

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

PELETIZACION POR FORMACION DE CAPAS. MECANISMO DE
CRECIMIENTO, VARIABLES OPERATIVAS Y PROPIEDADES.

ANA LIA CAVALIERI

- 1983 -

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

PELETIZACION POR FORMACION DE CAPAS. MECANISMO DE
CRECIMIENTO, VARIABLES OPERATIVAS Y PROPIEDADES.

ANA LIA CAVALIERI

1983

Agradecimientos:

Al Doctor Enrique Pereira por su intervención durante el desarrollo de este trabajo y por haber permitido su realización en los laboratorios bajo su dirección.

Al Doctor José M. Porto López por su valiosa colaboración en el desarrollo del presente estudio con oportunas sugerencias y discusiones.

Al Doctor Teodoro G. Krenkel por su intervención en la iniciación de este trabajo y al Ing. Rolando Poppi por la lectura crítica del manuscrito.

A quienes colaboraron en el diseño, construcción y mantenimiento de los equipos utilizados, en la confección de los dibujos y fotografías que acompañan el texto, en el programa de computación y especialmente a la Sra. Alicia Aguayo por el trabajo dactilográfico.

A mi esposo y compañeros del CETMIC por su estímulo y tolerancia durante el curso del trabajo.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por su apoyo económico.

	pág.
4. <u>MECANISMOS DE CRECIMIENTO</u>	25
5. <u>PARTE EXPERIMENTAL</u>	59
5.1. <u>CreCIMIENTO de pelets. Mecanismo de formación de capas</u>	59
5.1.1. MATERIALES Y EQUIPOS	59
5.1.2. TECNICAS OPERATIVAS	60
5.1.3. PARAMETROS A MEDIR Y EXPRESION DE RESULTADOS	64
5.1.4. TECNICAS DE MEDIDA	65
5.1.5. REPRODUCIBILIDAD DE DATOS	66
5.1.6. RESULTADOS Y DISCUSION	66
5.1.7. CONCLUSIONES	93
5.2. <u>Correlación entre las características de las materias primas y variables operativas con las características finales de los pelets obtenidos.</u>	94
5.2.1. INTRODUCCION	94
5.2.2. MATERIALES Y EQUIPOS	94
5.2.3. TECNICAS OPERATIVAS	96
5.2.4. PARAMETROS A MEDIR Y EXPRESION DE RESULTADOS	101
5.2.5. TECNICAS DE MEDIDA	101
5.2.5.1. Determinación de los valores de resistencia a la compresión bajo carga.	101
5.2.5.2. Determinaciones de porosidad	102
5.2.6. RESULTADOS Y DISCUSION	103
5.2.6.1. Influencia del tiempo de rodamiento en las características mecánicas y texturales de pelets obtenidos en sistema discontinuo.	103

	pág.
5.2.6.2. Influencia del tiempo de rodamiento total en la resistencia a la compresión de pelets verdes obtenidos en sistema semi-continuo.	109
5.2.6.3. Variaciones de la porosidad del pelet a lo largo del diámetro y de pelets de distinto diámetro con el contenido de agua.	112
5.2.7. CONCLUSIONES	116
6. CONSIDERACIONES GENERALES	118
7. BIBLIOGRAFIA	121
8. APENDICES	129

1. INTRODUCCION

La peletización (1-8) es la técnica a través de la cual se obtienen aglomerados en forma esférica (pelets); por rodamiento de los finos en equipos tales como disco o tambor rotatorio o superficie vibratoria y mediante la adición de cantidades controladas de agua que actúa como líquido ligante. Pueden además incorporarse otros ligantes y/o aditivos de acuerdo a los requerimientos de calidad de los pelets.

La peletización de los materiales finos mejora las condiciones de operación, tanto si se trata de materias primas como de polvos producidos durante la obtención de los productos: i) se disminuyen así los problemas de contaminación que surgen del manejo de finos; ii) se mejoran las cargas de los hornos resultando éstas más homogéneas, con los consiguientes beneficios derivados del aumento de velocidad de reacción; iii) se eliminan problemas de segregación de componentes de mezclas; iv) se facilita el almacenaje de materiales.

El campo de aplicación de la técnica de peletización como una forma de aglomeración de finos es muy amplio y abarca desde la industria metalúrgica (hierro, cinc) hasta la industria de fertilizantes sin dejar de lado la importante industria cerámica (materiales de alta alúmina, mezclas refractarias, óxidos de circonio y de magnesio, mullita, mezclas para vidrios y fritas, soportes para catalizadores, etc.)(2, 3, 9, 10 - 22).

Las distintas técnicas de aglomeración empleadas (1, 3, 7, 9, 12, 21, 23) incluyen compactación por presión, extrusión, briqueteado, nodulización, peletización, sinterizado.

La peletización es empleada con grandes ventajas prácticas y económicas sobre las demás, o bien como complemento de alguna de ellas, siendo éste el

caso de preparación de materias primas que alimentan las unidades de sintetizado.

La operación se conduce según los requerimientos especiales de los pelets en cuanto a sus características texturales y mecánicas. Para ello se controlan tanto las condiciones operativas como los aditivos y/o ligantes usados. Si los pelets han de constituir la carga de un horno, por ejemplo, deberán tener valores mínimos de resistencia a la rotura bajo carga de modo tal que puedan soportar el peso de la carga del horno. Estos valores están relacionados directamente con el diámetro de pelet y así, deberá controlarse tanto su tamaño como su distribución granulométrica, lo que a su vez determinará la porosidad del lecho con incidencia en las velocidades de reacción. Asimismo, los pelets deberán soportar, desde su obtención hasta su uso, los esfuerzos derivados del transporte y de las caídas (descarga de una tolva de almacenaje, por ej.), por lo que deberán ajustarse a valores particulares de los índices en ensayos de atrición en tambor y ensayos de caídas.

2. OBJETIVOS

En los circuitos de peletización utilizados en la práctica, la operación se lleva a cabo casi universalmente en forma continua y sólo una pequeña fracción de los lechos que constituyen la carga de los equipos de peletización, consiste en pelets que están transcurriendo sus etapas de nucleación o transición. Es así que la cinética y mecanismos que tienen lugar en la etapa de crecimiento de pelets, son factores determinantes a tener en cuenta en el establecimiento de las variables operativas con el fin de obtener un control satisfactorio de la calidad del producto terminado.

De la revisión de los antecedentes bibliográficos existentes sobre el tema de peletización, se evidencia que en la casi totalidad de los casos se trata de estudios que enfocan el problema en forma parcial, analizando sistemas discontinuos en las primeras etapas de la operación (nucleación y transición), con predominio del mecanismo de crecimiento por coalescencia.

El presente trabajo es parte de un proyecto que incluye estudios de consolidación de sólidos, tendientes a dilucidar aspectos vinculados con la producción, comportamiento y propiedades de aglomerados.

De este modo, el objetivo principal de este trabajo fue establecer las características principales del crecimiento de pelets, cuando el mecanismo controlante es el de formación de capas, tratando de correlacionar un parámetro característico de las distribuciones de tamaño con la principal variable de operación, el contenido de agua.

Para ello, se trabajó con un sistema constituido por un disco peletizador con carga inicial de núcleos de granulometría acotada y alimentaciones continuas de líquido y sólido.

Simultáneamente, y dado que las propiedades finales de los pelets produ-

cidos además de depender de las características intrínsecas del material pelletizado, son función de las variables operativas, se establecieron correlaciones que las vinculan.

3. PELETIZACION

3.1. Definición y nomenclatura adoptada

Se define como "peletización" a la técnica de aglomeración de materiales de granulometría muy fina, a través de la cual se obtienen agregados de forma aproximadamente esférica (pelets) por rodamiento de los finos, humedecidos con una cantidad de agua controlada, en equipos adecuados, pudiendo emplearse o no, ligantes y/o aditivos.

El proceso de peletización se puede dividir en tres etapas fundamentales:

- aglomeración de finos por rodamiento en un equipo adecuado con formación de pelets (peletización).
- secado de los pelets.
- endurecimiento térmico de los pelets secos.

La primera etapa es la decisiva para la obtención de buenos productos ya que pelets de buena calidad en verde conducirán a pelets de alta calidad en la etapa final. Muchos de los vocablos con que se denominan las etapas del proceso de peletización y los productos que se obtienen en cada una de ellas, así como los mecanismos por los cuales se forman y crecen los pelets, son de origen inglés y no existen palabras equivalentes en idioma castellano. Por este motivo, a continuación se enumeran las palabras que se adoptaron en este trabajo para usarse en reemplazo de los términos ingleses.

Se incluye también una descripción sintética del significado en cada caso.

- Etapas del proceso =

Peletización = balling = denominamos así al proceso en su totalidad, y en particular a la primer etapa de aglomeración de finos por rodamiento.

Consolidación térmica = pelletization = denominamos así a la última etapa del proceso que implica endurecimiento de los pelets por tratamiento térmico.

- Productos de peletización =

Pelets = balls = green pellets = producto de la primera etapa de peletización.

Pelets consolidados = fired pellets = producto obtenido en la etapa de tratamiento térmico.

- Mecanismos de peletización =

Nucleación = Nucleation = formación de nuevos pelets o núcleos (nuclei) en el peletizador a partir de la alimentación humedecida.

Coalescencia = Coalescence = formación de gránulos grandes a partir de dos o más gránulos que colisionan.

Fractura = Breakage = formación de fragmentos "hijos" de igual o diferente tamaño.

Abrasión y transferencia = Abrasion-transfer = transferencia de masas pequeñas de material de una especie a otra, debido a la interacción entre dichas especies y abrasión de las mismas.

Formación de capas = Snowballing = layering = incorporación de finos de la alimentación a los núcleos o pelets ya existentes.

- Otros términos =

Autoconservación = self-preserving = comportamiento de una carga de pelets en la que se mantiene la relación entre los diámetros de los gránulos más grande y más chico.

Semilla = seed = aglomerado de tamaño pequeño (alimentado al peletizador) a partir del cual crece el pelet.

3.2. Peletización

3.2.1. COHESION DE LOS PELETS Y ROL DEL AGUA

La primera etapa del proceso es la que ha sido más estudiada, no sólo porque es decisiva en las propiedades finales de los pelets, sino porque, en

algunos casos es posible hacer que las propiedades de los pelets caigan dentro de las especificaciones para determinados usos, lo que hace innecesaria la etapa térmica final.

El agua juega un importante papel en la peletización de sólidos de granulometría muy fina, siendo la cantidad de agua necesaria un valor crítico que depende del material a peletizar. El ámbito de contenidos de agua dentro del cual es factible la peletización (rango de peletizabilidad) es normalmente muy estrecho. Fuera de este rango es imposible formar pelets, ya sea porque se emplean contenidos de agua más altos y la carga del peletizador se convierte en una masa demasiado fluida, o bien por defecto de agua, en cuyo caso, las partículas conservan su identidad sin unirse en forma de pelets (7, 24-33). Las fuerzas responsables de la cohesión de las partículas finas que constituyen los pelets son de dos tipos: i) físicas (debidas a la tensión superficial del agua adicionada) y ii) mecánicas (de rodamiento).

Cuando las partículas son sometidas a la acción de rodamiento en el equipo de peletización, la fuerza gravitatoria que actúa a través de los cuerpos esféricos más grandes, puede aplicar una gran presión sobre las partículas más pequeñas en los puntos de contacto de éstas con los cuerpos esféricos o sobre las partículas de la superficie de dichos cuerpos. Además, cuando las partículas son forzadas a un íntimo contacto, se fracturan sus bordes, creando finos que ocuparán los espacios vacíos. Luego las partículas son mantenidas juntas por el efecto del agua superficial de las mismas (7, 34, 35). La magnitud de estas fuerzas asociadas con la tensión superficial del líquido, está determinada por el tamaño de las partículas, la estructura del gránulo y el contenido de humedad. Newitt y Conway-Jones (7) han descripto tres estados de contenido de agua para un arreglo de partículas esféricas (Fig.3.1.) a saber:

- estado pendular: el agua se encuentra presente en el gránulo sólo en los puntos de contacto de las partículas. Esta situación se da a bajos contenidos de agua, donde la relación entre la cantidad de líquido y el volumen de los espacios vacíos es muy baja y el aire forma entonces una fase continua. La resistencia de estos enlaces pendulares se debe a la presión capilar negativa y a la tensión superficial del líquido. En este estado las fuerzas cohesivas son pequeñas, el gránulo tiene poca plasticidad superficial y forma irregular.
- estado funicular: por aumento del contenido de líquido o por disminución del volumen de poros, cuando la granulación procede, el líquido rodea totalmente las partículas formando una película continua y quedando aire atrapado.
- estado capilar: se trata de un sistema de sólo dos fases, líquido-sólido. Los espacios de poros han sido llenados completamente por agua y hay un ligero exceso de agua en la superficie lo que confiere al aglomerado una cierta plasticidad.

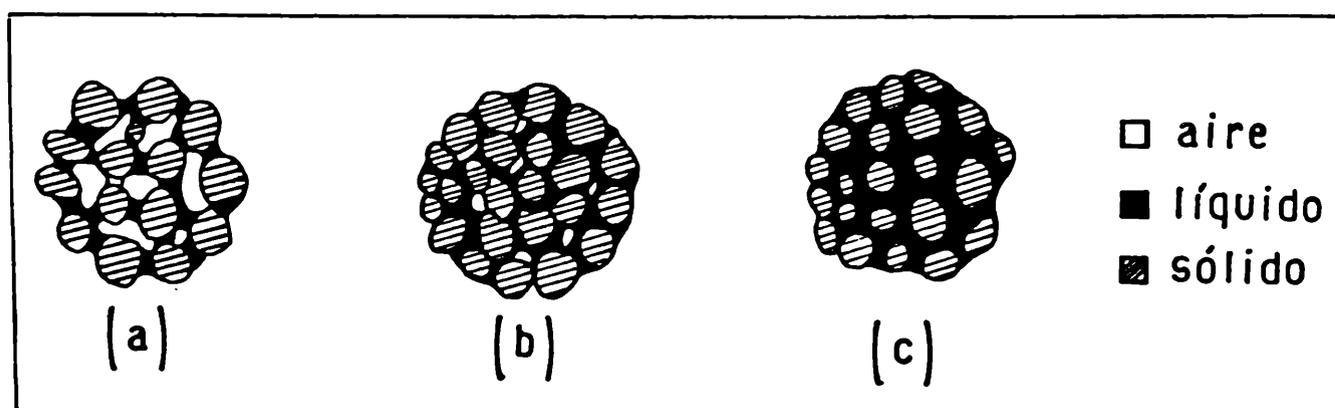


FIGURA 3.1.- Estructura de un aglomerado poroso de acuerdo a la distribución relativa de las fases aire-líquido-sólido: (a) estado pendular, (b) estado funicular, (c) estado capilar. Newitt, Conway-Jones (7).

Las fuerzas capilares constituyen sólo una de las fuerzas físicas (o naturales) que junto con las mecánicas (o aplicadas), contribuyen a la formación de los pelets (7, 23, 34, 36). De la magnitud de estas fuerzas depende la resistencia de los mismos. En general estas fuerzas físicas se pueden dividir de acuerdo a sus orígenes en:

- fuerzas interfaciales y de presión capilar en superficies líquidas móviles (ya descriptas);
- fuerzas de adhesión y cohesión en puentes de enlace no libremente móviles;
- atracción entre partículas sólidas por fuerzas de van der Waals, magnéticas o cargas electrostáticas;
- entrelazamiento de partículas de acuerdo a su forma.

3.2.2. EQUIPOS DE PELETIZACION (2, 19)

Con el objeto de asegurar la producción de buenos pelets, es necesario contar con un adecuado equipo donde se logre un buen comportamiento mecánico mediante movimientos del material que: i) permitan una distribución homogénea de la humedad superficial de los pelets y un máximo número de puntos y superficies de contacto; ii) produzcan presiones de modo que se reduzca la porosidad de los pelets y confieran forma esférica a los mismos, inicialmente irregulares.

En los comienzos del empleo de la técnica de peletización fueron usados tambores peletizadores (especialmente en la peletización de minerales de hierro) y discos peletizadores para cemento y fertilizantes. En la actualidad, se emplean alternativamente discos en la industria del hierro, con ciertas ventajas sobre los tambores. También se utilizan en menor grado otros diseños, tales como tambores de conos múltiples o conos de peletización. Estos

equipos tienen dos características comunes: su ubicación según un plano inclinado y su rotación, donde se produce el principal efecto por rodado del material sujeto al balance de tres fuerzas que actúan sobre las partículas (la fuerza gravitatoria, la resistencia por fricción y la fuerza centrífuga). Esto hace que se defina una velocidad crítica de rotación del equipo que corresponde a la máxima velocidad a la cual la fuerza centrífuga es tal que no arrastra el material que cae por efecto gravitatorio desde la parte más alta del equipo. A velocidades mayores el material será centrifugado (Fig. 3.2.).

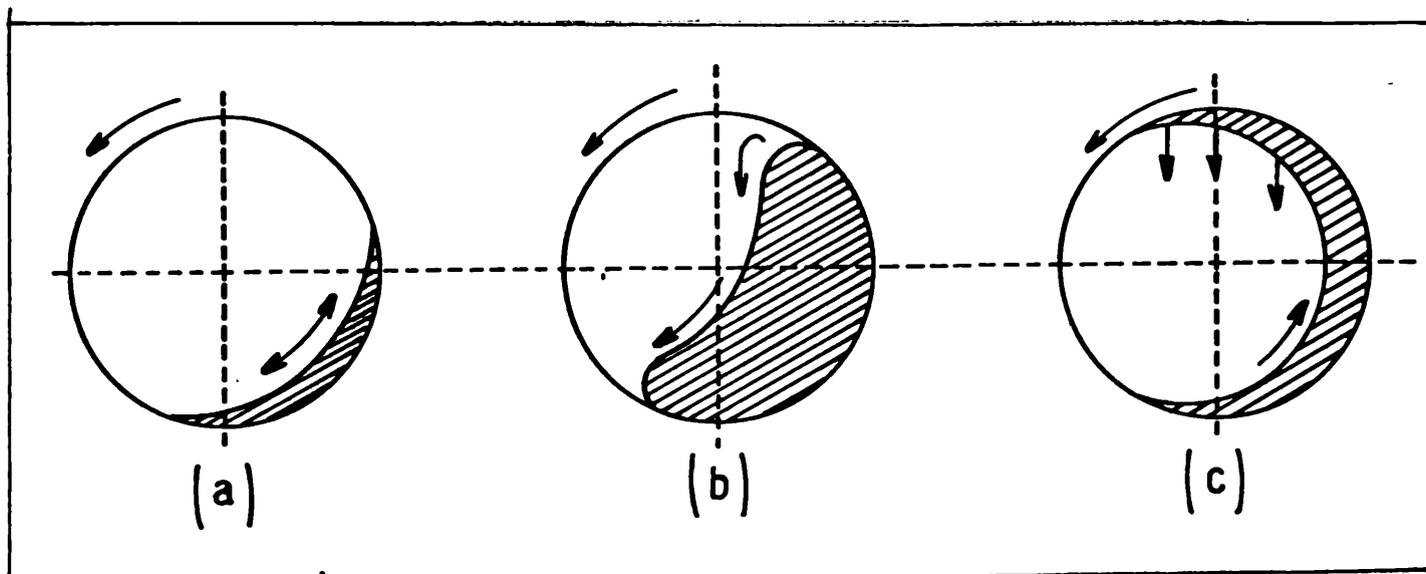


FIGURA 3.2.- Movimiento de la carga de un disco peletizador que gira a diferentes velocidades: (a) velocidad muy baja (deslizamiento), (b) velocidad óptima (rodamiento), (c) velocidad muy alta (caída sin rodamiento).

A continuación se da una muy breve descripción de los equipos indicados a través de la cual pueden deducirse los motivos de la elección de disco peletizador para la realización de este trabajo.

3.2.2.1. Tambor peletizador (2,19)

Es un cilindro rotatorio ligeramente inclinado, abierto en los dos extre-

mos. El material se introduce por uno de los extremos donde se ubican los alimentadores de agua. El interior del tambor generalmente se cubre con una capa de material fino humedecido cuyo espesor se regula por el empleo de rascadores.

Para lograr una operación exitosa deben tenerse en cuenta las siguientes características principales del tambor:

- relación longitud/diámetro: usualmente se emplean tambores con una longitud 2,5 a 3,5 veces su diámetro, valor determinado empíricamente.
- ángulo de inclinación entre el eje del tambor y la horizontal: son operados a ángulos muy bajos (por ej. 6°) de modo de aumentar el tiempo de residencia y disminuir el reciclaje de pelets pequeños.
- velocidad de rotación: las velocidades demasiado altas o demasiado bajas deben ser evitadas. Se emplean velocidades de 25-35% de la velocidad crítica (velocidad a partir de la cual el material es centrifugado). Aumentar la velocidad es perjudicial, pues se imparte movimiento violento a la carga con la consiguiente degradación de los pelets en formación.
- carga del tambor: varía con el material y generalmente es muy baja (alrededor del 5% del volumen del tambor).

Todas estas variables condicionan la velocidad de producción de los pelets y regulan el porcentaje de reciclaje (que puede variar entre 50 y 100 %), siendo indispensable el tamizado del producto, con retorno del material con tamaño menor que el requerido, ya que una distribución de tamaños muy amplia en el producto terminado, es característica de estos equipos.

3.2.2.2. Disco peletizador (3, 4, 19)

Consiste en un disco con pared periférica, que rota inclinado respecto a

la horizontal.

El disco actúa como un clasificador, comenzando la clasificación ya cuando se están formando los pelets. En la Fig. 3.3. se muestran esquemas de vista de frente y perfil de las trayectorias descritas por los pelets de distinto tamaño, núcleos y/o semillas en un disco peletizador.

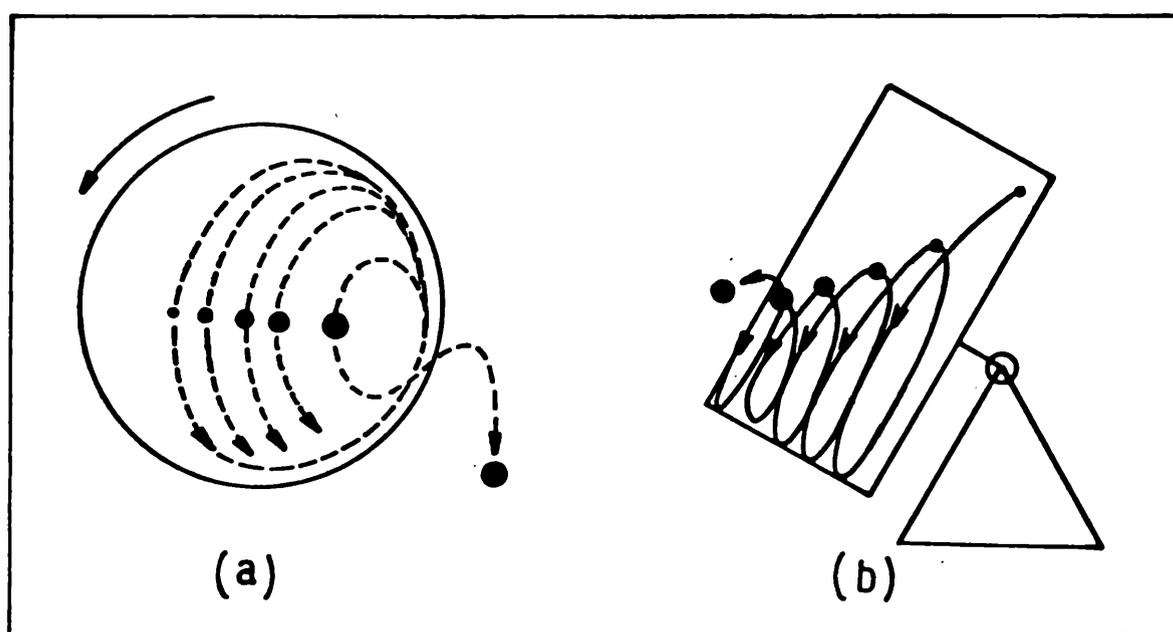


FIGURA 3.3.- Trayectorias de los pelets de la carga de un disco peletizador (a) de frente, (b) de perfil.

Los parámetros que controlan la salida del material del disco y su movimiento sobre él, son:

- diámetro del disco: el diámetro, o más precisamente el área del disco, son decisivos para la cantidad de pelets producidos, aunque no en la calidad de los mismos excepto que su porosidad disminuye ligeramente al aumentar el diámetro.

- ángulo de inclinación: la resistencia de los pelets es desarrollada por la compactación producida por los choques sufridos cuando ruedan hacia abajo en

el disco. Si disminuye la pendiente del disco, la componente de la gravedad paralela a la superficie del disco disminuye, y con ella la resistencia del pelet. Este factor hay que considerarlo en relación a la velocidad de rotación de modo de lograr la máxima utilización del disco.

- velocidad de rotación: se toma usualmente como un 70% de la velocidad crítica (velocidad a partir de la cual el material se centrifuga).. Si la velocidad es excesiva se puede disminuir la pendiente del disco.

- altura de pared periférica: al variarla se puede fijar el tiempo de residencia del material en el disco, para una pendiente y una velocidad de alimentación dadas. Para discos con diámetros menores de 4m se toma la altura igual a $(0,2 \times \text{diámetro del disco})$.

En operaciones con disco peletizador, es posible controlar el tamaño de pelet variando la ubicación de las alimentaciones líquida y sólida, ya que éstas permiten controlar la cantidad de material eficaz para la nucleación con lo que se controla la cantidad de pelets sobre el disco. Así, si hay pocos pelets, el tamaño promedio será mayor y si la carga está formada por un gran número de pelets, se descargarán los pelets más pequeños.

3.2.2.3. Cono peletizador (2, 19)

El modo de operación es intermedio entre un disco y un tambor. También existe en este caso una clasificación de tamaños por lo que se hace innecesario un reciclado como en tambor, ya que se descargan sólo los pelets que han alcanzado un determinado tamaño. Las consideraciones sobre las variables operativas, son idénticas a las ya hechas.

3.2.2.4. Tambor peletizador de conos múltiples (35)

Se trata de un tambor con una serie de compartimientos separados por ba-

ffles de modo tal que cada compartimiento tiene forma de cono truncado.

Con respecto al tambor simple, en el de conos múltiples se logra mayor tiempo de retención y se logra mayor acción de rodamiento y compactación. Además, en cada cono se clasifica el material, pasando al siguiente sólo aquellos pelets que han alcanzado determinado tamaño, con lo que se disminuye el reciclo.

3.2.2.5. Comparación entre tambor y disco (19)

Las Figs. 3.4. y 3.5. corresponden a esquemas de circuitos típicos de peletización con tambor peletizador y disco, respectivamente.

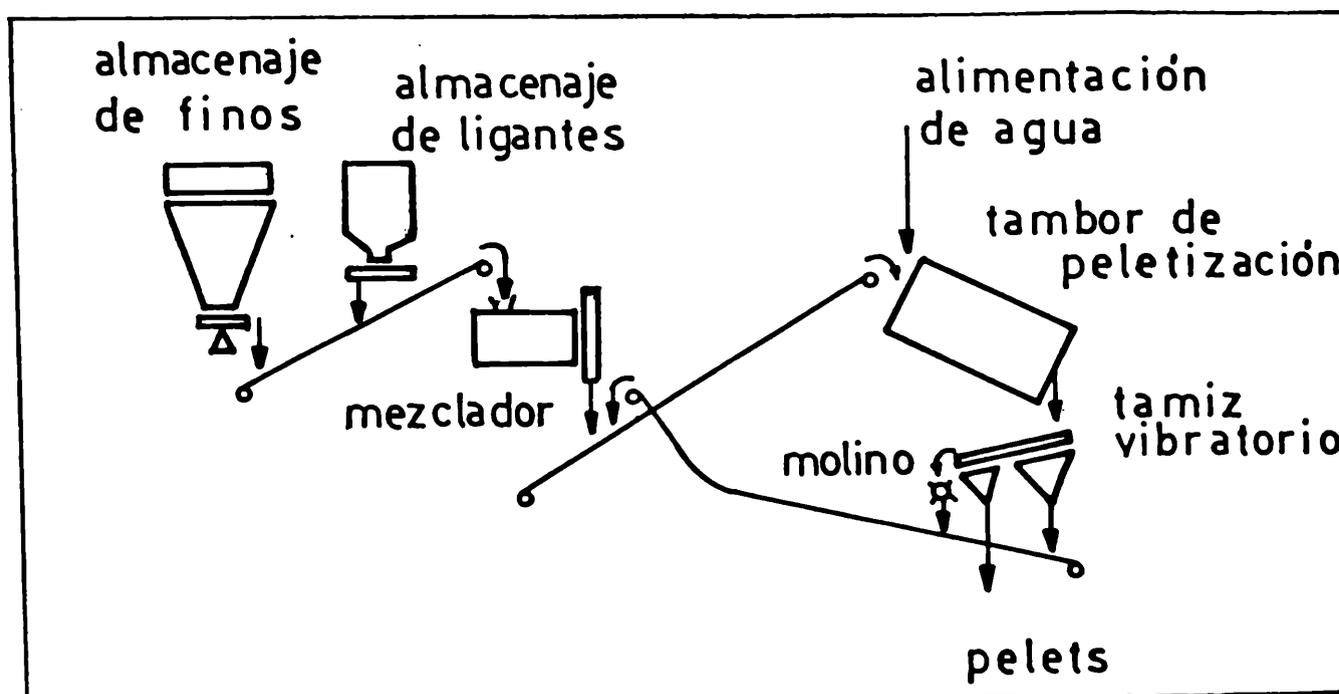


FIGURA 3.4.- Circuito típico de peletización con tambor peletizador.

