es casi siempre modular, esto es; cada paso del proceso químico está representado como un modelo matemático separado llamado módulo. Los módulos son conectados por sistemas de datos que representan las corrientes existentes entre las diferentes unidades del proceso.

El proceso para preparar una simulación a estado estacionario, presenta problemas matemáticos como lo es el resolver grandes sistemas de ecuaciones algebraicas no lineales. Sargent (1980) describe algunos métodos generales para la solución de sistemas de ecuaciones no lineales.

Prácticamente, cualquiera que sea la orientación adoptada, el número y tipo de ecuaciones que describen el proceso son iguales, la diferencia se da en la forma de manejar y resolver estos sistemas. Para la solución de estos sistemas de ecuaciones conduce a diferentes orientaciones en la simulación:

- 1.- Enfoque modular secuencial.
- 2.- Enfoque orientado a ecuaciones.
- 3.- Enfoque modular simultáneo o de doble rompimiento

## 2.5 SOFTWARE-HARDWARE

En la actualidad se le ha dado una gran importancia al desarrollo del software y se ha invertido suficiente dinero y esfuerzo para lograr grandes avances en este campo de sistemas de simulación de procesos.

Una vez que se tienen seleccionados los algoritmos de cálculo para un sistema de simulación es necesario que estos se implementen a una computadora y en un sistema de operación particular .

Para que un Software tenga los requerimientos deseados, para que en él puedan ser desarrollados los algoritmos de cálculo para la simulación de un proceso se hacen necesarios los siguientes requerimientos: Deben ser fáciles de entender, fáciles de mantener y modificar y lo más transparente que sea posible .

Para el desarrollo de nuevos sistemas Software, se han definido ciertos aspectos de organización, existen cinco etapas en la vida de cualquier programa computacional a gran escala:

- Definición.
- Diseño.
- Implementación.
- Prueba.
- Transferencia.

En la etapa de *definición* de especificaciones funcionales a criterios de diseño que nos dice cual es el sistema a utilizar pero, no indican como. Durante la ejecución de esta etapa es muy importante realizar un estudio del Software y de los sistemas existentes disponibles para evitar la repetición de información. En la etapa de *diseño* de un sistema computacional se especifica detalladamente como serán encontrados los requerimientos funcionales, en esta etapa se definen la arquitectura del sistema, la estructura de datos, la interfase con el archivo, el lenguaje de programación y la documentación del programa. Una vez que el diseño es completado se inicia la etapa de *Implementación*, aquí se permite transcribir el sistema diseñado a un lenguaje de programación, el lenguaje de programación puede ser seleccionado si éste no es parte del diseño del sistema. En la etapa de *Prueba* si el programa es confiable, y si realmente está libre de fallas y además que los usuarios manejen y tengan confianza en los resultados

obtenidos. En la etapa de *Transferencia* en donde el programa es utilizado continuamente para resolver problemas reales, en base a la producción. Las estrategias para el mantenimiento y mejoramiento del sistema, entrenamiento y consulta de usuarios también son importantes.

## 2.6 INTERFASE CON EL USUARIO

En esta etapa del sistema de simulación, el usuario está interactuando directamente con los modelos utilizando el Software y los algoritmos del sistema de simulación el usuario describe el problema ayudado por el lenguaje de entrada, también se incluyen los reportes de salida que es donde se representan los resultados. Las características más importantes que debe de tener la interfase con el usuario se enlistan a continuación:

1. Debe tener un formato libre.
2. Debe proporcionar valores automáticamente, valores cuando se necesiten.
3. El usuario debe proporcionar globalmente las unidades de entrada y salida, dentro de un párrafo o para datos en forma individual.
4. El usuario debe especificar los datos de entrada por componentes, corrientes, bloques y algunos u otros datos del modelo.
5. Debe proporcionar al usuario una forma recomendada de introducir los datos.
6. El usuario debe tener acceso a cualquier variable del modelo, y además pueda hacer cualquier transformación.
7. La descripción del diagrama de flujo de proceso es independiente del modo de convergencia

## 2.7 SIMULACION SECUENCIAL MODULAR

Westerberg utilizó este término para describir el enfoque que es usado hoy, esencialmente por todos los simuladores industriales. En este enfoque el programa es dividido en varias subrutinas o módulos, y cada módulo corresponde a una o más etapas de la planta de procesamiento. Existe un programa ejecutivo que arma el diagrama de flujo de proceso y establece el orden de cálculo.

En esta aproximación se presentan dos opciones diferentes de cálculo que son:

- 1.- Cálculo orientados al funcionamiento. Aquí se desarrolla una subrutina para cualquier tipo de bloque, que calculan las variables de corriente de salida en función de las variables de corriente de entrada y los parámetros del bloque. Las subrutinas son llamadas después para simular el proceso. Aquí generalmente el flujo de información es paralelo al flujo del proceso que está siendo simulado.
- 2.- Cálculos orientados al diseño. En esta parte es necesario hacer un diseño más detallado de los modelos de los equipos y tratarlos como en la primera opción. Para resolver este sistema el procedimiento de solución es alterado debido a que las variables fijadas en la primera opción ahora actuarán como grados de libertad. Este procedimiento es denominado flujo de información inverso.

Las corrientes de recirculación, son cortadas y llevadas a convergencia por un proceso iterativo.

Cuando se quiera resolver una simulación por el método secuencial modular, es necesario llevar a cabo la partición del diagrama de flujo, seleccionar las corrientes a romper, unir los cálculos y determinar la secuencia de cálculo.

En el caso de la convergencia de las corrientes de recirculación, el algoritmo de Wegstein (1958), ha sido el mejor para la simulación secuencial modular por casi 20 años; aunque este algoritmo descuida la interacción entre las variables de las corrientes a romper.

## 2.8 METODOS ORIENTADOS A ECUACIONES

Este método colecciona todas las ecuaciones que describen el diagrama de flujo del proceso y las resuelve como un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales.

Matemáticamente el problema puede ser planteado como :

$$\text{Resolver } F(x, u) = 0$$

Donde:  $x$ = Vector de variables de estado ( dependientes).

$u$ = Vector de variables de decisión ( independientes ).

Los métodos orientados a ecuaciones, se inician desde la partición del diagrama de flujo como en el método secuencial modular, pero con la diferencia de que en lugar de utilizar las subrutinas para calcular las variables de salida como una función de las variables de entrada, estos simuladores necesitan de procedimientos que generen y representen las ecuaciones para cada bloque, y una vez generadas las ecuaciones pueden ser alimentadas a un método eficiente para su solución.

En resumen los algoritmos de solución de ecuaciones, son utilizados para modelar tipos individuales de equipo, para resolver sistemas de simulación que involucran colecciones homogéneas de unidades ( tal como las columnas de destilación o cambiadores de calor ), y que están siendo estudiados en sistemas prototipo para resolver un sistema de simulación general.

## 2.9 METODOS MODULARES SIMULTANEOS

Todos los métodos modulares simultáneos ofrecen una convergencia rápida y una formulación natural de los problemas de diseño, pero tienen ciertas limitantes, tres desventajas que a continuación se mencionan:

- 1.- Necesitan buenos valores iniciales.
- 2.- No toman en cuenta las ventajas y la gran inversión utilizada en el desarrollo de los modelos de operaciones unitarias basados en el enfoque modular secuencial.
- 3.- Cuando hay un error de cálculo y no converge es difícil para el usuario diagnosticar el problema.

La idea básica de este enfoque se expone en la Fig. 2.6. en el algoritmo de doble rompimiento. En este enfoque se utilizan dos tipos de modelos: Rigurosos y simples.

Los modelos rigurosos son los modelos de operaciones unitarias tradicionales que se utilizan en la simulación modular secuencial, pero aquí son utilizados para determinar los parámetros en los modelos simples que son representados como ecuaciones.

Y cuando se trata de modelos simples estos se resuelven por medio de cualquier técnica eficiente de solución de ecuaciones, para determinar todas las variables de corriente que admiten los modelos rigurosos que son llamados otra vez.

En un modelo, lineal las variables de estado son variables de corriente de salida. Los modelos simples sea lineal o no lineal, algunas veces son referidos como modelos reducido, ya que involucran muy pocas variables. El enfoque de doble rompimiento tradicional, es llamado modular simultáneo, porque este usa los modelos modulares tradicionales, ya que son resueltos simultáneamente para todas las variables de corriente. El enfoque de doble rompimiento es considerado en realidad como otro método de convergencia que es utilizado como una alternativa para el enfoque modular secuencial.

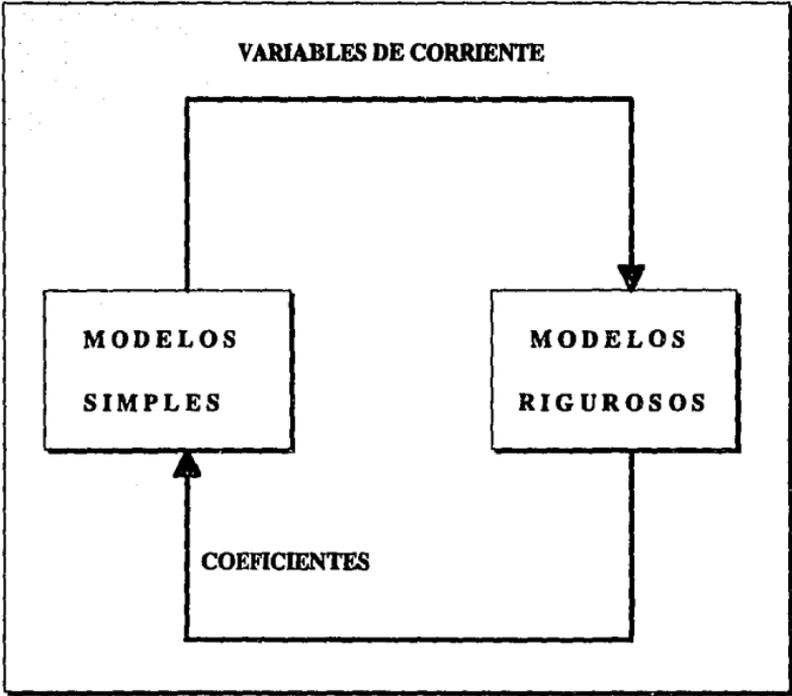


Fig. 2.6 Algoritmo de doble rompimiento

## 2.10 APLICACIONES

Los simuladores de proceso se utilizan de muchos modos distintos que van desde la evaluación preliminar de procesos al análisis de operaciones en las instalaciones existentes. Puesto que cada usuario tiene exigencias distintas para el sistema de simulación, éste último debe tener capacidades muy variadas. El sistema de simulación de procesos que se emplea para la evaluación de procesos debe tener capacidad para proporcionar la máxima información sobre el proceso, a partir de un *mínimo* de datos de entrada. Por ejemplo, en el cálculo de un intercambiador de calor que se utiliza en este tipo de evaluación no debe necesitar información detallada, tiene que poder aceptar información mínima ( como la cantidad de enfriamiento o calentamiento, el coeficiente de transferencia, etc.) y puede decir las temperaturas de las corrientes de salida y dar una estimación del área superficial que se requiere. El perderle al usuario que proporcione datos tales como el porcentaje de amortiguación, la disposición de los tubos o el espaciamiento entre los mismos, destruye la finalidad de la evaluación preliminar.

Los usos que se le han dado a la simulación de procesos son:

- 1.- Con propósitos de evaluación , experimentación y desarrollo, con ayuda de un simulador de procesos al que se le alimentan una cantidad muy pequeña de datos, puede ser empleada para probar la factibilidad económica de diferentes procesos.
- 2.- Como medio de aprender acerca de nuevos sistemas: tener una visión general de las alternativas de proceso, cambiando equipos, corrientes, condiciones de operación.
- 3.- Revisión de alternativas. Una vez encontrado que el proceso es atractivo desde el punto de vista financiero, deben probarse diferentes alternativas en cuanto a tamaño de la planta y condiciones de operación para la elección de la mejor.

4.- Como herramienta para entrenar personal.

5.- Planta piloto. El empleo de simuladores puede ayudar para un buen estimado de las condiciones de operación reales, basados en los relativamente pocos resultados de la planta piloto.

6.- Diseño. Gracias al simulador de procesos se obtienen todos los datos de proceso requeridos para el diseño detallado de los diferentes equipos. En esta etapa pueden reducirse los factores de seguridad debido a la incertidumbre.

7.- Simulación de plantas ya existentes. Muy útil cuando existe la necesidad de un cambio en las condiciones de operación.

8.- Como medio de proyectar hacia el futuro.

El mayor logro de la simulación es el haber producido mejores diseños de procesos con capital y costos de operación menores y en menor tiempo.

El sistema de simulación debe proporcionar al usuario estimaciones confiables sobre tamaños de equipos, cargas de calentamiento y enfriamiento, niveles de temperatura de rechazo de calor y necesidades de energía, para poder efectuar cotizaciones confiables de los costos de las instalaciones. Además los resultados de la evaluación preliminar deben ser de tal calidad que se puedan utilizar como estimaciones de los datos de entrada para la situación de diseño final. Los cálculos abreviados tradicionales darán casi siempre resultados suficientemente precisos para la evaluación preliminar, a condición de que se utilicen con buen sentido y prestando una atención cuidadosa a los límites de confiabilidad.

Un sistema general de simulación de procesos debe cumplir de manera general con los siguientes puntos:

- 1.- Poder simular el proceso en el que está interesado el ingeniero.
- 2.- Disponer de algún procedimiento para predecir o incluir propiedades termodinámicas y/o físicas.
- 3.- Contener características de verificación para asegurarse de que se haya definido apropiadamente el proceso y que las probabilidades de obtener una solución sean elevadas.
- 4.- Disponer de métodos para las finalidades de reciclaje, según las tolerancias especificadas por el usuario.
- 5.- Contener tolerancias suficientemente pequeñas con los cálculos iterativos dentro de los subprogramas para fines especiales, para permitirle al usuario especificar tolerancias razonablemente estrechas para la convergencia general. Esas tolerancias del cálculo iterativo deben ser lo bastante grandes para evitar un consumo innecesario de tiempo de computadora (Ver bibliografía "Chemical Engineering Handbook" Perry).

## **CAPITULO 3**

### **SIMULADOR ASPEN PLUS**

Los primeros simuladores se desarrollaron a fines de los años 50'S y principios de los 60'S los cuales correspondieron a la llamada "Primera Generación de simuladores ", estos simuladores poseían una capacidad muy limitada en las propiedades físicas de los componentes que manejaban y la convergencia de las recirculaciones, era generalmente por sustitución directa. El desarrollo de la tecnología computacional permitió un nuevo auge en la simulación de procesos, llegando así a la "Segunda Generación de Simuladores", la que comenzó a finales de los años 60'S, la simulación es llevada a cabo por la ejecución de un programa elaborado en lenguaje FORTRAN, estos contaban con un banco de datos más extenso, poseía técnicas sofisticadas para la convergencia de las recirculaciones, pero estaban limitados a un sistema líquido-vapor. Debido a las limitaciones de los simuladores de la primera y segunda generación rápidamente surgió la "Tercera Generación de Simuladores", que surgiría en los años 80'S, aquí los simuladores permiten un análisis a nivel de diagrama de flujo con diferentes corrientes (líquido-vapor, sólido-gas, multifase, sólido-líquido-vapor ), esta generación acepta diagramas de flujo a diferentes niveles de detalle (simples, detallados y muy detallados ), cualquier usuario tendrá acceso a éste simulador pues éste está bien documentado y diseñado, además éste sistema podrá ser compatible a diferentes sistemas de computadoras.

El simulador utilizado en la elaboración de éste trabajo fué el ASPEN "Advanced System for Process Engineering " (Sistema Avanzado para Ingeniería de Procesos) del Instituto Tecnológico de Massachusetts, en su modalidad de Sólidos, versión 8.5-4 adquirida por la Facultad de Química en febrero de 1993.

ASPEN PLUS pertenece a la tercera generación de simuladores, éste simulador puso a prueba su primera versión en más de cincuenta compañías, y en 1983 ASPEN PLUS surge con más de 600 nuevas subrutinas; la cual surgió como una nueva versión expandida, mejorada y soportada comercialmente , con mayor calidad, eficiencia y facilidad en su uso.

La compañía Monsanto fué una de las primeras instituciones en preocuparse por unir modelos computacionales de operaciones unitarias individuales y de ésta forma crear un

sistema de simulación de procesos. ASPEN PLUS al principio se desarrolló para el proceso de combustibles fósiles y carbón; en 1983 ASPEN PLUS ofrece una versión expandida, una a una de las versiones de éste simulador a sido mejorada, ofreciendo una mayor calidad y eficiencia en su manejo.

ASPEN PLUS resuelve las ecuaciones de las corrientes de conexión de un proceso de la misma forma en que las resuelve y las maneja el enfoque modular secuencial; cuando se trabaja en un proceso de simulación y se llega a una corriente de recirculación, las variables de éstas corrientes son supuestas iniciándose así un proceso iterativo, ASPEN PLUS utiliza diferentes tipos de métodos de convergencia, los cuales se listan a continuación (Ver bibliografía Aspen Plus User Guide");

<i>METODO</i>	<i>APLICACION</i>
WEGSTEIN	CONVERGENCIA DE CORRIENTES DE CORTE
SUSTITUCION DIRECTA	CONVERGENCIA DE CORRIENTES DE CORTE
SECANTE	CONVERGENCIA DE ESPECIF. DE CORRIENTE
BROYDEN	CORRIENTES DE CORTE Y/O CONV. DE ESPEC. DE DISEÑO
NEWTON	CORRIENTES DE CORTE Y/O CONV. DE ESPEC. DE DISEÑO
COMPLEX	OPTIMIZACION CON RESTRICCIONES DESIGUALES

Tabla 3.1 Métodos de convergencia

ASPEN es capaz de almacenar un número ilimitado de variables, de la forma estructura plex. Las Estructuras Plex son arreglos unidimensionales de longitud indefinida en donde no sólo se almacenan datos sino también los identificadores de esos datos y su respectivo valor, después otro identificador y su valor y así sucesivamente hasta un número ilimitado.

## - PROGRAMACION EN ASPEN PLUS

Para trabajar con éste simulador primeramente el usuario debe crear un archivo llamado INPUT, el cual se encuentra en un lenguaje y formato especial. Este archivo cuenta con varias etapas de almacenamiento de datos y especificación de modelos. Las etapas que componen al INPUT son:

1. **DESCRIPTION**; En esta etapa se da una breve descripción del proceso a simular.
2. **IN-UNITS, OUT-UNITS**; Especificación de las unidades de variables de proceso.
3. **COMPONENTS**; Especificación de los componentes que se manejan en el proceso.
4. **DATABANKS**; Aquí se especifica el (los) banco(s) de datos respectivo.
5. **FLWSHEET**; Especificación de las secciones y la secuencia que siguen los equipos en el proceso.
6. **PROPERTIES**; Especificación del modelo termodinámico.
7. **STREAMS**; Especificación de las corrientes de corte y corrientes de alimentación.
8. **BLOCK**; Especificación de las variables del equipo.

Una vez que se ha creado el INPUT, éste pasa por un traductor el cual crea el INPUT en un programa en FORTRAN, pasando después por un compilador de FORTRAN. Una vez que el programa a sido compilado el siguiente paso es crear la secuencia de cálculo utilizando algunos de los métodos de convergencia del simulador ( ya expuestos anteriormente),

relacionando los modelos de operaciones unitarias y la forma en que están interconectados cada uno de estos modelos y utilizando los bancos de datos de ASPEN PLUS y toda la información necesaria, para que se lleve a cabo la simulación y el flujo de información se complete de acuerdo a la Fig. 3.2.

Después de ésto se lleva a cabo la simulación del proceso. La versatilidad del simulador ASPEN PLUS permite generar un archivo llamado HISTORY el cual detalla con precisión la secuencia de cálculo, los posibles errores en el sistema y/o propiedades físicas, generando también un archivo REPORTE donde se pueden encontrar los balances de materia y energía, la conexión de módulos, las corrientes de proceso etc.

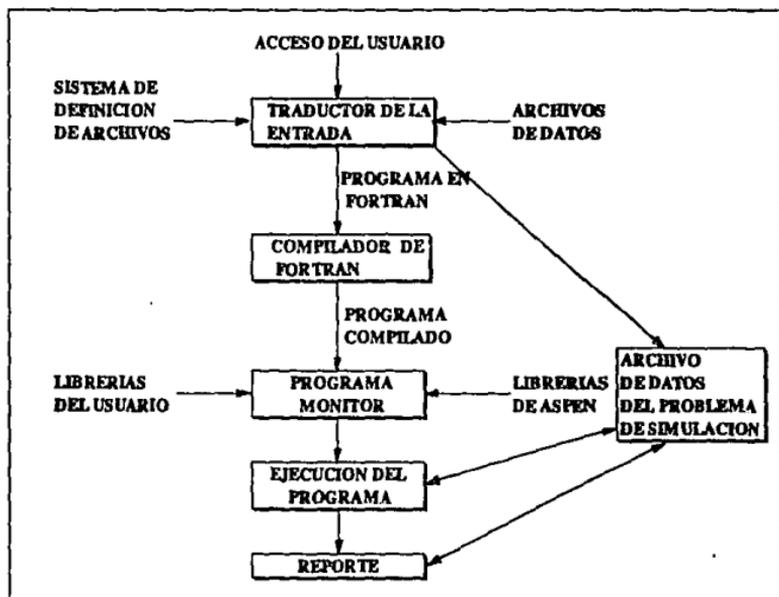


Fig. 3.2 Flujo de información en ASPEN PLUS

### 3.1 MODELOS

Como se mencionó anteriormente en la elaboración de éste trabajo se utilizó principalmente el manual de ASPEN PLUS en su modalidad de sólidos ayudados también por el manual guía del usuario, debido a que en el proceso de elaboración de cemento, las materias primas que se manejan en las corrientes de proceso son sólidos.

ASPEN PLUS posee una gran cantidad de modelos que son capaces de representar casi todas las operaciones unitarias que se llevan a cabo en cualquier planta de proceso. Este simulador posee modelos que no tienen ninguna limitación dimensional ya que pueden manejar cualquier número de componentes, alimentaciones, etapas de proceso, reacciones, y lo que es también importante es de que estos modelos admiten corrientes de entrada en cualquier estado físico (sólido, líquido, gas), así como de corrientes de trabajo y calor.

La forma de alimentar cada uno de los modelos de proceso al Simulador es :

- 1.- Tener un nombre reservado del modelo con el que se caracterizará durante la simulación.
- 2.- El nombre del equipo a modelar, con el que se encuentra identificada la operación en el simulador.
- 3.- Especificación de los parámetros característicos del equipo.

Cada equipo es un modelo que representa las operaciones unitarias involucradas en el proceso. Al alimentar un modelo en éste simulador se generan automáticamente todas las relaciones matemáticas que se pueden derivar de las leyes de la conservación de materia y energía, las relaciones de conexión y puede manejar también ecuaciones de velocidad de reacción y restricciones de diseño que se den por parte del usuario y por el modelo mismo, y las relaciones matemáticas generadas deben ser resueltas para que la operación unitaria pueda ser ejecutada. En la Tab. 3.3, se ilustran los modelos que maneja ASPEN PLUS en su manual de Sólidos.

MANUAL DE SÓLIDOS ASPEN PLUS

MODELOS DE OPERACIONES UNITARIAS

MODELOS	DESCRIPCION	MODELOS	DESCRIPCION
<b>MEZCLADORES Y SEPARADORES</b>		<b>COMPRESORES</b>	
MIXER	MEZCLADOR DE CORRIENTES	COMPR	COMPRESOR
FSPLIT	MEZCLADOR DE CORRIENTES CON VARIAS SALIDAS	MCOMPR	COMPRESOR EN VARIAS ETAPAS
SSPLIT	DIVISOR DE SUBCORRIENTES	<b>MANIPULADOR DE CORRIENTES</b>	
SEP	SEPARADOR	MULT	MULTIPLICADOR DE CORRIENTES
SEP2	SEPARADOR DE PRODUCTOS	DUPL	COPIADOR DE CORRIENTES
<b>CAMBIADORES DE CALOR Y FLASHES</b>		CLCHNG	ESPECIFICACION DE CLASE DE CO- CORRIENTE Y DE SECCIÓN
HEATER	CAMBIADOR DE CALOR	<b>MOLINOS Y TAMICES</b>	
FLASH2	EQUILIBRIO LÍQUIDO-VAPOR	CRUSHER	MOLINO TRITURADOR
FLASH3	EQUILIBRIO VAP-LIQ-LIQ	SCREEN	TAMIZ (SEP. DE PARTÍCULAS)
HEATX	CAMBIADOR DE CALOR ENTRE CORRIENTES DE PROCESO CON EQUILIBRIO DE FASES	<b>SEPARADOR GAS-SÓLIDO</b>	
MHEATX	CAMBIADOR DE CALOR ENTRE CORRIENTES DE PROCESO	FABFL	FILTRO DE BOLSAS
<b>DESTILACION CORTA</b>		CYCLONE	CICLON
DSTWU	DESTILACION CORTA-DISEÑO	VSCRUB	SEPARADOR VENTURY
DISTL	DESTILACION MULTICOM- PONENTE, CORTA-APROX.	ESP	PRECIPITADOR ELECTROSTATICO
<b>DESTILACION RIGUROSA</b>		<b>SEPARADOR LIQUIDO-SOLIDO</b>	
RADFRAC	DESTILACION RIGUROSA	HCCYC	CICLON HIDRAULICO
MULTIFRAC	DESTILACION RIGUROSA, COMPLEJA	CFUGE	CENTRIFUGA
EXTRACT	EXTRACCION LIQ-LIQ	FILTER	FILTRO
ABSBR	ABSORBEDOR	<b>LAVADOR DE SÓLIDOS</b>	
<b>REACTORES</b>		SWASH	LAVADOR DE UN ETAPA
RSTOIC	REACTOR ESTEQUIOMÉTRICO	CCD	LAVADOR DE VARIAS ETAPAS
RYIELD	REACTOR DE PRODUCCIÓN		
REQUL	REACTOR EN EQUILIBRIO		
RGIBBS	REACTOR AL EQUILIBRIO (GIBBS)		
RCSTR	TANQUE CONTINUO		
RPLUG	REACTOR TUBULAR		

Tabla 3.3 Modelos de operación unitaria

## NOTAS:

\* Para el caso de columnas de destilación existen tres modelos los cuales únicamente dos (DSTWU Y DISTL) manejan sólidos. Estos sólidos los maneja como inertes los cuales emigran por la corriente de salida de fondos de la torre. Los sólidos que maneja tendrán la misma temperatura que la fase líquida o gaseosa en la cual van suspendidos, la entalpia de estos será el resultado del balance de calor. Los sólidos no tienen efectos en los cálculos de separación.

