

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
FACULTAD DE QUIMICA E INGENIERIA QUIMICA
ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA

*TEMA: "ESTUDIO DE EVALUACION DE LOS PARAMETROS DE
DE FABRICACION DE MATERIALES COMBUSTIBLES
PARA UN REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACION"*

TESIS

*PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUIMICO*

Realizado por: Bach. Lupe Ynés Espinoza Luna

Asesor: Ing. Gilberto Salas Colotta

Co-Asesor: Ing. Régulo Visurraga Sosa

LIMA-PERU

1997

Mi mayor reconocimiento a los distinguidos miembros del jurado:

Presidente : Dr. Aurelio Arbildo López

Miembro : Ing. Favio Tenorio de la Cruz

Asesor : Ing. Gilberto Salas Colotta

Ciudad Universitaria, 20 de Noviembre de 1997.

T.

Dedicado a mis padres:

Prudencio Espinoza Sáenz y Julia Luna de Espinoza.

Quienes proporcionaron su apoyo en todo momento para que pueda culminar el presente trabajo de investigación y obtener así el título profesional que es uno de sus anhelos.

INTRODUCCION

Hasta la década del 70 la tecnología usada para la fabricación de materiales combustibles era la de fundir aleaciones de Aluminio-Uranio con 15-20% en peso de uranio (con 93% de enriquecimiento en uranio-235). Pero, debido a las restricciones realizadas por la Administración del Gobierno de los Estados Unidos, en la década del 80, limitando la utilización de uranio enriquecido para Reactores de Investigación del Tercer Mundo, se fabricó estos materiales con uranio-235 enriquecido al 20% utilizando la técnica pulvimetalúrgica, por las ventajas que ofrece frente a la fundición en cuanto a composición, distribución y homogeneidad del material fisil en la fase metálica que le sirve de soporte.

El empleo de la técnica de pulvimetalurgia hace factible utilizar -a los aspectos de estudio- materiales que por sus características físicas, químicas y metalúrgicas, permiten simular la presencia del cerámico de uranio utilizado en la fabricación real del combustible.

Debido a que el Perú cuenta con el Reactor Nuclear Peruano RP-10 y utiliza para su funcionamiento elementos combustibles tipo placa, el estudio se ha centrado específicamente en la fabricación de materiales combustibles para este tipo de elementos.

Por lo expuesto, se ha realizado una simulación del proceso de fabricación de pastillas combustibles para reactores de investigación, con el fin de permitir un trabajo de investigación en condiciones más seguras y económicas, sin perder la confiabilidad de los resultados.

AGRADECIMIENTOS:

Debo expresar mi agradecimiento a un gran número de personas que han contribuido, en forma desinteresada, de acuerdo a su disponibilidad de tiempo, en el desarrollo de las diversas etapas del presente trabajo de investigación.

Expreso mi gratitud en forma especial al Ing. Régulo Visurraga Sosa, Jefe del Area de Ensayos No-Destructivos de la Dirección de Aplicaciones mi asesor de tesis en el IPEN, quien supervisó en forma continua el desarrollo eficiente del trabajo de investigación, aportó gran parte de la bibliografía, así como también su experiencia en el campo metalúrgico y realizó el contacto con las instituciones que colaboraron con el desarrollo de la investigación.

También un gran agradecimiento al Ing. Hernán Contreras Pavez, Ingeniero Civil Metalúrgico, jefe del proyecto "Fabricación de Combustibles para el RECH-1" , de la CCHEN (Comisión Chilena de Energía Nuclear), quien proporcionó muchos consejos, vía correo electrónico, gracias a su experiencia en el campo, así como también envió las especificaciones para la fabricación de combustibles nucleares, cuyos aportes fueron de gran importancia para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Es particularmente valiosa la contribución de las siguientes personas: Ing. Ever Helfert, David Espinoza, Ing. Ruben Bruna, Ing. Ruben Rojas, Hedy Espinoza; quienes proporcionaron el software estadístico para el análisis de los resultados, así como también, computadoras para la redacción y scanner para las figuras presentadas.

Las aportaciones de los profesionales con quienes he trabajado han sido muy

valiosas. Los que han hecho contribuciones importantes son: Ing. Jesús Ruiz Saavedra, Jefe del Laboratorio de Materiales de la P.U.C.P; Ing. Sócrates Cutipa Castello, y el Ing. Franco Calderón Aguinaga, docentes del área de materiales de la P.U.C.P. quienes ayudaron en la toma de fotomicrografías de los polvos y muestras, así como también en la determinación de la dureza de las mismas. El Ing. Héctor Villacorta Arévalo, jefe del Laboratorio de Control de Calidad del Sima-Callao, quien colaboró proporcionando el acceso para la utilización de una prensa de 25 Ton. de capacidad, para el compactado de las muestras. El Ing. John Cuya, profesor de la Facultad de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería quien colaboró con el pulido para metalografía de las primeras muestras preparadas para este estudio. A José Maguiña León, técnico de la Dirección de Aplicaciones del IPEN quien colaboró con el acondicionamiento de los equipos utilizados en el IPEN para realizar la caracterización de los polvos, el mezclado, sinterizado y pulido de muestras. El Ing. Carlos Sebastián Calvo, jefe de la Dirección de Aplicaciones del IPEN, por las facilidades brindadas para establecer contactos con empresas que producen o venden polvos metalúrgicos utilizados en el estudio. Al Ing. Javier Guarnizo Olivera, jefe del Grupo de Cálculo Análisis y Seguridad del Reactor en el IPEN, quien proporcionó información técnica del RP-10. El Ing. Gilberto Salas Colotta quien realizó la corrección completa del presente trabajo de investigación.

RESUMEN

Se ha estudiado en base a diseños estadísticos los efectos que producen la variación de los diferentes factores que influyen en el proceso de fabricación de materiales combustibles, sobre las propiedades del material a obtener.

Se ha utilizado al carburo de silicio (SiC) como simulador del uranio, teniendo en cuenta sus características morfológicas y granulométricas. Tratando de acondicionar las características del material simulador y las del aluminio como material de matriz, a las especificaciones de materiales combustibles reportadas.

Este estudio pretende evitar el origen de zonas localizadas de calor en el combustible, logrando una distribución uniforme del material simulador en el aluminio, así como también proporcionar espacios vacíos (porosidades) suficientes para que, el aumento de volumen que originan los productos gaseosos de fisión, no deformen el elemento combustible.

Se proponen cinco etapas fundamentales que constituyen el proceso de fabricación de materiales combustibles: caracterización de polvos, mezclado, prensado, sinterizado y análisis metalográfico con evaluación de propiedades del material. Los resultados obtenidos servirán de base para la iniciación en la fabricación de elementos combustibles en el país.

El presente trabajo a contribuido al desarrollo de la tecnología nacional en fabricación de combustibles nucleares y a proporcionado experiencia en el desarrollo de la técnica de pulvimetalurgia, con la cual es factible fabricar materiales con diversas características y de muchas aplicaciones en nuestro medio

I N D I C E G E N E R A L

PRIMERA PARTE

ASPECTOS TEORICOS

CAPITULO I: REACTOR NUCLEAR

	<i>página</i>
1.- Fisión Nuclear	2
2.- Definición de Reactor Nuclear	5
3.- Clasificación de los Reactores Nucleares	5
3.1.- Por los neutrones que inducen la fisión	5
3.2.- Por la generación del combustible	5
3.3.- Por la utilización	6
3.4.- Por la disposición del combustible en el núcleo	6
3.5.- Por su geometría	6
3.6.- Por el enriquecimiento del combustible	6
3.7.- Por su potencia	6
4.- Componentes de un Reactor Nuclear Térmico	7
4.1.- Combustible	7
4.2.- Moderador	9
4.3.- Materiales Estructurales	9
4.4.- Materiales de Control	9
4.5.- Refrigerante	10
4.6.- Blindaje	10
4.7.- Reflectores	10

CAPITULO II : CICLO DEL COMBUSTIBLE

1.- Ciclo del Combustible	11
1.1.- Etapa Inicial del Ciclo del Combustible	11
1.2.- Etapa Final del Ciclo del Combustible	13
2.- Fabricación de Elementos Combustibles	13
2.1.- Obtención del núcleo o meat	15
2.1.1.- Dispersión U_3O_8-Al	15
2.1.2.- Dispersión de Aluminuros	16
2.1.3.- Dispersión de siliciuros	17
2.2.- Soldadura del conjunto	17
2.3.- Laminación en caliente	18
2.4.- Cortado final de la placa	19
2.5.- Armado del Elemento Combustible	19

CAPITULO III: ESPECIFICACIONES DE MATERIALES COMBUSTIBLES

1.- Características de un Combustible Nuclear	20
2.- Especificaciones de Materiales para Combustibles Nucleares	20
2.1.- Requerimientos Generales para Uranio	21
2.2.- Requerimientos Generales para UAl_x	22
2.3.- Requerimientos Generales para U_3Si_2	24
2.4.- Requerimientos Generales para U_3O_8	25
2.5.- Requerimientos Generales para Aluminio	27
2.6.- Porosidad	29
2.7.- Homogeneidad	30
2.8.- Densidad	30

CAPITULO IV: METALURGIA DE POLVOS

1.- Definición	32
2.- Métodos de obtención de polvos metalúrgicos	32
3.- Caracterización de los polvos metalúrgicos	33
3.1.- Caracterización Morfológica	33
1.3.2.- Determinación del Tamaño de la partículas	33
1.3.3.- Forma de la partícula, área superficial	34
1.3.4.- Caracterización Química	35
4.- Fabricación de piezas por Pulvimetalurgia	36
4.1.- Mezclado	36
4.2.- Compactado	37
4.3.- Sinterizado	38
4.4.- Operaciones Suplementarias	41
5.- Aplicaciones de la Pulvimetalurgia	43
6.- Ventajas y Limitaciones de la Pulvimetalurgia	44
6.1.- Ventajas	44
6.2.- Limitaciones	44

CAPITULO V: REACTOR NUCLEAR PERUANO RP-10

1.- Descripción General	46
2.- Núcleo del Reactor	47
2.1.- Elemento Combustible Estándar (SFE)	51
2.2.- Meat del SFE	51
3.- Ciclo del Combustible en el RP-10	53

SEGUNDA PARTE

ASPECTOS EXPERIMENTALES

CAPITULO I: EL PROBLEMA

1.- Objetivo	55
1.1.- Objetivo General	56
1.2.- Objetivos Específicos	56
2.- Método y Diseño de la Investigación	57
2.1.- Primera Etapa de la Investigación	57
2.2.- Segunda Etapa de la Investigación	58
2.3.- Tercera Etapa de la Investigación	60
2.4.- Cuarta Etapa de la Investigación	61

CAPITULO II: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1.- Caracterización de los Polvos	62
1.1.- Granulometría	62
1.2.- Morfología	62
1.3.- Densidad Aparente	62
1.4.- Composición Química	62
1.5.- Area Específica	62
1.6.- Densidad Tap	62
2.- Mezclado	66
3.- Compactado	66
4.- Sinterizado	66
5.- Análisis Metalográfico y Evaluación de Propiedades	70
5.1.- Análisis Metalográfico	70
5.2.- Evaluación de Propiedades	73

CAPITULO III: TABULACION DE DATOS Y RESULTADOS

1.- Tabulación de Datos	76
1.1.- Caracterización de los Polvos	76
1.2.- Primera Etapa de la Investigación	79
1.3.- Segunda Etapa de la Investigación	80
1.4.- Tercera Etapa de la Investigación	83
1.5.- Cuarta Etapa de la Investigación	84
2.- Procesamiento de Resultados	84
2.1.- Caracterización de los Polvos	84
2.2.- Primera Etapa de la Investigación	87
2.3.- Segunda Etapa de la Investigación	91

2.4.- Tercera Etapa de la Investigación	103
2.5.- Cuarta Etapa de la Investigación	106

CAPITULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS

1.- Caracterización de los Polvos	113
2.- Primera Etapa de la Investigación	113
3.- Segunda Etapa de la Investigación	115
3.1.- Análisis de los niveles de los factores para la densidad en verde	116
3.2.- Análisis de los niveles de los factores para la porosidad	116
3.3.- Análisis de los niveles de los factores para la dispersión	117
4.- Tercera Etapa de la Investigación	117
4.1.- Análisis de las condiciones de sinterizado en el lote E	117
4.2.- Análisis de las condiciones de sinterizado en el lote F	118
5.- Cuarta Etapa de la Investigación	118

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- Conclusiones	119
2.- Recomendaciones	120

A N E X O S

<i>ANEXO I: Ejemplo de Cálculos</i>	121
<i>ANEXO II: Aluminio</i>	128
<i>ANEXO III: Carburo de Silicio</i>	132

BIBLIOGRAFIA	135
---------------------	-----

I N D I C E D E T A B L A S

- Tabla N° 1: Nivel de impurezas máximo para uranio
Tabla N° 2: Composición Isotópica del uranio
Tabla N° 3: Composición Isotópica para UAl_x
Tabla N° 4: Contenido de impurezas metálicas para UAl_x
Tabla N° 5: Impurezas no metálicas en UAl_x
Tabla N° 6: Análisis de Tamizado (%w), Tamices U.S. Standard para UAl_x
Tabla N° 7: Composición Isotópica del U_3Si_2
Tabla N° 8: Composición Química del U_3Si_2
Tabla N° 9: Composición Isotópica del U_3O_8
Tabla N° 10: Análisis Físico y Químico del U_3O_8
Tabla N° 11: Nivel Máximo de Impurezas en el U_3O_8
Tabla N° 12: Análisis de Tamizado (por Synttron Sieve) screens, U.S. standard mesh para U_3O_8
Tabla N° 13: Composición Química del Aluminio
Tabla N° 14: Caracterización Química de la superficie de la partícula
Tabla N° 15: Parámetros más importantes del RP-10 para el núcleo normal de trabajo
Tabla N° 16: Composición del meat
Tabla N° 17: Condiciones de trabajo para el lote A, B y C
Tabla N° 18: Niveles de variación de los factores
Tabla N° 19: Factores del proceso para el lote D
Tabla N° 20: Diceño 2^4 para el lote D
Tabla N° 21: Factores del proceso para el lote E
Tabla N° 22: Diseño 2^2 para el lote E
Tabla N° 23: Diseño 2^2 para el lote F
Tabla N° 24: Masas de polvo para determinar densidad aparente
Tabla N° 25: Masa del tamizado de polvo de aluminio
Tabla N° 26: Masas del tamizado de polvo de Carburo de Silicio
Tabla N° 27: Composición Química de los polvos
Tabla N° 28: Masas y volúmenes para determinar la densidad tap.
Tabla N° 29: Masa y composición de compactos para el lote A, B y C
Tabla N° 30: Número de partículas por área para el lote A
Tabla N° 31: Número de partículas por área para el lote B y C
Tabla N° 32: Composición y masa total de cada compacto preparado en el lote D.
Tabla N° 33: Datos obtenidos para calcular la densidad en verde al trabajar con el diseño de la Tabla N° 22
Tabla N° 34: Datos obtenidos para calcular el % volumen para el lote D
Tabla N° 35: Composición y masa total de cada compacto preparado en el lote E y F.
Tabla N° 36: Datos obtenidos en el lote E para calcular la densidad y porosidad
Tabla N° 37: Datos obtenidos en el lote F para calcular la densidad y porosidad
Tabla N° 38: Datos obtenidos en el lote G para determinar la densidad y porosidad
Tabla N° 39: Datos obtenidos en el lote G para determinar el % volumen

Tabla N° 40: Datos obtenidos en el lote G para determinar la dureza
Tabla N° 41 : Densidad Aparente
Tabla N° 42: Análisis Granulométrico del polvo de aluminio
Tabla N° 43: Análisis Granulométrico del Polvo de Carburo de Silicio
Tabla N° 44: Morfología de los polvos
Tabla N°45: Area específica de los polvos
Tabla N° 46: Densidad Tap
Tabla N° 47: Fracción de área para el lote A
Tabla N° 48: Fracción de área para el lote B y C
Tabla N° 49: Densidad y porosidad en verde para el lote D
Tabla N° 50: % volumen de partículas para el lote D
Tabla N° 51: Efectos estimados para la densidad y porosidad a partir de la tabla N° 49.
Tabla N° 52: Efectos estimados para el % volumen a partir de la tabla N° 50
Tabla N° 53: Densidad y porosidad en verde y de sinterizado para el lote E
Tabla N° 54: Densidad y porosidad en verde y de sinterizado para el lote F
Tabla N° 55: Efectos estimados para porosidad a partir de la tabla N° 53
Tabla N° 56: Efectos estimados para porosidad a partir de la tabla N° 54
Tabla N° 57: Propiedades evaluadas en el lote G
Tabla N° 58: % volumen para el lote G
Tabla N° 59: Resultados de Dureza
Tabla N° 60: Constantes del Aluminio

I N D I C E D E F I G U R A S

- Figura N° 1: Mecanismo de la Fisión Nuclear*
Figura N° 2: Distribución de los Productos de fisión
Tabla N° 3 : Componentes principales de un reactor nuclear
Figura N° 4: Ciclo del Combustible.
Figura N° 5: Fabricación de Elementos Combustibles
Figura N° 6: Fotografía SEM de partículas combustibles de UAl_x estándar
Figura N° 7: Fotografía SEM de partículas combustibles de U_3O_8
Figura N° 8: Fabricación de piezas por pulvimetalurgia
Figura N° 9 : Mecanismo de Sinterizado entre partículas
Figura N° 10: Corte Transversal del Edificio del Reactor
Figura N° 11 : Núcleo del Reactor Nuclear Peruano RP-10
Figura N° 12: Elementos Combustible Estandar del RP-10
Figura N° 13: Polvos Utilizados
Figura N° 14 : Ro-tap
Figura N° 15: Forma común de partículas según ISO 3252
Figura N° 16: Varias formas de partículas según su técnica de fabricación
Figura N° 17: Medidor de densidad tap
Figura N° 18: Mezclado
Figura N° 19: Prensado de los Polvos
Figura N° 20: Dimensiones de la Matriz
Figura N° 21: Horno Eléctrico de Sinterizado
Figura N° 22: Balanza y Vernier utilizados
Figura N° 23 : Equipo de desbaste, tipo faja
Figura N° 24: Equipo de Pulido
Figura N° 25: Microscopio Metalográfico (Laboratorio de Materiales de la PUCP)
Figura N° 26: Microscopio Optico (Laboratorio de Aplicaciones del IPEN)
Figura N° 27: Medición de la Dureza de los Compactos
Figura N° 28 : Fotografía SEM de Polvo de Aluminio
Figura N° 29: Fotografía SEM de Polvo de SiC
Figura N° 30: Fotografía Microscópica de Muestra 1A
Figura 31: Fotografía Microscópica de Muestra 2A
Figura N° 32: Fotografía Microscópica de Muestra 7A
Figura N° 33: Fotografía Microscópica de Muestra 12A
Figura N° 34: Fotografía Microscópica de Muestra 2C
Figura N° 35: Fotografía Microscópica de Muestra 3C
Figura N° 36: Fotografías SEM de Compactos de SiC-Al óptimos

I N D I C E D E G R A F I C O S

- Gráfico N° 1: Log. \emptyset vs Log X_p para aluminio
Gráfico N° 2: Log. \emptyset vs Log X_p para carburo de silicio
Gráfico N° 3: Diagrama de probabilidad normal para densidad (datos en tabla N°51)
Gráfico N° 4: Densidad en verde vs. interacción BD en el lote D.
Gráfico N° 5: Densidad en verde vs. interacción AB (lote D)
Gráfico N° 6: Densidad en verde vs. efecto D (lote D)
Gráfico N° 7: Diagrama de probabilidad normal para % de porosidad (datos en tabla N°51)
Gráfico N° 8: %Porosidad vs. interacción AB (lote D)
Gráfico N° 9: % Porosidad vs. interacción BD (lote D)
Gráfico N° 10: Diagrama de probabilidad normal para el % volumen de partículas (datos en tabla N° 52)
Gráfico N° 11: % volumen vs. Efecto C (lote D)
Gráfico N° 12: % volumen vs. Efecto A (lote D)
Gráfico N° 13: Diagrama de probabilidad normal para porosidad (lote E)
Gráfico N° 14: Cambio de porosidad vs. efecto E (lote E)
Gráfico N° 15: Diagrama de probabilidad normal para porosidad (lote F)
Gráfico N° 16: Cambio de porosidad vs. Efecto E (lote F)
Gráfico N° 17: Cambio de porosidad vs. Efecto F (lote F).
Gráfico N° 18: Cambio de porosidad vs. Interacción EF (lote F).

PRIMERA PARTE

ASPECTOS TEORICOS

C A P I T U L O I

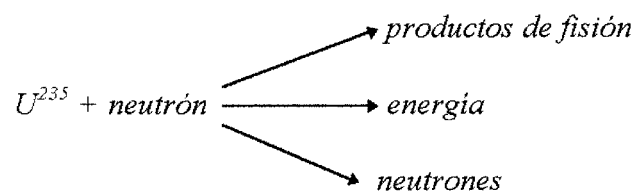
REACTOR NUCLEAR

1.- Fisión Nuclear⁽¹⁾:

La fisión es una reacción nuclear en la que un neutrón es absorbido por un núcleo de ciertos elementos químicos, produciéndose su rotura en dos fragmentos cuyas masas son del mismo orden de magnitud; al mismo tiempo se produce la emisión de un número variable de neutrones y unos 200 MeV de energía. También hay emisión de diversas radiaciones en el instante mismo de la fisión y, posteriormente, desde los fragmentos de fisión que están altamente excitados (ver figura N° 1).

Los elementos químicos naturales que pueden sufrir el proceso de fisión son los isótopos del uranio y del torio. Además, hay otros elementos químicos, producidos artificialmente, que también pueden sufrir este proceso, tal es el caso del plutonio y, en general de todos los transuránicos. En cuanto a los fragmentos de fisión y sus productos de desintegración, corresponden prácticamente a todos los elementos de la clasificación periódica y sus isótopos (ver figura N° 2).

Reacción de fisión del Uranio:



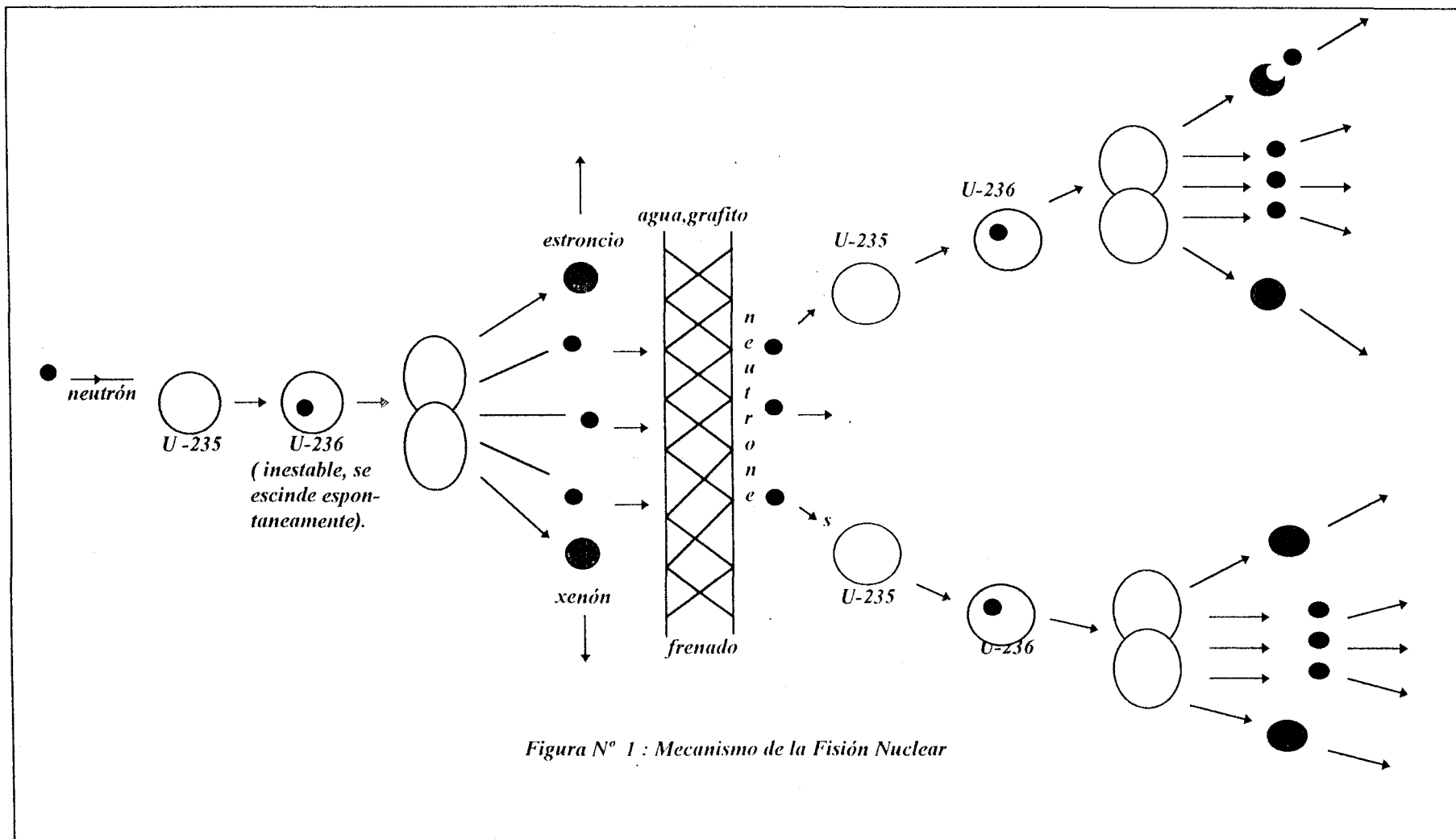


Figura N° 1 : Mecanismo de la Fisión Nuclear

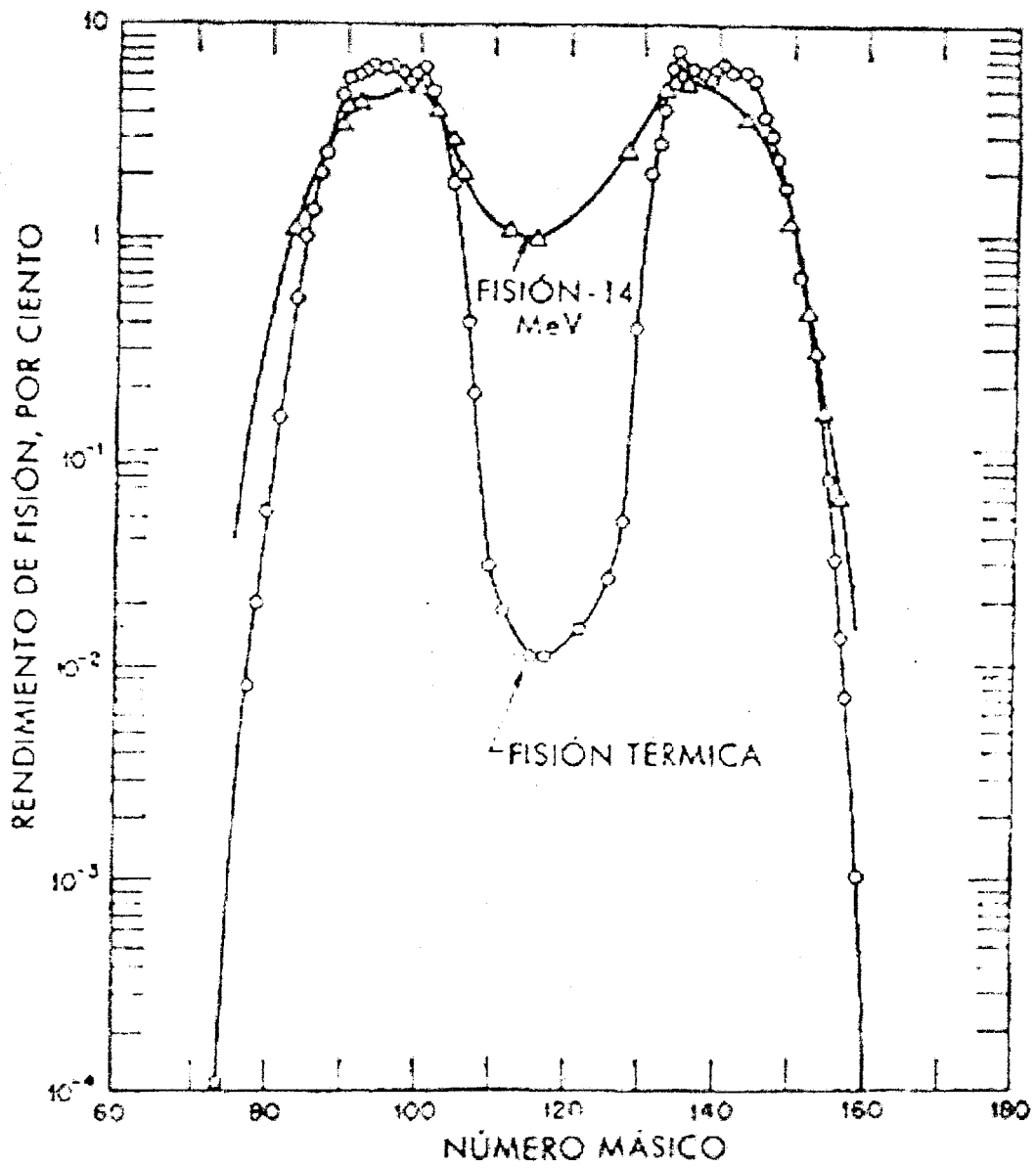


Figura N° 2: Distribución de los Productos de Fisión

2.- Definición de Reactor Nuclear:

El reactor nuclear es un sistema que consta fundamentalmente de un núcleo activo, donde se realiza el proceso nuclear de la fisión. El núcleo del reactor contiene el combustible nuclear, constituido por un núclido fisil, el que fisiona y mantiene la reacción en cadena, liberándose casi toda la energía de fisión en forma de calor.

3.-Clasificación de los Reactores Nucleares

Los reactores nucleares pueden clasificarse de diferentes modos, una clasificación general posible en base a la diversidad de sus componentes y aplicaciones es la siguiente:

3.1.- Por los neutrones que inducen la fisión: *De acuerdo a los neutrones, responsables mayoritarios de la fisión, los reactores se clasifican en base a la energía de los mismos:*

- Reactores Rápidos.*
- Reactores Intermedios.*
- Reactores Térmicos.*

3.2.- Por la generación de Combustible: *Se clasifica de acuerdo a la producción de nuevos combustibles.*

- Reactores Quemadores: La producción de un nuevo elemento combustible es menor que el consumo del isótopo combustible.*
- Reactores Convertidores: Cuando la cantidad de combustible es igual a la cantidad consumida.*
- Reactores Reproductores: Cuando el reactor produce un elemento combustible en mayor cantidad que la cantidad consumida.*

3.3.- Por la utilización: Los reactores por su utilización se clasifican en:

- Reactores de Investigación.
- Reactores de Producción de Radioisótopos.
- Reactores de Capacitación.
- Reactores de prueba de materiales.

3.4.- Por la disposición del combustible en el núcleo: Los reactores de acuerdo a la disposición del combustible y moderador en el núcleo, se clasifican en:

- Reactores Homogeneos.
- Reactores Heterogéneos.

3.5.- Por su geometría: Se clasifican en:

- Reactores cilindricos.
- Reactores esféricos.
- Reactores paralelepípedos.
- Otras geometrias.

3.6.- Por el enriquecimiento del Combustible: Se clasifican en reactores de:

- Uranio Natural.
- Bajo enriquecimiento (1 a 5% en U^{235}).
- Mediano enriquecimiento (2 a 40% en U^{235}).
- Alto enriquecimiento (mayor a 40% en U^{235}).

3.7.- Por su potencia: Por el nivel de potencia o flujo, los reactores se clasifican en:

- Reactores de bajo flujo (10^6 neutrones/cm².s), potencia cero.

- Reactores de mediano flujo (10^{12} neutrones/cm².s), baja potencia.
- Reactores de alto flujo (10^{14} neutrones/cm².s), mediana potencia.
- Reactores de alto flujo (mayores de 10^{15} neutrones/cm².s), alta potencia (centrales de producción de energía nucleoelectrónica).

4.- Componentes de un Reactor Nuclear Térmico:

El principal componente es el combustible, que mediante la reacción de fisión da lugar a la producción de calor. El reactor nuclear está rodeado de reflectores y blindajes, los cuales evitan las pérdidas de energía y protegen de la radiación; también existe un material moderador de neutrones, cuya misión es la de que los neutrones alcancen el nivel de energía adecuado para que se produzca la fisión.

Con el objeto de que la reacción se lleve a cabo en unas condiciones determinadas, el reactor va provisto de unos mecanismos de control que actúa sobre los neutrones que van a chocar con los núcleos del combustible nuclear. Existe también un refrigerante para extraer el calor y los materiales estructurales (ver figura N° 3). En adelante se especifica las principales características de los componentes de los reactores nucleares.

4.1.- Combustible^[2]: El combustible de un reactor nuclear puede definirse como un material que contiene uno o más isótopos fisionables (U^{233} , U^{235} ó Pu^{239}). Es, por tanto, el componente en el que, a consecuencia de la reacción de fisión nuclear, se produce la mayor parte de la energía.^[3] Los combustibles que van a utilizarse en reactores deben tener propiedades adecuadas, tanto físicas como nucleares. En general se prefieren los sólidos, de modo que por lo común se

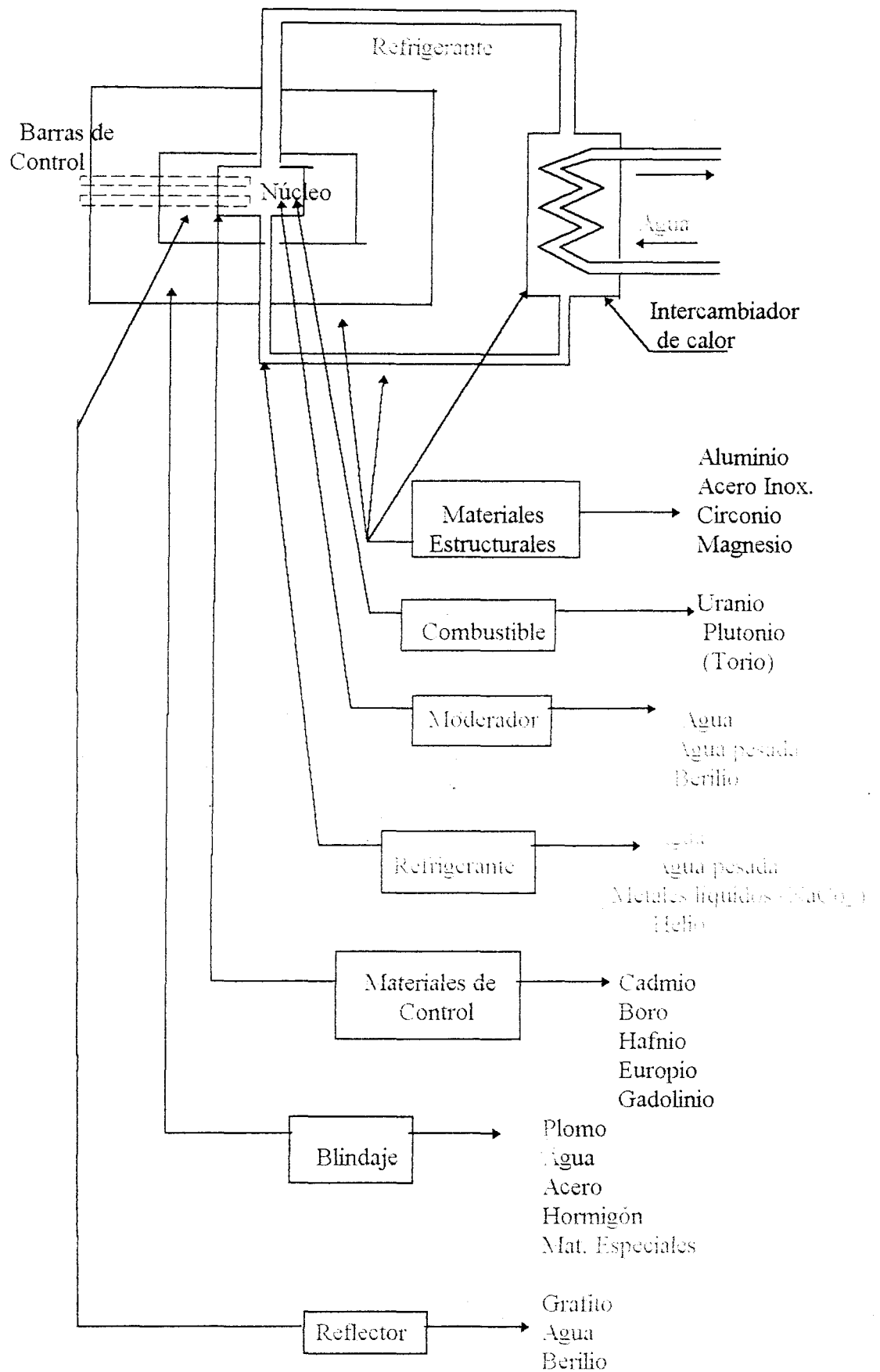


Figura N° 3: Componentes Principales de un Reactor Nuclear.

emplean UO_3 , ThO_2 , PuO_2 y mezclas en forma de pelotitas (pellets) sinterizadas, de alta densidad. Otras combinaciones que se han utilizado son: aleaciones de uranio y aluminio, soluciones de sulfato de uranio, aleaciones de plutonio y aluminio, U_3Si , UC_x y aleaciones y cermets de Pu. El U^{235} se prefiere, en gran medida, debido a su elevado punto de fusión ($2176^\circ C$), buena conductividad térmica, alta densidad y resistencia a los efectos de la radiación

4.2.- Moderador: La misión del material moderador es reducir la energía de los neutrones desde el nivel en que son emitidos en la fisión (unos 2 MeV) hasta el nivel que se desea, en general térmico (0.025 eV). Este proceso de reducción de la energía de los neutrones mediante interacciones de difusión con los núcleos ligeros se denomina moderación.