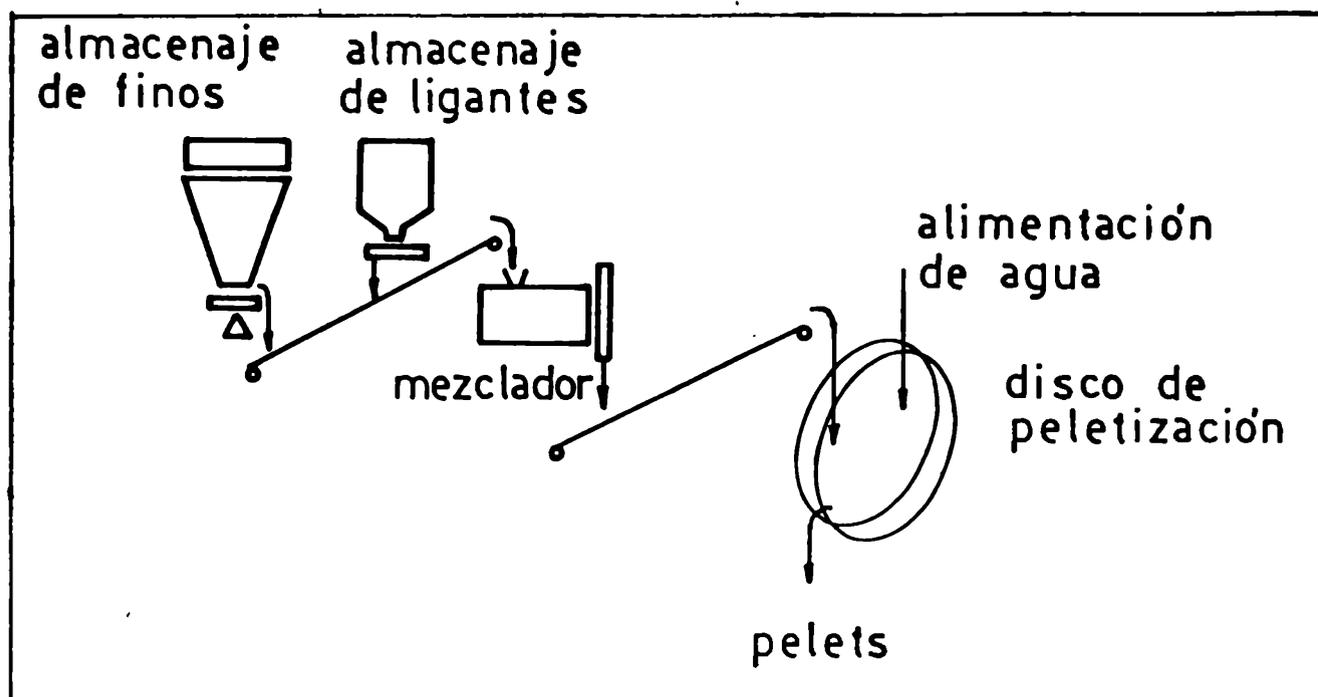


FIGURA 3.5.- Circuito típico de peletización con disco peletizador.

Aparentemente no existen diferencias cualitativas ni tecnológicas del proceso. Los pelets formados son casi de la misma calidad. Existen, sí, diferencias de costos; siendo éstos 4-8% más bajos si se emplean discos, en lugar de tambores.

La flexibilidad frente a las fluctuaciones del material alimentado es mayor en tambor que en disco. Si la alimentación se vuelve demasiado seca, se aumentará el reciclo por disminución del crecimiento de los pelets, lo que aumentará el crecimiento por formación de capas y disminuirá la formación de nuevos núcleos. Así, resultará un aumento temporario de la velocidad de producción de pelets y disminuirá el reciclo, favoreciendo la producción de núcleos y bajando la producción de pelets de tamaño mayor que el requerido.

Las plantas industriales equipadas con disco peletizador requieren un espacio 30% menor que aquéllas con tambor de la misma capacidad.

El disco requiere menor potencia y generalmente menos mantenimiento. Sin embargo, los costos de operación son mayores pues se requiere mayor supervisión.

El disco actúa como un clasificador, mientras que el producto del tambor es necesario tamizarlo y reciclar los pelets de pequeño tamaño.

3.2.3. MODOS DE TRABAJO

3.2.3.1. Operación "batch"

Es un método de trabajo útil en escala de laboratorio (7, 26, 37, 38) pero no para producción de pelets en gran escala.

El material humedecido con la cantidad de agua requerida para su aglomeración es cargado inicialmente (y por única vez) al equipo, dejándose rodar un tiempo preestablecido, sin nuevos agregados de material fino. En el tiempo, el proceso puede dividirse en tres regiones (29): nucleación, transición y crecimiento (Fig. 3.6.):

- Región de nucleación y crecimiento de núcleos: en el estado inicial, el crecimiento se debe a la energía superficial asociada a la película de agua que rodea las partículas. Cuando tales partículas entran en contacto entre sí, se destruye parte de la interfase agua-aire en los cuellos de contacto con reducción de la energía del sistema. La magnitud de la interfase destruída es función de la distribución de tamaño, forma y empaquetamiento de las partículas y del espesor de la película de agua. En los flóculos flojos así formados, el enlace se debe a la presión capilar negativa sobre la curvatura del cuello líquido. Después de un corto período de inducción se produce un reordenamien-

to y empaquetamiento parcial de las partículas en núcleos pequeños de forma aproximadamente esférica. Los núcleos así formados representan un estado energético más estable, son muy porosos y están constituidos por tres fases: agua, aire y partículas sólidas. La velocidad de crecimiento de los núcleos estaría relacionada con su superficie externa por unidad de volumen y no con la superficie específica del polvo, siendo muy pequeño el rango de tamaños en esta región.

- Región de transición: cuando la compactación por rodamiento continúa, las partículas en los núcleos son compactadas, con disminución continua de los espacios vacíos internos y llenado de los capilares con agua, produciéndose una rápida densificación. El agua es expulsada hacia la superficie del pelet y se altera el mecanismo de crecimiento. El sistema, salvo pequeñas porciones de aire ocluido, se compone de dos fases: agua y sólido. La distribución de tamaños se amplía produciéndose crecimiento por coalescencia (capítulo 4) debido a la superficie ligeramente pastosa de los pelets.

- Región de crecimiento de pelets: los pelets en esta etapa están formados por un interior muy compacto y una capa exterior ligeramente húmeda. A medida que los pelets crecen, el número de coordinación de cada partícula fluctúa rápidamente. Los pelets crecen por coalescencia según configuraciones de las cuales la tetraédrica es la más estable, adquiriendo forma esférica por rodamiento posterior. Además de coalescencia, ocurren en esta etapa otros mecanismos: decoalescencia, abrasión y transferencia de pequeños elementos de volumen, fragmentación (capítulo 4).

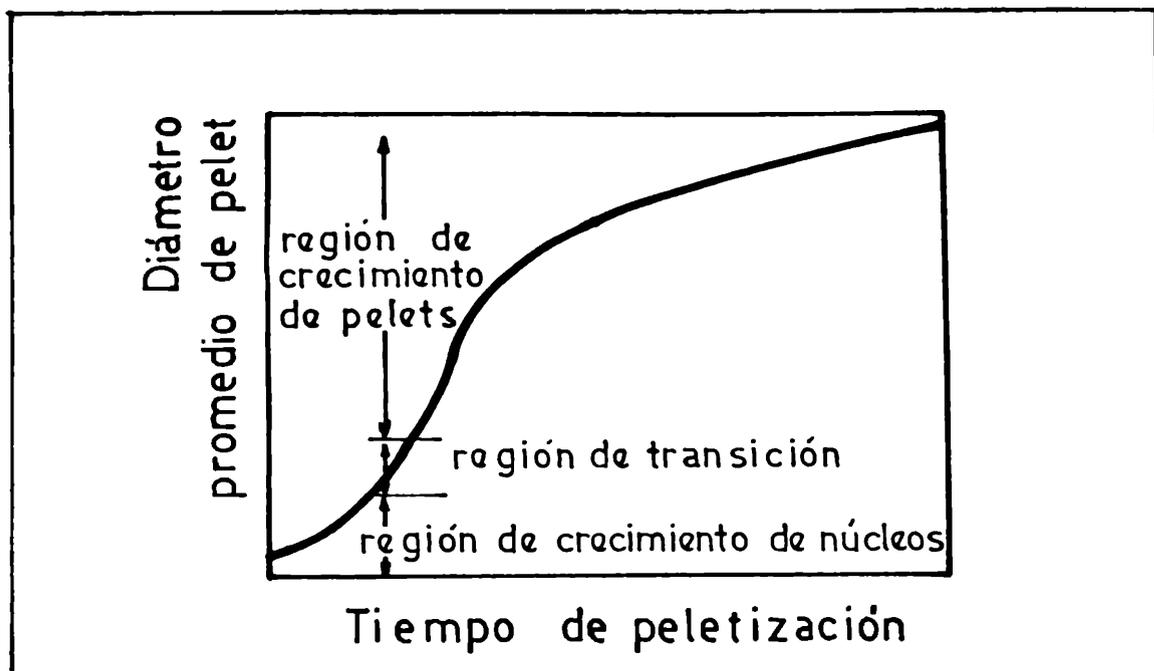


FIGURA 3.6.- Zonas de crecimiento: crecimiento de núcleos, transición y crecimiento de pelets. Kapur, Fuerstenau (29).

3.2.3.2. Operación continua

Consiste en alimentar o no inicialmente material de granulometría gruesa (semillas) con posterior alimentación continua de agua y finos y descarga de pelets por derborde en disco y por el extremo contrario en tambor, donde se efectúa un reciclaje de los pelets más pequeños y de los muy grandes previamente molidos. Es el método aplicado en escala industrial.

3.2.3.3. Operación semi-continua y operación discontinua

Son formas de trabajo para estudios en pequeñas escalas (38-41) con discos peletizadores pequeños y que consiste en cargar inicialmente semillas. Posteriormente, las alimentaciones de agua y finos se hacen en forma continua (operación semi-continua) o en forma discontinua (operación discontinua).

En ambos casos no hay desborde de pelets. Esta forma de trabajo permite realizar estudios de crecimiento de pelets así como de influencia de parámetros decisivos en las propiedades mecánicas y texturales de pelets (resistencia, porosidad).

3.2.3.4. Comparación entre las formas de operación descriptas

En la operación "batch" se carga inicialmente (a tiempo t_0) y por única vez, el material a peletizar, mezclado previamente con la cantidad de agua necesaria para su aglomeración. De igual modo en las operaciones discontinua y semi-continua, existe una carga inicial única de semillas (a tiempo t_0), pero a diferencia de la operación "batch", hay una alimentación discontinua o continua respectivamente, a tiempos t_i preestablecidos. En estos dos tipos de operación no existe descarga de pelets, lo que las diferencia de la operación continua con alimentaciones continuas de líquido y sólido.

Es importante destacar también que en la operación "batch" el número de aglomerados disminuye, ya que los pelets grandes crecen a expensas de los más chicos. Por otra parte, en las operaciones continua, semi-continua y discontinua, el número total de pelets se conserva, aumentando su tamaño por incorporación de finos alimentados durante la operación.

En la Fig. 3.7. se da un esquema comparativo de los modos de operación señalados ("batch", continuo y semi-continuo y discontinuo), donde:

t_0 : tiempo inicial de rodado.

t_i : tiempo de iniciación de cada agregado de finos = $t_{i-1} + \Delta t$ ($i=1 \dots f$).

t_f : tiempo final de rodado (operación continua y semicontinua).

Δt : intervalo de tiempo entre dos agregados sucesivos = $\Delta t_1 + \Delta t_2$ ($\Delta t_2=0$ en operación continua y semicontinua).

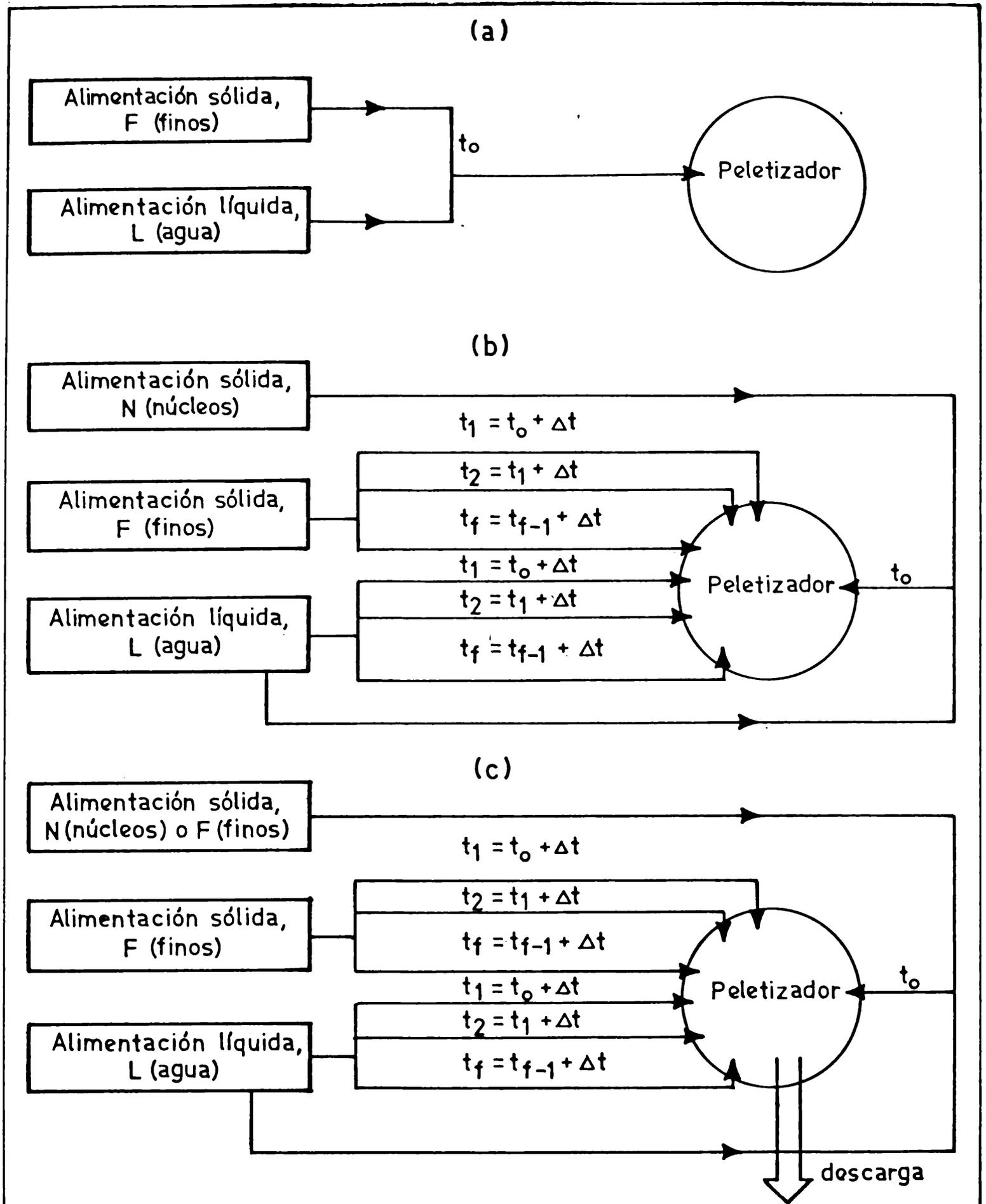


FIGURA 3.7.- Esquema comparativo entre las distintas formas operativas: (a) operación en "batch"; (b) operación discontinua y semicontinua; (c) operación continua.

Δt_1 : tiempo de rodado con simultánea adición de finos.

Δt_2 : tiempo de rodado sin adición de finos.

3.2.4. LIGANTES Y/O ADITIVOS

El ligante fundamental para la peletización de distintos materiales y común a casi todos ellos, es el agua. En la peletización de minerales de hierro, la bentonita es empleada como ligante junto con el agua, que es indispensable.

Otros ligantes, además de actuar como tales, actúan como aditivos, o sea que se utilizan para mejorar una o más propiedades de los pelets. Por otra parte hay materiales que peletizan sólo por el agregado de agua y los pelets obtenidos tienen buenas propiedades mecánicas y texturales y buen comportamiento en su uso posterior.

Hay ligantes y aditivos orgánicos e inorgánicos. Los primeros, mejoran la resistencia de los pelets verdes y peletssecos, pero dan pelets muy débiles durante el tratamiento térmico, ya que se descomponen a temperaturas muy inferiores a aquéllas en que comienzan a aparecer los enlaces por recristalización. Por lo tanto se emplean fundamentalmente en obtención de pelets sin tratamiento térmico, o acompañados de otros que actúen en la etapa de consolidación térmica. El uso de sustancias inorgánicas, por otro lado, mejora la resistencia de los pelets verdes y secos tanto como la de los pelets tratados térmicamente. El mecanismo de estos efectos no está totalmente estudiado pero puede suponerse dependiente de la formación de uniones químicas que constituirían los puentes sólidos entre las partículas en la etapa de secado.

3.2.5. CARACTERISTICAS DE LOS PELETS

3.2.5.1. Características mecánicas

Los pelets, antes de su tratamiento térmico o de su empleo como tales, de-

ben soportar, desde su salida del equipo peletizador: manipuleo, transporte, caídas, cargas de los hornos, almacenaje. Para ello deben poseer cierta resistencia mecánica a la abrasión y a la rotura que dependen de cada material en particular y del uso para el que son destinados los pelets.

En general, las medidas de resistencia mecánica que se practican sobre los pelets son tres:

- Resistencia a la compresión bajo carga: el ensayo consiste en aplicar una carga creciente sobre un pelet ubicado entre dos platos planos, hasta su rotura. El valor máximo de carga soportado por el pelet hasta su rotura se expresa en kg/pelet.

Rumpf (23) da una expresión para la resistencia a la tensión en función de la fuerza de enlace por punto de contacto (calculada para los distintos tipos de enlaces entre partículas) y de la fracción de volumen vacío, el número de coordinación medio y el diámetro de las partículas, para tamaños de partículas uniformes, reemplazando el diámetro de partículas por un diámetro equivalente medio cuando se tiene una distribución de tamaños. Además relaciona la resistencia a la tensión con la resistencia a la compresión. Para altos valores de resistencia a la tensión, éstos guardan una relación lineal con los valores de resistencia a la compresión, produciéndose desviaciones a valores pequeños de resistencia a la tensión. La proporcionalidad entre ambas se da a valores altos de contenido de agua. A bajos contenidos, hay mayores fuerzas de fricción y la resistencia a la compresión disminuye menos que la resistencia a la tensión.

Por otra parte, Ryshkewitch (43) da una relación exponencial entre la resistencia a la compresión de un cuerpo poroso y la porosidad del mismo. A altos tiempos de rodado existe una desviación de este comportamiento. Esto fue

estudiado en un sistema gibbsita-H₂O- mogul (38) en operación semi-continua en disco peletizador, con alimentaciones discontinuas de líquido y sólido, encontrándose una dependencia similar entre la porosidad total y la resistencia de los pelets.

Klar y col.(44) relacionaron la resistencia de polvos compactados con el tamaño de poros de las partículas además de la porosidad total y con la forma de la partícula. Encontraron una disminución de la resistencia con el aumento de tamaño de poro y que las partículas de forma esférica eran las de menor resistencia. Existe, además, una relación entre la resistencia a la compresión de pelets y una potencia de su diámetro. Newitt y Conway-Jones (7) propusieron un valor 2 para el exponente, mientras que Capes y Coleman (45), indicaron el mismo valor 2, sólo para los casos en los que hay distribución homogénea de enlaces. Para otras distribuciones propusieron un exponente con valor comprendido entre 1 y 2.

- Resistencia a las caídas: El ensayo consiste en dejar caer libremente el pelet desde una altura preestablecida tantas veces como sea necesario hasta que se fracture, expresándose el resultado como "número de caídas".

- Resistencia a la atrición: El ensayo consiste en dejar rodar en un tambor una carga de pelets, para luego proceder al tamizado normalizado, dándose el resultado en forma de índices: índice superior (porcentaje de pelets sobrevivientes con diámetros mayores que uno especificado) e índice inferior (porcentaje de finos de granulometría menor que un valor especificado). Para cada tipo de material hay que fijar la duración del ensayo, la cantidad de pelets a ensayar y, los tamices que definen los índices.

Los índices se definen como sigue:

$$\text{índice superior(\%)} = \frac{a}{b} \times 100$$

$$\text{índice inferior (\%)} = \frac{b-c}{b} \times 100$$

donde :

a = peso retenido por el tamiz de abertura mayor.

b = peso total de pelets ensayados.

c = peso retenido por el tamiz de abertura más pequeña.

3.2.5.2. Características texturales

Son requerimientos importantes de los pelets terminados, su porosidad y rugosidad. Una adecuada porosidad implica un correcto comportamiento del pelet en su empleo posterior, en cuanto que contribuye a su resistencia mecánica y, en algunos casos, a regular las velocidades de reacción en etapas posteriores.

Asimismo, la rugosidad de la superficie de los pelets, (debida principalmente a características granulométricas) hace que de ser muy alta, se aumente el índice inferior del ensayo de atrición, con lo que habría mucha producción de finos en el transporte y manipuleo de los pelets, con los inconvenientes derivados de ello.

3.2.5.3. Características granulométricas

Los requerimientos de granulometría se refieren principalmente al tamaño de pelets y a su distribución de tamaños, lo que está relacionado con la resistencia mecánica de los mismos, encontrándose además una asociación directa entre la distribución granulométrica y la porosidad de lechos en tratamientos posteriores.

4. MECANISMOS DE CRECIMIENTO

Los mecanismos a través de los cuales las partículas finas se aglomeran para formar pelets por rodamiento y la velocidad a la que esta aglomeración ocurre dependen de parámetros tales como, la cantidad de agua adicionada y de condiciones operativas como velocidad de giro e inclinación del equipo peletizador.

Newitt y Conway-Jones (7) propusieron un mecanismo de coalescencia para la formación de pelets.

Estudiaron en forma cualitativa la peletización de arena en tambor y los factores que afectan la velocidad de crecimiento. Observaron que ésta depende de la facilidad de los gránulos para deformarse y coalescer e interviniendo como factores reguladores: contenido de humedad, velocidad de rotación del tambor, carga del tambor, tamaño promedio y distribución de tamaños del material alimentado. La velocidad de crecimiento fue determinada por el análisis por tamizado de muestras tomadas a distintos intervalos durante una corrida.

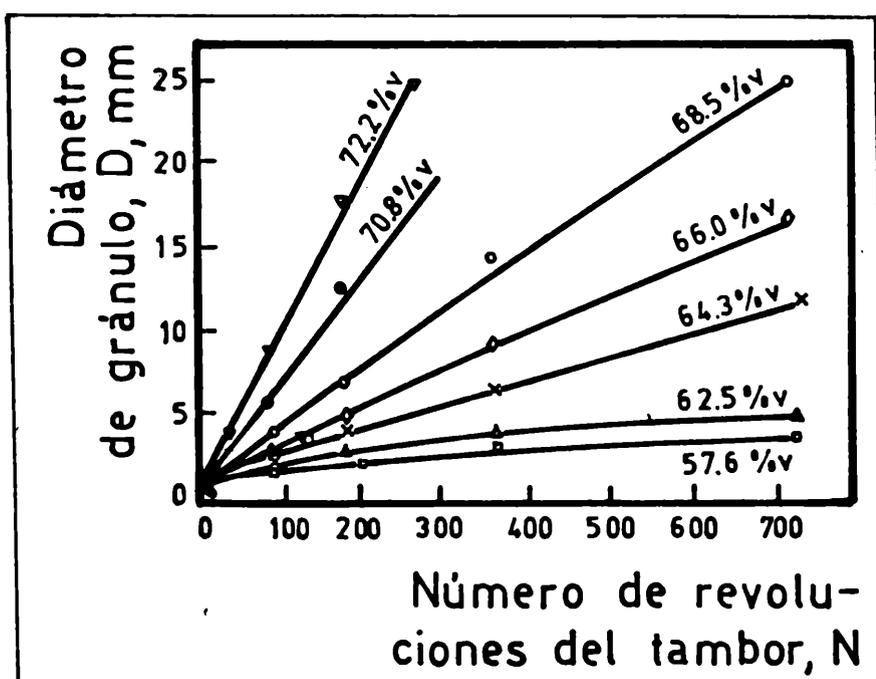


FIGURA 4.1.- variación del crecimiento de gránulos de arena fina con el contenido de humedad. Newitt, Conway-Jones (7)

De las curvas de distribución de frecuencias en peso, para distintos contenidos de agua, obtuvieron los diámetros promedios de gránulos y los graficaron en función el número de revoluciones del tambor (Figura 4.1.), observando una relación aproximadamente lineal. Analizando la velocidad de crecimiento (pendientes de las curvas) en función del contenido de agua (Figura 4.2.) podía observarse una considerable variación en la misma, para cambios comparativamente pequeños en el contenido de humedad. Además, existía un valor crítico de contenido de agua, por debajo del cual, la velocidad de crecimiento era insignificante, porque la carga se volvía demasiado seca, adhiriendo a las paredes del tambor y tendiendo a deslizar más que a rodar. Por otro lado, cuando el contenido de agua era muy alto la velocidad de crecimiento se hacía excesiva, los gránulos eran débiles y tendían a colapsar.

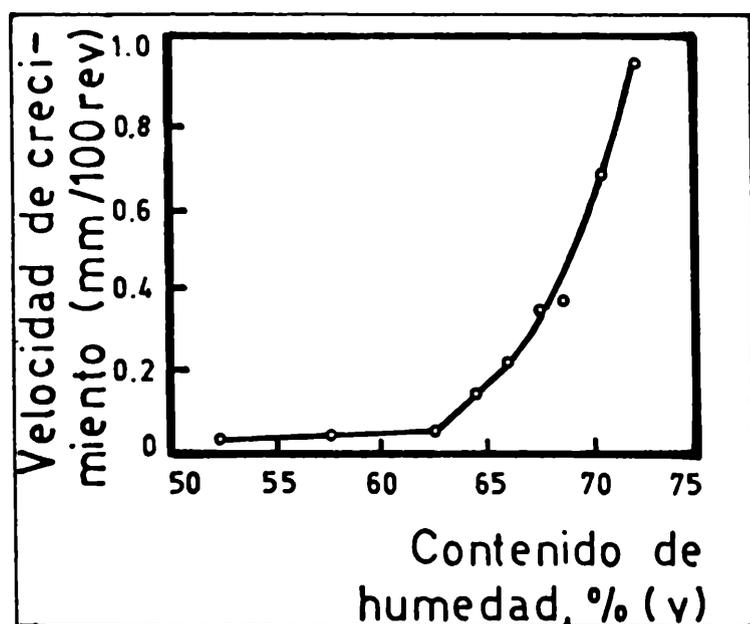


FIGURA 4.2.- Variación de la velocidad de crecimiento con el contenido de humedad. Newitt, Conway-Jones (7).

Cuando la carga del tambor fue muy pequeña, las probabilidades de coalescencia disminuyeron y la velocidad de crecimiento, en consecuencia, fue más baja.

Encontraron, además, que la velocidad de crecimiento, expresada en térmi-

nos de revoluciones del tambor (Figura 4.3.) y no del tiempo de peletización, era independiente de la velocidad de rotación del tambor, por debajo de la velocidad crítica, a partir de la cual el material es centrifugado sin rodar.

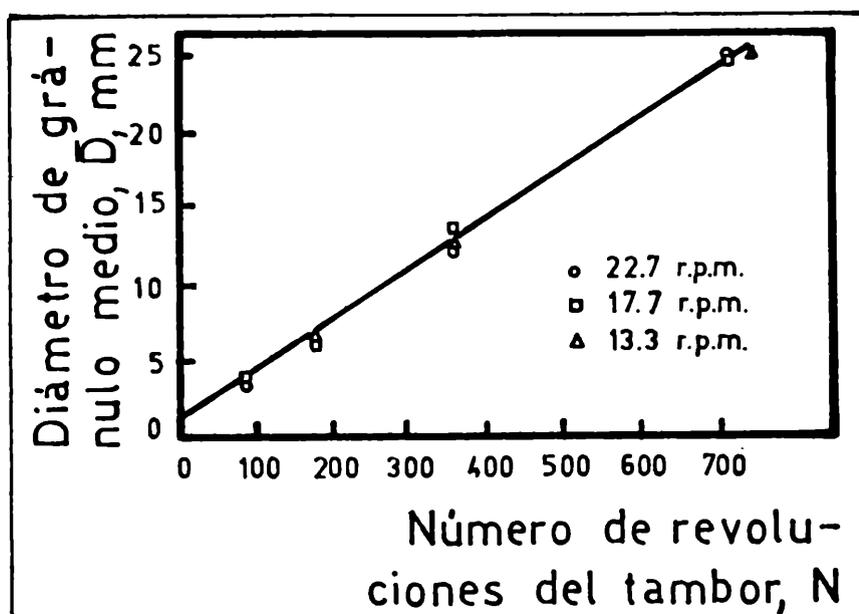


FIGURA 4.3.- Efecto de la velocidad de giro del tambor sobre la velocidad de crecimiento del gránulo. Newitt, Conway-Jones (17).

Observaron también, que los materiales de granulometría más fina, exhibieron velocidades de crecimiento menores para casi el mismo contenido de humedad.

Para poder cuantificar el proceso de crecimiento, es necesario observar en primer lugar qué mecanismos de crecimiento tienen lugar. Sastry y Fuerstenau(34) resumieron los mecanismos responsables de la formación y crecimiento de pelets en: nucleación, coalescencia, abrasión y transferencia, fractura, formación de capas. Ellos realizaron experiencias con trazadores para la identificación de los mecanismos: peletizaron en operación "batch", dos calcitas molidas con similares distribuciones granulométricas pero con diferentes características fluorescentes (aparecían una blanca y otra negra al ser fotografiadas bajo luz ultravioleta). En primer término peletizaron ambas calcitas por separado y luego un tiempo adicional, mezcladas en proporciones diferentes. Los pelets

resultantes fueron seccionados en dos mitades según un plano al azar y fotografiados bajo luz ultravioleta. Los resultados experimentales mostraron los mecanismos que ocurren durante los procesos de crecimiento de pelets. Determinaron que en una peletización en "batch":

- en los estados iniciales, el crecimiento de pelets ocurre por un mecanismo de COALESCENCIA.
- es muy importante el aporte al crecimiento por ABRASION Y TRANSFERENCIA del material.
- en los últimos estados, se evidencia FRACTURA de gránulos, pero los segmentos rotos son demasiado grandes para formar capas sobre los pelets sobrevivientes. Además, con el objeto de hacer una descripción general del proceso de peletización, y teniendo en cuenta que en una operación continua hay una constante alimentación de finos, establecieron la diferencia entre los conceptos de "especies bien formadas" y "alimentación húmeda agregada". Las primeras son de tamaño finito y crecen por la contribución de las segundas que pueden ser consideradas como especies de tamaño infinitesimal.

A partir de las observaciones cualitativas de los resultados, dieron una representación formal de los mecanismos de crecimiento (Figura 4.4.), los que pueden ser descriptos en términos de:

- Nucleación: generación de especies bien formadas a partir de la alimentación nueva (en "batch" sólo ocurre nucleación en los primeros estados del proceso).

Cambia tanto el número como la masa de las especies bien formadas.