\*\* Para el caso de los reactores solamente en el RSTOIC Y el RYIELD se puede especificar los atributos de la corriente de salida, como la distribución del tamaño de partícula.

Los parámetros y especificaciones que manejan estos modelos pueden ser consultados en el manual de sólidos ASPEN PLUS (Ver bibliografía " Aspen Plus User Guide").

## 3.2 MODELOS TERMODINAMICOS

Aquí se especifican los métodos y modelos usados para el cálculo de las propiedades termodinámicas durante la simulación; ASPEN PLUS los llama OPTION SET. Las ecuaciones termodinámicas para el cálculo de propiedades con las que cuenta ASPEN PLUS se muestran en la Tabla 3.4, estos modelos termodinámicos resultan ser un elemento indispensable para que la operación unitaria que se está simulando para que genere resultados lo más cercano posible a la realidad, a partir de una serie de parámetros de información reales introducidos como datos por el usuario, estos modelos termodinámicos generan todas las propiedades termodinámicas y de transporte requeridas para simular las operaciones unitarias así como del dimensionamiento de equipo.

ASPEN PLUS define el modelo preciso para cada una de las operaciones unitarias a simular, gracias a que en éste simulador es posible utilizar modelos con coeficientes de actividad que son calculados por diferentes métodos, por lo que se cuenta con una gran gama de opciones al combinar ecuaciones de estado con modelos de coeficientes.

ASPEN PLUS detecta los ciclos de recirculación, así como las corrientes de corte.

### 3.3 BANCO DE DATOS

En un banco de datos se puede encontrar la información necesaria para caracterizar un compuesto como podría ser el calor estándar de formación, propiedades críticas, peso molecular, etc., toda esta información se encuentra disponible una vez que se ha activado el banco de datos y podrá ser utilizada para el cálculo de propiedades termodinámicas a través de los modelos termodinámicos y de transporte.

ASPEN PLUS versión 8.5-4 cuenta con seis bancos de datos los cuales se enlistan a continuación:

BANCO DE DATOS	No. DE SUSTANCIAS	CARACTERIZACIÓN
ASPENPCD	472	Banco principal de sustancias puras.
DIPPRPCD	766	Desarrollado por "AICHE", sustancias puras.
COMBUST	59	Compuestos típicamente productos de combustión.
SOLIDS	121	Sólidos puros.
BINARY	49	Constantes de Henry para algunos Compuestos.
AQUOUS	262	Parámetros para el cálculo de especies iónicas y moleculares en solución acuosa.

Tabla 3.5. Bancos de Datos

# MODELOS TERMODINAMICOS

## ASPEN PLUS

CLAVE	MODELO TERMODINAMICO	CLAVE	MODELO TERMODINAMICO
<b>MODELO IDEAL</b>		<b>MODELOS CON COEFICIENTES DE ACTIVIDAD</b>	
SYSOP0	IDEAL/LEY DE RAOULT	SYSOP7	REDLICH-KWONG
<b>ESTADOS CORRESPONDIENTES</b>		SYSOP7A	REDLICH-KWONG/LEY DE HENRY
SYSOP1	CHAO-SEADER	SYSOP7B	NOTHNAGEL
SYSOP2	GRAYSON-STREED	SYSOP7C	NOTHNAGEL/LEY DE HENRY
<b>ECUACIONES DE ESTADO</b>		SYSOP7D	HAYDEN-O'CONNELL
SYSOP3	REDLICH-KWONG-SOAVE	SYSOP7E	HAYDEN-O'CONNELL/LEY DE HENRY
SYSOP4	PENG-ROBINSON	SYSOP7L	LIQUIDO-LIQUIDO/REDLICH KWONG
SYSOP5	BWR-LEE-STARLING	<b>VAN LAAR</b>	
SYSOP6	REDLICH-KWONG-ASPEN	SYSOP9	REDLICH-KWONG
SYSOP14	PERTURBED-HARD-CHAIN	SYSOP9A	REDLICH-KWONG/LEY DE HENRY
SYSOP17	LEE-KESLER-PLOCKER	SYSOP9B	NOTHNAGEL
SYSOP18	REDLICH-KWONG-UNIFAC	SYSOP9C	NOTHNAGEL/LEY DE HENRY
<b>MODELOS ESPECIALES</b>		SYSOP9D	HAYDEN-O'CONNELL
SYSOP12	TABLAS DE VAPOR ASME	SYSOP9E	HAYDEN-O'CONNELL/LEY DE HENRY
AMINES	KEINT-EISENBERG	<b>UNIUQAC</b>	
APISOUR	METODO API	SYSOP11	REDLICH-KWONG
SYSOP 15S	NRTL/CORRELACION ASME	SYSOP11A	REDLICH-KWONG/LEY DE HENRY
SYSOP15	NRTL/REDLICH-KWONG-SOAVE/ CORRELACION ASME	SYSOP11B	NOTHNAGEL
SYSOP15M	NRTL/REDLICH-KWONG-SOAVE/ TABLAS ASME	SYSOP11C	NOTHNAGEL/LEY DE HENRY
SYSOP16S	PITZER/CORRELACION ASME	SYSOP11E	HAYDEN-O'CONNELL
SYSOP16	PITZER/REDLICH-KWONG/ CORRELACION ASME	<b>WILSON</b>	
SYSOP16B	PITZER/REDLICH-KWONG/ TABLAS ASME	SYSOP8	REDLICH-KWONG
		SYSOP8A	REDLICH-KWONG/LEY DE HENRY
		SYSOP8B	NOTHNAGEL
		SYSOP8C	NOTHNAGEL/LEY DE HENRY

Tabla 3.4 Modelos Termodinámicos

### 3.4 INTERFASE CON EL USUARIO

El usuario describe el proceso el cual quiere representar en el simulador y lo hace por medio de un lenguaje el cual le permitirá tener acceso al cálculo del balance de materia y energía por medio del simulador. Este lenguaje debe tener la información necesaria del proceso, la cual se encuentra en el diagrama de flujo del proceso (DFP). En ASPEN PLUS esta información puede ser suministrada de dos formas: la primera es mediante la realización de un programa de caracteres ASCII al cual se hace referencia en paginas posteriores como INPUT el cual se puede realizar en cualquier editor o procesador de palabras; la segunda opción es introducir los datos en forma de gráficas y formatos ya hechos, dando una visión gráfica del proceso, puesto que a la vez que se están introduciendo datos se puede visualizar la secuencia de proceso en el diagrama de flujo de proceso.

ASPEN PLUS cuenta con varios manuales para un mejor aprendizaje del usuario y de acuerdo al tipo de proceso se pueda hacer uso ellos, los cuales se mencionan a continuación:

- ASPEN PLUS User Guide: Necesario para el aprendizaje del simulador y primeras lecciones de éste, conteniendo procesos líquido-vapor típicos.
- ASPEN PLUS Electrolytes Manual: Este manual contiene la información necesaria para la simulación de procesos en donde intervienen electrolitos en solución acuosa y no acuosa.
- ASPEN PLUS Solids Manual: En él se encuentran todos los aspectos que se deben considerar tanto en equipos como en el manejo de corrientes cuando en el proceso se manejen sólidos.

- **ASPEN PLUS Interactive Simulation:** En él se encuentra la información necesaria para el manejo de la forma interactiva en la simulación.
- **ASPEN PLUS Data Regression Manual:** Se trata de una guía completa para el manejo del sistema de regresión lineal que maneja ASPEN PLUS.
- **ASPEN PLUS Guide to Physical Properties:** Es una Guía en el usuario avanzado en el cálculo y uso de propiedades.
- **ASPEN PLUS Costing Manual:** Aquí se encuentra la información necesaria para el sistema de costos, así como su simulación y reporte.
- **ModelManager and Aspen Plus, Instalation and reference for the PC:** Aquí se encuentra la información necesaria para la instalación del simulador y la configuración de la PC.
- **ModelManager Getting Started and Tutorials for the PC:** Inicia al usuario en el uso del ModelManager a través de tutoriales.
- **ASPEN PLUS Notes on Interfaces and User Models:** Aquí se encuentra la información necesaria para que el usuario pueda introducir subrutinas en lenguaje Fortran, y en que casos se deban usar.
- **ASPEN PLUS Stream Libraries and insert libraries:** Describe como usar la biblioteca de corrientes para almacenar información entre diferentes corridas de una misma simulación.

### 3.5 SOPORTE COMPUTACIONAL

El Hardware con que se cuenta para la elaboración de éste trabajo se encuentra en el laboratorio de Simulación y Optimización de Procesos ubicado en el edificio "E" de la Facultad de Química.

El Hardware consiste de :

- 1.- Computadora personal de procesador 486 compatible con IBM.
- 2.- De 8-10 Mb de memoria extendida.
- 3.- Un mínimo de 20 MB de espacio en disco duro.
- 4.- 640 KB de memoria extendida.
- 5.- Un coprocesador matemático 803087 o equivalente.
- 6.- Un puerto en paralelo.
- 7.- Un mouse para utilizar el sistema gráfico.

El Software con el que se cuenta se puede dividir en dos partes que son: El sistema operativo (El sistema operativo instalado es la versión 6.0) y los programas que conforman el Simulador.

Los programas que integran al Simulador son:

- \* ASPEN PLUS para computadora 386, con todas las rutinas que se requieren para llevar acabo la simulación.
- \* ModelManager que es una Interfase con el usuario, el cual es un sistema gráfico que permite introducir todos los datos para la ejecución de la simulación.
- \* Programas y compiladores exclusivos como el NDP-FORTRAN, Phar Lap 386 / ASM / 386 / LINK y el DUS extender.

## **CAPITULO 4**

### **CEMENTO**

No se tiene idea desde cuando se descubrió y se utilizó por primera vez un material aglomerante, probablemente esto se utilizó después del primer uso inteligente del fuego. Se creó que el hombre primitivo encendió fuego en un hoyo rodeado por piedra caliza o yeso, entonces el calor descarbonata y deshidrata una parte de las piedras, que caen convertidas en polvo y los trozos de piedra quedan solidamente unidos formándose así la primera mampostería. Los Egipcios, Asirios y Griegos emplearon éste material, en México las primeras culturas también lo utilizaron aunque con algunas desventajas.

El Cemento Portland atribuido al Inglés Joseph Aspdín quien lo patentó en 1824 con éste nombre por su similitud con una piedra natural que se obtenía en las canteras de la Isla de Portland, en aguas Inglesas. Desde esta fecha el proceso de elaboración de cemento a sufrido varias modificaciones con el fin de mejorar el proceso y así obtener mejores resultados en la calidad del Cemento.

Cementos Tolteca junto con Cementos Hidalgo, S.A. en Hidalgo Nuevo León y Cruz Azul establecida en Jasso en el Edo. de Hgo. fueron las primeras fábricas de cemento establecidas en México.

El grupo Tolteca fundado en México en el año de 1909, el que rápidamente aumentó la demanda de Cemento por lo que se empezó un proyecto de ampliación y en 1960 empezó a operar cementos Tolteca, Planta Atotonilco quien en la actualidad contribuye al rápido desarrollo de la industria de la construcción elaborando Cemento Tipo-I y Cemento Puzolánico C-2. Cementos Tolteca situada estratégicamente en el Edo. de Hgo. debido a que en esta región abunda la piedra caliza y la arcilla las cuales son las materias primas principales para la elaboración del cemento (Ver bibliografía Curso de tecnología del cemento, Manual de capacitación y adiestramiento).

#### 4.1. DESCRIPCION DEL PROCESO

Las materias primas utilizadas para la elaboración del cemento se obtienen de la cantera que se encuentra de lado oeste de la planta a 1.2 km. aproximadamente, ubicada en el cerro llamado "XOYATLA", de ésta cantera se extraé la piedra caliza; en el caso del barro (arcilla) este se extraé de la cantera ubicada también en el lado oeste de la planta a unos 800 mts. Para el caso del mineral de fierro, la puzolana y el yeso estos llegan a la planta por medio de camiones.

La caliza proveniente de cantera con tamaños de piedra que oscilan en 42", existe una variación considerable en el tamaño de estas piedras, pues es difícil controlar la explosión (barrenado en canteras) para que salgan piedras de un mismo tamaño, ésta caliza es transportada por camiones Haulpack de volteo de una capacidad de 35 toneladas, los cuales depositan el material en la tolva para ser reducida de tamaño en la trituradora primaria (quebradora de pilón). El tamaño máximo de entrada de piedra es de 42" y de salida de un tamaño máximo de 5". La piedra caliza que sale de la trituradora primaria es transportada por medio de bandas a la siguiente etapa de trituración. En la trituradora secundaria (quebradora de martillos) se logra reducir el tamaño de 5" a un poco más de 2", ésta piedra es transportada por una banda para poder ser trasladada hasta la tercera etapa de trituración (quebradora de martillos); aquí la caliza mayor de 2" es triturada junto con la proporción correcta de arcilla. La arcilla que también es traída de cantera y depositada en la tolva respectiva. Los finos de caliza, separados previamente por un tamiz, son añadidos junto con el óxido de fierro después de la trituradora terciaria, las proporciones tipo con las que se hace esta mezcla son:

Mezcla:	78 % Caliza.
	20.5 % Arcilla
	1.5 % Fierro.

El material una vez mezclado se va apilando es decir se van haciendo montones de éste material, una pila (montón de mezcla arcilla, caliza, fierro) consta de 25 000 toneladas ( fase de prehomogeneización). Este material es recogido por el reclaimer y enviado por banda transportadora hasta los molinos de crudo. Antes de entrar al molino el material pasa por una cámara en donde se alcanza unas temperaturas de 310 ° C ayudados por un quemador, que se encuentra en la entrada al molino de crudo, con el fin de secar el material, posteriormente pasa al molino de crudo (molino de bolas) en donde se alcanza una finura de *FIN M-200 78*.

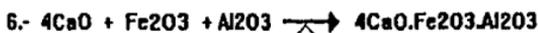
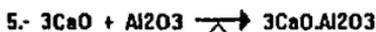
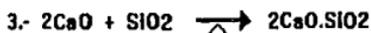
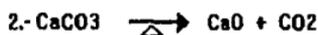
A la salida del molino de crudo se deben cumplir tres factores que nos sirven como parámetros para obtener una composición deseada en el clinker y cemento producidos (Ver bibliografía "Curso de tecnología del cemento, manual de capacitación y adiestramiento").

$$FSC= 98$$

$$S/R = 2.5$$

$$A/F = 1.7$$

El crudo obtenido de molinos se envía a silos de homogeneización por medio de una bomba neumática. Existen dos secciones de almacenamiento, los silos "A" y los silos "B". Después de aquí el crudo ( mezcla de caliza, arcilla, barro finamente molidos), es calentado por efecto de los gases calientes de salida del horno, logrando así una deshidratación, pues en ésta etapa de precalentamiento se alcanzan temperaturas de unos 800 °C; de aquí el crudo entra al horno en donde alcanza temperaturas de 1400 °C. Una vez en el horno, el crudo va avanzando por efecto de la rotación y de la inclinación de éste, en cuanto el crudo entra al horno se inicia el proceso de calcinación donde el crudo se somete a elevadas temperaturas, que originan reacciones químicas, las cuales se mencionan a continuación:



la mezcla de los productos de estas reacciones dan lugar a la formación del "clinker". Estas reacciones se efectúan a una temperatura de 1,400 ° C., Para alcanzar dichas temperaturas dentro del horno, se cuenta con quemadores de combustóleo. El clinker producido aquí se conduce a una cámara de enfriamiento, con varios compartimentos, en donde el clinker es enfriado de unos 1000 ° C a unos 130 ° C, lo cual se logra inyectando aire del ambiente por medio de ventiladores, parte de éste aire que se calienta por contacto con el clinker es aprovechado para la combustión, la otra parte se pasa a través de un enfriador y se desaloja por la chimenea con una temperatura de unos 120 °C. El clinker es transportado a los molinos de cemento por medio de bandas metálicas que, antes de entrar a estos molinos de cemento (molinos de bolas) el clinker es dosificado con yeso ( para regular el fraguado ) para el caso del cemento tipo I, para el caso del cemento puzolánico se le agregan a las dos materias primas antes mencionadas la arena volcánica denominada "puzolana" ( este material contribuye a aumentar resistencias mecánicas ).

Las proporciones con las que se agrega el yeso y la puzolana al clinker son:

#### **CEMENTO TIPO I**

**CLINKER = 95-96 %**

**YESO = 4-5 %**

#### **CEMENTO C-2**

**CLINKER = 71-74 %**

**YESO = 4-5 %**

**PUZOLANA = 22-24 %**

## DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE CEMENTO

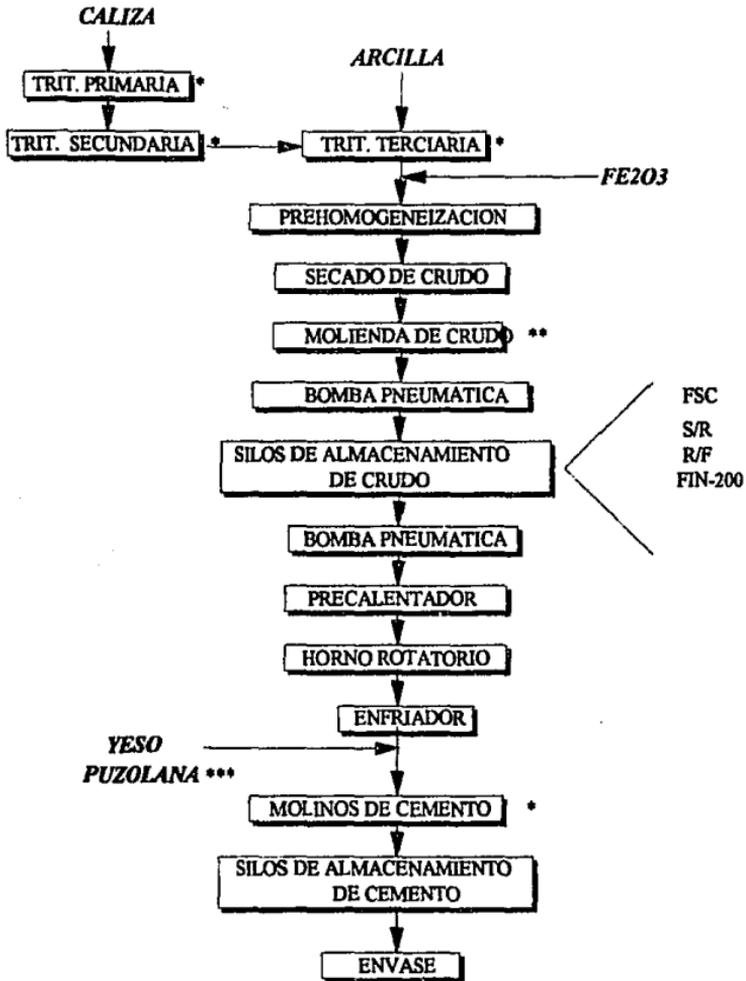


Fig. 4.1 Diagrama de bloques del proceso de elaboración de cemento

### NOTAS:

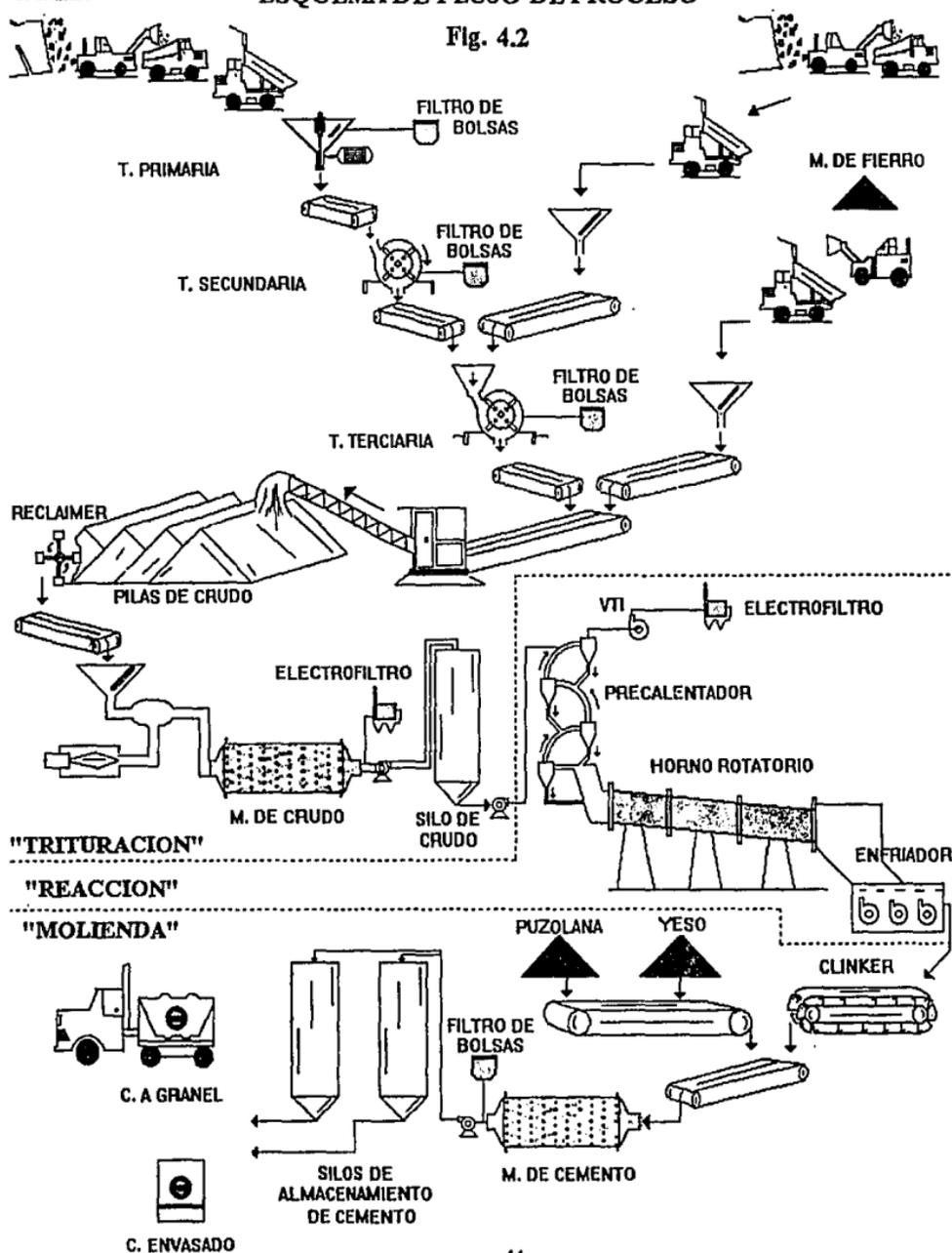
- \* CUENTA CON EQUIPO DE PROTECCION AMBIENTAL, FILTRO DE BOLSAS.
- \*\* CUENTA CON EQUIPO DE PROTECCION AMBIENTAL, FILTRO ELECTROSTATICO.
- \*\*\* SE AGREGA PUZOLANA PARA EL CASO DE CEMENTO TIPO C-2, 22-24 % DEL CLINKER

C. CALIZA

# ESQUEMA DE FLUJO DE PROCESO

C. ARCILLA

Fig. 4.2



El clinker con yeso y con o sin puzolana una vez molido, con una FIN 325 M ( finura en malla 325, con tamaños de 45 micras), es el cemento propiamente dicho, el cual se envía por banda transportadora a los silos de almacenamiento. De los silos de almacenamiento el cemento es envasado en sacos de 50 kg. o enviado a granel , en camión o en ferrocarril, según su destino.

En la Fig. 4.2 se muestra el diagrama de flujo de proceso seguido del diagrama de bloques del proceso Fig.4.1. En el apéndice se dan las propiedades de cada uno de los Cemento T-I y C-2..

## 4.2 MICROSCOPIA

Se ha encontrado que la calidad del cemento no depende unicamente de la composición sino que además depende de la estructura cristalina que presente el Clinker. corresponde a la Microscopía analizar al Clinker, el análisis Microscópico del Clinker es una técnica que se utiliza para estudiar las fases mineralógicas del Clinker y la relación que tiene con la etapa de enfriamiento del Clinker (Ver bibliografía "curso de tecnología de cemento, manual de capacitación y adiestramiento").

La técnica Microscópica utilizada en éste análisis se conoce como "Sección Pulida" en la cual se utilizan como muestra gránulos completos o ligeramente triturados del Clinker impregnados en una resina los que estan cortados y pulidos para ser analizados con luz reflejada y en el que se observan los tamaños de los cristales, así como de la distribución de cada una de las fases del Clinker.

El método de "Sección Pulida", se puede determinar el tamaño de los cristales y observar su forma y la distribución de las cuatro fases principales del Clinker: Alita (C3S), Belita (C2S), Aluminato Tricálcico (C3A) y Ferrita (C4AF), así como de la cal libre y MGO (Periclasa), además es posible cuantificarlas.

Las características microscópicas de las fases del Clinker observadas en Sección Pulida son las siguientes:

**ALITA:** Su forma cristalográfica es siempre hexagonal, cuando la velocidad de enfriamiento es muy lenta, la Alita se puede revertir en Belita y Cal libre, y sobre todo los cristales de baja temperatura debida a su inestabilidad, su tamaño oscila entre 15 y 25  $\mu$ .

**BELITA:** Se presenta en forma redonda, con bordes lisos o rugosos. Cuando el material crudo principalmente los materiales arcillosos o con cuarzo no a sido adecuadamente molido y/u homogeneizado, los cristales de Belita se observan agrupados formando claustros. Su tamaño oscila entre 25 y 40  $\mu$ .

**FASE LIQUIDA:** Formada por Ferrita y Aluminato, cristaliza durante la etapa de enfriamiento, por lo tanto del tamaño que presentan los cristales puede estimarse la velocidad de enfriamiento. Si el enfriamiento a sido rápido los cristales de ambas fases son muy pequeños y apenas diferenciados unos de otros, y si el enfriamiento es lento la fase es bien diferenciada y los cristales son de gran tamaño. La Fase líquida se observa de color blanco.

**CAL LIBRE:** Se observa como cristales redondos de color negro, generalmente son cristales pequeños; si la Caliza no es adecuadamente molida y/u homogeneizada la cal libre puede encontrarse formando claustros ésto ocurre cuando los cristales de Caliza miden hasta 120  $\mu$ .