Las sustancias que pueden usarse como moderadores deben tener peso atómico pequeño para que el choque entre los neutrones y sus núcleos disminuya la energía de manera eficaz, entre ellos tenemos: el H_2O ligera, H_2O pesada (D_2O óxido de deuterio), berilio (metal óxido ó carburo) y carbono (grafito).

4.3.- Materiales Estructurales: Se entiende por materiales estructurales aquellos componentes que, encontrándose, bien dentro o alrededor del núcleo del reactor, están sometidos a las radiaciones nucleares.

Los materiales que pueden considerarse como estructurales son: aluminio, magnesio, circonio y acero inoxidable.

4.4.- Materiales de Control: Los materiales de control son materiales absorbentes de neutrones (gran sección eficaz de absorción) que permiten fijar el flujo neutrónico y la potencia del reactor en el valor requerido.

Entre los materiales considerados se tiene: cadmio, boro, hafnio y algunos óxidos de tierras raras (europio y gadolinio).

4.5.- Refrigerante: *El objetivo de un refrigerante es la extracción del calor que se genera en un reactor nuclear. Pueden ser gas ó líquido; los líquidos, a su vez, pueden ser acuosos, orgánicos o metálicos. El empleo de unos u otros depende, entre otras razones, de las características del reactor.*

Entre estos materiales tenemos: el agua ligera, agua pesada, metales líquidos como el sodio, bismuto y plomo; gases como hidrógeno, metano, amoníaco, helio, vapor de agua, dióxido de carbono y aire; también algunos compuestos orgánicos y sales fundidas.

4.6.- Blindaje: *Es aquel material que atenúa los neutrones y la radiación y que se producen en la fisión a un nivel seguro, para protección del personal y el funcionamiento satisfactorio de los instrumentos que regulan las diversas operaciones del reactor y su control.*

Entre los materiales que se utilizan como blindaje se tiene: plomo, agua ligera, acero y algunos materiales especiales .

4.7.- Reflectores: *La misión de un material reflector en un reactor nuclear es difundir o reflejar los neutrones que quieren escapar y hacerles volver al reactor para que la reacción de fisión se mantenga. Por esta razón, el reflector debe reunir unas buenas características de difusión y una baja probabilidad de captura neutrónica (absorción). En general se utiliza D₂O, berilio (ó su óxido) y grafito.*

C A P I T U L O I I

CICLO DEL COMBUSTIBLE

1.- Ciclo del Combustible

La expresión "Ciclo del Combustible Nuclear" se emplea para designar todas las operaciones necesarias para suministrar combustible nuevo a un reactor nuclear o disponer del combustible agotado. Cuando se aplica la estrategia del ciclo del combustible abierto o la de utilización del combustible en una sola etapa, éste pasa por el reactor una vez; el combustible agotado no se reelabora, y, por tanto, no se reciclan el U^{235} ni el Pu^{239} producidos que quedan sin utilizar. En esos casos el combustible agotado se almacena, y por último se evacúa como desecho. Con el ciclo cerrado, el material fisiónable no quemado se recupera en una planta de reelaboración para reciclarlo a un reactor térmico o un reactor rápido. (ver figura N° 4).

1.1.- Etapa inicial del ciclo del combustible:

Entre las actividades que componen la etapa inicial del Ciclo del Combustible figuran la exploración del uranio, para localizar las reservas del mineral de uranio adecuadas; la extracción del mineral de uranio; el tratamiento y la refinación del mineral para producir concentrado de uranio (torta amarilla); la producción de hexafluoruro de uranio; el enriquecimiento isotópico en U^{235} del hexafluoruro de uranio para cumplir las necesidades de enriquecimiento de los reactores; y la fabricación de combustible para los reactores nucleares. La fabricación incluye la

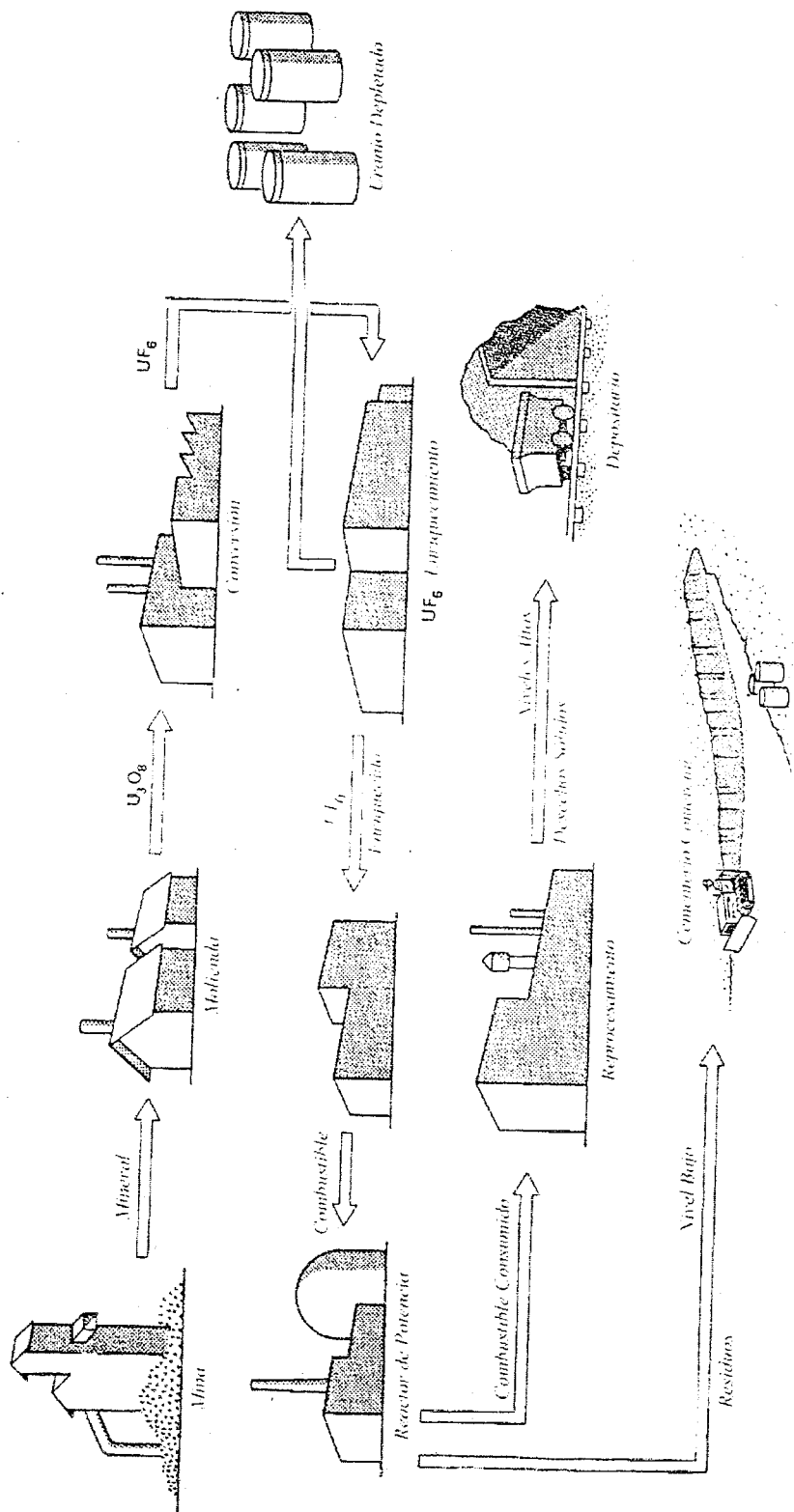


Figura N° 4: Ciclo del Combustible

transformación del hexafluoruro de uranio en óxido de uranio; la formación de pastillas de óxido de uranio; el encapsulamiento de las pastillas de óxido de uranio en barras o placas de combustible; y el montaje de los elementos combustibles.

1.2.- Etapa final del ciclo del combustible:

Entre las actividades que componen la parte final del Ciclo del Combustible figuran el almacenamiento temporal o a largo plazo del combustible irradiado; la reelaboración del combustible irradiado con la recuperación de plutonio y uranio para el reciclado; la fabricación de combustible con mezcla de óxido; la gestión de desechos radiactivos, incluidos el tratamiento, el acondicionamiento, el almacenamiento y la evacuación, y las actividades de transporte, vinculadas al traslado de los materiales radiactivos de una a otra operación.

2.- Fabricación de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación:

Los elementos combustibles tipo MTR (Material Testing Reactor) contienen un núcleo de fase dispersa (U_3O_8) en una matriz de aluminio. El elemento combustible está formado por un conjunto de placas dispuestas en forma paralela, espaciadas entre sí a fin de permitir la circulación del agua de refrigeración que actúa como moderador de neutrones.

La técnica utilizada para la fabricación de las placas es la de enmarcado. Luego de realizar el ensamble tapa-marco-tapa con su núcleo portador del elemento fisil y utilizando los procesos de soldadura TIG se sueldan las tres tapas para evitar el deslizamiento entre sí en el proceso de laminación. El proceso de fabricación se detalla a continuación. (ver figura N° 5).

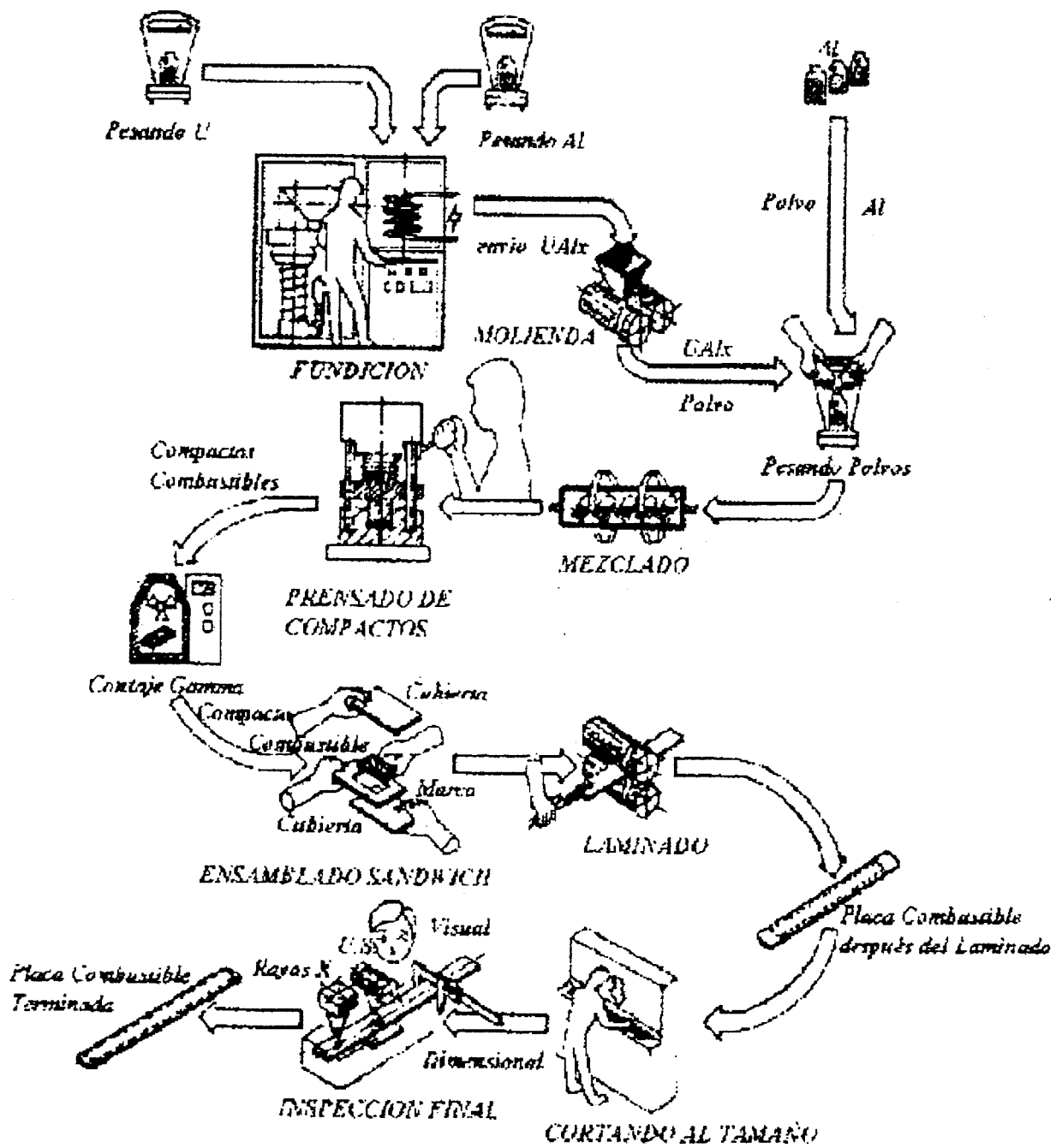


Figura Nº 5: Fabricación de Elementos Combustibles

2.1.- Obtención del Núcleo o Meat:

En la actualidad existen tres líneas para obtener los núcleos con los cuales también se fabrican miniplacas para irradiar, simulando el comportamiento que tendrá en el reactor. Las tres líneas son las siguientes:

2.1.1.- Dispersión U_3O_8 -Al: *El meat está compuesto por aluminio como matriz metálica y por partículas de U_3O_8 homogéneamente distribuidas como fase dispersa.*

El U_3O_8 se obtiene por secado y calcinación del DUA (diuranato de amonio) y finalmente se le trata térmicamente a 1380°C , con lo que se logra un crecimiento de grano y esfericidad de las partículas. Luego se mezcla con polvo de aluminio, se prensa y sinteriza, obteniéndose así el núcleo.

La mezcla U_3O_8 -Al debe tener una buena compresibilidad, área específica baja (para el U_3O_8), una distribución de tamaños de partículas en rangos bien definidos, baja porosidad de los polvos, forma tendiendo a la esférica y por supuesto una buena resistencia mecánica de los polvos durante la laminación.

Para cada uno de los requerimientos mencionados existe una justificación. Las partículas angulosas con superficie muy irregular y poco densas fragmentan excesivamente y tienden a producir durante la laminación el efecto llamado "stringering", que consiste en la fragmentación de una partícula grande, en partículas más pequeñas, las cuales se disponen en forma continua en la dirección de laminación, generando una textura fibrosa. Esto proporciona propiedades mecánicas heterogéneas al núcleo dando una pésima distribución

de la fase fisil (U_3O_8) en el núcleo y originando puntos calientes en la irradiación del combustible (distribución distorsionada de temperaturas).

Los fragmentos de partículas poco densas, produce un aumento del área específica del U_3O_8 , dando por resultado, un incremento de su reactividad con el aluminio, durante la irradiación y un daño por radiación más severo.

La morfología influye en la fluidez de los polvos y en la densidad aparente, y estos a su vez influyen en el proceso de compactación.

El rango de tamaño de las partículas, es importante, pues la partícula de U_3O_8 debe retener la mayor cantidad posible de productos de fisión, minimizando así el daño que estos producen a la matriz de aluminio.

2.1.2.- Dispersión de Aluminuros (UAl_x-Al) : Este método combina la fusión y la pulvimetalurgia. El aluminuro UAl_x se obtiene por fusión de una aleación de aluminio y uranio, con alto contenido de uranio, en un horno de inducción o de arco en atmósfera inerte.

Obtenido el compuesto intermetálico por fusión, se procede al colado, triturado, molienda, clasificación y mezcla con polvo de aluminio, para finalmente obtener por prensado el compacto o núcleo.

De los tres compuestos intermetálicos obtenidos, el UAl_3 es el más usado. El UAl_4 a pesar de ser el más estable, no posee buena ductilidad y por su estructura ortorrómbica, presenta problemas durante la irradiación "swelling" (crecimiento o redondeamiento anisotrópico). Además es el que menos uranio contiene.

Normalmente se evita la formación de UAl_4 durante la fusión, produciendo directamente el UAl_3 puro (implica usar concentraciones de 74,63% en peso y temperaturas sobre $1500^{\circ}C$ o utilizando menores concentraciones de uranio y elementos que actúan como inhibidores de la fase UAl_4 , por ejemplo el Si, Zr, Sn en concentraciones menor al 5% en peso).

El UAl_2 pareciera el más adecuado debido al contenido de uranio que posee (81,52%) y densidad elevada ($8,14 \text{ g/cm}^3$), estructura isotrópica, pero el inconveniente de ser extremadamente pirofórico (se inflama al contacto con el aire o produce chispa al ser golpeado) dificulta algunas operaciones de fabricación.

2.1.3.- Dispersión de Siliciuros (U-Si-Al): Este método es una combinación de fusión y metalurgia de polvos. El compuesto intermetálico U-Si, se obtiene por fusión en un horno de inducción o arco eléctrico.

Mediante molienda, se obtiene los polvos, los cuales al ser clasificados por tamaño son mezclados con polvo de aluminio. Luego esta mezcla es prensada, obteniéndose así el núcleo.

La elección del silicio como material dispersante se basa en la alta densidad, buena resistencia a la corrosión y a la irradiación.

2.2.- Soldadura del Conjunto:

El núcleo compactado es armado en su respectivo marco de aluminio del mismo espesor, el cual es previamente recocido y decapado.

Previo a la operación de laminado, el conjunto marco-núcleo-tapa es ensamblado y soldado con soldadura TIG.

Se utiliza como material estructural la aleación Al: 6061 debido a su baja sección eficaz de captura neutrónica, bajo costo, fácil obtención y un noble comportamiento, debido a que como el zirconio, su pasividad se debe a un film de óxido protector. Esta aleación contiene además Mg, Si, Cu y Cr que le otorgan una adecuada resistencia mecánica conjuntamente con un razonable comportamiento a la corrosión.

2.3.- Laminación en Caliente:

Los tochos (conjunto tapa-marco con núcleo-tapa, soldado) son calentados a una temperatura de 500-600°C durante dos horas, luego son laminados en caliente a 360°C, en ocho secuencias bien definidas, las dos primeras secuencias tienen un 25% de reducción del espesor. La reducción total por el laminado en caliente es aproximadamente 80%.

Luego del laminado a las placas se les realiza el examen de ampolladura, el cual consiste en calentar las placas en un horno a 500°C durante una hora. Con este examen se verifica que la placa tubo una buena adherencia del núcleo con las tapas de aluminio, dando una hermeticidad a la placa combustible. Las placas son cortadas con sobredimensión, luego decapadas con NaOH.

Se requiere un mínimo de 10% de laminación en frío para todas las placas, obteniendo de esta manera el espesor requerido de la placa combustible. Finalmente se le realiza un control densitométrico y/o la geometría del combustible mediante rayos x.

2.4.- Cortado final de la placa:

Con la ayuda de las radiografías tomadas se marcan las placas con las dimensiones especificadas en el plano de fabricación . Luego de ser marcadas, las placas se cortan con una cizalladora.

2.5.- Armado del Elemento Combustible:

El armado se realiza en una máquina fresadora, que tiene un medidor de dimensiones en forma digital, el cual tiene un dispositivo o herramienta en forma de rueda.

Las placas combustibles se disponen mecánicamente en forma paralela una sobre otra, guiándose por las paredes ramuradas del elemento combustible.

A cada placa se le pasa con la ruedita de la fresadora con una leve presión, quedando de esta forma fija cada placa; formando con la boquilla y demás componentes el elemento combustible propiamente dicho, que luego del control final será transportado en contenedores especialmente diseñado para estos fines al depósito de salvaguardias.

C A P I T U L O I I I

ESPECIFICACIONES DE MATERIALES COMBUSTIBLES

1.- Características de un Combustible Nuclear ¹²¹

Los requisitos que ha de cumplir un combustible nuclear son los siguientes:

A.- Debe poseer buenas características nucleares tales como: pequeña sección eficaz de absorción de neutrones y alta concentración de isótopos fisionables.

B.- Debe tener una buena resistencia mecánica (si es sólido) y una elevada resistencia a la fluencia.

C.- Debe presentar una elevada resistencia a la corrosión por el medio que lo rodea y ser compatible con los materiales de vaina y refrigerantes.

D.- Debe ser estable, tanto dimensionalmente como en sus propiedades mecánicas bajo las condiciones de funcionamiento, entre ellas las de irradiación.

E.- Debe poseer buenas propiedades de transmisión de calor, tales como conductividad térmica elevada, una gran superficie y una sección pequeña.

F.- Debe ser producido y fabricado con facilidad y con un coste bajo.

2.- Especificaciones de Materiales para Combustibles Nucleares:

A continuación se muestra en detalle los requerimientos generales para Uranio y diferentes aleaciones de uranio enriquecido (UAl_x , U_3Si_2 y U_3O_8).

2.1.- Requerimientos Generales para Uranio:

- *Composición Química (solamente para información) : El contenido de uranio del metal será 99.85% en peso como mínimo con impurezas individuales que no excedan lo siguiente:*

Tabla N° 1: Nivel de Impurezas**Máximo para Uranio**

<i>Elemento</i>	<i>Masa por ppm</i>
<i>Ag</i>	<i>10.0</i>
<i>Al</i>	<i>100.0</i>
<i>B</i>	<i>3.0</i>
<i>Be</i>	<i>10.0</i>
<i>C</i>	<i>350.0</i>
<i>Ca</i>	<i>50.0</i>
<i>Cd</i>	<i>0.2</i>
<i>Co</i>	<i>5.0</i>
<i>Cr</i>	<i>50.0</i>
<i>Cu</i>	<i>50.0</i>
<i>Fe/Ni</i>	<i>400.0</i>
<i>Li</i>	<i>10.0</i>
<i>Mg</i>	<i>50.0</i>
<i>Mn</i>	<i>15.0</i>
<i>Mo</i>	<i>100.0</i>
<i>Na</i>	<i>25.0</i>
<i>P</i>	<i>100.0</i>
<i>Pb</i>	<i>5.0</i>
<i>Si</i>	<i>100.0</i>
<i>Sn</i>	<i>10.0</i>
<i>Zr</i>	<i>250.0</i>

Tabla N° 2: Composición Isotópica del Uranio

<i>Isótopo</i>	<i>Contenido (%W de U total)</i>
U^{234}	<i>0.50 máximo.</i>
U^{235}	<i>10.75 + 0.20</i>
U^{236}	<i>1.00 máximo.</i>
U^{238}	<i>balance</i>

2.2.- *Requerimientos Generales para UAl_x***Tabla N° 3: Composición Isotópica para el UAl_x**

Isótopo	Contenido (%W de U total)
U^{234}	0.5 máximo.
U^{235}	(92 a 94)
U^{236}	1 máximo.
U^{238}	5 a 7

Constituyentes Cristalinos (%W).

$UAl_2=9$

$UAl_3=58$

$UAl_4=33$

Densidad de la partícula = 6.41 g/cm^3

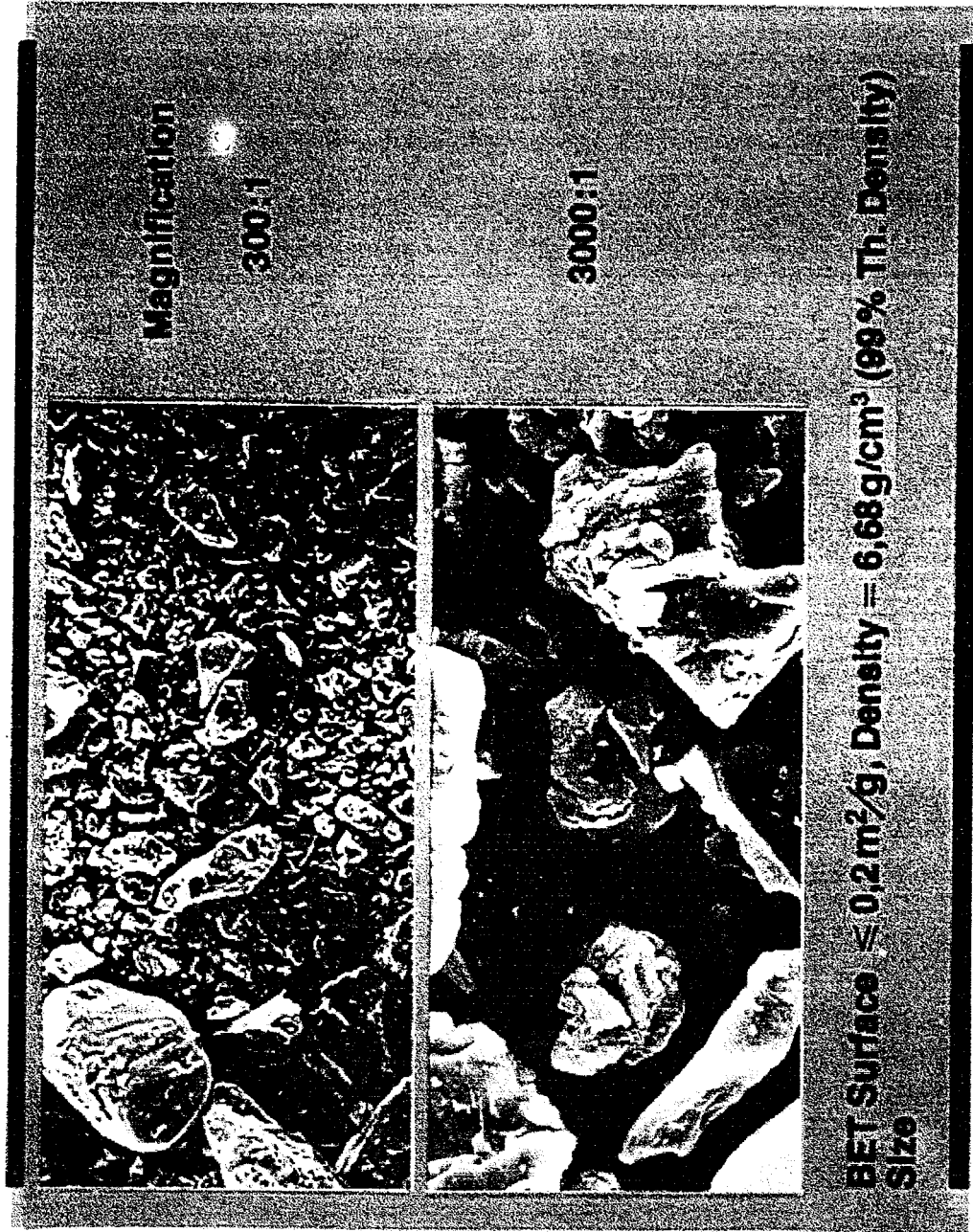
Tabla N° 4: Contenido de Impurezas Metálicas (ppm) para UAl_x

Elemento	masa en ppm	Elemento	masa en ppm
Ba	1	Ni	20
Be	1	P	20
B	0.5	Si	30
Ca	20	Ag	1
Cd	0.5	Su	1
Cr	2	W	20
Co	5	V	20
Cu	10	Zn	10
Fe	100	Zr	10
Pb	0.5	Sm	0.2
Mg	10	Eu	0.2
Mo	1	Dy	0.2
Mn	1	Gd	0.2

Tabla N° 5: Impurezas no Metálicas (%w) en UAl_x

Elemento	%w
O	0.26
N	0.001
C	0.172
Fat/Oil	0.0
H	0.002
No volátiles	100%

Figura N° 6: Fotografía SEM de partículas combustibles
de UAlx estándar



Magnification

300:1

3000:1

BET Surface $\leq 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$, Density = $6,68 \text{ g}/\text{cm}^3$ (99% Th. Density)
Size

Tabla N° 6: Análisis de Tamizado (%w),**Tamices U.S. Standard para UAl_x**

# de tamiz	%w
+170	0.00
-170+200	27.21
-22+270	14.00
-270+325	26.52
-325	19.49
Pan +Loss	19.28

2.3.- Requerimientos Generales para U_3Si_2 **Tabla N° 7 : Composición Isotópica del U_3Si_2**

Isótopo	Contenido (%W de U total)
U^{234}	0.50 máximo.
U^{235}	19.75 ± 0.20
U^{236}	1.00 máximo.
U^{238}	Balance.

Tabla N° 8: Composición Química del U_3Si_2

Elemento	Cont. Máx. Impur. (ppm/masa)
Al	600.0
B	30.0
C	1000.0
Cd	10.0
Co	10.0
Cu	80.0
Fe/Ni	1000.0
H	200.0
Li	10.0
N	500.0
O	7000.0
Zn	1000.0

El contenido de silicio del polvo de siliciuro de uranio (U_3Si_2) puede ser 7.5 +0.4-0.1

%w.

2.4.- *Requerimientos Generales para U₃O₈***Tabla N° 9: Composición Isotópica del U₃O₈**

Isótopo	%w
U ²³⁴	0.15
U ²³⁵	19.67
U ²³⁶	0.13
U ²³⁸	80.05

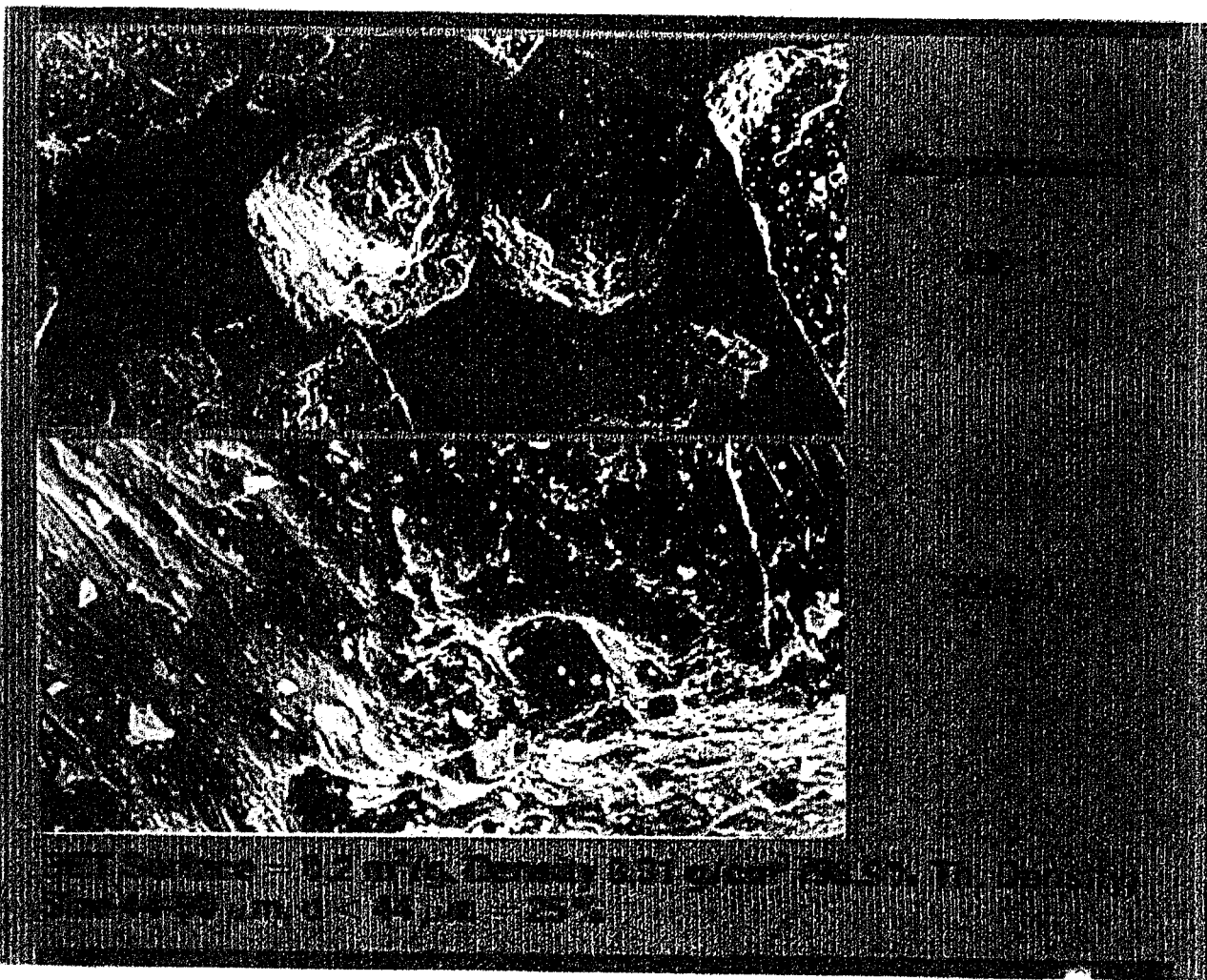
Tabla N° 10: Análisis Físico y Químico del U₃O₈

Componente	Especificación
Uranio (%W)	>84.5
Assay (%W)	>19.70 + 0.20
Densidad (g/cm ³)	> 8.0
Area Superficial (m ² /g)	Uniforme de lote a lote.
UO ₂ (%)	< 1.0

Tabla N° 11: Nivel Máximo de Impurezas en el U₃O₈

Elemento	ppm metal base
Al	100.00
B	2.00
Ba	10.00
Be	0.20
Ca	50.00
Cd	0.50
Co	3.00
Cr	*
Cu	20.00
Fe	*
K	20.00
Li	5.00
Mg	100.07
Mn	5.00
Na	20.00
Ni	*
P	<100.00
Si	50.00
V	2.00
F	20.00
Total	<1000.00

Figura N° 7: Fotografía SEM de partículas combustibles de U3O8 denso pretratado



- *Total de Cr+Ni+Fe no excederá 150 ppm*

Tabla N° 12: Análisis de Tamizado (por Synttron Sieve) screens,

U.S. standard mesh para U₃O₈

# de tamiz	%w
+170	1.00
-170+200	27.00
-200+230	13.00
-230+270	19.00
-270+325	16.00
-325	25.00

2.5.- Requerimientos Generales para Aluminio:

Los polvos de aluminio utilizados generalmente son Alcoa tipo 101, per Alcoa product data book 6-20-60, ó Reynolds metals 120, ó Alcon Mdx75; sin embargo, otros tipos también pueden ser aceptados.

El polvo está formado por partículas esféricas producidas por atomización. El 100% de los polvos pasa malla 100 (149 μ m) U.S. Standard screen con el 80% pasando la malla 325 (44 μ m) U.S. Standard screen.

La composición Química no debe sobrepasar los valores mostrados en la tabla siguiente:

Tabla N° 13: Composición Química del Aluminio

Elemento	%W	Elemento	%w
B	0.001 máx.	Li	0.001 máx.
Cd	0.001 máx.	Mg	0.015 máx.
Co	0.001 máx.	Si	0.300 máx.
Cu	0.008 máx.	Ti	0.030 máx.
Fe	0.400 máx.	Zn	0.030 máx.
Li	0.001 máx.	Al	99.500 máx.

2.6.- Porosidad:

La porosidad remanente después de la fabricación del núcleo, proporciona espacios para acomodar el inchamiento inicial de las partículas combustibles bajo irradiación. La cantidad de porosidades se incrementa significativamente como el volumen de la carga se incrementa, debido a esto se vuelve más difícil para la matriz de aluminio, fluir completamente alrededor de las partículas combustibles, especialmente las que están una con otra.