- Coalescencia: producción de especies de mayor tamaño a partir de dos o más especies bien formadas que colisionan y se unen.

Se considera como evento elemental la colisión binaria de dos pelets de masa m_i y m_j ($m_i + m_j = m_{i+j}$). Aumenta la masa de las especies y disminuye su

número, sin cambio en la masa total del sistema.

- Fractura: producción de fragmentos (especies bien formadas) de igual o distinto tamaño, que pueden unirse a las especies sobrevivientes por coalescencia.

Cambia la masa y el número de los aglomerados pero no la masa total.

- Abrasión y transferencia: se intercambia material fino entre dos especies sin sentido preferencial del intercambio.

No cambia el número ni la masa total, sólo hay cambios continuos de tamaños.

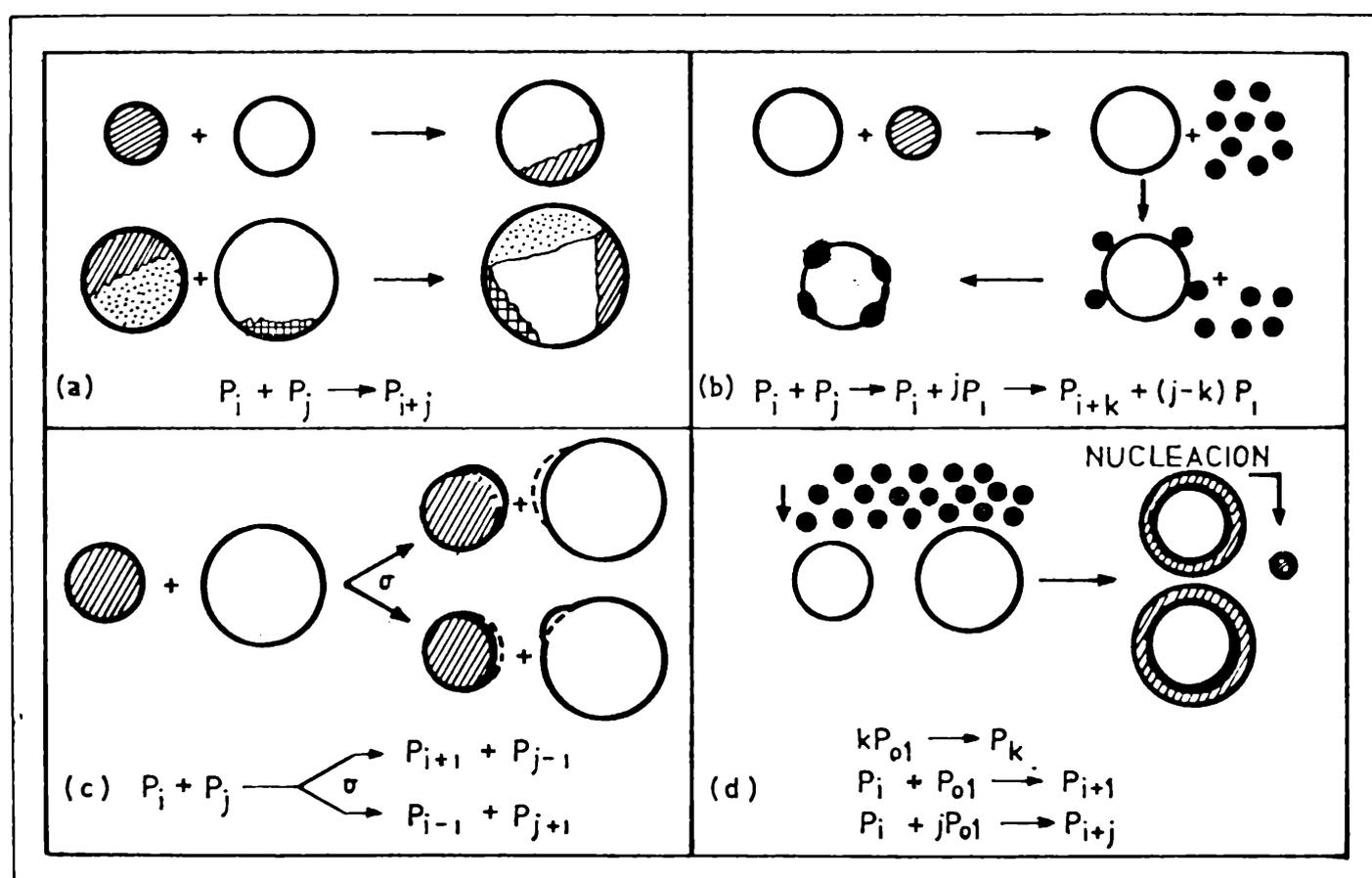


FIGURA 4.4.- Representación formal de los mecanismos de crecimiento. P_i se usa para representar un pelet de masa m_i ($=ih$) y P_{01} se refiere a los núcleos nuevos de masa h ; (a) coalescencia, (b) fractura, (c) abrasión y transferencia, y (d) formación de capas y nucleación. Sastry, Fuerstenau (34)

- Formación de capas: al existir alimentación nueva los pelets actúan como núcleos y adicionan finos.

Hay continuos cambios en la masa total del sistema y el tamaño de los pelets, pero su número permanece constante.

Con anterioridad, Capes y Danckwerts (26) realizaron estudios con trazadores, peletizando en operación "batch" arenas de colores contrastantes (una blanca y otra azul por coloración con azul de metileno) encontrando que el mecanismo de crecimiento era por fractura y formación de capas. Peletizaron ambas arenas por separado, reemplazando la fracción $< \frac{1}{4}$ " de la arena blanca por una cantidad igual de pelets de tamaño $< \frac{1}{4}$ " de arena azul, peletizando la mezcla un tiempo adicional. Obtuvieron pelets de un interior blanco y cubierta azul.

El mecanismo de crecimiento consiste en destrucción de los pelets más pequeños y más débiles (azules) por colisión con los más grandes (blancos) con posterior redistribución del material en capas sobre los pelets más grandes. Además encontraron que los pelets inicialmente más grandes tuvieron mayor incremento del diámetro durante el proceso de granulación. Esto lo visualizaron graficando diámetro final de pelet vs. diámetro inicial (Figura 4.5.).

Además, diseñaron experiencias similares para determinar: si sólo los gránulos más grandes de la carga crecían a expensas de los más pequeños o si además ocurría la situación inversa; si los gránulos más grandes nunca se rompían y qué sucedía durante la etapa de nucleación (en los primeros estados de crecimiento). Concluyeron que el mecanismo predominante de crecimiento de los gránulos grandes (después de los estados iniciales) fue la redistribución de los fragmentos que se producen por la destrucción de los gránulos más pequeños de la carga. Estos experimentos se refieren al crecimiento de los gránulos

los una vez que han sido formados, pero ya en las primeras revoluciones del tambor, la arena húmeda ubicada en él, formaba masas flojas que se transformaban luego en núcleos. Los ensayos realizados en este sentido, indicaron la formación de grandes agregados que luego por rodamiento se transformaban en pequeños gránulos esféricos.

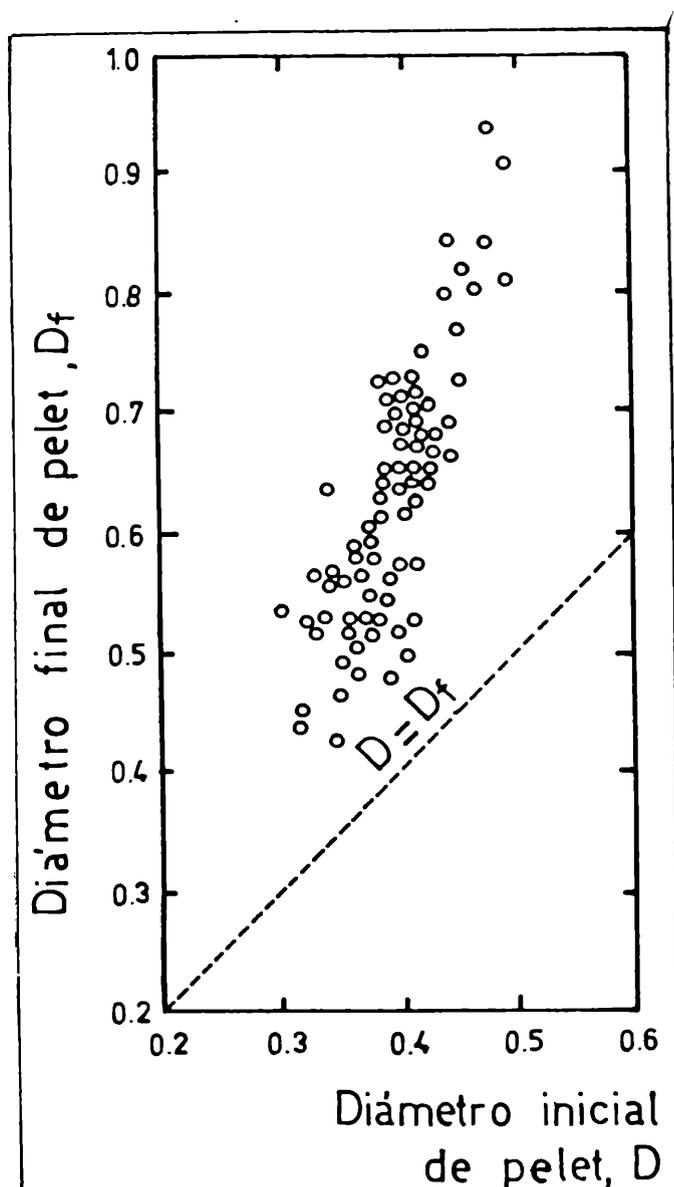


FIGURA 4.5.- Relación entre los diámetros inicial y final de gránulos en una carga de una operación "batch". Capes, Danckwerts (26).

En un trabajo posterior, Capes y Danckwerts (37) determinaron a través de una técnica fotográfica las distribuciones de tamaño de los pelets de la carga del tambor a distintos tiempos de rodamiento. La Figura 4.6. corresponde a las curvas de distribución de tamaño acumulativas que obtuvieron a 350, 700 y 1050 revoluciones del tambor, con disminución del número de gránulos de 460 a 80.

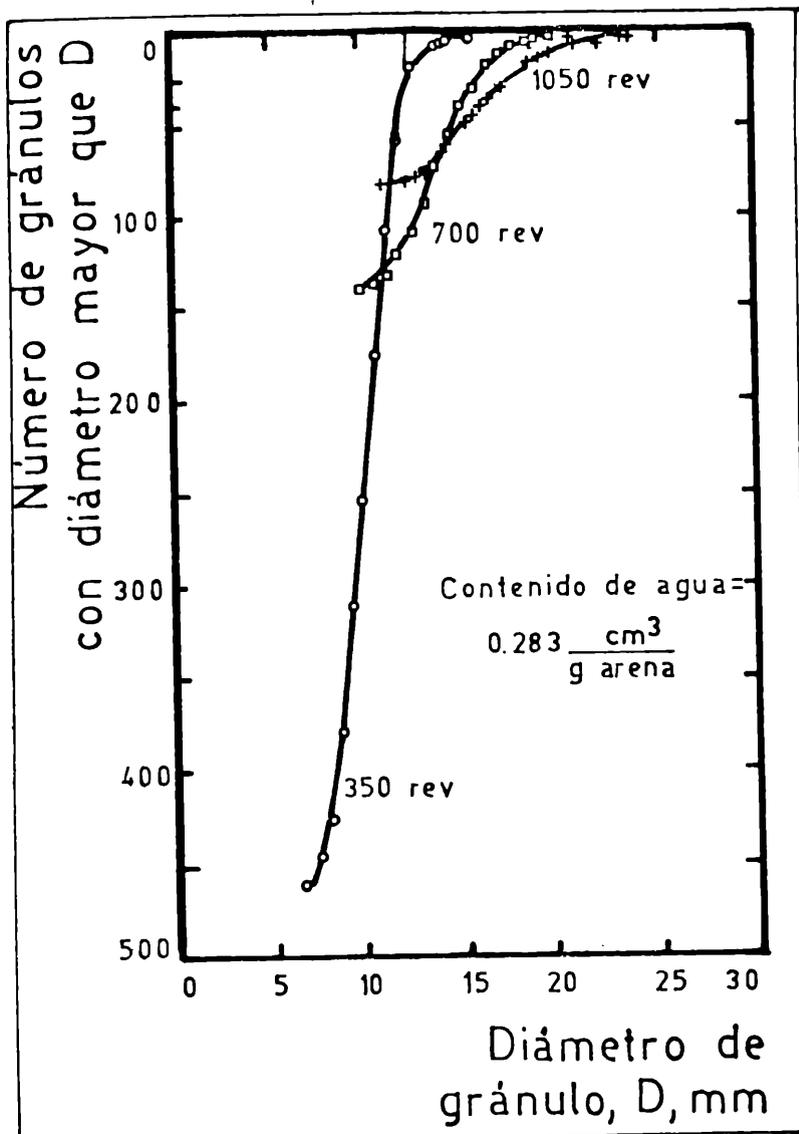


FIGURA 4.6.- Distribuciones de tamaño de granulos en estados sucesivos durante la granulacion en "batch" de arena de 97 μ . Capes, Danckwerts (37).

La Figura 4.7. corresponde a la forma adimensional donde los parámetros normalizadores son el número total de granulos y el diámetro máximo de la distribución. De esta forma las sucesivas distribuciones son coincidentes, denominándose autoconservación a este comportamiento.

De acuerdo a este comportamiento, se tiende a una distribución instantánea teórica en concordancia con los resultados experimentales.

La distribución teórica la expresaron como función de la relación entre los diámetros mínimo y máximo de los pelets, o alternativamente como función de la relación entre el diámetro medio (igual número de pelets con diámetro mayor y menor que el diámetro medio) y el diámetro máximo. En cualquiera de

las dos expresiones aparece un exponente que depende del material peletizado y no es función de la forma en que se exprese la distribución.

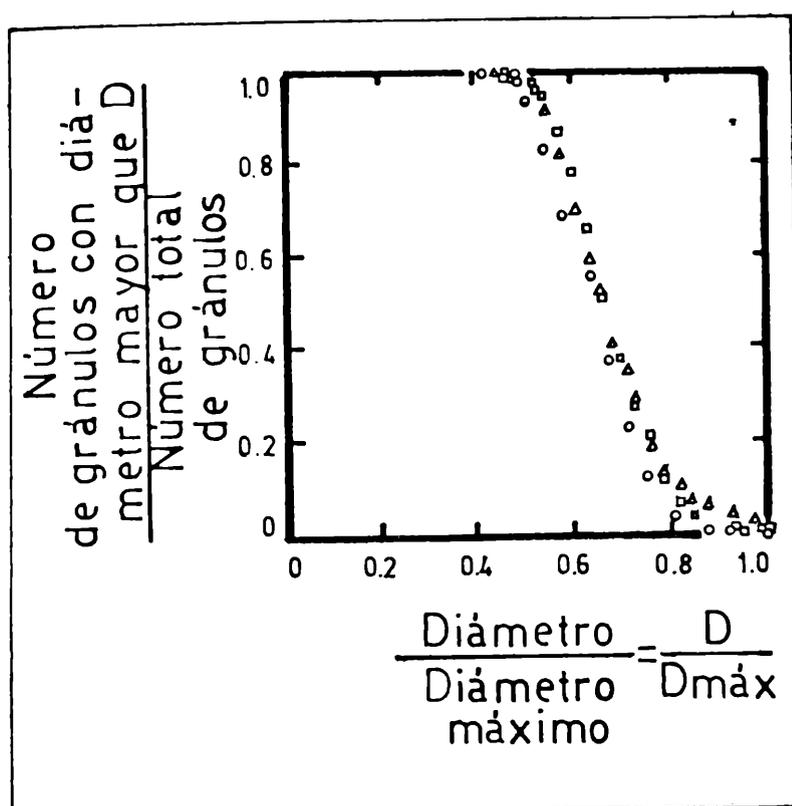


FIGURA 4.7.- Distribuciones de tamaño de la FIGURA 4.6. graficadas en forma adimensional. Capes, Danckwerts (37)

En una operación "batch", como ya se expresó anteriormente, los pelets más grandes crecen más rápidamente que los más chicos, debido a la fractura de éstos e incorporación a los primeros. Por el contrario, si hay un proporcionamiento continuo de material fino, eficaz para incorporarse a los pelets existentes, todos los pelets deberían crecer con igual velocidad, independientemente de su tamaño.

Para probarlo, cargaron arena blanca al tambor y alimentaron arena azul en forma continua. Seccionaron los pelets y midieron los incrementos de sus diámetros. En la Figura 4.8. graficaron los diámetros finales en función de los iniciales. Se observa que todos los diámetros aumentan en la misma cantidad, en contraste con lo observado en una operación "batch", que ya fuera mostrado en la Figura 4.5.

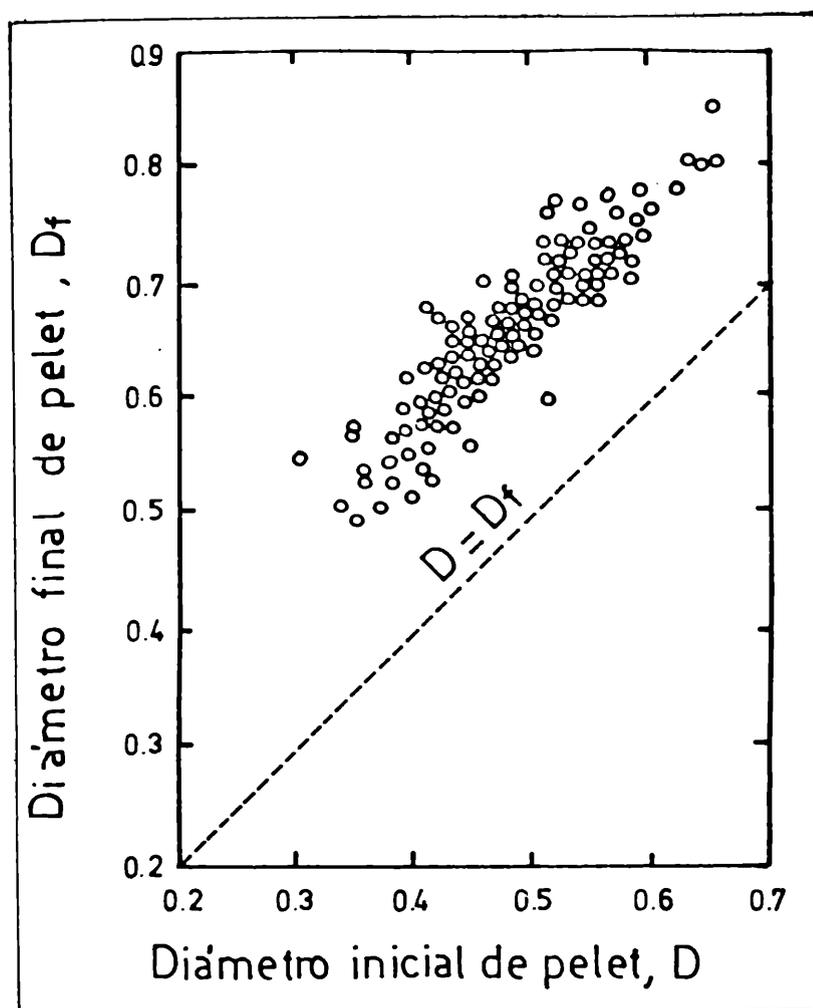


FIGURA 4.8.- Relación entre los diámetros inicial de gránulos cuando hay alimentación continua de finos. Capes, Danckwerts (37).

Por su parte Kapur y Fuerstenau (29,30) propusieron la coalescencia como principal mecanismo responsable del crecimiento de pelets. Estos investigadores estudiaron la cinética de peletización de piedra caliza (29) con diferentes contenidos de agua, en tambor peletizador, utilizando la forma de operación "batch".

Determinaron las distribuciones granulométricas de los pelets en varios estados, por un método fotográfico.

En la Figura 4.9., se muestran las distribuciones granulométricas que se obtuvieron a 400, 800, 1200, 2000 y 3600 revoluciones, para un contenido de agua de 42,5 % (v).

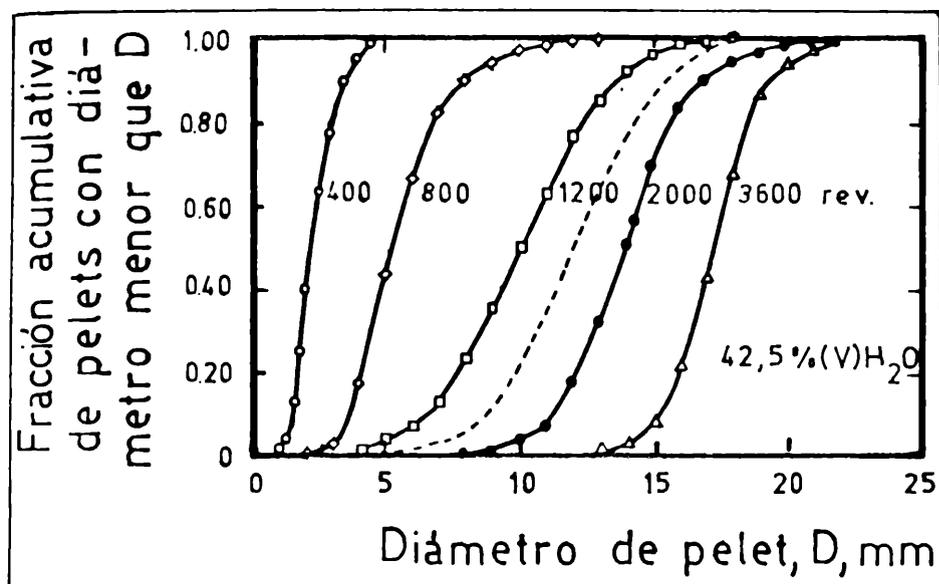


FIGURA 4.9.-Distribución de tamaños de pellets con 42,5% (v) agua para distintos estados de crecimiento. Kapur, Fuerstenau(29)

En la Figura 4.10. se observan los diámetros promedio graficados para diversos números de revoluciones. La velocidad de crecimiento no fue constante aumentando rápidamente en las primeras etapas, con una marcada dependencia del contenido de agua en esos primeros estados.

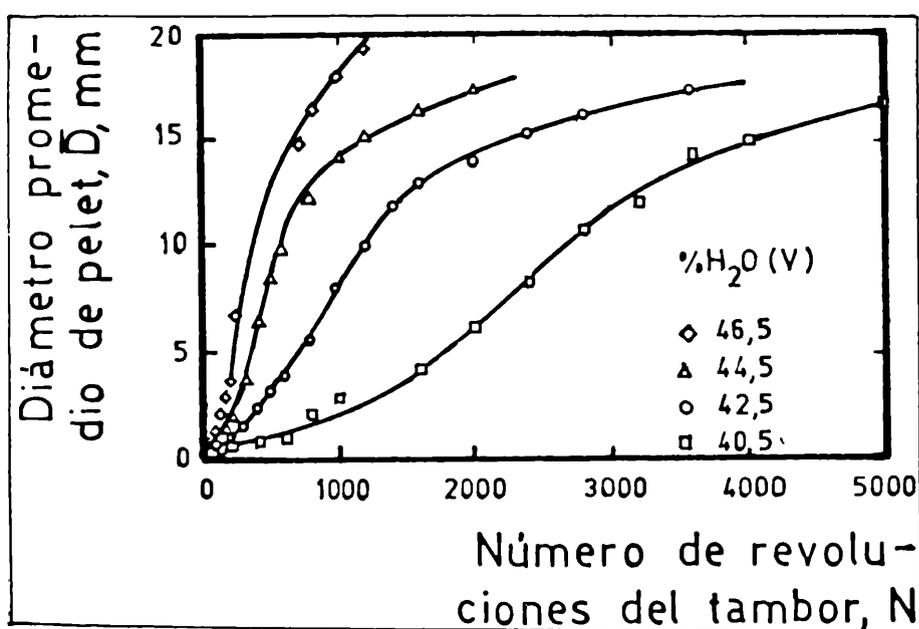


FIGURA 4.10.-Diámetro promedio de pellets como función del número de revoluciones del tambor para diferentes contenidos de humedad. Kapur, Fuerstenau (29).

Correlacionaron la velocidad de crecimiento en la región de nucleación con el área superficial específica externa de los núcleos. Esta no es la superficie específica del polvo, sino de los aglomerados y por unidad de volumen en

lugar de unidad de peso, para tener en cuenta la porosidad del aglomerado. Usaron como medida de la superficie específica, la inversa del diámetro promedio.

Definieron una constante de velocidad para la región de nucleación (k_n) y una constante de velocidad para la región de crecimiento (k_p) en función de dicha superficie específica.

En la Figura 4.11., se grafican las constantes de velocidad, k_n y k_p en función del contenido de humedad.

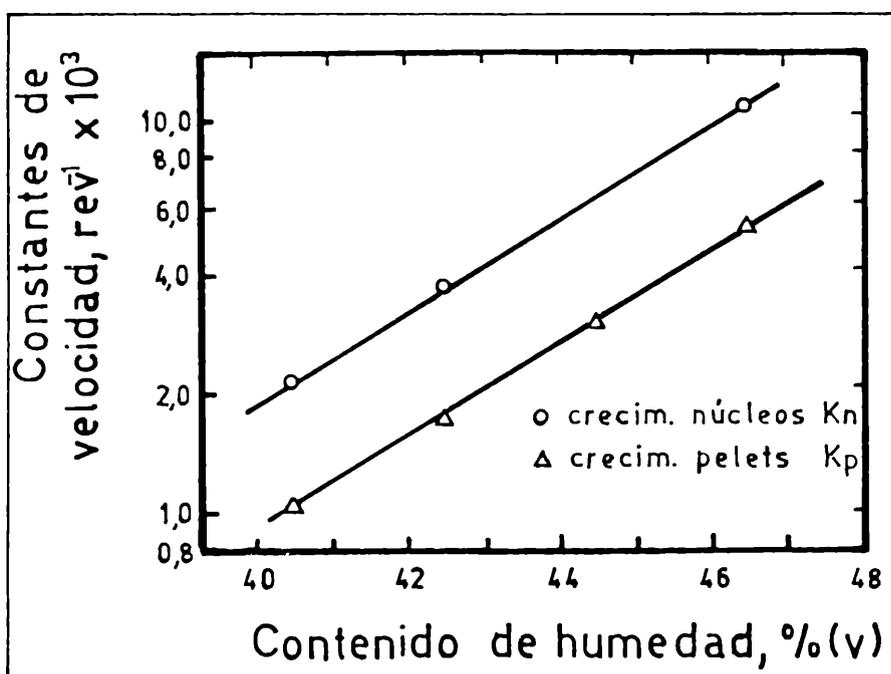


FIGURA 4.11.- Constantes de velocidad para las regiones de crecimiento de núcleos y de pellets. Kapur, Fuerstenau (29)

La relación existente obedece a la siguiente ecuación exponencial:

$$k_v = d \exp(eA)$$

donde:

k_v : constante de velocidad, rev^{-1}

A : contenido de agua, % (V).

d,e: constantes para cada material.

Además, Kapur y Fuerstenau (30) caracterizaron la distribución de tamaños

de aglomerados en las primeras etapas del crecimiento (nucleación), por un parámetro simple, el diámetro máximo ($D_{m\acute{a}x}$), obtenido por extrapolación de la porción recta de la curva de distribución acumulativa. Trabajaron con piedra caliza de diferentes superficies específicas, peletizando en tambor y operación en "batch". Las distribuciones de tamaño de los núcleos fueron determinadas a diferentes estados de crecimiento por técnicas fotográficas. La Figura 4.12. corresponde a las distribuciones granulométricas de tamaño de núcleos con 44,6 %(v) de agua y obtenidos a partir de piedra caliza de $0,18\text{m}^2/\text{g}$ de superficie específica, a diferentes revoluciones del tambor.

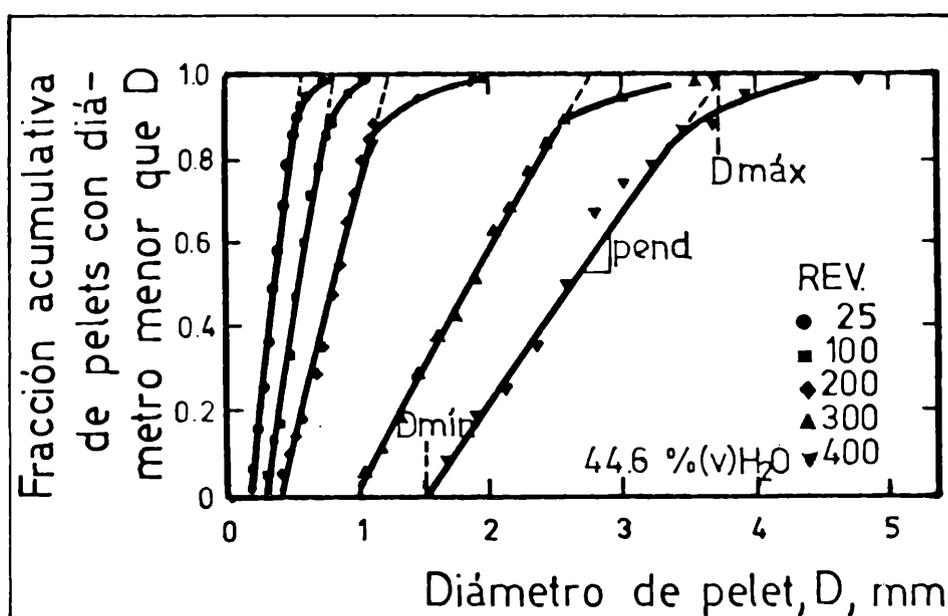


FIGURA 4.12.-Distribuciones de tamaños de núcleos de piedra caliza. Kapur, Fuerstenau(30)

La forma de las curvas aparece como independiente del contenido de agua, pudiendo ser aproximada como líneas rectas de acuerdo a la ecuación:

$$y = m(D - D_{m\acute{i}n}) \quad \text{ó} \quad \frac{dy}{dD} = \frac{1}{D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n}} = m$$

donde:

y: fracción numérica acumulativa de aglomerados con diámetro menor que D.

m: pendiente.

$D_{\text{mín}}$, $D_{\text{máx}}$: el tamaño de gránulo más pequeño y el tamaño teórico más grande respectivamente.