**MGO: (Periclasa)** Se observa como cristales cúbicos generalmente de un color rosáceo, sobre relieve, es decir, al observarlo se tienen que enfocar solamente los cristales. El tamaño de los cristales depende de la velocidad de enfriamiento. Puede aparecer dispersa o formando claustros.

Como se puede observar en las fotografías de la 1 a la 7 la Periclasa no se observa esto se debe a que el  $MgCO_3$  máximo que se tiene como guía es del 1% en peso debido a las propiedades de expansión que aporta éste compuesto al cemento. El  $MgCO_3$  no tiene ningún efecto en el cemento, pero descarbonatado (a lo que se llama Periclasa), origina los efectos ya explicados.

En la Tabla 4.3 se dan los valores óptimos para que un clinker tenga una formación cristalográfica apropiada.

COMPUESTO	PARAMETRO	VALOR OPTIMO
Alita	Rango de tamaño	15-25 $\mu$
	Vel. de calentamiento	Rápida
Belita	Rango de tamaño	25-40 $\mu$
	Tiempo de cocción (a 1400° C o más )	Prolongado
	Vel. de enfriamiento	Rápida

Tabla. 4.3 Valores óptimos de los parámetros operativos

### 4.3 TEORIA DE BOGUE

Debido a la dificultad que existe en la determinación exacta de todos y cada uno de los componentes del clinker ( clinker, producto de hornos, mezcla de  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  y el CAO no combinado, pues el  $\text{CaCO}_3$  se agrega en exceso; todos estos como componentes principales ). El crudo que entra a los hornos posee 5 componentes principales: CAO, MGO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ .

Las correlaciones de Bogue son muy importantes y frecuentemente usadas como indicadores de las propiedades químicas del clinker. La norma oficial mexicana considera estas correlaciones para determinar la composición del clinker.

*Consideraciones del análisis de Bogue:*

(Ver bibliografía "Cement Chemistry" de Taylor).

- " Asume que las cuatro fases de composición mayores las ocupa:  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ .

- " Asume que el  $FE_2O_3$  reacciona con la  $AL_2O_3$  y con la CAO para formar  $C_4AF$ .
- " La  $AL_2O_3$  que queda de la combinación al formarse el  $C_4AF$  reacciona con la CAO para formar  $C_3A$ .
- " La CAO reacciona con la Sílice, se forma primero  $C_2S$  y la CAO que queda, reacciona con el  $C_2S$  para formar  $C_3S$ . Si después de convertirse todo el  $C_2S$  en  $C_3S$  queda todavía algo de CAO, este permanece sin combinarse.
- " La MGO permanece esencialmente sin combinarse.

Dahl da una secuencia de cálculo aplicando los principios de Bogue, y ha deducido ecuaciones sencillas por las cuales los diversos compuestos en el sistema de tres componentes C-A-S o en el de cuatro componentes C-A-F-S, se pueden determinar directamente de los análisis químicos de los óxidos componentes (Ver bibliografía "La química del cemento" de Bogue).

Sabiendo que el clinker posee cuatro componentes esenciales, para los cuales se les hace un análisis de porcentos en peso de la siguiente manera:

	$C_3S (\alpha)$	$C_2S (\beta)$	$C_3A (\gamma)$	$C_4AF (\delta)$
( a ) CAO	0.7369	0.6512	0.6227	0.4616
( b ) $SiO_2$	0.2631	0.3488	---	---
( c ) $AL_2O_3$	---	---	0.3773	0.2098
( d ) $FE_2O_3$	---	---	---	0.3286

Analizando la tabla anterior, demuestra que el CAO se encuentra en un 73.69 % en peso del  $C_3S$ , y lo demás es  $SiO_2$ ; al igual el  $C_2S$  posee un 65.12 % en peso de CAO y un 34.88 % en peso de  $SiO_2$  y así sucesivamente. Rearreglando se llega a las siguientes ecuaciones:

$$a = 0.7369 \alpha + 0.6512 \beta + 0.6227 \gamma + 0.4616 \delta..$$

$$b = 0.2631 \alpha + 0.3488 \beta$$

$$c = 0.3773 \gamma + 0.2098 \delta$$

$$d = 0.3286 \delta$$

Despejando  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ .

$$\alpha = 4.071 a - 7.6024 b - 6.7187 c - 1.4297 d$$

$$\beta = -3.0710 a + 8.6024 b + 5.0683 c + 1.0785 d$$

$$\gamma = 2.6504 c - 1.6920 d$$

$$\delta = 3.0432 d$$

De las ecuaciones anteriores se determinan las ecuaciones de Bogue, para el caso en que el factor A/F es mayor o menor de 0.64 que es el límite en el cual el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alcanza para producir o no el C3A.

Asumiendo que el SO<sub>3</sub> está presente como sulfato de calcio (CASO4) se debe hacer la siguiente consideración:

$$\frac{\text{CAO (pm. 56.8)}}{\text{SO}_3 \text{ (pm 80.06)}} = 0.7$$

Para A/F > 0.64

$$\text{C3S} = 4.0710 \text{ CAO} - 7.6024 \text{ SIO}_2 - 1.4297 \text{ FE}_2\text{O}_3 - 6.7187 \text{ AL}_2\text{O}_3 - 2.852 \text{ SO}_3$$

$$\text{C2S} = 8.6024 \text{ SIO}_2 + 1.0785 \text{ FE}_2\text{O}_3 + 5.0683 \text{ AL}_2\text{O}_3 - 3.0710 \text{ CAO}$$

$$= 2.8675 \text{ SIO}_2 - 0.7544 \text{ C3S}$$

$$\text{C3A} = 2.6504 \text{ AL}_2\text{O}_3 - 1.6920 \text{ FE}_2\text{O}_3$$

$$\text{C4AF} = 3.0432 \text{ FE}_2\text{O}_3$$

Considerando que los cálculos realizados con las fórmulas de Bogue, dan solamente la composición potencial del clinker; pues esta composición del clinker depende considerablemente de la temperatura de calentamiento en el horno y de las condiciones que se dan en el enfriamiento. Cambios en la rapidez de enfriamiento o temperatura de calcinación pueden modificar considerablemente la composición alcanzada en el clinker.

A continuación se da el porcentaje de composición potencial que arroja la teoría de Bogue (The Rotary Cement Kiln):

C3S	61.8 %
C2S	15 %
C3A	8.73 %
C4AF	10.04 %

Para corroborar esta composición potencial, considerando datos reales, ayudados por el análisis microscópico se realizó el siguiente análisis:

- 1.- Se seleccionaron fotos microscópicas de un tamaño de 100 y 200  $\mu$ .
- 2.- De la selección anterior se busca de entre estas fotos aquellas que contengan los componentes esenciales: Alita (C3S), Belita (C2S), Fase Líquida (C3A + C4AF) y cal libre (CAO), con el fin de tener porcentajes de los componentes del clinker.
- 3.- Se realiza un encuadrado que ocupe toda el área de la fotografía, con el fin de sacar un área total de la fotografía.
- 4.- Se identifican todos y cada uno de los cristales de acuerdo con la forma, tamaño y color de éstos, y se determina el número de cuadros que ocupa el área del cristal, sacando así un área total por cada uno de los componentes.

Los resultados obtenidos de éste análisis se pueden consultar en la columna de cuadros 'A" y "B" en la sección de análisis de resultados, en donde se hace referencia a las fotos de estudio, y cuyos resultados se aprecian en la Fig. 4.3.

### *Relaciones de Bogue modificadas*

De los resultados obtenidos, las relaciones de Bogue quedan modificadas con factores poco diferenciados de los reales, de tal manera que éstas relaciones tendrán los siguientes factores

Para  $A/F > 0.64$

$$C3S = 4.1895 \text{ CAO} - 7.8238 \text{ SIO}_2 - 1.4713 \text{ FE}_2\text{O}_3 - 6.9143 \text{ AL}_2\text{O}_3 - 2.935 \text{ SO}_3$$

$$C2S = 9.17 \text{ SIO}_2 + 1.15 \text{ FE}_2\text{O}_3 + 5.4 \text{ AL}_2\text{O}_3 - 3.27 \text{ CAO}$$

$$= 3.058 \text{ SIO}_2 - 0.8047 \text{ C3S}$$

$$C3A = 2.53 \text{ AL}_2\text{O}_3 - 1.60 \text{ FE}_2\text{O}_3$$

$$C4AF = 3.031 \text{ FE}_2\text{O}_3$$

FOTOGRAFIAS DE ESTUDIO

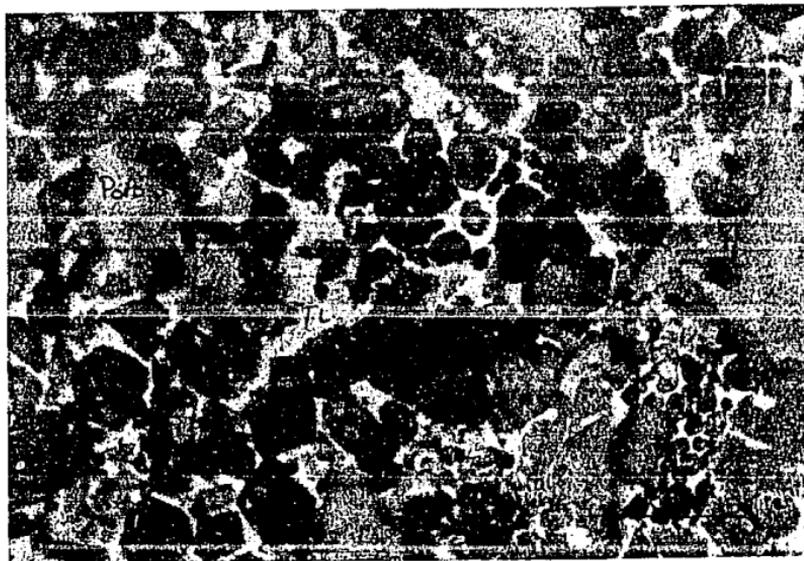


FOTO No. 1

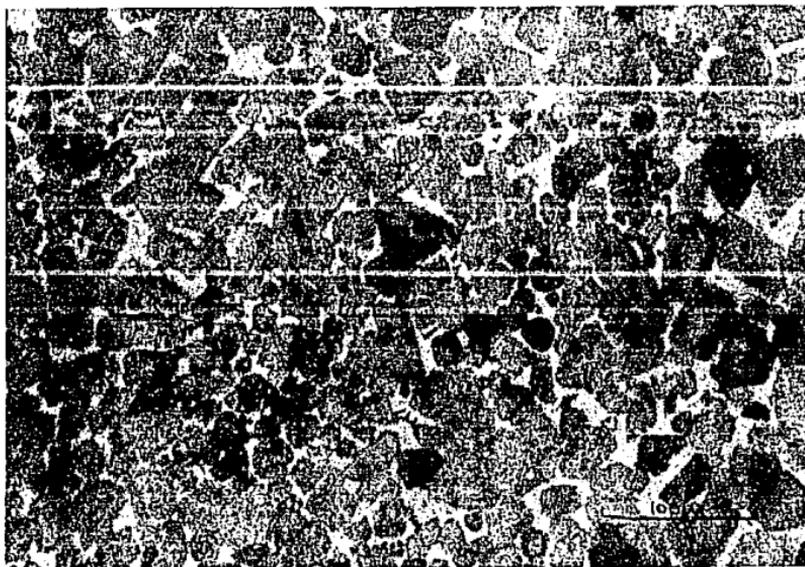


FOTO No. 2

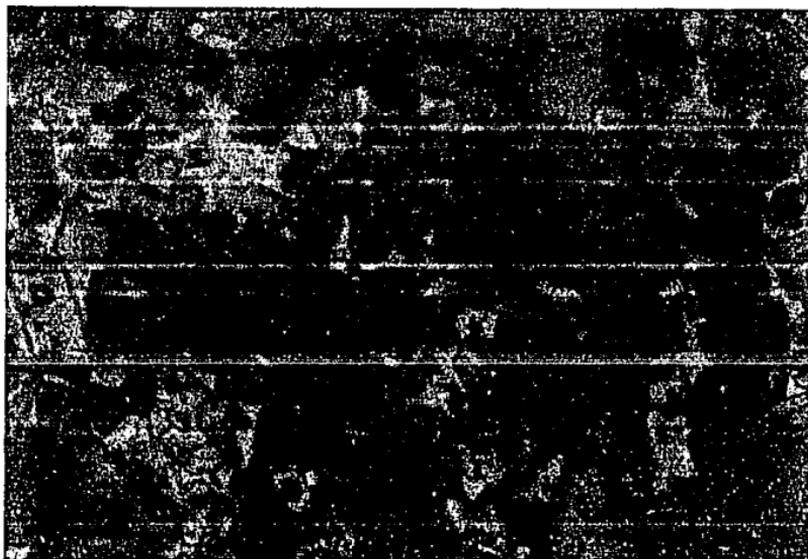


FOTO No. 3

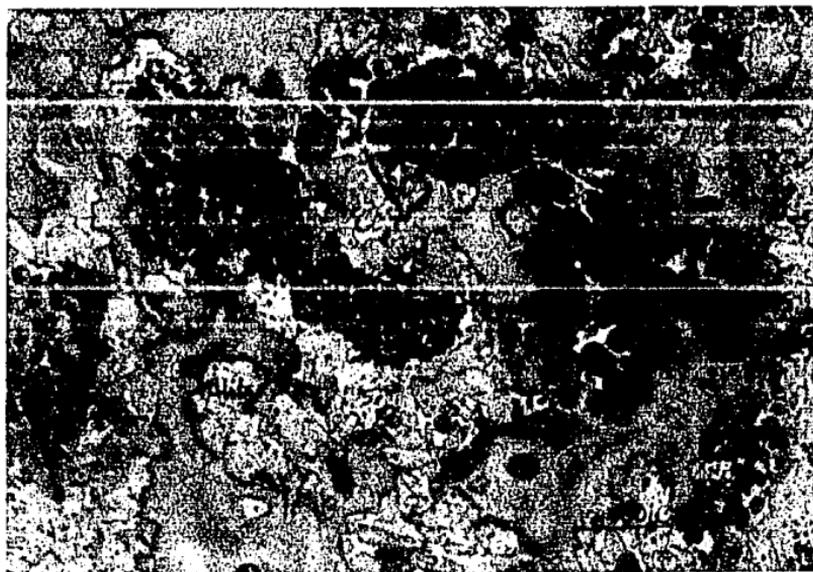


FOTO No. 4

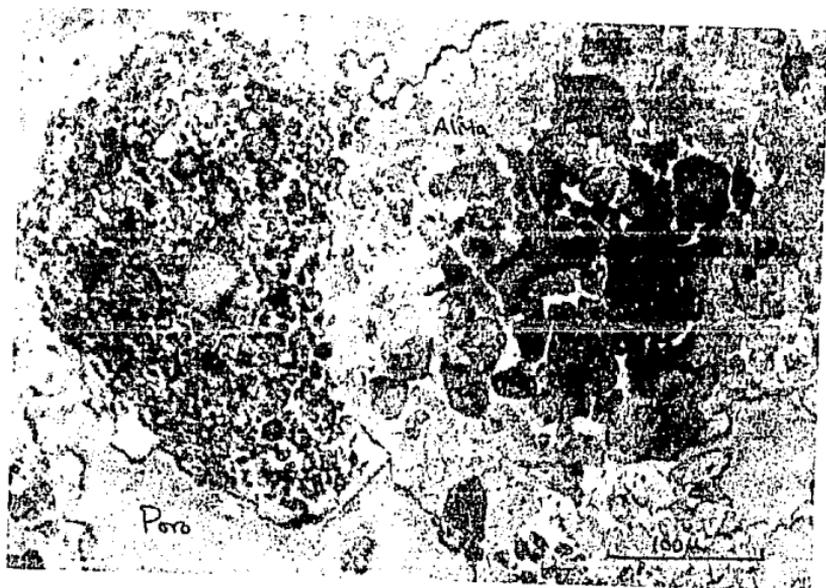


FOTO No. 5



FOTO No. 6



FOTO No. 7

## **CAPITULO 5**

### **SIMULACION DEL PROCESO DE ELABORACION DE CEMENTO**

En la mayoría de las simulaciones que se llevan a cabo se manejan fases líquidas y gaseosas y solamente la fase sólida forma parte del proceso en una o dos corrientes, pero pocas son las veces en que se simula todo un proceso en donde se tenga una sola fase, la fase sólida.

La simulación con sólidos implica tener en consideración algunos aspectos que no se toman en cuenta cuando se trabaja con otra fase (líquida o gaseosa), como pueden ser: La distribución del tamaño de partícula, el tipo de subcorriente que se está manejando etc., como es de esperarse también se manejan equipos que manejan única y exclusivamente sólidos como son los Crushers (molinos), Colectores de polvo, Screen (tamíz) etc., esto es debido a que los modelos termodinámicos que maneja cada módulo de operación encuentra la solución correcta cuando maneja sólidos y no otra fase.

El propósito de éste trabajo no es la de optimizar el proceso, sino como una representación del proceso, en donde se trabaje con datos reales y donde se consideren los factores que son importantes para una buena calidad en el Clinker y la importancia de conocer el comportamiento del proceso cuando alguno de estos factores que se listan a continuación se ve modificado.

- Modificación del flujo másico de las materias primas.
- Un cambio en el tamaño de partícula del crudo que entra al horno.
- Composición de las materias primas.
- Tamaño máximo de partículas.
- Eficiencia del equipo de protección ambiental.
- El cambio en la composición química del cemento cuando se modifican alguno de los factores A/F, S/R, FSC.
- Composición química del cemento.

En éste trabajo se lleva a cabo la simulación del proceso de elaboración de Cemento T-I y Cemento tipo C-2, debido a que la planta de cemento Tolteca elabora estos dos tipos de Cementos.

Como se verá después el proceso para elaborar Cemento T-1 y C-2 son casi el mismo, con la única diferencia de que en el Cemento Puzolánico tipo C-2, se le agrega una corriente adicional a la corriente de Clinker y Yeso; ésta corriente se llama Puzolana. La Puzolana son cenizas de origen volcánico que contribuyen a aumentar resistencias mecánicas y que le da propiedades de resistencia hidráulica al cemento.

### 5.1 UNIDADES (IN-UNITS, OUT-UNITS)

Lo más conveniente para la selección de las unidades es utilizar aquellas unidades en las que se dispone la mayor parte de la información del proceso de elaboración de Cemento. ASPEN PLUS maneja tres sistemas de unidades que son : el Sistema Métrico (MET), Sistema Internacional (SI), y el Sistema de Ingeniería (ENG). El Sistema de unidades elegido para éste trabajo fué el Sistema Métrico con algunas diferencias debido a que la información disponible se encontraba en estas unidades, esto se logró gracias a que en ASPEN PLUS se pueden definir las unidades a utilizar para una variable específica. El cambio de unidades se muestra en la Tab. 5.1.

PARAMETRO	SISTEMA METRICO (MET)	CAMBIO A
Temperatura	°F	°C
Presión	ATM	MMHG
Flujo Másico	KG/HR	Toneladas/ Hora
Longitud	Metro	Pulgadas y Micras
Flujo de Entalpia	CAL/SEG	KCAL/HR
Entalpia Molar	CAL/MOL	KCAL/MOL
Capacidad Calorífica	CAL/MOL °K	KCAL/MOL °K

Tabla 5.1 Cambio de unidades

No	TAMAÑO	CALIZA	ARCILLA	FIERRO	YESO	PUZOLANA	(*)	(*)	2	5	20
							CEMENTO T-I	CEMENTO C-2			
1	45 $\mu$	0.7	1.1	14	5	5	60	1.00	0.96	1	2
2	55 $\mu$	0.6	0.85	12	6	6	40	---	1	2	1.2
3	75 $\mu$	0.6	1.15	13	3	3	---	---	1.28	1.2	1.2
4	100 $\mu$	0.9	1.1	18	11	12	---	---	0.8	1.3	5.1
5	250 $\mu$	0.62	1.06	12	9	9	---	---	0.2	1.2	8
6	1000 $\mu$	0.2	10.2	10	10	10	---	---	0.5	0.9	11
7	5000 $\mu$	0.1	10.5	11	12	12	---	---	0.9	3	11.1
8	3/8 IN	1	12	3	10	7	---	---	1	1	2
9	1/2 IN	2	11	4	11	11	---	---	1	4	2.1
10	3/4 IN	0.1	10.5	3	7	7	---	---	1	2.1	1.1
11	1.0 IN	1	5	---	6	8	---	---	1.2	1.3	5
12	1.5 IN	2	9	---	5	5	---	---	1.3	11	20
13	2.0 IN	2.68	10	---	5	5	---	---	1.1	18	25
14	2.5 IN	2	7.54	---	---	---	---	---	2	9	1.2
15	3.0 IN	0.2	9	---	---	---	---	---	5	10	4
16	4.0 IN	0.1	---	---	---	---	---	---	4	17	---
17	5.0 IN	8.5	---	---	---	---	---	---	10	16	---
18	10.0 IN	11	---	---	---	---	---	---	9	---	---
19	15.0 IN	19	---	---	---	---	---	---	15.66	---	---
20	20.0 IN	21	---	---	---	---	---	---	11	---	---
21	25.0 IN	18	---	---	---	---	---	---	13	---	---
22	30.0 IN	6.5	---	---	---	---	---	---	17	---	---
23	42 IN	1.2	---	---	---	---	---	---	11	---	---

Tabla 5.2 Distribución del tamaño de partícula de las corrientes de proceso y corrientes de corte especificadas

NOTA:

(\*) Para fines prácticos se utilizan estos valores, pero la especificación exacta es:

CEMENTO T-I    FIN M-350 (55  $\mu$ )            83%

CEMENTO C-2    FIN M-350 (45  $\mu$ )            92%

No.	TAMAÑO	26	37I	37A	37E	42
1	45 $\mu$	42	56.18	61.26	60.17	1.04
2	55 $\mu$	23	20.33	18.05	18.56	2.5
3	75 $\mu$	21	23.48	20.68	21.26	2.1
4	100 $\mu$	14	—	—	—	1.25
5	250 $\mu$	—	—	—	—	1.16
6	1000 $\mu$	—	—	—	—	8.1
7	5000 $\mu$	—	—	—	—	7.64
8	3/8 IN	—	—	—	—	6.9
9	1/2 IN	—	—	—	—	10.23
10	3/4 IN	—	—	—	—	11.01
11	1.0 IN	—	—	—	—	12.54
12	1.5 IN	—	—	—	—	10.05
13	2.0 IN	—	—	—	—	12
14	2.5 IN	—	—	—	—	6.3
15	3.0 IN	—	—	—	—	5.08
16	4.0 IN	—	—	—	—	—
17	5.0 IN	—	—	—	—	—
18	10.0 IN	—	—	—	—	—
19	15.0 IN	—	—	—	—	—
20	20.0 IN	—	—	—	—	—
21	25.0 IN	—	—	—	—	—
22	30.0 IN	—	—	—	—	—
23	42 IN	—	—	—	—	—

Debido a que en la distribución del tamaño de partículas se habla de longitudes que van desde 42 Pulgadas hasta 45 Micras, se hace referencia a estas unidades (Pulgadas y Micras) durante el proceso de simulación; en la Tabla B-1 que se encuentra en el apéndice, se da la equivalencia entre estas unidades.

En la Tabla 5.2 se da la distribución del tamaño de partícula de las corrientes de proceso y corrientes de corte especificadas.

NOTA : Para el caso de la corriente CALIZA, se tomó un promedio en la distribución del tamaño de partícula, pues en esta corriente no se realiza un tamizado debido a que aquí existen tamaños máximos de piedra de 42", esto es por que no se puede controlar el tamaño, pues ésta piedra se extrae de cantera ayudados por explosiones de dinamita.

## 5.2 COMPONENTES (COMPONENTS)

De acuerdo a los componentes que se manejan en el proceso que se va a simular se especificará el banco de datos del cual se obtendrán las propiedades para caracterizar al compuesto.

En esta etapa de la simulación se especifican todos los componentes que se manejarán en la simulación y que se encuentran especificados en el banco de datos de sólidos (Solids Data Bank) como son:  $\text{CaCO}_3$ -2 (Cálcita), CAO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -2 (Alúmina),  $\text{SiO}_2$  (Sílice),  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , y MGO (Periclasa) por lo que para la especificación de estos compuestos no hubo ningún problema.

Para saber todas las propiedades termodinámicas que se encuentran caracterizando un compuesto se puede consultar el Apéndice "A" del simulador ASPEN PLUS que se encuentra en el Laboratorio de Simulación y Optimización de procesos del edificio "E" de la Facultad de Química.

Para el caso del AIRE, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (no especificada), se especifica el banco de datos DIPPRPCD porque aunque anteriormente se mencionó que la fase sólida era la única fase que se manejaba en éste trabajo fué necesario introducir el aire debido a que el colector de polvo (Filtro de Bolsa, FABFL) maneja dos fases; la fase sólida y la fase gaseosa, para la operación de éste equipo; éste aire introducido no afecta en nada al proceso y sale inmediatamente después, en la corriente gaseosa del colector de polvo.

El CO<sub>2</sub> surge como un producto de reacción en la combustión realizada en el horno para el caso de la descarbonatación del CaCO<sub>3</sub>-2 y el MgCO<sub>3</sub>.

En el caso del H<sub>2</sub>O, éste compuesto no se introduce en ninguna de las corrientes de entrada por varias razones, las cuales se mencionan a continuación:

- El agua que forma parte de las corrientes de entrada al proceso entra como humedad, es decir, no entra como agua de combinación.
- La humedad de las corrientes de proceso es pequeña y no interviene en nada en el proceso.
- Para introducir el agua como humedad es necesario definir otra subcorriente en las corrientes de entrada. (subcorriente MIXED).
- Resultaría ilógico introducirla, debido a que en la mayoría de equipos que se manejan, estos manejan sólidos y no aceptan otra subcorriente.

El C3S, C2S, C4AF, C3A, surgen como productos de reacción, estos compuestos no se encuentran caracterizados en el banco de datos de sólidos, por lo que se introdujeron algunas propiedades termodinámicas para su caracterización, las propiedades que se introdujeron se ilustran en la Tabla B-2 del Apéndice.

El C3S, C2S, C4AF, C3A, son los compuestos principales que forman el Clinker.

Una vez que el Clinker se ha formado se mezcla con otras materias primas con el fin de darle al cemento ciertas propiedades hidráulicas y de fraguado. La corriente de YESO lleva consigo un compuesto que tampoco se encuentra caracterizado en el Banco de Datos de Sólidos que es el CASO4.2H2O (Sulfato de Calcio Dihidratado), por lo que para éste compuesto también se dieron algunas de sus propiedades termodinámicas.