Otros parámetros que tienen un efecto importante sobre la cantidad de porosidades en la fabricación, aunque su contribución no ha sido aislada es, por ejemplo: considerando U_3Si_2 fabricado por la B&W, CERCA y NUKEN para ensayos de irradiación; el contenido de porosidad del núcleo combustible producido por un conocido fabricante permanece constante, pero hay una variación de fabricante a fabricante: 4% vol. para CERCA, 7.8% vol. para NUKEN y 9 a 10% para B&W. Las diferencias en el material o parámetros que pueden haber contribuido a las diferentes cantidades de porosidades incluye: (1) resistencia de la aleación de aluminio usada para el marco y la tapa de las aleaciones CERCA, estuvo muy lejos de su resistencia, mientras que la aleación B&W, es poco resistente; (2) la temperatura de laminado 425° para CERCA y NUKEN y $\approx 500^\circ$ para B&W, (3) cantidad de finos en el polvo de U_3Si_2 , 40% para CERCA y 17-18% para NUKEN y B&W; (4) tren de laminación, especialmente la cantidad de reducción en frío y las relaciones entre el tamaño del compacto y la cavidad en el marco.

Diferencias en la porosidad en las placas se manifiestan como diferencias en swelling (hinchado de las placas durante la irradiación). Bajo las mismas

condiciones de irradiación una diferencia de 6% en volumen antes de fabricarse, la porosidad se traslada a la diferencia de 6% del espesor del núcleo en el espesor final de la placa. Este valor ≈ 30 a $40 \mu\text{m}$ para valores típicos del espesor del núcleo, es mucho menor que los tolerados o permitidos para los canales de enfriamiento. Además no se espera que las variaciones normales de las porosidades después de fabricado tengan implicancias en la seguridad.

2.7.- Homogeneidad:

Con el incremento del % de volumen del combustible y la densidad de uranio, el límite de homogeneidad presente resulta en un incremento en el número de placas combustibles rechazadas. El límite de homogeneidad dentro de las especificaciones deben ser un resultado del análisis de pruebas en caliente y además partes de las características totales de seguridad.

Con la técnica estándar, se determina las desviaciones homogéneas sobre áreas de 1 cm^2 . Son aceptables todas las técnicas de medición.

Limitaciones en el diseño o seguridad sobre la homogeneidad son producto de las mayores tolerancias de la homogeneidad. Las tolerancias mínimas no son decisivas. Las desviaciones mínimas mayores pueden ser aceptadas, pero su control permite un conocimiento profundo de la calidad total de fabricación de la placa combustible.

2.8.- Densidad:

La propiedad de mayor influencia en el comportamiento térmico es la densidad. Esta propiedad determina la conductividad térmica de óxido y debe mantenerse

dentro del rango específico para asegurar valores aceptables de la temperatura del óxido y de la liberación de gases de fisión.

La densidad se mantiene lo más alta posible para cumplir los siguientes requerimientos:

- Maximizar la cantidad de material fisionable presente en el elemento combustible (relación U_3O_8/Al).*
- Asegurar que la liberación de gases de fisión estará dentro de límites aceptables.*

C A P I T U L O I V

METALURGIA DE POLVOS

1.- Definición: *La pulvimetalurgia (P/M) es el estudio del proceso de transformación de los polvos en productos finales, incluye su caracterización, sus procesos de ingeniería, la secuencia de estas operaciones, la aplicación de leyes básicas de calor, trabajo y deformación para los cambios de estructura, forma y propiedades.*

Es importante saber que todo proceso P/M empieza con la obtención de los polvos a usar, estos polvos deben cumplir ciertas condiciones de composición, tamaño, forma, etc., para ser empleados en las operaciones. Antes se consideraba solo los polvos metalúrgicos de los metales bases, pero actualmente se usan polvos de toda clase, incluso no metálicos, se entiende por polvo como la colección de un sólido finamente dividido, separado en tamaños muy pequeños, se entiende por convención que el tamaño máximo debe ser de 1 mm.

2.-Métodos de Obtención de Polvos Metalúrgicos:

Existen los siguientes procesos:

- Técnicas Mecánicas (impacto, rozamiento, cizallamiento y compresión)*
- Técnicas electrolíticas (corrosión anódica).*
- Técnicas químicas (descomposición de un sólido por un gas, descomposición térmica, precipitación de un líquido, precipitación por gas).*

- *Técnicas atomizantes (electrodo giratorio, disco giratorio, crisol giratorio, electrodo vibrante, cilindros, agua, gas, explosión).*

3.- Caracterización de los polvos metalúrgicos

Es importante el conocimiento profundo de todas los posibles parámetros a medir de los polvos metalúrgicos, y es indispensable el uso de equipo moderno altamente tecnificado para su análisis, como computadores gráficos que realizan las tediosas operaciones de cálculos estadísticos, análisis matemáticos y que elaboren los gráficos requeridos para poder comprender y predecir el comportamiento de los polvos.

3.1.- Caracterización morfológica:

Se realiza con los siguientes instrumentos:

- *Scanning Electron Microscope: Conocido en nuestro medio como microscopio electrónico de barrido o en forma general dentro de la clasificación tecnológica SEM.*

- *Transmisión Electron Microscope: El cual revela la estructura interna de la partícula, conocido con las siglas TEM.*

3.2.- Determinación del tamaño de la partícula:

El tamaño de la partícula es entendido como la unidad dimensional de distancia, es la distancia recta mas grande que se puede encontrar en la partícula, la magnitud de esta distancia condiciona el equipo a usar para su medición.

Con tal fin pueden usarse diferentes técnicas de mesuramiento, todas ellas posibles gracias a los esfuerzos de los investigadores orientados al desarrollo de teorías físicas, la máxima empleada es: "el tamaño a medir condiciona el equipo a usar", por convención se asume equivalentes esféricos por que en una esfera solo hay un

parámetro para definir sus medidas, este es el diámetro, todas las técnicas de medición usan un parámetro geométrico en base al cual realizan la conversión; las técnicas usadas son: Microscopía, Tamizado, Sedimentación, Dispersión de luz, Conductividad Eléctrica, Bloqueo de la Luz, Técnicas de Rayos-X, Método de Adsorción (BET 1938).

3.3.-Forma de la partícula, Area superficial: La geometría de la partícula esta íntimamente relacionada con su área superficial y su volumen, los cuales pueden ser fácilmente calculados si es que se asume forma esférica, pero a pesar de contar con esta información siempre se necesita conocer verdaderamente la forma real o formas que presentan las partículas de un determinado universo o lote.

La determinación de la forma, ha dado lugar a estudios muy profundos de Estereología Cuantitativa como método principal de determinación, que ha sido posible solo con la ayuda de la tecnología moderna, fundamentalmente del estudio de las proyecciones de las imágenes en superficies sucesivas, para después mediante técnicas estadísticas, gráficas y computacionales generar la imagen verdadera del cuerpo en gráficos 3D que permitan un estudio cabal de la orientación de los planos, la superficie que ofrece, el volumen del mismo y las irregularidades en su superficie, esta topografía de la partícula indicara los parámetros de la forma, los índices de la forma, que podrán ser usados fácilmente en la plantas como medio de discriminación del producto y criterio de selección para su mezcla.

En las diferentes determinaciones de las formas se ha podido establecer que se presentan con continua periodicidad las formas: esféricas, angular, redondeada,

lágrima, cubica, esponja, acicular, cilíndrica, fibrosa, irregular, ligamento, hojuela, poligonal, agregada, dentrítica.

En la determinación del área superficial existen dos tipos de análisis, el objetivo es medir el área superficial total a lo largo de todos los tipos de partículas, el primero de ellos fue indicado líneas arriba y es el BET, el segundo es el Análisis de Permeabilidad, ampliamente conocido por todos, que consiste en la fabricación de una probeta de polvo metalúrgico que es expuesta a presiones diferentes en un tubo de ensayo con tal fin, nos indicara la porosidad teórica y la densidad teórica del material, de los dos el más conveniente es del BET.

3.4.- Caracterización Química:

Existen dos niveles de caracterización química, el primero de ellos trata de determinar las características químicas del lote en su totalidad, para este nivel son apropiadas las técnicas convencionales de análisis químicos como gravimetría, volumetría, colorimetría, etc.

El segundo nivel es la caracterización química de la superficie de la partícula, para ello se disponen en la actualidad de algunos análisis especiales que se muestran en la tabla N° 14.

Se busca en este segundo nivel información referente a la composición química superficial, si existen estados iónicos determinar la valencia de oxidación de esas zonas, ver si existen especies químicas complejas en la superficie, capas superficiales de óxidos, complejos pasivantes, o determinar la naturaleza de capas exteriores en caso de existir estas.

Tabla 14: Caracterización Química de la Superficie de la Partícula

METODOS	DESCRIPCION
<i>RX fotoemisión Spectroscópica (XFS)</i>	<i>Usa rayos-X monocromáticos, consiste en la adsorción fotónica de los electrones, el cambio de energía experimentado es fácilmente asociado a la especie química, puede identificar elementos y especies químicas.</i>
<i>Auger Electron Spectroscopía (AES)</i>	<i>Está basado en la excitación superficial que sufre la energía de la partícula al ser sondeada por un analizador que emite electrones por medio de una sonda, la diferencia en los niveles de energía son constantes características de ciertos átomos, y pueden por consiguiente ser analizados.</i>
<i>Espectrometría de masa iónica secundaria (SIMS)</i>	<i>Usa un gas inerte ionizado y cerca de 500 eV para remover los iones positivos y negativos formados en la superficie a analizar, así pueden detectarse las cargas iónicas en las secciones de las superficies, puede detectar todos los elementos y sus isótopos, pero solo en forma cualitativa.</i>
<i>Auger Microscopía de Barrido (SAM)</i>	<i>Es el método AES pero con la modificación que emite una señal electrónica sobre la superficie que la barre continuamente, representando la distribución de elementos específicos generando gráficas 2D de la superficie cualitativamente, por lo general se espera que los análisis muestren la información dada por AES y SAM.</i>

Por lo general la materia prima para la producción de polvos metalúrgicos es muy pura y seleccionada, por lo que no hay presencia importante de impurezas, lógicamente se prefiere trabajar con sustancias lo más puras posibles, pero eso depende de los métodos de extracción y refinación metalúrgicos, pues los materiales de partida en operaciones P/M son elementos casi puros, en el caso de necesitarse pre-aleaciones existe también buena pureza de estos materiales, los análisis químicos están destinados más bien a la determinación de microsegregaciones, y a la cuantificación de las impurezas presentes.

4.- Fabricación de piezas por pulvimetalurgia (ver figura N° 8)

4.1.- Mezclado: La combinación y el mezclado propios de los polvos son esenciales para la uniformidad del producto terminado. La distribución del tamaño

de la partícula deseada se obtiene combinando de antemano los diferentes tipos de polvos utilizados. Los polvos de aleación, los lubricantes y los agentes de volatilización se agregan para dar una cantidad de porosidad deseada a los polvos combinados durante el mezclado. El tiempo para el mezclado puede variar desde unos pocos minutos hasta varios días, dependiendo de la experiencia y de los resultados deseados. El sobremezclado debe evitarse en muchos casos, ya que puede disminuir el tamaño de la partícula y endurecer por trabado las partículas.

4.2.- Compactado: La operación más importante en la metalurgia de polvos es el compactado o presionando. El propósito del compactado es consolidar el polvo en la forma deseada y tan cerca como sea posible a las dimensiones finales, teniendo en cuenta cualquier cambio dimensional que resulte del sinterizado; el compactado se ha diseñado también para impartir el nivel y tipo de porosidad deseado y proporcionar una adecuada resistencia para la manipulación.

La mayoría de las partes se comprimen en frío. Para obtener más densidad y resistencia las partes pueden comprimirse en caliente o forjarse (martillado) subsecuentemente.

La forma de la partícula adecuada, el tamaño y la distribución del tamaño, la selección cuidadosa y la mezcla son necesarias para obtener una parte comprimida satisfactoria. Las mejores ligas se obtienen entre partículas abruptas, pero las partículas redondas fluyen mejor en el molde y bajo presión.

El metal en polvo comúnmente se comprime en una cavidad de dado para tomar la forma de la parte mediante uno o más punzones. La calidad depende de empaquetar con uniformidad el material.

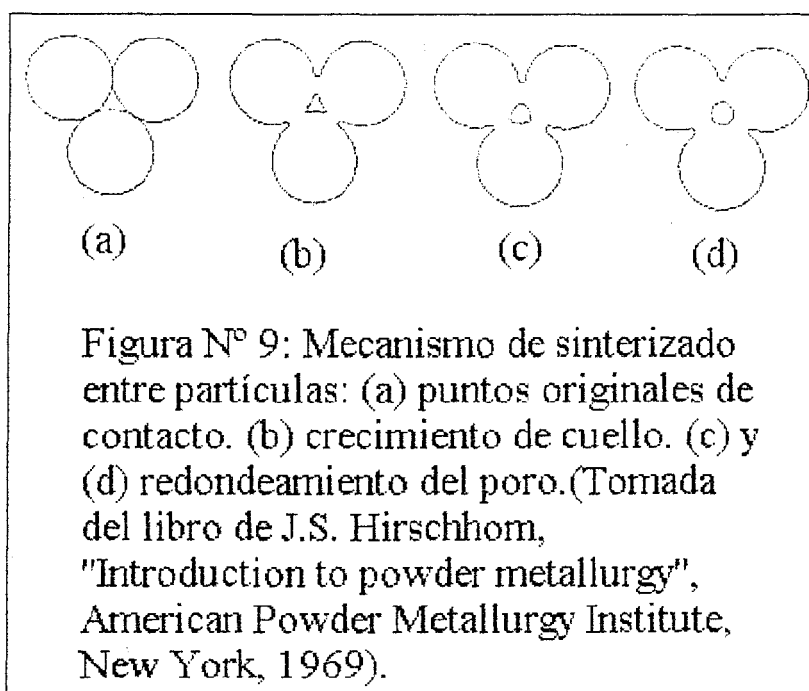
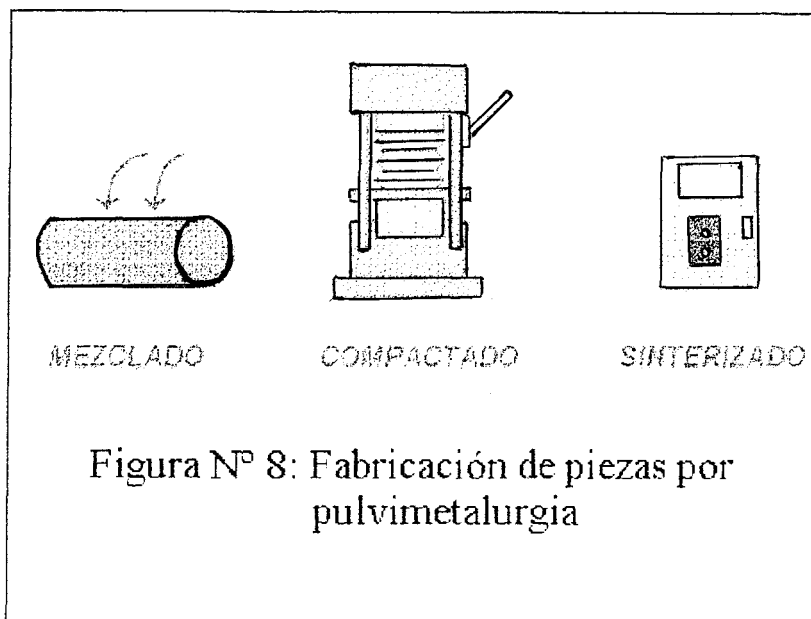
La forma en que el polvo llena el dado determina la velocidad de operación. Puede agregarse estearato de zinc para lubricar el dado y las partículas para disminuir así el desgaste y ayudar en la compactación. Estas sustancias se volatiliza en el sinterizado y ayudan a mantener contactados los poros.

Como otros métodos de compactación se tienen: el de colada, deslizándose el polvo mojado en moldes; la compactación centrífuga; moldeo por inyección; compresión isostática ó compresión hidráulica en un líquido; y la compresión isostática caliente (HIP) .

4.3.- Sinterizado: *El proceso de sinterizado se efectúa generalmente a una temperatura inferior a la del constituyente de más alto punto de fusión. En algunos casos, la temperatura es suficientemente alta para formar un constituyente líquido, como en la manufactura de carburos cementados, en que el sinterizado se hace por encima del punto de fusión del metal cementador. En otros casos, no tiene lugar la fusión de ninguno de los constituyentes.*

Los hornos de sinterizado pueden ser del tipo de resistencia eléctrica o del tipo de encendido por gas o petróleo. Es necesario controlar estrechamente la temperatura para minimizar las variaciones en dimensiones finales. La temperatura muy uniforme y precisa del horno eléctrico lo hace más adecuado para este tipo de trabajo.

Como el enlace entre partículas se afecta grandemente por las películas superficiales, debe evitarse la formación de películas superficiales indeseables, tales como óxidos. Esto puede conseguirse mediante el empleo de una atmósfera protectora controlada. Otra función de la atmósfera es reducir tales películas si



están presentes en los polvos antes de mezclar y aglomerar. La atmósfera protectora no debe contener ningún oxígeno libre y debe ser neutral o reductora respecto al metal que va a sinterizarse. Una atmósfera seca de hidrógeno se utiliza en el sinterizado de carburos refractarios y contactos eléctricos, pero la mayoría de las atmósferas comerciales de sinterizados se producen por la combustión parcial de varios hidrocarburos. El gas natural o propano se emplea a menudo para este propósito.

El sinterizado es esencialmente un proceso de enlazar cuerpos sólidos por fuerzas atómicas. Las fuerzas de sinterizado tienden a disminuir con el aumento de temperatura, pero todas las obstrucciones al sinterizado (como el contacto superficial incompleto, la presencia de películas superficiales y la falta de plasticidad) disminuirán más rápidamente con el aumento de temperatura. Por tanto, las temperaturas elevadas tienden a favorecer el proceso de sinterizado. Cuanto mayor sea el tiempo de calentamiento o la temperatura, mayores serán el enlace entre la película y la resistencia tensil resultante.

A pesar del mucho trabajo experimental y teórico sobre los aspectos fundamentales del sinterizado, todavía hay mucho del proceso que no se entiende. El proceso de sinterizado empieza con el enlace entre las partículas conforme el material se calienta. El enlace incluye la difusión de átomos donde hay contacto íntimo entre partículas adyacentes que dan lugar al desarrollo de fronteras de grano. Esta etapa origina un incremento en resistencia y dureza relativamente grande, aún después de breves exposiciones a elevada temperatura. Durante la

siguiente etapa, las áreas de enlace recientemente formadas, llamadas "cuellos", crecen en tamaño, seguidas por un redondeamiento de los poros. Esto se muestra esquemáticamente en la figura N° 9 en términos de un modelo de tres esferas. La última etapa es el encogimiento y la eventual eliminación del poro. Esta etapa rara vez se completa, ya que las temperaturas y los tiempos necesarios son demasiado imprácticos.

4.4.- Operaciones Suplementarias:

Para aplicaciones que requieren mayor densidad o estrechas tolerancias dimensionales, el sinterizado es seguido por una operación de trabajado en frío, conocida como "presionado final de represión". Este presionado tiene por objeto condensar el comprimido sinterizado. Es posible obtener considerable deformación plástica dentro del troquel, lo cual da como resultado formas más complejas de las que podrían hacerse directamente del polvo. La restringida deformación plástica dentro del troquel permite también, en muchos casos, obtener estrechas tolerancias dimensionales sin necesidad de un maquinado costoso ulterior.

El calentamiento para sinterizar puede interrumpirse en alguna temperatura intermedia, lo cual se conoce como presinterizado. En este punto el comprimido puede tener buena maquinabilidad o ser suficientemente suave para permitir la utilización de operaciones factibles después de sinterizar.

En algunos casos, el resinterizado después de represionar incrementará las propiedades mecánicas considerablemente.

Dependiendo de la aplicación, el comprimido sinterizado puede tratarse térmicamente para obtener ciertas propiedades deseables. El tratamiento térmico puede ser de liberación de esfuerzos o de recocido.

Se pueden llevar a cabo diversas operaciones para completar la manufactura de las piezas hechas de polvo de metal. Estas operaciones incluyen maquinado, cizallamiento, escariado, pulido, enderezamiento, eliminación de rebabas, esmerilado y limpiadura por chorro de arena.

De los diversos métodos de enlace, sólo la soldadura fuerte se ha utilizado extensamente para los productos de metalurgia de polvos.

La impregnación es el medio más común para llenar los poros internos en el comprimido sinterizado. Esto se lleva a cabo principalmente para mejorar las propiedades de antifricción, como en los cojinetes autolubricantes. La impregnación de aceite puede lograrse sumergiendo las piezas en un recipiente con aceite caliente, o extrayendo primero el aire de los poros por vacío y luego forzando el aceite dentro de los poros a base de presión. Las ceras y las grasas también se utilizan como impregnadores. El empleo de un impregnador metálico de bajo punto de fusión, como las aleaciones al estaño y el plomo babbitt en una matriz esponjosa de aleaciones no ferrosas, tiende a mejorar las propiedades antifriccionantes del metal. La impregnación como plomo líquido se ha usado para incrementar la gravedad específica de las piezas de base de hierro.

5.- Aplicaciones de la Pulvimetalurgia

Una de las aplicaciones principales es la de cojinetes porosos, que pueden absorber de un 10 a un 40% de su volumen de aceite. El espesor de la película de aceite se regula automáticamente: cuando la temperatura es elevada fluye más aceite, y cuando es baja, el aceite vuelve al cojinete, debido a la acción capilar, y de esta manera no se pierde aceite de lubricación. Estos cojinetes se utilizan en muchas industrias y en piezas que son difíciles de lubricar ó en los casos en que es conveniente que no se pierda el aceite. Son convenientes las piezas de porosidad controlada para los diafragmas y filtros para gases, aceites refrigerantes y otras soluciones químicas. Si se regula bien la porosidad, por este medio se pueden separar gases de líquidos y mezclas no emulsionables de líquidos y preparar catalizadores, electrodos de elementos secundarios, ánodos para células electrolíticas y otros artificios. Las principales aplicaciones de la metalurgia de polvos se pueden clasificar del modo siguiente:

1.- Producción de formas dúctiles, densas, de metales de elevado punto de fusión, tales como wolframio, molibdeno y tántalo, pues a partir de estos metales en polvo por fusión se obtendrán estructuras de grano grueso.

2.- Fabricación de cojinetes y partes metálicas porosas, en las que se requiere una porosidad controlada, la posibilidad de impregnación de aceite y el empleo de adiciones no metálicas, tal como el grafito.

3.- Producción de carburos duros cementados, carburos de wolframio, molibdeno y tántalo en una matriz de cobalto ó níquel para herramientas cortantes y resistentes al desgaste y para matrices sometidas a servicios duros.

4.- *Fabricación de contactos eléctricos, constituidos por una matriz conductora de la electricidad y del calor, en la que están embebidas partículas resistentes al desgaste.*

5.- *Producción de compactos de polvo de formas determinadas sometidos posteriormente a tratamiento térmico como ampliación de las formas obtenidas según los métodos corrientes.*

6.- Ventajas y Limitaciones de la Pulvimetalurgia

6.1.- Ventajas:

Las ventajas de la pulvimetalurgia se basan en poderse hacer las piezas:

(a) de tamaño exacto.

(b) con una gran velocidad de producción.

(c) con menos operaciones, en general, que las que exigen otros métodos de hechurado de materiales.

(d) con un pequeño corte de mano de obra.

(e) sin necesidad de un posterior trabajo de taller.

(f) con poco desperdicio de material.

6.2.- Desventajas:

Las limitaciones de la metalurgia de polvos se deben esencialmente a los materiales, los hombres y las máquinas.

(a) El material, como se ha dicho, no fluye libremente, y, por lo tanto, no se pueden hacer piezas con partes penetrantes. Estos objetos se han de fabricar por ahora en el taller mecánico. La concentricidad se ha de cuidar bien, y el límite de

tolerancia en este aspecto a de ser razonable. En lo posible se han de evitar los gastos complementarios de taller para dejar listas las piezas.

(b) Esta es una técnica en la cual es más necesaria la colaboración entre el fabricante de los polvos, el de las piezas por pulvimetalurgia y el usuario con sus técnicos y proyectistas.

(c) Las máquinas, naturalmente, tienen un límite de capacidad, y esto pone freno al tamaño de los objetos, pero cada día se consiguen materiales que resistan acciones más intensas en diversos aspectos.

C A P I T U L O V

REACTOR NUCLEAR PERUANO RP-10

1.- Descripción General

El diseño y la construcción del Reactor y de sus instalaciones se realizaron a través de un convenio firmado entre las Repúblicas de Argentina y Perú, participando la COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE ARGENTINA (CNEA) Y EL INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR (IPEN).

El reactor fue puesto a CRITICO por primera vez el día 30 de Noviembre de 1988.

Las bases de diseño tomadas en cuenta para la construcción del reactor se agrupan bajo los siguientes conceptos:

A.- Por el tipo de reactor:

- Tipo pileta.*
- Baja potencia.*
- Materiales Nucleares tipo MTR.*

B.- Por el uso del reactor:

- Investigación en el área de materiales.*
- Investigación básica en el área nuclear.*
- Producción de radioisótopos.*
- Entrenamiento de personal profesional en Reactores Nucleares.*

En la tabla N° 15 se presentan las características más importantes del RP-10 y en la figura N° 10 un corte vertical del edificio del reactor.

2.- Núcleo del Reactor

El núcleo está compuesto de 25 elementos de combustible, de los cuales 20 son elementos combustibles estándar (SFE), y 5 elementos combustibles de control (EFC).

Estos se encuentran empernados en una grilla de 10x10 posiciones, el espacio libre es llenado con los elementos reflectores y las barras de control.

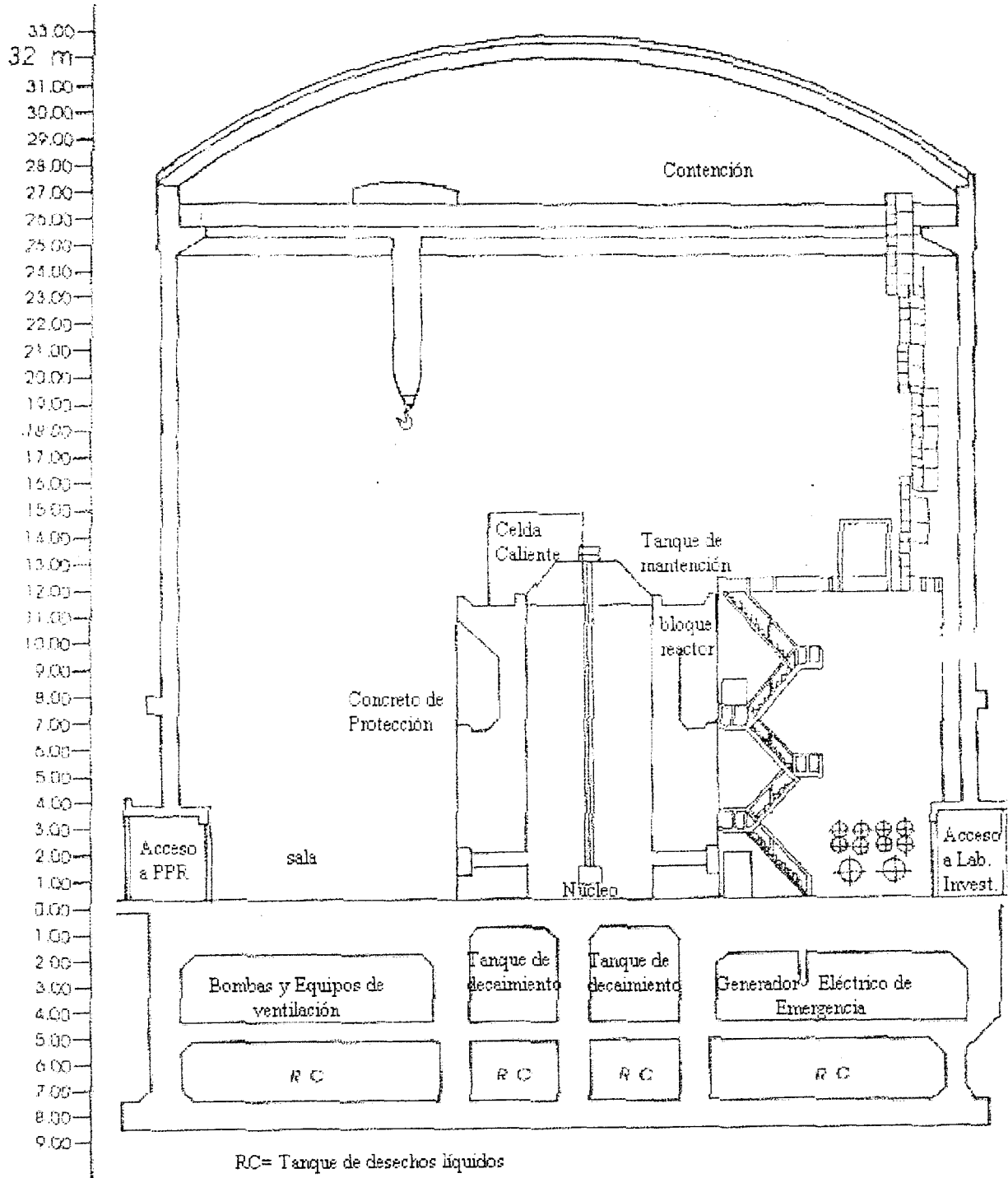
Para la irradiación de muestras, son 9 posiciones in-core con altos flujos y 16 posiciones out-core con flujos bajos, 3 canales radiales (contiguos a la pared del tanque), 1 canal de paso tangencial completo, 1 canal radial para neutrografía, una columna térmica y 2 sistemas neumáticos, como se muestra en la figura N° 11.

Al presente solo 2 de las 9 posiciones in-core son usadas en la producción de radioisótopos para demanda nacional e investigación. Los otros están disponibles para propósitos iguales o cualquier otra irradiación. El rango de flujo de neutrones térmicos en las posiciones de irradiación in-core a 10 MW es de 5×10^{13} n/cm²seg (mínimo) a 2×10^{14} n/cm²seg (máximo). Las 16 posiciones out-core tienen flujos debajo de 5×10^{13} n/cm²seg. En cada una de estas posiciones de irradiación 16 cápsulas selladas conteniendo muestras o blancos pueden ser colocados y pueden tener hasta 25 cm³ de volumen.

Tabla N° 15: Parámetros mas importantes del RP-10 para el núcleo normal de trabajo.

Tipo de Combustible del Reactor	MTR
Combustible	U_3O_8 -Al enriquecido al 19,75% de U^{235} ; 17,5 gr. por placa.
Número de Elementos Combustibles	20 elementos combustibles normales (16 placas), 5 elementos combustibles de control (12 placas).
Contenido de U^{235} en el núcleo	280 gr. en el combustible
Masa crítica del núcleo	4275 gr. de U^{235}
Moderador	Agua liviana desmineralizada
Reflector	Grafito y agua liviana
Máxima temperatura permisible del agua en operación normal	Entrada: 40°C Salida: 45,2°C
Barras de Control	5 barras de control gruesas (3 propiamente de seguridad y 2 de compensación y regulación) de Ag-In-Cd. 1 barra de regulación fina (BCF) de acero.
Blindaje superior	Agua y un sistema "colchón caliente"
Blindaje lateral	Agua + Hormigón
Número de canales horizontales:	
Radial	4 (uno de ellos para neutrografía) radiales
Tangencial	1 conducto tangencial pasante
Forma del núcleo	Paralelepípedo
Grilla del núcleo	Forma de loseta de 10x10 orificios
Máximo quemado del combustible	55%
Flujo neutrónico promedio a 100 W	$4,45 \times 10^8$ neutrones/cm ² .s
Reactividad (pcm) del núcleo	Máximo exceso de reactividad: 8100 pcm
Area de transferencia de calor en los elementos combustibles	Area caliente: 7,72 m ²
Flujo calórico promedio en las placas	13×10^5 W/m ²
Temperatura del combustible	Máxima admisible de pared = 110°C
Caudal nominal del refrigerante	1650 m ³ /h (primario) 1650 m ³ /h (secundario)
Presión relativa máxima	Primario: 5 Kg/cm ² Secundario: 3,5 Kg/cm ²
Resistividad del moderador	De 1 a 3 MΩcm
Ph	Entre 5 y 7,7
Coefficiente de reactividad por temperatura del moderador	-16,5 pcm/°C

Figura N° 10: Corte Transversal del Edificio del Reactor



RC= Tanque de desechos líquidos

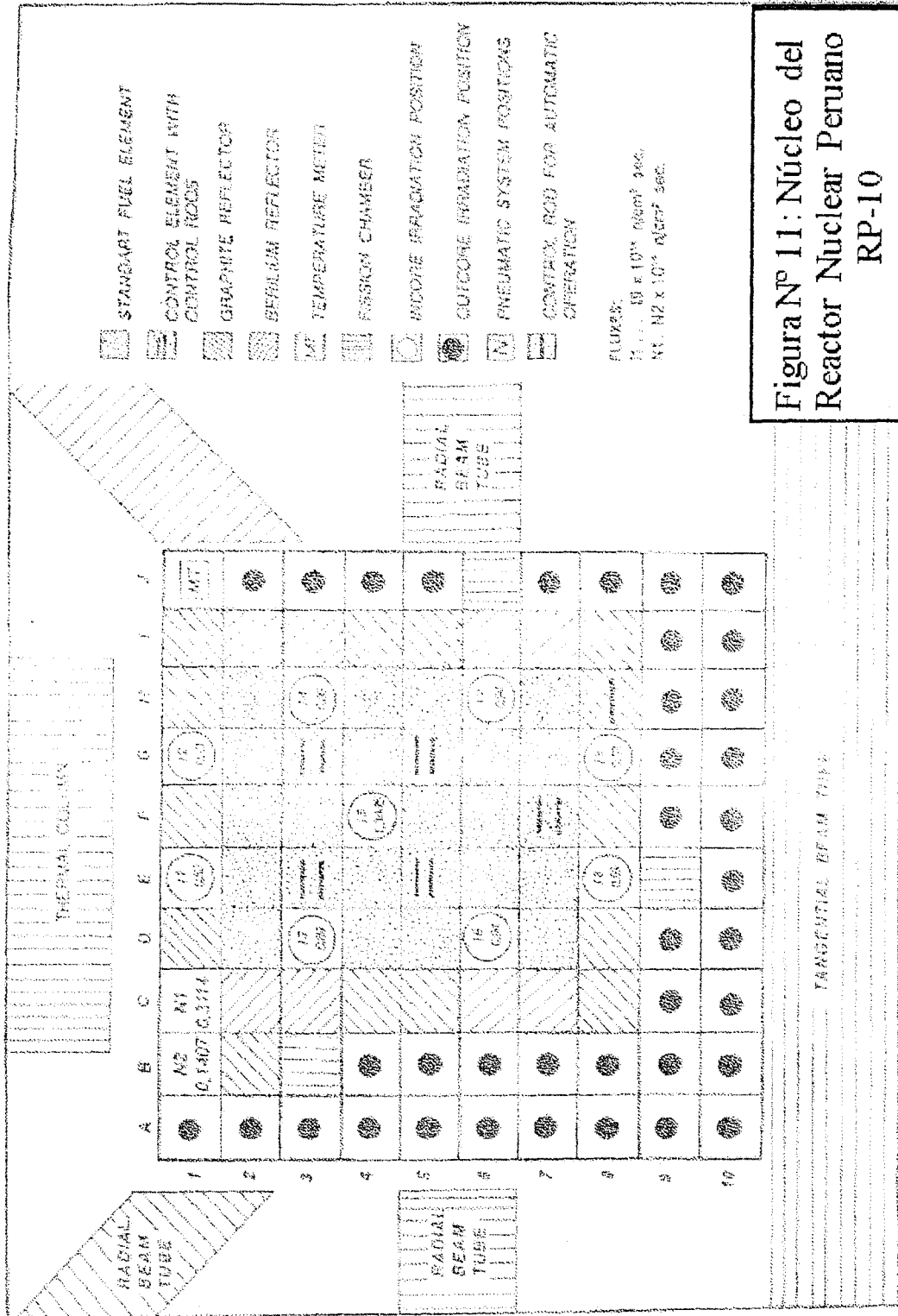


Figura N° 11: Núcleo del Reactor Nuclear Peruano RP-10

2.1.- Elemento Combustible Estándar (SFE):

Cada elemento combustible estándar consta de 16 placas combustibles, formadas por dos cubiertas de aluminio c/u; las cuales encierran las placas de dispersión de U_3O_8 -Al. Las dimensiones de las placas se muestran en la figura N° 12.

El largo total del SFE es de 930 m.m. El revestimiento de las placas combustibles externas es de mayor espesor que la de las placas combustibles internas con la finalidad de prevenir daños durante la manipulación del SFE. El núcleo (meat) es insertado en el marco usando la técnica del cuadro enmarcado (ver figura N° 5).

Las placas combustibles son conectadas a dos placas laterales por un procedimiento especial de rolado. Los espaciamientos entre placas, por donde circula el agua de refrigeración, son de 3,3 m.m.