Estos autores postularon que la coalescencia era un proceso totalmente al azar, sin ninguna mayor probabilidad de ocurrir entre dos núcleos de un determinado tamaño. Introduciendo el concepto de núcleo promedio hipotético (volumen integrado de la distribución entre las fracciones acumulativas 1 a 0), un factor de encogimiento (tiene en cuenta que la porosidad del aglomerado disminuye continuamente), y el número mínimo y máximo, de aglomerados combinados para dar los más pequeños y los más grandes gránulos respectivamente, derivaron una ecuación de velocidad de crecimiento que relaciona el diámetro máximo con el número de revoluciones del tambor.

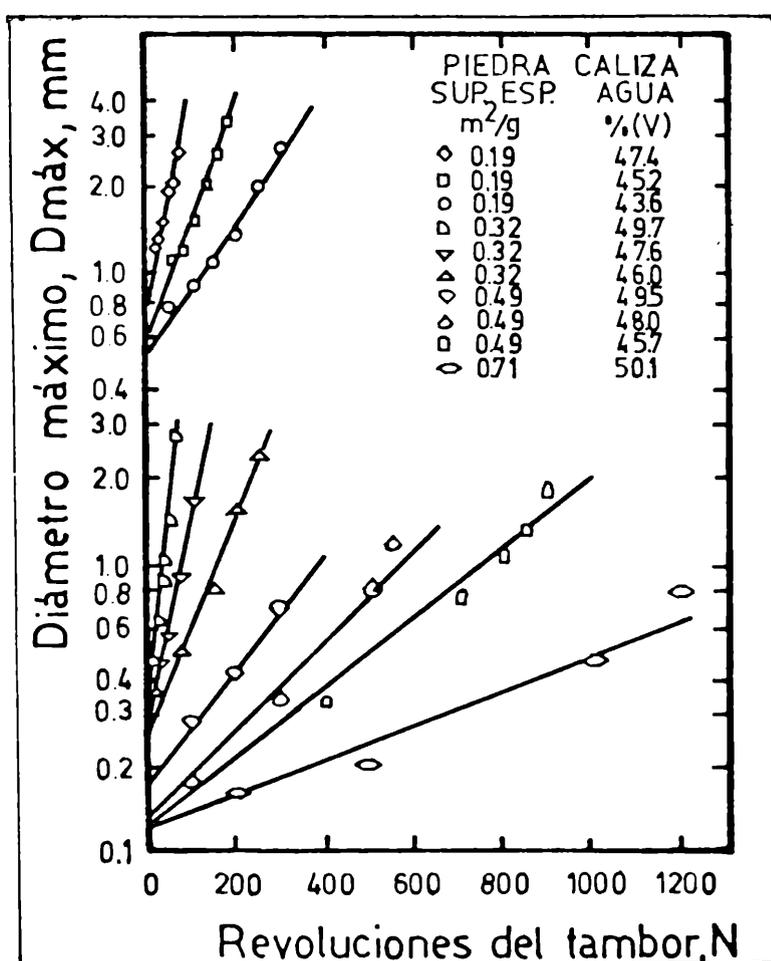


FIGURA 4.13.- Diámetros máximos de aglomerados de piedra caliza graficados en función del número de revoluciones. Kapur, Fuerstenau (30).

Los resultados presentados en la Figura 4.13., donde se grafica $D_{\text{máx}}$ vs. N para piedras calizas de diferentes superficies específicas peletizadas con diferentes contenidos de agua, confirman la validez de los mecanismos propuestos y suposiciones hechas. La ecuación no es válida para polvos muy finos y especialmente para muy bajos contenidos de agua, probablemente debido a que ΔN no es constante. Capes (46) graficó los datos experimentales de Kapur y Fuerstenau (30), obtenidos peletizando piedra caliza en la región de bajos contenidos de líquido y velocidades de crecimiento también bajas, en la forma adimensional propuesta por Capes y Danckwerts(26, 37), quienes consideraron el crecimiento de pelets formados a partir de arena en la región de altos contenidos de líquido y por lo tanto de velocidades de crecimiento altas. En la Figura 4.14. se representan en forma adimensional las distribuciones correspondientes a la peletización de piedra caliza de $0,18 \text{ m}^2/\text{g}$ de superficie específica y con 44,6 %(v) de agua para 25, 100, 200, 300 y 400 revoluciones del tambor.

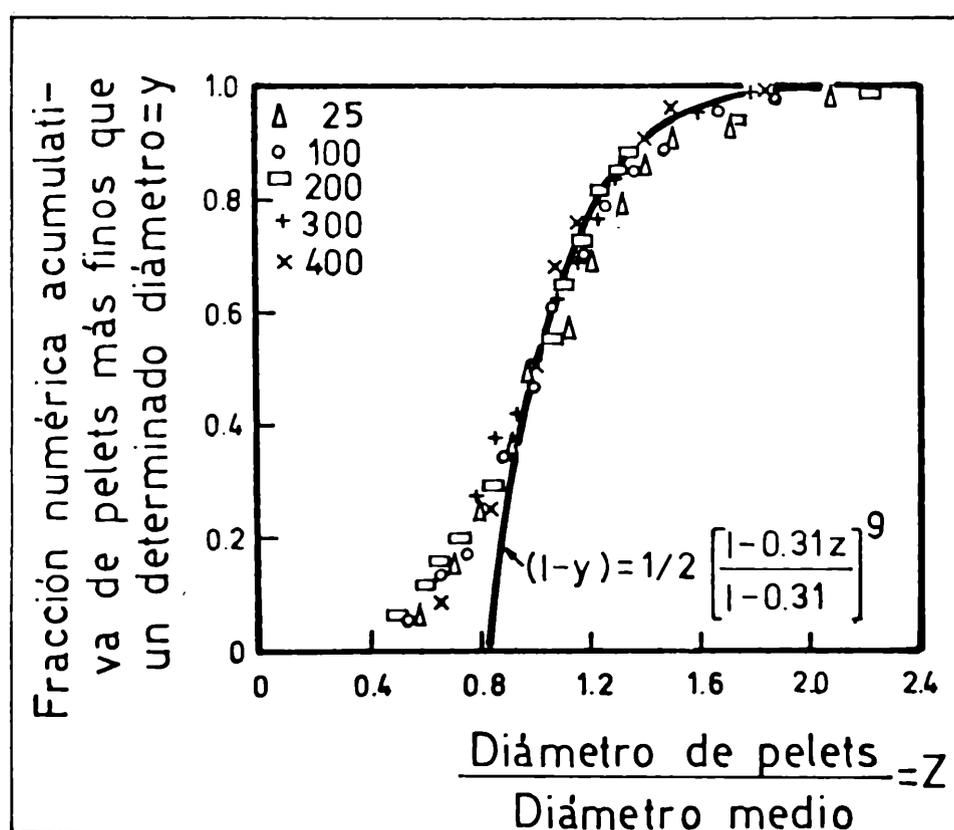


FIGURA 4.14.-Datos de Kapur, Fuerstenau (50) presentados en la forma adimensional propuesta por Capes, Danckwerts(14, 15). Capes (46).

Además, Capes (46) estudió en la forma conducida por Capes y Danckwerts (26, 45) la peletización de arenas (una de ellas coloreada) pero en la región de bajos contenidos de líquido, comparables a los usados por Kapur y Fuerstenau (30) en sus experiencias con piedra caliza. De acuerdo a los resultados obtenidos, observó que el mecanismo de crecimiento de pelets en peletización "batch" de arena es esencialmente el mismo tanto a altos como bajos contenidos de líquido. De todos modos, la peletización es un proceso muy complicado y es imprudente suponer que el mecanismo encontrado para arena, necesariamente es aplicable a otros materiales bajo condiciones diferentes.

Resumiendo, la correlación encontrada por Kapur y Fuerstenau (30) puede ser vista como equivalente al mecanismo de autoconservación postulado por Capes y Danckwerts (37), lo que indicaría que este comportamiento es una propiedad general del proceso de peletización en "batch". Linkson y colaboradores (32) propusieron que las diferencias entre los mecanismos para el crecimiento de pelets, postuladas por los distintos investigadores citados anteriormente, radican en la diferencia de las distribuciones granulométricas de los materiales estudiados. Una distribución de tamaños estrecha, como la estudiada por Capes y Danckwerts (26, 37) la cual contiene muy pocos finos, produce gránulos débiles que pueden ser fracturados por los otros gránulos de la carga y crecer continuamente por fractura y formación de capas. Por otra parte, un material como el estudiado por Kapur y Fuerstenau (29-31) que presenta una amplia distribución de tamaños, origina gránulos muy fuertes, demasiado fuertes como para fracturarse y el crecimiento es exclusivamente por coalescencia hasta alcanzar un determinado tamaño. Linkson y colaboradores (32) establecieron esta conclusión a partir del estudio de pelets de arenas, una blanca y una coloreada, y con dos distribuciones de tamaño, una amplia (-325 mallas) y otra estrecha (entre 80 y 100 mallas).

Capes (5) describió el comportamiento de un sistema en el cual había un proporcionamiento continuo de alimentación sólida humedecida a una carga que estaba rodando. Inicialmente, se formaron los núcleos de pelets por coalescencia de los aglomerados más pequeños, pero en las etapas subsiguientes el crecimiento ocurrió por formación de capas del material alimentado sobre los pelets existentes.

En la Figura 4.15. se muestran las distribuciones de tamaño de gránulos, después del estado de nucleación, medidas por técnicas fotográficas.

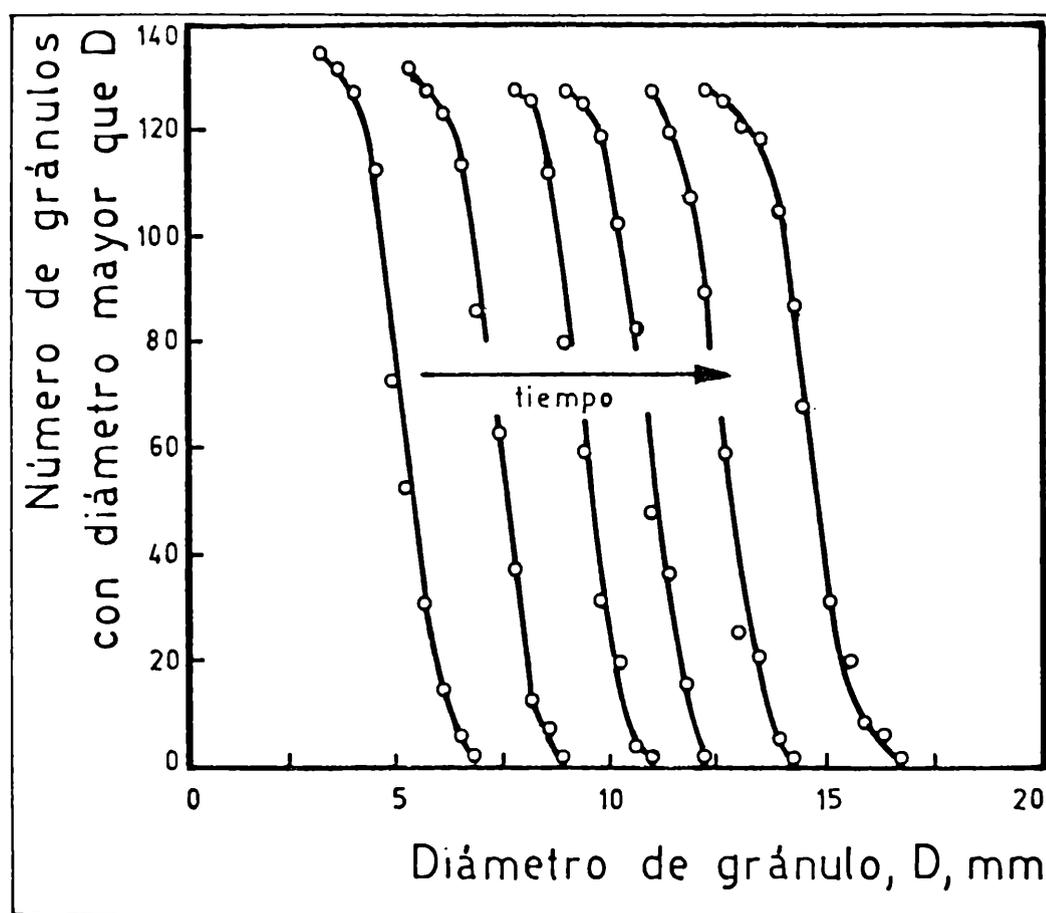


FIGURA 4.15.-Distribuciones de tamaño de gránulos para crecimiento por formación de capas con alimentación continua de finos. Capes (5)

La cantidad de material fino que formó las capas sobre los pelets existentes fue proporcional a su superficie expuesta, ya que sólo los más pequeños aglomerados desaparecieron y muy pocos de los aglomerados originalmente presentes sufrieron fractura durante la operación. Esta situación contrasta con

la que ocurre operando en "batch", donde las capas se producen, según lo indicado por Capes y Danckwerts (26, 37) por incorporación de los fragmentos de los gránulos más pequeños de la carga originados durante la operación.

Esto está de acuerdo con el hecho de que los gránulos más pequeños se fracturan más fácilmente que los de tamaño intermedio, en su choque con los más grandes y el material fino resultante tiene mayor probabilidad de asimilarse a los gránulos más grandes en los sitios de fragmentación. En forma similar, Meissner y col. (47) hallaron que la velocidad de crecimiento de pelets de óxido de cinc por peletización seca, aumentaba con el cuadrado del diámetro para los demás factores constantes (densidad de pelets, fracción volumétrica de pelets en el lecho, densidad de los finos).

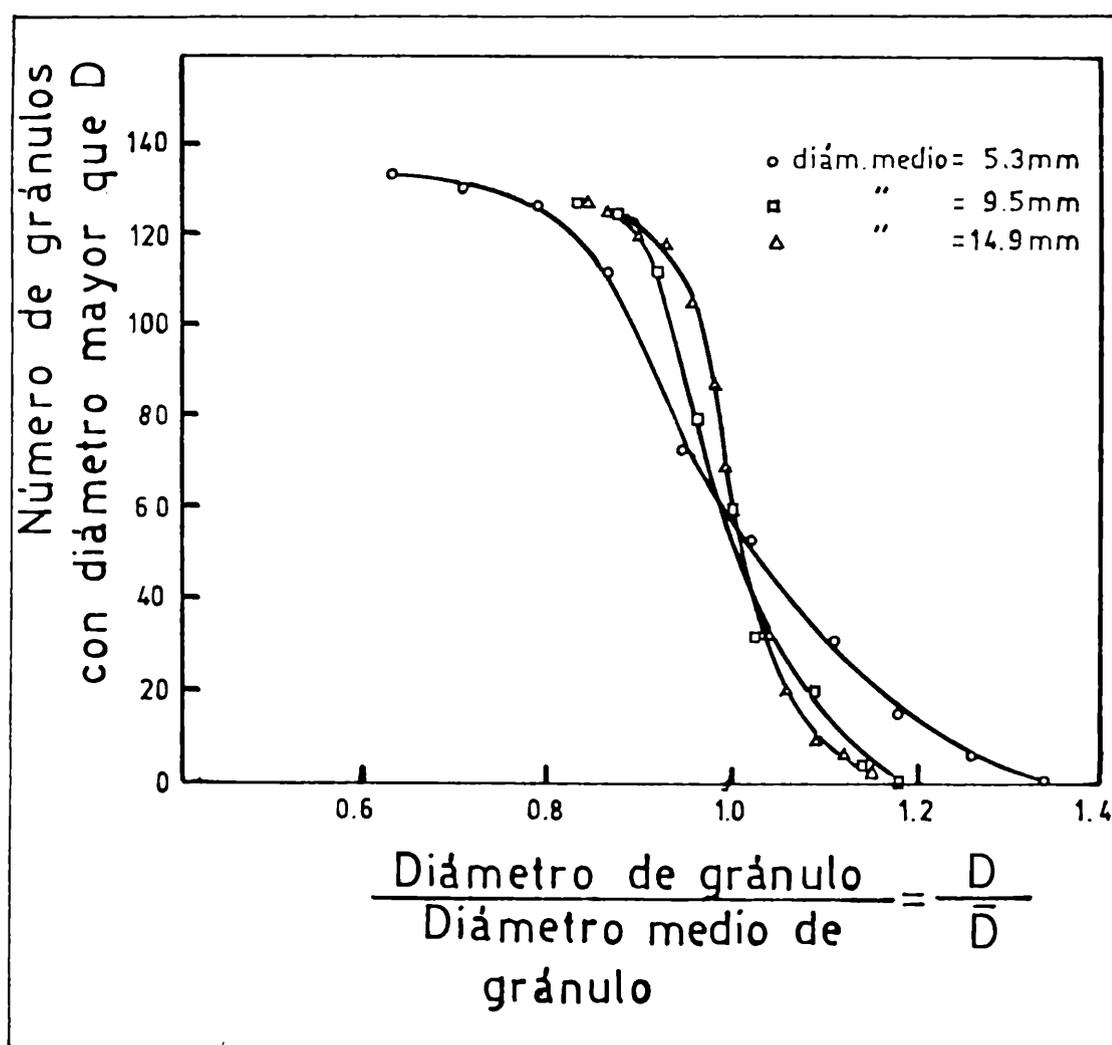


FIGURA 4.16. Distribuciones de tamaños de gránulos de la FIGURA 4.15. graficadas en forma adimensional. Capes (5).

En la Figura 4.16., se muestran tres de las distribuciones de la Figura 4.15.

graficadas por Capes (5) en función de un diámetro adimensional (diámetro de gránulo dividido por diámetro medio de gránulo).

Esta figura ilustra una consecuencia importante de la diferencia en comportamientos. Mientras la peletización "batch" tiende a un crecimiento de autoconservación, en el cual la relación entre los diámetros de los gránulos más grandes y de los más pequeños permanece constante, en la peletización con continuo proporcionamiento de material fino la relación disminuye cuando el crecimiento procede. Esto se debe a que todos los pelets tienen igual oportunidad de incorporar finos.

Kapur y Fuerstenau (30) derivaron una relación semiempírica entre un parámetro característico de la distribución, $D_{m\acute{a}x}$ y el tiempo de aglomeración, N . Para ello, supusieron una constante de velocidad fija. Esto es una limitación del modelo, que presenta desviaciones para polvos de superficies específicas altas. Los mismos autores (28,31) formularon un modelo sobre la base de coalescencia al azar pero con velocidad de coalescencia variable en el tiempo. Consideraron mezclado perfecto y colisiones binarias completamente al azar entre pelets de dos tamaños cualquiera, definiendo una probabilidad finita de que en una colisión dada, ocurra una coalescencia efectiva. Esta probabilidad es una función desconocida de la energía de la colisión, de la porosidad del pelet, su tamaño, deformabilidad y plasticidad superficial, que son los factores determinantes de la resistencia del enlace entre los componentes del par formado en el instante de la colisión.

Expresaron la distribución de tamaño de pelets en forma de fracción numérica con el objeto de poder comparar con los datos experimentales y encontraron la solución mediante el empleo de una función de generación.

Tuvieron en cuenta además, que el pelet en el estado de núcleo se está

compactando constantemente, lo que implica la necesidad de modificar adecuadamente la escala de tamaño de pelet. Relacionaron la porosidad del pelet con el tiempo de aglomeración para sistemas representativos y el diámetro de pelet teórico normalizado, con el diámetro medio normalizado, por una función empírica, suponiendo que todos los pelets se compactan en la misma extensión.

Encontraron que los parámetros de las distribuciones de tamaño de los pelets, generados por el modelo de coalescencia al azar propuesto, estaban unívocamente relacionados entre sí, y por lo tanto las distribuciones de tamaño se conservaron. Esto lo mostraron, para distintos sistemas, en gráficos logarítmicos de la varianza o del tercer momento de la distribución en función del diámetro medio normalizado de pelet, obteniendo rectas de pendiente 2 y 3 respectivamente, para las regiones de nucleación y transición. Sin embargo, en la región de crecimiento de pelets, hubo en algunos casos apartamiento del comportamiento lineal, indicando que el mecanismo de coalescencia al azar no se mantuvo en esta región.

La coalescencia al azar es sólo uno de los mecanismos posibles de incremento de tamaño de arreglos de partículas. Para que así ocurra, los pelets deben ser pequeños y porosos y fácilmente deformables sin fractura, propiedades asociadas con las partículas finas y con altos contenidos de agua. Bhrany y col. (25) afirmaron que no sólo la humedad desempeña un papel importante en la formación de pelets sino que es necesario un tiempo de residencia suficiente para completar la operación en el peletizador que depende de la naturaleza del material que se está peletizando. Por tal motivo desarrollaron métodos para la determinación de la humedad crítica necesaria para la formación de pelets y del tiempo de residencia del material en el disco. La primera se basa en la determinación de la capacidad de retención de humedad de sólidos finamente di

vididos. La suposición hecha fue que el peso por ciento de agua retenido por un lecho de partículas con empaquetamiento al azar es el mismo peso por ciento de un pelet con similar empaquetamiento al azar. Para la determinación del tiempo de residencia en el disco, desarrollaron una técnica, empleando un trazador que podía ser fácilmente analizado (cloruro de sodio). Distinguieron dos estados de crecimiento de pelets en un disco peletizador: formación de núcleos y semillas y crecimiento de los núcleos ya formados. Esto está de acuerdo con lo propuesto por Floyd y Engelleitner (4) quienes caracterizaron la operación en el disco por la formación de un patrón característico de flujo de finos, aglomerados y pelets terminados.

Bhrany y col. (25) propusieron una ecuación que representaba los efectos combinados de nucleación y crecimiento de pelets en función de la concentración de la sal (trazador) en la zona de crecimiento a cualquier tiempo.

En la expresión aparecen dos términos exponenciales. El primero da el tiempo para la formación de núcleos y el tamaño de la zona de nucleación, mientras que el segundo da el tiempo para el crecimiento de pelets y el tamaño de la región de crecimiento.

En el caso de que la región de nucleación sea muy pequeña (por ejemplo en un circuito con prehumedecedor), la ecuación se reduce al segundo exponencial.

Lo propuesto, lo estudiaron experimentalmente con discos peletizadores de diámetro variable encontrándose un estrecho acuerdo entre la curva teórica y la experimental.

Los mismos investigadores estudiaron la cinética de aglomeración de dos minerales, determinando los diámetros de los pelets por tamizado y pesada de las fracciones y los tiempos de retención por el método del trazador. La Figura 4.17. muestra curvas de crecimiento de fracciones de distintos diámetros como

porcentaje acumulativo de pelets con diámetro mayor que el indicado en función del tiempo de retención.

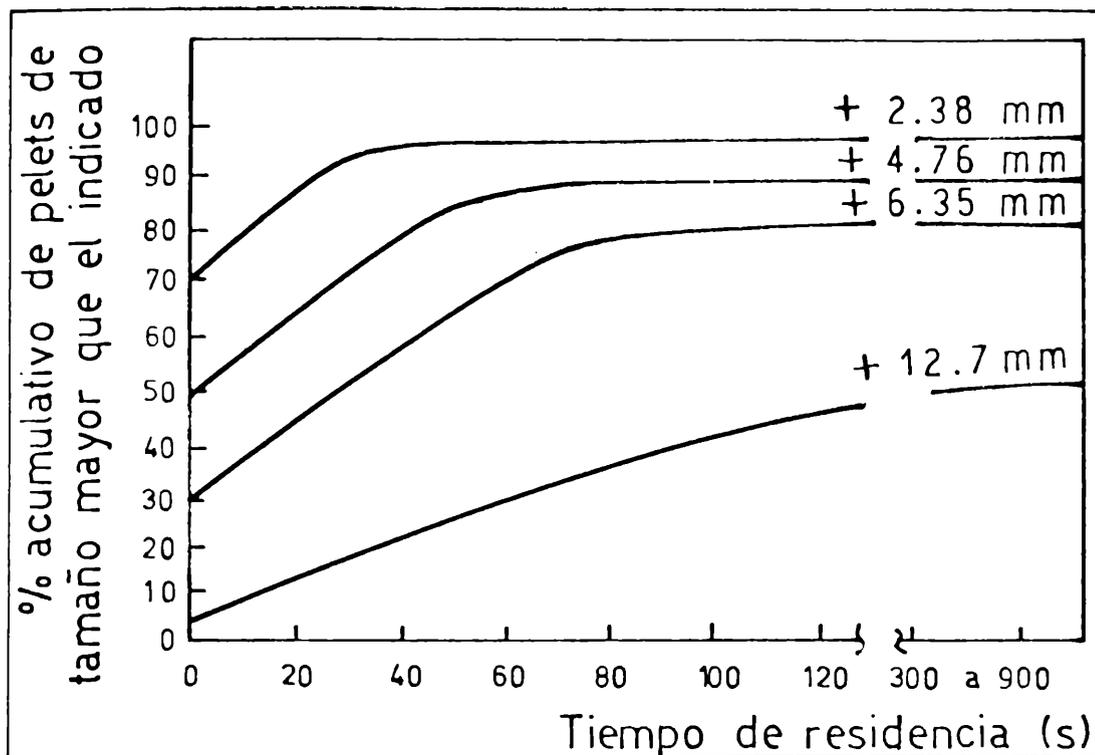


FIGURA 4.17.-Efecto del tiempo de retención sobre el tamaño del producto. Bhrany y col (25).

Cada fracción de tamaño aumenta a velocidad prácticamente constante hasta alcanzar un máximo y luego cesa de aumentar.

El máximo disminuye cuando el tamaño de las partículas aumenta y la velocidad de aglomeración disminuye cuando el tamaño del aglomerado aumenta. El tiempo requerido para alcanzar el máximo es directamente proporcional al tamaño de los pelets. Por otra parte la dispersión de tamaños del producto del disco es función de las características del material peletizado y del tiempo de residencia de éste en la zona de crecimiento.

El conocimiento de las distribuciones de tamaño como una función del tiempo es de gran importancia en los análisis de sistemas que coalescen. Se han derivado ecuaciones cinéticas del tipo de aparición-desaparición para pelets en tambor de peletización (31). Considerando distribución al azar de las especies en el espacio y aglomeración por coalescencia binaria, Sastry y Fuerstenau (48)

postularon una subdivisión del proceso de aglomeración en dos clases básicas: aglomeración "en espacio libre" y aglomeración "en espacio restringido", lo cual se ilustra esquemáticamente en la Figura 4.18. La primer clase corresponde a la aglomeración de especies presentes en concentraciones muy diluídas (ej: aerosol). Teóricamente, en este caso, una partícula dada puede colisionar con todas las otras en una vecindad característica definida por una unidad de volumen.

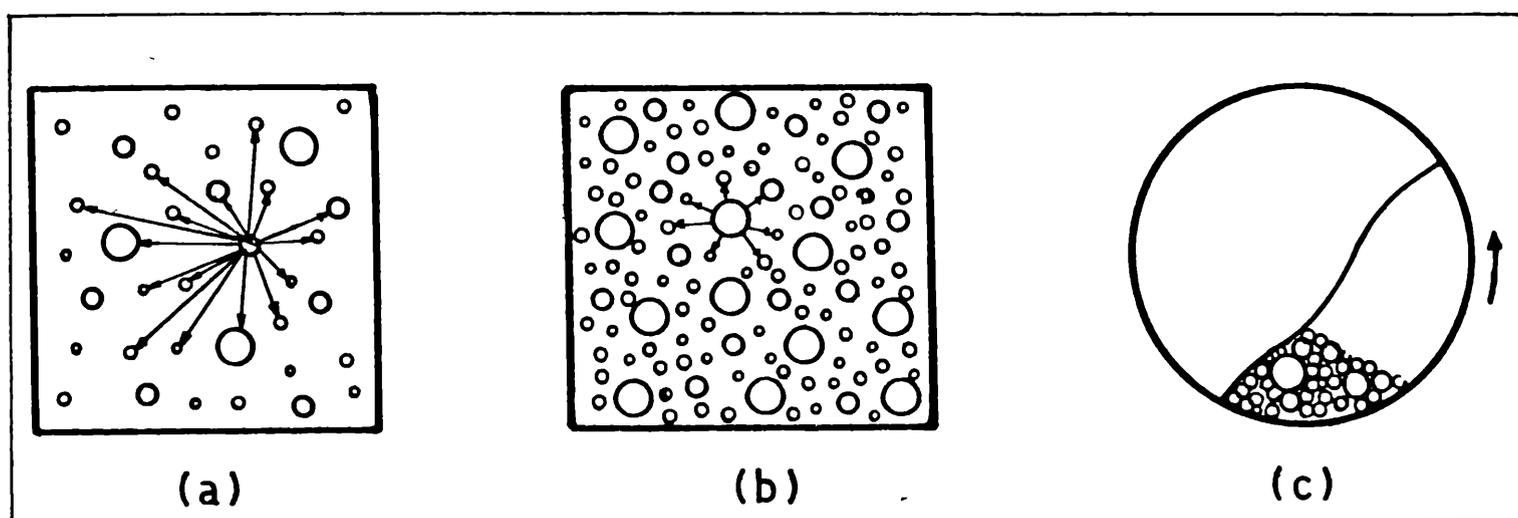


FIGURA 4.18.- Representación esquemática del proceso de aglomeración del tipo: (a) en espacio libre, (b) y (c) en espacio restringido.

Sastry, Fuerstenau (48).

La aglomeración en espacio restringido representa el caso de la aglomeración de pelets en un equipo aglomerador. El movimiento de una especie dada es muy restringido por la densidad de población alta. Además, Sastry y Fuerstenau (48) a través de su análisis demostraron la relación entre las curvas de distribución y la densidad de población, para aglomeración en espacio libre y en espacio restringido.

Consideraron un sistema de partículas de varios tamaños distribuídas al azar en el espacio, con cambios en la distribución de la masa de las partículas

que colisionan y luego coalescen. Postularon la coalescencia como único mecanismo de crecimiento y que las partículas no se fracturan después de la aglomeración.

En coincidencia con Kapur y Fuerstenau (31), consideraron constante la velocidad combinada de colisión-coalescencia como una primera aproximación (válido para proceso de coalescencia al azar). Así propusieron las ecuaciones determinísticas clásicas modificadas por un parámetro que representaba el "orden de la aglomeración" (vale 1 ó 2 para espacio restringido y espacio libre, respectivamente), indicando la velocidad de progreso del proceso de aglomeración.

El análisis combinatorial para el proceso de coalescencia está de acuerdo con el modelo determinístico con la ventaja que permite estimar la varianza asociada a la formación de un aglomerado de un determinado tamaño.

El crecimiento de pelets puede involucrar un mecanismo simple o ser el resultado de dos o más mecanismos de los propuestos (34).