### 5.3 MODELOS TERMODINAMICOS (PROPERTIES)

Esta etapa es de gran importancia pues de esto depende que los resultados sean confiables. En ASPEN PLUS existen 44 OPTION SETS disponibles. La OPTION SET más frecuentemente usada y recomendada con sólidos es SYSOP0, la cual utiliza la ley de Hess para el cálculo de formación, la ecuación de capacidad calorífica en función de la temperatura, y también utiliza las ecuaciones del gas ideal para las propiedades en fase vapor, la Ley de Raoult para cálculos en equilibrio líquido-vapor, la regla de Watson para la entalpia de líquidos en la desviación del gas ideal y la ecuación de Rackett para el cálculo de la densidad del líquido.

Esta OPTION SET calcula la Entalpia, Entropía y energía libre a partir del calor de formación del sólido (DHSFRM), alimentando la energía libre de formación del sólido (DGSFRM) y la capacidad calorífica para cada componente. Todos los modelos que utiliza la OPTION SET SYSOP0 para el cálculo de las propiedades termodinámicas se ilustran en la tabla 5.1 y 5.2 del manual de sólidos ASPEN PLUS.

Por estas razones la **OPTION SET** utilizada en la simulación del Proceso de elaboración de cemento fué la **SYSOP0**.

## **5.4 TOPOLOGIA DEL PROCESO (FLOWSHEET)**

El proceso de elaboración de cemento se divide en tres secciones; que son:

Sección de **TRITURACION**; esta sección estrictamente se compone de tres etapas de trituración y una de molienda, pero para una mejor identificación de ésta se optó por llamarse así.

En la etapa de trituración las materias primas deben ser finamente molidas y de éstas la que presenta más dificultades en su molienda es la Caliza; la reducción de tamaño lograda en ésta sección va de 42" a 75  $\mu$ , ésta trituración se efectúa en varias etapas de trituración.

Sección de **REACCION**; en ésta sección llega el crudo finamente molido (tamaño nominal de 75  $\mu$ ), se introduce en el horno rotatorio sometiendo a temperaturas de 1400°C provocando así las reacciones para la formación de los componentes principales del Clinker.

Sección de **MOLIENDA**; en esta sección se muele el Clinker mezclado con **YESO** y **PUZOLANA** (para el caso de cemento Puzolánico tipo C-2), alcanzando un tamaño de partícula de 45 a 55  $\mu$  según el tipo de cemento que se está produciendo.

En la especificación de la topología del proceso primeramente se tiene que identificar los bloques; cada bloque es una etapa de operación o proceso unitario con que se conforma el proceso en sí, por lo que los mezcladores y divisores también se identifican y se tendrán que especificar en el **INPUT**; después se identifica el nombre con el que se caracterizará al bloque éste podrá ser elegido por el usuario; seguido de la identificación de las corrientes de entrada y salida del bloque como se ilustra en el **FLOWSHEET** del **INPUT** de la simulación del proceso de elaboración de cemento.

Es necesario aclarar que en esta sección de la simulación del proceso, para el caso del cemento tipo C-2 se anexa una corriente al MIXERH que se encuentra situado en la sección de molienda llamada PUZOLANA (esta es la diferencia entre los procesos de elaboración de cemento tipo I y tipo C-2). Los diagramas de bloques para el proceso de elaboración de cemento T-I y C-2 se ilustran en las Fig. 5.3 y 5.4.

## **5.5 CORRIENTES DE ALIMENTACION Y DE CORTE (STREAM, TEAR STREAM)**

Para que una corriente en fase sólida pueda ser definida es necesario especificar sus condiciones, entre estas condiciones se encuentran: Flujo Másico, Composición, Condiciones de Temperatura y Presión, la clase de subcorriente y la distribución del tamaño de partícula.

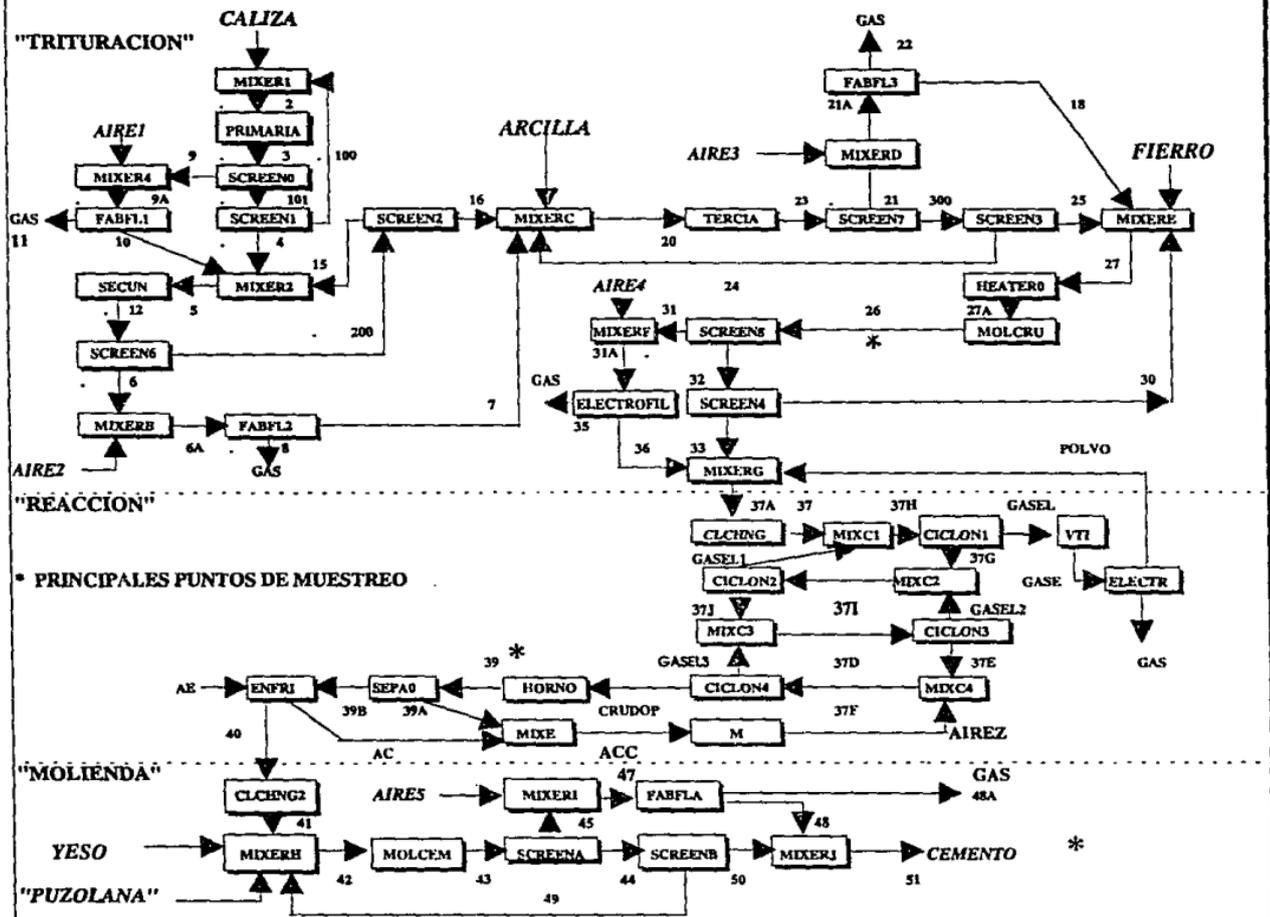
Las corrientes de corte son aquellas corrientes que es necesario especificar para que la simulación del proceso converja, estas se originan por las recirculaciones en el proceso. Estas corrientes de corte pueden ser suministradas y especificadas por parte del usuario o pueden también ser definidas por ASPEN PLUS con el fin de que el proceso converja; pero no siempre es posible que ASPEN PLUS la defina debido a que el simulador sólo lo hace en base a criterios matemáticos, y no toma en cuenta el proceso por ésta razón es más recomendable que el usuario especifique estas corrientes.

Las corrientes de corte especificadas en la simulación de éste proceso son: 2, 5, 20, 26, 42, 37I, 37E, 34A y AIREZ.

Las corrientes de alimentación que se manejan en éste proceso son: CALIZA, ARCILLA, FIERRO, YESO y PUZOLANA. Todas y cada una de estas corrientes tanto las corrientes de corte como las corrientes de alimentación fueron especificadas.



Fig. 5.4 Diagrama de bloques para la simulación en ASPEN PLUS cemento tipo C-2



## COMPOSICION DE CORRIENTES DE PROCESO

### CORRIENTES DE ALIMENTACION

Se agrega puzolana  
para el caso de  
cemento tipo C-2

	CALIZA	ARCILLA	FIERRO	YESO	PUZOLANA
SiO <sub>2</sub>	4.55	50	6.00	11.64	72.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.42	10.00	1.65	10.00	14.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	5.22	62.86	15.00	3.39
CaCO <sub>3</sub>	90.5	28.63	16.6	0.00	1.69
MgCO <sub>3</sub>	1.92	3.97	0.94	0.00	2.32
CaSO <sub>4</sub>	0.6	0.00	0.00	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.4	0.9	0.9	17.00	0.27
K <sub>2</sub> O	0.4	0.87	0.23	0.00	0.224
CASO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	46.36	0.00

Tab. 5.5 Composición de corrientes de alimentación

### CORRIENTES INTERMEDIAS

	CRUDO
SiO <sub>2</sub>	13.63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.8
CaCO <sub>3</sub>	76.21
CaO*	42.68
MgCO <sub>3</sub>	1.41
CaSO <sub>4</sub>	0.47
MgO*	0.79
Na <sub>2</sub> O	0.47
K <sub>2</sub> O	0.59
FSC	98.00
A/F	1.98
S/R	2.53

Tab. 5.6

Composición de corriente de CRUDO

	CLINKER
SiO <sub>2</sub>	0.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00
CaCO <sub>3</sub>	—
CaO	1.2
MgO	1.47
Na <sub>2</sub> O	0.23
K <sub>2</sub> O	0.56
C <sub>2</sub> S	16.00
C <sub>3</sub> S	63.12
C <sub>3</sub> A	6.00
C <sub>4</sub> AF	10.00
FSC	98.00
A/F	1.47
S/R	2.4

Tab. 5.7

Composición de la corriente de clinker

De éstas corrientes se tienen análisis puesto que se trata de puntos de muestreo.

\* composición estequiométrica aproximada

## CORRIENTES DE CORTE ESPECIFICADAS

	2	5	20	26	42	37I	37E	37A	AIREZ
SiO2	4.5	4.5	14.11	14.15	0.55	14.14	14.14	14.14	A I R E
Al2O3	0.96	0.96	3.3	3.3	0.47	3.30	3.30	3.30	
Fe2O3	0.2	0.2	1.00	2.00	0.7	1.97	1.90	1.97	
CaCO3	90.5	90.5	77.6	76.7	0.00	76.76	76.70	76.70	
MgCO3	1.92	1.92	2.5	2.3	0.00	2.30	2.30	2.30	
CaSO4	0.6	0.6	0.47	0.46	0.00	0.46	0.46	0.46	
CaO	0.0	0.00	0.00	0.00	0.83	0.00	0.00	0.00	
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	1.6	0.00	0.00	0.00	
Na2O	0.4	0.4	0.5	0.5	0.15	0.50	0.50	0.50	
K2O	0.4	0.4	0.5	0.5	0.73	0.50	0.50	0.50	
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.0	0.00	0.00	
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	60.4	0.00	0.00	0.00	
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	8.6	0.00	0.00	0.00	
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	8.8	0.00	0.00	0.00	
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	2.1	0.00	0.00	0.00	

Tab. 5.8 Composición de corrientes de corte especificadas

La composición de las corrientes de corte y de alimentación se ilustran en las Tablas 5.5, 5.6, 5.7 , 5.8 .

La distribución del tamaño de partícula tanto de las corrientes de alimentación como las de corte se ilustran en la Tabla 5.2

#### *Obtención del Flujo Másico*

El flujo másico que se maneja en las corrientes se determinó de la siguiente manera:

Primero se determinó el equipo crítico del proceso; siendo el horno el elegido; la Planta de cementos Tolteca cuenta con cuatro hornos en operación cada uno de los cuales maneja diferentes capacidades:

EQUIPO	CAPACIDAD (TPH)
Horno No. 1	60
Horno No. 2	60
Horno No. 3	120
Horno No. 4	180
Total	420

Tabla 5.9 Determinación de la capacidad de hornos

De esas 420 TPH de crudo que se alimentan al horno se componen de un 78 % de Caliza, un 20.5 % de ARCILLA y un 1.5 % de FIERRO; por lo tanto el flujo másico de las corrientes de alimentación quedará determinado de la siguiente forma:

420 TPH de Crudo corresponden a:

MATERIA PRIMA	CALCULO	FLUJO MASICO (TPH)
CALIZA	$0.78 * 420$	327.6
ARCILLA	$.205 * 420$	86.1
FIERRO	$.015 * 420$	6.3

Tabla 5.10 Determinación de alimentación de CALIZA, ARCILLA y FIERRO

Para obtener el flujo másico de PUZOLANA y YESO en los Cementos T-I y C-2 se utiliza la siguiente Tabla:

CEMENTO TIPO	MATERIA PRIMA	PORCENTAJE
T-I	CLINKER	95 %
	YESO	5 % en peso de Clinker.
C-2	CLINKER	72.71 %
	YESO	5 % en peso de Clinker
	PUZOLANA	22.35 % en peso de Clinker

Tabla 5.11 Proporciones de YESO Y PUZOLANA

## 5.6 MODELOS Y ESPECIFICACION DE SUS PARAMETROS (BLOCK)

Como se mencionó en el capítulo tres ASPEN PLUS puede reproducir cualquier tipo de operación unitaria, también en el capítulo tres en la Tabla 3.3 se muestran los modelos de operaciones unitarias que se manejan en el manual de sólidos.

Los parámetros a especificar en cada modelo de operación unitaria están determinados por los grados de libertad del equipo.

Los modelos CRUSHER manejan única y exclusivamente sólidos por lo que si se llegase a introducir otra fase éste modelo arrojaría resultados falsos e incoherentes. La función de éste modelo es reducir de tamaño especificando algunos parámetros como se puede apreciar en el INPUT. Uno de los parámetros que maneja éste modelo es el BWI ( Bond Work Index ) que es el trabajo requerido para reducir de tamaño a un material sólido.

El valor del BWI es específico para cada material por lo que éste parámetro fué tomando diferentes valores a lo largo del proceso, pues en cada etapa del proceso se iba reduciendo de tamaño a diferentes materiales sólidos; el cálculo del BWI considerado para cada CRUSHER fué como se ilustra en la Tabla 5.12.

CRUSHER	CALCULO PONDERADO	BWI KW HR/TON
PRIMARIA	10.18	10.18
SECUN	10.18	10.18
TERCIA	$(.205 * 7.1) + (.79 * 10.18)$	9.49
MOLCRU	$(.205 * 7.1) + (.015 * 12.16) * (.775 * 10.18)$	9.52
MOLCEM	13.49	13.49

Tabla 5.12 Determinación del BWI especificado en los CRUSHER

Los valores del BWI se tomaron de literatura (Ver bibliografía "Manual del Ingeniero Químico", Perry).

Para los equipos de protección ambiental ( Filtro de Bolsas, FABFL; Precipitador Electrostático, ESP), para que estos equipos funcionaran fué necesario introducir una corriente de gas (aire) y mezclarla con pequeñas partículas sólidas de hasta 100  $\mu$  de tamaño con el fin de simular polvo. El polvo consiste en pequeñas partículas sólidas suspendidas en aire. Estos equipos pudieron no haberse introducido en un momento dado, pero pretendiéndose acercarlo más posible a la realidad se optó por introducirlo. Siendo así que el aire se introdujo aunque inmediatamente después se sacó, siendo diferente para el caso del H<sub>2</sub>O por las razones antes señaladas.

La eficiencia alcanzada en la simulación del FABFL y ESP es del 100 %.

El filtro de bolsas maneja tamaños de partículas de 0.1 a 100  $\mu$  y Temperaturas moderadamente bajas ( $T=120^{\circ}\text{C}$ ) y el ESP es para tamaños de de partículas menores a 10  $\mu$  y maneja temperaturas máximas de 100  $^{\circ}\text{F}$ , lo que sería 537  $^{\circ}\text{C}$ .

Los ESCREEN'S son tamizaciones que se le realizan a las corrientes.

El HEATER utilizado es para precalentar el crudo (HEATER0) y el segundo (ENFRI) es para enfriar el clinker.

Para el caso del horno se utilizó el modelo RSTOIC, especificando las condiciones de Temperatura y Presión, las reacciones estequiométricas, la conversión alcanzada por alguno de los reactivos, la distribución del tamaño de partícula (especificado como atributo de la corriente) del clinker de salida del reactor. Debido a la elevada temperatura a la que se somete el crudo que entra al horno y por efecto de la rotación e inclinación de éste se va aglomerando el material, dando lugar al efecto de clinkerización.

Las razones por las que se escogió el modelo RSTOIC fueron:

1.- El objetivo principal de esta simulación es la de que partiendo de las composiciones químicas de las materias primas se pueda estimar la composición química del cemento.

2.- De los seis modelos de reactores que manejan sólidos solamente en el RSTOIC y en el RYIELD es posible especificar un tamaño de partícula a la salida del reactor.

3.- De los modelos mencionados en el punto No. 2 es más conveniente manejar el RSTOIC debido a que las reacciones estequiométricas es información que se dispone.

4.- Por efectos del punto No. 2 se utilizan los molinos de Cemento, y si se hubiera elegido otro modelo los molinos de cemento no tendrían sentido.

5.- Por efecto de la temperatura los compuestos de Fe y Al que se van formando dentro del horno (C3A, C4AF), los que forman una fase líquida la cual ocupa un 20 a 30 % del volumen dentro del reactor, que es donde se encuentran enbebidos el C3S y el C2S. La fase líquida y los efectos de equilibrio se encuentran controlados por las siguientes relaciones aritméticas, además de definir la composición del clinker. Estas relaciones se determinan con la composición del crudo que entra al horno. En la Tabla 5.13 se dan las relaciones aritméticas de las que se hablaron, su efecto y el rango en el que se deben mantener.

RELACION	EFEECTO	GUIA
FSC	Afecta las proporciones de C3S y C2S	96
S/R	Regula la cantidad de Fase Líquida	2.6
A/F	Viscosidad de la Fase líquida	1.7

Tabla 5.13 Relaciones aritméticas guía del CRUDO

por lo que las fases se encuentran fijas y controladas, siendo los valores más óptimos.

## **CAPITULO 6**

### **SIMULACION DEL PROCESO EN EXCEL**

Debido a que diariamente la composición química de las materias primas está en constante cambio, surge la necesidad de saber ¿Que composición se necesita ? y ¿como se ven modificados los factores FSC, A/F, S/R para que la composición del Clinker y la de cemento no cambien o no se vea afectada considerablemente ?, además de conocer la cantidad de materias primas que se deben mezclar. Es por estas razones por las que se pretendió realizar éste trabajo y como Cementos Tolteca no cuenta con el programa de simulación ASPEN PLUS con el que fué realizada la simulación del proceso de elaboración de cemento, pues este pertenece a la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, se pretende configurar una hoja de cálculo para que ésta pueda ser instalada y utilizada en la planta con el fin de dar respuestas inmediata de las preguntas antes señaladas.

Variar las composiciones de cada una de las materias primas así como de cambiar los valores de los factores y ver como se refleja el cambio en la composición química de cada una de las corrientes del proceso (Crudo, Clinker, Cemento etc.).

El paquete de Computadora que se utilizará para este fin es el Microsoft EXCEL Versión 4.0 (hoja de cálculo), por diferentes razones, las que a continuación se mencionan:

- \* Este paquete se encuentra instalado en la planta.
- \* Es de fácil programación y acceso.
- \* La mayoría del personal lo maneja.

En los subtemas siguientes se describe brevemente lo que es el Microsoft EXCEL y de los factores que lo componen.

## Microsoft Excel

El Microsoft Excel es un programa de computadora, que es compatible con Microsoft Windows; Excel solamente puede ser activado desde Windows.

El Microsoft Excel versión 4.0 es la versión más nueva; mejorando las versiones anteriores. Microsoft Excel es una herramienta computacional que provee de ambientes administrativos automatizados para la realización de proyecciones, cálculos, análisis de datos toma de decisiones y generación de reportes.

Las formas de trabajar en Excel son las siguientes:

*Hoja electrónica (Worksheet):* A través del uso de hojas electrónicas, Excel permite diseñar poderosos y efectivos modelos así como sistemas exactos y confiables.

*Gráficas (Chart):* Excel ofrece un paquete completo de gráficas que facilitan la visualización de datos instantáneamente, en la creación de presentaciones y gráficas de calidad.

*Bases de datos (Database):* En este ambiente es posible manejar bases de datos en hojas electrónicas utilizando operaciones estándar de bases de datos y de formas de entrada.

*Macros:* Con Excel es posible crear Macros que automaticen las tareas realizadas frecuentemente.

*Workbooks:* Con Excel es posible crear librerías de trabajo mediante los cuales se puede incluir varios documentos a la vez.

*Slides:* Con Excel es posible crear presentaciones de hojas de trabajo con efectos especiales en la pantalla.

La nueva versión de Excel la 4.0, ofrece nuevas características para ser utilizado más fácilmente, se realizaron mejoras analíticas, de manejo de datos y capacidades de presentación haciendo con ello una aplicación que le ayudará a realizar un trabajo más fácil, rápido y profesionalmente.

Las nuevas características se dividen en seis grupos que son:

- Características de uso general.
- Características de formateo y presentación.
- Características de análisis.
- Características de impresión.
- Características en gráficos.
- Características en base de datos.

las que han mejorado eficientemente la forma de uso y alcance de Microsoft Excel.

#### Limitaciones

El propósito de la simulación del proceso en Excel es la de que en planta pueda calcularse rápidamente la composición química del Clinker y del Cemento tomando en cuenta la composición química de las materias primas y además las TPH agregadas de cada una de ellas; sin perder de vista los factores de los cuales depende una buena formación de Clinker por efecto de las reacciones en el horno ( FSC, S/R, A/F).

Esta hoja de cálculo que se creará únicamente considera la composición de las materias primas, Clinker y Cemento, pero no toma en cuenta la distribución del tamaño de partícula que se registran en cada una de las corrientes de proceso.

A diferencia del Simulador ASPEN PLUS aquí no se están considerando los siguientes puntos:

- Subcorrientes
- Diagrama de Bloques
- Corrientes de recirculación.
- No se ve nada de las composiciones de sólidos que entran al equipo de control ambiental.
- Especificaciones del equipo ( Temperaturas, Presiones, BWI, Fases etc.)
- Únicamente se hace una referencia a las corrientes considerando la composición.

Como se mencionó anteriormente el programa en Excel nos dará resultados de composición teórica del Clinker, Cemento y corrientes intermedias, por lo que para la realización de éste trabajo se utilizan:

La suma aritmética promedio para el caso de los componentes en una mezcla.

Las reacciones estequiométricas.

Las correlaciones de Bogue, para la determinación de la composición del Clinker.

DETERMINACION DE LA COMPOSICION DEL CRUDO, CLINKER Y CEMENTO A PARTIR DE LA COMPOSICION DE MATERIAS PRIMAS

SECCION DE TRITURACION

	CALIZA	ARCILLA	FIERRO
<b>SIO2</b>	C9	D9	E9
<b>AL2O3</b>	C10	D10	E10
<b>FE2O3</b>	C11	D11	E11
<b>CACO3</b>	C12	D12	E12
<b>MGCO3</b>	C13	D13	E13
<b>CASO4</b>	C14	D14	E14
<b>NA2O</b>	C15	D15	E15
<b>K2O</b>	C16	D16	E16
<b>YESO</b>	C17	D17	E17
<b>TPH</b>	C18	D18	E18

**CRUDO**

<b>SIO2</b>	$=(((C9 * C18) + (D9 * D18) + (E9 * E18)) / H18) = H9$
<b>AL2O3</b>	$=(((C10 * C18) + (D10 * D18) + (E10 * E18)) / H18) = H10$
<b>FE2O3</b>	$=(((C11 * C18) + (D11 * D18) + (E11 * E18)) / H18) = H11$
<b>CACO3</b>	$=(((C12 * C18) + (D12 * D18) + (E12 * E18)) / H18) = H12$
<b>MGCO3</b>	$=(((C13 * C18) + (D13 * D18) + (E13 * E18)) / H18) = H13$
<b>CASO4</b>	$=(((C14 * C18) + (D14 * D18) + (E14 * E18)) / H18) = H14$
<b>NA2O</b>	$=(((C15 * C18) + (D15 * D18) + (E15 * E18)) / H18) = H15$
<b>K2O</b>	$=(((C16 * C18) + (D16 * D18) + (E16 * E18)) / H18) = H16$
<b>YESO</b>	$=(((C17 * C18) + (D17 * D18) + (E17 * E18)) / H18) = H17$
<b>TPH</b>	$=((C18 + D18 + E18) = H18)$

$$\text{CAO} = (((\text{C12} \cdot \text{C18}) + (\text{D12} \cdot \text{D18}) + (\text{E12} \cdot \text{E18})) / \text{H18}) \cdot 56 / 100 = \text{J16}$$

$$\text{FSC} = ((\text{J16} / ((2.8 \cdot \text{H9}) + (1.2 \cdot \text{H10}) + (0.65 \cdot \text{H11}))) \cdot 100 = \text{J11}$$

$$\text{S/R} = (\text{H9} / (\text{H10} + \text{H11})) = \text{J12}$$

$$\text{A/F} = (\text{H10} / \text{H11}) = \text{J13}$$

## SECCION DE REACCION \*

### CLINKER

$$\text{MGO} = (\text{H13} \cdot 40.3 / 84.3) = \text{D23}$$

$$\text{CAO} = (\text{J16} - ((64 \cdot 168 / 228) - (15 \cdot 112 / 172)(10 \cdot 224 / 485.68) - (8.7 \cdot 168 / 270))) \cdot 0.1 = \text{D24}$$

$$\text{C3S} = ((\text{J16} \cdot 4.071) - (7.6024 \cdot \text{H9}) - (1.429 \cdot \text{H11}) - (6.7187 \cdot \text{H10})) \cdot 1.55 = \text{D25}$$

$$\text{C2S} = ((2.8675 \cdot \text{H9}) - (0.754 \cdot \text{D25})) \cdot 1.55 \cdot (-1) = \text{D26}$$

$$\text{C4AF} = ((3.0432 \cdot \text{H11}) \cdot 1.55 = \text{D27}$$

$$\text{C3A} = ((2.6504 \cdot \text{H10}) - (1.69 \cdot \text{H11})) \cdot 1.55 = \text{D28}$$

$$\text{K2O} = (\text{H15} \cdot 1.55) = \text{D29}$$

$$\text{NA2O} = (\text{H14} \cdot 1.55) = \text{D30}$$

$$\text{CO2} = ((\text{H12} \cdot 44 / 100) + (\text{H13} \cdot 44 / 84.3)) = \text{D31}$$

$$\text{TPH} = \text{I27}$$

## SECCION DE MOLIENDA

	YESO	PUZOLANA
SIO2	E36	F36
AL2O3	E37	F37
FE2O3	E38	F38
CAC03	E39	F39
MGCO3	E40	F40
K2O	E41	F41
NA2O	E42	F42
CASO4.H2O	E43	F43

TPH que se deben de alimentar de YESO =  $0.04 * I26 = G46$

TPH que se deben de alimentar de PUZOLANA =  $0.22 * I26 = G47$

\* Consultar las correlaciones de Bogue y la estequiometria de las reacciones.