2.2.- Meat del SFE

El meat está formado por una dispersión de U_3O_8 en aluminio, con la siguiente composición:

TABLA N° 16: Composición del Meat

Elemento	% Peso
U^{235}	10,408
U^{238}	42,292
Al	37,7
O	9,6

La densidad del uranio en el meat es $2,296 \text{ gr/cm}^3$, lo cual está muy por debajo del límite de la densidad experimental de este tipo de combustible de $3,20 \text{ gr/cm}^3$.

La carga de un SFE es de 280 gr. de U^{235} y el de una placa combustible es de 17,5 gr. de U^{235} .

El enriquecimiento del uranio de bajo enriquecimiento (LEU) es de 19,75%_p de U²³⁵ de acuerdo con la INFCE recomendada. El volumen total del meat en un SFE es de 617,46 cm³.

3.- Ciclo del Combustible en el RP-10

En el RP-10 se realiza un ciclo del combustible incompleto, debido a que se inicia con la compra de elementos combustibles ya fabricados, y continúa con el almacenamiento en seco hasta que alcancen el nivel de reactividad requerida, momento en el cual son posicionados en el núcleo del reactor para su utilización. Una vez consumidos los elementos combustibles en el reactor, son retirados del mismo y puestos en una pileta auxiliar (pileta de agua), pudiendo permanecer ahí por días, meses ó años, dependiendo del grado de quemado alcanzado por el elemento combustible. Después de este periodo de tiempo, los elementos combustibles son enviados a la Planta de Desechos Radiactivos ó a U.S.A. para su reelaboración.

SEGUNDA PARTE

ASPECTOS EXPERIMENTALES

C A P I T U L O I

EL PROBLEMA

Debido a las restricciones realizadas por la Administración del Gobierno de los Estados Unidos, en la década del 80, limitando la utilización de uranio enriquecido para Reactores de Investigación del Tercer Mundo, se fabricó estos materiales con uranio-235 enriquecido al 20% utilizando la técnica pulvimetalúrgica, por las ventajas que ofrece frente a la fundición.

El empleo de la técnica de pulvimetalurgia hace factible utilizar -a los aspectos de estudio- materiales que por sus características físicas, químicas y metalúrgicas, permiten simular la presencia del cerámico de uranio utilizado en la fabricación real del combustible, porque trabajar con el sistema real (uranio-aluminio) demandaría tener que implementar el laboratorio con la infraestructura adecuada, para cumplir con las estrictas condiciones de seguridad física y nuclear que la normativa internacional puntualiza para la fabricación de estos componentes, y esto implicaría la inversión de un capital mucho mayor, lo cual no es disponible por el momento.

Por lo expuesto, se utilizará Carburo de Silicio (SiC) en polvo como simulador del uranio y aluminio en polvo como matriz. Esta simulación se realiza con el fin de permitir un trabajo de investigación en condiciones más seguras y económicas, sin

perder la confiabilidad de los resultados. Es conveniente mencionar que existen antecedentes que demuestran la factibilidad del simulador a utilizar incluso bajo condiciones de severa deformación plástica.

El presente estudio va a permitir el desarrollo de una Tecnología Nacional para la Industria de Fabricación de Elementos Combustibles y el autoabastecimiento de la demanda nacional, determinada principalmente por el Reactor Nuclear Peruano RP-10; cuyos resultados permitirán controlar los parámetros de operación en los posteriores procesos de fabricación de elementos combustibles tipo MTR en el país. Así mismo contribuirá a adquirir conocimientos sobre las propiedades de los materiales y de la pulvimetalurgia como técnica de fabricación.

El material a obtener forma parte de los materiales compuestos de matriz metálica (MMC, Metal Matrix Composite) con refuerzo en forma de partículas; un nuevo material, que puede ofrecer muchas ventajas respecto a otros materiales utilizados en la industria.

1.- Objetivo

1.1.- Objetivo General: *Obtener los Parámetros Optimos de Fabricación de Materiales Combustibles tipo disperso de U_3O_8 -Al para el Reactor Nuclear Peruano RP-10.*

1.2.- Objetivos Específicos:

- Simular una dispersión homogénea de carburo de silicio en el aluminio, cuyo comportamiento sea similar a la dispersión U_3O_8 -Al.

- Obtener la máxima densidad en los compactos de SiC-Al, simulando que con la máxima densidad se va a tener mejor comportamiento térmico, como es el caso del U_3O_8 -Al.

- Obtener en los compactos de SiC-Al una porosidad mínima, cuyo comportamiento simule que se va a mantener en el núcleo durante la irradiación, la retención de los productos de fisión con un alto grado de confiabilidad.

2.- Método y Diseño de la Investigación:

La presente investigación es de tipo experimental, basada en un diseño factorial, entendiéndose este como aquel en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento, a fin de determinar un juego de parámetros óptimos.

2.1.- Primera Etapa de la Investigación:

Como etapa inicial en la investigación se realizó la caracterización de los polvos siguiendo los procedimientos establecidos por las normas y se comparó los resultados con las especificaciones para combustibles dadas en el capítulo III de la primera parte del estudio. Seguidamente se tomó como base 15 compactos preparados en un estudio anterior (lote A) y se preparó 8 pastillas más (lote B y C) variando en ellas la concentración de carburo de silicio (simulador del uranio) hasta llegar al porcentaje solicitado por el reactor RP-10 (de acuerdo al esquema mostrado en la tabla N° 17); con los resultados obtenidos de estas pastillas se fijó un rango aproximado para los niveles de variación de los factores que influyen en el proceso de fabricación. Siendo estos los mostrados en la tabla N° 18.

2.2.- Segunda Etapa de la Investigación:

En la segunda etapa de la investigación se trabajó con las variaciones de los cuatro primeros factores que intervienen en el proceso (ver tabla N° 18), y para esto se identificaron con letras mayúsculas como se muestra en la tabla N° 19.

Se obtiene con estos factores un diseño factorial 2^4 el cual requiere fabricar 16 pastillas siguiendo el esquema de la tabla N° 20.

Tabla N° 17: Condiciones de Trabajo para el lote A, B y C

N° muestra	V_m (rpm)	T_m (hrs.)	$C_{aplic.}$ (Ton.)	$T_{ac.}$ (min.)	T_s (°C)	t_s (hrs.)	% _p de SiC
1A	200	1.0	10	5	620	0.5	30.0
2A	200	2.5	19	10	620	1.0	30.0
3A	200	3.0	20	15	620	1.5	30.0
4A	200	4.0	20	15	620	2.0	30.0
5A	185	1.0	20	7	620	0.5	30.0
6A	185	2.0	20	12	620	1.0	30.0
7A	185	3.0	20	15	620	1.5	30.0
8A	185	4.0	20	15	620	2.0	30.0
9A	160	1.0	20	5	620	0.5	30.0
10A	160	3.0	20	15	620	1.0	30.0
11A	160	4.0	20	15	620	2.0	30.0
12A	123	5.0	20	5	620	0.5	30.0
13A	123	2.0	20	10	620	1.0	30.0
14A	123	3.0	20	15	620	1.5	30.0
15A	123	4.0	20	15	620	2.0	30.0
1B	200	3.0	20	0.5	520	2.0	52.73
2B	200	4.0	20	0.5	520	2.0	52.73
3B	250	2.0	20	0.5	520	2.0	52.73
4B	250	3.0	20	0.5	520	2.0	52.73
5B	250	4.0	20	0.5	520	2.0	52.73
1C	300	2.0	20	0.5	520	2.0	62.30
2C	300	3.0	20	0.5	520	2.0	62.30
3C	300	4.0	20	0.5	520	2.0	62.30

Tabla N° 18: Niveles de variación de los Factores

FACTOR	NIVEL BAJO	NIVEL ALTO
Velocidad de mezclado	200 rpm	300 rpm
Tiempo de mezclado	2 hrs.	4 hrs.
Carga Aplicada	15 Ton.	20 Ton.
Tiempo de aplic. De carga	5 min.	15 min.
Temperatura de sinterizado	520°C	620°C
Tiempo de sinterizado	3 hrs.	6 hrs.

Tabla N° 19: Factores del Proceso para el lote D

FACTOR	MAGNITUD	LETRA
Tiempo de Mezclado	horas (hrs.)	A
Velocidad de Mezclado	revol.xmin. (rpm)	B
Carga Aplicada	Toneladas (Ton)	C
Tiempo de Aplic. De Carga	minutos (min.)	D

Tabla N° 20 : Diseño 2⁴ para el lote D

N° de pastilla	A	B	C	D
1D	-	-	-	-
2D	+	-	-	-
3D	-	+	-	-
4D	+	+	-	-
5D	-	-	+	-
6D	+	-	+	-
7D	-	+	+	-
8D	+	+	+	-
9D	-	-	-	+
10D	+	-	-	+
11D	-	+	-	+
12D	+	+	-	+
13D	-	-	+	+
14D	+	-	+	+
15D	-	+	+	+
16D	+	+	+	+

Donde el signo negativo indica que el factor se encuentra en el nivel bajo y el signo positivo en el nivel alto.

Se tomaron como variables de respuesta el %volumen de las partículas en la matriz, la densidad y la porosidad.

Con los resultados se determinará que factores producen mayor variabilidad en el proceso y cuales son los valores óptimos en esta etapa, utilizando técnicas estadísticas de análisis (con ayuda del software statgraphics).

2.3.- Tercera Etapa de la Investigación:

En la tercera etapa de la investigación se procede a determinar los parámetros óptimos de sinterizado, tomando las condiciones mostradas en la tabla N° 18, para esto cada factor se denominó con una letra como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla N° 21: Factores del proceso para el lote E

FACTOR	MAGNITUD	LETRA
Temp. de Sinterizado	° C	E
Tiempo de Sinterizado	horas	F

Se trabajó con los factores a dos niveles de variación, logrando un diseño factorial 2^2 , el cual requiere realizar 4 pastillas, para lo cual se procedió según el esquema siguiente:

Tabla N° 22: Diseño 2^2 para el lote E

N° de Pastilla	E	F
1E	-	-
2E	+	-
3E	-	+
4E	+	+

Donde el signo (-) indica el nivel inferior y el signo (+) el nivel superior; tomando como variable de respuesta el cambio de porosidad durante el sinterizado.

En base a técnicas estadísticas se analizan los efectos que producen los parámetros de sinterizado sobre la densidad y porosidad para poder encontrar los óptimos.

En esta etapa se preparó un lote más de compactos (lote F) con diferentes condiciones de sinterizado de acuerdo al esquema mostrado en la tabla 23.

Tabla N° 23: Diseño 2^2 para el lote F

N° de Pastilla	A	B
1F	-	-
2F	+	-
3F	-	+
4F	+	+

Se realizó el análisis utilizado en el lote E.

2.4.- Cuarta Etapa de la Investigación:

Como etapa final con los parámetros óptimos establecidos se prepararon 3 compactos más y en ellos se determinaron las propiedades del material como: densidad, % de porosidad, % volumen de partículas, dureza así como también se tomaron fotografías SEM en las que se pueden visualizar la dispersión de las partículas y sus formas.

C A P I T U L O I I

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1.-Caracterización de los Polvos:

Para los polvos utilizados, de carburo de silicio y aluminio (ver figura N° 13), se tomó en cuenta las siguientes características:

1.1.- Granulometría: Se utilizó el método descrito en ASTM B214-86 y el equipo mostrado en la figura N° 14.

1.2.- Morfología: El análisis fue por observación visual en Microscopio Electrónico de Barrido (SEM). Se estudió en base a micrografías de muestras. (ver figuras N° 15 y 16).

1.3.- Densidad Aparente: Determinada de acuerdo al procedimiento descrito en ASTM B212-89.

1.4.- Composición Química: Se asumió la composición química indicada por el fabricante, y se determinó las impurezas por la técnica de Análisis por Activación Neutrónica.

1.5.- Area Específica: Se determinó simulando que las partículas son esféricas (ver ejemplo de cálculos, anexo I).

1.6.- Densidad Tap: Se realizó según ASTM B527-85. (ver figura N° 17).



Figura N° 13: Polvos Utilizados

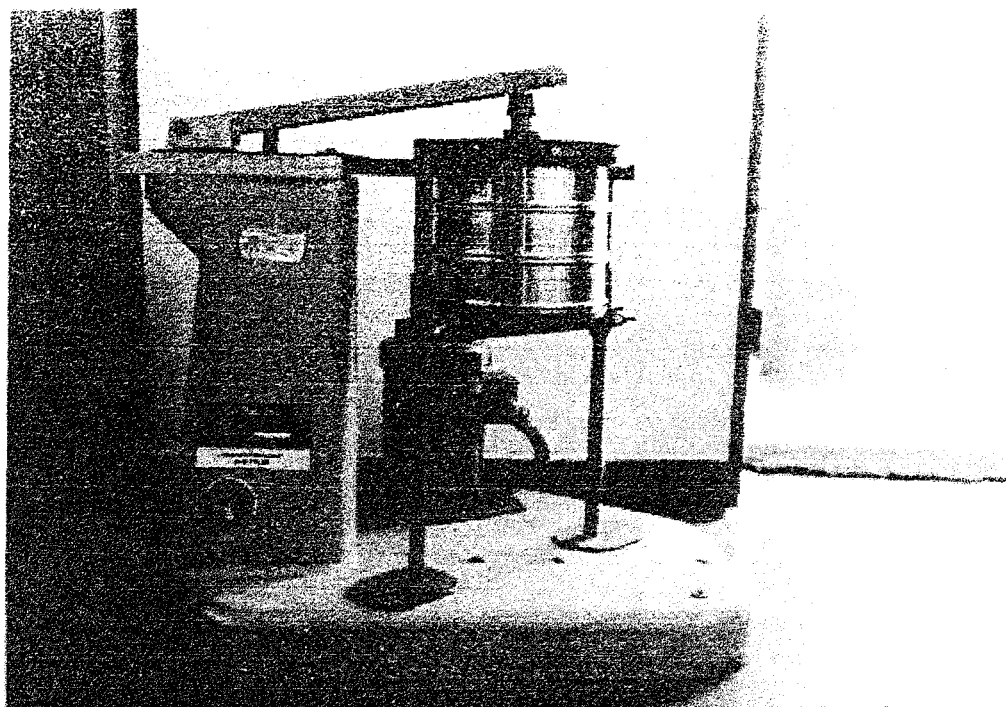


Figura N° 14: Ro-tap

Figura N° 15: Forma común de partículas de polvos según ISO 3252
 (a) acicular. (b) angulae. (c) dendrítica. (d) fibroso. (e) flaky. (f) granular.
 (g) irregular. (h) nodular. (i) esferoidal.

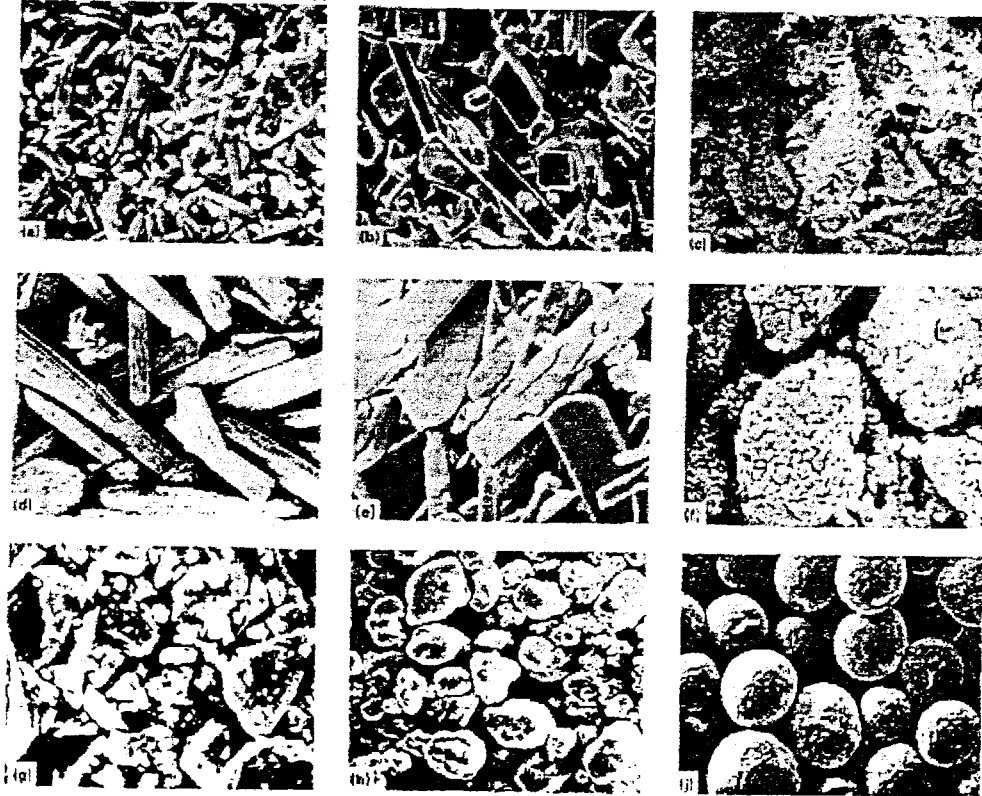





Figura N° 16: Varias formas de partículas según su técnica de fabricación


Unidimensional

Acicular:
 Descomposición
 Química 


Irregular rod-like:
 Descomp. Qca.,
 cominución
 mecánica 


Bidimensional


Dendrítica:
 Electrolítica 


Flake:
 Cominución
 mecánica 

Tridimensional

Esférica:
 Atomización, carbonil
 precip. de un líquido. 

Nodular:
 Atomización,
 descomposición qca. 

Irregular:
 Atomización,
 descomposición qca 

Porosa:
 Reducción de
 óxidos 

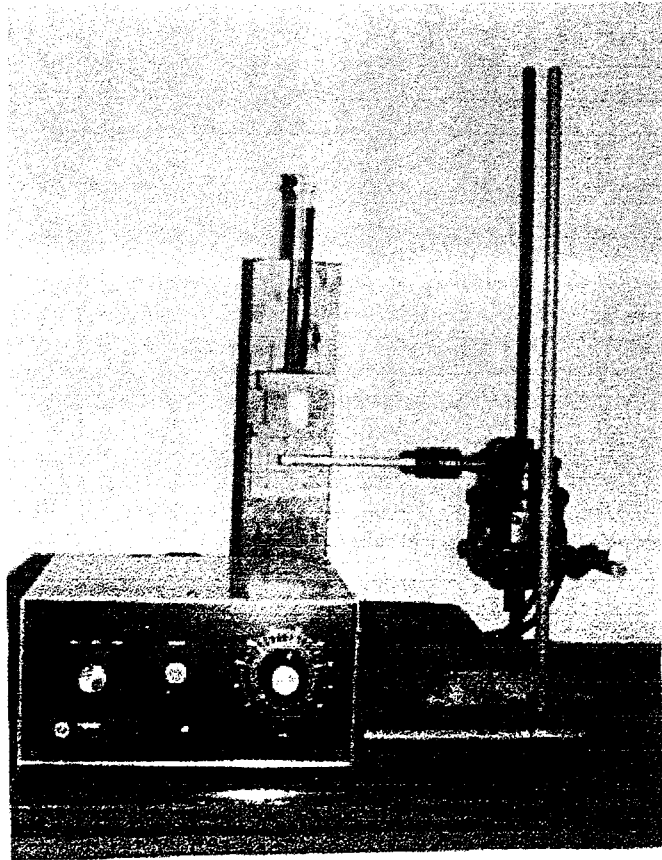


Figura N° 17: Medidor de Densidad Tap

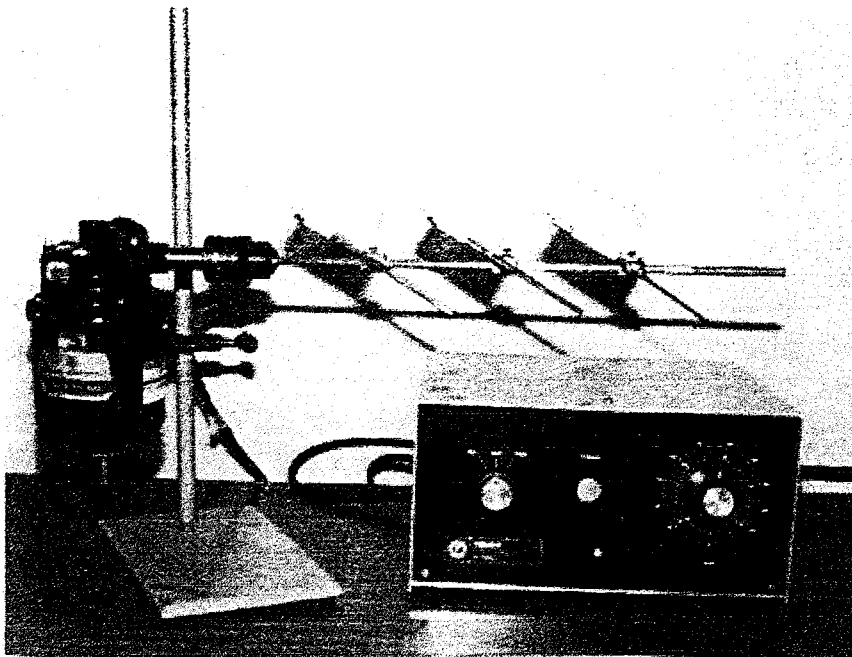


Figura N° 18: Mezclador

2.- Mezclado

El mezclado se realizó en un dispositivo de rotación (figura N° 18) en el cual se colocaron los portamuestras conteniendo las mezclas de polvos en la siguiente proporción: 62.3%_p de polvo de carburo de silicio y 37.7%_p de polvo de aluminio (80% malla 325).

Los parámetros de mezclado a evaluar son:

- Velocidad de mezclado (A) en revoluciones por minuto (rpm).
- Tiempo de mezclado (B) en horas (hrs.).

3.- Compactado

El procedimiento empleado fue el de "compactado por acción simple". Se utilizó una prensa hidráulica de 0 a 25 Ton de carga (ver figura N° 19).

La matriz empleada fue de acero, con las dimensiones especificadas en la figura N° 20.

Los parámetros de compactación son:

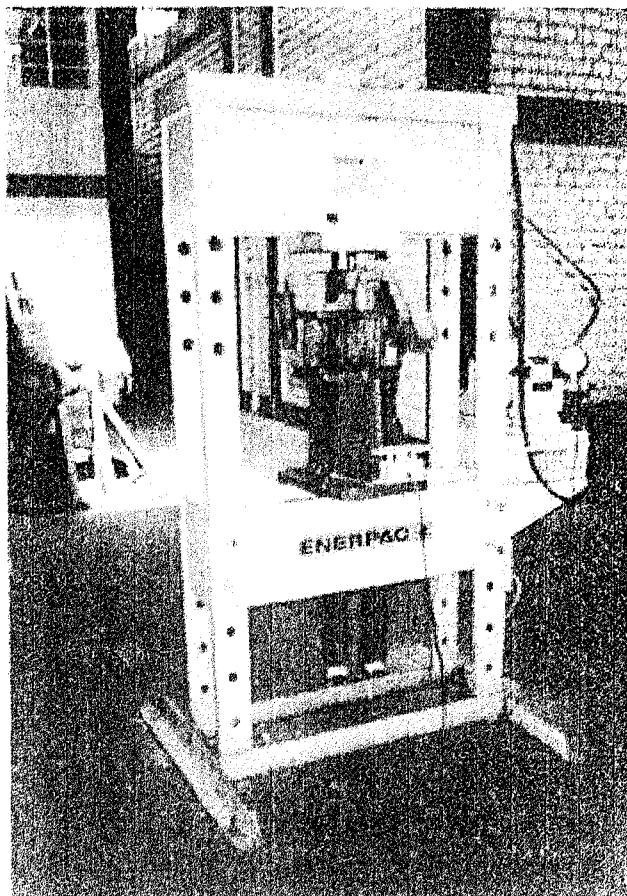
- Carga aplicada (C) en toneladas.
- Tiempo de aplicación de la carga (D) en minutos.

La forma de aplicación de la carga se realizó en "forma lenta", es decir, se aplica el 50% de la carga total a velocidad constante y luego se aumenta la velocidad progresivamente hasta alcanzar el valor predeterminado para cada caso.

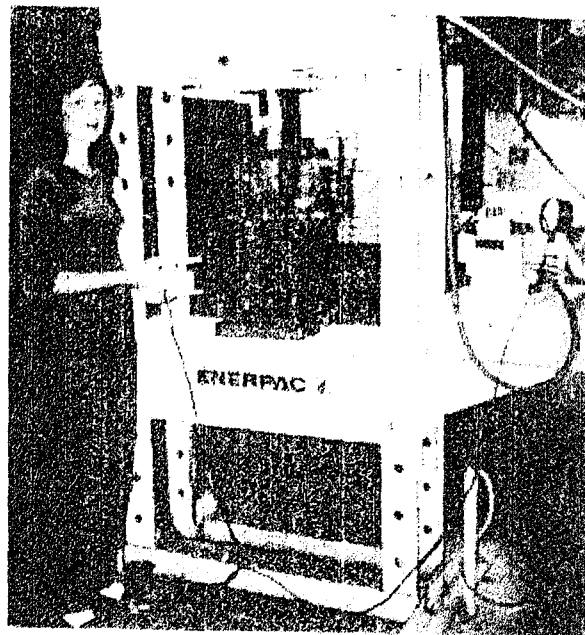
Terminado el compactado y obtenida la pastilla (núcleo en verde), se efectuó el control dimensional para determinar la densidad según la norma ASTM B331-85.

4.- Sinterizado

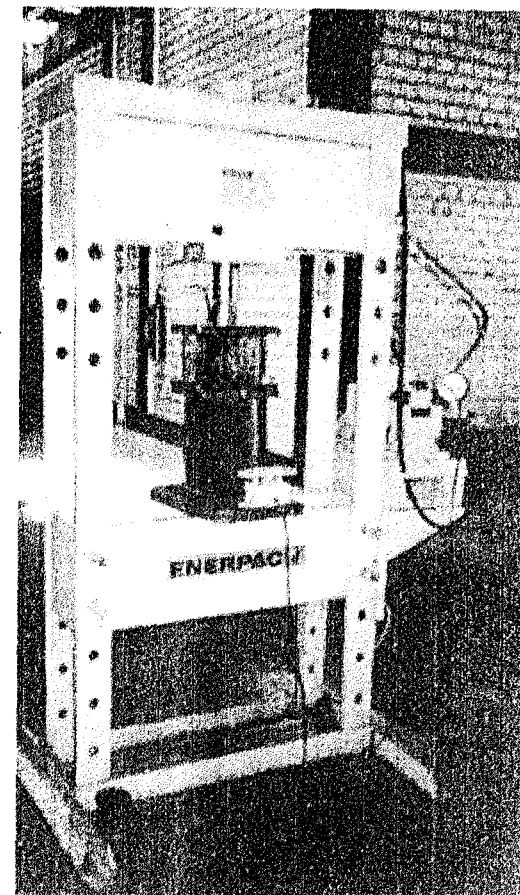
Para el sinterizado de las pastillas en verde se utilizó un horno eléctrico con 22x30x30 cm³. (ver figura N° 21). Se controlaron los siguientes parámetros:



(a)



(b)



(c)

Figura N° 19: Prensado de los Polvos: (a) Llenado de la matriz con la mezcla de polvos. (b) Compactado del polvo. (c) tiempo de compactación.

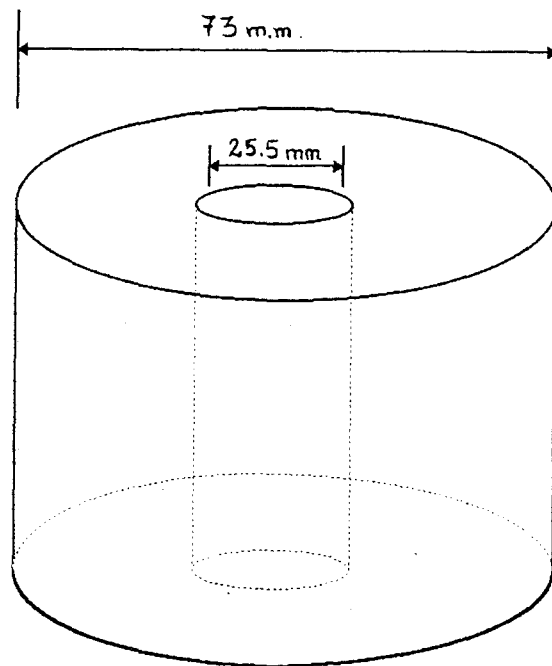
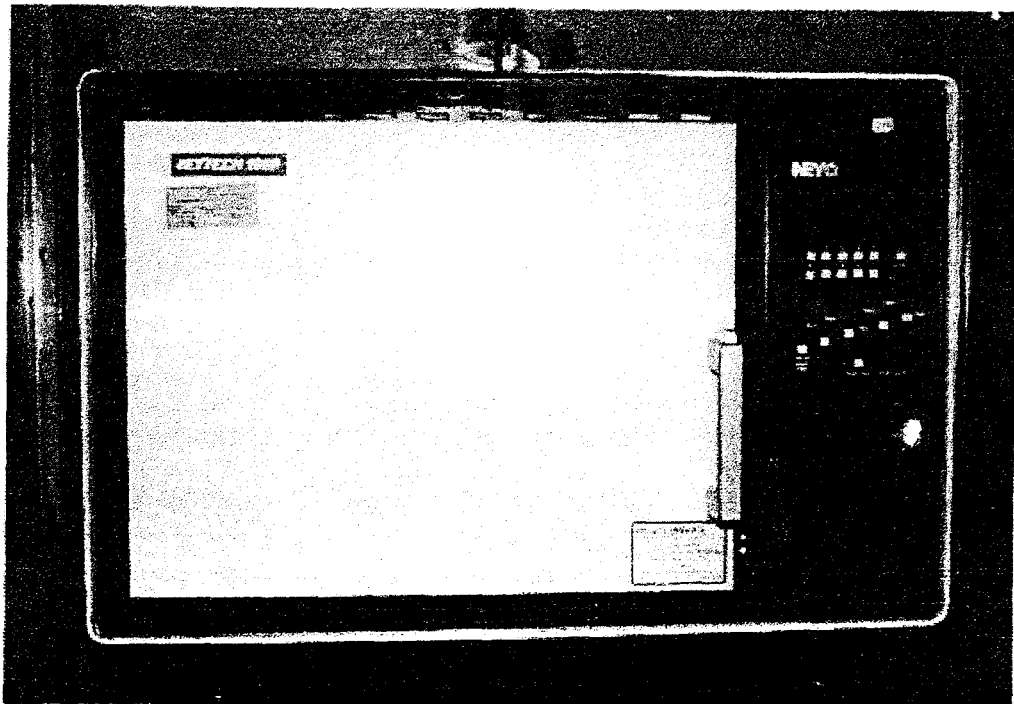
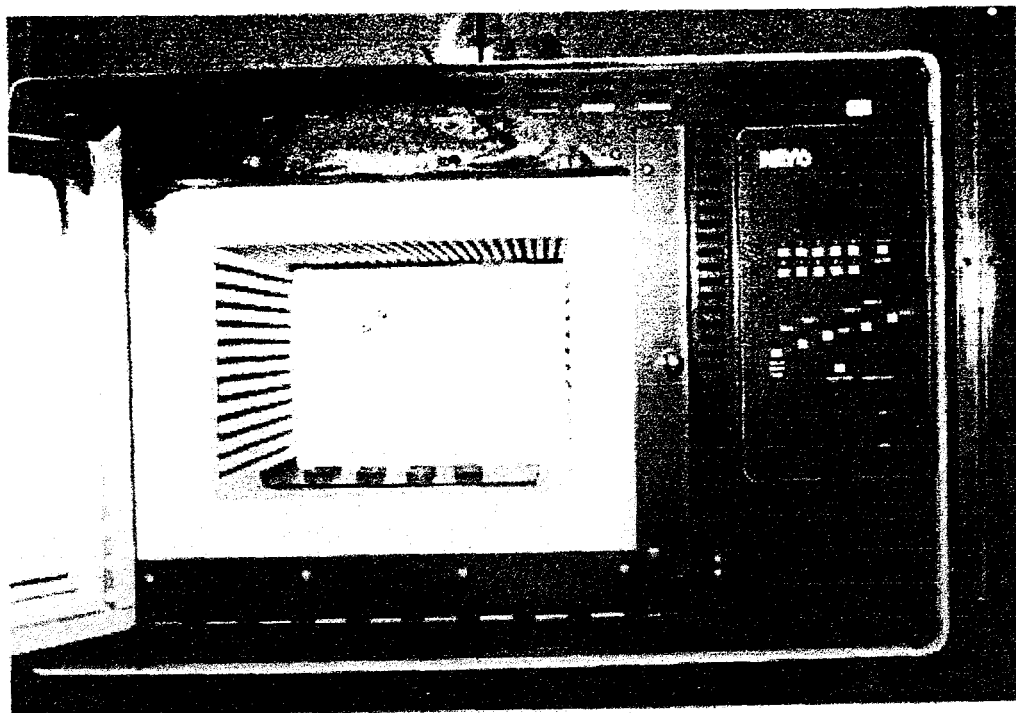


Figura N^o20
Dimensiones de la Matriz



(a)



(b)

Figura N° 21: Horno Eléctrico de Sinterizado
(a) parte externa. (b) parte interna.

- *Temperatura de sinterizado (E) en °C.*

- *Tiempo de sinterizado (F) en horas.*

El proceso se realizó en atmósfera normal.

Retiradas las pastillas del horno, se procedió a medir sus dimensiones (utilizando los equipos mostrados en la figura N°22):

- *Altura en mm.*

- *Diámetro en mm.*

- *Masa en gramos.*

Con estos valores se determina la densidad y porosidad del sinterizado de acuerdo a la regla de las mezclas.

5.- Análisis Metalográfico y Evaluación de Propiedades

5.1.- Análisis Metalográfico

Para efectuar el microanálisis de la muestra a investigar se preparó una microsección metalográfica, es decir una pequeña probeta uno de cuyos planos se rectificó minuciosamente y pulió.

El procedimiento seguido para preparar las probetas fue el siguiente:

1° Desbaste: La superficie a pulir, se desbastó pasándola sucesivamente por papeles con abrasivos de granos cada vez más finos desde 240 al 600 (ver figura N° 23).

Los papeles abrasivos se apoyan sobre una superficie plana (vidrio grueso, por ejemplo) y la probeta que se apoya sobre ellos por la cara a desbastar, se frota moviéndola en una dirección hasta que se observen en su superficie solo marcas de



Figura N° 22: Balanza y Vernier utilizados

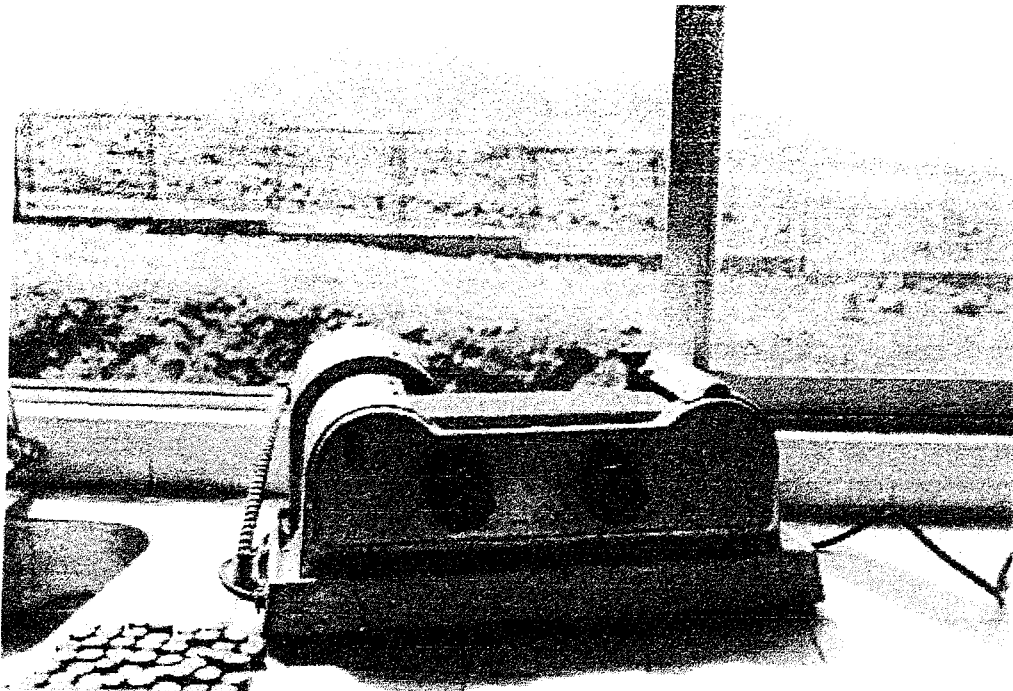


Figura N° 23: Equipo de Desbaste tipo faja.

desbaste correspondientes al papel de que se trate. La dirección de desbaste se gira 90 grados al pasar de un papel al siguiente.