Sin embargo, mediante la selección adecuada de materiales y parámetros de operación es posible aislar los mecanismos individuales para investigaciones experimentales, siendo esencial el entendimiento de estos mecanismos individuales (31) para el análisis y concepción de modelos de los sistemas de aglomeración en general y especialmente los circuitos continuos industriales de aglomeración. El mecanismo elemental de crecimiento por fractura y formación de capas fue propuesto inicialmente por Capes y Danckwerts (26), quienes encontraron que dicho mecanismo tiene lugar después de los estados iniciales donde el mecanismo de crecimiento dominante es de coalescencia. Interpretaron sus datos a través de una relación lineal existente entre los diámetros iniciales de los gránulos y sus diámetros después de una cantidad finita de crecimiento.

Pero en su análisis no especificaron la frecuencia de destrucción de los gránulos más pequeños que luego formarán las capas sobre los gránulos de mayor diámetro y no describieron explícitamente el comportamiento dinámico del sistema y la evolución en el tiempo del espectro de tamaños. Más aún, la relación propuesta por ellos termina abruptamente para la fracción acumulativa de gránulos con diámetros mayores o iguales que el tamaño D/\bar{D} (donde \bar{D} es el diámetro medio del gránulo) y no presentan la "cola" que aparecía según los datos experimentales en el rango de gránulos de tamaño pequeño. La razón probable de esta discrepancia es que en su análisis supusieron un estricto orden determinístico para que ocurriera la fractura, o sea que sólo los gránulos más pequeños se fracturaban. Kapur (49) propuso que quizá una forma más realista de tratar el problema sería asignar una probabilidad finita de rotura a los gránulos de todos los tamaños y asignando a los gránulos más pequeños la probabilidad más alta. O sea, que las velocidades específicas de fractura serían distribuidas con respecto al tamaño de gránulo y caerían rápidamente al aumentar el tamaño. En su análisis, partió del balance de población y el balance en volumen del material fracturado.

Propuso una descripción teórica de la cinética de granulación en "batch" para el mecanismo de fractura y formación de capas a través de dos ecuaciones, en términos de un parámetro simple de la función de similaridad, llegando a una expresión del número total de gránulos sobrevivientes, y de la fracción acumulativa de gránulos con diámetros mayores o iguales que un diámetro D . Coincidentemente, Capes y Danckwerts (26) también mostraron empíricamente que el diámetro medio de gránulo aumenta linealmente con el tiempo.

Como ya fue mencionado, Newitt y Conway-Jones (7) observaron crecimiento por coalescencia en la granulación de arenas. Capes y Danckwerts (26) obser-

varon este mecanismo para el crecimiento de pequeños núcleos, mientras que Kapur y Fuerstenau (29) mostraron que la coalescencia era el modo primario de crecimiento para granulación de piedra caliza, en la región de nucleación y que este mecanismo continuaba operando en la región de transición. En gran escala, la práctica es operar con alimentación continua de finos a la carga. Bajo estas condiciones, el mecanismo de crecimiento por formación de capas puede contribuir significativamente al crecimiento (5). Kapur y Fuerstenau (31) estudiaron la cinética en la región de crecimiento de núcleos suponiendo coalescencia al azar (en el sentido de que la frecuencia de coalescencia es independiente del tamaño de pelet). Una descripción cuantitativa de la cinética de granulación por el mecanismo de coalescencia preferencial (no al azar), requiere el conocimiento de una función de velocidad de coalescencia específica entre pelets de diferente tamaño. En lugar de ello, Kapur (50) propuso una aproximación, basada en una función de velocidad empírica donde refleja la naturaleza del mecanismo de coalescencia preferencial. Los parámetros que aparecen en la expresión otorgan a la misma la flexibilidad suficiente como para una representación matemática de la cinética equivalente a la realidad. En su análisis matemático planteó expresiones de la distribución acumulativa de tamaños y de la velocidad de crecimiento para un volumen de gránulo medio.

En la Figura 4.19. se muestra el diámetro de gránulo como función del número de revoluciones del tambor, para piedra caliza con tres contenidos de agua, con los datos experimentales dados por Kapur y Fuerstenau (29) se observa un cambio abrupto en la zona de crecimiento de pelets. La Figura 4.20. en escala log-log, muestra el diámetro medio en función del número de revoluciones. Las relaciones son líneas rectas, lo que está de acuerdo con el modelo

planteado por Kapur (50) para mecanismo de coalescencia preferencial. En vista de que las rectas son aproximadamente paralelas entre sí, dan como suposición razonable que la función de velocidad de coalescencia depende sólo del contenido de agua.

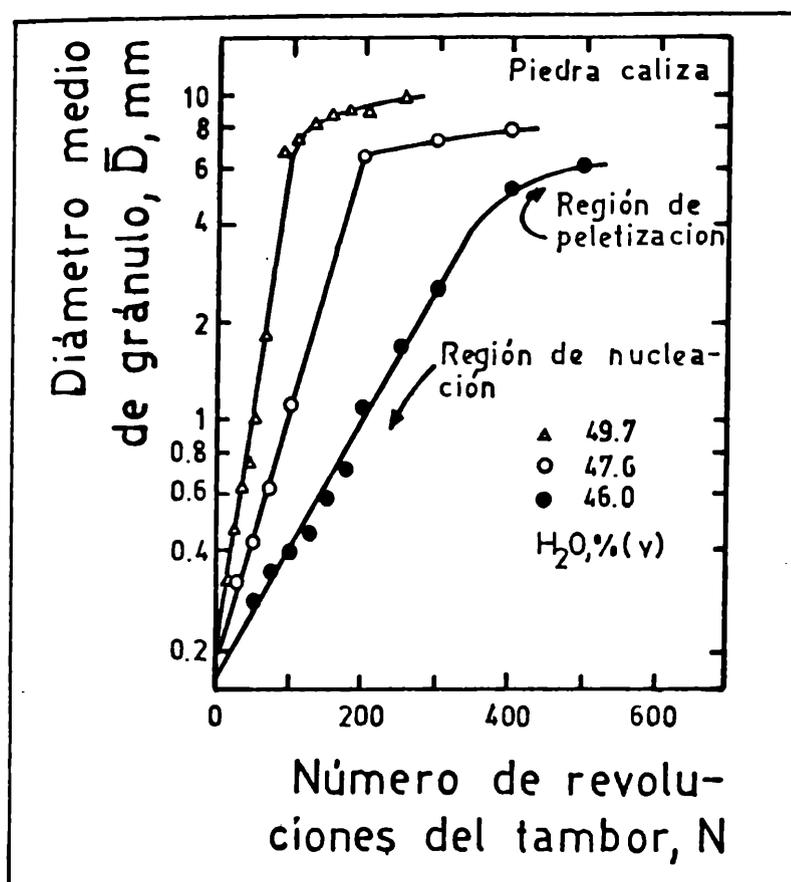


FIGURA 4.19.-Diámetro medio de gránulo en función del número de revoluciones del tambor. Kapur (50).

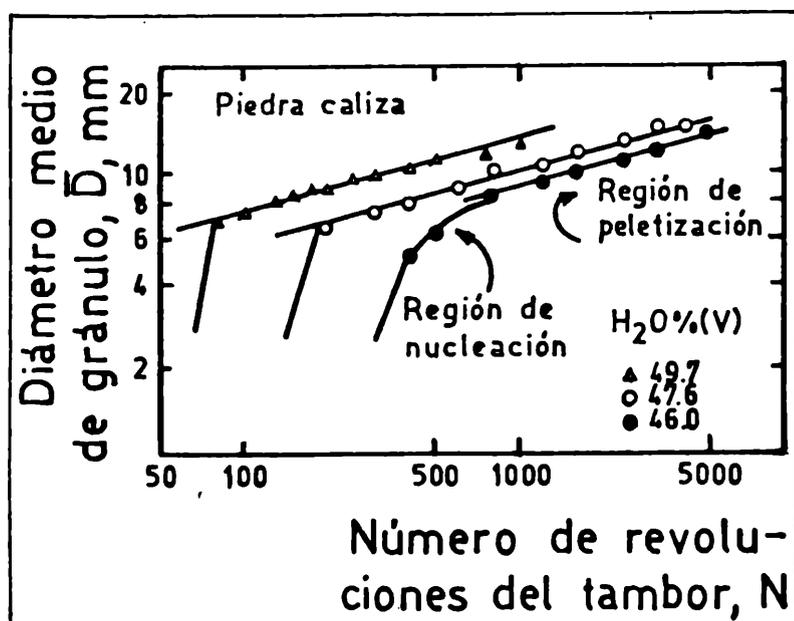


FIGURA 4.20.-Diámetro medio de gránulo en función del número de revoluciones del tambor en escala log-log. Kapur (50).

En la Figura 4.21. se dan las distribuciones de tamaño a diferentes tiempos de granulación y para tres contenidos de agua como una función del tamaño adimensional, D/\bar{D} . Como se expresaría a partir del modelo, las curvas tienden a coincidir en una única curva de distribución.

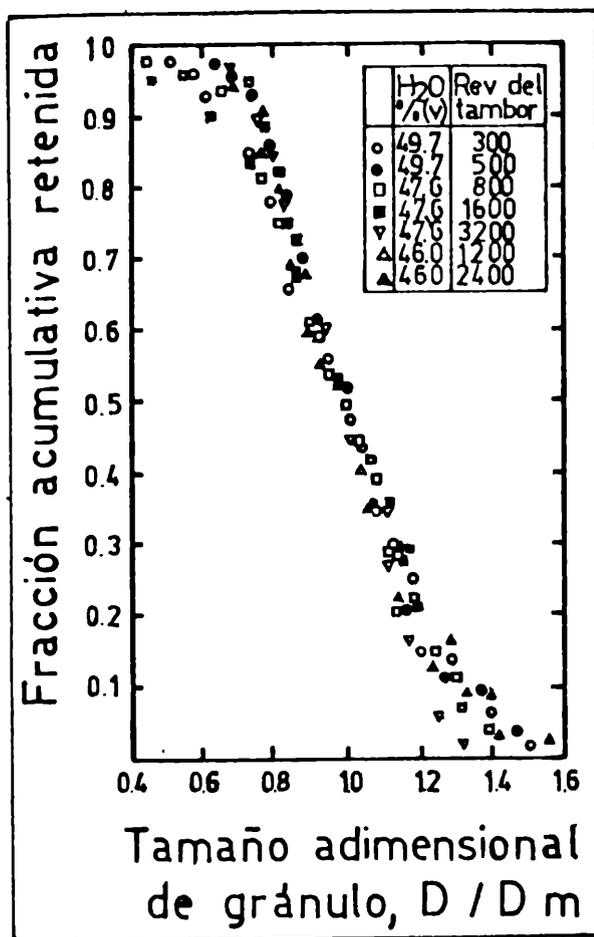


FIGURA 4.21.-Distribuciones acumulativas en función de la variable de similitud D/\bar{D} , que muestra autoconservación del espectro de tamaños. Kapur (50).

En la Figura 4.22. se muestra la sensibilidad de la función de coalescencia con el contenido de agua para coalescencia al azar y coalescencia preferencial. Las constantes de velocidad se tomaron a partir de las pendientes en la Figura 4.19. y las prolongaciones de las rectas en la Figura 4.20. en unidades arbitrarias. Aunque el modelo tiende a resultados satisfactorios cuando se compara con los datos experimentales, quizá éste no sea el único válido, pero es de gran utilidad práctica. Provee una base para la comparación de la "peletizabilidad" de diferentes materiales y en particular para la evaluación cuantitativa de los efectos del contenido de agua.

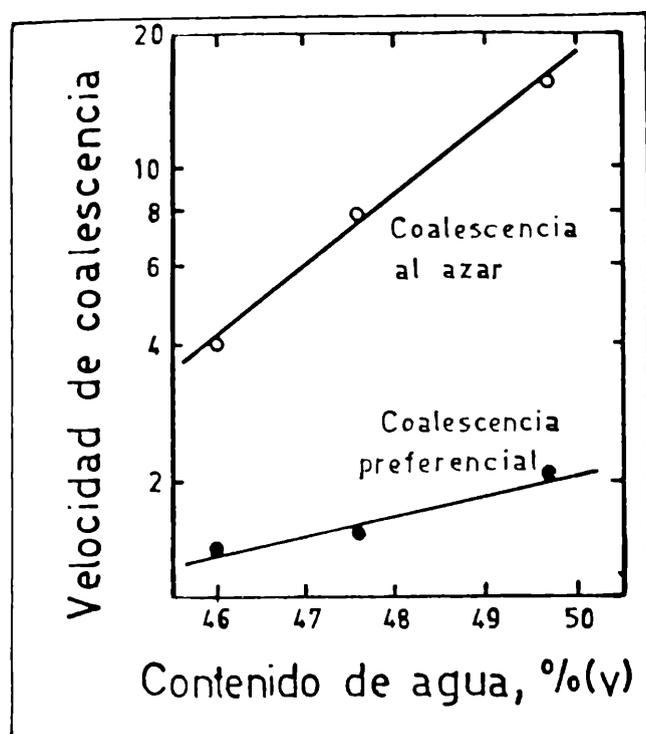


FIGURA 4.22.-Función de velocidad de coalescencia (en unidades arbitrarias) para mecanismos de coalescencia al azar y preferencial en función del contenido de agua. Kapur (50).

El "índice de peletizabilidad" es de importancia para estimar el probable comportamiento de un material dado en granulación en gran escala.

Sastry (33) desarrolló una expresión del índice de peletizabilidad para cuantificar las velocidades de crecimiento de pelets y modelos de balance de población y estudió las distribuciones de tamaño para los mecanismos de coalescencia y formación de capas.

Propuso una relación exponencial entre el número de revoluciones del tambor necesarias para alcanzar un determinado diámetro y el contenido de agua.

$$t(\bar{D}, A) = \tau(\bar{D}) \exp(-2,3 QA)$$

donde:

$\tau(\bar{D})$ = tiempo normalizado necesario para alcanzar el diámetro promedio \bar{D} .

$t(\bar{D}, A)$ = número de revoluciones para alcanzar el diámetro promedio \bar{D} con un contenido de agua A .

- Q = pendiente del gráfico semilogarítmico entre t y A .

A = contenido de agua.

Propuso un parámetro normalizador $\beta^* = \exp(2,3 QA)$, independiente del tiempo de aglomeración, y que puede tomarse como una medida de la peletizabilidad del material. Desde un punto de vista práctico se puede emplear el logaritmo de β^* :

$$\beta = \log \beta^* = QA$$

donde:

β = índice de peletizabilidad.

Existe una dependencia lineal entre el índice de peletizabilidad β y el contenido de agua, mientras la relación con la peletizabilidad, β^* , es exponencial. Graficando \bar{D} en función del tiempo normalizado, τ , se obtienen curvas de crecimiento en una forma invariante (Figura 4.23.).

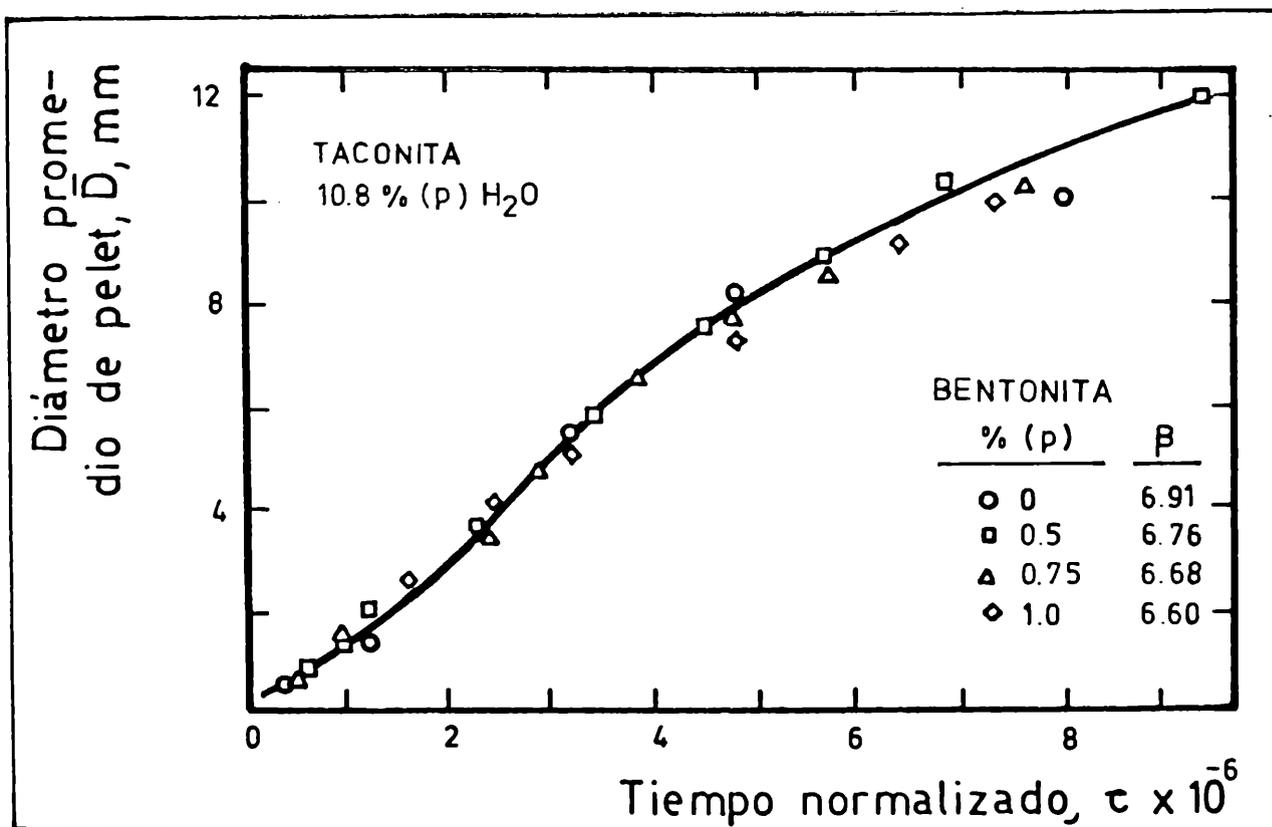


FIGURA 4.23.-Cinética de crecimiento en "batch" de pellets de taconita en términos del tiempo normalizado, τ , usando el índice de peletizabilidad, β , como parámetro normalizador. Sastry (33)

En general la investigación del proceso de peletización se ha realizado en "batch" donde el crecimiento por formación de capas está prácticamente ausente. Sin embargo en la mayoría de los circuitos operados en forma continua, el crecimiento ocurre por coalescencia y por formación de capas. Sastry (33) presentó consideraciones matemáticas para dar un modelo y analizar la cinética del proceso por formación de capas. Utilizó un método semi-continuo y estudió: distribución de tamaños de los pelets, velocidad de alimentación y contenido de humedad. Indicó que el crecimiento es proporcional a la superficie expuesta, en coincidencia con Capes (5) e hizo notar la naturaleza compleja del crecimiento por formación de capas, debido en principio a la interacción no-lineal de las variables de operación.

Consideró dos comportamientos diferentes de crecimiento en términos de la velocidad de desaparición de los finos alimentados: a) consumo instantáneo, b) consumo parcial.

Con experiencias en operación semi-continua encontró que para velocidad de alimentación constante, el contenido de agua tenía un efecto sorprendente sobre la velocidad de crecimiento por formación de capas. En general, los más altos contenidos de agua dieron las mayores velocidades de crecimiento.

Sin embargo, hubo una región de contenido de agua que no altera la velocidad de crecimiento (Figura 4.24.).

Además graficó el diámetro promedio de pelet en función del número de revoluciones del tambor, para diferentes contenidos de agua y diferentes velocidades de alimentación (Figura 4.25.). De la pendiente de estas curvas se puede estimar la peletizabilidad. Como la pendiente aumenta con el tiempo, es evidente que la peletizabilidad es una función del tiempo.

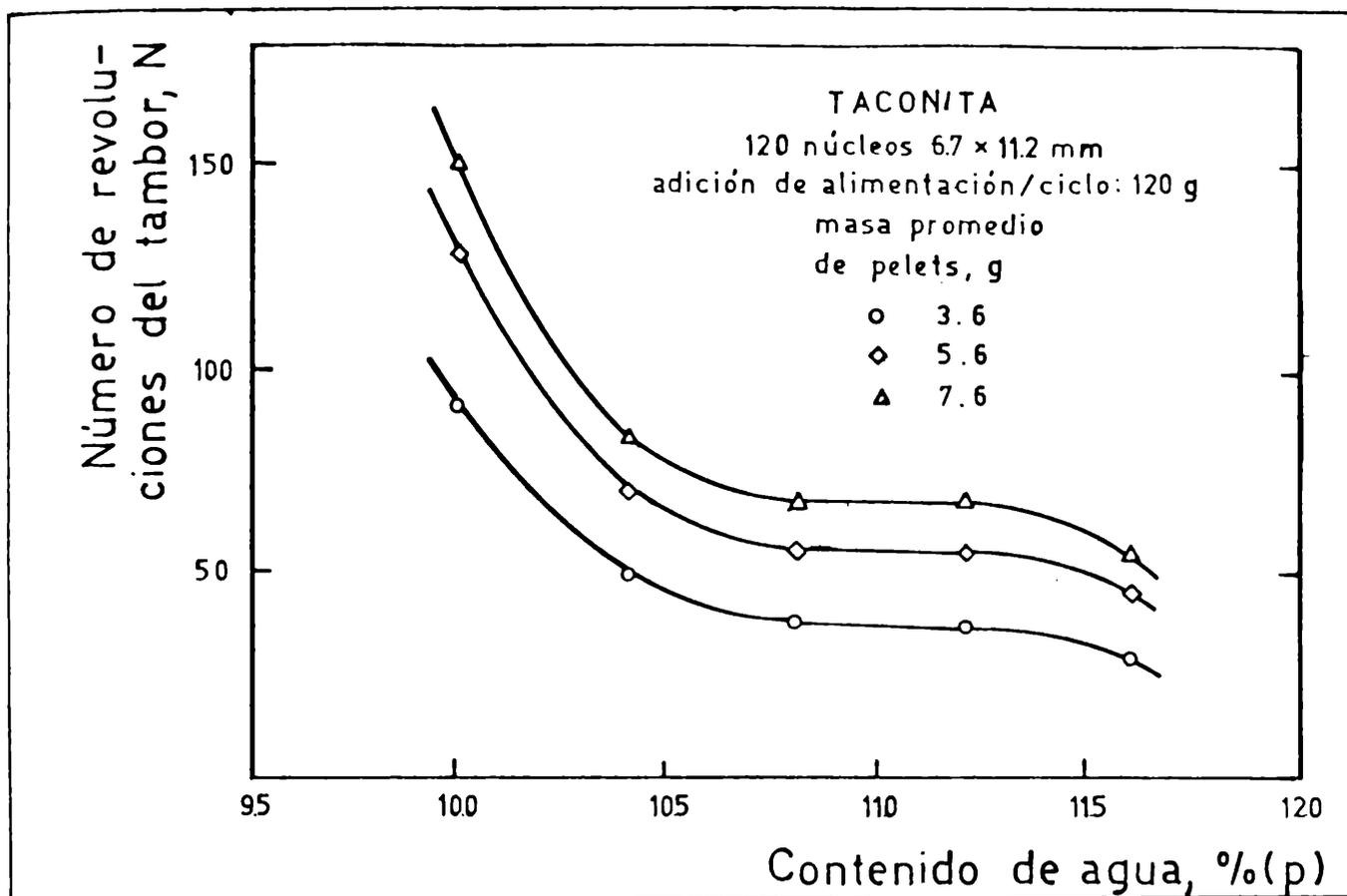


FIGURA 4.24.-Números de revoluciones del tambor necesarios para alcanzar la masa promedio indicada en función del contenido de agua alimentada. Sastry (33).

Esto está de acuerdo con los resultados de estudios de peletización en operación "batch", donde la velocidad de coalescencia también aumenta en los estados iniciales de crecimiento. En experiencias con alimentación continua, en contró que la velocidad de aumento de la masa promedio de pelet era igual a la velocidad de alimentación. Además, el crecimiento por formación de capas es independiente del tamaño (todos los pelets crecen en la misma extensión). Esto es, la varianza del diámetro o de la masa permanecerían sin cambio. Sin embargo, las distribuciones de tamaño a varios estados de crecimiento mostraron una dispersión.

Por este motivo, Sastry (33) hizo una corrección a las expresiones matemáticas, introduciendo el concepto de una función de dispersión de tamaños.

De acuerdo a los resultados, caracterizó las variaciones en el crecimiento por la varianza de la masa, que aumenta linealmente con el tiempo.

Además, obtuvo soluciones numéricas de las distribuciones de tamaño de pellets para distintos valores de un parámetro que indica la contribución fraccional al crecimiento independiente de la masa.

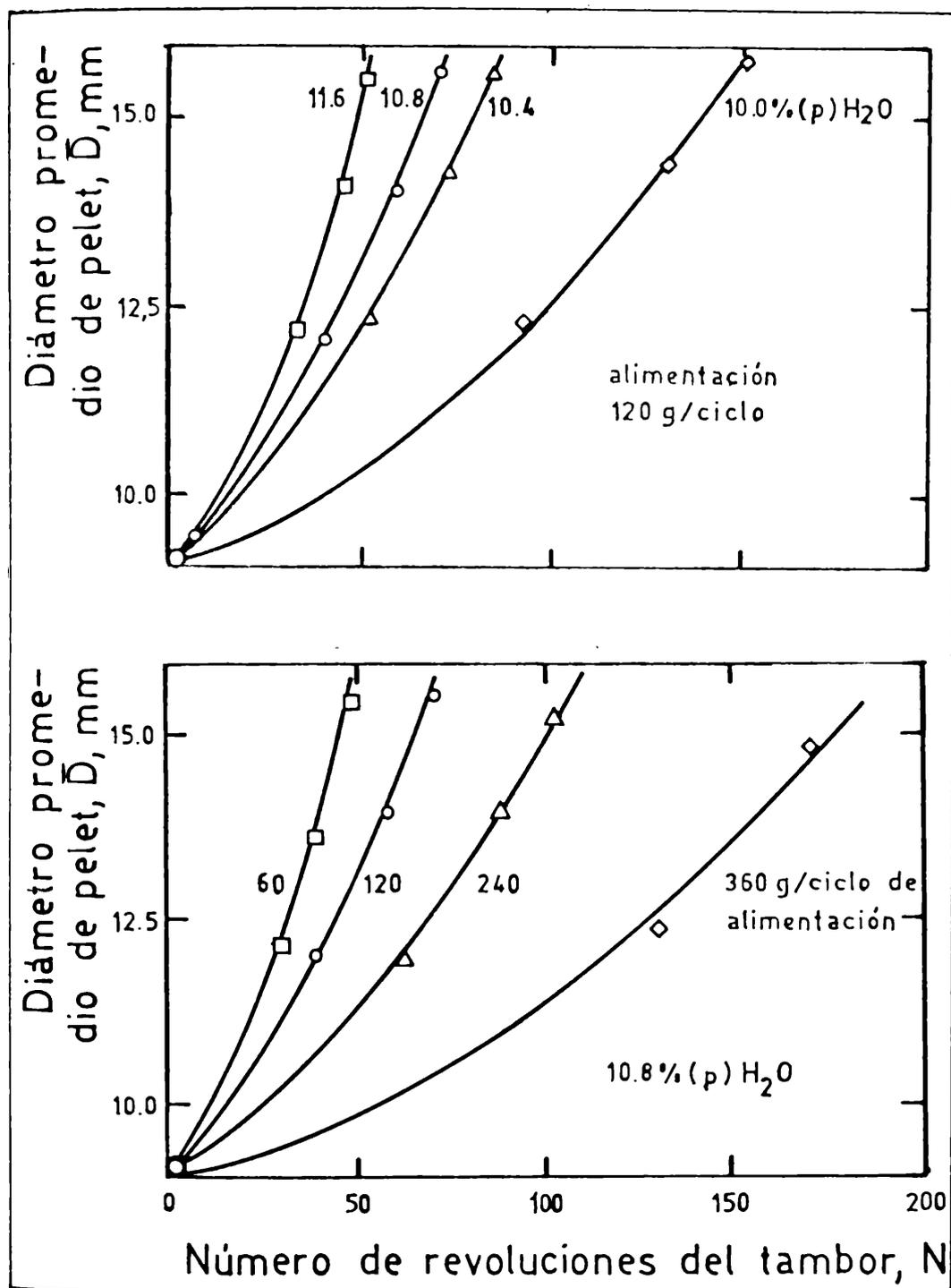


FIGURA 4.25.-Diámetro promedio de pellet vs número de revoluciones del tambor para distintas alimentaciones de agua y de sólido. Sastry (33).

Ouchiyama y Tanaka (51), desarrollaron una ecuación cinética de granulación basada en un mecanismo de crecimiento por coalescencia.

Además incluyeron una probabilidad de coalescencia basándose en un modelo físico de granulación (42). Dieron una expresión simple para el número de puntos de contacto entre partículas sólidas, basada en un simple modelo de empaquetamiento, donde las estimaciones teóricas están de acuerdo con datos experimentales, no sólo de empaquetamiento de esferas uniformes, sino también de empaquetamiento al azar (53).

Formularon un modelo para la compactación de pelets y dieron una relación teórica entre la porosidad y resistencia del pelet y las condiciones de operación (54).

5. PARTE EXPERIMENTAL

5.1. Crecimiento de pelets. Mecanismo de formación de capas

5.1.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Se peletizó gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) con la granulometría original del material, cuya curva de distribución (obtenida por análisis de las partículas con un granulómetro de láser CILAS, modelo 715) se muestra en la Figura 5.1.