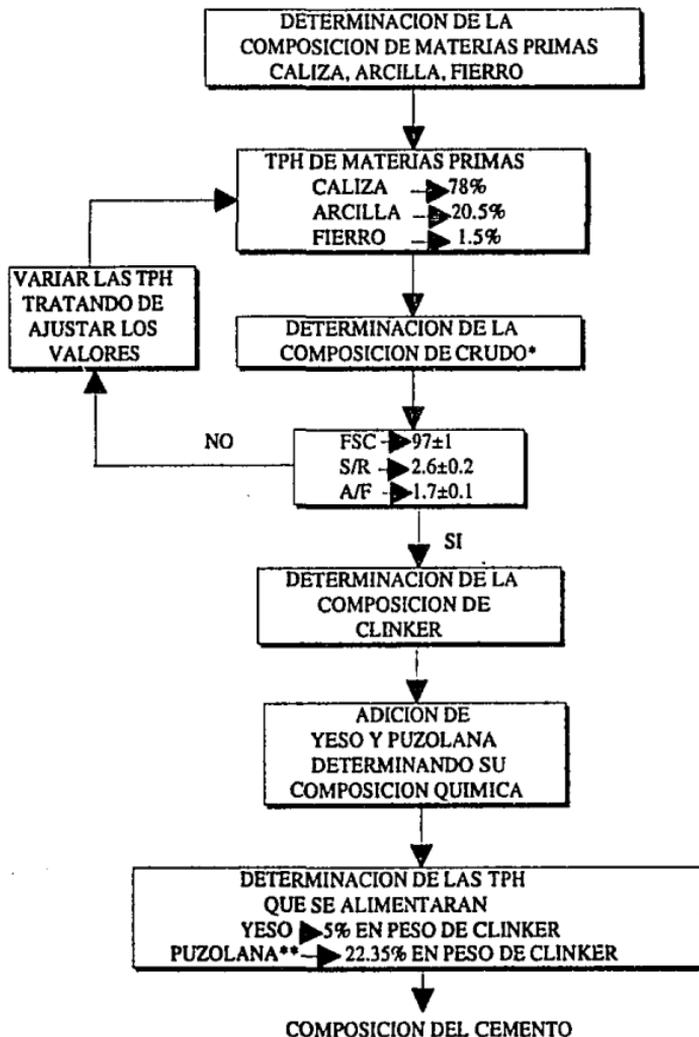
### CEMENTO TIPO T-I

SIO2	= $(E36 * G46 / J47)$
AL2O3	= $(E37 * G46 / J47)$
FE2O3	= $(E38 * G46 / J47)$
CAC03	= $(E39 * G46 / J47)$
CAO	= $(D24 * I26 / J47)$
MGO	= $(D23 * I26 / J47)$
K2O	= $(D29 * I26 + E41 * G47) / J47$
NA2O	= $((D30 * I26 + E42 * G47) / J47)$
CASO4.H2O	= $((E43 * G46) / J47)$
C2S	= $(D26 * I26 / J47)$
C3S	= $(D25 * I26 / J47)$
C4AF	= $(D27 * I26 / J47)$
C3A	= $D28 * I26 / J47$

### CEMENTO TIPO C-2

SIO2	= $((E36 * G46) + (F36 * G47)) / K47$
AL2O3	= $((E37 * G46) + (F37 * G47)) / K47$
FE2O3	= $((E38 * G46) + (F38 * G47)) / K47$
CAC03	= $((E39 * G46) + (F39 * G47)) / K47$
CAO	= $(D24 * I26 / K47)$
MGO	= $((D23 * I26) / K47)$
K2O	= $((D29 * I26) + (E41 * G46) + (F41 * G47)) / K47$
NA2O	= $((D30 * I26) + (E42 * G46) + (F42 * G47)) / K47$
CASO4.H2O	= $((E43 * G46) / J47)$
C2S	= $(D26 * I26 / K47)$
C3S	= $(D25 * I26 / K47)$
C4AF	= $(D27 * I26 / K47)$
C3A	= $(D28 * I26 / K47)$

FLUJO DE INFORMACION PARA LA HOJA DE CALCULO "EXCEL"



\* Consultar el apéndice

\*\* Para el caso del Cemento Tipo C-2

FIG. 6.1

Secuencia para la hoja de cálculo Excel

## **CAPITULO 7**

### **RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS**

## 7.1 RESULTADOS DE LA SIMULACION CON ASPEN PLUS

Las TPH, la composición, y la distribución del tamaño de partículas se muestran en las Tablas 7.1, los valores que se dan están en fracción peso.

La clase de corriente MIXCIPSD se compone de dos Subcorrientes MIXED y CISOLID. La Subcorriente MIXED se compone de fase vapor y/o líquida, y la Subcorriente CISOLID se compone de sólidos de estructura convencional; en el caso del manejo de los sólidos se proporciona la distribución del tamaño de partícula por lo que la subcorriente CISOLID pasa a llamarse CIPSD.

Debido a que se trabajan con algunas corrientes que pueden manejar una y dos Subcorrientes, se hace una distribución para las Subcorrientes:

- Subcorrientes del Tipo CISOLID.
- Subcorrientes del Tipo MIXED y CISOLID.
- Subcorrientes del Tipo MIXED.

A continuación se muestran los resultados de cada corriente para el cemento Tipo T-1 y para el caso del cemento Tipo C-2 se muestran únicamente las corrientes que presentan diferencias en las corrientes con respecto al proceso de cemento Tipo T-1.

## CEMENTO TIPO T-I

## SUBCORRIENTES TIPO CISOLID

TABLA(S) 7.1.a

CORRIENTE	CALIZA	2	3	101	4	100	9	10
TPH TOTALES	327.6	367.46	367.46	364.67	324.85	39.82	2.78	2.78
KCAL/HR TÓT.	-9.50E+08	-1.29E+07	-1.00E+09	-1.00E+09	-9.00E+08	-1.10E+08	-8.10E+06	-8.10E+06
SUBCORRIENTE	CIPSD							
ESTRUCTURA	CONVENC.							
CLASE	MIXCIPSD							
FASE	SOLIDO							
COMPONENTES: FRACCION MASA								
AIRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAC03-2	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FE2O3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
AL2O3-2	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142
MGCO3	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192
SiO2	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
K2O	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041
CASO4	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEMP. °C	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
PRES. MMHG	585	585	585	585	585	585	585	587
VFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PM. PROMEDIO PSD	96.79	96.79	96.79	96.79	96.79	96.79	96.79	96.79
FRAC1	0.007	0.0062	0.0065	0.0032	0.0037	4.63E-10	0.4355	0.4355
FRAC2	0.006	0.0053	0.0054	0.0035	0.004	4.90E-10	0.2585	0.2585
FRAC3	0.006	0.0053	0.0055	0.004	0.0045	5.70E-10	0.193	0.193
FRAC4	0.009	0.008	0.0086	0.0078	0.0087	1.10E-09	0.1128	0.1128
FRAC5	0.0062	0.0055	0.0085	0.0086	0.0097	1.20E-09	0.00	0.00
FRAC6	0.002	0.0017	0.018	0.018	0.02	2.70E-09	0.00	0.00
FRAC7	0.001	0.0009	0.038	0.039	0.044	8.40E-08	0.00	0.00
FRAC8	0.001	0.009	0.041	0.042	0.047	1.60E-08	0.00	0.00
FRAC9	0.02	0.017	0.049	0.05	0.056	3.50E-08	0.00	0.00
FRAC10	0.001	0.0009	0.036	0.036	0.04	5.02E-08	0.00	0.00
FRAC11	0.01	0.009	0.056	0.057	0.064	1.90E-07	0.00	0.00
FRAC12	0.02	0.017	0.075	0.076	0.085	1.00E-06	0.00	0.00
FRAC13	0.026	0.023	0.078	0.078	0.088	6.80E-06	0.00	0.00
FRAC14	0.02	0.017	0.071	0.071	0.08	3.80E-05	0.00	0.00
FRAC15	0.002	0.0018	0.077	0.078	0.087	5.20E-03	0.00	0.00
FRAC16	0.001	0.0014	0.097	0.098	0.1098	5.10E-02	0.00	0.00
FRAC17	0.085	0.1567	0.297	0.2993	0.2445	0.7464	0.00	0.00
FRAC18	0.11	0.1249	0.026	0.027	0.00	0.2479	0.00	0.00
FRAC19	0.19	0.1693	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC20	0.21	0.1872	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC21	0.18	0.1604	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC22	0.065	0.058	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC23	0.012	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## CEMENTO TIPO T-I

## SUBCORRIENTES TIPO CISOLID

## TABLA(S) 7.1.a

CORRIENTE	5	15	12	6	200	7	16	ARCILLA
TPH TOTALES	389.63	62	389.63	2.93	386.71	2.93	324.71	86.1
KCAL/HR TOT.	-1.14E+09	-1.81E+08	-1.14E+09	-8.55E+06	-1.13E+09	-8.55E+06	-9.48E+08	-2.81E+08
SUBCORRIENTE	CIPSD							
ESTRUCTURA	CONVENC.							
CLASE	MIXCIPSD							
FASE	SOLIDO							
VENTES: FRACCION MASA								
AIRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CACO3-2	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.2863
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FE2O3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.045
AL2O3-2	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.1
MGO3	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192	0.0192	0.0397
SiO2	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.505
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.009
K2O	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0087
CASO4	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.00
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEMP. °C	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
PRES. MMHG	586	585	585	585	585	587	585	585
VFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PM. PROMEDIO	96.79	96.79	96.79	96.79	96.79	96.79	96.79	75.19
PSD								
FRAC1	6.20E-03	3.10E-10	0.0066	0.4416	0.0033	0.4416	0.004	0.011
FRAC2	5.10E-03	3.28E-10	0.005	0.2516	0.0034	0.2516	0.004	0.0085
FRAC3	5.10E-03	3.86E-10	0.005	0.19	0.004	0.19	0.0047	0.0115
FRAC4	0.0081	7.86E-10	0.008	0.1167	0.008	0.1167	0.01	0.011
FRAC5	0.0081	1.20E-09	0.01	0.00	0.011	0.00	0.01	0.0106
FRAC6	0.0169	5.05E-10	0.042	0.00	0.042	0.00	0.05	0.102
FRAC7	0.036	2.25E-08	0.081	0.00	0.081	0.00	0.097	0.105
FRAC8	0.039	9.68E-08	0.076	0.00	0.076	0.00	0.091	0.12
FRAC9	0.047	4.50E-07	0.089	0.00	0.091	0.00	0.11	0.11
FRAC10	0.034	2.41E-06	0.088	0.00	0.089	0.00	0.106	0.105
FRAC11	0.053	3.46E-05	0.1321	0.00	0.1331	0.00	0.16	0.05
FRAC12	0.071	1.29E-03	0.1655	0.00	0.166	0.00	0.199	0.09
FRAC13	0.092	0.1168	0.1465	0.00	0.148	0.00	0.153	0.1
FRAC14	0.1517	0.5325	0.084	0.00	0.085	0.00	0.00	0.075
FRAC15	0.125	0.3251	0.051	0.00	0.052	0.00	0.00	0.09
FRAC16	0.095	0.024	0.004	0.00	0.004	0.00	0.00	0.00
FRAC17	0.2038	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## CEMENTO TIPO T-I

## SUBCORRIENTES TIPO CISOLID

TABLA(S) 7.1.a

CORRIENTE	20	23	21	300	24	18	25	FIERRO
TPH TOTALES	451.44	451	4.35	447.1	37	4.35	409.41	6.3
KCAL/HR TOT.	-1.30E+09	-1.30E+09	-1.20E+07	-1.26E+09	-1.10E+08	-1.30E+07	-1.70E+09	-1.27E+07
SUBCORRIENTE	CIPSD							
ESTRUCTURA	VONVENC.							
CLASE	MIXCIPSD							
FASE	SOLIDO							
COMPONENTES: FRACCION MASA								
AIRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAC03-2	0.7762	0.7762	0.7762	0.7762	0.7762	0.7762	0.7762	0.166
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FE2O3	0.0109	0.0109	0.0109	0.0109	0.0109	0.0109	0.0109	0.6
AL2O3-2	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.0165
MGCO3	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.0094
SiO2	0.1411	0.1411	0.1411	0.1411	0.1411	0.1411	0.1411	0.06
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.00504	0.00504	0.00504	0.00504	0.00504	0.00504	0.00504	0.009
K2O	0.00505	0.00505	0.00505	0.00505	0.00505	0.00505	0.00505	0.0023
CASO4	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.00
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEMP. °C	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
PRES. MMHG	585	585	585	585	585	585	585	585
VFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PM. PROMEDIO	91.33	91.33	91.33	91.33	91.33	91.33	91.33	112.5
PSD								
FRAC1	0.0078	0.008	0.4484	0.0046	1.00E-10	0.4484	4.70E-03	0.14
FRAC2	0.006	0.006	0.2386	0.0041	1.00E-10	0.24	4.50E-03	0.12
FRAC3	0.0068	0.0071	0.1982	0.0056	1.30E-10	0.1986	5.80E-03	0.13
FRAC4	0.009	0.011	0.1146	0.01	7.21E-10	0.1146	1.00E-02	0.18
FRAC5	0.012	0.019	0.00	0.02	1.53E-09	0.00	2.00E-02	0.12
FRAC6	0.055	0.096	0.00	0.1	1.15E-08	0.00	1.06E-01	0.1
FRAC7	0.089	0.1526	0.00	0.154	1.17E-07	0.00	1.68E-01	0.11
FRAC8	0.088	0.139	0.00	0.1571	3.10E-06	0.00	1.53E-01	0.03
FRAC9	0.098	0.1556	0.00	0.1638	7.13E-05	0.00	1.72E-01	0.04
FRAC10	0.096	0.1622	0.00	0.1745	1.00E-03	0.00	1.79E-01	0.03
FRAC11	0.1378	0.1752	0.00	0.061	0.1703	0.00	0.1753	0.00
FRAC12	0.2206	0.06	0.00	0.008	0.101	0.00	0.00	0.00
FRAC13	0.1379	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC14	0.043	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC15	0.017	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## CEMENTO TIPO T-I

## SUBCORRIENTES TIPO CISOLID

TABLA(S) 7.1.a

CORRIENTE	27	27A	26	30	31	36	32	33
TPH TOTALES	468	468	468	48	12.38	12.38	455.6	407.65
KCAL/HR TOT.	-1.30E+09	-1.30E+09	-1.30E+09	-1.40E+08	-3.60E+07	-3.60E+07	-1.30E+09	-1.10E+09
SUBCORRIENTE	CIPSD							
ESTRUCTURA	CONVENC.							
CLASE	MIXCIPSD							
FASE	SOLIDO							
COMPONENTES: FRACCION MASA								
AIRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CACO3-2	0.767	0.767	0.767	0.767	0.767	0.767	0.767	0.767
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FE2O3	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
AL2O3-2	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
MGO3	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
SiO2	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051
K2O	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049
CASO4	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEMP. °C	50	300	300	300	300	23.3	300	300
PRES. MMHG	585	585	585	585	585	587	585	585
VFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PM. PROMEDIO	96.55	96.55	96.55	96.55	96.55	96.55	96.55	96.55
PSD								
FRAC1	0.0101	0.0101	0.5382	1.00E-17	1.00	1.00	0.5257	0.5875
FRAC2	0.0077	0.0077	0.1674	5.80E-08	0.00	0.00	0.172	0.1922
FRAC3	0.073	0.073	0.256	0.6274	0.00	0.00	2.63	0.2201
FRAC4	0.051	0.051	0.038	0.3725	0.00	0.00	0.039	0.00
FRAC5	0.019	0.019	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC6	0.093	0.093	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC7	0.1486	0.1486	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC8	0.1345	0.1345	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC9	0.1506	0.1506	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC10	0.1568	0.1568	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC11	0.1534	0.1534	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## CEMENTO TIPO T-1

## SUBCORRIENTES TIPO CISOLID

## TABLA(S) 7.1.a

CORRIENTE	37A	POLVO	37	37G	37I	37E	CRUDOP	39B
TPH TOTALES	434	13.94	434	440.9	444	438.4	420	271.9
KCAL/HR TOT.	-1.20E+08	-4.60E+07	-1.20E+08	-1.20E+08	-1.30E+08	-1.30E+08	-1.20E+08	6.13E+08
SUBCORRIENTE	CIPSD	CIPSD						
ESTRUCTURA	CONVENC.	CONVENC.						
CLASE	MIXCIPSD	MIXCIPSD						
FASE	SOLIDO	SOLIDO						
COMPONENTES: FRACCION MASA								
AIRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CACO3-2	0.767	0.767	0.767	0.767	0.767	0.767	0.767	0.018
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FE2O3	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.00
AL2O3-2	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.00
MGCO3	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.00
SiO2	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0079
K2O	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0077
CASO4	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.00
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.15
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.6342
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.081
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0115
TEMP. °C	293.00	210.00	293.00	210.00	470.00	510.00	705.00	1400.00
PRES. MMHG	588.00	588.00	588.00	-45.00	-30.00	-23.50	-11.00	580.00
VFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PM. PROMEDIO	91.59	91.59	91.59	91.59	91.59	91.59	91.59	202.92
PSD								
FRAC1	0.6126	1.00	0.6126	0.6187	0.6189	0.6165	0.6	0.01
FRAC2	0.1805	0.00	0.1805	0.177	0.1789	0.1787	0.1865	0.05
FRAC3	0.2064	0.00	0.2068	0.2035	0.2021	0.2047	0.2136	0.01
FRAC4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
FRAC5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
FRAC6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
FRAC7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
FRAC8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
FRAC9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12
FRAC10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15
FRAC11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
FRAC12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
FRAC13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
FRAC14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
FRAC15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
FRAC16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## CEMENTO TIPO T-I

## SUBCORRIENTES TIPO CISOLID

## TABLA(S) 7.1.a

CORRIENTE	40	41	YESO	42	49	43	45	44
TPH TOTALES	271.93	272.51	13.47	392.3	106.38	392.35	49	418.16
KCAL/HR TOT.	5.30E+10	6.13E+09	-1.50E+07	6.10E+09	1.60E+09	6.12E+09	7.60E+08	6.47E+09
SUBCORRIENTE	CIPSD	CIPSD	CIPSD	CIPSD	CIPSD	CIPSD	CIPSD	CIPSD
ESTRUCTURA	CONVENC.	CONVENC.	CONVENC.	CONVENC.	CONVENC.	CONVENC.	CONVENC.	CONVENC.
CLASE	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD
FASE	SOLIDO	SOLIDO	SOLIDO	SOLIDO	SOLIDO	SOLIDO	SOLIDO	SOLIDO
COMPONENTES: FRACCION MASA								
AIRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CACO3-2	0.018	0.018	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAO	0.00	0.00	0.00	.0193	.0193	.0193	.0193	.0193
FE2O3	0.00	0.00	0.15	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069
AL2O3-2	0.00	0.00	0.1	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
MGCO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO2	0.00	0.00	0.1164	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.0079	0.0079	0.17	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114
K2O	0.0077	0.0077	0.00	0.0073	0.0073	0.0073	0.0073	0.0073
CASO4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.15	0.15	0.00	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148
C3S	0.6342	0.6342	0.00	0.602	0.602	0.602	0.602	0.602
C4AF	0.10	0.10	0.00	0.096	0.096	0.096	0.096	0.096
C3A	0.081	0.081	0.00	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
YESO	0.00	0.00	0.4636	.022	.022	.022	.022	.022
MGO	0.0115	0.0115	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
TEMP. °C	115	115	15.00	115	115	115	115	115
PRES. MMHG	590	590	585	585	585	585	585	585
VFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PM. PROMEDIO	202.92	202.94	106.84	194.6	194.6	194.6	194.6	194.6
PSD								
FRAC1	0.01	0.01	0.05	0.008	0.026	0.5575	1.00	0.5775
FRAC2	0.05	0.05	0.06	0.054	0.065	0.169	0.00	0.169
FRAC3	0.01	0.01	0.03	0.23	0.839	0.2274	0.00	0.2274
FRAC4	0.01	0.01	0.11	0.036	0.095	0.0258	0.00	0.025
FRAC5	0.02	0.02	0.09	0.017	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC6	0.03	0.03	0.1	0.024	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC7	0.02	0.02	0.12	0.018	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC8	0.11	0.11	0.1	0.079	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC9	0.12	0.12	0.11	0.087	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC10	0.15	0.15	0.07	0.103	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC11	0.11	0.11	0.06	0.078	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC12	0.13	0.13	0.05	0.092	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC13	0.07	0.07	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC14	0.07	0.07	0.00	0.048	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC15	0.09	0.09	0.00	0.062	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**EMENTO TIPO T-I**

**SUBCORRIENTES TIPO CISOLID**

**TABLA(S) 7.1.a**

CORRIENTE	48	50	51				
TPH TOTALES	49	236.9	286				
KCAL/HR TOT.	7.60E+08	3.69E+09	4.42E+09				
SUBCORRIENTE	CIPSD	CIPSD	CIPSD				
ESTRUCTURA	CONVENC.	CONVENC.	CONVENC.				
CLASE	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD				
FASE	SOLIDO	SOLIDO	SOLIDO				
COMPONENTES: FRACCION MASA							
AIRE	0.00	0.00	0.00				
CACO3-2	0.00	0.00	0.00				
CAO	0.0193	0.0193	0.0193				
FE2O3	0.0069	0.0069	0.0069				
AL2O3-2	0.005	0.005	0.005				
MGCO3	0.00	0.00	0.00				
SIO2	0.0049	0.0049	0.0049				
CO2	0.00	0.00	0.00				
NA2O	0.0114	0.0114	0.0114				
K2O	0.0073	0.0073	0.0073				
CASO4	0.00	0.00	0.00				
SO3	0.00	0.00	0.00				
C2S	0.148	0.148	0.148				
C3S	0.602	0.602	0.602				
C4AF	0.096	0.096	0.096				
C3A	0.077	0.077	0.077				
YESO	.022	.022	.022				
MGO	0.01	0.01	0.01				
TEMP. °C	115	115	115				
PRES. MMHG	585	585	585				
VFRAC	0.00	0.00	0.00				
LFRAC	0.00	0.00	0.00				
SFRAC	1.00	1.00	1.00				
PM. PROMEDIO	197.25	197.25	197.25				
PSD							
FRAC1	1.00	0.7495	0.7924				
FRAC2	0.00	0.2505	0.2075				
FRAC3	0.00	0.00	0.00				
FRAC4	0.00	0.00	0.00				
FRAC5	0.00	0.00	0.00				
FRAC6	0.00	0.00	0.00				
FRAC7	0.00	0.00	0.00				
FRAC8	0.00	0.00	0.00				
FRAC9	0.00	0.00	0.00				
FRAC10	0.00	0.00	0.00				
FRAC11	0.00	0.00	0.00				
FRAC12	0.00	0.00	0.00				
FRAC13	0.00	0.00	0.00				
FRAC14	0.00	0.00	0.00				
FRAC15	0.00	0.00	0.00				
FRAC16	0.00	0.00	0.00				
FRAC17	0.00	0.00	0.00				
FRAC18	0.00	0.00	0.00				
FRAC19	0.00	0.00	0.00				
FRAC20	0.00	0.00	0.00				
FRAC21	0.00	0.00	0.00				
FRAC22	0.00	0.00	0.00				
FRAC23	0.00	0.00	0.00				

**SUBCORRIENTES TIPO MIXED**

**CEMENTO TIPO T-I**

Tabla(s) 7.1.b

CORRIENTE	AIRE1	11	AIRE2	8	AIRE3	22	AIRE4	35
LIT/MIN	5.11E+04							
KCAL/HR TOT.	-6.42E+03	-6.92E+03	-6.92E+03	-6.93E+03	-6.92E+03	-6.92E+03	-9.50E+05	-2.95E+05
SUBCORRIENTE	MIXED							
CLASE	MIXCIPSD							
FASE	VAPOR							
<b>COMPONENTES: FRACCION MASA</b>								
AIRE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
CACO3-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FE2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AL2O3-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGCO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SIO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CASO4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEMP.°C	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	297
PRES. MMHG	585	585	585	585	585	585	585	585
VFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PM. PROMEDIO	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95

**CEMENTO TIPO T-I**

**Tabla(s) 7.1.b**

CORRIENTE	GAS	39A	AE	AC	ACC	AIREZ	AIRES	48A
TPH TOTALES	1.15E+03	1.48E+02	1.00E+03	1.00E+03	1.15E+03	2.78E+02	5.11E+04	5.11E+04
KCAL/HR TOT.	2.59E+08	2.57E+08	-2.39E+06	-2.39E+08	2.59E+08	7.76E+06	-6.92E+03	-6.92E+03
SUBCORRIENTE	MIXED	MIXED	MIXED	MIXED	MIXED	MIXED	MIXED	MIXED
CLASE	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD	MIXCIPSD
FASE	VAPOR	VAPOR	VAPOR	VAPOR	VAPOR	VAPOR	VAPOR	VAPOR
<b>COMPONENTES: FRACCION MASA</b>								
AIRE	1.00	0.00	1.00	1.00	0.75	1.00	1.00	1.00
CACO3-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FE2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AL2O3-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGCO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SI02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.00	1.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CASO4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEMP.°C	210	1400	15	1200	1210	1210	15	115
PRES. MMHG	588	580	585	585	585	585	585	585
VFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PM. PROMEDIO	28.95	44.00	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95