2° Pulido: La superficie de la probeta desbastada, hasta el grado (600) es limpiada con alcohol, luego se pasa por unos paños de terciopelo impregnados de desbaste correspondientes al papel de que se trate. La dirección de desbaste se gira 90 grados al pasar de un papel al siguiente.

2° Pulido: La superficie de la probeta desbastada, hasta el grado (600) es limpiada con alcohol, luego se pasa por unos paños de terciopelo impregnados de abrasivo (alúmina y pasta de diamante). Los paños de pulido van sujetos a unos discos giratorios (ver figura N° 24). Al girar el disco, la probeta se apoya suavemente sobre el, debe también moverse describiendo círculos pero en sentido contrario. El propósito es que el pulido de la probeta se haga en todas las direcciones para evitar arrastres entre fases de distinta dureza ó de inclusiones. Luego la probeta es lavada con abundante agua y secada en la corriente de aire de un secador.

Una vez pulidos los compactos, se tomó fotomicrografías de las pastillas del lote A, B y C con el microscopio óptico mostrado en la figura N° 25 a partir de estas fotomicrografías se determinó el número de partículas por área según la norma ASTM E112-88. Para las pastillas del lote D ya pulidas se determinó la dispersión de partículas (% volumen) dividiendo la pastilla en cuatro parte y realizando el conteo directamente desde el microscopio (ver figura N° 26) según la norma ASTM E562-83.

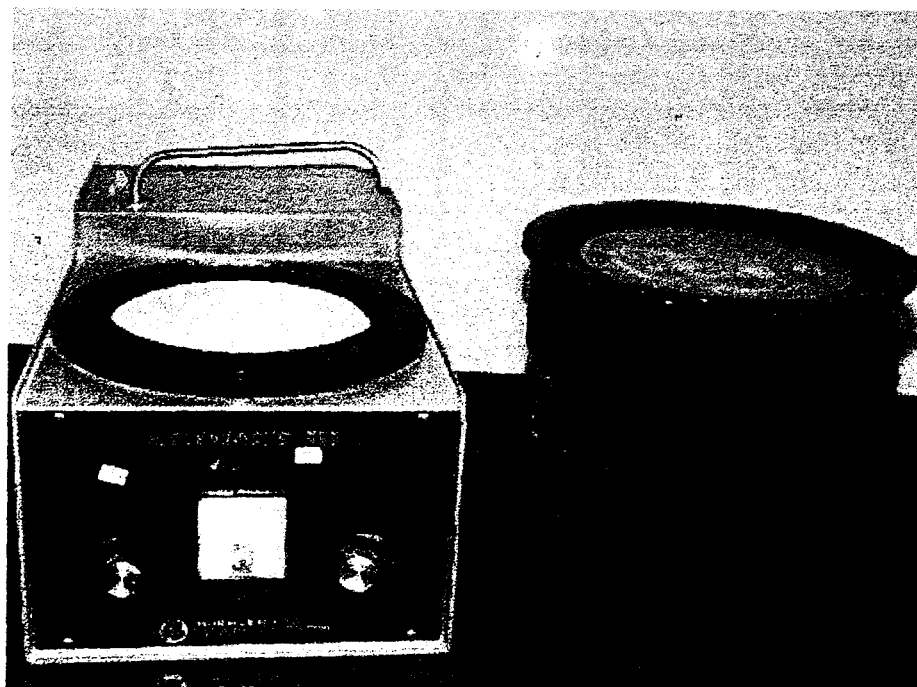


Figura N° 24: Equipo de pulido, tipo disco

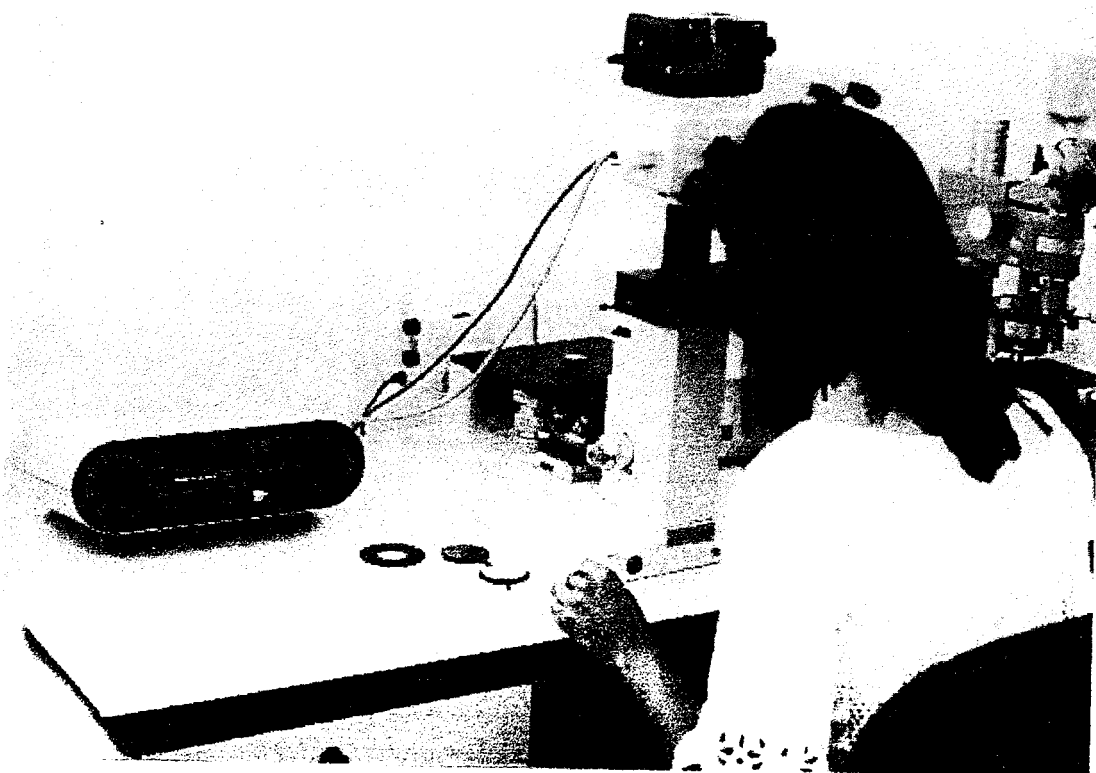


Figura N° 25: Microscopio Metalográfico (Laboratorio de Materiales de la PUCP).

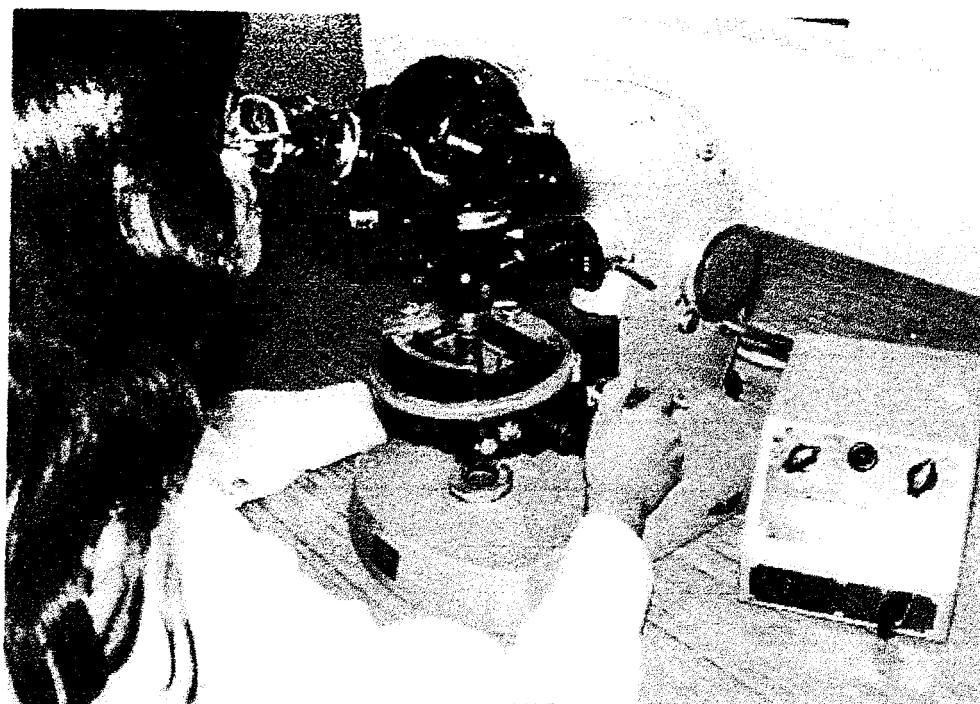


Figura N° 26: Microscopio Optico (Laboratorio de Aplicaciones del IPEN).

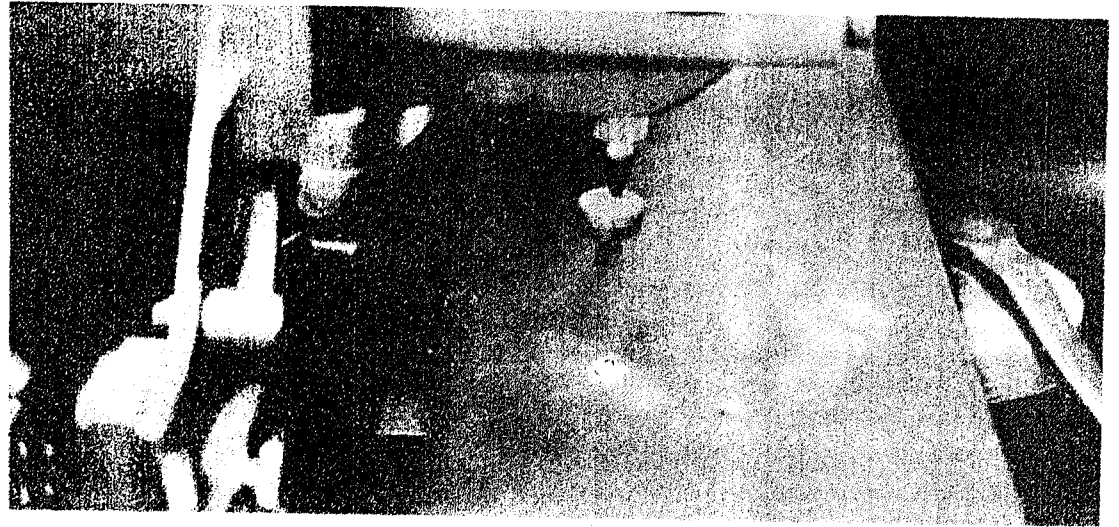
5.2.- Evaluación de Propiedades:

Se mide la siguiente propiedad:

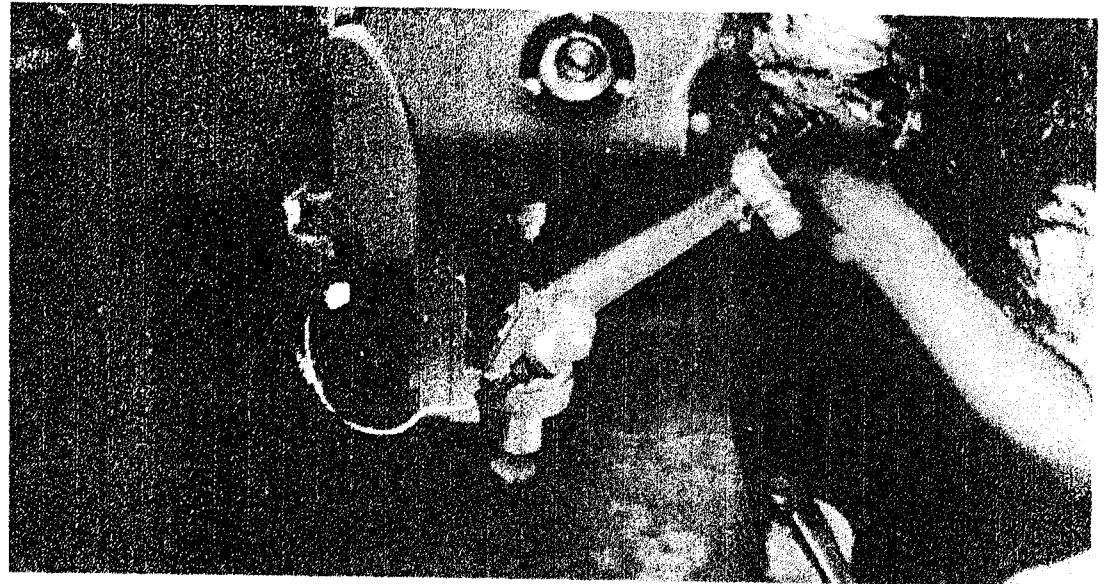
- Dureza Vickers: Consiste en presionar una pirámide de diamante contra la probeta, bajo cargas muy livianas. Se mide la diagonal de la impresión cuadrada y se localiza en una gráfica el número de dureza Vickers (VHN). El ensayo se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en ASTM E92-83, (ver figura N° 27).



(a)



(b)



(c)

Figura N° 27: Medición de la Dureza de los compactos: (a) Equipo de medición de Dureza Vickers. (b) Formación de la huella en la muestra. (c) Toma de la medida de la huella

C A P I T U L O I I I**TABULACION DE DATOS Y RESULTADOS****1.- Tabulación de Datos:****1.1.- Caracterización de los Polvos:****Tabla N° 24: Masas de polvos para determinar la densidad aparente**

<i>Material en Polvo</i>	<i>Masa #1 W₁ (gr.)</i>	<i>Masa #2 W₂(gr.)</i>	<i>Masa#3 W₃(gr.)</i>	<i>Masa #4 W₄ (gr.)</i>	<i>Masa#5 W₅(gr.)</i>
<i>Al</i>	28.30	29.7	29.0	29.2	28.5
<i>SiC</i>	34.30	35.0	35.2	35.8	35.1

Tabla N° 25: Masas del tamizado de polvo de Aluminio

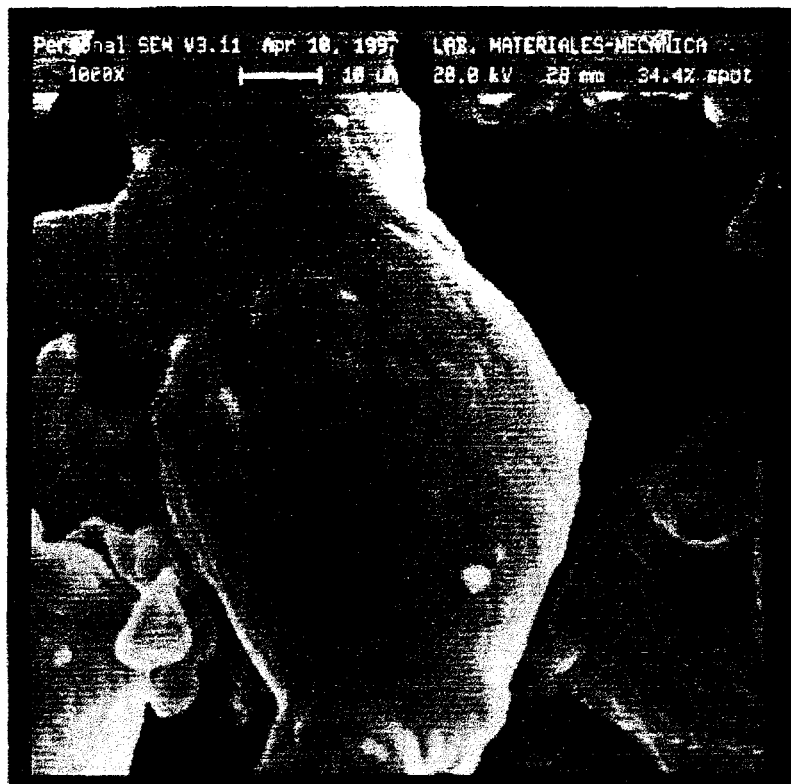
<i># Tamiz</i>	<i>Masa(gr.)</i>
+270	28.8
-270+325	4.2
-325+400	5.4
-400	11.6

Tabla N° 26: Masas del tamizado de polvo de SiC

<i># Tamiz</i>	<i>Masa (gr.)</i>
+170	1.10
-170+200	5.39
-200+270	20.11
-270+325	8.44
-325+400	10.56
-400	4.40



(a)

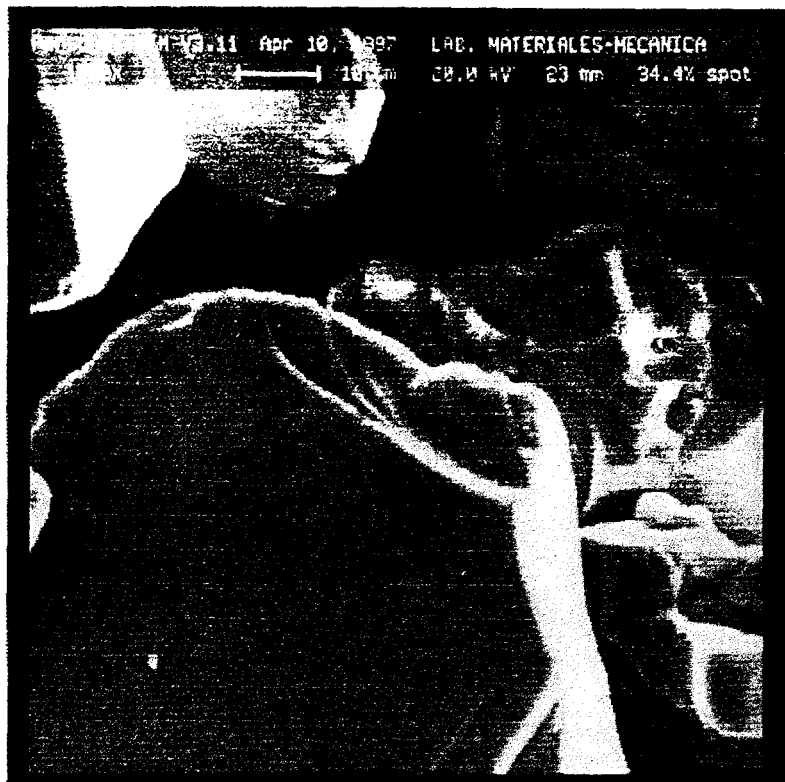


(b)

Figura N° 28: Fotografia SEM de Polvo de Aluminio: (a) 200X (b) 1000X



(a)



(b)

Figura N° 29: Fotografía DEM de Polvo de SiC: (a) 200X (b) 1000X

Tabla N° 27: Composición Química de los Polvos

<i>Elemento</i>	<i>Unidad</i>	<i>SiC</i>	<i>Al</i>
<i>Al</i>	<i>%</i>	<i>0,74</i>	<i>94,5</i>
<i>K</i>	<i>%</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>
<i>Ca</i>	<i>%</i>	<i>0,1</i>	<i>nd</i>
<i>Mg</i>	<i>%</i>	<i>0,1</i>	<i>nd</i>
<i>Mn</i>	<i>%</i>	<i>0,03</i>	<i>0.001</i>
<i>Na</i>	<i>%</i>	<i>0,006</i>	<i>0,012</i>
<i>Ti</i>	<i>%</i>	<i>0,054</i>	<i>nd</i>
<i>V</i>	<i>%</i>	<i>0,058</i>	<i>0,011</i>
<i>Ga</i>	<i>ppm</i>	<i>nd</i>	<i>156</i>
<i>Zn</i>	<i>%</i>	<i>nd</i>	<i><0,02</i>
<i>W</i>	<i>ppm</i>	<i>0,6</i>	<i>nd</i>
<i>Fe</i>	<i>%</i>	<i>0,56</i>	<i>nd</i>
<i>Cr</i>	<i>ppm</i>	<i>57</i>	<i>nd</i>
<i>Ce</i>	<i>ppm</i>	<i>10</i>	<i>nd</i>
<i>La</i>	<i>ppm</i>	<i>5,7</i>	<i>1,4</i>
<i>Sc</i>	<i>ppm</i>	<i>0,4</i>	<i>nd</i>
<i>Sm</i>	<i>ppm</i>	<i>1,2</i>	<i>nd</i>
<i>Yb</i>	<i>ppm</i>	<i><0,5</i>	<i>nd</i>
<i>U</i>	<i>ppm</i>	<i>0,7</i>	<i>4,3</i>
<i>Th</i>	<i>ppm</i>	<i>0,6</i>	<i>nd</i>

Tabla N° 28: Masas y volúmenes para determinar la densidad tap

<i>Polvo</i>	<i>W₁ (gr.)</i>	<i>W₂ (gr.)</i>	<i>W₃ (gr.)</i>	<i>V₁ (ml)</i>	<i>V₂ (ml)</i>	<i>V₃ (ml)</i>
<i>Al</i>	<i>25.0</i>	<i>25.0</i>	<i>25.0</i>	<i>16.1</i>	<i>16.1</i>	<i>16.1</i>
<i>SiC</i>	<i>25.0</i>	<i>25.0</i>	<i>25.0</i>	<i>14.3</i>	<i>14.3</i>	<i>14.3</i>

1.2.- Primera Etapa de la Investigación:**Tabla N° 29: Masa y composición de pastillas para el lote A, B y C**

<i>LOTE</i>	<i>% SiC</i>	<i>% Al</i>	<i>Peso Total</i>	<i>N° pastillas</i>
<i>A</i>	<i>30.00</i>	<i>70.00</i>	<i>20.0 gr.</i>	<i>15</i>
<i>B</i>	<i>52.73</i>	<i>47.26</i>	<i>8.4 gr.</i>	<i>5</i>
<i>C</i>	<i>62.30</i>	<i>37.70</i>	<i>8.4 gr.</i>	<i>3</i>

Tabla N° 30: Número de partículas por área para el lote A

N° de muestra	Area (1)	Area (2)	Area (3)	Area (4)	Area (5)	Area (6)
1A	55	52	61	54	55	56
2A	96	94	92	76	88	85
3A	118	105	113	125	155	139
4A	163	132	113	130	126	138
5A	84	56	97	134	150	145
6A	107	94	110	128	115	97
7A	60	78	66	58	74	70
8A	58	60	52	94	120	104
9A	59	69	82	82	60	70
10A	104	129	128	128	104	129
11A	44	45	51	55	54	83
12A	59	74	62	60	70	56
13A	121	129	128	136	168	172
14A	80	64	87	62	63	59
15A	87	78	101	63	83	91

Tabla N° 31: Número de partículas por área para el lote B y C

N° de muestra	Area (1)	Area (2)	Area (3)	Area (4)	Area (5)	Area (6)
1B	131	153	112	153	112	131
2B	130	104	144	144	130	104
3B	77	112	102	62	49	48
4B	69	34	72	62	55	44
5B	69	96	56	65	67	78
1C	90	95	71	63	63	82
2C	56	50	56	50	56	56
3C	41	41	44	48	37	60

1.3.- Segunda Etapa de la Investigación:**Tabla N° 32: Composición y masa total de cada****pastilla fabricada en el lote D**

Lote	% SiC	% Al	MasaTotal	N°Pastillas
D	62.30	37.70	10 gr.	16

**Tabla N° 33: Datos obtenidos para calcular la densidad en verde
al trabajar con el diseño 2^a de la tabla 27**

N° Muestra	Peso (gr.)	Altura (mm.)	Diámetro(mm.)
1D	9,83	7,85	25,7
2D	9,84	7,80	25,7
3D	9,83	7,85	25,7
4D	9,81	7,85	25,7
5D	9,44	7,70	25,7
6D	9,79	7,65	25,7
7D	9,82	7,55	25,7
8D	9,83	7,55	25,7
9D	9,79	7,70	25,7
10D	9,82	7,70	25,7
11D	9,81	7,80	25,7
12D	9,84	7,80	25,7
13D	9,86	7,65	25,7
14D	9,84	7,50	25,7
15D	9,82	7,55	25,7
16D	9,70	7,50	25,7

Tabla N° 34: Datos obtenidos para calcular el % volumen para el lote D

N° Muestra	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1D-A	1.0	1.5	2.0	3.0	3.0	2.5	1.0
1D-B	2.0	1.0	3.0	2.0	3.5	2.0	3.0
1D-C	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0
1D-D	2.5	2.5	1.5	2.0	2.0	2.5	1.0
2D-A	2.5	1.5	2.0	2.5	3.5	3.5	3.5
2D-B	1.5	2.5	3.0	1.5	2.0	1.5	3.0
2D-C	1.0	1.5	3.0	3.0	2.5	2.0	1.0
2D-D	1.5	1.5	3.5	3.5	3.0	1.0	1.0
3D-A	1.0	1.5	2.5	1.5	1.5	1.0	1.5
3D-B	1.0	1.5	2.0	3.0	1.0	1.0	0.0
3D-C	2.0	3.0	1.5	3.0	1.0	2.5	1.0
3D-D	1.0	2.0	3.0	2.5	2.0	3.0	4.0
4D-A	2.5	3.5	3.0	3.0	2.5	2.0	2.0
4D-B	1.5	3.0	3.0	2.5	1.0	2.0	1.5
4D-C	1.5	3.0	2.5	1.0	2.0	1.5	1.5
4D-D	1.5	1.5	6.0	2.0	4.0	1.5	2.0
5D-A	4.0	3.0	3.5	3.0	4.5	1.5	1.5
5D-B	3.0	4.0	3.5	2.0	2.5	3.5	3.5
5D-C	2.5	1.0	3.5	1.5	2.5	1.5	1.0
5D-D	2.0	1.0	3.5	3.0	4.0	1.0	2.0
6D-A	2.0	4.0	2.0	1.0	3.0	1.0	1.5

Nº Muestra	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
6D-B	3.5	1.0	1.0	2.5	0.5	2.0	2.0
6D-C	2.0	2.0	1.5	1.5	2.0	2.0	2.5
6D-D	2.0	2.0	1.0	2.0	1.0	1.5	1.0
7D-A	1.0	1.0	2.0	3.0	5.0	2.0	2.0
7D-B	1.0	1.0	2.5	6.0	3.0	5.5	4.0
7D-C	1.5	1.0	2.5	3.0	1.0	2.0	1.0
7D-D	1.5	4.5	3.0	1.5	4.0	3.0	5.5
8D-A	2.0	2.0	2.0	3.0	2.0	1.5	3.0
8D-B	1.5	1.0	2.5	1.5	1.5	3.5	1.0
8D-C	1.5	2.0	1.0	2.0	1.5	1.0	1.0
8D-D	3.0	2.5	3.0	3.0	2.0	1.0	1.0
8D-A	3.0	5.0	1.5	3.0	1.0	1.5	0.5
8D-B	3.0	2.5	1.0	3.0	3.0	2.5	1.5
8D-C	2.0	2.5	2.5	3.0	2.5	1.0	1.0
8D-D	1.0	1.0	3.0	1.0	1.5	1.0	1.0
9D-A	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.5	2.5
9D-B	1.5	1.0	2.5	1.5	3.5	3.0	2.0
9D-C	1.5	3.0	2.0	2.0	1.5	2.5	2.0
9D-D	3.0	2.0	1.0	1.5	1.0	2.5	1.5
10D-A	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
10D-B	1.0	1.0	2.0	2.5	2.0	2.0	1.5
10D-C	2.0	4.0	3.0	1.5	1.0	2.0	1.5
10D-D	1.0	1.0	2.0	2.0	2.5	1.0	1.0
11D-A	2.0	1.5	1.0	2.0	1.5	1.5	2.5
11D-B	2.0	2.5	3.5	2.5	3.5	2.0	2.0
11D-C	2.5	1.0	2.5	3.0	1.5	2.0	2.5
11D-D	2.0	1.0	1.5	5.0	2.5	2.0	4.5
12D-A	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	1.0	0.5
12D-B	1.5	1.5	1.0	2.0	2.0	1.5	1.0
12D-C	1.0	1.0	1.0	6.5	2.5	3.0	1.0
12D-D	1.5	2.5	2.0	4.5	4.5	5.0	2.0
13D-A	2.5	2.5	3.0	1.5	1.0	4.0	1.5
13D-B	2.5	1.0	0.5	1.5	1.0	2.0	1.0
14D-C	1.5	2.5	4.0	3.0	1.5	2.5	2.5
14D-D	1.0	1.5	1.5	2.0	1.5	1.0	1.0
15D-A	1.0	2.5	2.0	2.0	1.0	1.5	2.5
15D-B	3.0	3.0	4.5	2.5	3.0	2.5	0.5
15D-C	1.0	1.5	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
15D-D	2.5	1.0	3.0	2.5	2.0	2.5	4.5
16D-A	2.0	2.5	2.0	2.0	3.0	3.0	1.0
16D-B	1.0	1.0	1.5	1.0	2.0	4.5	1.0
16D-C	1.5	1.0	3.0	1.5	2.5	3.0	2.0
16D-D	1.0	2.0	2.5	2.0	1.0	2.5	3.5

1.4.- Tercera Etapa de la Investigación**Tabla N° 35: Composición y masa total de cada pastilla fabricada
en el lote E y F**

LOTE	% SiC	% Al	Peso Total	N°Pastillas
E	62.30	37.70	10	4
F	62.30	37.70	10	4

**Tabla N° 36: Datos obtenidos en el lote E para calcular
la densidad y porosidad**

N° de muestra	Masa _v (gr.)	Diámetro _v (mm.)	Altura _v (mm.)	Masa _s (gr.)	Diámetro _s (mm)	Altura _s (mm)
1E	9.85	25.70	7.70	9.81	25.70	7.80
2E	9.82	25.70	7.70	9.86	26.05	7.80
3E	9.83	25.70	7.70	9.84	25.90	7.80
4E	9.83	25.70	7.60	9.84	26.20	7.90

**Tabla N° 37: Datos obtenidos en el lote F para calcular
la densidad y porosidad**

N° muestra	Masa _v (gr.)	Diámetro _v (mm.)	Altura _v (mm.)	Masa _s (gr.)	Diámetro _s (mm)	Altura _s (mm.)
1F	9.84	25.70	7.50	9.84	25.70	7.50
2F	9.86	25.70	7.65	9.88	25.70	7.65
3F	9.82	25.70	7.55	9.82	25.70	7.55
4F	9.70	25.70	7.50	9.71	25.70	7.50

1.5.- Cuarta Etapa de la Investigación**Tabla N° 38: Datos Obtenidos en el lote G para determinar la densidad y porosidad**

N° de muestra	Masa _v (gr.)	Diámetro _v (mm.)	Altura _v (mm.)	Masa _s (gr.)	Diámetro _s (mm.)	Altura _s (mm.)
1G	9.85	25.75	7.70	9.92	25.75	7.65
2G	9.87	25.70	7.70	9.94	25.70	7.65
3G	9.82	25.70	7.80	9.85	25.70	7.75

Tabla N° 39 : Datos obtenidos en el lote G para determinar el % volumen

N° muestra	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈
1G	2	4	2	2	3	3	3	3
2G	3.5	4	3.5	5.5	3	2	4	3
3G	5	3	4	4	3	5	3	4

Tabla N° 40 : Datos obtenidos en el lote G para determinar la dureza

Sección	D ₁ (μ m)	D ₂ (μ m)	P (Kg)
A	572	528	5
B	608	602	5
C	794	804	10

2.- Procesamiento de Resultados:**2.1.- Caracterización de Polvos:****Tabla N° 41: Densidad Aparente**

Material en Polvo	δ_a (gr/cm ³)
Carburo de Silicio	1.4032
Aluminio	1.1576

Tabla N° 42: Análisis Granulométrico del polvo de Aluminio

# Tamiz	D_p (μm)	X_p	$X_{p(\text{acum.})}$
+270	0,0530	0,5760	1,000
-270+325	0,0490	0,0840	0,424
-325+400	0,0415	0,1080	0,340
-400	0,0380	0,2320	0,232

Tabla N° 43: Análisis Granulométrico del polvo de SiC

# Tamiz	D_p (μm)	X_p	$X_{p(\text{acum.})}$
+170	0,0900	0,0220	1,0000
-170+200	0,0825	0,1078	0,9780
-200+270	0,0640	0,4022	0,8702
-270+325	0,0490	0,1688	0,4680
-325+400	0,0415	0,2112	0,2992
-400	0,0380	0,0880	0,0880

Tabla N° 44: Morfología de los polvos

Material en Polvo	Forma
Carburo de Silicio	irregular
Aluminio	nodular

Tabla N° 45: Area Específica de los polvos

Material en Polvo	Area Específica (cm^2/gr)
Carburo de Silicio	46.80
Aluminio	78.98

Tabla N° 46: Densidad Tap

Material en Polvo	δ_T
Carburo de Silicio	1.7482
Aluminio	1.5528

2.2.- Primera Etapa de la Investigación**Tabla N° 47: Fracción de área para el lote A**

N° muestra	#p/mm ²	S
1A	1388	3.02
2A	2213	7.31
3A	3146	18.36
4A	3342	16.62
5A	2775	37.83
6A	2713	12.41
7A	1692	7.84
8A	2033	28.39
9A	1758	10.09
10A	3008	12.66
11A	1383	14.29
12A	1588	6.98
13A	3558	21.99
14A	1729	11.44
15A	2096	12.84

Tabla N° 48: Fracción de área para el lote B y C

N° muestra	#p/mm ²	S
1B	3300	18.35
2B	3150	18.15
3B	1875	27.11
4B	1400	14.76
5B	1821	13.76
1C	1933	13.75
2C	1350	3.10
3C	1129	8.13