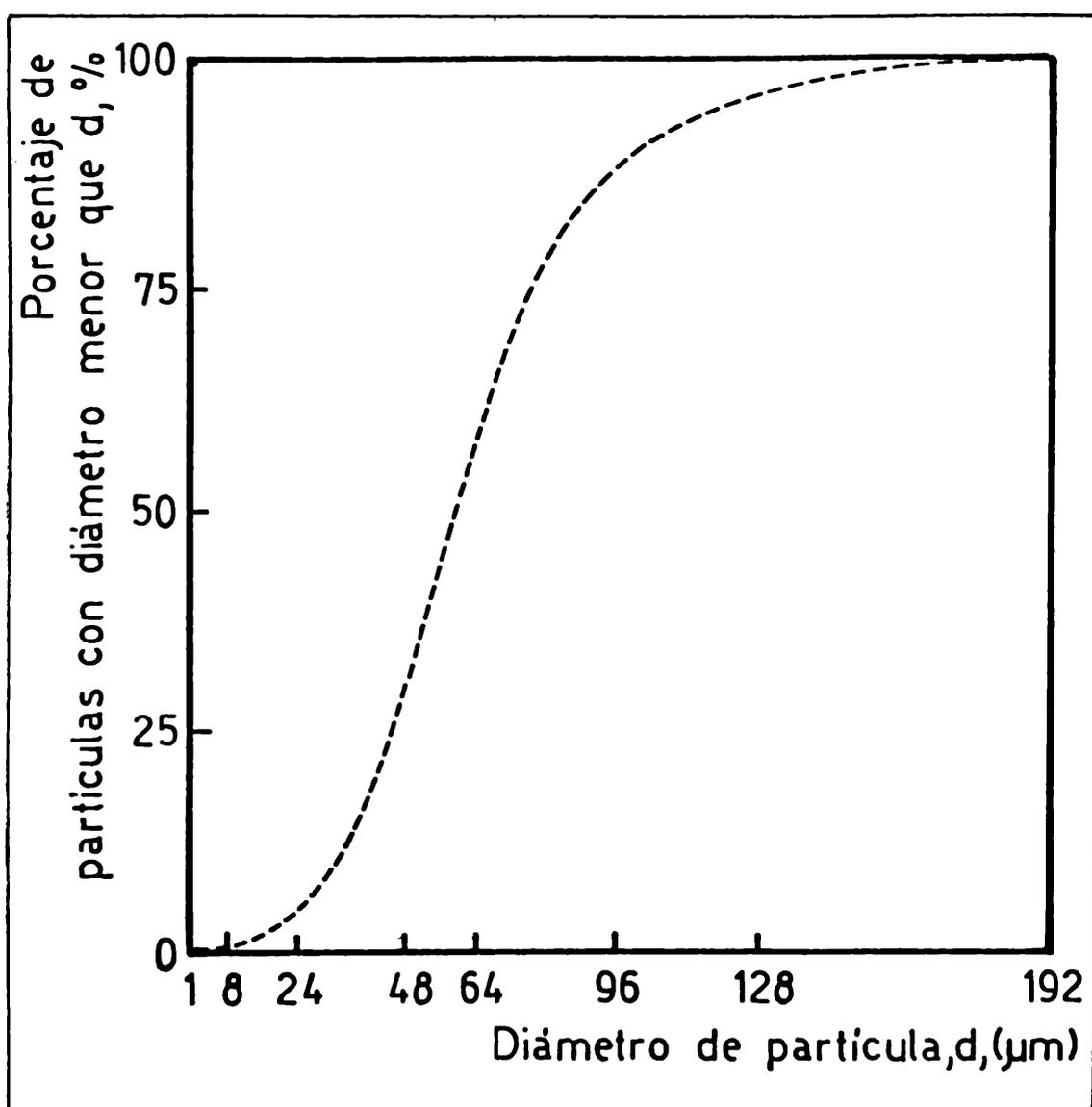


FIGURA 5.1.-Distribución granulométrica de finos de gibbsita.

Se partió de núcleos de granulometría comprendida entre 4 y 3,36mm (tamices N°5 y N°6 de la serie ASTM).

En las experiencias realizadas se utilizó mogul* como ligante en una proporción del 3% en peso respecto de los finos alimentados.

Para la formación de pelets verdes se empleó un disco peletizador (Fotografía 5.1.) accionado por un motor con regulador de velocidad dentro del rango a trabajar. El disco tenía 35 cm de diámetro y 7,5 cm de altura de pared periférica y además de poder modificarse su velocidad de giro podía variarse la inclinación del mismo.

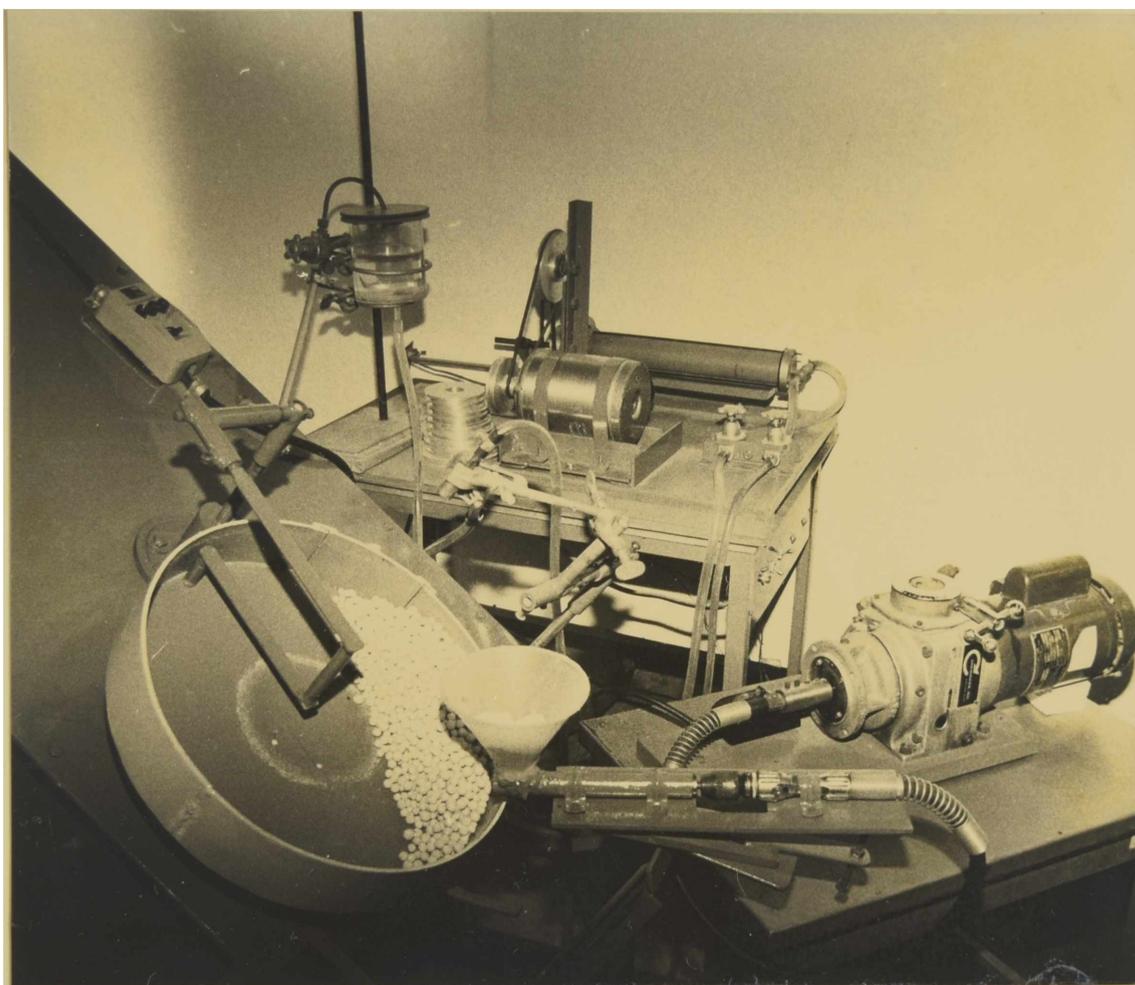
El sólido fino fue agregado por un sistema constituido por una pequeña tolva comunicada con un tornillo alimentador de paso pequeño y accionado por un motor de velocidad regulable (Fotografía 5.2.).

Por otra parte, la alimentación líquida se realizó mediante un sistema consistente en un émbolo, cuya velocidad de avance estuvo gobernada por un motor de 60 rpm y regulable, aplicando distintas reducciones por uso de poleas intermedias intercambiables, de diferentes diámetros. El agua fue alimentada en forma de fina lluvia, para lo cual el pico de salida estuvo constituido por un tubo interno de diámetro muy pequeño (para paso del agua) y uno exterior de mayor diámetro con entrada de aire a presión (Fotografía 5.3.).

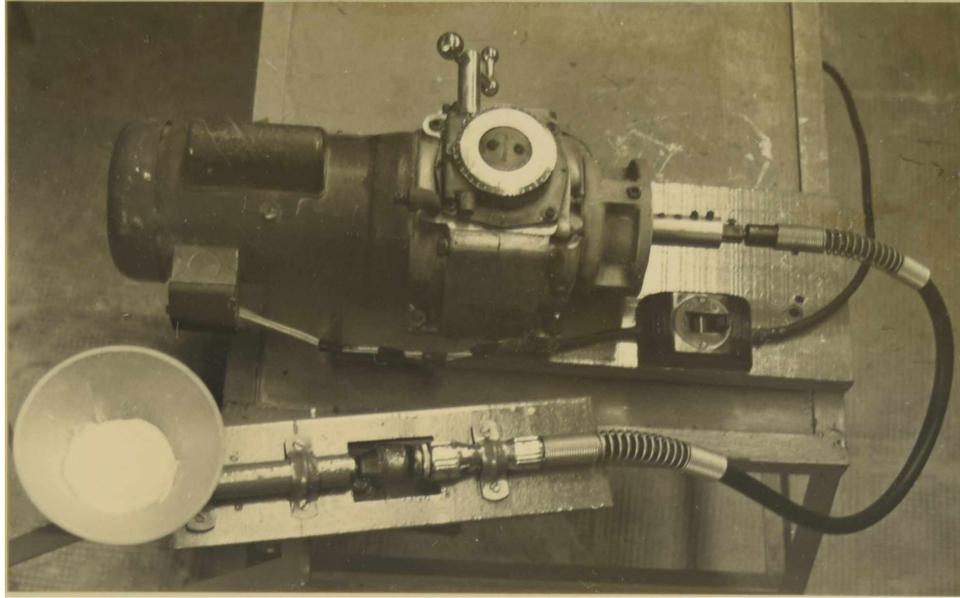
5.1.2. TECNICAS OPERATIVAS

Se peletizó en un sistema "semi-continuo", entendiéndose por tal aquel en el cual la operación es discontinua en cuanto se realiza una única alimentación de núcleos de granulometría acotada, al iniciarse la operación y porque

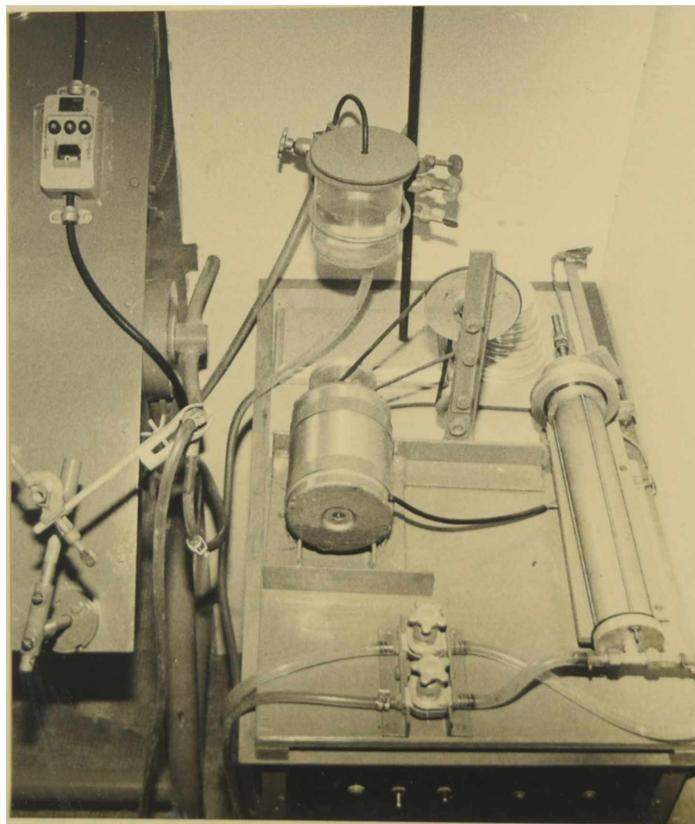
* Mogul: es el nombre comercial de un aglomerante fabricado a base de almidón de maíz pre-gelatinado. Es compatible con otros aglomerantes y confiere mayor resistencia a los pelets verdes. No absorbe agua inmediatamente, por lo tanto los pelets verdes adquieren mayor resistencia después de un corto tiempo.



FOTOGRAFIA 5.1.-Equipo peletizador



FOTOGRAFIA 5.2.-Sistema de alimentación de sólidos.



FOTOGRAFIA 5.3.-Sistema de alimentación de líquido
ligante.

se alimenta una cantidad prefijada de finos de modo tal que al terminar de agregarlos no haya desborde de pelets.

Por otra parte la operación se pudo considerar continua porque las alimentaciones líquida y sólida se realizaron en forma continua.

Se realizaron las operaciones de peletización en verde con diferentes contenidos de agua (A = 27,0%, 25,9%, 24,7%, 23,6%, 22,4% y 20,7% en peso respecto de los finos alimentados), seleccionados dentro del rango de peletizabilidad del material que se cubrió totalmente y que fue determinado previamente en forma experimental. El porcentaje de agua se fijó en cada experiencia, variando la velocidad de alimentación líquida entre 4,6 y 3,6 ml/min (Tabla 5.1.) para una única alimentación sólida que se fijó en 17,4 g/min.

Experiencia N°	Veloc. de alim. de agua(ml/min)	%(p) agua	Diámetro de polea (cm)
1	4,7	27,0	8,04
2	4,5	25,9	8,40
3	4,3	24,7	8,79
4	4,1	23,6	9,22
5	3,9	22,4	9,69
6	3,6	20,7	10,50

TABLA 5.1.- Alimentaciones de agua y poleas utilizadas para las distintas experiencias de estudio de crecimiento de pelets de gibbsita.

Este modo de operar se seleccionó de modo de tener en todos los casos la

misma disponibilidad instantánea de finos y establecer la relación entre las diferentes formas de crecimiento y el porcentaje de agua, ya que el resto de las variables de operación fueron fijadas previamente. Se trabajó con una velocidad de giro del disco de 14 rpm y una inclinación de 45°.

El ligante, mogul, fue agregado en forma sólida, mezclado con los finos.

En cada experiencia se cargó inicialmente el disco con 200 g de núcleos (correspondiente a aproximadamente 2000 núcleos) y se alimentaron 800 g de finos durante 46 minutos de tiempo total de operación. Cada experiencia se detuvo en cuatro instantes de la operación (10, 20, 30 y 40 min) tomándose fotografías de las distribuciones de tamaño de la carga de pelets del disco a esos tiempos y al finalizar la operación. El esquema de agregados de finos y agua correspondientes a los tiempos a los cuales fue detenida la operación se da en la Tabla 5.2.

Tiempo de rodado (min)	Finos agregados (g)	Agua agregada (ml)					
		Exp.N° 1	Exp.N° 2	Exp.N° 3	Exp.N° 4	Exp.N° 5	Exp.N° 6
10	174	47	45	43	41	39	36
20	174	47	45	43	41	39	36
30	174	47	45	43	41	39	36
40	174	47	45	43	41	39	36
46	104	28	27	26	25	23	22

TABLA 5.2.- Finos y agua agregados hasta la toma de cada fotografía de la distribución de tamaños de pelets a los tiempos de rodado indicados.

5.1.3. PARAMETROS A MEDIR Y EXPRESION DE RESULTADOS

Se siguió el proceso a través del aumento de un diámetro de pelet caracte-

rístico en función del tiempo de rodamiento, expresado este último como número de revoluciones (N) ya que la variable que interesa es la distancia recorrida por los pelets sobre el disco. Se eligió como diámetro característico de las distribuciones de tamaños de pelets, el diámetro promedio de pelet, \bar{D} .

Aunque éste es sólo uno de los parámetros que representan la distribución y no es suficiente en general para describir los espectros de tamaño completos, Sastry(33) demostró, como ya se mencionó anteriormente, que es un parámetro válido y útil para estudios de crecimiento. Para el cálculo de los valores de \bar{D} fue necesario medir los diámetros de los pelets en distintos instantes de la peletización. Las frecuencias de aparición de pelets con diámetros definidos fueron expresadas en forma porcentual y representadas gráficamente como frecuencias relativas y frecuencias relativas acumuladas en función del diámetro de pelet, D, para los distintos tiempos de rodamiento (N = 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones).

5.1.4. TECNICAS DE MEDIDA

Para la medición de los diámetros de los pelets obtenidos, se empleó una técnica fotográfica. La operación se detuvo a los tiempos prefijados, descargándose el contenido del disco sobre una base de fondo oscuro, construída para tal fin. Para la iluminación se empleó un estativo con cuatro lámparas de luz difusa de tal modo que los pelets no proyectaran sombras para no incurrir en errores posteriores en las medidas de los diámetros.

El cuadro abarcado por la cámara fue de 24 x 36 cm, utilizándose en la ampliación un campo de 18 x 24 cm. La cámara fotográfica, con película de 125 ASA se niveló conjuntamente con la base. Las ampliaciones se desarrollaron a tamaño natural utilizando como medida patrón un numerador cuadrado de 2 cm de lado ubicado en el centro visual de la lente.

Sobre la ampliación y superponiendo un papel milimetrado transparente se procedió a la medida de los diámetros de los pelets. Como los pelets no eran en todos los casos totalmente esféricos, se midieron de cada uno, dos diámetros perpendiculares entre sí (el diámetro horizontal y el diámetro vertical), tomándose como diámetro de pelet el diámetro calculado como promedio aritmético de los diámetros horizontal y vertical medidos.

Las Fotografías 5.4.a a 5.9. corresponden a tomas de las distribuciones a distintos tiempos y para distintos contenidos de agua.

5.1.5. REPRODUCIBILIDAD DE DATOS

Se realizaron 3 ensayos de peletización, en iguales condiciones de operación y todos empleando 27,0% de agua con el objeto de establecer la reproducibilidad de datos. La Fotografía indicada con el número 5.4., corresponde a una vista parcial de las distribuciones de tamaño de pelets a los 46 minutos de operación, para los tres ensayos.

En la Figura 5.2. se representan tales distribuciones. Los diámetros promedio de pelets obtenidos en cada experiencia fueron 7,68, 7,80 y 7,79 mm, lo que se consideró como satisfactorio.

5.1.6. RESULTADOS Y DISCUSION

Resulta oportuno anotar que las experiencias programadas, peletizando en operación semicontinua, con alimentación continua de sólidos finos y agua y partiendo de núcleos, han tenido como propósito aislar el mecanismo de crecimiento de pelets por formación de capas. Las Fotografías 5.5. a 5.10. corresponden a la distribución granulométrica de pelets con distintos contenidos de agua y para los diferentes tiempos de peletización.

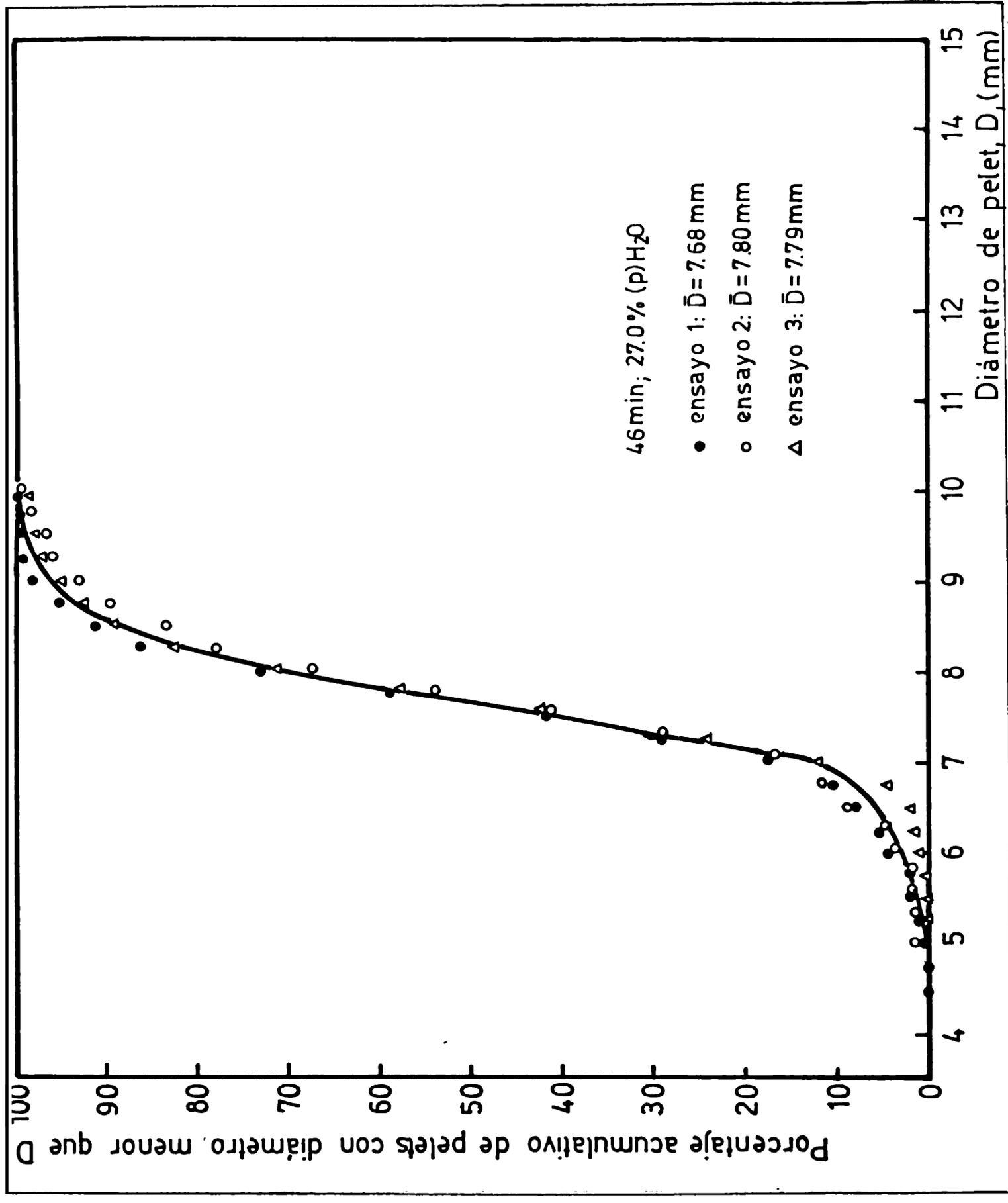
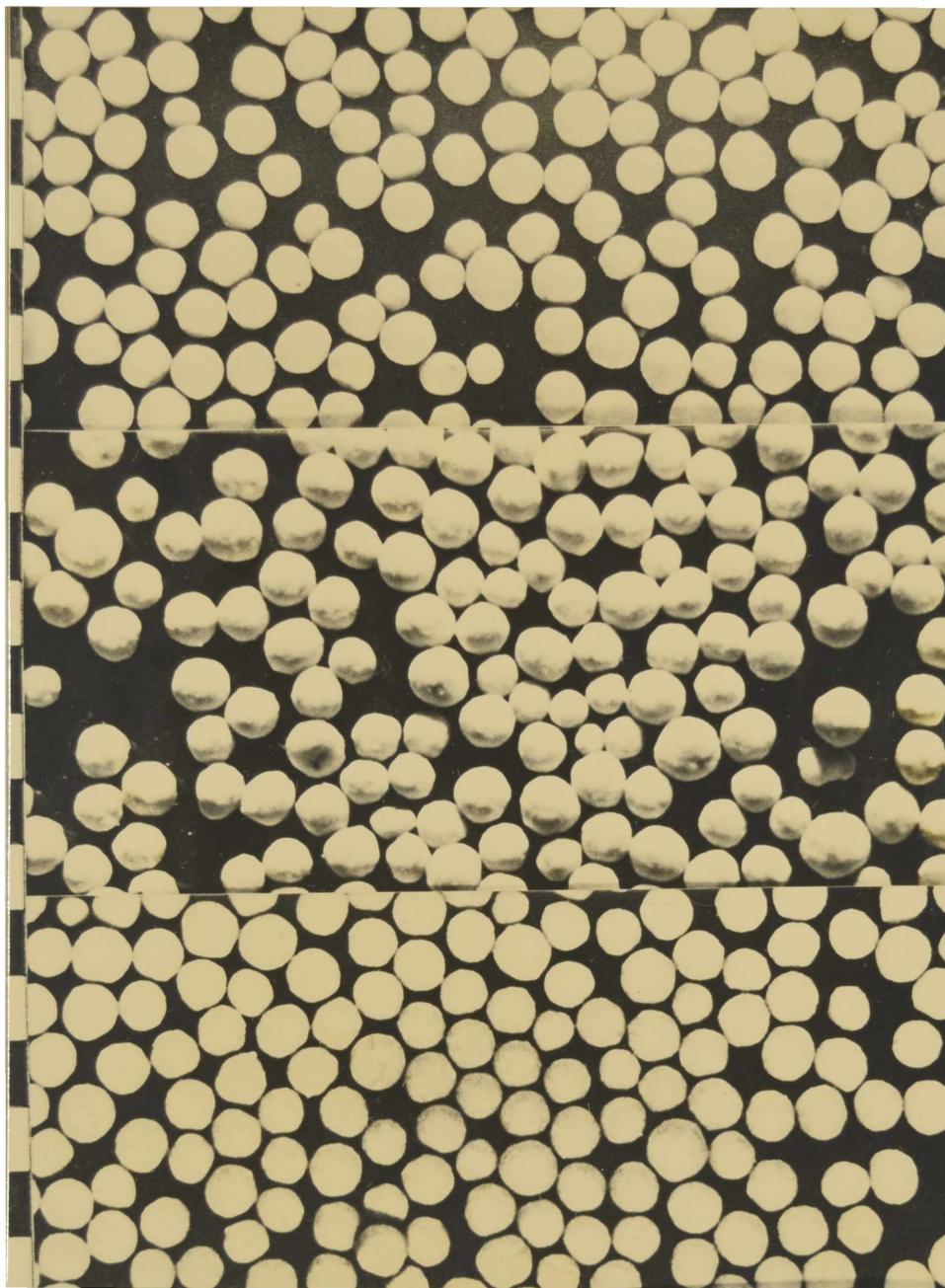
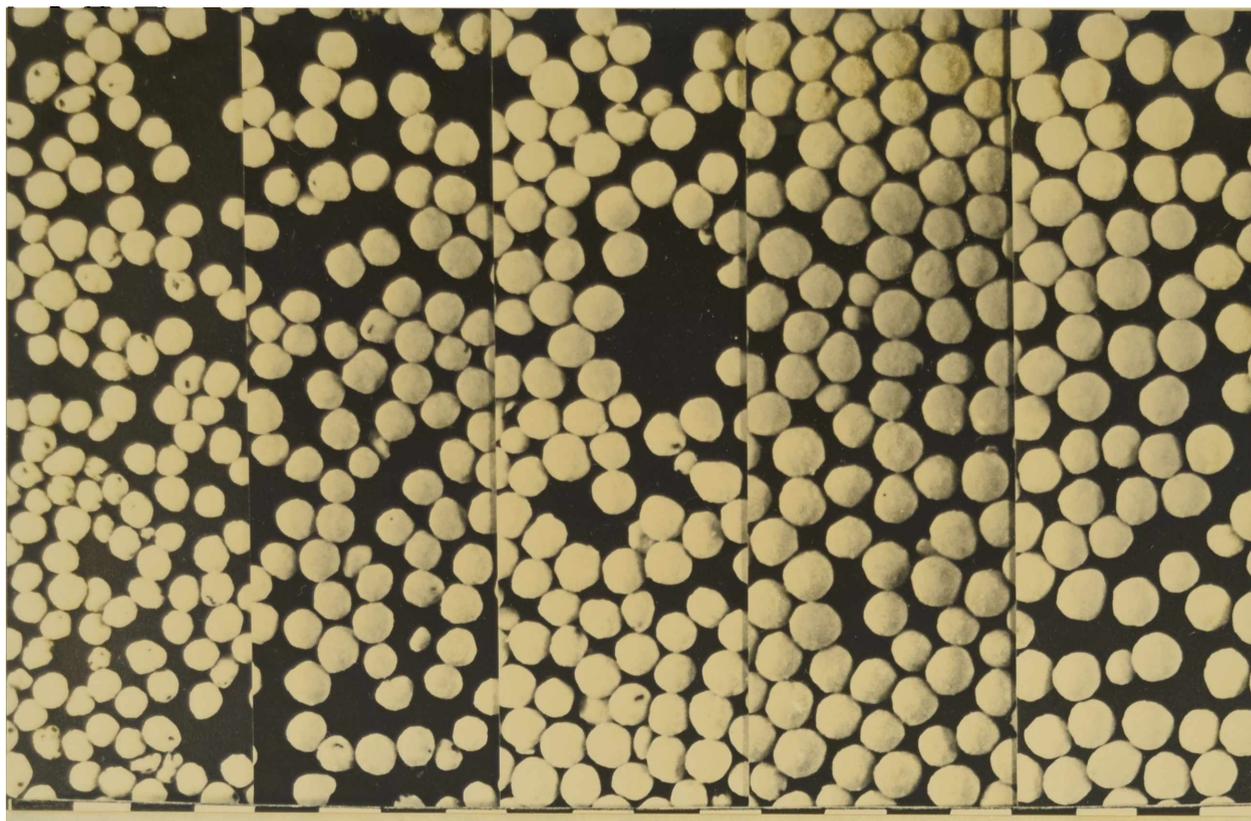


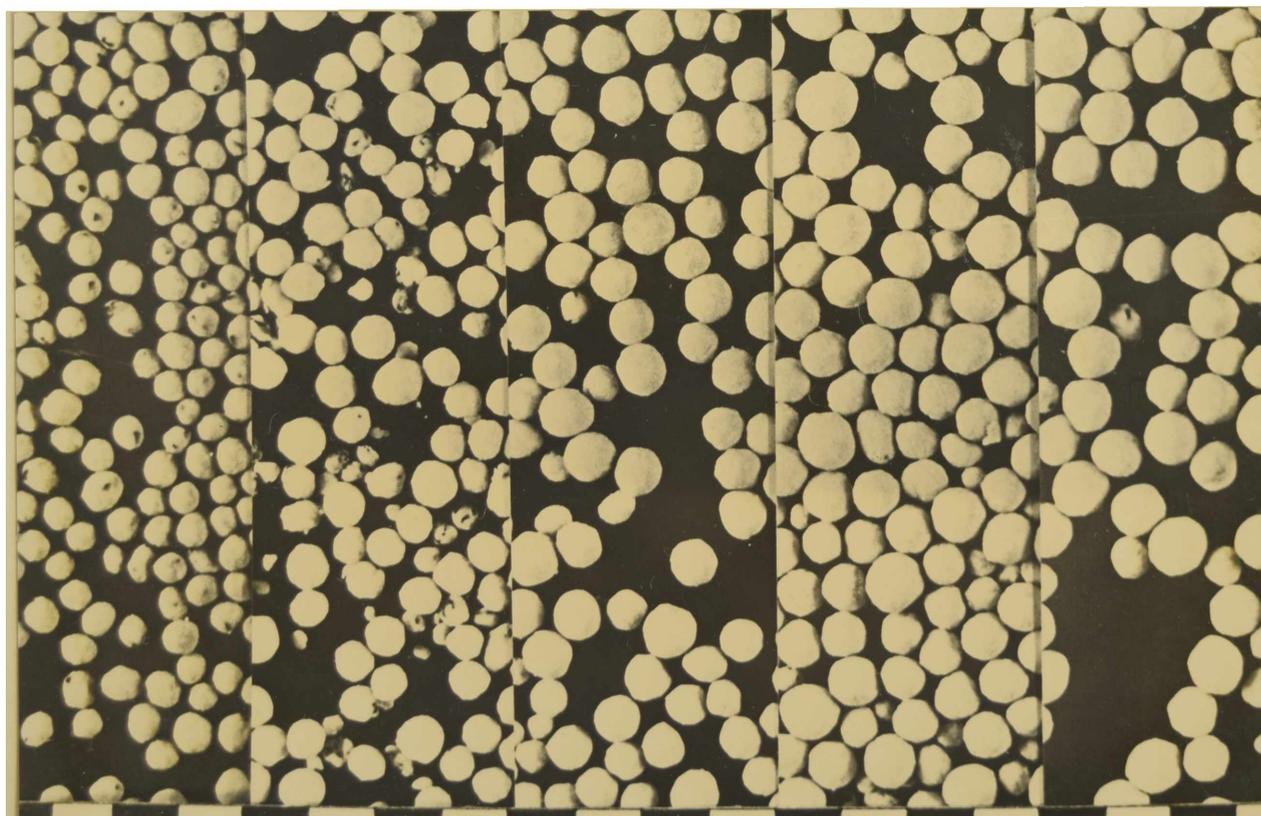
FIGURA 5.2. - Distribuciones granulométricas acumulativas de pelets de gíbsita con 27,0% (p)H₂O para tres ensayos diferentes, a 644 revoluciones del disco.