## CEMENTO TIPO T-I

## SUBCORRIENTES TIPO MIXED Y CISOLID

TABLA 7.1.c

CORRIENTE	9A	6A	21A	31A	GASEL	GASE	GASEL	37I
KCAL/HR TOT.	-8.13E+06	-8.55E+06	-1.30E+07	-3.36E+07	-5.93E+07	-5.93E+07	-5.96E+07	-1.30E+09
CLASE	MIXCIPSD							
SUBCORRIENTE	MIXED							
FASE	VAPOR							
COMPONENTES: FRACCION MASA								
AIRE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
CACO3-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FE2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AL2O3-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGCO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEMP. °C	15.00	15.00	15.00	23.3	210	210	470	490
PRES. MMHG	588	588	588	588	-45.00	588	-30.00	-30.00
VFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LFrac	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LIT/MIN	5.11E+04	5.11E+04	5.11E+04	5.11E+04	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06
KCAL/HR SUB.	-6928	-6927	-6918	-6918	-6918	-6918	-6918	-6918
PM. PROMEDIO	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95
ESTRUCTURA	CONVENC.							
SUBCORRIENTE	CIPSD							
FASE	SOLIDO							
COMPONENTES: FRACCION MASA								
AIRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CACO3-2	0.905	0.905	0.7762	0.767	0.767	0.767	0.767	0.767
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FE2O3	0.002	0.002	0.0109	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
AL2O3-2	0.0142	0.0142	0.033	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
MGCO3	0.0192	0.0192	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
SiO2	0.045	0.045	0.1411	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.004	0.004	0.00504	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051
K2O	0.0041	0.0041	0.00505	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049
CASO4	0.006	0.006	0.0047	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEMP. °C	15	15	15	23.3	210	210	470	490
PRES. MMHG	588	588	588	588	-45.00	588	-30.00	-30.00

## CEMENTO TIPO T-I

TABLA 7.1.c

CORRIENTE	9A	6A	21A	31A	GASEL	GASE	GASEL1	37I
VFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
TPH SUB.	2.789	2.93	4.33	12.38	13.94	13.94	20.96	264.9
KCAL/HR SUB.	-8.13E+06	-8.55E+06	-1.30E+07	-3.36E+07	-4.05E+07	-4.05E+07	-6.10E+07	-1.35E+09
PM. PROMEDIO	96.79	96.79	91.33	91.59	91.27	91.27	91.27	91.27
PSD								
FRAC1	0.435	0.4416	0.4484	1.00	1.00	1.00	1.00	0.6361
FRAC2	0.258	0.2516	0.2386	0.00	0.00	0.00	0.00	0.1708
FRAC3	0.193	0.19	0.1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.193
FRAC4	0.112	0.1167	0.1146	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## CEMENTO TIPO T-I

## SUBCORRIENTES TIPO MIXED Y CISOLID

TABLA 7.1.c

CORRIENTE	37H	GASEL2	GASEL3	37D	37F	39	47
KCAL/HR TOT.	-1.32E+09	-6.80E+07	-5.12E+07	-1.34E+09	-1.26E+09	-6.20E+08	7.65E+08
CLASE	MIXCIPSD						
SUBCORRIENTE	MIXED						
FASE	VAPOR						
COMPONENTES: FRACCION MASA							
AIRE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00
CACO3-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FE2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AL2O3-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGCO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
H2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEMP. °C	390	510	705	610	860	1400	106
PRES. MMHG	-45.00	-23.50	-11.00	-23.50	-11.00	580	588
VFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LIT/MIN	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	9.87E+06	5.11E+04
KCAL/HR SUB.	-6918	-6918	-6918	-6918	-6918	2.57E+06	-6.92E+03
PM. PROMEDIO	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	44.00	28.95
ESTRUCTURA	CONVENC.						
SUBCORRIENTE	CIPSD						
FASE	SOLIDO						
COMPONENTES: FRACCION MASA							
AIRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CACO3-2	0.767	0.767	0.767	0.767	0.767	0.018	0.00
CAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0193
FE2O3	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.00	0.0069
AL2O3-2	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.00	0.005
MGCO3	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.00	0.00
SiO2	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.0049
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0079	0.0114
K2O	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0077	0.0073
CASO4	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0	0.00
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.148
C3S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.6342	0.602
C4AF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.096
C3A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.081	0.077
YESO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.022
MGO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0115	0.01
TEMP. °C	390	510	705	610	860	1400	115
PRES. MMHG	-45.00	-23.50	-11.00	-23.50	-11.00	580	588

**CEMENTO TIPO T-I**

CORRIENTE	37H	GASEL2	GASEL3	37D	37F	39	47	
VFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
SFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
TPH SUB.	455	23.98	18.39	462.41	438.4	272.5	48.91	
KCAL/HR SUB.	1.13E+09	-6.97E+07	-5.32E+07	-1.30E+09	-1.27E+09	6.18E+10	7.65E+08	
PM. PROMEDIO	91.59	91.59	91.59	91.59	91.59	202.92	194.6	
<b>PSD</b>								
FRAC1	0.6304	1.00	1.00	0.634	0.6165	0.01	1.00	
FRAC2	0.1722	0.00	0.00	0.1718	0.1787	0.05	0.00	
FRAC3	0.1972	0.00	0.00	0.1942	0.2047	0.01	0.00	
FRAC4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	
FRAC5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	
FRAC6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	
FRAC7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	
FRAC8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	
FRAC9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	
FRAC10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	
FRAC11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	
FRAC12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	
FRAC13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	
FRAC14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	
FRAC15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	
FRAC16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FRAC17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FRAC18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FRAC19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FRAC20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FRAC21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FRAC22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FRAC23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

## CEMENTO TIPO C-2

## SUBCORRIENTES TIPO CISOLID

Tab. 7.1.d

CORRIENTE	42	49	43	45	44	48	50	51
TPH TOTALES	580.51	234.13	580.32	76.24	504.27	76.24	270.13	346.9
KCAL/HR TOT.	7.10E+09	2.88E+09	7.16E+09	9.41E+08	6.22E+09	9.40E+08	3.33E+09	4.27E+09
SUBCORRIENTE	CIPSD							
ESTRUCTURA	CONVENC.							
CLASE	MIXCIPSD							
FASE	SOLIDO							
COMPONENTES: FRACCION MASA								
AIRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAC03-2	0.0029	0.0029	0.0029	0.0029	0.0029	0.0029	0.0029	0.0029
CAO	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
FE2O3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
AL2O3-2	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136
MGCO3	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
SiO2	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NA2O	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
K2O	0.0061	0.0061	0.0061	0.0061	0.0061	0.0061	0.0061	0.0061
CASO4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C2S	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118
C3S	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497
C4AF	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
C3A	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064
YESO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
MGO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
TEMP. °C	115	115	115	115	115	115	115	115
PRES. MMHG	585	585	585	585	585	585	585	585
VFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LFRAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFRAC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PM. PROMEDIO	145.43	145.43	145.43	145.43	145.43	145.43	145.43	145.43
PSD								
FRAC1	0.0135	1.00E-15	0.5804	1.00	0.5201	1.00	1.00	1.00
FRAC2	0.055	0.065	0.1683	0.00	0.1925	0.00	0.00	0.00
FRAC3	0.2357	0.8376	0.2252	0.00	0.2575	0.00	0.00	0.00
FRAC4	0.05	0.096	0.026	0.00	0.029	0.00	0.00	0.00
FRAC5	0.055	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC6	0.033	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC7	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC8	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC9	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC10	0.097	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC11	0.075	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC12	0.082	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC13	0.048	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC15	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FRAC23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## CEMENTO TIPO C-2

Tab: 7.1.d

CORRIENTE	PUZOLANA
TPH TOTALES	60.95
KCAL/HR TOT.	-2.10E+08
SUBCORRIENTE	CIPSD
ESTRUCTURA	CONVENC.
CLASE	MIXCIPSD
FASE	SOLIDO
NENTES: FRACCION MASA	
AIRE	0.00
CACO3-2	0.0036
CAO	0.006
FE2O3	0.011
AL2O3-2	0.03
MGCO3	0.004
SIO2	0.1331
CO2	0.00
NA2O	0.021
K2O	0.006
C2S	0.1313
C3S	0.501
C4AF	0.085
C3A	0.065
YESO	0.018
MGO	0.013
TEMP. °C	15
PRES. MMHG	585
VFRAC	0.00
LFRAC	0.00
SFRAC	1.00
PM. PROMEDIO	66.57
PSD	
FRAC1	0.05
FRAC2	0.06
FRAC3	0.03
FRAC4	0.12
FRAC5	0.09
FRAC6	0.10
FRAC7	0.12
FRAC8	0.07
FRAC9	0.11
FRAC10	0.07
FRAC11	0.08
FRAC12	0.05
FRAC13	0.05
FRAC14	0.00
FRAC15	0.00
FRAC16	0.00
FRAC17	0.00
FRAC18	0.00
FRAC19	0.00
FRAC20	0.00
FRAC21	0.00
FRAC22	0.00
FRAC23	0.00

**SUBCORRIENTES TIPO MIXED Y CISOLID**

**CEMENTO TIPO C-2 TAB. 7.1.f**

CORRIENTE	47
KCAL/HR TOT.	-7.30E+08
CLASE	MIXCIPSD
SUBCORRIENTE	MIXED
FASE	VAPOR
COMPONENTES: FRACCION MASA	
AIRE	1.00
CaCO3-2	0.00
CaO	0.00
Fe2O3	0.00
Al2O3-2	0.00
MgCO3	0.00
SiO2	0.00
CO2	0.00
H2O	0.00
Na2O	0.00
K2O	0.00
C2S	0.00
C3S	0.00
C4AF	0.00
C3A	0.00
YESO	0.00
MGO	0.00
TEMP. °C	115
PRES. MMHG	588
VFRAC	1.00
LFRAC	0.00
SFRAC	0.00
LIT/MIN	5.11E+04
KCAL/HR SUB.	-1.95E+04
PM. PROMEDIO	58.95
ESTRUCTURA	CONVENC.
SUBCORRIENTE	CIPSD
FASE	SOLIDO
COMPONENTES: FRACCION MASA	
AIRE	0.00
CaCO3-2	0.009
CaO	0.0127
Fe2O3	0.0164
Al2O3-2	0.0112
MgCO3	0.009
SiO2	0.0712
CO2	0.00
Na2O	0.0199
K2O	0.0061
C2S	0.1272
C3S	0.5029
C4AF	0.08
C3A	0.0701
YESO	0.01
MGO	0.0088
TEMP. °C	115
PRES. MMHG	588

CEMENTO TIPO C-2	
CORRIENTE	47
VFRAC	0.00
LFRAC	0.00
SFRAC	1.00
TPH SUB.	76.24
KCAL/HR SUB.	-7.30E+08
PM. PROMEDIO	145.18
PSD	
FRAC1	1.00
FRAC2	0.00
FRAC3	0.00
FRAC4	0.00
FRAC5	0.00
FRAC6	0.00
FRAC7	0.00
FRAC8	0.00
FRAC9	0.00
FRAC10	0.00
FRAC11	0.00
FRAC12	0.00
FRAC13	0.00
FRAC14	0.00
FRAC15	0.00
FRAC16	0.00
FRAC17	0.00
FRAC18	0.00
FRAC19	0.00
FRAC20	0.00
FRAC21	0.00
FRAC22	0.00
FRAC23	0.00

## 7.2 RESULTADOS DE EXCEL

Valores en porciento en peso

SECCION DE TRITURACION Tab. 7.2.1 Composición de la sección de Trituración

	CALIZA	ARCILLA	FIERRO
SiO <sub>2</sub>	4.55	50.5	6.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.42	10	1.65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	4.5	60
CaCO <sub>3</sub>	90.5	28.63	16.6
MgCO <sub>3</sub>	1.92	3.97	0.94
CASO <sub>4</sub>	0.6	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.4	0.9	0.9
K <sub>2</sub> O	0.4	0.87	0.23
YESO	0.00	0.00	0.00
TPH	327.6	86.1	6.3

	CRUDO
SiO <sub>2</sub>	13.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.98
CaCO <sub>3</sub>	76.71
MgCO <sub>3</sub>	2.33
CASO <sub>4</sub>	0.47
Na <sub>2</sub> O	0.51
K <sub>2</sub> O	0.49
YESO	0.00
TPH	420.00

FSC= 96.39  
S/R= 2.71  
A/F= 1.61

CAO = 42.96  
SO<sub>3</sub> = 0.28

SECCION DE MOLIENDA Tab. 7.2.2 Composición de la sección de Reacción

	CLINKER TEO. DE BOGUE
MGO	1.11
CAO	2.03
C <sub>3</sub> S	63.16
C <sub>2</sub> S	15.05
C <sub>4</sub> AF	10.06
C <sub>3</sub> A	8.09
K <sub>2</sub> O	0.77
Na <sub>2</sub> O	0.79

TPH= 273  
CRUDO

Tablas 7.2.2

SECCION DE MOLIENDA Tab. 7.2.3 Composición de la sección de Molienda

	YESO	PUZOLANA
SiO <sub>2</sub>	0.1164	0.718
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1	0.1418
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15	0.0339
CaCO <sub>3</sub>	0.00	0.0169
MgCO <sub>3</sub>	0.00	0.0232
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00224
Na <sub>2</sub> O	0.17	0.0027
CASO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0.4636	0.00

	CEMENTO TIPO	
	T-1	C-2
SiO <sub>2</sub>	0.500	7.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.500	1.36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.700	2.01
CaCO <sub>3</sub>	0.00	0.297
CAO	1.932	1.60
MGO	1.060	0.87
K <sub>2</sub> O	0.730	0.60
Na <sub>2</sub> O	1.14	2.41
C <sub>2</sub> S	14.346	11.84
C <sub>3</sub> S	60.206	49.70
C <sub>4</sub> AF	9.585	7.91
C <sub>3</sub> A	7.716	6.37
YESO	2.20	2.00
MGCO <sub>3</sub>	0.00	0.9
TPH	286.38	346.90

Tablas 7.2.3

TPH que se deben alimentar de YESO = 13.38  
TPH que se deben alimentar de PUZOLANA = 60.93  
YESO = CASO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O

## 7.3 ANALISIS DE RESULTADOS

### - TEORIA DE BOGUE

En el estudio experimental en base al Microscópio de Luz transmitida, se tomó una muestra de clinker, y preparando ésta de acuerdo al método de "Sección Pulida" se enfocaron varias zonas de la muestra, obteniendo así una fotografía por cada zona puntual observada.

De las fotografías del Clinker que se obtuvieron se puede observar la presencia de Alita, Belita, Cal libre, Fase fluida así como porosidades, obteniendose los porcentajes de cada compuesto del clinker por diferencia de áreas, los que se muestran en las Tablas 7.3.A, de las cuales al compararlas con la teoría de Bogue se obtienen resultados favorables en el sentido de que la composición del clinker que se produce en la planta de cemento, sigue la misma tendencia que las correlaciones de Bogue como se puede apreciar en la Tab. 7.3.1.B y Fig. 7.3.1.C. Este comportamiento se ve reflejado en los factores de corrección los que se exponen en la Tabla 7.3.1.D.

El porcentaje de variación fué:

No.	COMPUESTO	FACTOR DE CORRECCION	% DE VARIACION
1	C3S	1.029	2.8
2	C2S	1.06	6.2
3	C4AF	0.996	0.4
4	C3A	0.95	4.9
5	CaO	0.47	52

Tabla 7.3.1.D Porcentaje de variación teórica Bogue Vs Real

**ANALISIS MICROSCOPICO DEL CLINKER**  
**" PLANTA ATOTONILCO "**

FOTO No. 1

" A "

" B "

AT=2109

100 MICRAS

AT=1819

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	1164	55
BELITA	273	13
FASE LIQUIDA	346	16.25
CAL LIBRE	37	1.75
POROS	290	14

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	1164	64
BELITA	273	15
C3A	164	9
C4AF	182	10
CAL LIBRE	37	2

FOTO No. 2

AT=2166

AT=2166

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	1424	65.75
BELITA	341	15.74
FASE LIQUIDA	401	18.51

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	1424	65.75
BELITA	341	15.75
C3A	190	8.75
C4AF	211	9.75

FOTO No. 3

AT=2166

AT=1573

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	991	46
BELITA	220	10.2
FASE LIQUIDA	291	13.16
POROS	593	27.37
CAL LIBRE	71	3.27

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	991	63
BELITA	220	14
C3A	125	8
C4AF	166	10.5
CAL LIBRE	71	4.5

FOTO No. 4

AT=2166

AT=1774

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	1100	51
BELITA	598	28
FASE LIQUIDA	39	1.8
POROS	392	18.1
CAL LIBRE	37	1.1

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	1100	62
BELITA	598	33.7
C3A	18	1.02
C4AF	21	1.18
CAL LIBRE	37	2.1

Tab. 7.3.A Resultados del analisis de las fotografias

NOTA ALITA =  $C_3S = 3CaO \cdot SiO_2$

BELITA =  $C_2S = 2CaO \cdot SiO_2$

C3A =  $3CaO \cdot Al_2O_3$

\* En las columnas "B" se ha quitado el área de los poros, pues estos no comprenden la composición del clinker.

**ANALISIS MICROSCOPICO DEL CLINKER  
" PLANTA ATOTONILCO "**

" A "

" B "

FOTO No. 5

AT=2166

AT=1494.5

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	941	43.4
BELITA	284	13.11
FASE LIQUIDA	243	11.22
CAL LIBRE	26.5	1.2
POROS	671.5	31.07

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	941	63
BELITA	284	19
C3A	119	8
C4AF	124	8.3
CAL LIBRE	26.5	1.7

FOTO No. 6

200 MICRAS

AT=2166

AT=1343

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	859	40
BELITA	188	8.68
FASE LIQUIDA	269	12.41
POROS	823	37.9
CAL LIBRE	27	1.01

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	859	64
BELITA	188	14
C3A	121	9
C4AF	148	11
CAL LIBRE	27	2

FOTO No. 7

AT=2166

AT=1606

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	1092	50.4
BELITA	289	13.34
FASE LIQUIDA	181	8.33
POROS	560	26
CAL LIBRE	44	1.91

COMPUESTO	No. DE CUADROS	% QUE REPRESENTA
ALITA	1092	68
BELITA	289	18
C3A	85	5.3
C4AF	96	6
CAL LIBRE	44	2.7

Tab. 7.3.A Resultados del analisis de las fotografias

NOTA ALITA= C3S = 3CaO.SiO2  
BELITA= C2S = 2CaO.SiO2  
C3A = 3CaO.Al2O3

\* En las columnas "B" se ha quitado el área de los poros, pues estos no comprenden la composición del clinker.

Tab. 7.3.1.A Porcentaje promedio de los componentes del Clinker

FOTOS CONSIDERADAS No.	COMPUESTO	PROMEDIO
7 (1,2,3,4,5,6,7)	ALITA (C3S)	64
6 (1,2,3,5,6,7)	BELITA (C2S)	16
3 (1,2,3,5,6)	C4AF	10
4 (1,2,3,5,6)	C3A	8
4 (1,4,5,6,7)	CAL LIBRE	2.1

7.3.1.B Comparación de la composición potencial Vs real

No.	COMPUESTO	BOGUE	REAL
1	C3S	61.8	63.6
2	C2S	15	16
3	C4AF	10.04	10
4	C3A	8.73	8.3
5	CaO	4.43	2.1

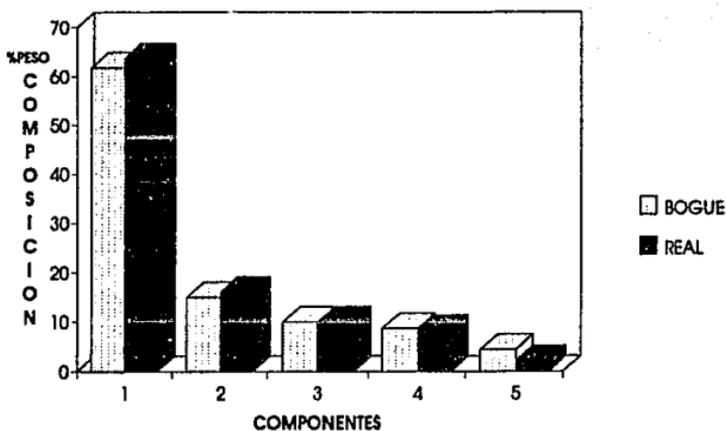


Fig. 7.3.1.C Gráfica de la composición de Bogue Vs real

Los porcentaje de variación son pequeños y sin influencia muy marcada en la composición del clinker, pues la composición que propone Bogue es la composición potencial ideal que alcanzaría el clinker, siendo los componentes del clinker los principales componentes del cemento además de yeso, puzolana, sílice, fierro, alúmina y otros componentes menores.

La CAO fué el compuesto que presentó un porcentaje de variación más amplio debido a que el  $\text{CaCO}_3$  se agrega en exceso, el cual es controlado con el factor FSC cuyos valores son de 96-98 ( ver apéndice C ). Se tiene extremo cuidado en que el CAO no rebase el 2 % en peso debido a que esta planta proveé de cemento a otras industrias de la construcción en donde se tiene un estricto control en la composición del cemento.

## **SIMULACION DEL PROCESO EN ASPEN PLUS**

Las corrientes de corte especificadas para los seis ciclos que se presentan en el proceso fueron estimadas, sabiendo la capacidad de ASPEN PLUS para detectar una corriente de corte y hacer converger un ciclo sin que se le halla especificado una corriente de corte, obviamente el tiempo de convergencia y el número de iteraciones es mayor, pero una vez que convergió el ciclo se tomaron los valores de la corriente de corte especificada por ASPEN PLUS los que se introdujeron en el INPUT, logrando así una disminución en el tiempo de convergencia final.

El método de convergencia utilizado para los seis ciclos fué el método WEGSTEIN sin que presentara ningún problema de convergencia.

Durante la simulación del proceso existen algunos detalles que son necesarios aclarar para un mejor entendimiento de la programación del INPUT, que es el programa de entrada al simulador ASPEN PLUS, estos detalles se mencionan a continuación:

Durante el transcurso de la simulación se utilizó un tipo de clase de corriente para las tres secciones del proceso, tratándose de la corriente MIXCIPSD, la cual se utiliza para subcorriente MIXED (fase líquida y gaseosa) y subcorriente CIPSD (fase sólida con la especificación del tamaño de partícula).

Los filtro de bolsas fueron especificados con datos reales, éstos datos son: caída de presión, tiempo de limpiado, número de bolsas, número de celdas y diámetro de las bolsas, la eficiencia alcanzada en estos equipos es el 100% para el caso del simulador ASPEN PLUS, y cuya eficiencia en la realidad es del 99.9 %.

En los ciclones se especificó el diámetro del ciclón, longitud del cono, longitud del cilindro etc., cuyos datos también son los reales, la eficiencia alcanzadas en este equipo durante la simulación fué de 90% y éste resultado se reflejo en la simulación; en el caso del precipitador electrostático en éste se especificó el diámetro del cable utilizado, número de platos, espaciado entre cables etc. la eficiencia alcanzada para éste equipo en el simulador ASPEN PLUS es del 100 % . y cuya eficiencia en la realidad llega a ser del 99.9 %.

Para el caso de los CRUSHER, las especificaciones que se da a estos equipos son: diámetro de salida de partícula, el BWI el cual varía según el material de que se trate así como del tipo de trituradora o molino. Existen cuatro tipos de CRUSHER de los cuales se tomaron los siguientes:

<b>GYRATORY</b>	<b>Trituradora de pilón (Trituradora primaria).</b>
<b>MULTIPLE-ROLL</b>	<b>Trituradora de martillos (Trituradora secundaria y terciaria).</b>
<b>CAGE-MILL</b>	<b>Molino de bolas (Molino crudo y de Cemento).</b>

Un efecto importante durante el desarrollo del proceso surge en el precalentador; éste equipo lleva el nombre de "precalentador Humboldt" y consiste en cuatro ciclones que están conectados en serie en donde se logra el efecto de calentamiento debido al aire caliente proveniente del horno el cual entra a éste equipo por la parte inferior y actúa en flujo ascendente a contracorriente con el sólido que llega por la parte superior de éste equipo y actúa en flujo descendente lograndose así la transmisión de calor, la temperatura alcanzada va desde 300 °C que es la temperatura de entrada del sólido hasta 700 °C que es la temperatura de salida del sólido, éste efecto se puede ver reflejado en los resultados de la simulación, como se aprecia en la Fig. 4.2.

El horno es rotatorio con una ligera inclinación con el fin de que el sólido no se retenga dentro de éste equipo, aquí se llevan acabo las reacciones que dan origen a los componentes principales del clinker; para la representación de éste equipo se utilizó un reactor RSTOIC sólo para dar efecto a las reacciones además de las razones mencionadas en la sección 5.6 de éste trabajo.

El proceso de elaboración del cemento se lleva acabo al aire libre en toda la sección de Trituración y Molienda; el material es depositado en las tolvas las que se encuentran en la parte superior de las trituradora y por efecto del peso del material y la rotación del equipo el material cae y es transportado por banda de hule o por elevador de cangilones, por lo tanto el cambio de la presión durante ésta sección permanece constante, conservandose la del medio ambiente. En la sección de Reacción el sistema precalentador-horno se encuentran relacionados, debido a que en la salida del gas del precalentador se encuentra un ventilador de tiro inducido el cual succiona el aire desde el horno, logrando así el ascenso del aire caliente, éste cambio en las presiones no causa algún efecto considerable en el sólido, cuyo flujo es descendente.

Los Procesos de elaboración de los cementos tipo T-I y C-2 son iguales en la sección de Trituración ( en donde se alcanza una reducción del tamaño de partícula que va desde 42" hasta 75  $\mu$  ) y sección de Reacción ( en donde el crudo es calcinado en el horno para dar origen al clinker), la diferencia se presenta en la sección de Molienda ( en esta sección el material es finamente molido hasta tamaños de 45 $\mu$  y 75 $\mu$ ), por la adición de una materia prima, Como se puede apreciar en las Tablas 7.1.a y 7.1.b para el caso de la corriente 51, la cual se trata de cemento tipo T-I y C-2 sucesivamente, la diferencia en la composición es debida a la adición de PUZOLANA al Clinker además del YESO, para el caso del cemento tipo C-2; la PUZOLANA es rica en SIO<sub>2</sub>, FE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lo que contribuye a aumentar ciertas propiedades mecánicas al cemento (Consistencia, Rápidez de fraguado etc.).

Estas diferencias se pueden observar en la siguiente Tabla que surge de los resultados de la simulación.