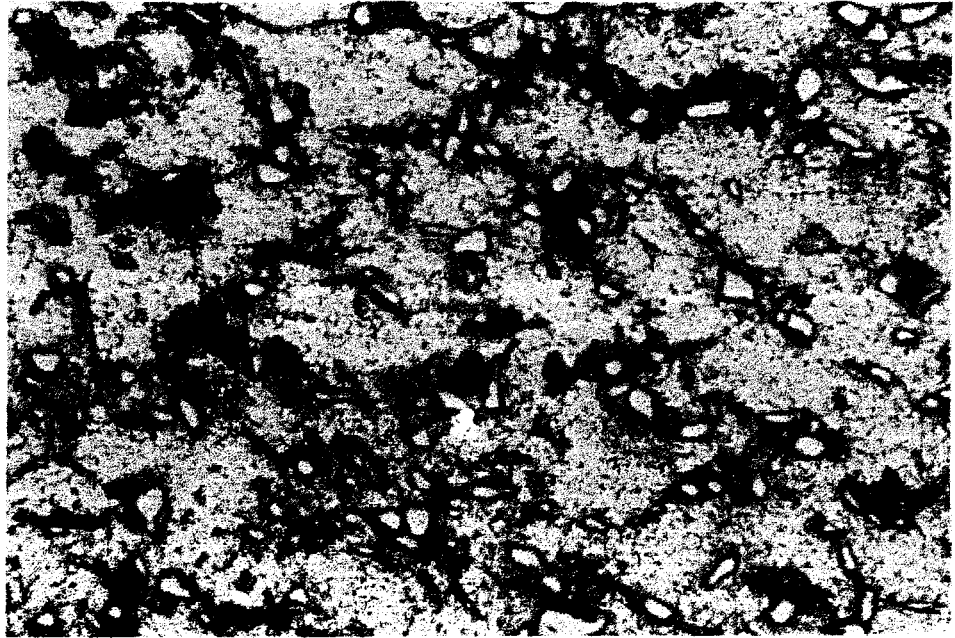


Figura N° 30: Fotografía Microscópica de Muestra 1A

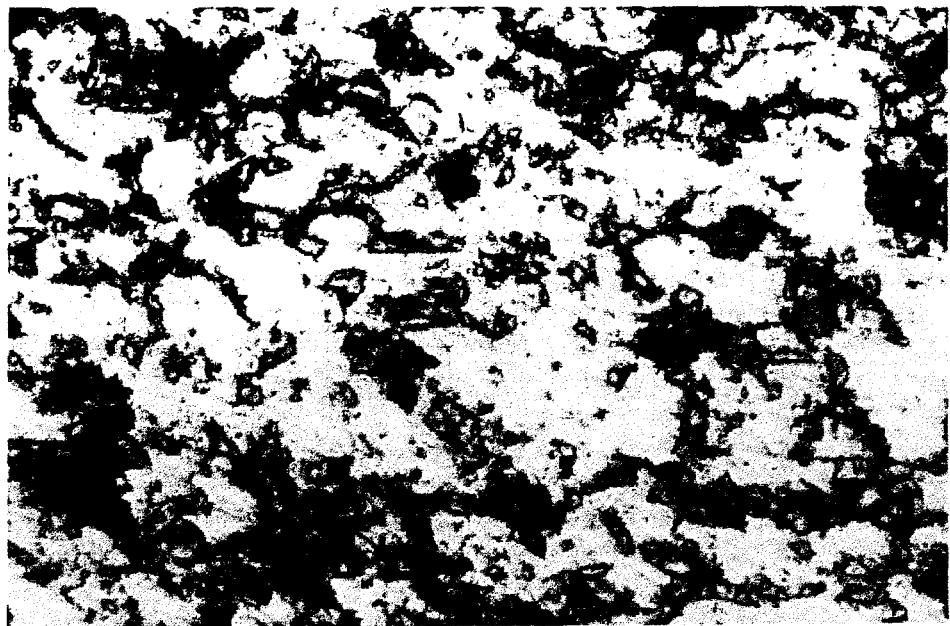


Figura N° 31: Fotografía Microscópica de Muestra 2A

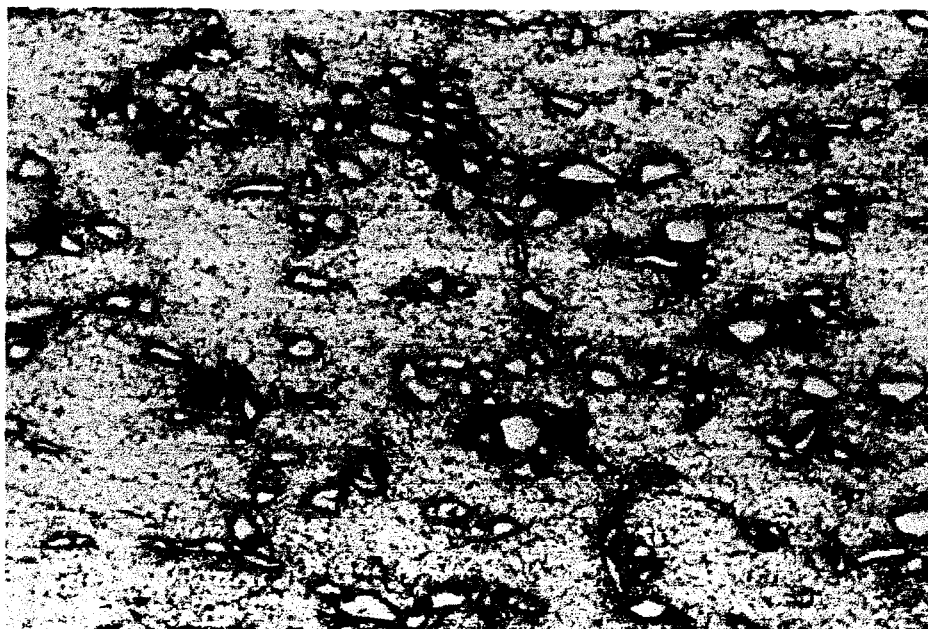


Figura N° 32: Fotografía Microscópica de Muestra 7A

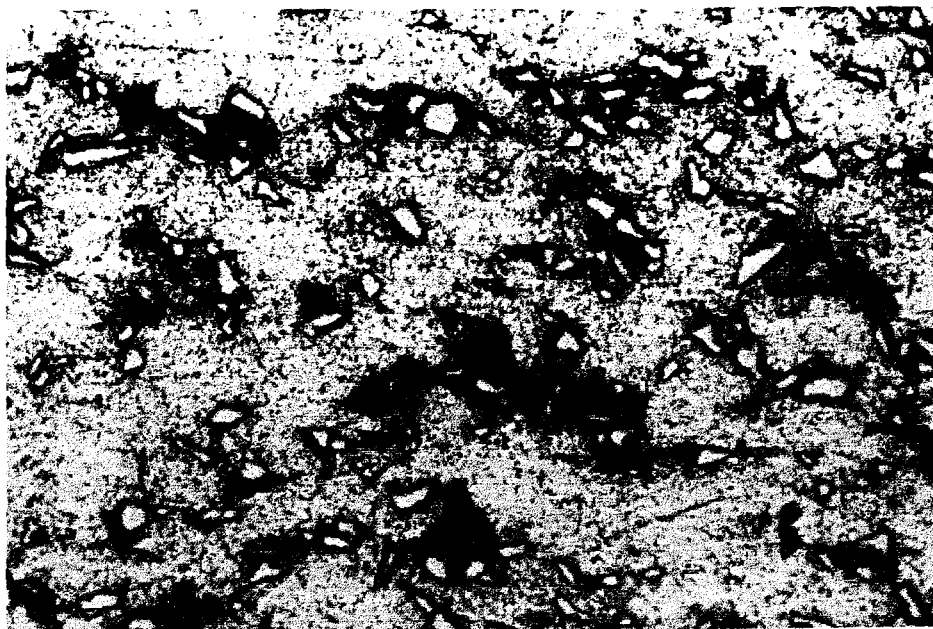


Figura N° 33: Fotografía Microscópica de Muestra 12A



Figura N° 34: Fotografía Microscópica de Muestra 2C

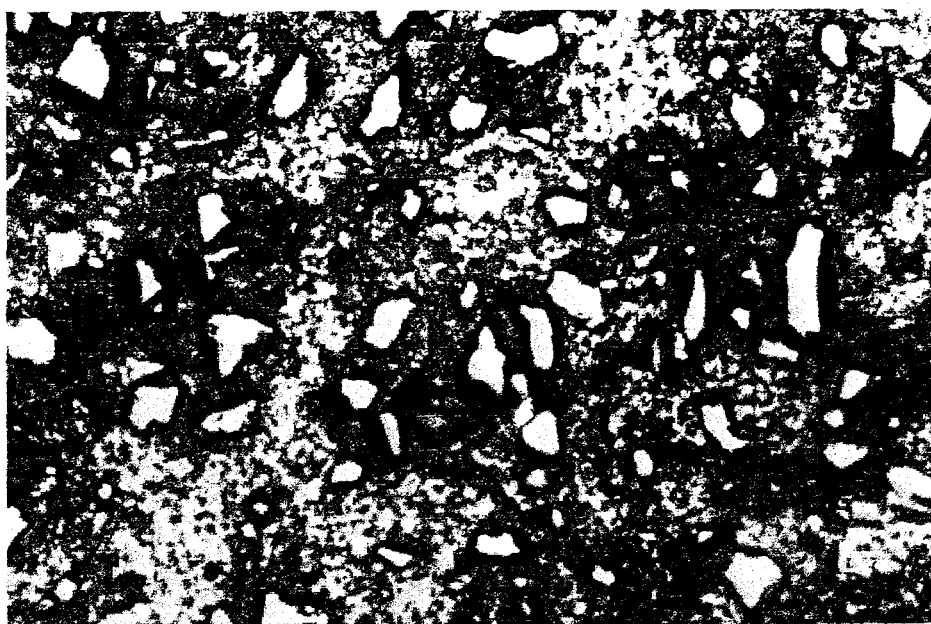


Figura N° 35: Fotografía Microscópica de Muestra 3C

2.3.- Segunda Etapa de la Investigación**Tabla N° 49: Densidad y Porosidad en verde para el lote D**

N° Muestra	δ_v (gr/cm ³)	P_v (%)
1D	2,4135	19.75
2D	2,4314	19.15
3D	2,4135	19.75
4D	2,4086	19.91
5D	2,3629	21.43
6D	2,4665	17.98
7D	2,5068	16.64
8D	2,5094	16.56
9D	2,4505	18.52
10D	2,4580	18.27
11D	2,4240	19.40
12D	2,4314	19.15
13D	2,4841	17.40
14D	2,5287	15.92
15D	2,5068	16.64
16D	2,4927	17.11

Tabla N° 50: %volumen de partículas para el lote D

N° muestra	P_p	CI	S
1D	12.17	9.87	2.401
2D	14.06	11.41	1.980
3D	11.50	9.33	3.247
4D	14.40	11.69	2.509
5D	16.29	13.22	3.543
6D	11.38	9.24	1.525
7D	16.52	13.43	4.863
8D	11.94	9.69	2.373
9D	12.50	10.16	2.776
10D	12.50	10.14	0.964
11D	10.60	8.60	2.009
12D	14.17	11.50	2.688
13D	12.28	9.99	6.017
14D	11.72	9.51	3.777
15D	12.95	10.50	4.389
16D	12.61	10.24	1.333

**Tabla N° 51: Efectos estimados para la δ_v y P_v a partir de
la tabla N° 49**

Factor	Efecto Estimado para δ_v	Efecto Estimado para P_v
Promedio	2.45555	18.3488
A: V_m	0.020575	-0.685
B: t_m	0.0122	-0.4075
C: C_a	0.053375	-1.7775
D: t_p	0.03295	-1.095
AB	-0.022825	0.76
AC	0.0136	-0.450
AD	-9.225E-3	0.3075
BC	0.031175	-1.0375
BD	-0.0288	0.955
CD	8.725E-3	-0.29
ABC	-0.0171	0.57
ABD	8.125E-3	-0.2725
ACD	-9.7E-3	0.3225
BCD	-0.021225	0.705
ABCD	2.45E-3	-0.0825

**Tabla N° 52: Efectos Estimados para el % volumen
a partir de la tabla N° 50**

Factor	Efecto Estimado
Promedio	2.89938
A: V_m	-1.51375
B: t_m	0.05375
C: C_a	1.15375
D: t_p	0.19125
AB	0.11125
AC	-0.93875
AD	-0.09625
BC	-0.53125
BD	-0.83375
CD	0.61625
ABC	-0.43375
ABD	0.30875
ACD	-0.10125
BCD	-0.72875
ABCD	-0.39625

Gráfico N°3
 Diagrama de Probabilidad Normal para densidad
 (datos en la tabla N° 51)

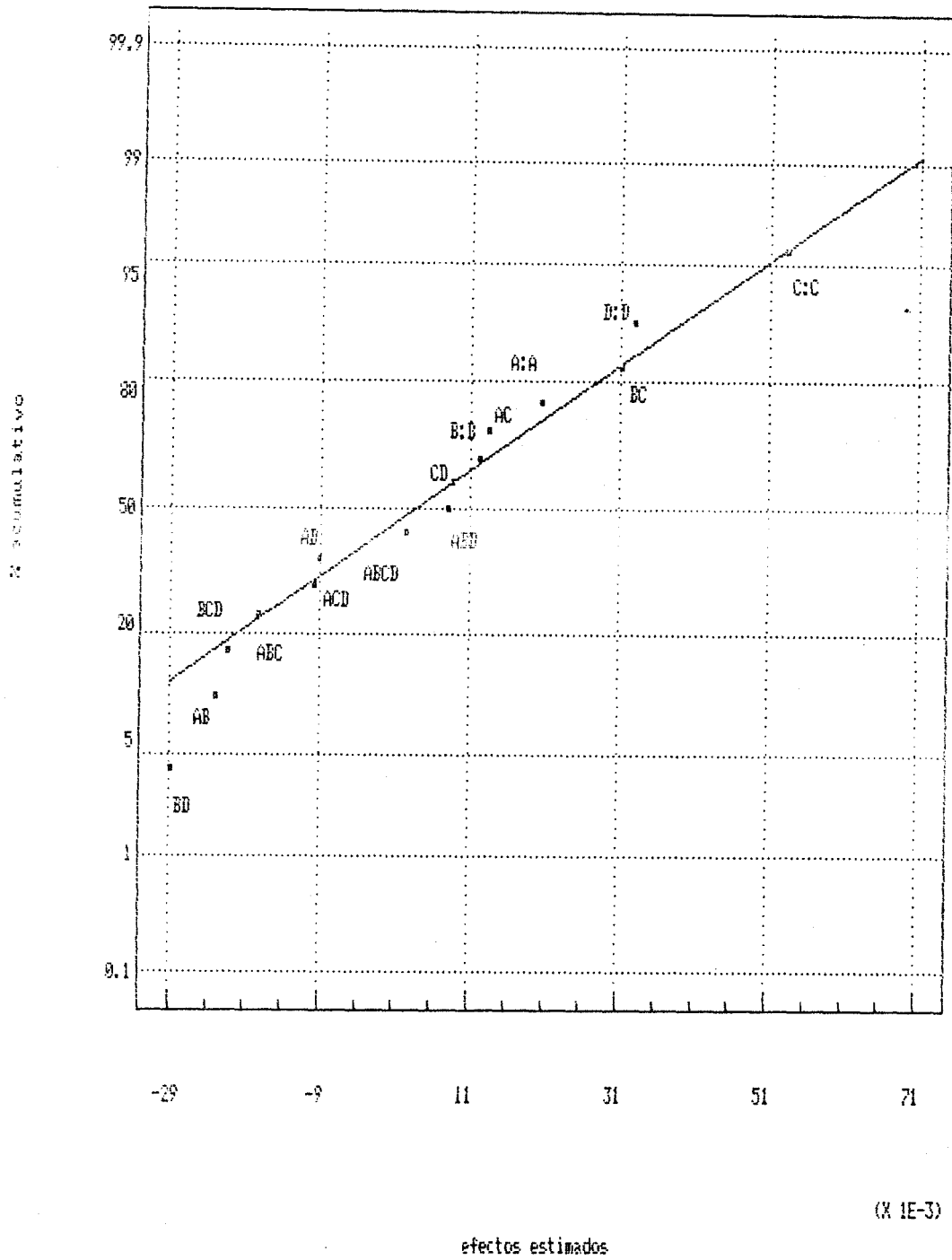


Gráfico N°4
Densidad en verde vs. interacción BD
en el lote D

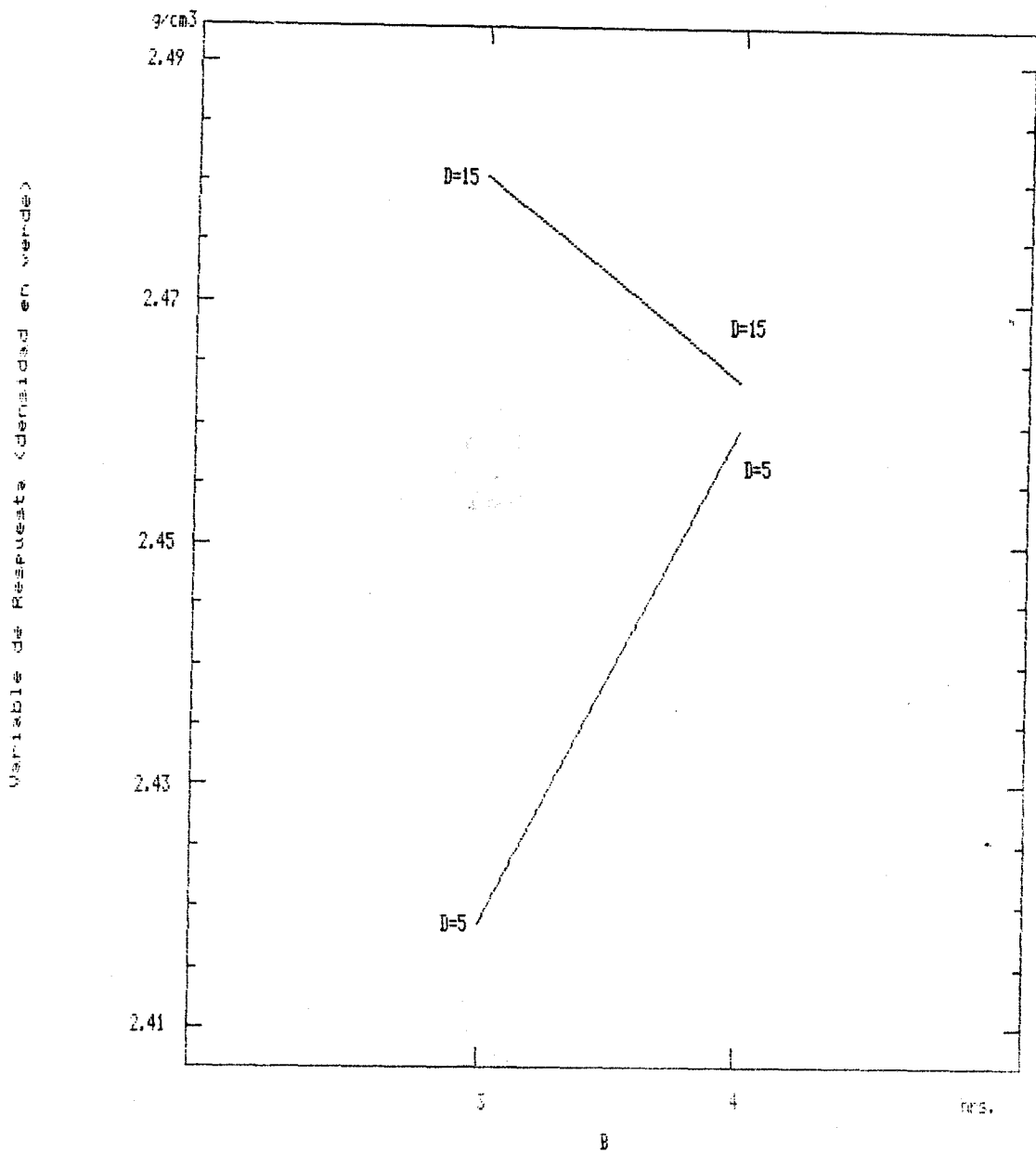


Gráfico N°5
Densidad en verde vs. interacción AB
en el lote D

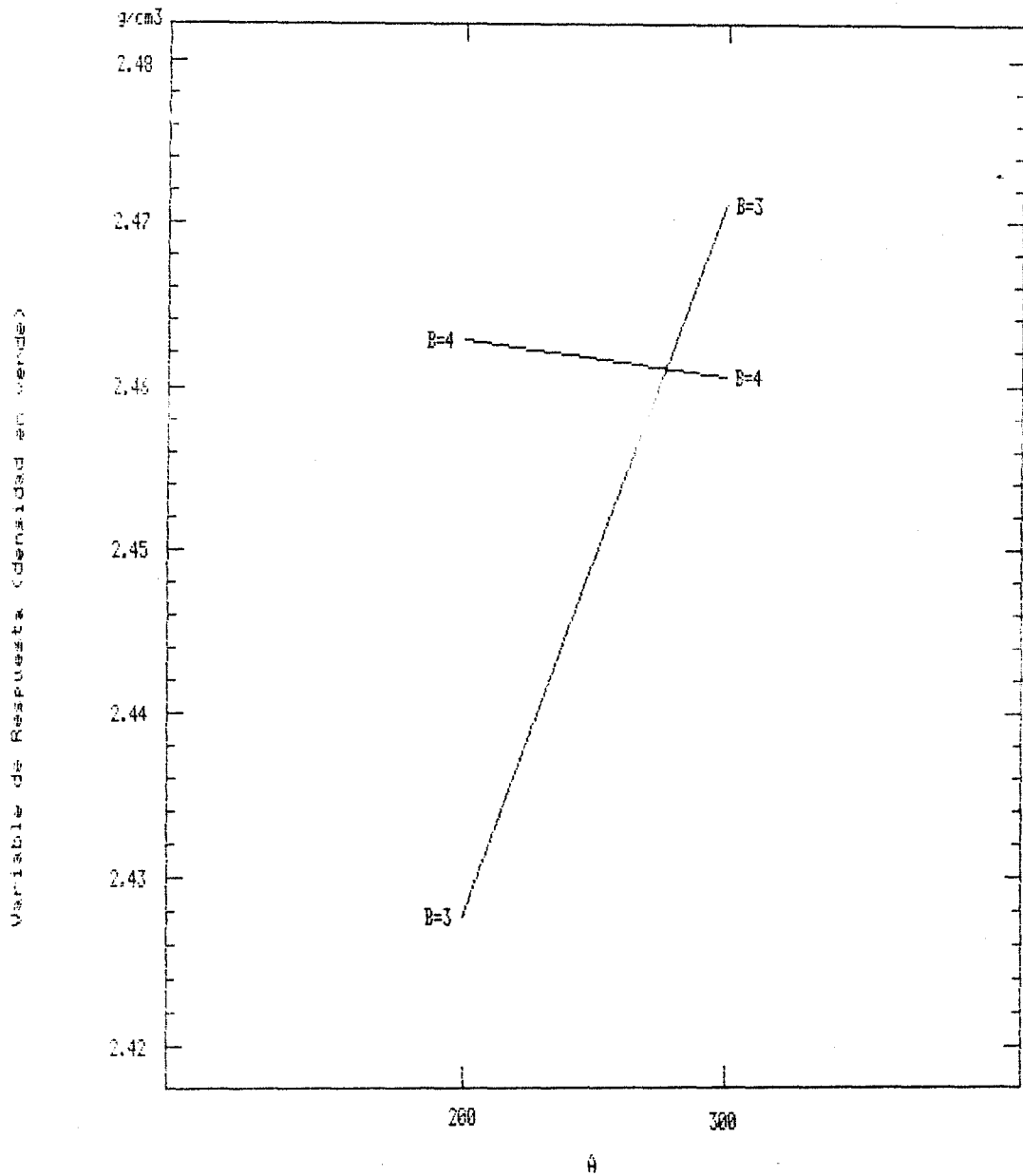


Gráfico N°5
Densidad en verde vs. efecto D
en el lote D

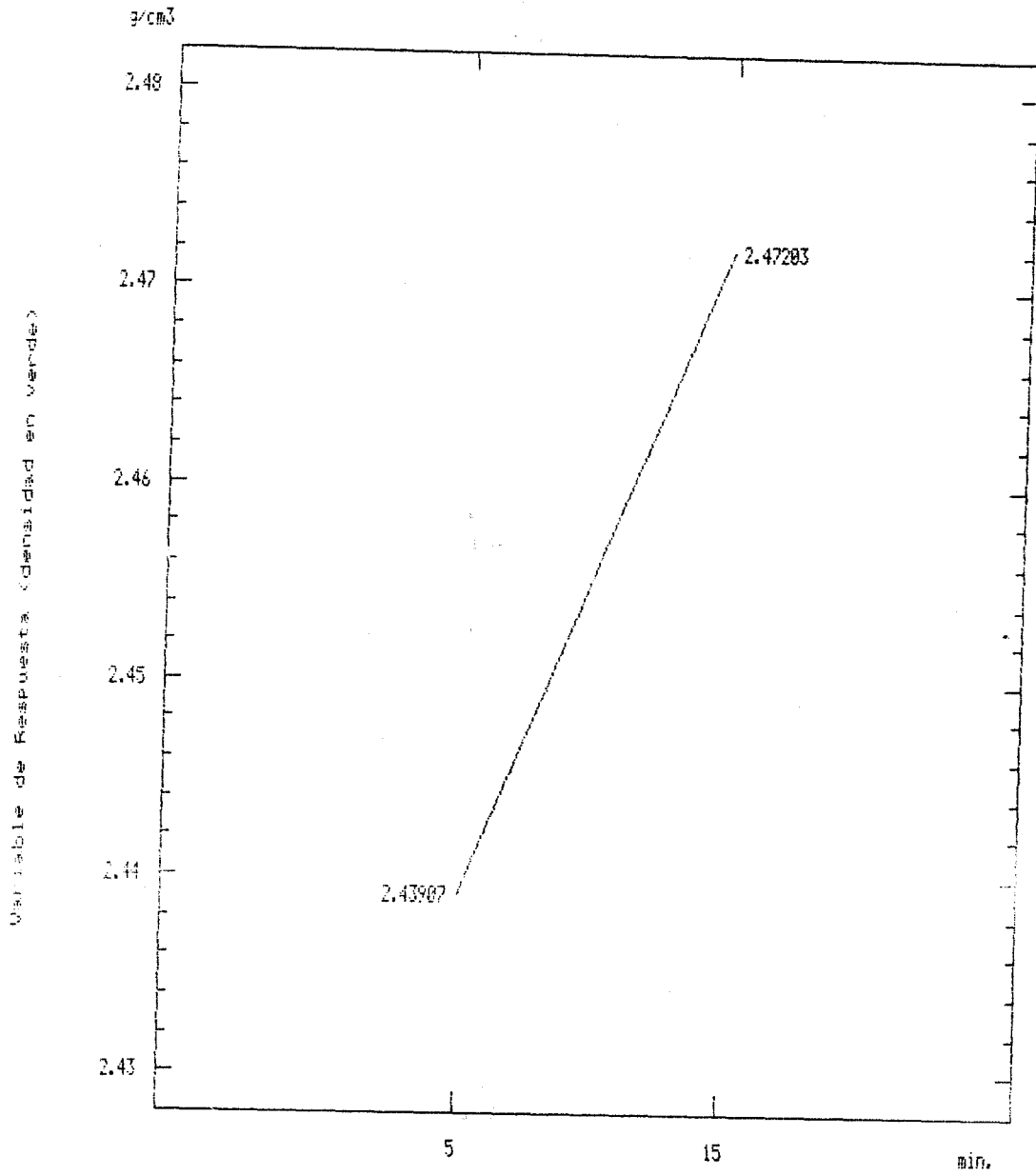


Gráfico N°7
Diagrama de Probabilidades Normal para % porosidad
(datos en la tabla N° 51)

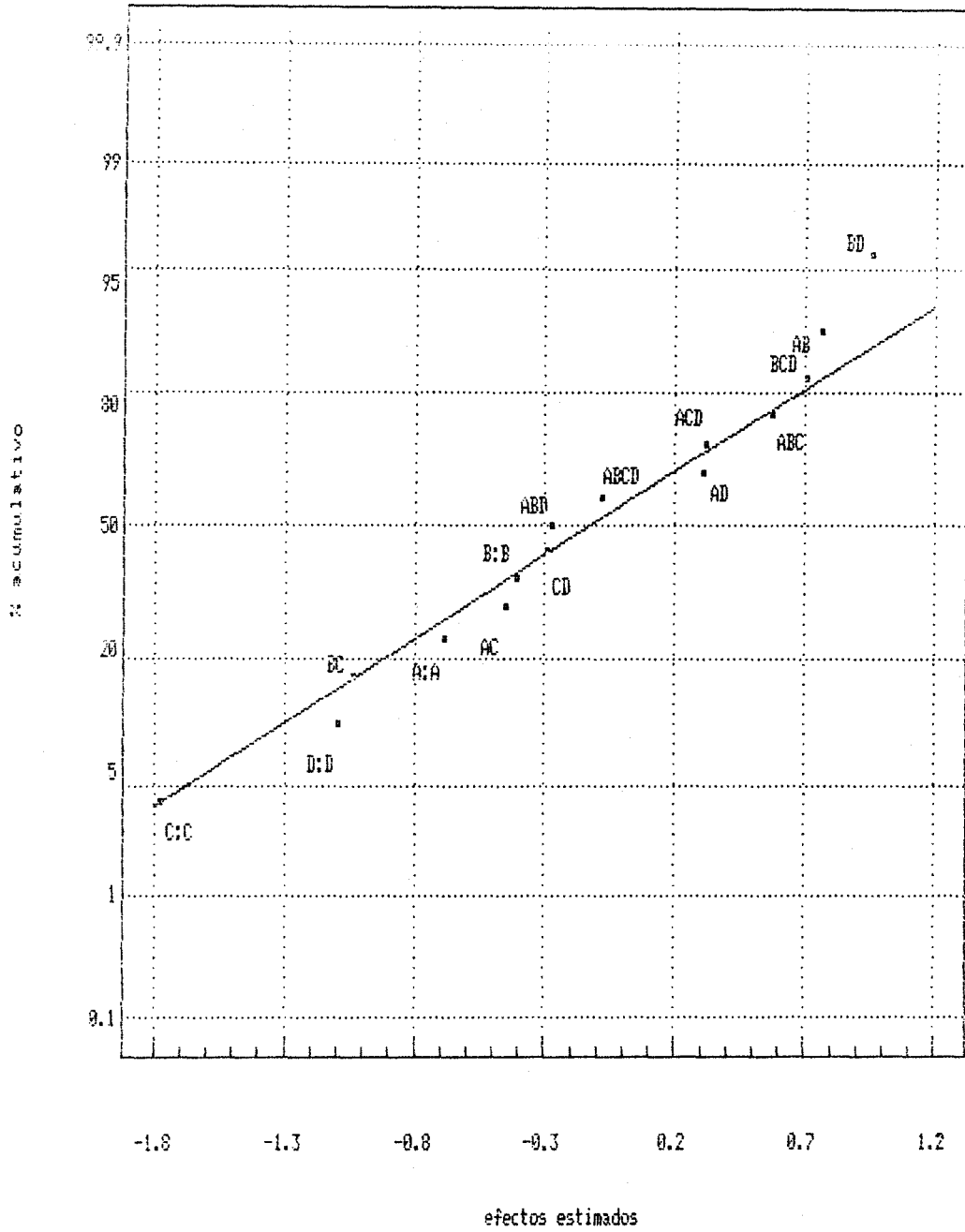


Gráfico N°8
% porosidad vs interacción AB
en el lote D

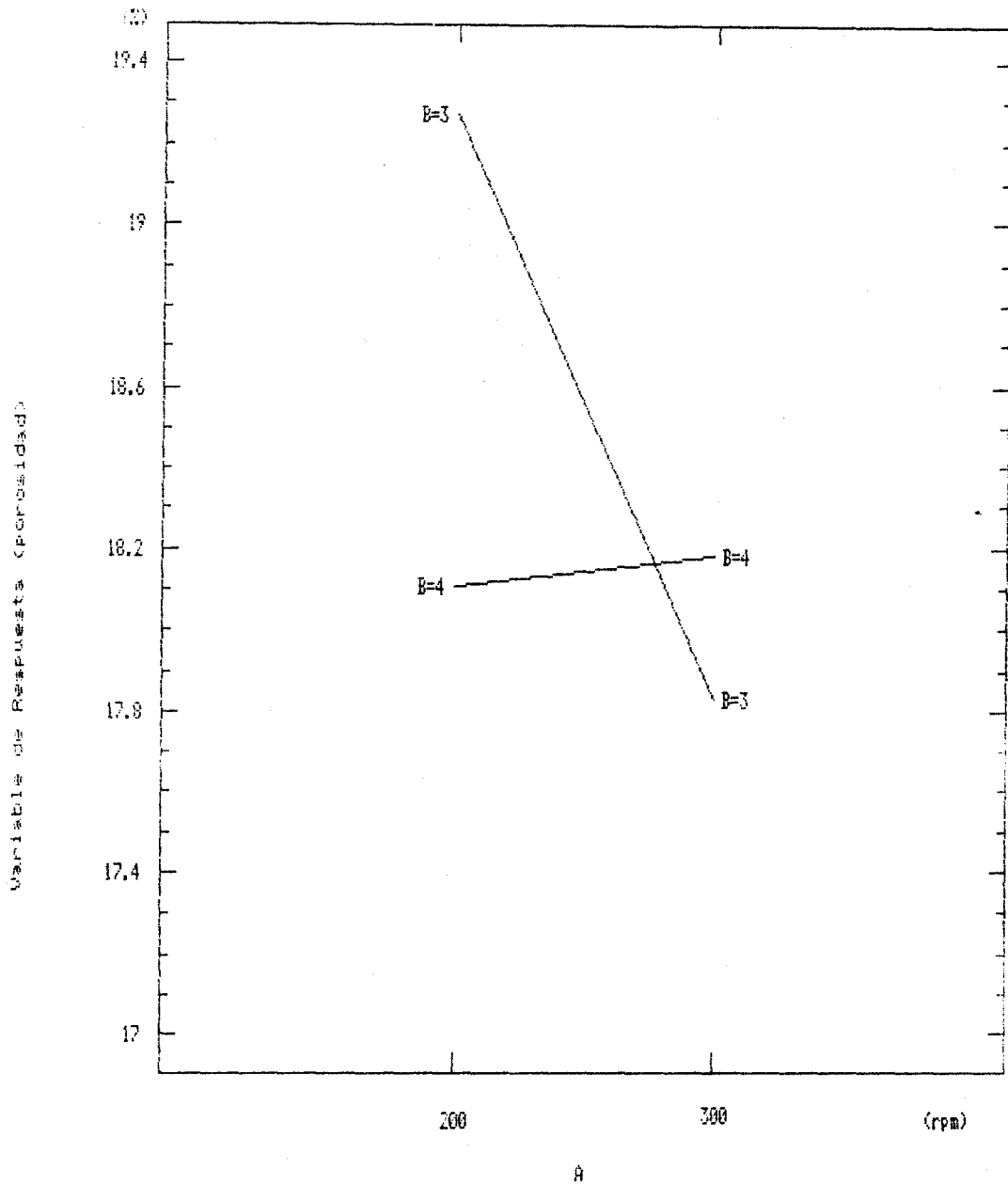


Gráfico N°9
% porosidad vs interacción BD
en el lote D

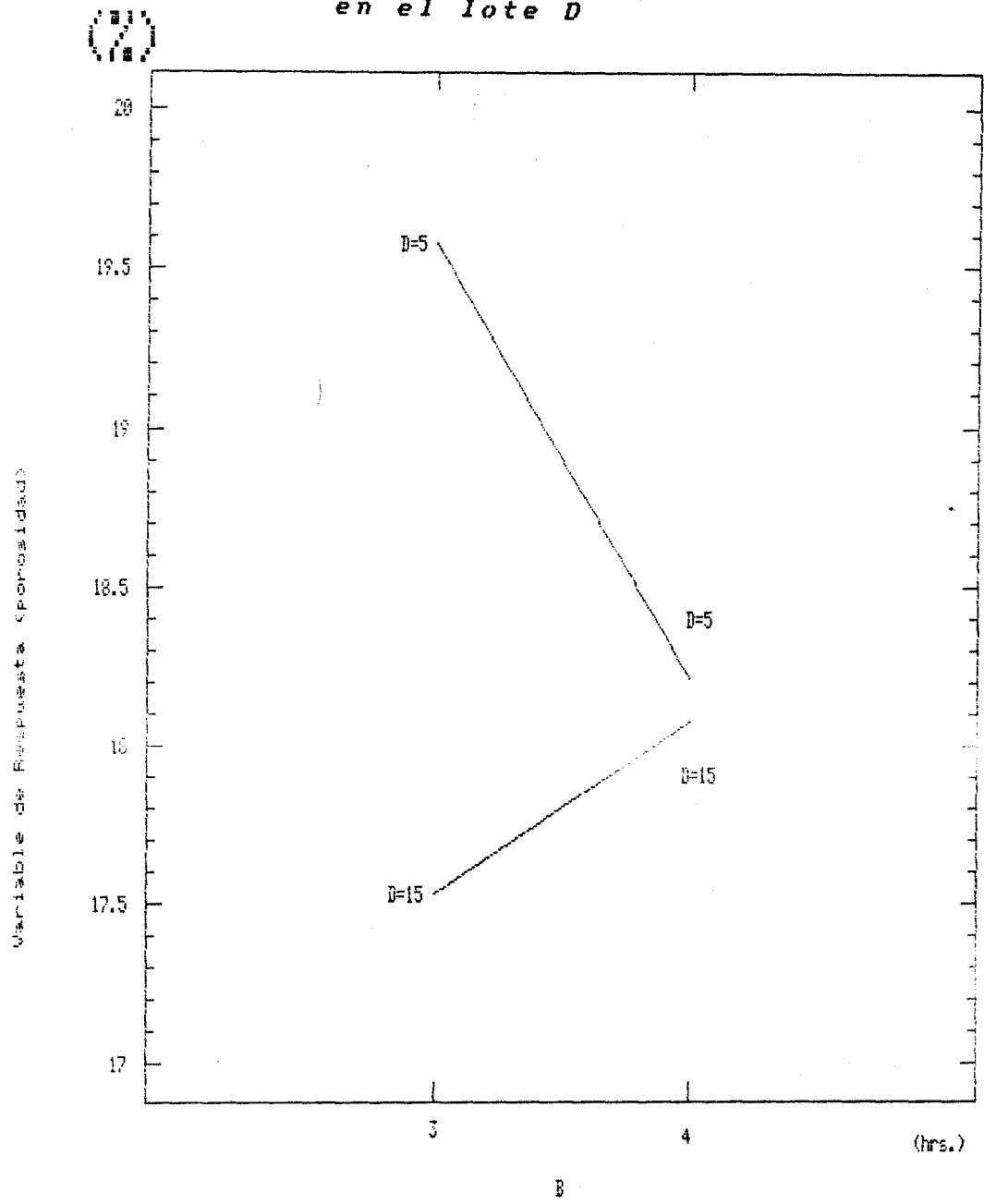


Gráfico N°10
Diagrama de Probabilidad Normal para el
% volumen de partículas (datos en tabla N°52)