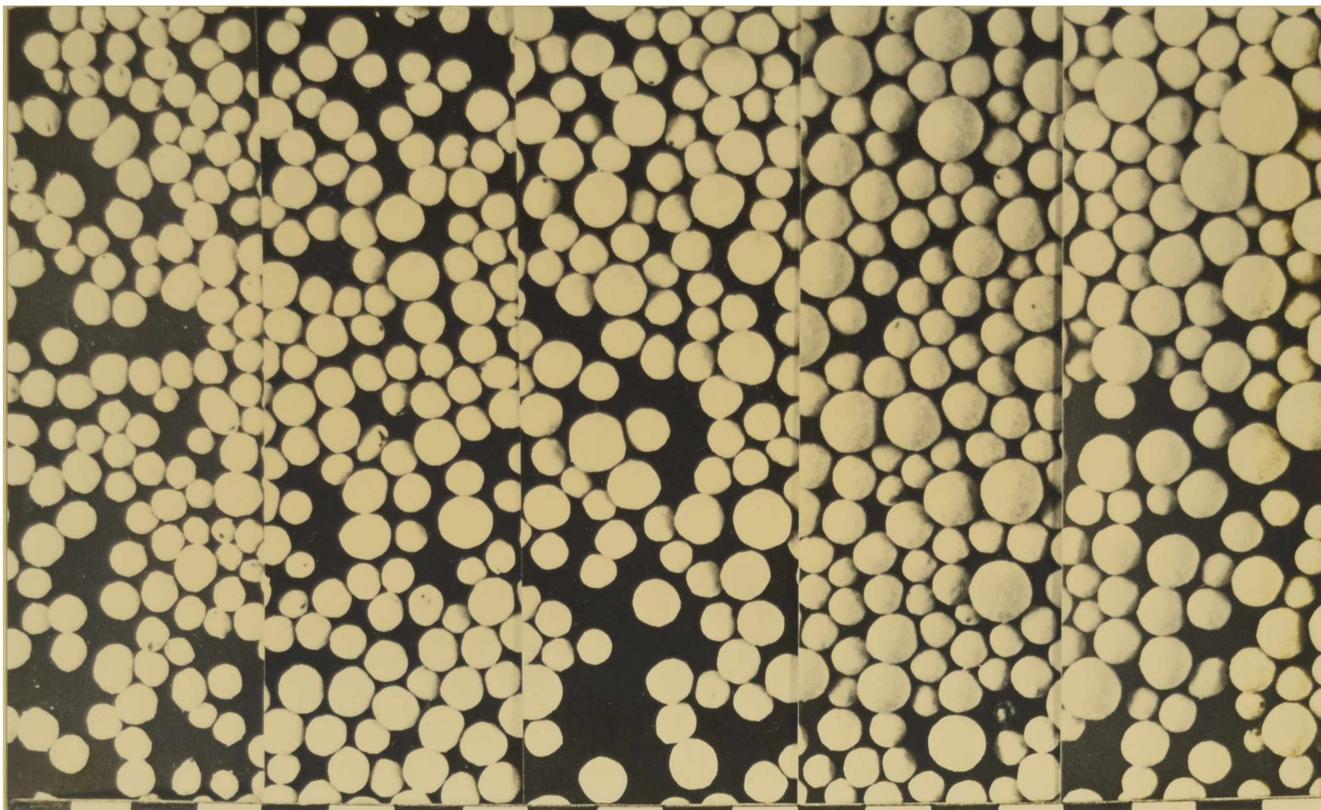
FOTOGRAFIA 5.4.-Vista parcial del lecho de pelets de gibbsita con 27%(p) H_2O y 644 revoluciones del disco, para tres ensayos diferentes.



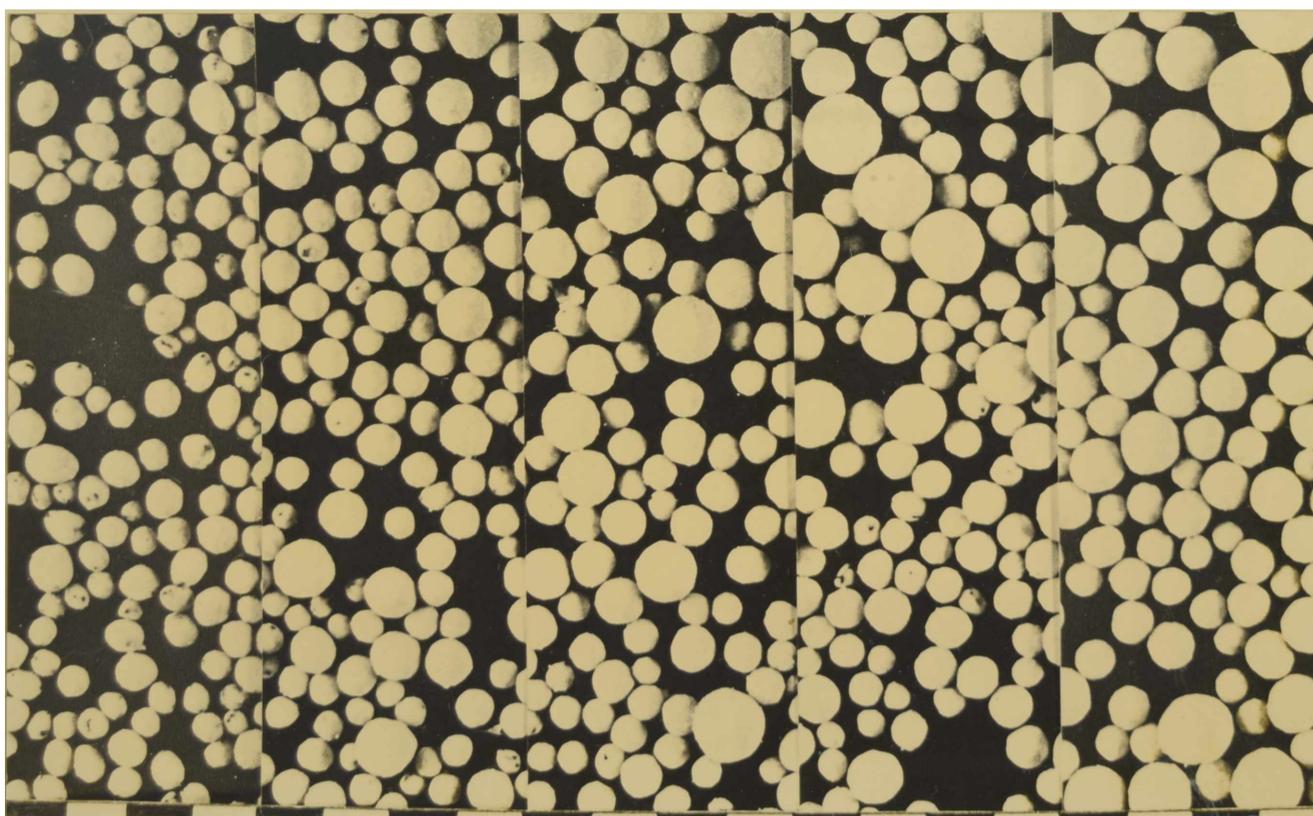
FOTOGRAFIA 5.5.-Vista parcial del lecho de pelets de gibbsita con 27,0%
(p) H_2O y 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.



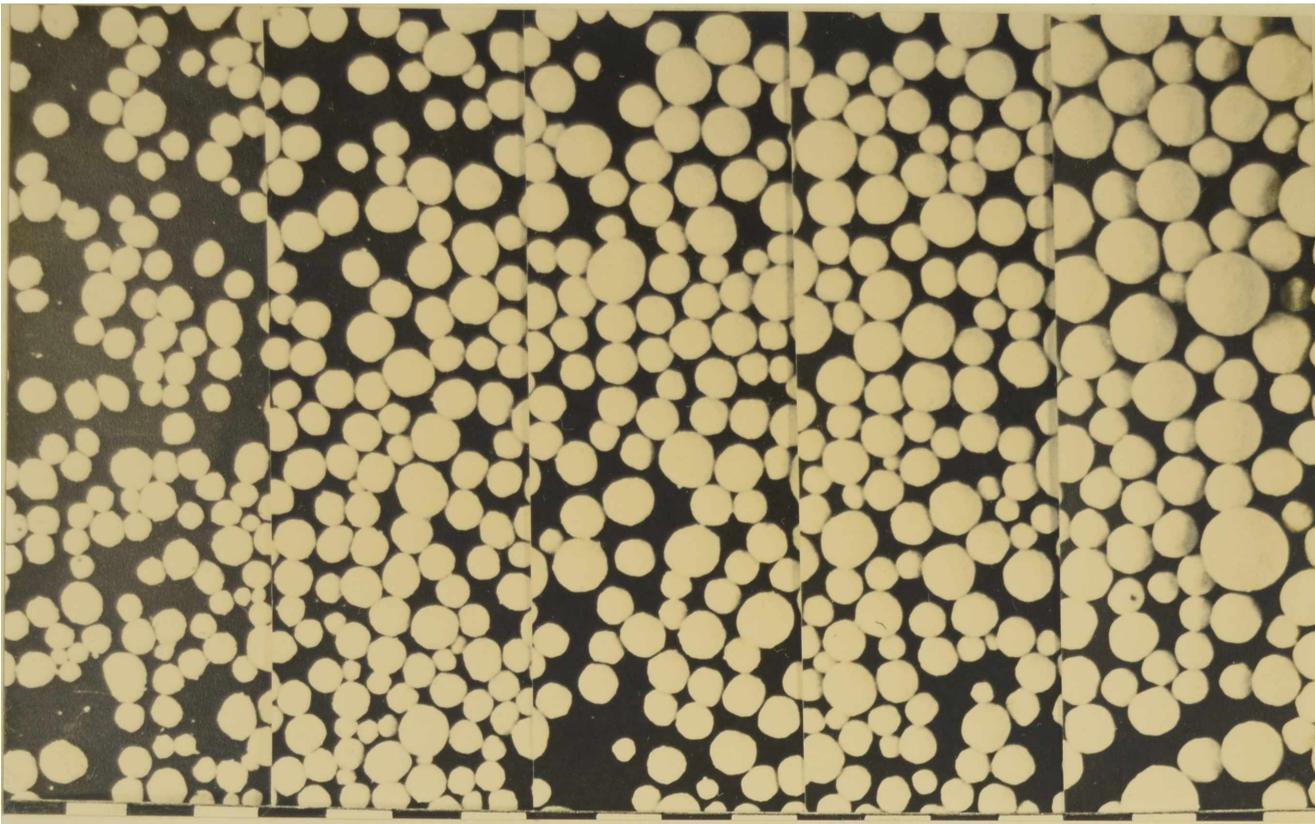
FOTOGRAFIA 5.6.-Vista parcial del lecho de pelets de gibbsita con 25,9%
(p) H_2O y 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.



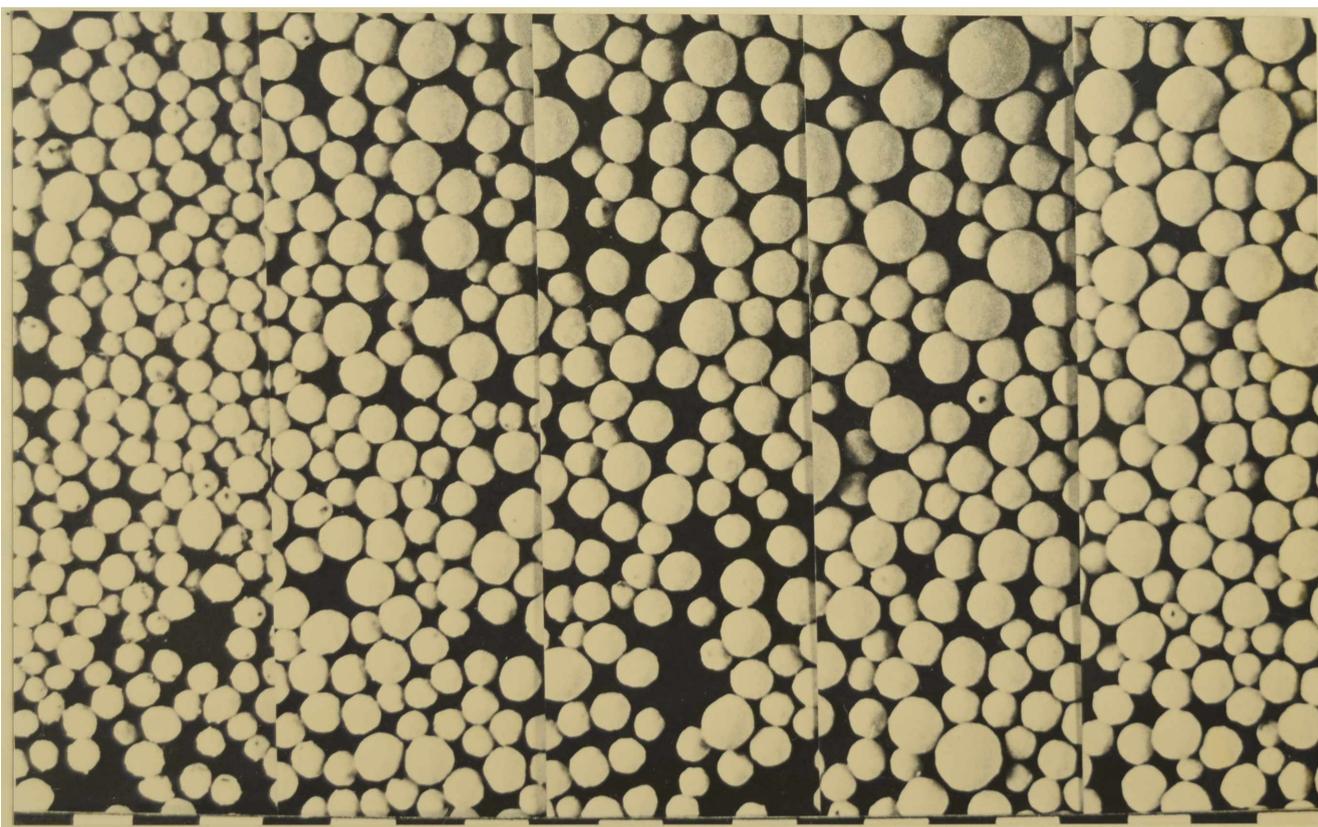
FOTOGRAFIA 5.7.-Vista parcial del lecho de pelets de gibbsita con 24,7 %
(p) H_2O y 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.



FOTOGRAFIA 5.8.-Vista parcial del lecho de pelets de gibbsita con 23,6 %
(p) H_2O y 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.



FOTOGRAFIA 5.9.-Vista parcial del lecho de pelets de gibbsita con 22,4 %
(p) H_2O y 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.



FOTOGRAFIA 5.10.-Vista parcial del lecho de pelets de gibbsita con 20,7 %
(p) H_2O y 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

En las Figuras 5.3.(a-f) se muestran las distribuciones acumulativas de frecuencias relativas de pelets con diámetros menores que el diámetro \bar{D} en función de dicho diámetro para distintos grados de peletización. Las figuras se dan en orden decreciente de contenidos de agua. Las distribuciones correspondientes a pelets con contenidos de agua más altos son estrechas, mientras que en la zona de bajos contenidos de agua, se amplían notablemente. De ello se desprende la existencia de un comportamiento diferente del sistema en distintas regiones del rango de peletizabilidad. Esto se debe a que la distribución de agua no es ideal en términos de uniformidad de mojado, como consecuencia de una alimentación líquida localizada, por la ubicación del alimentador. Esto da como resultado las distribuciones de frecuencias relativas que se muestran en las Figuras 5.4.(a-f), donde se observa un crecimiento preferencial de algunos pelets (los cuales presentan diámetros anormalmente altos que no presentarían en condiciones de mojado ideal) para los más bajos contenidos de agua, donde las curvas se sesgan hacia el lado de los diámetros mayores. Con mojado ideal, las distribuciones deberían ser simétricas y más estrechas, debido a que se parte de núcleos de granulometría acotada y todos tendrían igual probabilidad de crecimiento. Tales distribuciones se observan ya para contenidos de agua altos, especialmente para 27,0% de agua (en el límite del rango de peletizabilidad) y como caso límite en las distribuciones obtenidas en una simulación numérica (Apéndice II) donde se postula un reparto ideal de la alimentación líquida y crecimiento proporcional a la superficie (Figura 5.5.).

En el Apéndice I, Tabla I.1. se dan los valores de los diámetros promedio de pelets para distintos instantes de las peletizaciones con diferentes contenidos de agua, y los sesgos de las distribuciones de frecuencia correspondientes.

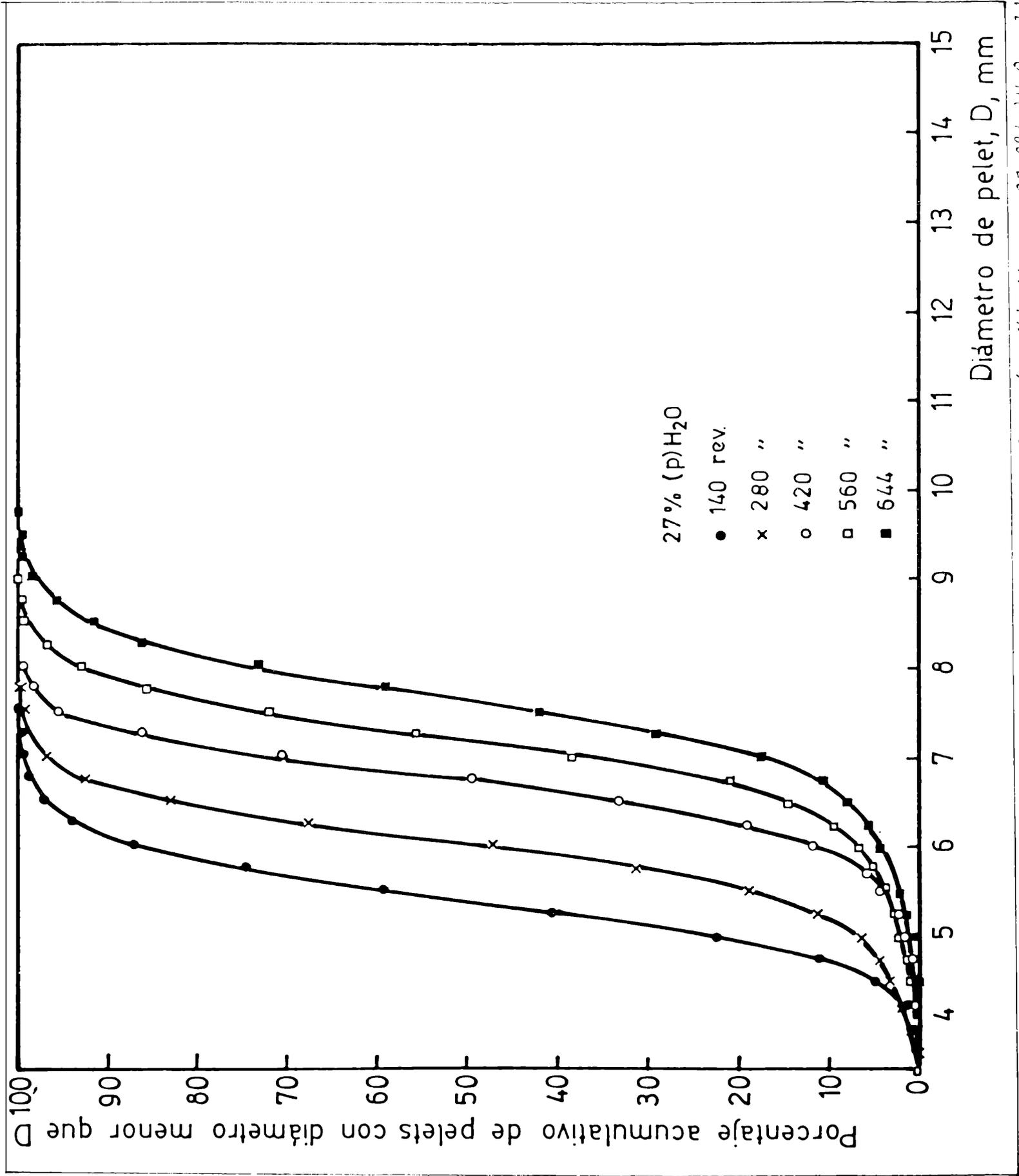


FIGURA 5.3(a).-Distribuciones granulométricas acumulativas de pellets de gábscita con 27,0%(p)H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

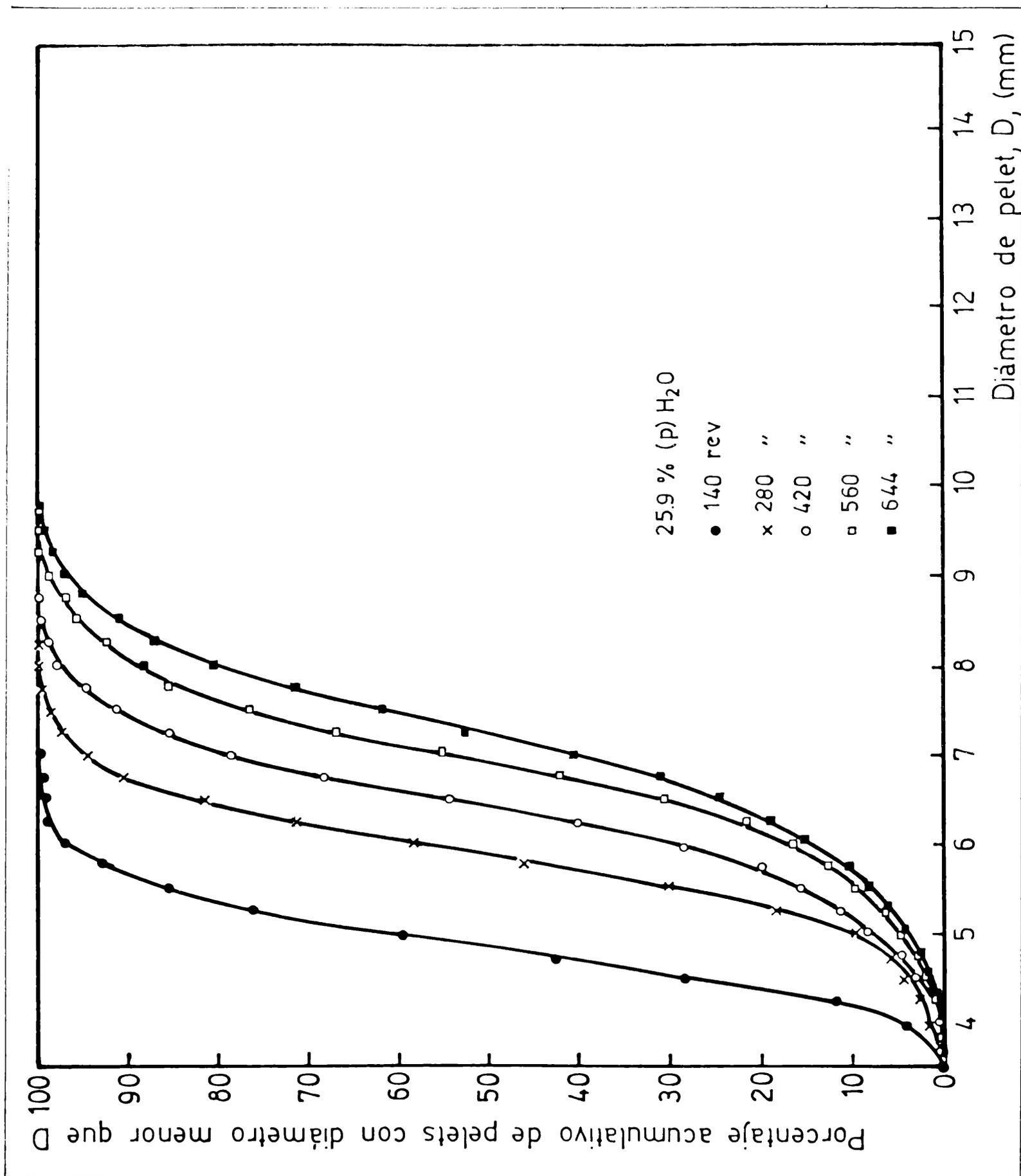


FIGURA 5.3(b). -Distribuciones granulométricas acumulativas de pelets de gáibbsita con 25,9% (p) H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

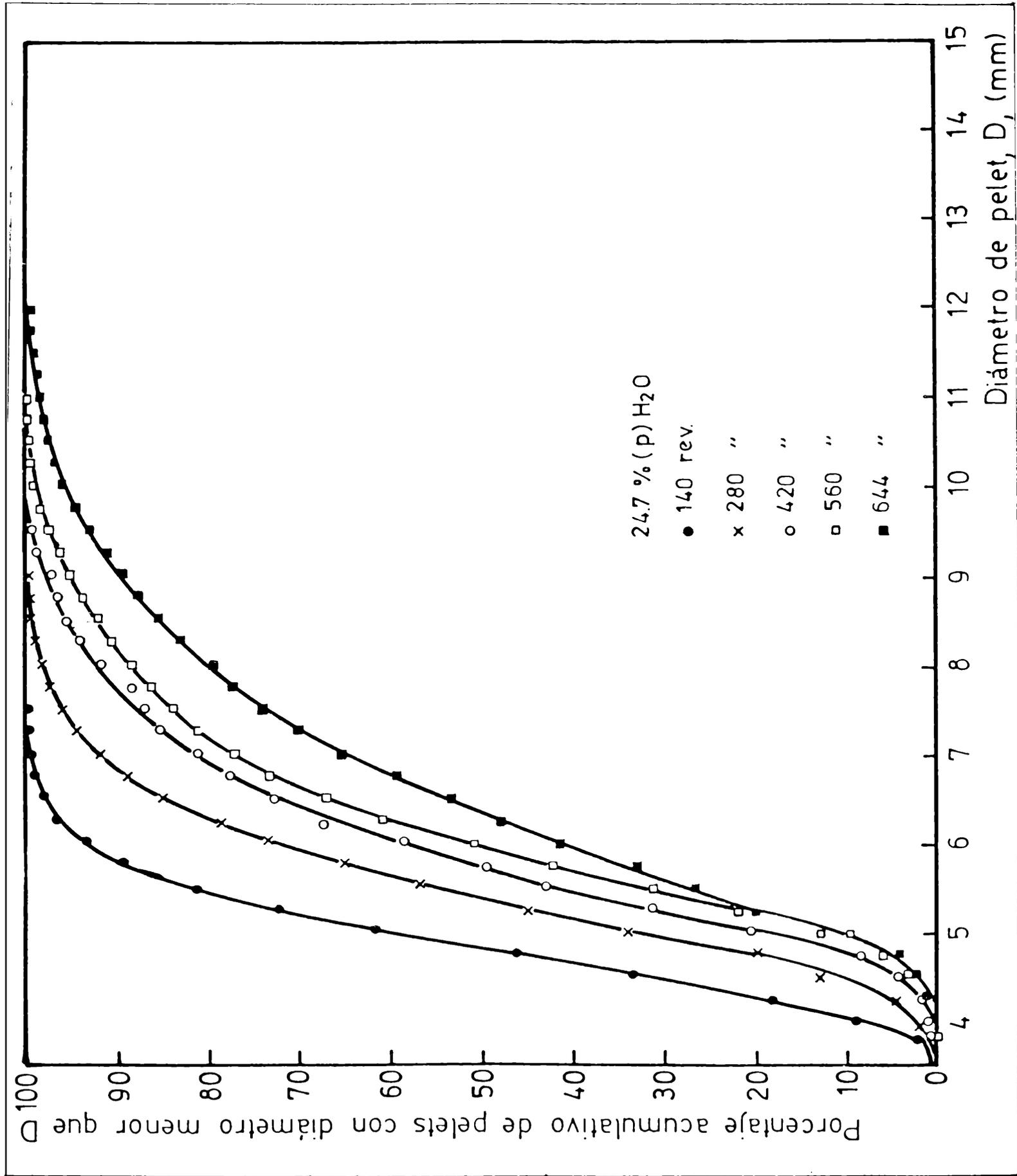


FIGURA 5.3(c).-Distribuciones granulométricas acumulativas de pelets de gíbbssita con 24,7%(p)H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