COMPUESTO	CEMENTO T-I % peso	CEMENTO C-2 % peso
CACO <sub>3</sub>	0.00	0.29
CAO	1.9	1.6
FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.69	2.0
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5	1.36
MGCO <sub>3</sub>	0.00	0.9
SIO <sub>2</sub>	0.49	7.2
NA <sub>2</sub> O	1.14	2.4
K <sub>2</sub> O	0.73	0.61
C <sub>2</sub> S	14.8	11.8
C <sub>3</sub> S	60.2	49.7
C <sub>4</sub> AF	9.6	8.0
C <sub>3</sub> A	7.7	6.4
YESO	2.2	2.0
MGO	1.0	1
TAMAÑO MAX. PART.	75 $\mu$	45 $\mu$

Tabla 7.3.2 Composición de cemento tipo T-I y C-2

Para el caso del MGO existe un límite superior en las especificaciones oficiales que es de 5 % en peso, si se rebasa éste límite se origina un fenómeno de expansión en el cemento, sin embargo en planta Atotonilco el límite es 2 % asegurando de esta manera algún problema posterior (Ver bibliografía Norma Oficial Mexicana).

Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O el rango aceptable entre 0.8 y 1.4 % no tiene ningún efecto considerablemente en las propiedades del cemento.

El yeso se agrega como aditivo, que ayuda en el regulamiento de fraguado.

Los componentes principales del clinker son C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>4</sub>AF y C<sub>3</sub>A, los que dan la resistencia mecánica al cemento. Los demás componentes como el SiO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y YESO ayudan al cemento regulando el tiempo de fraguado. Es importante mencionar que las propiedades mecánicas del cemento se obtienen principalmente de la composición química del cemento y de la estructura cristalina del clinker. (ver Bibliografía "Química del Cemento" de Bogue)

## **RESULTADOS DE EXCEL**

Tratándose de una simulación a estado estacionario surge una situación que es necesario especificar y que se da constantemente, que es la variación en la composición de las materias primas ARCILLA, FIERRO y principalmente la CALIZA, ésta corriente cambia constantemente tanto en composición como en tamaño de partícula. En composición varía de un estrato a otro y en tamaño de partícula también varía debido a que ésta materia prima es traída de cantera directamente, en donde no es posible controlar las dimensiones de las piedras que se produce durante la explosión, únicamente se acepta un tamaño máximo de piedra que es de 42".

La composición química alcanzada en ésta hoja de cálculo es similar a la del simulador ASPEN PLUS como se puede analizar en la tabla de composición 7.3.3. Por lo tanto la hoja de cálculo EXCEL ofrece buenos resultados, con la diferencia de que aquí no se manejan equipos, tamaño de partícula, ni subcorrientes; sino que se trata de un balance estequiométrico, pero que significa una herramienta de gran ayuda en la determinación de la composición del Cemento a partir de la composición química de las materias primas y la cantidad de cada una de estas que debe combinarse para que los factores que se manejan no se vean alterados en gran medida y caigan dentro del rango establecido de control; los factores de los cuales se hace referencia son: FSC, A/F y S/R. Estos factores surgen de estudios experimentales (ver bibliografía " La Química del Cemento" de Bogue), en base a la experiencia y condiciones de operación de los equipos, y cuyo valor varía de 96 a 98 (ver apéndice C). A continuación se muestra la composición alcanzada en la simulación del proceso de cemento y la hoja de cálculo EXCEL.

COMPUESTO	SIMULADOR ASPEN PLUS		HOJA DE CALCULO EXCEL	
	CEMENTO T-I % peso	CEMENTO C-2 % peso	CEMENTO T-I % peso	CEMENTO C-2 % peso
CACO3	0.00	0.29	0.000	0.297
CAO	1.9	1.6	1.93	1.6
FE2O3	0.69	2.0	0.7	2.01
AL2O3	0.5	1.36	0.5	1.36
MGCO3	0.00	0.9	0.00	0.9
SiO2	0.49	7.2	0.5	7.22
NA2O	1.14	2.4	1.14	2.41
K2O	0.73	0.61	0.730	0.60
C2S	14.8	11.8	14.37	11.84
C3S	60.2	49.7	60.2	49.7
C4AF	9.6	8.0	9.58	7.91
C3A	7.7	6.4	7.716	6.37
YESO	2.2	2.0	2.2	2.0
MGO	1.0	1	1.060	0.97
TAMAÑO MAX. PART.	75 $\mu$	45 $\mu$	—	—

Tabla 7.3.3 Composición de cemento tipo T-I y C-2 , resultados de la simulación de ASPEN PLUS Vs Excel

En la Tabla siguiente se muestran las especificaciones químicas reconocidas oficialmente en la Norma Oficial Mexicana.

<b>COMPUESTO Y CARACTERISTICAS</b>	<b>CEMENTO T-I % peso</b>	<b>CEMENTO C-2 % peso</b>
SiO <sub>2</sub> , mín. %	----	21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , máx. %	----	----
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , máx %	----	6.0
MgO, máx %	5.0	5.0
C <sub>3</sub> S, máx % *	----	----
C <sub>2</sub> S, mín. % *	----	----
C <sub>3</sub> A, máx. % *	----	8
C <sub>4</sub> AF máx, % *	----	----

#### 7.3.4 Parámetros químicos de la Norma Oficial Mexicana

\* se determinan con las correlaciones de Bogue.

## **CAPITULO 8**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Las correlaciones de Bogue son reconocidas oficialmente en la industria del cemento y expuestas en la Norma Oficial Mexicana para el control de la calidad del clinker de cemento.

- La composición que arrojan las correlaciones de Bogue son aceptadas y se acercan en gran medida a la composición química del clinker producido en cementos Tolteca, Planta Atotonilco.

Debido a lo que se plantea anteriormente la composición que se especifica en las correlaciones de Bogue (ésta composición del clinker se expone en la Tabla 7.3.1.A) son usadas para determinar la composición del clinker durante la simulación en ASPEN PLUS, en la parte donde se especifica la conversión de los reactivos en el Horno utilizando el modelo RSTOIC.

Estas correlaciones de Bogue también fueron usadas en la hoja de cálculo Excel.

La finalidad de simular el proceso de elaboración de cemento fué la de conocer los alcances y limitaciones del simulador ASPEN PLUS en el manejo de sólidos, y que lo hacen diferente a otros procesos donde se manejan fase líquida o gaseosa; la diferencia principal se ve reflejada en el equipo que se utiliza y en el manejo del tamaño de partícula. Es necesario considerar varios factores para lograr una buena simulación con sólidos en el ASPEN PLUS, los cuales se mencionan a continuación:

- ASPEN PLUS maneja las fases sólida, líquida y gaseosa como subcorrientes, por lo que cuando ASPEN despliega los resultados los maneja en subcorrientes como se puede ver en las tablas de resultados de la simulación Tablas 7.1.a,b,c,d,e,f.
- Existen equipos que manejan única y exclusivamente fase sólida, como es el caso de los CRUSHER, SCREEN, etc.

- ASPEN PLUS maneja los equipos de protección ambiental Filtro de bolsas, Ciclon y Precipitador electrostático de los cuales el Ciclon no logra separar totalmente el sólido del gas su eficiencia anda en un 95 % y por el contrario el Precipitador y el Filtro de Bolsas alcanzan eficiencias del 100 %
- Existen equipos que aceptan unicamente fase sólida y fase gaseosa, como es el caso de FABFL (filtro de bolsas), CICLON, etc.; es por esto que durante la simulación del proceso se introdujo aire intencionalmente.
- Dentro de los Sólidos existen tres clases de subcorrientes CISOLID:
  - CIPSD: Componente convencional que se le asigna un tamaño de partícula.
  - NCPSD: Componente no convencional al que se le asigna un tamaño de partícula.
  - CISOLID: Componente convencional al que no se le asigna un tamaño de partícula.
- ASPEN PLUS es capaz de simular reacciones en fase sólida ( subcorriente CISOLID ) la cual reacciona con otra fase ya sea líquida o gaseosa (subcorriente MIXED ); para lograr éste propósito es necesario introducir la cinética de la reacción en una subrutina en FORTRAN la que es llamada y compilada desde el programa de entrada al simulador ( INPUT ).
- ASPEN PLUS, no fué capaz de simular el reactor con cinética, debido a que no puede realizar cálculos cuando en el modelo se le introduce unicamente fase sólida, como es el caso del proceso de elaboración de cemento en el caso de la corriente de CRUDO subcorriente CIPSD (fase sólida) que entra al horno.

- Es importante mencionar que ASPEN PLUS no cuenta con un modelo de operaciones unitarias para el almacenamiento y prehomogeneización de sólidos, como es el caso de los SILOS; los que se representarían por un mezclador, perdiendo de vista la importancia de éste equipo. Los elevadores de cangilones, las bandas transportadoras de material tienen el mismo caso.

ASPEN PLUS resultó ser capaz de simular y representar en gran medida las condiciones que se presentan en la realidad cuando se maneja la fase sólida. Los resultados de la simulación presentados, así como sus análisis demuestran que el simulador ASPEN PLUS resulta ser una herramienta confiable en el diseño de procesos químicos tanto en fase sólida como en otras fases.

#### *RECOMENDACIONES*

El enfoque durante la formación profesional del Ingeniero Químico es principalmente la Industria Petrolera, por lo que poco se conoce de procesos fuera de éste campo industrial; es recomendable conocer otros campos de la Industria de Procesos que nos permitan conocer detalles de diseño y análisis de procesos. El proceso de elaboración de cemento pertenece a otra rama de la industria en donde se conocen equipos diferentes, en donde interviene únicamente la fase sólida, tratándose de un proceso de gran importancia para la industria de la construcción.

## **BIBLIOGRAFIA**

- 1 • "Aspen Technology Inc. ASPEN-PLUS, Apéndice A", 1991.
- 2 • "Aspen Technology Inc. ASPEN-PLUS Guide to Physical Properties, 1991.
- 3 • "Aspen Technology Inc. ASPEN-PLUS Interactive Simulation, 1991.
- 4 • "Aspen Technology Inc. ASPEN-PLUS Model Manager and Aspen Plus, installation and reference for the PC, 1991.
- 5 • "Aspen Technology Inc. ASPEN-PLUS Solids Manual, 1991.
- 6 • "Aspen Technology Inc. ASPEN-PLUS User Guide, 1991.
- 7 • "Aspen Technology Inc. ASPEN-PLUS Model Manager Getting Started and Tutorials for the PC, 1991.
- 8 • "Capacity of the Rotary Cement Kiln "  
J. Soc. Chem. Ind. 41, 330-2, 332-4.  
1938.
- 9 • " Cement And Concrete Research "  
An International Journal.  
Vol. 8, 16, 19. 1986-1987.  
Pergamon Press. New York OXFORD.
- 10 • " Cement Chemistry "  
H.F.W. Taylor.  
Ed. Academics Press.  
1990.
- 11 • " Cemento, Fabricación, Propiedades, aplicaciones "  
Dr. Phil Fritz Keil.  
Editores Técnicos Asociados.  
1986.

- 12 • " Chemicals Engineering Handbook "  
Robert H. Perry.  
Cecil H. Chilton.  
McGraw-Hill Book company.  
1985.
- 13 • " Chemical Process Simulation "  
Asghar Husain.  
Regional Research Laboratory.  
Hyderabad.  
Ed. Wiley Eastern Limited.  
1980.
- 14 • " Chemical Process Simulation "  
Biegler T. L.  
Chem. Eng. Progress; October 1989, pp. 50-61.
- 15 • " Curso de Tecnología del Cemento "  
Centro de Capacitación y Adiestramiento.  
Planta Atotonilco.  
1991.
- 16 • " Estudio de las condiciones óptimas de las materias primas para Cemento Portland "  
Ma. Gpe. Anda Ortiz.  
1965.
- 17 • " Ingeniería de Proyecto para Plantas de Ingeniería "  
H. F. Rase y M. H. Barrow.  
Ed. CECSA.  
1988.
- 18 • " La Química del Cemento "  
R:H: Bogue.  
Ed. DOSSAT S.A:  
1952.

- 19 • " Microsoft EXCEL "   
 Hoja de cálculo con gráficos y base de datos.   
 Referencia de funciones.   
 Versión 4.0   
 1989-1992.
- 20 • " Norma Oficial Mexicana "   
 1975.
- 21 • " The Rotary Cement Kiln "   
 by Kurt E. Peray.   
 Second Edition.   
 Chemical Publishing Co., Inc.   
 New York.   
 1986.
- 22 • " Operaciones de separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química "   
 Henley, E. J.   
 México, Reverté, 1990; 814 pp
- 23 • "Prontuario de Cemento "   
 Lagahn, Kohlhas.   
 Editores Técnicos Asociados.   
 1975.
- 24 • " Simulación de Procesos a Estado Estacionario "   
 Mariano Ramos Olmos.   
 México, D. F. 1984.
- 25 • " 7 th International, Congress on the Chemistry of Cement "   
 Volume I.   
 Principal Reports.   
 París 1980.
- 26 • " Bitácoras de control de calidad y balance energético del horno "   
 Cementos Tolteca; 1994

## APENDICE A

## A-1 INPUT'S PARA LA SIMULACION DEL PROCESO DE ELABORACION CEMENTO TIPO T-I

Como se mencionó anteriormente la diferencia entre los procesos de elaboración del Cemento Tipo T-I y C-2 consiste en la adición de una corriente de PUZOLANA al Clinker para el caso del Cemento Tipo C-2.

```
TITLE " CEMENTO TOLTECA "
;
IN-UNITS MET TEMPERATURE=C PRESSURE=MMHG &
    MASS-FLOW="TONNE/HR" LENGTH=IN &
    ENTHALPY-FLOW="KCAL/HR" &
    MOLE-ENTHALPY="KCAL/MOL" &
    MOLE-HEAT-CAPACITY="KCAL/MOL-K"
OUT-UNITS MET TEMPERATURE=C PRESSURE=MMHG &
    MASS-FLOW="TONNE/HR" LENGTH=IN &
    ENTHALPY-FLOW="KCAL/HR" &
    MOLE-ENTHALPY="KCAL/MOL" &
    MOLE-HEAT-CAPACITY="KCAL/MOL-K"
;
; ***** CORRIENTES DE CORTE *****
TEAR 2 / 5 / 20 / 26 / 37I / 37E / 37A / 42
;
DATABANKS      SOLIDS / DIPRPCD
;
PROP-SOURCES   SOLIDS / DIPRPCD
;
COMPONENTS     AIR AIR /
                CACO3-2 CACO3-2 /
                CAO CAO /
                FE2O3 FE2O3 /
                AL2O3-2 AL2O3-2 /
                MGCO3 MGCO3 /
                SIO2 SIO2 /
                CO2 CO2 /
                H2O H2O /
                NA2O NA2O /
                K2O K2O /
                CASO4 CASO4 /
                O3S O3S /
                C3 * C2S /
                C4 * C3S /
                C5 * C4AF /
                C6 * C3A /
                C7 * YESO /
                MGO MGO
```

\* ESPECIFICACION DE PROPIEDADES \*

\*\*\*\*\* SILICATO DICALSICO \*\*\*\*\*  
 PROP-DATA  
 PROP-LIST MW / DHSFRM / CPSPO1 / DGSFRM  
 PVAL C3 172 / 377.9 / 27.9 / 357.5

\*\*\*\*\* SILICATO TRICALSICO \*\*\*\*\*  
 PROP-DATA  
 PROP-LIST MW / DHSFRM / CPSPO1 / DGSFRM  
 PVAL C4 228.32 / 700.1 / 41.08 / 665.4

\*\*\*\*\* FERROALUMINATO TETRACALCICO \*\*\*\*\*  
 PROP-DATA  
 PROP-LIST MW / DHSFRM / CPSPO1 / DGSFRM  
 PVAL C5 485.6 / 850.7 / 55.29 / 842.4

\*\*\*\*\* ALUMINATO TRICALSICO \*\*\*\*\*  
 PROP-DATA  
 PROP-LIST MW / DHSFRM / CPSPO1 / DGSFRM  
 PVAL C6 270.20 / 857.5 / 50.16 / 815.5

\*\*\*\*\* YESO \*\*\*\*\*  
 PROP-DATA  
 PROP-LIST MW / DHSFRM / CPSPO1 / DGSFRM  
 PVAL C7 168.14 / 479.33 / 42.5 / 425.47

PROPERTIES SYSOP0

FLWSHEET TRITURACION

BLOCK MIXER1	IN=CALIZA 100	OUT=2
BLOCK PRIMARIA	IN=2	OUT=3
BLOCK SCREEN0	IN=3	OUT=101 9
BLOCK MIXERA	IN=9 AIRE1	OUT=9A
BLOCK FABFL1	IN=9A	OUT=11 10
BLOCK SCREEN1	IN=101	OUT=100 4
BLOCK MIXER2	IN=4 10 15	OUT=5
BLOCK SECUN	IN=5	OUT=12
BLOCK SCREEN6	IN=12	OUT=200 6
BLOCK MIXERB	IN=6 AIRE2	OUT=6A
BLOCK FABFL2	IN=6A	OUT=8 7
BLOCK SCREEN2	IN=200	OUT=15 16
BLOCK MIXERC	IN=16 ARCILLA 7 24	OUT=20
BLOCK TERCIA	IN=20	OUT=23
BLOCK SCREEN7	IN=23	OUT=300 21
BLOCK MIXERD	IN=21 AIRE3	OUT=21A
BLOCK FABFL3	IN=21A	OUT=22 18
BLOCK SCREEN3	IN=300	OUT=24 25
BLOCK MIXERE	IN=25 FIERRO 30 18	OUT=27
BLOCK HEATER0	IN=27	OUT=27A

BLOCK MOLCRU	IN=27A	OUT=26
BLOCK SCREEN8	IN=26	OUT=32 31
BLOCK MIXERF	IN=31 AIRE4	OUT=31A
BLOCK ELECTROFIL	IN=31A	OUT=35 36
BLOCK SCREEN4	IN=32	OUT=30 33
BLOCK MIXERG	IN=33 36 POLVO	OUT=37A

;  
**FLWSHEET REACCION**

BLOCK CLCHNG1	IN=37A	OUT=37
BLOCK MIXC1	IN=37 GASEL1	OUT=37H
BLOCK CICLON1	IN=37H	OUT=GASEL 37G
BLOCK VTI	IN=GASEL	OUT=GASE
BLOCK ELECTR	IN=GASE	OUT=GAS POLVO
BLOCK MIXC2	IN=37G GASEL2	OUT=37I
BLOCK CICLON2	IN=37I	OUT=GASEL1 37J
BLOCK MIXC3	IN=37J GASEL3	OUT=37D
BLOCK CICLON3	IN=37D	OUT=GASEL2 37E
BLOCK MIXC4	IN=37E AIREZ	OUT=37F
BLOCK CICLON4	IN=37F	OUT=GASEL3 CRUDOP
BLOCK HORNO	IN=CRUDOP	OUT=39
BLOCK SEPA0	IN=39	OUT=39A 39B
BLOCK ENFRI	IN=39B AE	OUT=40 AC
BLOCK MIXE	IN=39A AC	OUT=ACC
BLOCK M	IN=ACC	OUT=AIREZ

;  
**FLWSHEET MOLIENDA**

BLOCK CLCHNG2	IN=40	OUT=41
BLOCK MIXERH	IN=41 YESO 49	OUT=42
BLOCK MOLCEM	IN=42	OUT=43
BLOCK SCREENA	IN=43	OUT=44 45
BLOCK MIXERI	IN=45 AIRE5	OUT=47
BLOCK FABFLA	IN=47	OUT=48A 48
BLOCK SCREENB	IN=44	OUT=49 50
BLOCK MIXERJ	IN=50 48	OUT=51

;  
**DEF-STREAMS MIXCIPSD TRITURACION**

DEF-STREAMS MIXCIPSD REACCION

DEF-STREAMS MIXCIPSD MOLIENDA

;  
**DEF-SUBS-ATTR PSD PSD**

IN-UNITS LENGTH=IN

INTERVALS 23

SIZE-LIMITS 0 / 0.0017716 / 0.002165 / 0.0029527 / 0.003937 / 0.009842 / 0.03937 / 0.1968 /  
0.375 / 0.5 / 0.75 / 1 / 1.5 / 2 / 2.5 / 3 / 4 / 5 / 10 / 15 / 20 / 25 / 30 / 42

;  
**STREAM CALIZA**

SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MASS-FLOW=327.6

MASS-FRAC SIO2 0.0455 / AL2O3-2 0.0142 / FE2O3 0.002 / CaCO3-2 0.905 /

CASO4 0.006 / MGCO3 0.0192 / NA2O .004 / K2O .0041

SUBS-ATTR PSD (.007 .006 .006 .009 .0062 .002 .001 .01 .02 .001 .01 .02 .0268 &  
.02 .002 .001 .085 .11 .19 .21 .18 .065 .012)

```

;
STREAM 2
  SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=327
  MASS-FRAC SIO2 0.0455 / AL2O3-2 0.0142 / FE2O3 0.002 / CACO3-2 0.905 /
  CASO4 0.006 / MGCO3 0.0192 / NA2O .004 / K2O .0041
  SUBS-ATTR PSD (.0096 .01 .0128 .008 .002 .005 .009 .01 .01 .01 .012 .013 .011 &
  .02 .05 .04 .1 .09 .1566 .11 .13 .17 .11 )
;
STREAM AIRE1
  SUBSTREAM MIXED TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=2.89
  MOLE-FRAC AIR 1
;
STREAM AIRE2
  SUBSTREAM MIXED TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=2.89
  MOLE-FRAC AIR 1
;
STREAM 5
  SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MASS-FLOW=326.5
  MASS-FRAC SIO2 0.0455 / AL2O3-2 0.0142 / FE2O3 0.002 / CACO3-2 0.905 /
  CASO4 0.006 / MGCO3 0.0192 / NA2O .004 / K2O .0041
  SUBS-ATTR PSD (.01 .02 .012 .013 .012 .009 .03 .01 .04 .021 .013 .11 .18 .09 &
  .1 .17 .16 0 0 0 0 0 0 )
;
STREAM ARCILLA
  SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MASS-FLOW=86.1
  MASS-FRAC SIO2 0.505 / AL2O3-2 0.1063 / FE2O3 0.052 / CACO3-2 0.2863 /
  MGCO3 0.0397 / NA2O .009 / K2O .0087
  SUBS-ATTR PSD (.011 .0085 .0115 .011 .0106 .102 .105 .12 .11 .105 .05 .09 .1 &
  .0754 .09 0 0 0 0 0 0 0 0 )
;
STREAM 20
  SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MASS-FLOW=413
  MASS-FRAC SIO2 0.1455 / AL2O3-2 0.033 / FE2O3 0.01 / CACO3-2 0.776 /
  CASO4 0.0047 / MGCO3 0.025 / NA2O .005 / K2O .0051
  SUBS-ATTR PSD (.02 .012 .012 .051 .08 .11 .111 .02 .021 .011 .05 .2 .25 .012 &
  .04 0 0 0 0 0 0 0 0 )
;
STREAM AIRE3
  SUBSTREAM MIXED TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=2.89
  MOLE-FRAC AIR 1
;
STREAM AE
  SUBSTREAM MIXED TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=2.89
  MOLE-FRAC AIR 1
;
STREAM FIERRO
  SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MASS-FLOW=6.3
  MASS-FRAC SIO2 .1164 / AL2O3-2 .0165 / FE2O3 .6286 / CACO3-2 .166 /
  MGCO3 .0094 / NA2O .009 / K2O .0023
  SUBS-ATTR PSD (.14 .12 .13 .18 .12 .1 .11 .03 .04 .03 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 )
;

```





```

BLOCK SCREEN2 SCREEN
  IN-UNITS LENGTH=IN
  PARAM OPENING=1.99 MODE=DRY STRENGTH=18
;
BLOCK MIXERC MIXER
;
BLOCK TERCIA CRUSHER
  IN-UNITS LENGTH=IN
  PARAM DIAM=1 MODE=PRIMARY TYPE=MULTIPLE-ROLL
  BWI CIPSD 9.49
;
BLOCK SCREEN7 SCREEN
  IN-UNITS LENGTH=MU
  PARAM OPENING=99 MODE=DRY STRENGTH=0.9
;
BLOCK MIXERD MIXER
  PARAM PRES=588
;
BLOCK FABFL3 FABFL
  IN-UNITS AREA=SQIN PRESSURE=MMHG LENGTH=IN
  PARAM CALCULATE=PRESSURE
  BAG-PROPS NCELLS=4 NBAGS=64 DIAM=5 AREA=1570.8 PDROP=0.2941
  OPERATION FILT-TIME=0.5
;
BLOCK SCREEN3 SCREEN
  IN-UNITS LENGTH=IN
  PARAM OPENING=1 MODE=DRY STRENGTH=20
;
BLOCK MIXERE MIXER
;
BLOCK HEATER0 HEATER
  PARAM PRES=0 TEMP=300 NPHASE=2
;
BLOCK MOLCRU CRUSHER
  IN-UNITS LENGTH=IN
  PARAM DIAM=.002 MODE=PRIMARY TYPE=CAGE-MILL
  BWI CIPSD 9.52
;
BLOCK SCREEN8 SCREEN
  IN-UNITS LENGTH=MU
  PARAM OPENING=10 MODE=DRY STRENGTH=0.5
;
BLOCK MIXERF MIXER
  PARAM PRES=588
;
BLOCK ELECTROFIL ESP
  SIMULATION NPLATE=100 HT-PLATE=10 LEN-PLATE=4
  WIRE-SPECS PLATE-WIRE=0.5 WIRE-WIRE=0.6 DIAM=.1055
  DIELECTRIC CIPSD 20
;

```

```

BLOCK SCREEN4 SCREEN
  IN-UNITS LENGTH=MU
  PARAM OPENING=70 MODE=DRY LEVEL=UPPER STRENGTH=60
;
BLOCK MIXERG MIXER
;
BLOCK CLCHNG1 CLCHNG
;
BLOCK MIXC1 MIXER
  PARAM PRES= -45
;
BLOCK CICLONI CYCLONE
  IN-UNITS LENGTH=METER
  SIMULATION DIAM=2.5
  PARAM MODE=SIMULATION METHOD=LAPPLE TYPE=USER VANE=16
  DIMENSIONS LEN-CYLINDER=2 LEN-CONE=3 DIAM-OVER=1 LEN-OVER=1 &
  WIDTH-INLET=0.5 HT-INLET=1 DIAM-UNDER=0.75
;
BLOCK VTI COMPR
  PARAM TYPE= POLYTROPIC PRES=588 TEMP=210
;
BLOCK ELECTR ESP
  SIMULATION NPLATE=100 HT-PLATE=10 LEN-PLATE=4
  WIRE-SPECS PLATE-WIRE=0.5 WIRE-WIRE=0.6 DIAM=.1055
  DIELECTRIC CIPSD 10
;
BLOCK MIXC2 MIXER
  PARAM PRES= -30
;
BLOCK CICLON2 CYCLONE
  IN-UNITS LENGTH=METER
  SIMULATION DIAM=2.5
  PARAM MODE=SIMULATION METHOD=LAPPLE TYPE=USER VANE=16
  DIMENSIONS LEN-CYLINDER=2 LEN-CONE=3 DIAM-OVER=1 LEN-OVER=1 &
  WIDTH-INLET=0.5 HT-INLET=1 DIAM-UNDER=0.75
;
BLOCK MIXC3 MIXER
  PARAM PRES= -23.5
;
BLOCK CICLON3 CYCLONE
  IN-UNITS LENGTH=METER
  SIMULATION DIAM=2.5
  PARAM MODE=SIMULATION METHOD=LAPPLE TYPE=USER VANE=16
  DIMENSIONS LEN-CYLINDER=2 LEN-CONE=3 DIAM-OVER=1 LEN-OVER=1 &
  WIDTH-INLET=0.5 HT-INLET=1 DIAM-UNDER=0.75
;
BLOCK MIXC4 MIXER
  PARAM PRES= -11
;