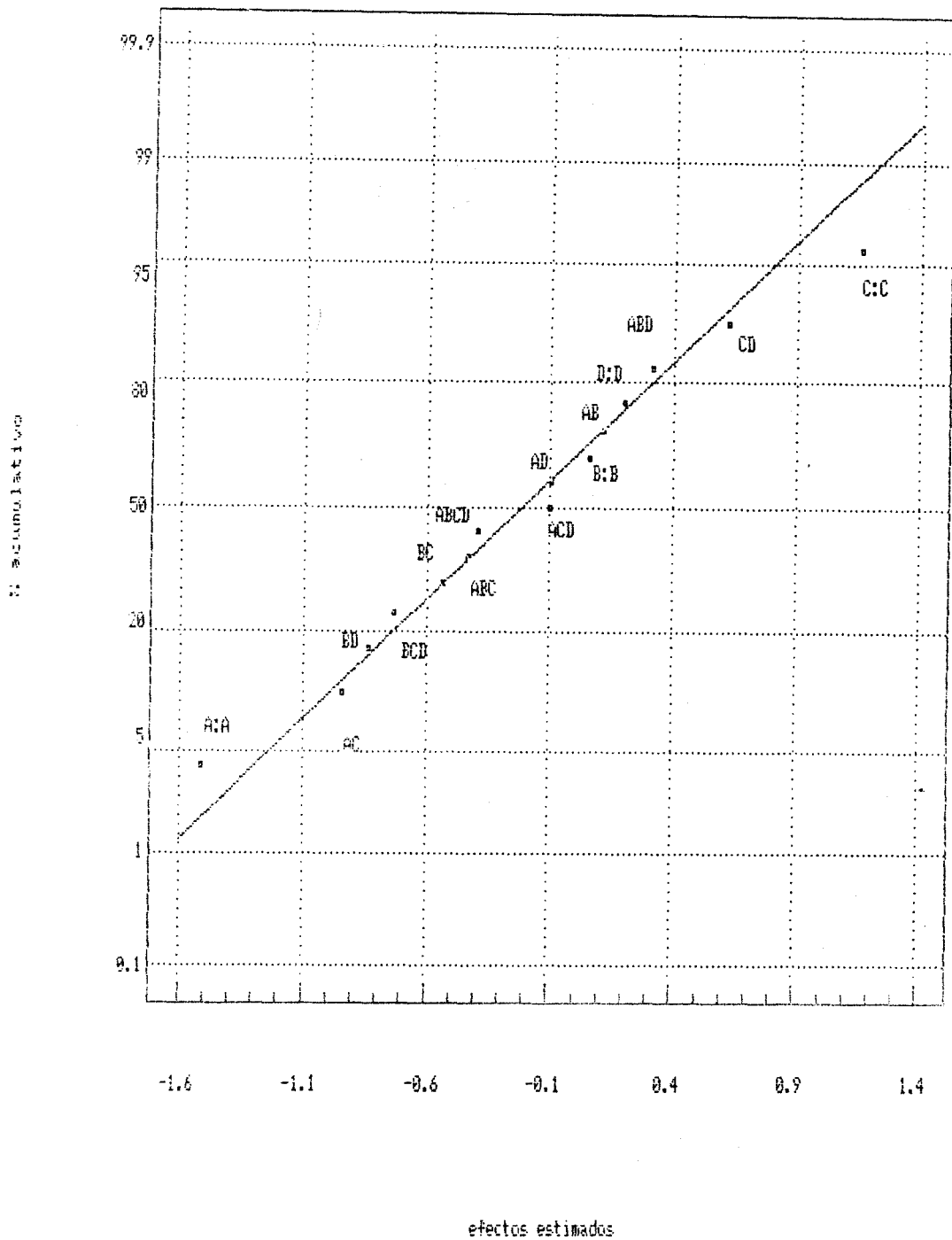


Gráfico N°11
% volumen vs. efecto C
(lote D)

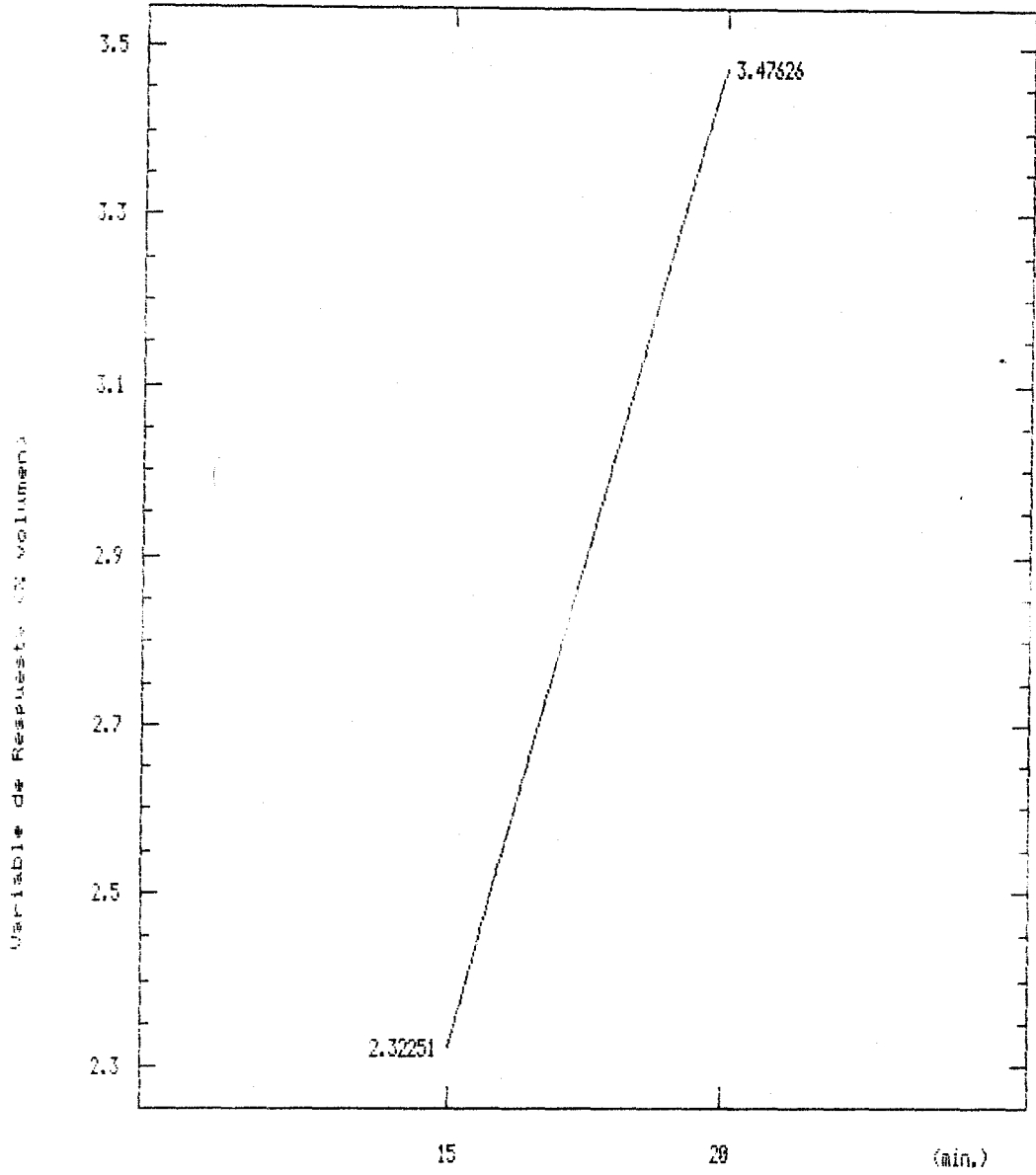
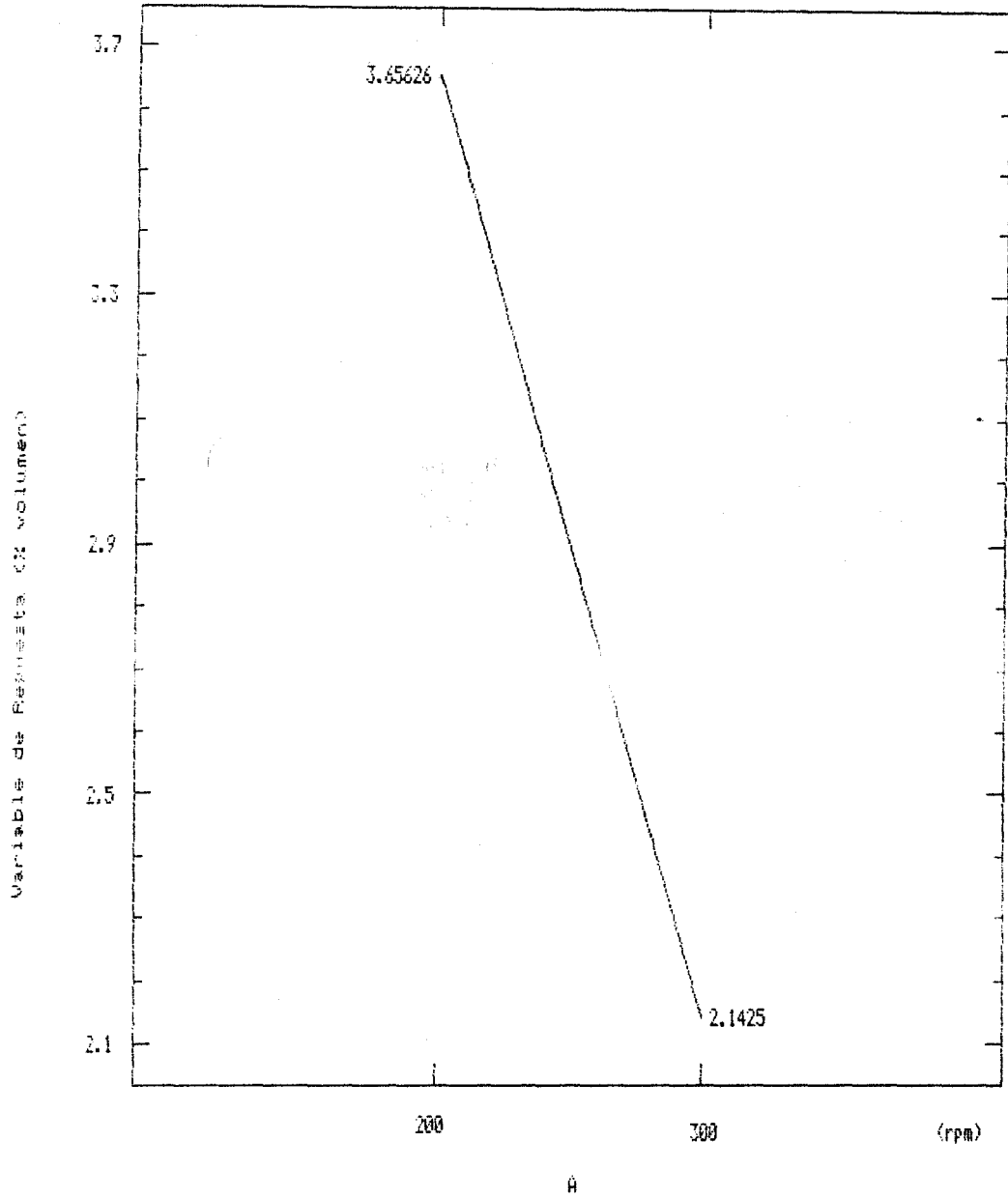


Gráfico N°12
% volumen vs. efecto A
(lote D)



2.4.- Tercera Etapa de la Investigación:**Tabla N° 53: Densidad, Porosidad y cambio de porosidad en verde y de sinterizado para el lote E**

N° muestra	Densidad _v (g/cm ³)	Porosidad _v (%)	Densidad _s (g/cm ³)	Porosidad _s (%)	Cambio de Porosidad
1E	2.4655	18.02	2.4240	19.40	-7.11
2E	2.4580	18.27	2.3713	21.15	-13.62
3E	2.4605	18.18	2.3940	20.40	-10.88
4E	2.4929	17.11	2.3099	23.19	-26.22

Tabla N° 54: Densidad, Porosidad y cambio de porosidad en verde y de sinterizado para el lote F

N° muestra	Densidad _v (g/cm ³)	Porosidad _v (%)	Densidad _s (g/cm ³)	Porosidad _s (%)	Cambio de porosidad
1F	2.4314	19.15	2.4471	18.63	2.79
2F	2.4240	19.40	2.4265	19.32	0.41
3F	2.4505	18.52	2.4605	18.18	1.87
4F	2.580	18.27	2.4605	18.18	0.50

Tabla N° 55: Efectos estimados para el % porosidad en el lote E a partir de la tabla N° 53

Factor	Efecto Estimado
Promedio	-14.4575
A:E	-10.925
B:F	-8.185
AB	-4.415

Gráfico N°13
Diagrama de Probabilidad Normal para porosidad
(lote E)

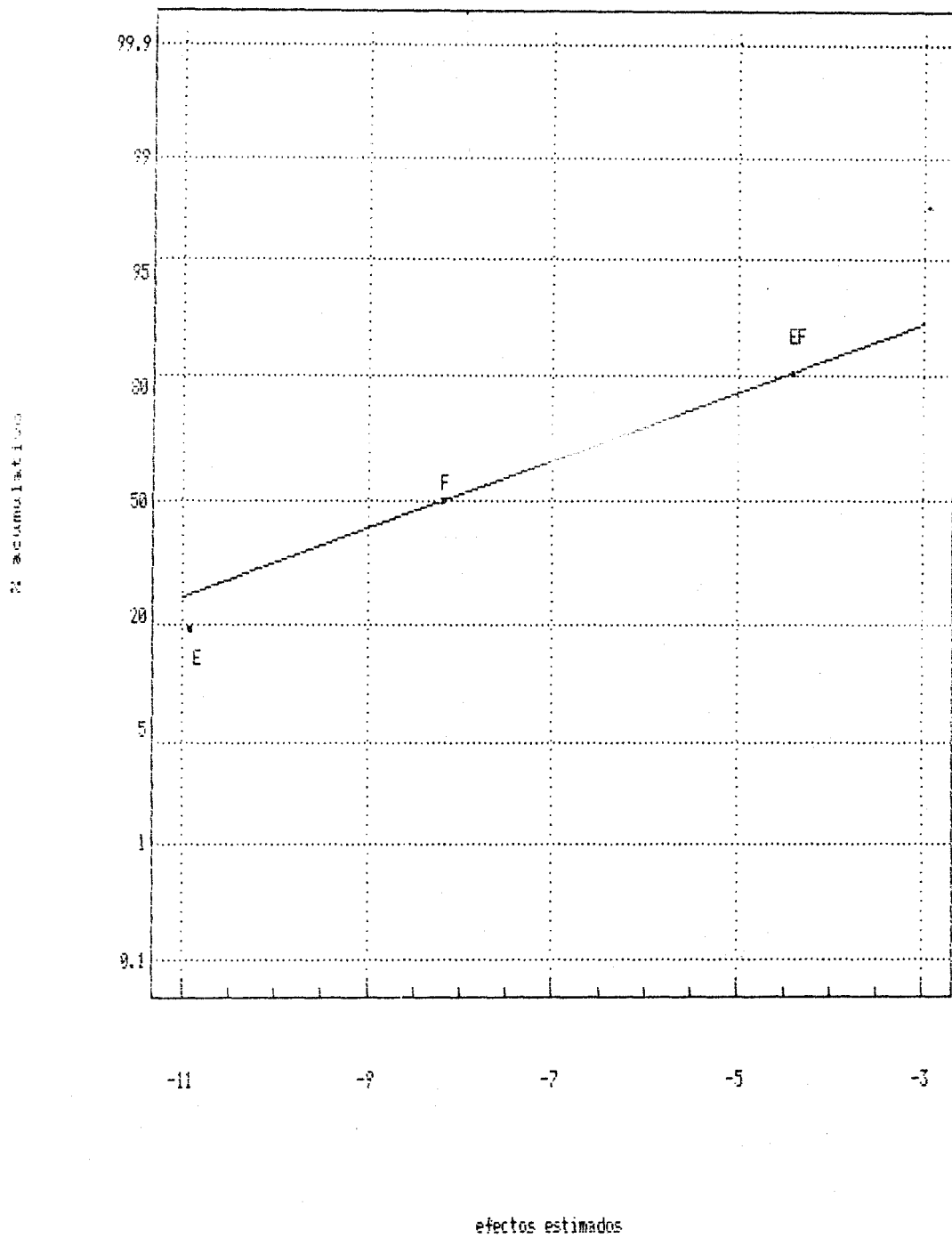
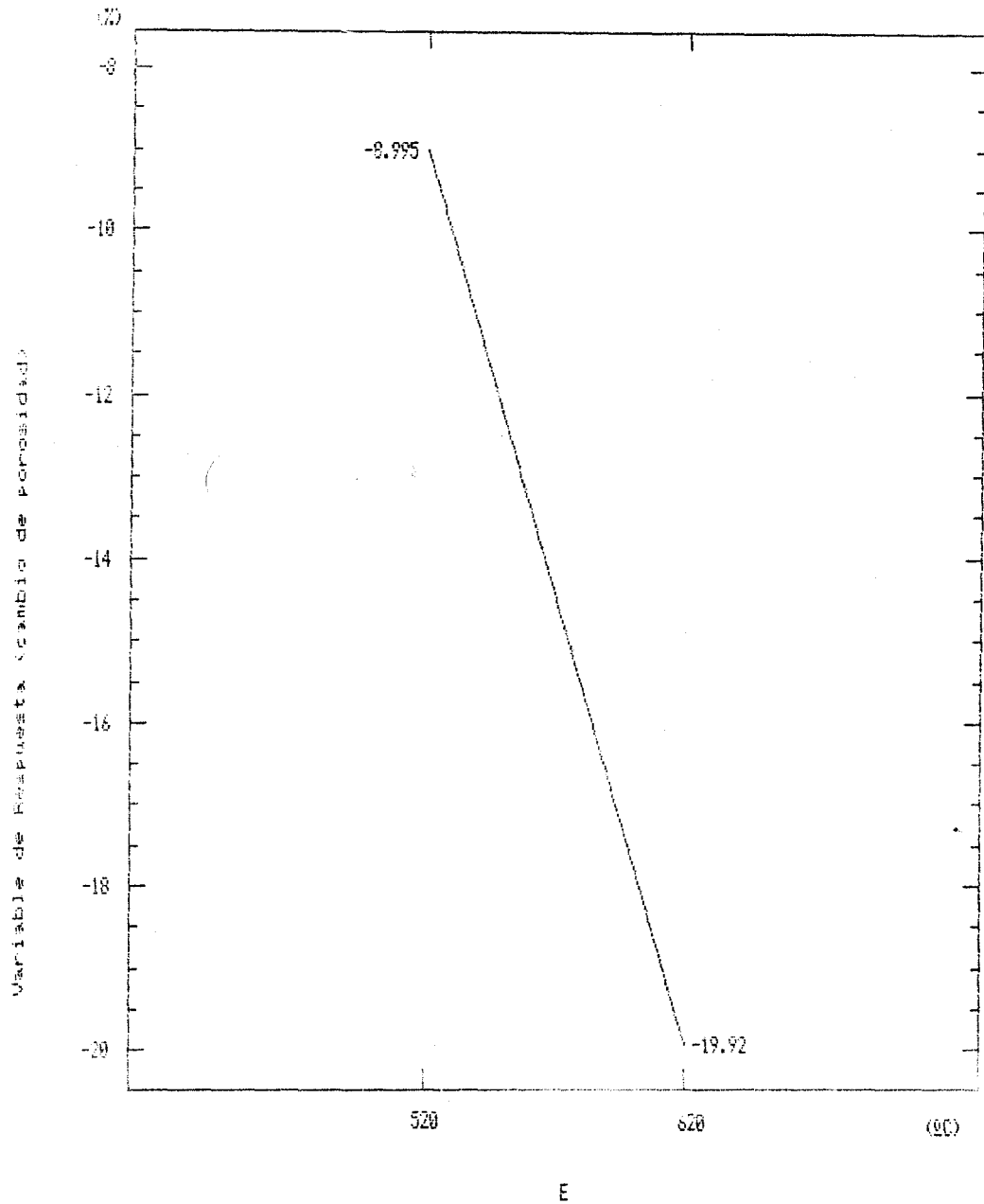


Gráfico N°14
Cambio de porosidad vs. efecto E
(lote E)



**Tabla N° 56: Efectos estimados para el % de porosidad
en el lote F a partir de la tabla N° 54**

<i>Factor</i>	<i>Efecto Estimado</i>
<i>Promedio</i>	1.3925
<i>A:E</i>	-1.875
<i>B:F</i>	-0.415
<i>AB</i>	-0.505

2.5.- Cuarta Etapa de la Investigación

Tabla N° 57: Densidad y Porosidad en verde y de sinterizado para el lote G

<i>N° muestra</i>	<i>Densidad_v (g/cm³)</i>	<i>Porosidad_v (g/cm³)</i>	<i>Densidad_s (g/cm³)</i>	<i>Porosidad_s (g/cm³)</i>
1G	2.4559	18.34	2.4896	17.22
2G	2.4705	17.85	2.5043	16.73
3G	2.4265	19.16	2.4496	18.55

Tabla N° 58: % volumen para el lote G

<i>N° muestra</i>	<i>P_p</i>	<i>S</i>	<i>CI</i>
1G	17.18	7.2810	6.0752
2G	22.26	6.3469	5.2958
3G	24.22	5.2074	4.3450

Tabla N° 59 : Resultados de Dureza

<i>Sección</i>	<i>Hv</i>
<i>A</i>	30.70
<i>B</i>	25.30
<i>C</i>	29.04

Gráfico N°15
Diagrama de Probabilidad Normal para porosidad
(lote F)

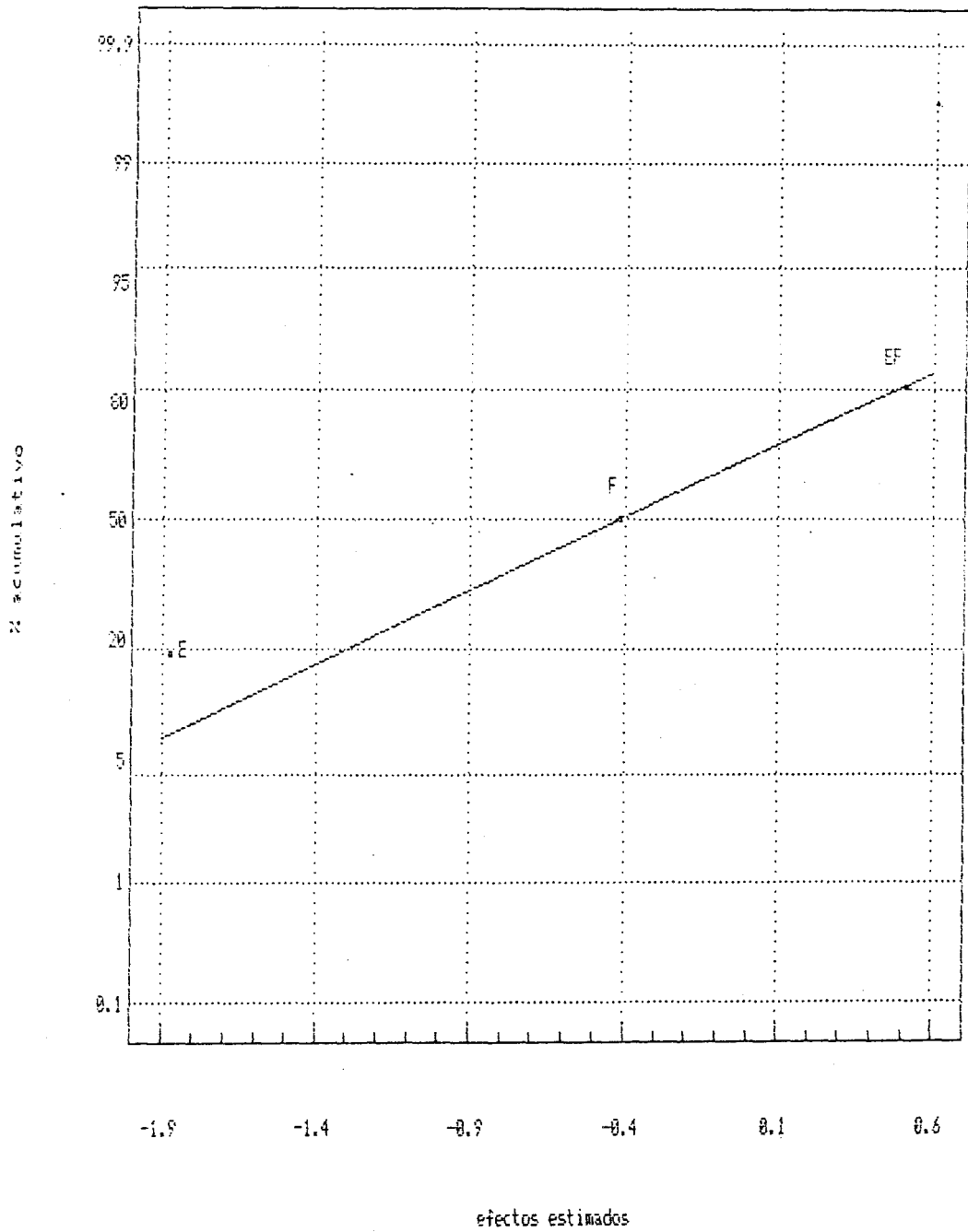


Gráfico N°16
Cambio de porosidad vs. efecto E
(lote F)

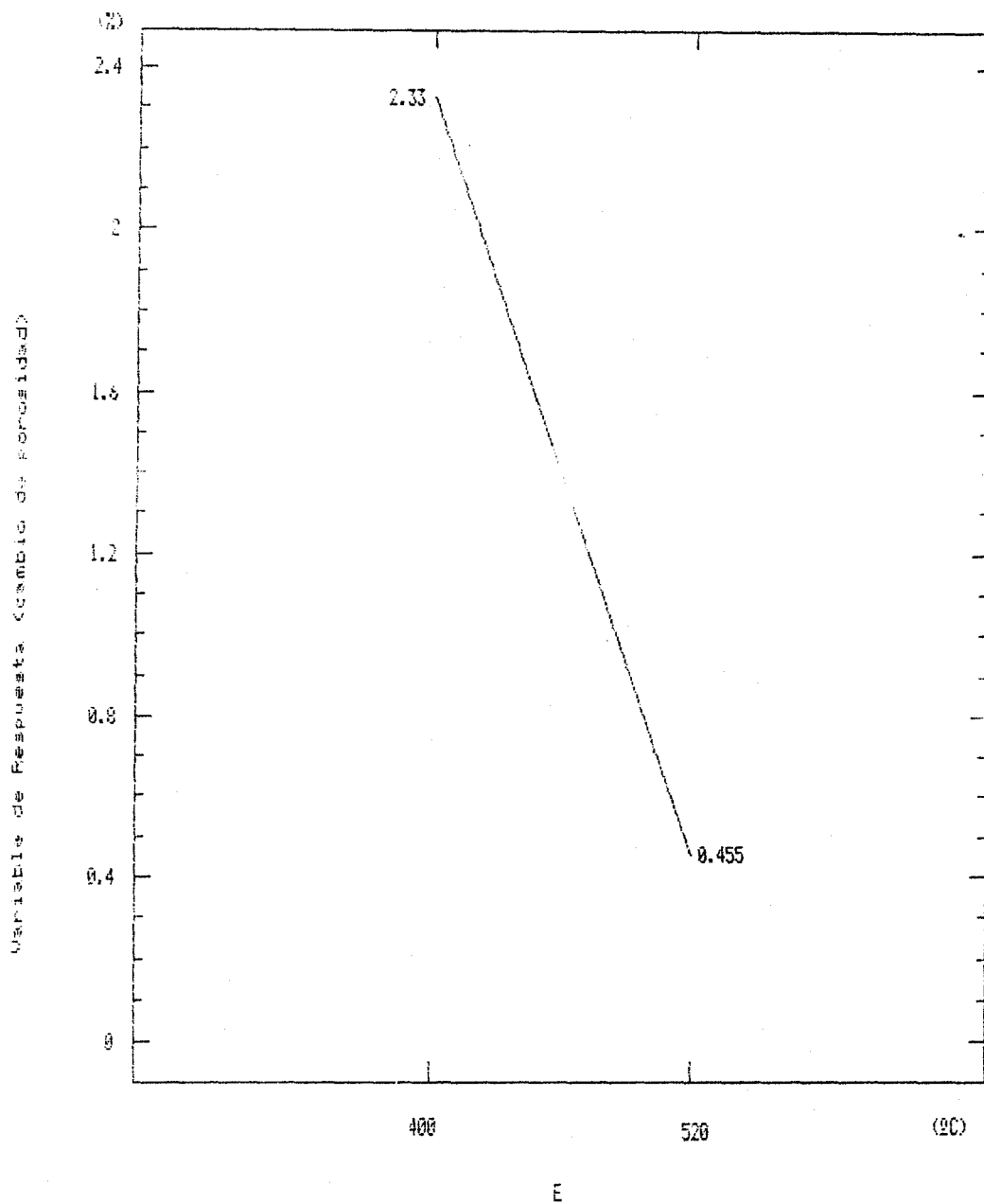


Gráfico N°17
Cambio de porosidad vs. efecto F
(lote F)

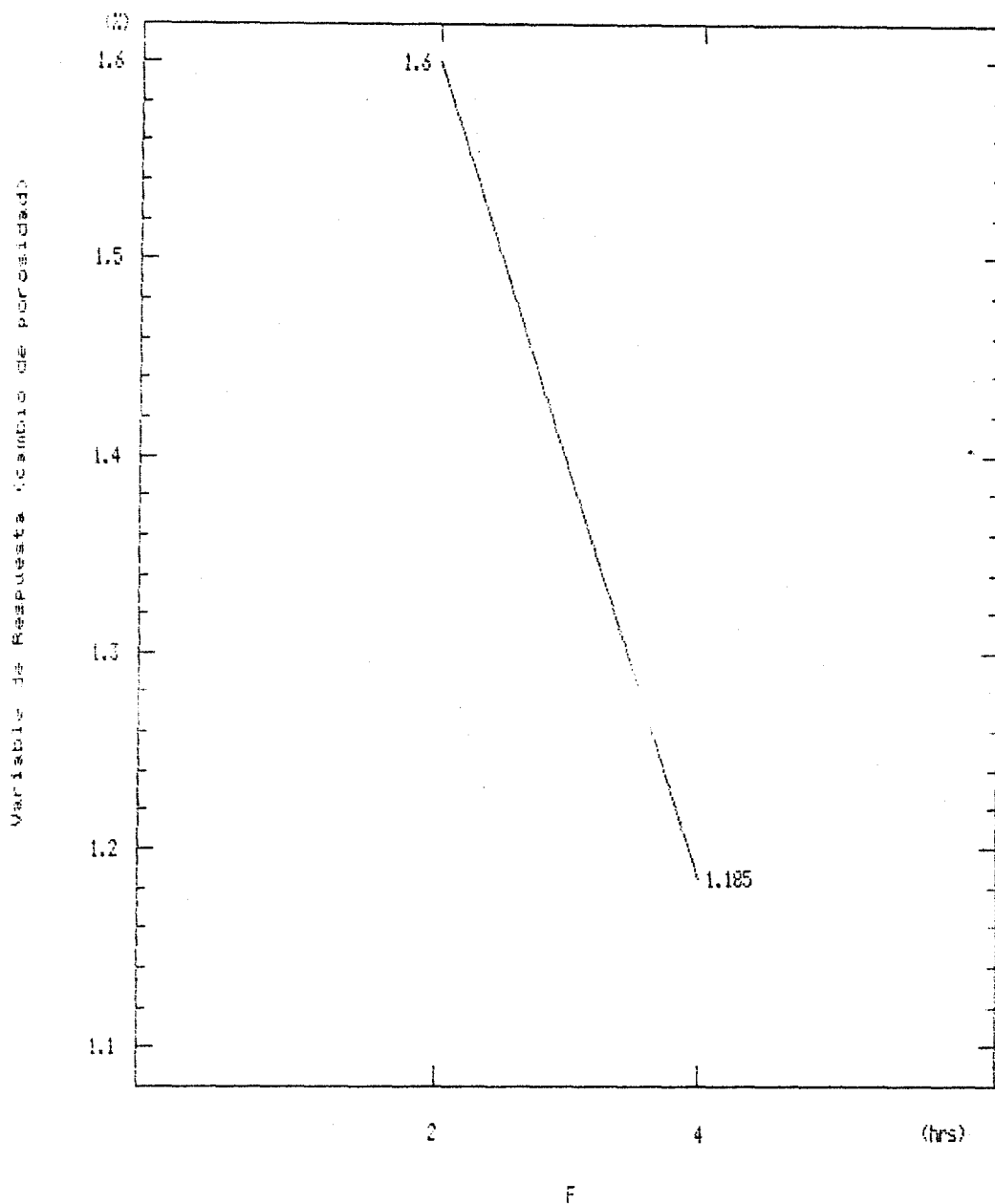
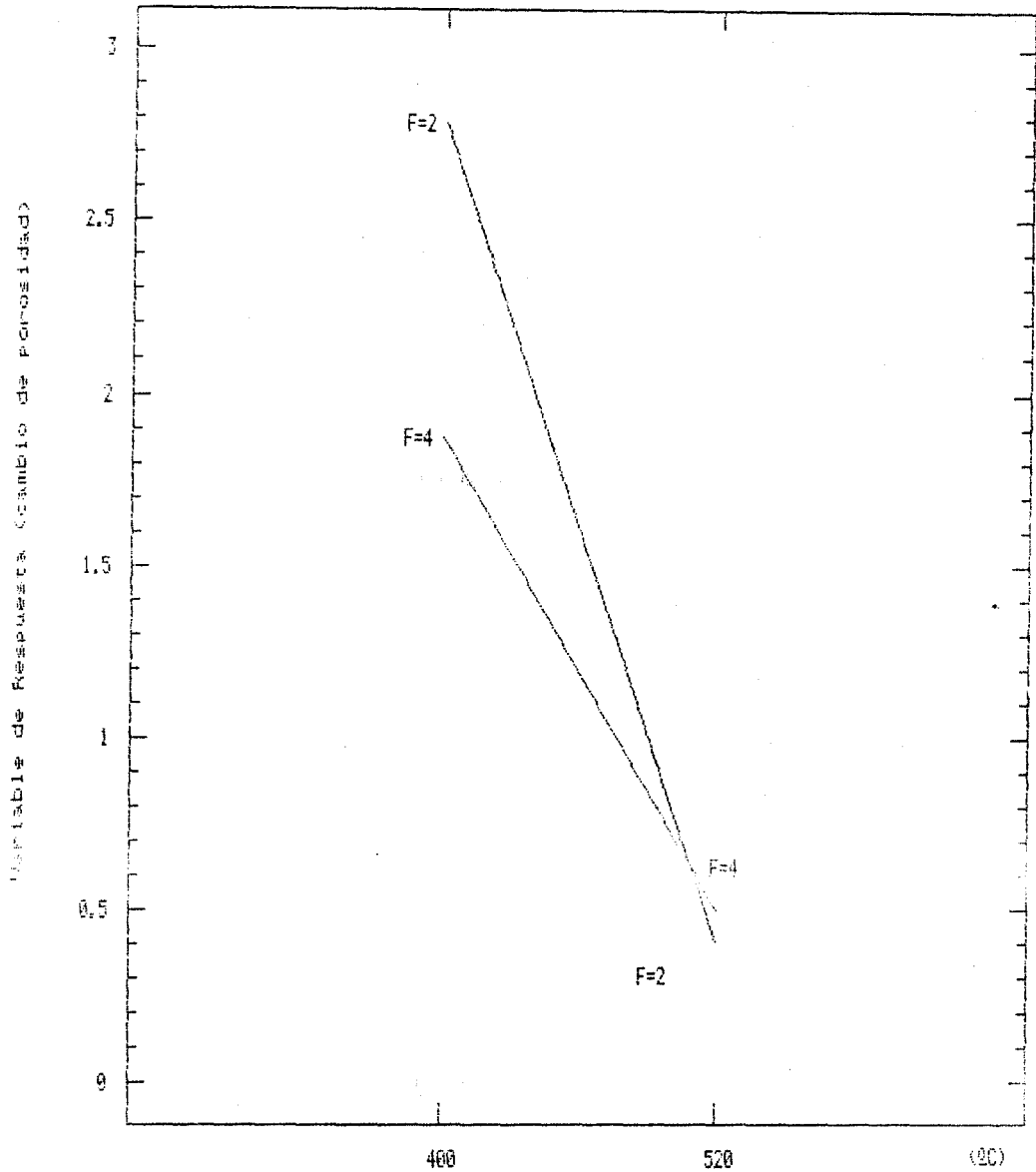
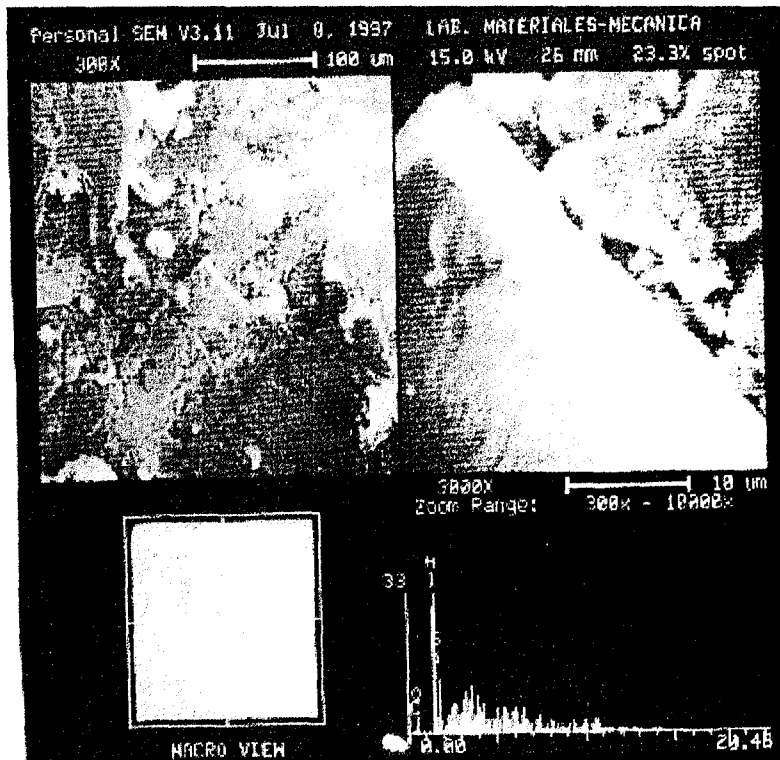


Gráfico N°18
Cambio de porosidad vs. interacción EF
(lote F)



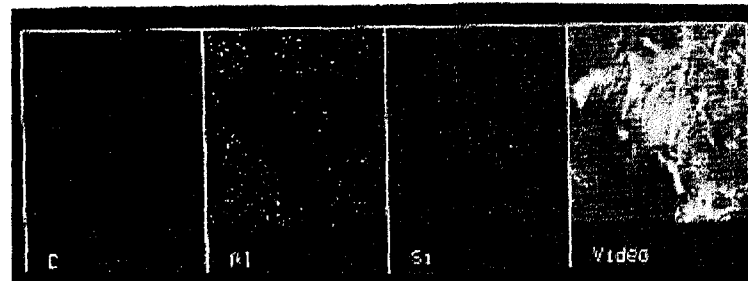


(a)



(b)

Figura N° 36: Fotografías SEM de compacto de SiC-Al óptimo: (a) Se visualiza la unión entre partículas. (b) Se visualiza la presencia de poros. (c) Muestra cualitativa del grado de dispersión de las partículas en el compacto óptimo.