```

BLOCK CICLON4 CYCLONE  
IN-UNITS LENGTH=METER  
SIMULATION DIAM=1.5  
PARAM MODE=SIMULATION METHOD=LAPPLE TYPE=USER VANE=16  
DIMENSIONS LEN-CYLINDER=2 LEN-CONE=3 DIAM-OVER=1 LEN-OVER=1 &  
WIDTH-INLET=0.5 HT-INLET=1 DIAM-UNDER=0.75

;

BLOCK HORNO RSTOIC

PARAM PRES=590 TEMP=1400 SERIES=YES NPHASE=2  
STOIC 1 CIPSD CASO4 -1/ CAO 1/MIXED O3S 1  
STOIC 2 CIPSD MGCO3 -1/ MGO 1/MIXED CO2 1  
STOIC 3 CIPSD CACO3-2 -1/ CAO 1/MIXED CO2 1  
STOIC 4 CIPSD CAO -2/ SIO2 -1/ C3 1  
STOIC 5 CIPSD CAO -1/ C3 -1/ C4 1  
STOIC 6 CIPSD CAO -4/ AL2O3-2 -1/ FE2O3 -1/ C5 1  
STOIC 7 CIPSD CAO -3/ AL2O3-2 -1/ C6 1  
CONV 1 CIPSD CASO4 1  
CONV 2 CIPSD MGCO3 1  
CONV 3 CIPSD CACO3-2 1  
CONV 4 CIPSD CAO 0.64  
CONV 5 CIPSD CAO 0.6  
CONV 6 CIPSD FE2O3 1  
CONV 7 CIPSD AL2O3-2 1  
SUBS-ATTR 3 CIPSD PSD (.01 .05 .01 .01 .02 .03 .02 .11 .12 .15 .11 .13 .07 &  
.07 .09 0 0 0 0 0 0 0 0)  
SUBS-ATTR 4 CIPSD PSD (.01 .05 .01 .01 .02 .03 .02 .11 .12 .15 .11 .13 .07 &  
.07 .09 0 0 0 0 0 0 0 0)

;

BLOCK SEPA0 SSPLIT

FRAC MIXED 39A 1  
FRAC CIPSD 39A 0

;

BLOCK ENFRI HEATX

PARAM T-COLD=1200  
FEEDS HOT=39B COLD=AE  
PRODUCTS HOT=40 COLD=AC  
HEAT-TR-COEF U=600

;

BLOCK MIXE MIXER

;

BLOCK M MULT

PARAM 0.25

;

BLOCK CLCHNG2 CLCHNG

;

BLOCK MIXERH MIXER

PARAM PRES=585

;

BLOCK MOLCEM CRUSHER

IN-UNITS LENGTH=MU  
PARAM DIAM=50 MODE=PRIMARY TYPE=CAGE-MILL  
BWI CIPSD 13.49

;  
BLOCK SCREENA SCREEN

IN-UNITS LENGTH=MU

PARAM OPENING=44 STRENGTH=.5

;  
BLOCK MIXERI MIXER

PARAM PRES=588

;  
BLOCK FABFLA FABFL

IN-UNITS AREA=SQIN PRESSURE=MMHG LENGTH=IN

PARAM CALCULATE=PRESSURE

BAG-PROPS NCELLS=4 NBAGS=64 DIAM=5 AREA=940.0 PDROP=0.2941

OPERATION FILT-TIME=0.5

;  
BLOCK SCREENB SCREEN

IN-UNITS LENGTH=MU

PARAM OPENING=54 STRENGTH=60

;  
BLOCK MIXERJ MIXER

;  
STREAM-REPORT MASSFRAC

A-2 INPUT'S PARA LA SIMULACION DEL PROCESO DE ELABORACION  
CEMENTO TIPO C-2

TITLE " CEMENTO TOLTECA "

```

;
IN-UNITS MET TEMPERATURE=C PRESSURE=MMHG &
      MASS-FLOW="TONNE/HR" LENGTH=IN &
      ENTHALPY-FLOW="KCAL/HR" &
      MOLE-ENTHALPY="KCAL/MOL" &
      MOLE-HEAT-CAPACITY="KCAL/MOL-K"
OUT-UNITS MET TEMPERATURE=C PRESSURE=MMHG &
      MASS-FLOW="TONNE/HR" LENGTH=IN &
      ENTHALPY-FLOW="KCAL/HR" &
      MOLE-ENTHALPY="KCAL/MOL" &
      MOLE-HEAT-CAPACITY="KCAL/MOL-K"

```

```

;
;***** CORRIENTES DE CORTE *** *****
TEAR  2 / 5 / 20 / 26 / 37I / 37E / 37A / 42

```

```

;
DATABANKS      SOLIDS / DIPRPCD

```

```

;
PROP-SOURCES   SOLIDS / DIPRPCD

```

```

;
COMPONENTS     AIR AIR /
                CACO3-2 CACO3-2 /
                CAO CAO /
                FE2O3 FE2O3 /
                AL2O3-2 AL2O3-2 /
                MGCO3 MGCO3 /
                SIO2 SIO2 /
                CO2 CO2 /
                H2O H2O /
                NA2O NA2O /
                K2O K2O /
                CASO4 CASO4 /
                O3S O3S /
                C3 * C2S /
                C4 * C3S /
                C5 * C4AF /
                C6 * C3A /
                C7 * YESO /
                MGO MGO

```

```

;
; * ESPECIFICACION DE PROPIEDADES *
;

```

```

;***** SILICATO DICALSICO *****

```

```

PROP-DATA
PROP-LIST MW / DHSFRM / CPSPO1 / DGFORM
PVAL C3 172 / 377.9 / 27.9 / 357.5

```

\*\*\*\*\* SILICATO TRICALSICO \*\*\*\*\*

PROP-DATA

PROP-LIST MW / DHSFRM / CPSPO1 / DGSFRM  
PVAL C4 228.32 / 700.1 / 41.08 / 665.4

\*\*\*\*\* FERROALUMINATO TETRACALCICO \*\*\*\*\*

PROP-DATA

PROP-LIST MW / DHSFRM / CPSPO1 / DGSFRM  
PVAL C5 485.6 / 850.7 / 55.29 / 842.4

\*\*\*\*\* ALUMINATO TRICALSICO \*\*\*\*\*

PROP-DATA

PROP-LIST MW / DHSFRM / CPSPO1 / DGSFRM  
PVAL C6 270.20 / 857.5 / 50.16 / 815.5

\*\*\*\*\* YESO \*\*\*\*\*

PROP-DATA

PROP-LIST MW / DHSFRM / CPSPO1 / DGSFRM  
PVAL C7 168.14 / 479.33 / 42.5 / 425.47

PROPERTIES SYSOPO

FLWSHEET TRITURACION

BLOCK MIXER1	IN=CALIZA 100	OUT=2
BLOCK PRIMARIA	IN=2	OUT=3
BLOCK SCREEN0	IN=3	OUT=101 9
BLOCK MIXERA	IN=9 AIRE1	OUT=9A
BLOCK FABFL1	IN=9A	OUT=11 10
BLOCK SCREEN1	IN=101	OUT=100 4
BLOCK MIXER2	IN=4 10 15	OUT=5
BLOCK SECUN	IN=5	OUT=12
BLOCK SCREEN6	IN=12	OUT=200 6
BLOCK MIXERB	IN=6 AIRE2	OUT=6A
BLOCK FABFL2	IN=6A	OUT=8 7
BLOCK SCREEN2	IN=200	OUT=15 16
BLOCK MIXERC	IN=16 ARCILLA 7 24	OUT=20
BLOCK TERCIA	IN=20	OUT=23
BLOCK SCREEN7	IN=23	OUT=300 21
BLOCK MIXERD	IN=21 AIRE3	OUT=21A
BLOCK FABFL3	IN=21A	OUT=22 18
BLOCK SCREEN3	IN=300	OUT=24 25
BLOCK MIXERE	IN=25 FIERRO 30 18	OUT=27
BLOCK HEATER0	IN=27	OUT=27A
BLOCK MOLCRU	IN=27A	OUT=26
BLOCK SCREEN8	IN=26	OUT=32 31
BLOCK MIXERF	IN=31 AIRE4	OUT=31A
BLOCK ELECTROFIL	IN=31A	OUT=35 36
BLOCK SCREEN4	IN=32	OUT=30 33
BLOCK MIXERG	IN=33 36 POLVO	OUT=37A

;  
FLOWSHEET REACCION

BLOCK CLCHNG1	IN=37A	OUT=37
BLOCK MIXC1	IN=37 GASEL1	OUT=37H
BLOCK CICLON1	IN=37H	OUT=GASEL 37G
BLOCK VTI	IN=GASEL	OUT=GASE
BLOCK ELECTR	IN=GASE	OUT=GAS POLVO
BLOCK MIXC2	IN=37G GASEL2	OUT=37I
BLOCK CICLON2	IN=37I	OUT=GASEL1 37J
BLOCK MIXC3	IN=37J GASEL3	OUT=37D
BLOCK CICLON3	IN=37D	OUT=GASEL2 37E
BLOCK MIXC4	IN=37E AIREZ	OUT=37F
BLOCK CICLON4	IN=37F	OUT=GASEL3 CRUDOP
BLOCK HORNO	IN=CRUDOP	OUT=39
BLOCK SEPA0	IN=39	OUT=39A 39B
BLOCK ENFRI	IN=39B AE	OUT=40 AC
BLOCK MIXE	IN=39A AC	OUT=ACC
BLOCK M	IN=ACC	OUT=AIREZ

;  
FLOWSHEET MOLIENDA

BLOCK CLCHNG2	IN=40	OUT=41
BLOCK MIXERH	IN=41 YESO 49 PUZOLANA	OUT=42
BLOCK MOLCEM	IN=42	OUT=43
BLOCK SCREENA	IN=43	OUT=44 45
BLOCK MIXERI	IN=45 AIRES	OUT=47
BLOCK FABFLA	IN=47	OUT=48A 48
BLOCK SCREENB	IN=44	OUT=49 50
BLOCK MIXERJ	IN=50 48	OUT=51

;  
DEF-STREAMS MIXCIPSD TRITURACION  
DEF-STREAMS MIXCIPSD REACCION  
DEF-STREAMS MIXCIPSD MOLIENDA

;  
DEF-SUBS-ATTR PSD PSD  
IN-UNITS LENGTH=IN  
INTERVALS 23

SIZE-LIMITS 0 / 0.0017716 / 0.002165 / 0.0029527 / 0.003937 / 0.009842 / 0.03937 / 0.1968 /  
0.375 / 0.5 / 0.75 / 1 / 1.5 / 2 / 2.5 / 3 / 4 / 5 / 10 / 15 / 20 / 25 / 30 / 42

;  
STREAM CALIZA

SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MASS-FLOW=327.6  
MASS-FRAC SIO2 0.0455 / AL2O3-2 0.0142 / FE2O3 0.002 / CaCO3-2 0.905 /  
CASO4 0.006 / MGCO3 0.0192 / NA2O .004 / K2O .0041  
SUBS-ATTR PSD (.007 .006 .006 .009 .0062 .002 .001 .01 .02 .001 .01 .02 .0268 &  
.02 .002 .001 .085 .11 .19 .21 .18 .065 .012 )

;  
STREAM 2

SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=327  
MASS-FRAC SIO2 0.0455 / AL2O3-2 0.0142 / FE2O3 0.002 / CaCO3-2 0.905 /  
CASO4 0.006 / MGCO3 0.0192 / NA2O .004 / K2O .0041

SUBS-ATTR PSD (.0096 .01 .0128 .008 .002 .005 .009 .01 .01 .01 .012 .013 .011 &  
.02 .05 .04 .1 .09 .1566 .11 .13 .17 .11 )

;

STREAM AIRE1

SUBSTREAM MIXED TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=2.89  
MOLE-FRAC AIR 1

;

STREAM AIRE2

SUBSTREAM MIXED TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=2.89  
MOLE-FRAC AIR 1

;

STREAM 5

SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MASS-FLOW=326.5  
MASS-FRAC SIO2 0.0455 / AL2O3-2 0.0142 / FE2O3 0.002 / CACO3-2 0.905 /  
CASO4 0.006 / MGCO3 0.0192 / NA2O .004 / K2O .0041  
SUBS-ATTR PSD (.01 .02 .012 .013 .012 .009 .03 .01 .04 .021 .013 .11 .18 .09 &  
.1 .17 .16 0 0 0 0 0 0 )

;

STREAM ARCILLA

SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MASS-FLOW=86.1  
MASS-FRAC SIO2 0.505 / AL2O3-2 0.1063 / FE2O3 0.052 / CACO3-2 0.2863 /  
MGCO3 0.0397 / NA2O .009 / K2O .0087  
SUBS-ATTR PSD (.011 .0085 .0115 .011 .0106 .102 .105 .12 .11 .105 .05 .09 .1 &  
.0754 .09 0 0 0 0 0 0 0 0 )

;

STREAM 20

SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MASS-FLOW=413  
MASS-FRAC SIO2 0.1455 / AL2O3-2 0.033 / FE2O3 0.01 / CACO3-2 0.776 /  
CASO4 0.0047 / MGCO3 0.025 / NA2O .005 / K2O .0051  
SUBS-ATTR PSD (.02 .012 .012 .051 .08 .11 .111 .02 .021 .011 .05 .2 .25 .012 &  
.04 0 0 0 0 0 0 0 0 )

;

STREAM AIRE3

SUBSTREAM MIXED TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=2.89  
MOLE-FRAC AIR 1

;

STREAM AE

SUBSTREAM MIXED TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=2.89  
MOLE-FRAC AIR 1

;

STREAM FIERRO

SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MASS-FLOW=6.3  
MASS-FRAC SIO2 .1164 / AL2O3-2 .0165 / FE2O3 .6286 / CACO3-2 .166 /  
MGCO3 .0094 / NA2O .009 / K2O .0023  
SUBS-ATTR PSD (.14 .12 .13 .18 .12 .1 .11 .03 .04 .03 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 )

;

STREAM 26

SUBSTREAM CIPSD TEMP=15 PRES=585 MOLE-FLOW=418.5  
MASS-FRAC SIO2 0.1415 / AL2O3-2 0.033 / FE2O3 0.02 / CACO3-2 0.767 /  
CASO4 0.0046 / MGCO3 0.023 / NA2O .005 / K2O .0051  
SUBS-ATTR PSD (.42 .23 .21 .11 .03 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 )





```

;
BLOCK SCREEN2 SCREEN
  IN-UNITS LENGTH=IN
  PARAM OPENING=1.99 MODE=DRY STRENGTH=18
;
BLOCK MIXERC MIXER
;
BLOCK TERCIA CRUSHER
  IN-UNITS LENGTH=IN
  PARAM DIAM=1 MODE=PRIMARY TYPE=MULTIPLE-ROLL
  BWI CIPSD 9.49
;
BLOCK SCREEN7 SCREEN
  IN-UNITS LENGTH=MU
  PARAM OPENING=99 MODE=DRY STRENGTH=0.9
;
BLOCK MIXERD MIXER
  PARAM PRES=588
;
BLOCK FABFL3 FABFL
  IN-UNITS AREA=SQIN PRESSURE=MMHG LENGTH=IN
  PARAM CALCULATE=PRESSURE
  BAG-PROPS NCELLS=4 NBAGS=64 DIAM=5 AREA=1570.8 PDROP=0.2941
  OPERATION FILT-TIME=0.5
;
BLOCK SCREEN3 SCREEN
  IN-UNITS LENGTH=IN
  PARAM OPENING=1 MODE=DRY STRENGTH=20
;
BLOCK MIXERE MIXER
;
BLOCK HEATER0 HEATER
  PARAM PRES=0 TEMP=300 NPHASE=2
;
BLOCK MOLCRU CRUSHER
  IN-UNITS LENGTH=IN
  PARAM DIAM=.002 MODE=PRIMARY TYPE=CAGE-MILL
  BWI CIPSD 9.52
;
BLOCK SCREEN8 SCREEN
  IN-UNITS LENGTH=MU
  PARAM OPENING=10 MODE=DRY STRENGTH=0.5
;
BLOCK MIXERF MIXER
  PARAM PRES=588
;
BLOCK ELECTROFIL ESP
  SIMULATION NPLATE=100 HT-PLATE=10 LEN-PLATE=4
  WIRE-SPECS PLATE-WIRE=0.5 WIRE-WIRE=0.6 DIAM=.1055
  DIELECTRIC CIPSD 20

```

```

;
BLOCK SCREEN4 SCREEN
  IN-UNITS LENGTH=MU
  PARAM OPENING=70 MODE=DRY LEVEL=UPPER STRENGTH=60
;
BLOCK MIXERG MIXER
;
BLOCK CLCHNG1 CLCHNG
;
BLOCK MIXC1 MIXER
  PARAM PRES= -45
;
BLOCK CICLON1 CYCLONE
  IN-UNITS LENGTH=METER
  SIMULATION DIAM=2.5
  PARAM MODE=SIMULATION METHOD=LAPPLE TYPE=USER VANE=16
  DIMENSIONS LEN-CYLINDER=2 LEN-CONE=3 DIAM-OVER=1 LEN-OVER=1 &
  WIDTH-INLET=0.5 HT-INLET=1 DIAM-UNDER=0.75
;
BLOCK VTI COMPR
  PARAM TYPE= POLYTROPIC PRES=588 TEMP=210
;
BLOCK ELECTR ESP
  SIMULATION NPLATE=100 HT-PLATE=10 LEN-PLATE=4
  WIRE-SPECS PLATE-WIRE=0.5 WIRE-WIRE=0.6 DIAM=.1055
  DIELECTRIC CIPSD 10
;
BLOCK MIXC2 MIXER
  PARAM PRES= -30
;
BLOCK CICLON2 CYCLONE
  IN-UNITS LENGTH=METER
  SIMULATION DIAM=2.5
  PARAM MODE=SIMULATION METHOD=LAPPLE TYPE=USER VANE=16
  DIMENSIONS LEN-CYLINDER=2 LEN-CONE=3 DIAM-OVER=1 LEN-OVER=1 &
  WIDTH-INLET=0.5 HT-INLET=1 DIAM-UNDER=0.75
;
BLOCK MIXC3 MIXER
  PARAM PRES= -23.5
;
BLOCK CICLON3 CYCLONE
  IN-UNITS LENGTH=METER
  SIMULATION DIAM=2.5
  PARAM MODE=SIMULATION METHOD=LAPPLE TYPE=USER VANE=16
  DIMENSIONS LEN-CYLINDER=2 LEN-CONE=3 DIAM-OVER=1 LEN-OVER=1 &
  WIDTH-INLET=0.5 HT-INLET=1 DIAM-UNDER=0.75
;
BLOCK MIXC4 MIXER
  PARAM PRES= -11

```

; BLOCK CICLON4 CYCLONE  
IN-UNITS LENGTH=METER  
SIMULATION DIAM=1.5  
PARAM MODE=SIMULATION METHOD=LAPPLE TYPE=USER VANE=16  
DIMENSIONS LEN-CYLINDER=2 LEN-CONE=3 DIAM-OVER=1 LEN-OVER=1 &  
WIDTH-INLET=0.5 HT-INLET=1 DIAM-UNDER=0.75

; BLOCK HORNO RSTOIC  
PARAM PRES=590 TEMP=1400 SERIES=YES NPHASE=2  
STOIC 1 CIPSD CASO4 -1/ CAO 1/MIXED O3S 1  
STOIC 2 CIPSD MGCO3 -1/ MGO 1/MIXED CO2 1  
STOIC 3 CIPSD CACO3-2 -1/ CAO 1/MIXED CO2 1  
STOIC 4 CIPSD CAO -2/ SIO2 -1/ C3 1  
STOIC 5 CIPSD CAO -1/ C3 -1/ C4 1  
STOIC 6 CIPSD CAO -4/ AL2O3-2 -1/ FE2O3 -1/ C5 1  
STOIC 7 CIPSD CAO -3/ AL2O3-2 -1/ C6 1  
CONV 1 CIPSD CASO4 1  
CONV 2 CIPSD MGCO3 1  
CONV 3 CIPSD CACO3-2 1  
CONV 4 CIPSD CAO 0.64  
CONV 5 CIPSD CAO 0.6  
CONV 6 CIPSD FE2O3 1  
CONV 7 CIPSD AL2O3-2 1  
SUBS-ATTR 3 CIPSD PSD (.01 .05 .01 .01 .02 .03 .02 .11 .12 .15 .11 .13 .07 &  
.07 .09 0 0 0 0 0 0 0 0 )  
SUBS-ATTR 4 CIPSD PSD (.01 .05 .01 .01 .02 .03 .02 .11 .12 .15 .11 .13 .07 &  
.07 .09 0 0 0 0 0 0 0 0 )

; BLOCK SEPA0 SSPLIT  
FRAC MIXED 39A 1  
FRAC CIPSD 39A 0

; BLOCK ENFRI HEATX  
PARAM T-COLD=1200  
FEEDS HOT=39B COLD=AE  
PRODUCTS HOT=40 COLD=AC  
HEAT-TR-COEF U=600

; BLOCK MIXE MIXER

; BLOCK M MULT  
PARAM 0.25

; BLOCK CLCHNG2 CLCHNG

; BLOCK MIXERH MIXER  
PARAM PRES=585

BLOCK MOLCEM CRUSHER  
IN-UNITS LENGTH=MU  
PARAM DIAM=50 MODE=PRIMARY TYPE=CAGE-MILL  
BWI CIPSD 13.49  
;  
BLOCK SCREENA SCREEN  
IN-UNITS LENGTH=MU  
PARAM OPENING=44 STRENGTH=.5  
;  
BLOCK MIXERI MIXER  
PARAM PRES=588  
;  
BLOCK FABFLA FABFL  
IN-UNITS AREA=SQIN PRESSURE=MMHG LENGTH=IN  
PARAM CALCULATE=PRESSURE  
BAG-PROPS NCELLS=4 NBAGS=64 DIAM=5 AREA=940.0 PDROP=0.2941  
OPERATION FILT-TIME=0.5  
;  
BLOCK SCREENB SCREEN  
IN-UNITS LENGTH=MU  
PARAM OPENING=74 STRENGTH=60  
;  
BLOCK MIXERJ MIXER  
;  
STREAM-REPORT MASSFRAC

## **APENDICE B**

**APENDICE B**

**TABLA B-1** Equivalencias en la distribución del tamaño de partículas :

No.	Longitudes (IN)	Longitudes (μ)
1	0.001771	45
2	0.002165	55
3	0.002952	75
4	0.003937	100
5	0.009842	250
6	0.003937	1000
7	0.1968	5000
8	3/8	3/8
9	1/2	12700
10	3/4	19050
11	1.00	25400
12	1.50	38100
13	2.00	50800
14	2.50	63500
15	3.00	76200
16	4.00	101600
17	5.00	127000
18	10.00	254000
19	15.00	381000
20	20.00	508000
21	25.00	635000
22	30.00	762000
23	42.00	1066800

**Tabla B-2** Propiedades Termodinámicas alimentadas (Ver bibliografía Chemicals Engineering Handbook, Perry)

COMPUESTO	PESO MOLECULAR	CALOR DE FORMACION KCAL/MOL	ENERGIA LIBRE DE FOR. KCAL/MOL	CAPACIDAD CALORIFICA KCAL/MOL °K
C3S	228.32	700.1	665.4	41.08
C2S	172	377.9	357.5	27.9
C4AF	485.6	850.7	842.4	55.29
C3A	270.2	857.5	815.5	50.16
YESO	168.14	479.33	425.5	42.5

## APENDICE C

## APENDICE C " CONCEPTOS "

$$FSC = \frac{CAO}{2.8 SiO_2 + 1.2 Al_2O_3 + 0.65 Fe_2O_3}$$

Esta expresión ha sido derivada de los estudios de combinación de equilibrio de estos materiales. A medida que FSC se hace menor que 100 la proporción de Sílice como C3S disminuye progresivamente y aumenta como C2S.

$$S/R = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Relación de Silicatos con respecto a la cantidad de fundente.

$$A/F = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Relación que determina la viscosidad del fundente, nos determina también la proporción de C3A en el Clinker.

CRUDO= Mezcla finamente molida de Caliza, Arcilla y Fierro que se almacena en silos lista para ser introducida al horno y producir el clinker. La composición tipo del crudo se presenta en las corrientes intermedias Tabla 5.9

PUZOLANA= Preponderantemente son cenizas volcánicas, que se hallan dispuestas en las zonas que bordean a un volcan, y que por cementación se han convertido en bancos compactos.

Este material es mezclado y finamente molido con el clinker y Yeso en proporciones ya especificadas dándole al cemento ciertas propiedades hidráulicas. La composición típica de éste material se muestra en la corriente de PUZOLANA de la simulación o en la Tabla 5.8

**CLINKER=** Es el resultado de someter a elevadas temperaturas el crudo que entra al horno, el clinker es originado por reacciones químicas, formando un conglomerado de color negro grisáceo de tamaños hasta de 3".

**CEMENTO T-1=** Se utiliza para uso común en construcciones generales de concreto, cuando no se requieren ciertas propiedades de calor de hidratación moderado, alta resistencia a temprana edad o por acción moderada a los sulfatos.

**CEMENTO C-2=** El nombre completo es Cemento Puzolánico Tipo C-2, se trata de Cemento Portland al cual se le agrega un material activo o sea uno que contribuye a aumentar resistencias mecánicas y que le imprime ciertas propiedades convenientes al producto.

**TAMIZACION=** Consiste en hacer pasar un material a través de mallas cuyo diámetro de abertura es conocido, existirá material que pase a través de la abertura y material que no lo haga.