(c)

C A P I T U L O I V

ANALISIS DE RESULTADOS

1.- Caracterización de los Polvos :

El polvo de aluminio presenta una morfología nodular, aún a grandes aumentos no se observan porosidades ni protuberancias importantes (ver figura N° 28), lo cual permite un mayor deslizamiento interparticular dado que disminuye la fricción entre los mismos, permitiendo una densificación más eficiente.

La morfología redondeada del aluminio asociada con su rugosidad fina permite inferir un comportamiento adecuado para fluir sin problemas en la etapa de compactación y presentará una superficie apta para un efectivo contacto en el sinterizado.

Dadas las características morfológicas del SiC (ver figura N° 29) comparadas con las de U_3O_8 y UAl_x en las figuras N° 6 y N° 7 y la distribución granulométrica (tabla N°43) muy semejante a las especificaciones hacen que el SiC se pueda emplear como un similitud del uranio, para su estudio en el presente trabajo de investigación.

2.- Primera Etapa de la Investigación:

En los lotes A, B y C de compactos , se trata de encontrar que combinación de parámetros producen mejor dispersión de partículas de SiC en la matriz de aluminio.

De las tablas N° 47 y N° 48 se puede observar que las muestras 1A, 2A, 7A, 12A, 2C y 3C presentan la menor desviación estándar, por lo cual poseen un número aproximadamente igual de partículas en cada sección analizada y por lo tanto buena dispersión.

En las fotografías de estas muestras se observa lo siguiente:

Muestra 1A: Partículas poco fragmentadas, de tamaño aproximadamente uniforme (ver figura N° 30).

Muestra 2A: Partículas fragmentadas de tamaño no uniforme y porosidades (ver figura N° 31).

Muestra 7A: Partículas de diferentes formas y tamaños, aglomeradas en algunas secciones (ver figura N° 32).

Muestra 12A: Partículas fragmentadas de diferentes tamaños (ver figura N° 33).

Muestra N° 2C: Poca porosidad, partículas de tamaño aproximadamente uniforme y forma tendiendo a la esférica (ver figura N° 34).

Muestra 3C: Poca porosidad, partículas de tamaño poco uniforme y forma aproximadamente redondeada. (ver figura N° 35).

Todas estas muestras presentan buena dispersión, pero las partículas tienden a fragmentarse y variar su forma y tamaño debido al sobremezclado, originado en este caso por el tiempo de mezclado, como es el caso de las muestras 12A y 7A.

Por estos motivos se ha tomado como niveles de variación de los parámetros de mezclado los siguientes:

Velocidad de Mezclado: 200 - 300 rpm.

Tiempo de mezclado: 3 4 horas.

Para los parámetros de prensado se ha tenido en cuenta las limitaciones de las prensas existentes, y se ha tomado como niveles de variación 15 - 20 Ton. De carga variando el tiempo de aplicación de la misma entre 5 y 15 minutos para ver si produce alguna variación en la respuesta.

Como parámetros de sinterizado se tomó como niveles de variación tentativos los siguientes:

Temperatura de Sinterizado: 520 - 620 °C.

Tiempo de Sinterizado: 3 - 6 horas.

Pudiendo estos niveles variar de acuerdo a los resultados obtenidos en las porosidades.

3.- Segunda Etapa de la Investigación:

Para realizar el análisis de los diseños factoriales utilizados tanto en esta etapa como en las siguientes, se asumió lo siguiente:

1° Los factores son fijos.

2° El diseño es completamente aleatorizado.

3° Se satisface la suposición usual de normalidad.

Como no se han realizado réplicas de los experimentos por no tener la cantidad de materia prima suficiente, un método de análisis especial, para no despreciar las interacciones de orden superior, es el empleo de diagramas de probabilidad, para lo cual se calculan primero los efectos de los factores y sus interacciones. Los efectos que son despreciables se distribuirán normalmente, con media cero y

varianza σ^2 , y tenderán a ubicarse a lo largo de una línea recta en la gráfica, mientras que los efectos significativos tendrán medias distintas de cero y no se ubicarán en la línea recta.

3.1.- Análisis de los Niveles de los Factores para la Densidad en Verde:

De la gráfica N° 3 la interacción BD es la más significativa (causa mayor variabilidad en la respuesta, la densidad en verde); así también la interacción AB y el efecto D se encuentran alejados de la recta normal.

En la gráfica N° 4 para la interacción BD el tiempo de aplicación de la presión tiene un gran efecto para bajos tiempos de mezclado.

En la gráfica N° 5 para la interacción AB, el efecto de la velocidad de mezclado es muy pequeño cuando el tiempo de mezclado se encuentra en el nivel bajo y muy grande en caso contrario.

En la gráfica N° 6, el efecto D es positivo, para maximizar la densidad en verde, se debe trabajar con el tiempo de aplicación de la presión en el nivel alto.

Por todo lo expuesto para lograr maximizar la densidad en verde se debe trabajar con A en el nivel alto, B en el nivel bajo y D en el nivel alto; el efecto C no es significativo dentro del rango de variación trabajado.

3.2.- Análisis de los Niveles de los Factores para la Porosidad:

La gráfica N° 7 muestra que las interacciones más significativas son BD y AB.

En la gráfica N° 8 el efecto A es poco significativo cuando el tiempo de mezclado se encuentra en el nivel alto y muy grande en caso contrario.

En el gráfico N° 9 el efecto D es pequeño cuando el tiempo de mezclado se encuentra en el nivel alto.

Con estas observaciones se comprueba que para minimizar la porosidad A debe trabajar en el nivel alto, B en el nivel bajo y D en el nivel alto, como en el caso de la densidad en verde.

3.3.- Análisis de los Niveles de los Factores para la Dispersión (% volumen):

La gráfica N° 10 muestra que los efectos C y A son los más significativos.

Del gráfico N° 11, se obtiene una menor desviación estándar de las muestras cuando se trabaja con C en el nivel bajo.

Del gráfico N° 12, la menor desviación estándar se obtiene cuando A trabaja en el nivel alto.

Con estas observaciones se puede afirmar que para obtener la menor desviación estándar del % volumen de partículas obtenida en cada muestra se debe trabajar con A en el nivel alto y C en el nivel bajo, el efecto B y D no causa variabilidad en el % volumen de partículas.

4.- Tercera Etapa de la Investigación:

4.1.- Análisis de las Condiciones de Sinterizado en el lote E:

De la gráfica N° 13 se puede observar que el efecto E es más significativo.

En la gráfica N° 14 demuestra que la mayor variación en la porosidad ocurre cuando E se encuentra en el nivel bajo ; sin embargo, esta variación es negativa, indicando que la porosidad aumenta en vez de disminuir con el sinterizado, esto se debe a que se ha trabajado en una atmósfera oxidante, por lo que el aluminio se oxida a Al_2O_3 y densifica en una cantidad mínima en el centro del compacto, oxidándose en la superficie.

4.2.- Análisis de las Condiciones de Sinterizado en el lote F:

Del gráfico N° 15 el efecto E es el más significativo.

En el gráfico N° 16, existe mayor cambio de porosidad cuando se trabaja con E en el nivel bajo.

En el gráfico N° 17, para el efecto F, se logra mayor variación de porosidad cuando F se encuentra en el nivel bajo.

Con el gráfico N° 18 para la interacción EF se comprueba que para lograr un mayor cambio de la porosidad se debe trabajar con E y F en el nivel bajo.

5.- Cuarta Etapa de la Investigación:

Al realizar la evaluación de algunas propiedades de los compactos óptimos, se puede notar el %volumen de los compactos está aproximadamente en 21% variando entre ellos en un valor de ± 6.3 . La dureza encontrada varía entre 25 y 30 Hv aproximadamente. Y la porosidad está en el 17.5%

C A P I T U L O V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- Conclusiones:

- *Las partículas de SiC dispersas en aluminio muestran homogeneidad cuando se trabaja entre los rangos de 200 y 300 rpm de velocidad de mezclado y un tiempo de mezclado de 3 a 4 horas.*
- *Teniendo en cuenta los rangos de trabajo establecidos para la etapa de mezclado, en base a técnicas estadísticas se ha determinado que existe una dispersión uniforme, del 21% en volumen de partículas, cuando se realiza el mezclado a 300 rpm en 3 horas.*
- *La máxima densidad alcanzada es aproximadamente de 2.5 g/cm³ equivalente al 85% de la densidad teórica del compacto.*
- *Los parámetros óptimos de prensado, en base al rango de trabajo establecido son: Carga aplicada = 15 Ton. Tiempo de aplicación de la carga = 15 min.*
- *A 400°C de temperatura y un tiempo de 2 horas para el sinterizado se obtiene un mayor cambio de porosidad (disminución de porosidades), la que llega a ser del 17.5 % aproximadamente , llegando estos parámetros a ser los óptimos para el sinterizado, dentro de los rangos de trabajo establecidos.*

2.- Recomendaciones:

- *Para realizar el compactado de gran cantidades de piezas, es necesario lubricar la matriz para que esta no se desgaste.*
- *Al realizar el sinterizado de compactos se debe controlar la atmósfera, sobre todo cuando se trabaja con materiales que son fácilmente oxidables*
- *Cuando se utiliza técnicas estadísticas de análisis se debe tener cuidado en elegir las variables de respuesta ya de ello depende el obtener resultados confiables. estadísticas de análisis se debe tener cuidado en elegir las variables de respuesta ya de ello depende el obtener resultados confiables.*

a A N E X O I

EJEMPLO DE CALCULOS

1.- Caracterización de Polvos:

1.1.- Análisis Granulométrico:

Con los datos de la tabla N° 25 y N° 26 se obtiene la fracción en peso de cada polvo del modo siguiente:

Para el caso del SiC (tabla N° 26)

N° tamiz: 170

Masa retenida : 1.10 gr.

Masa total de polvo: 50 gr.

Fracción en peso: X_p

$$X_p = 1.10/50 = 0.022$$

Se procede igual para los demás tamices y también para el polvo de aluminio (tabla N° 25).

El diámetro medio de las partículas (D_p), es el promedio de las aberturas de los tamices, por ejemplo para el SiC de la tabla N°28, mallas 170 y 200 el D_p será:

$$D_p = (.0900 + 0.075)/2 = 0.0825 \mu\text{m}.$$

Los resultados se muestran en la tabla N° 42. para el polvo de aluminio y en la tabla N° 43 para el polvo de SiC.

1.2.- Morfología

Se determinó por comparación visual de las figuras N° 28 y N° 29, en base a las fotografías de diversos tipos de polvos mostrados en la norma ISO 3252 (ver figura N° 15) y también se tomó en cuenta la forma que deben tener las partículas de acuerdo al método de obtención del polvo (ver figura N° 16).

1.3.-Cálculo de la densidad aparente de los polvos:

Con los datos de la tabla se calculó la masa promedio como sigue:

$$W_{Al} = (28.30 \text{ gr.} + 29.7 \text{ gr.} + 29.0 \text{ gr.} + 29.2 \text{ gr.} + 28.5 \text{ gr.})/5 = 28.94 \text{ gr.}$$

Se calcula la densidad aparente (δ_a) con la ecuación:

$$\delta_a = w \text{ (gr.)} * 0.04 \dots\dots\dots(1)$$

Reemplazando:

$$\delta_a = 28.94 * 0.04 = 1.1576 \text{ gr/cm}^3$$

Para el SiC se procede de la misma forma, los resultados se muestran en la tabla N° 41.

1.4.- Area Específica

Se utilizó la ecuación:

$$Se = (6 \times \lambda / \delta_p) \times \sum (X_i/D_{mi}) \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

$$Se = \text{Area específica (cm}^2/\text{gr)}$$

$$\delta_p = \text{densidad relativa de las partículas.}$$

λ = factor de forma.

X_i = fracción en peso de las partículas.

D_{mi} = Diámetro medio de las partículas.

El factor de forma se obtuvo experimentalmente, utilizando la relación:

$$\lambda = F / M \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

F = Diámetro Feret's (longitud máxima de una partícula medida en una dirección fija).

M = Diámetro Martin's (longitud de una línea recta que bisecciona el área de la partícula; de todas las partículas medidas en la misma dirección).

Los datos se tomaron de las figuras N° 28 y N° 29. para el carburo de silicio y aluminio respectivamente, siendo el resultado el siguiente:

$$\lambda_{Al} = 1.6711$$

$$\lambda_{SiC} = 1.342$$

Desarrollando para el caso del Aluminio se tiene:

$$S_e = (6 \times 1.6711 / 2.699) \times (21.2589)$$

$$S_e = 78.98 \text{ cm}^2/\text{gr.}$$

1.5.- Densidad Tap:

Se utilizó la relación:

$$\delta_T = W / V = \text{masa (g.)} / \text{volumen (ml.)} \dots\dots\dots(4)$$

Con los datos de la tabla N° 28 se obtiene el promedio y se aplica la ecuación anterior. Los resultados se muestran en la tabla N° 46.

2.- Primera Etapa de la Investigación:

Determinación del # de Partículas por Unidad de Área: Se utilizó el procedimiento planimétrico especificado en ASTM E112-88; se trazaron 6 rectángulos sobre la fotomicrografía y se contó el # de partículas dentro de cada área.

Se efectuó el cálculo siguiente:

$$\# \text{ part. / mm}^2 = \# \text{ part. / } A_{\square} \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

part. = número de partículas en cada área.

A_{\square} = área del rectángulo = 1600 mm²

También se calculó la desviación estándar de los datos con la ecuación:

$$S = \{ \sum (x - \bar{x}) / (n-1) \}^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

3.- Segunda Etapa de la Investigación:

3.1.- Determinación de la Densidad en Verde (δ_v):

Se utilizó la ecuación: (Norma ASTM B331-85)

$$\delta_v = 1273 (M / d^2 \times h) \dots\dots\dots(7)$$

Donde:

M = masa del compacto en gramos.

d = diámetro del compacto en mm.

h = altura del compacto en mm.

De la tabla N° 33 para la muestra 1D se tiene:

$$\delta_v = 1273 [9.83 / (25.7)^2 \times 7.85] = 2.4135 \text{ g/cm}^3$$

3.2.- Determinación de la Porosidad en Verde:

Se determinó utilizando la regla de las mezclas siguiente:

$$\% P_v = [(\delta_{tc} - \delta_g) / \delta_{tc}] \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

D_{tc} = densidad teórica del compacto.

D_g = densidad geométrica del compacto (en esta caso es la δ_v).

$$D_{tc} = \delta_{SiC} \times f_{SiC} + \delta_{Al} \times f_{Al} \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

δ_{SiC} = densidad teórica del SiC (3.23 g/cm³).

f_{SiC} = fracción volumétrica del SiC.

δ_{Al} = densidad teórica del aluminio (2.699 g/cm³).

f_{Al} = fracción volumétrica del aluminio.

Las fracciones volumétricas se calculan como sigue:

$$f_{SiC} = (\% \text{ peso SiC} / \delta_{SiC}) / [(\% \text{ peso SiC} / \delta_{SiC}) + (\% \text{ peso Al} / \delta_{Al})] \dots\dots(10)$$

f_{Al} se calcula igual a la ecuación (11) pero cambiando el numerador por aluminio.

Para la muestra 1D de la tabla N° 49:

$$\% P_v = \{ (3.0074 \text{ g/cm}^3 - 2.4135 \text{ g/cm}^3) / 3.0074 \text{ g/cm}^3 \} \times 100 = 19.75 \%$$

3.3.- Determinación del % Volumen de Partículas:

Se realizó por observación directa en el microscopio utilizando la norma ASTM

E562-83.

Cada muestra se dividió en cuatro secciones (A, B, C y D). Se realizaron los siguientes cálculos:

$$\bar{P}_p = (1/n) \times \sum P_{pi} \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

$$\bar{P}_{pi} = \text{promedio aritmético de } P_{pi}$$

$$P_{pi} = (P_i / P_T) \times 100 = \% \text{ de puntos sobre la cuadrícula para el campo I.}$$

n = número de campos contados.

Desviación Estándar:

$$S = \{ [1/(n-1)] \times \sum (P_{pi} - \bar{P}_p)^2 \}^{1/2} \dots\dots\dots (12)$$

95% de intervalo de confianza (CI):

$$CI = \pm 2.36 \times S / (n)^{1/2} \dots\dots\dots(13)$$

Para la muestra 1D-A se tiene:

$$P_{pi} = (1/16) \times 100 = 6.25$$

Se realiza el mismo cálculo para los 7 campos observados, luego:

$$P_p = 12.5$$

El mismo procedimiento se realiza para las muestras 1D-B, 1D-C y 1D-D; después se calcula el promedio de los cuatro y el resultado se muestra en la tabla N° 50.

El cálculo de la S y CI se obtiene empleando el mismo sistema, los resultados se muestran también en la tabla N° 50.

4.- Tercera Etapa de la Investigación:**4.1.- Determinación del % porosidad en verde y de sinterizado:**

Se determinó de la forma mostrada en 3.2 utilizando los datos de las tablas N° 37 y N° 37.

5.- Cuarta Etapa de la Investigación:**5.1.- Determinación de la Densidad y % de porosidad en verde y de sinterizado:**

Se determinó de la forma mostrada en 3.1 y 3.2 utilizando los datos de la tabla N°38 . Los resultados ase muestran en la tabla N° 57.

5.2.- Determinación del % volumen de partículas:

Se determinó de la mostrada en 3.3 utilizando los datos de la tabla N° 39 , los resultados se muestran en la tabla N° 58.

A N E X O II

ALUMINIO

El aluminio es uno de los principales componentes de la corteza terrestre, de la que forma parte en una proporción del 8,13%, superior a la del hierro, que se supone es de un 5%, y sóloamente superada entre los metales por el silicio (26.5%).

El aluminio no se encuentra puro en la naturaleza, sino formando parte de los minerales, de los cuales los más importantes son las bauxitas, que están formadas por 62-65% de alumina (Al_2O_3), hasta un 28% de óxido de hierro (Fe_2O_3), 12-30% de agua de hidratación (H_2O) y hasta un 8% de sílice (SiO_2).

Propiedades Físicas del Aluminio

El aluminio es un metal blando brillante, que pulido semeja a la plata. Cristaliza en la red cúbica centrada en las caras. Su peso específico es igual a 2,699, es decir, casi 1/3 del hierro (7,87). El único metal industrial más ligero que el aluminio es el magnesio, de peso específico 1,74. Su conductividad eléctrica es un 60% de la del cobre y 3.5 veces mayor que la del hierro. Su punto de fusión es de 660°C y el de ebullición 2450°C. Este punto de fusión relativamente bajo, unido a su punto de ebullición bastante alto facilita su fisión y moldeo.

Propiedades Químicas del Aluminio

La propiedad química más destacada del aluminio es su gran afinidad con el oxígeno,



por lo que se emplea, entre otras cosas, para la desoxidación de los baños de acero, para la soldadura aluminotérmica (Al + FeO₂), para la fabricación de explosivos, etc.

A pesar de esto y aunque parezca un contrasentido, el aluminio es completamente inalterable en el aire ya que se recubre en frío, de una delgada película protectora de alúmina anhidra Al₂O₃ muy adherente y compacta, cuyo volumen es 1.28 veces la del metal de que proviene.

Una película reciente de alúmina natural tiene un espesor de 0.01μ; en frío, es necesario que transcurra más de un año para que llegue a tener 0.1μ.

Por calentamiento en aire seco, se llega a una oxidación más rápida a 500°C:

- Sobre aluminio de 99.99% la capa reciente de 0.01μ alcanza 0.741μ en 12 horas, para estabilizarse hacia 0.90μ después de 48 horas.

- Sobre aluminio de 99.5%, la capa de óxido alcanza 0,6μ de espesor después de 250 horas a 500°C y continúa creciendo.

Debido a esta película protectora, resiste también la acción del vapor de agua, el ataque del ácido nítrico concentrado y muchos otros compuestos químicos. En cambio, es atacado por el ácido sulfúrico, el clorhídrico, el nítrico diluido y por las soluciones salinas.

Propiedades Mecánicas del Aluminio

Las propiedades mecánicas más interesantes en el aluminio son su débil resistencia mecánica y su gran ductilidad y maleabilidad, que permite forjarlo, trefilarlo en hilos delgadísimo y laminarlo en láminas o panes tan finos como los de oro, hasta de un espesor de 0.004 mm (0.4μ). A la temperatura de 500°C se vuelve frágil y se puede pulverizar fácilmente.

Aplicaciones del Aluminio

El aluminio tiene multitud de aplicaciones: su bajo peso específico lo hace útil para la fabricación de aleaciones ligeras, extensamente empleadas en construcciones aeronáuticas y en general cada vez más en los vehículos de transporte (automotores, automóviles, etc.).

Su elevada conductividad eléctrica lo hace útil para la fabricación de conductores eléctricos de aluminio técnicamente puro o en forma de cables armados con acero galvanizado.

Su elevada conductividad calorífica e inalterabilidad lo hacen útil para la fabricación de utensilios de cocina y, en general, para aparatos de intercambio de calor.

Su maleabilidad lo hace útil para la fabricación de papel de aluminio, en lo que se emplea actualmente un 10% de su producción total.

Su resistencia a la corrosión, lo hace útil para la fabricación de depósitos para ácido acético, cerveza, etc. También se emplea en forma de chapas para cubiertas de

edificios. Y reducido a polvo para la fabricación de purpurinas y pinturas resistentes a la corrosión atmosférica.

Sus propiedades reductoras lo hacen útil para la desoxidación del hierro y otros metales y para las soldaduras aluminio-térmicas.

Tabla N° 60: Constantes del Aluminio

<i>Propiedad</i>	<i>Constante</i>
<i>Símbolo</i>	<i>Al</i>
<i>Número Atómico</i>	<i>13</i>
<i>Peso Atómico</i>	<i>26.98</i>
<i>Cristalización en la red cúbica centrada en la cara</i>	<i>$a=4.04^3$ cm.</i>
<i>Peso Específico</i>	<i>2.699</i>
<i>Conductividad Eléctrica a 20°C</i>	<i>34.6 m/Ohm.mm²</i>
<i>Resistividad Eléctrica a 20°C</i>	<i>2655 microhms. cm²/cm.</i>
<i>Conductividad Calorífica a 0°C</i>	<i>0.53 cal/cm. x s. °C</i>
<i>Coefficiente de Dilatación Lineal de 20°C a 100°C</i>	<i>23.6 x 10⁶ x °C</i>
<i>Punto de Fusión</i>	<i>660°C</i>
<i>Calor Latente de Fusión</i>	<i>94.5 cal/gr.</i>
<i>Calor Específico Medio</i>	<i>0.215 cal/g. °C</i>
<i>Punto de Ebullición</i>	<i>2450°C</i>
<i>Calor de Combustión</i>	<i>380.8 Kcal/mol.</i>
<i>Equivalente electroquímico</i>	<i>0.3354 gr/amp.hora</i>
<i>Módulo de elasticidad</i>	<i>7200 kg/mm²</i>
<i>Resistencia a la tracción Fundido</i>	<i>9.12 kg/mm²</i>
<i>Resistencia a la Tracción Laminado (duro)</i>	<i>18.28 kg/mm²</i>
<i>Resistencia a la Tracción Recocido (blando)</i>	<i>7.11 kg/mm²</i>
<i>Dureza fundido</i>	<i>24.32 HB</i>
<i>Dureza Laminado duro</i>	<i>45-60 HB</i>
<i>Dureza recocido</i>	<i>15 - 25 %</i>
<i>Alargamiento fundido</i>	<i>18 - 25 %</i>
<i>Alargamiento laminado duro</i>	<i>3 - 5 %</i>
<i>Recocido</i>	<i>30 - 45 %</i>
<i>Contracción al solidificarse fundido en arena</i>	<i>1,600 %</i>
<i>Contracción al solidificarse en coquilla</i>	<i>1,825 %</i>

A N E X O I I I

CARBURO DE SILICIO

El carburo de silicio, SiC, es un compuesto en proporción simple de los pesos de combinación de los dos elementos, que en el sistema periódico figuran consecutivamente, observándose ciertas analogías entre los caracteres de ambos, pero que por la manera de presentarse en la naturaleza, casi podría decirse que representan dos mundos distintos.

En efecto, el carbono, principal vehículo de toda vida orgánica, representa por su cuantía una parte alicuota pequeña de los elementos existentes en la tierra, mientras que el silicio, componente indispensable de casi todas las rocas, es el prototipo de la naturaleza inorgánica y es con el oxígeno el elemento constitutivo más difundido de nuestro planeta.

Propiedades del Carburo de Silicio

El carburo de silicio cristaliza en cuerpos hexagonales, tabulares o apuntados, de 3,2 de densidad, fuerte dispersión y color gris verdoso, que en los cristales muy puros debe faltar por completo. El coeficiente de dilatación es sumamente pequeño, pudiendo ser introducido en agua fría el material calentado al rojo blanco sin que se rompa o estalle.

Ni el agua ni los ácidos le atacan a la temperatura ordinaria. El vapor de agua le oxida a 1300 hasta 1400°C, el cloro no le descompone sino a temperaturas superiores a 600°C, el oxígeno inicia a partir de 1000°C una acción sumamente lenta. Los álcalis y peróxidos en fusión así como los óxidos metálicos determinan una oxidación total, que es utilizada para la investigación del silicio.

Aplicaciones del Carburo de Silicio

La parte inmensamente mayor de la producción se utiliza como material abrasivo, en lugar del esmeril, aún cuando el carburo de silicio es más costoso, se emplea para las mismas aplicaciones que el esmeril, con más eficacia y rapidez, pues el trabajo se ejecuta en un tiempo que varía del tercio al cuarto del requerido cuando se emplea el esmeril.

En la acción esmerilante está también basada la aplicación de este producto mezclado con cemento u hormigón para pavimentos sujetos a gran desgaste.

El polvo de carburo de silicio se emplea para cortar el vidrio para tallarlo y para pulirlo.

La resistencia al fuego y la escasa dilatabilidad térmica del SiC pueden aprovecharse, en primer lugar, para enbadurnar con una papilla compuesta de SiC (amorfo y cristalino) desmenuzado y disolución de silicatos de potasa las partes de los muros o de electrodos expuestas al fuego y, en segundo lugar, para la fabricación de piedras o ladrillos completos, muflas y otras piezas moldeadas. Únicamente hay que evitar que tales objetos entren en contacto con sustancias básicas cuando se encuentren sometidos a temperaturas altas.

El SiC amorfo, se emplea para preparar ladrillos sumamente refractarios y para construir las retortas empleadas en la destilación del zinc.

Se a demostrado que el SiC reduce la plata, el cobre, el níquel y el plomo de los cloruros correspondiente.

Por la acción del SiC sobre los óxidos metálicos se puede obtener muchos siliciuros metálicos. Esta reacción se puede emplear para la preparación de aceros ternarios o cuaternarios en una sola operación.

En combinación con la conductibilidad eléctrica se utilizan las propiedades refractarias del SiC para la fabricación de resistencias destinadas a los más diversos usos, resistencias para los aparatos de protección de las instalaciones eléctricas, para el caldeo de hornos eléctricos de mufla y otros aparatos de calefacción, cuya forma es susceptible de acomodación a las más diversas necesidades así de la economía domestica como de la industria.

B I B L I O G R A F I A

1. *ACHESON J., Duncan; "Control de Calidad y Estadística Industrial", Ediciones Alfa Omega. Quinta Edición, 1989*
2. *ASTM B212-89, Standard Test Method for Apparent Density of Free-Flowing Metal Powders.*
3. *ASTM B214-86, Standard Test Method for Sieve Analysis of Granular Metal Powders.*
4. *ASTM B331-85 (Reapproved 1990), Standard Test Method for Compressibility of Metal Powders in Uniaxial Compaction.*
5. *ASTM B527-85, Standard Test Method for Tap Density of Powders of Refractory Metals and Compounds by Tap-Pak Volumeter.*
6. *ASTM E92-82, Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.*
7. *ASTM E112-88, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.*
8. *ASTM Designation E562 - 83 , "Standard Practice for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count".*
9. *CALVO, Felipe A.; "Metalografía Práctica". Editorial Alhambra S.A. 1972. (páginas: 13-15).*
10. *CARDENAS Y. Hugo, Fabricación Control y Garantía de Calidad de Elementos Combustibles de Bajo Enriquecimiento (ECBE) tipo placa (MTR) para Reactores de Investigación; Informe de capacitación en la C.N.E.A. del 05/12/83 al 30/12/83. Instituto Peruano de Energía Nuclear delegación Buenos Aires.*
11. *CARO, Rafael. "Física de Reactores Nucleares" . Sección de Publicaciones de la Junta de Energía Nuclear. Madrid 1976.*
12. *CASTILLO, Francisco J. ; MARIN, Jorge E. , CHAVEZ, Juan C. ; HECHELEITNER, Hernán; TESTART, Eduardo; CORTES, Douglas. "U₃O₈ para Combustibles Tipo Disperso". Comisión Chilena de Energía Nuclear. NUCLEOTECNICA, Año 6, N° 11, Octubre 1986. (páginas: 23-30).*

13. CROVAT, M. F.; NUKEM GmbH D-6450 Hanau 11. *Fuel Element Development. Covering the Advanced Fuel and Cycle Requirements of the JANUS 30 MTR (SEM photographs).*
14. DOYLE, Laurence E.; KEYSER, Carl A. , LEACH, James L. , SCHRADER, George F. ; SINGER, Morse B. "Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros". Prentice Hall Hispanoamericana S. A. Tercera Edición. (páginas: 218-232).
15. PRANESH, B. ASWATH. *Overview of Processing and Properties of Ceramic Materials. The University of Texas at Arlington UTA 1895-1995. (Tablas N° 1,2,3,4).*
16. FREUND, WILLIAMS, PERLES. "Estadística para la Administración con Enfoque Moderno" , Quinta Edición, Prentice Hall Hispanoamericana S.A. , Mexico 1988.
17. HILL, Red. "Introducción a la Metalurgia Física" . (páginas: 599-625).
18. HOLDEN, A. N. , General Electric Company , "Dispersed Fuel Elements". *American Society for Metals and U.S. Atomic Energy Commission (Division of Technical Information Monograph series on Metallurgy in Nuclear Technology Gordon and Breach Science Publishers. New York, London, Paris. (páginas: 1-6, 35).*
19. IAEA - TECDOC - 467. "Standardization of Specifications and Inspection Procedures for LEU Plate Type Research Reactor Fuels" . *Report of a consultants meeting organized by the International Atomic Energy Agency and Held in Geesthacht, Federal Republic of Germany. 16 - 18 april 1986. (páginas: 12, 13, 25).*
20. IPOHORSKI, M. ; MARRAPODI, M. R. ; "Microscopía Electrónica de Barrido" *Comision Nacional de Energía Atómica Dependiente de la Presidencia de la Nación CNEAT 31/125. Buenos Aires 1973 (Reimpresión 1976).*
21. INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR (IPEN). "Estudio Preliminar Planta Piloto de Elementos Combustibles Multipropósito" . 1987.
22. JIMENO, Emilio; MONALL F. R. ; "Metalurgia General Extractiva, Física, Mecánica y Química". Tomo II. Universidad de Madrid, Facultad d Ciencias, Laboratorio de Metalurgia. Madrid 1955.

23. LOPEZ RODRIGUEZ, M.; MARINES F., Pascual; "Materiales Nucleares" Tomo I. Servicio de Publicaciones de la Junta de Energía Nuclear. Madrid 1971. (páginas: 5-14, 151-179).
24. MARIN, J. ; CASTILLO, J. ; CHAVEZ J. C. ; HECHENLEITNER, H. ; TESTART, E. ; CORTES, D. "Fabricación de Combustibles Tipo Disperso (M.T.R.)". Comisión Chilena de Energía Nuclear. NUCLEOTECNICA, Año 6, N° 11, Octubre 1986. (páginas: 11-22).
25. MARTIN, M. M. WERNER, W. J. ; LEITTEN, C. F. ; ORNL-TM-1377. "Fabrication of Aluminum Base Irradiation Test Plates". Metals and Ceramics Division. February 1966, Contract. N° W-7405-eng-26. (páginas: 6,7).
26. MINGO, Arnaldo; AUDERO, Miguel; GOMEZ CONSTELA, Alejandro; "Desarrollo de Formadores de Poros para Fabricación de Pastillas de UO_2 dimensionalmente Estables bajo Irradiación"; Trabajo Especial de Ingeniería Nuclear; Instituto Balseiro Universidad Nacional de Cuyo; San Carlos de Bariloche - Junio 1981.
27. MONTGOMERY, Douglas C. "Control Estadístico de la Calidad". Grupo Editorial Iberoamericano M. Mexico 1991 (págs. 237 - 263).
28. MONTGOMERY, Douglas C. "Diseño y Análisis de Experimentos". Grupo Editorial Iberoamericano. Mexico 1991.
29. NUPAVER, Albert J. ; WITSBERGER, John C. "Particle Shape Analysis", Handbook of Metals. Volumen 7.
30. ORNL/TM - 11809
31. PERUVIAN NUCLEAR CENTER ; Oscar Miroquesada de la Guerra (RACSO). Technical Information - 1996.
32. QUINTANILLA, Joel O. , Procesos Pulvimetalúrgicos para Incrementar el valor agregado de Metales Nativos Peruanos. Instituto de Investigación de la Universidad de Lima.
33. STATISTICAL GRAPHICS CORPORATION, USERIS GUIDE; "Statistical Graphics System" , A plus ware product. STSC, Inc.
34. STOHMANN, F.; KERL, Bruno; BUNTE; NEUMAN; BING; HAYAUCK, T. "Gran Enciclopedia de Química Industrial. Tomo XII. F. Seix Editor Barcelona. (páginas: 174-175).

35. THE AMERICAN SOCIETY FOR METALS. "Metals Handbook" 1948 Edition. (páginas: 301, 302).
36. TESTART, Eduardo; CASTILLO, Javier; CHAVEZ, Juan C. ; HECHENLEITNER, Hernán; MARIN, Joego. "Siliciuros de Uranio como alternativa de Combustibles para Reactores de Investigación". Comisión Chilena de Energía Nuclear. NUCLEOTECNICA, Año 6, N° 11, octubre 1986. (páginas: 31-36).
37. UNDERWOOD, Ervin E. "Metalografía Cuantitativa". Handbook of Metals, Vol. 9.
38. ZHU J. L., NECHAEV A., TAUCHID M., Capacitación sobre el Ciclo del Combustible Nuclear para los Países en Desarrollo; OIEA Boletín, 2/1988.
39. ZUÑIGA G., Agustín; LAMAS V., José; AVILA L., Juan, HUAPALLA C., Israel; "Física de los Reactores Nucleares de Investigación y Sus Aplicaciones", VIII Simposio Peruano de Física, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna. Diciembre 1989. (páginas: 15-18, 20,33,34).