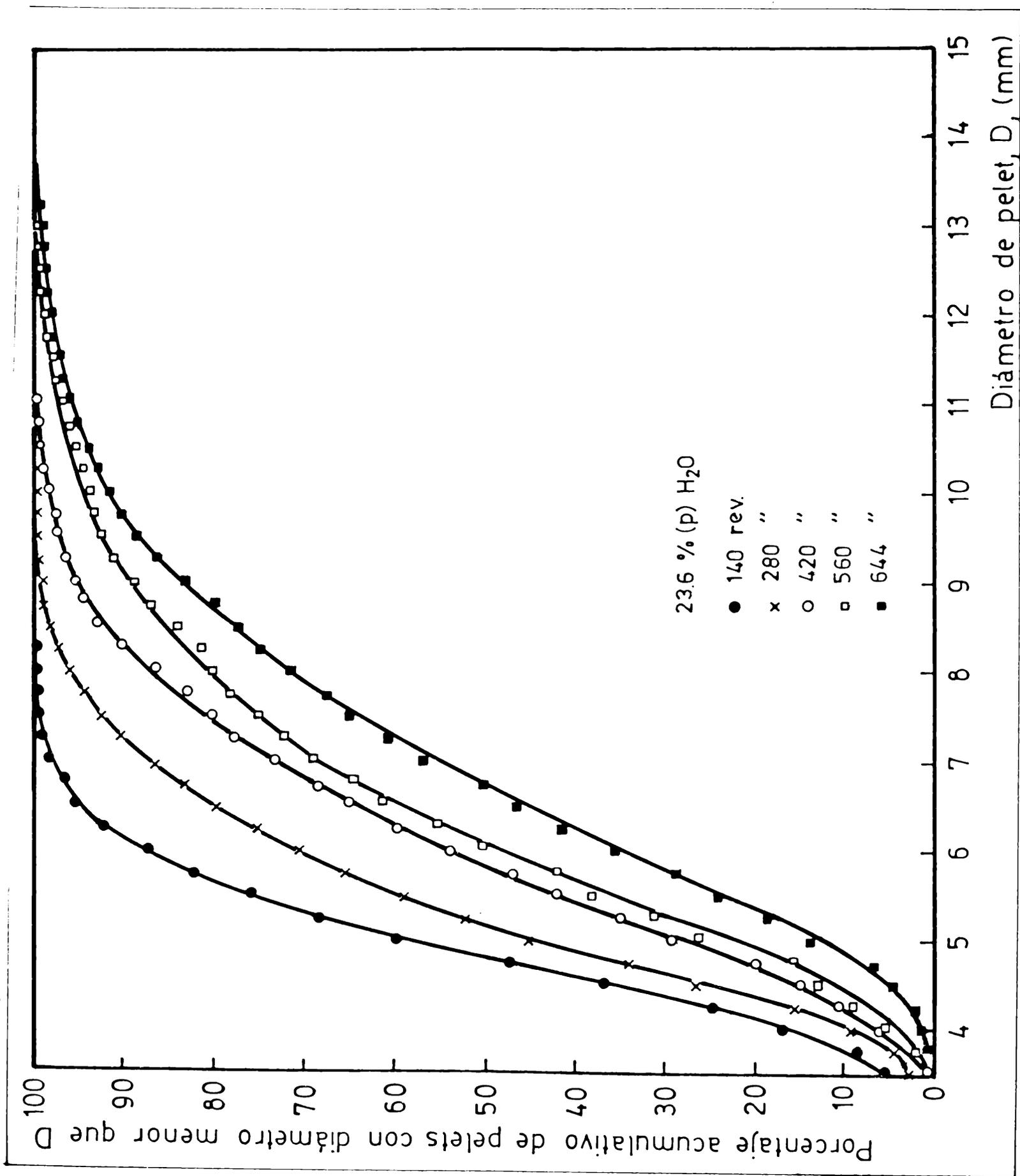


FIGURA 5.3(d). -Distribuciones granulométricas acumulativas de pellets de gibbsita con 23,6% H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

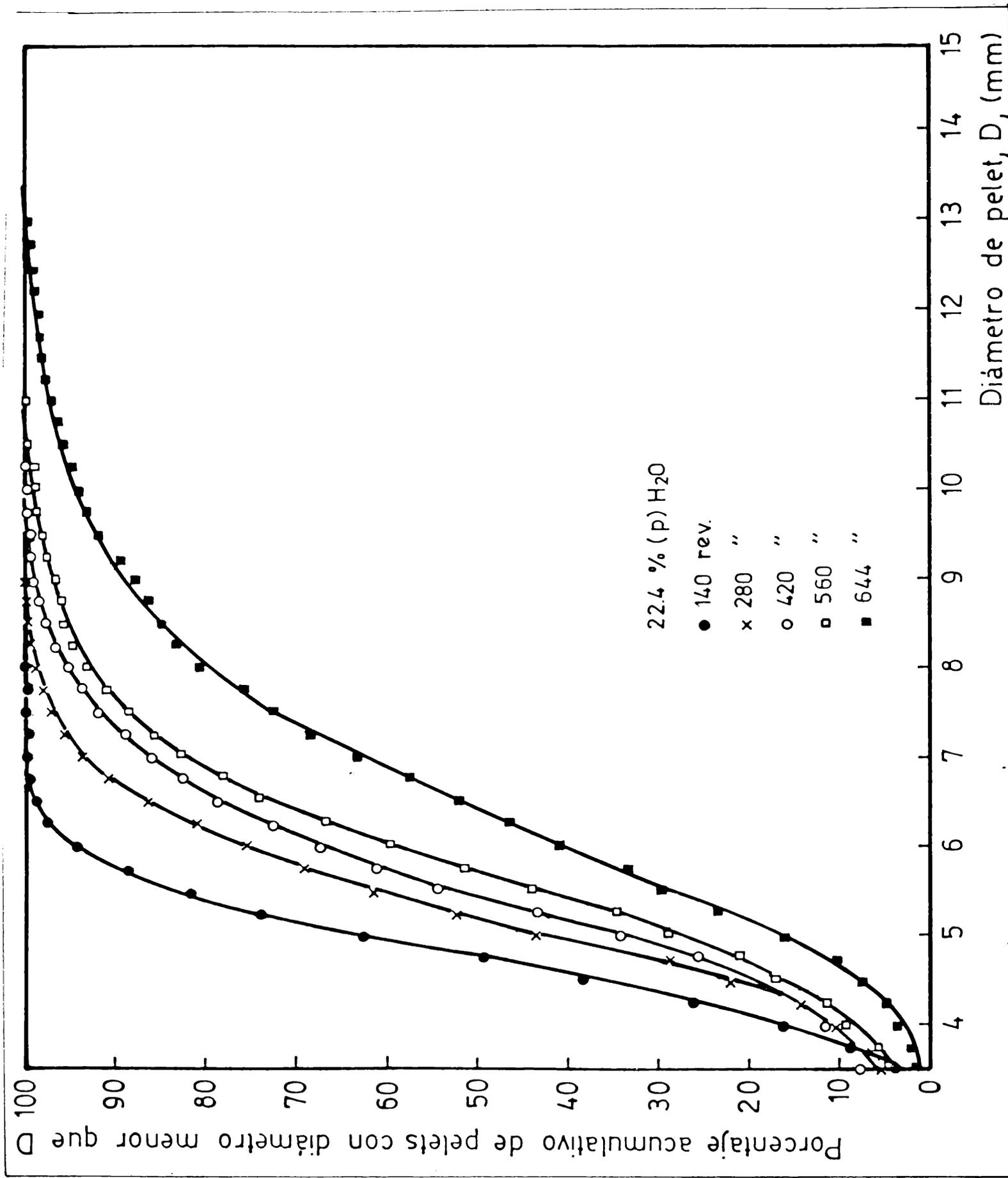


FIGURA 5.3(e).-Distribuciones granulométricas acumulativas de pelets de gibbsita con 22,4%(p)H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

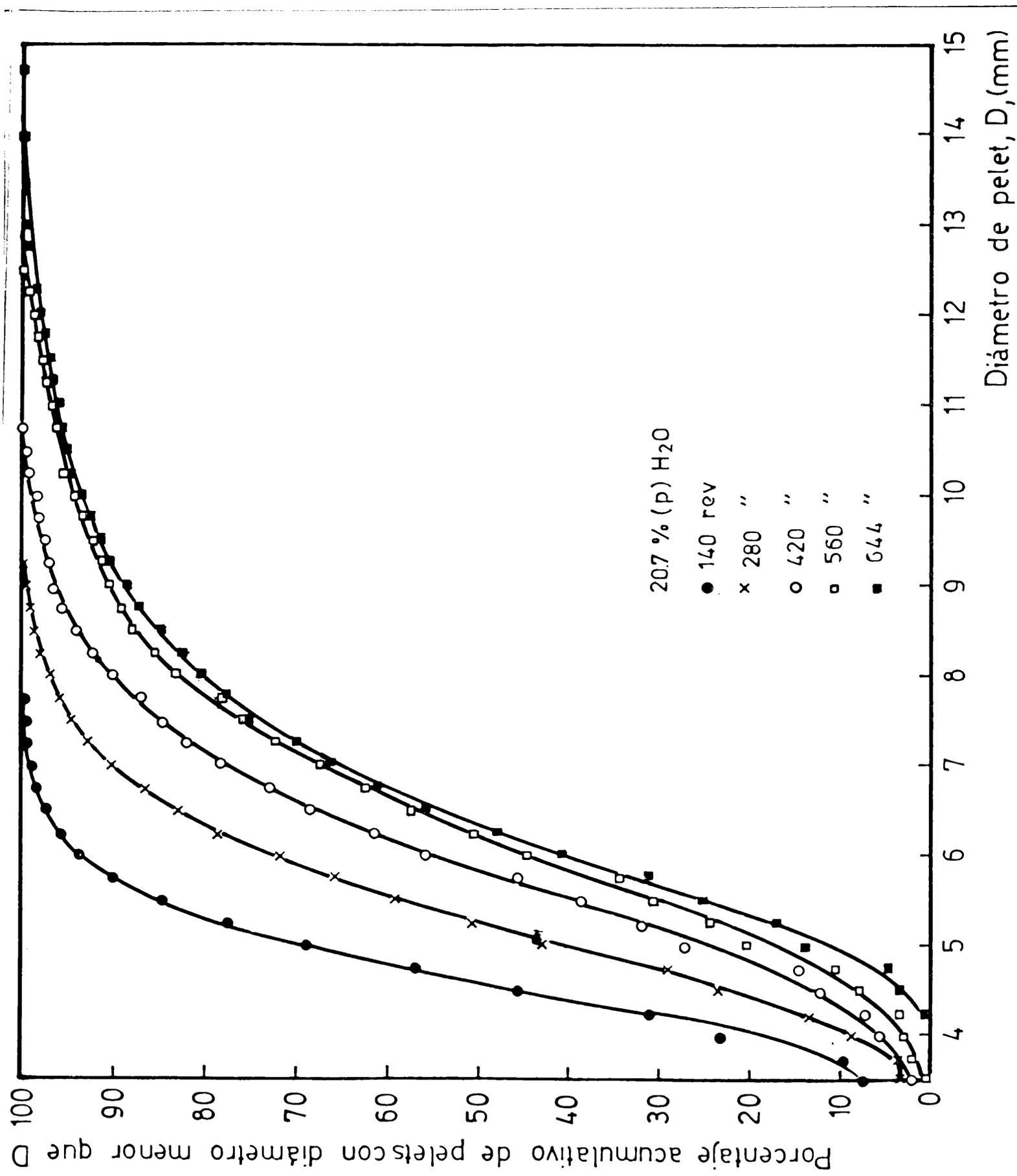


FIGURA 5.3(β).-Distribuciones granulométricas acumulativas de pelets de gibbsita con 20,7%(p)H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

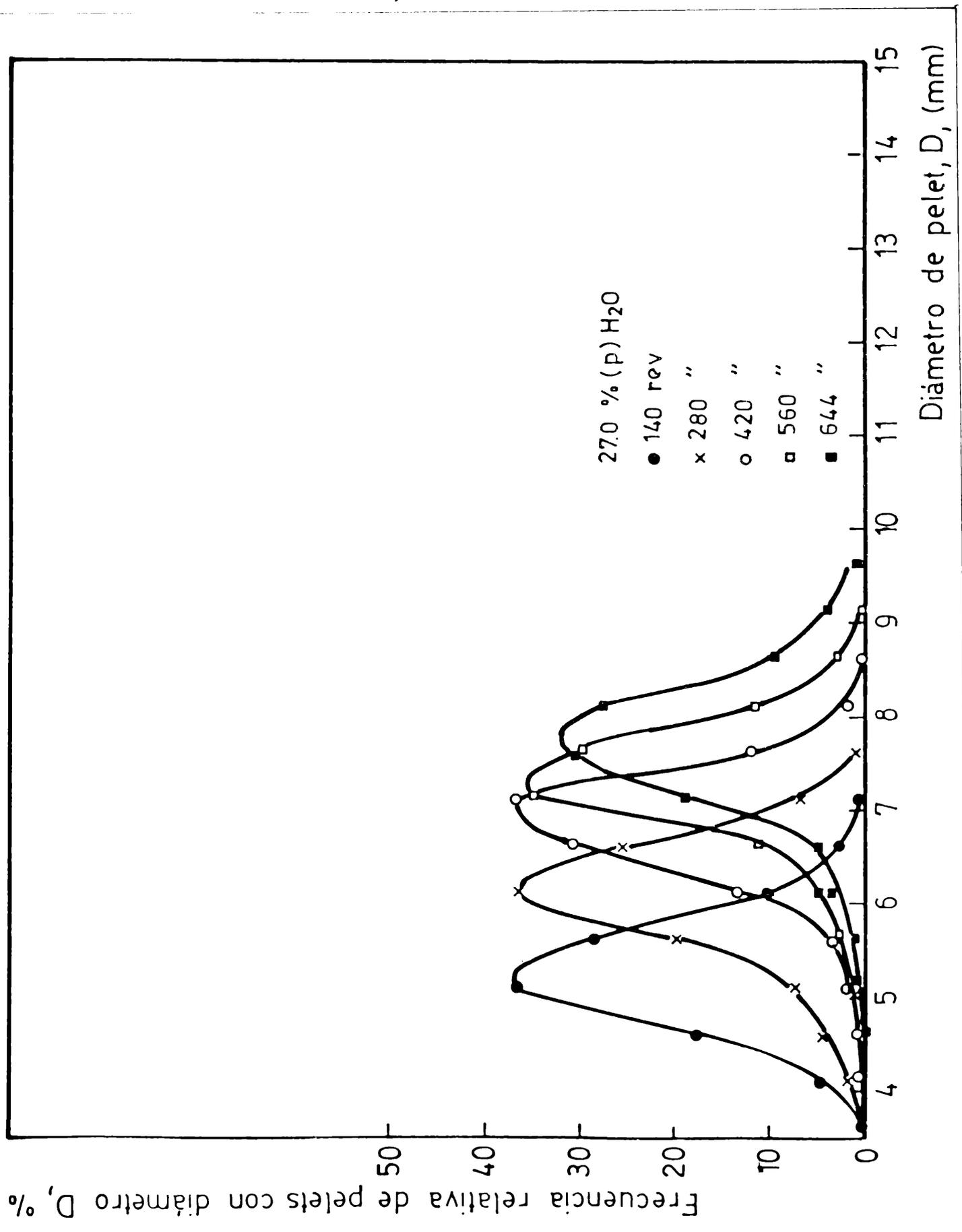


FIGURA 5.4(a).-Distribuciones de frecuencias relativas de pellets con 27,0%(p)H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

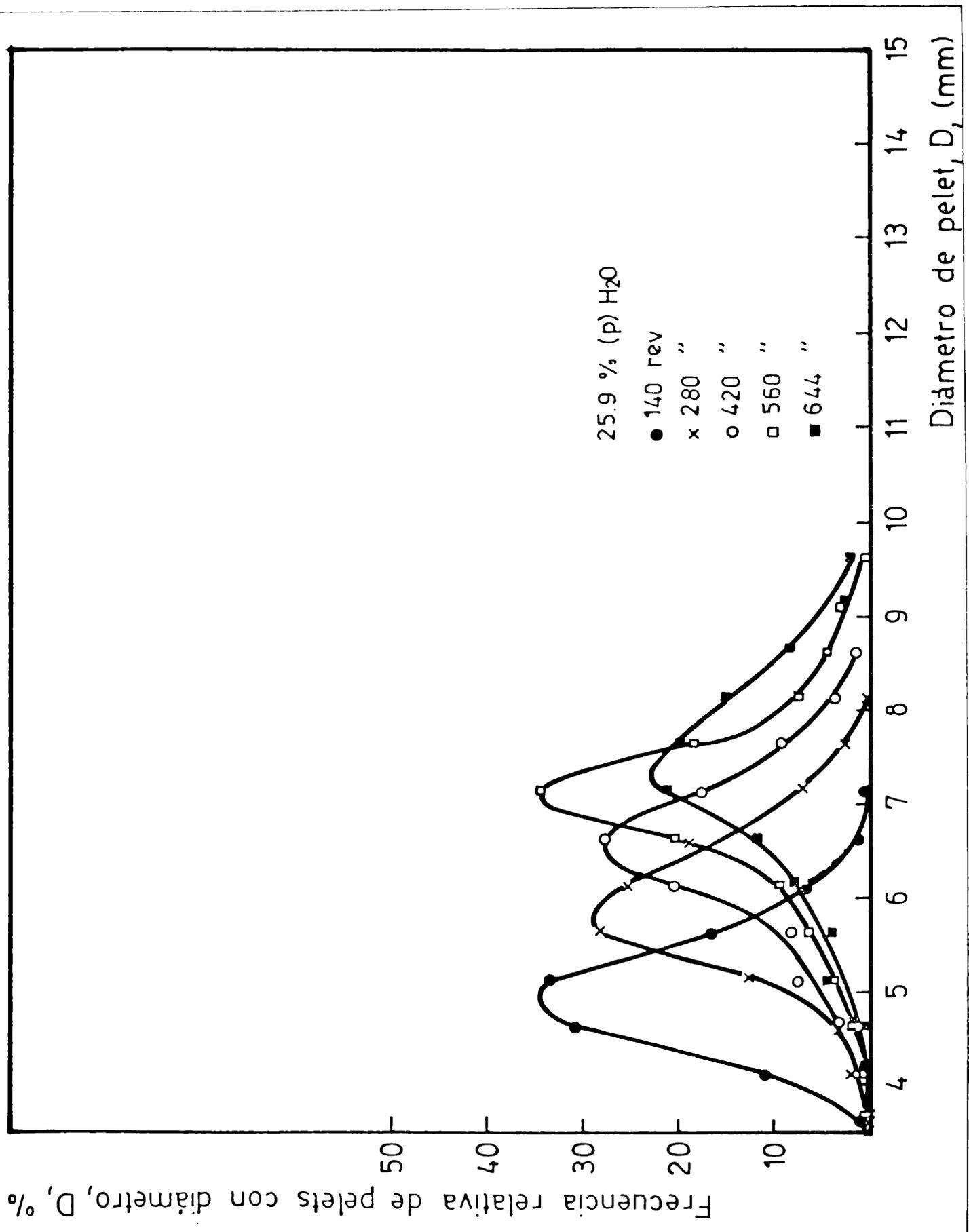


FIGURA 5.4(b). -Distribuciones de frecuencias relativas de pelets con 25,9%(p)H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

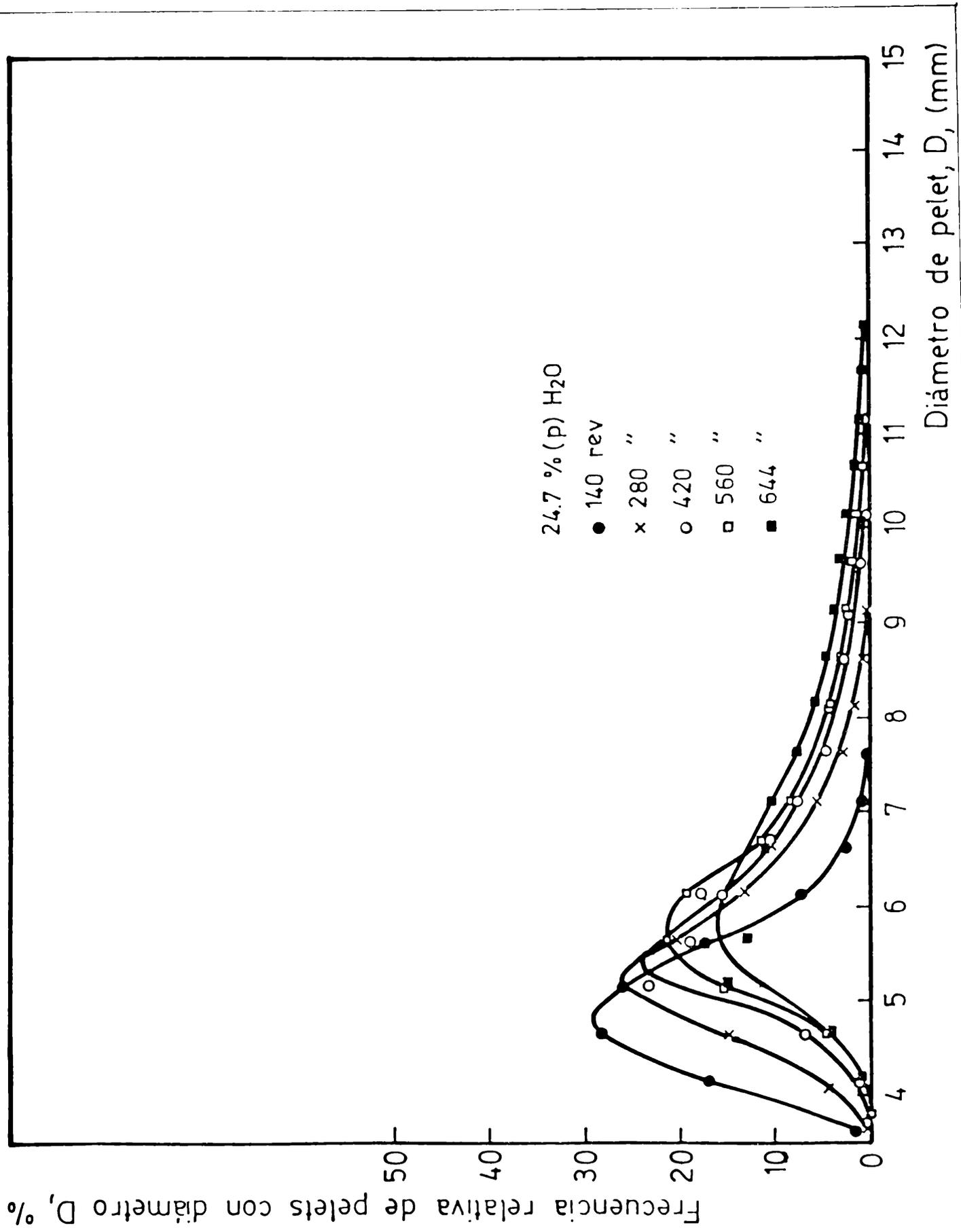


FIGURA 5.4(c).--Distribuciones de frecuencias relativas de pellets con 24,7%(p)H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

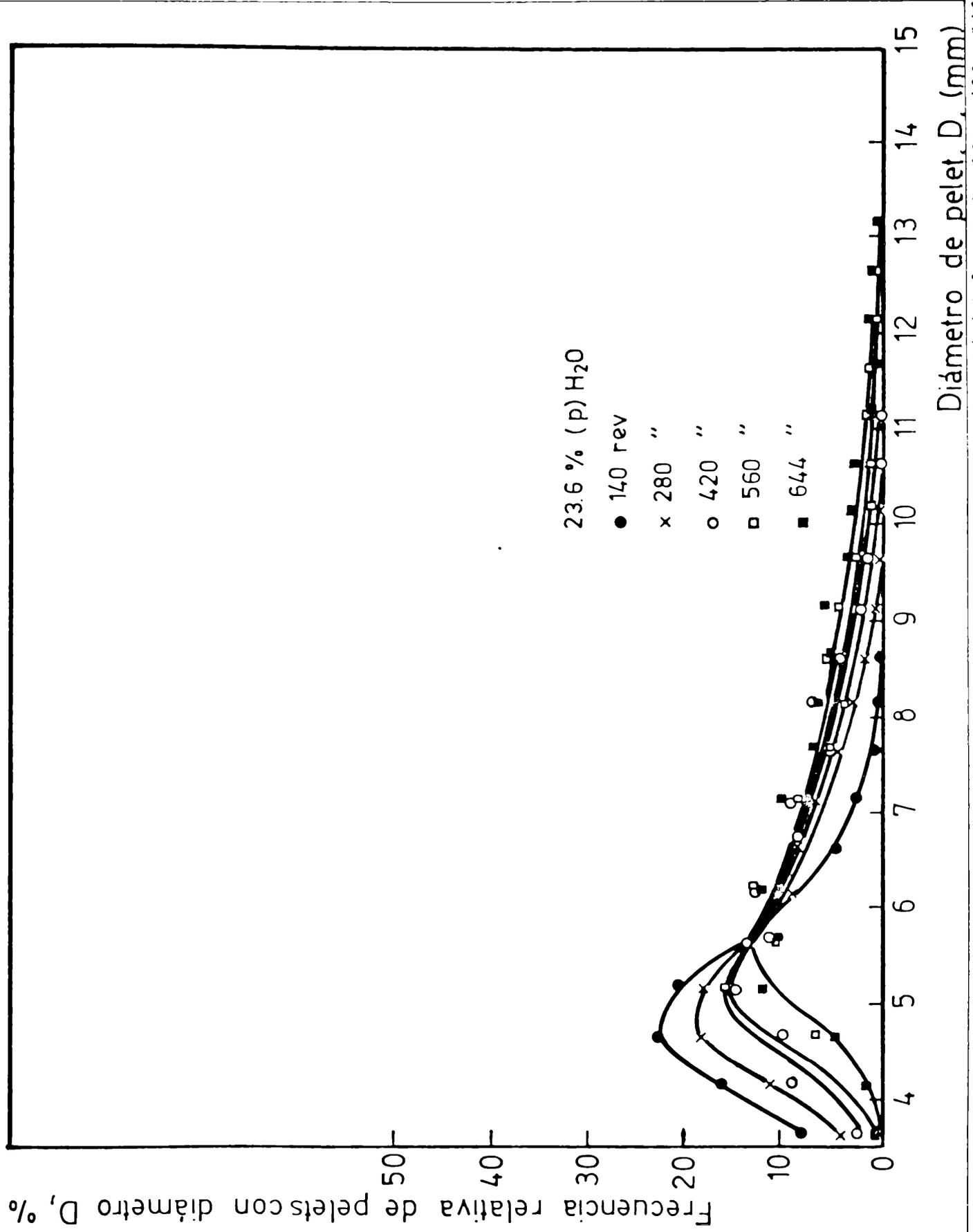


FIGURA 5.4(d). -Distribuciones de frecuencias relativas de pellets con 23,6%(p)H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

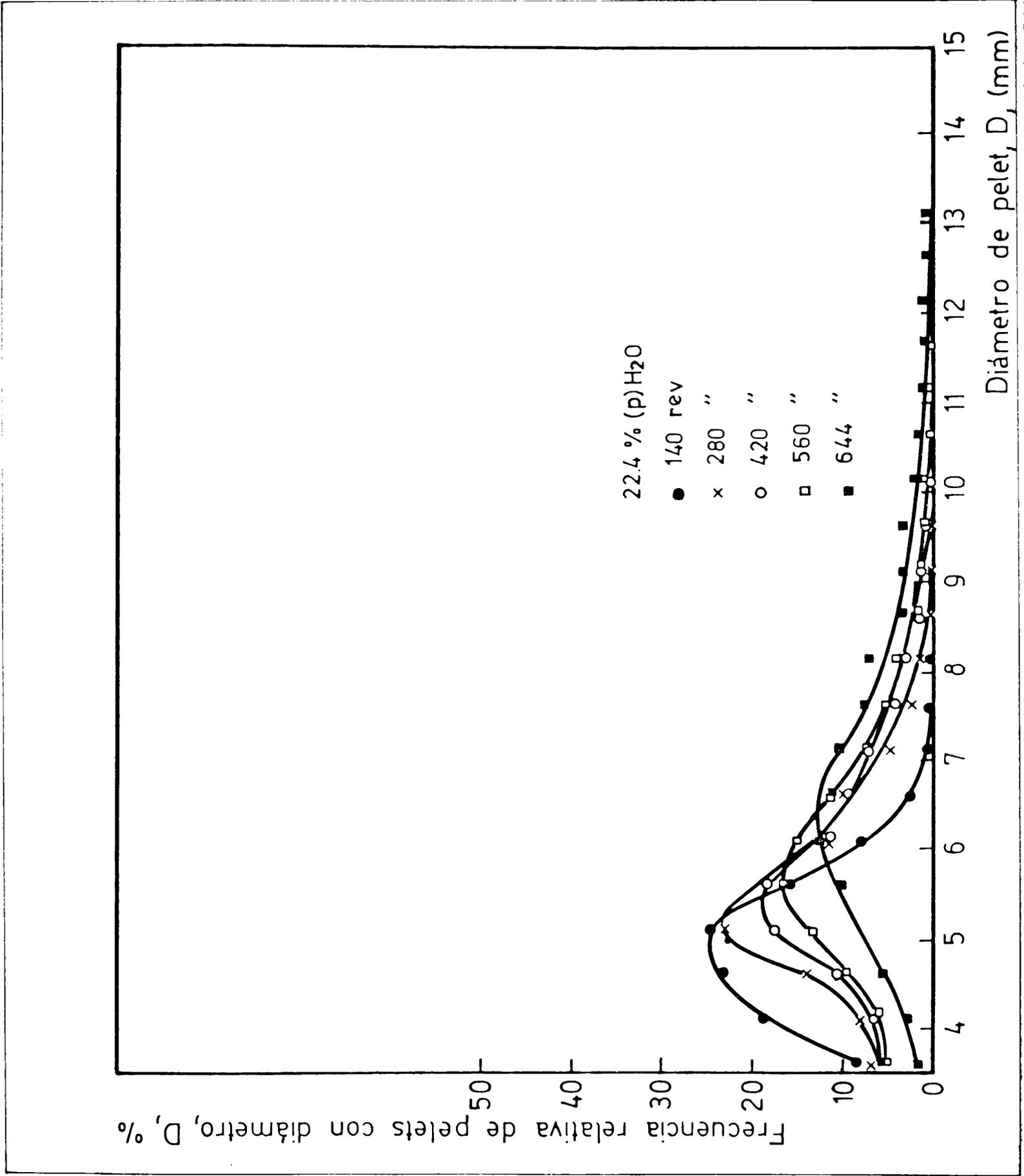


FIGURA 5.4(e).-Distribuciones de frecuencias relativas de pellets con 22,4%(p)H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

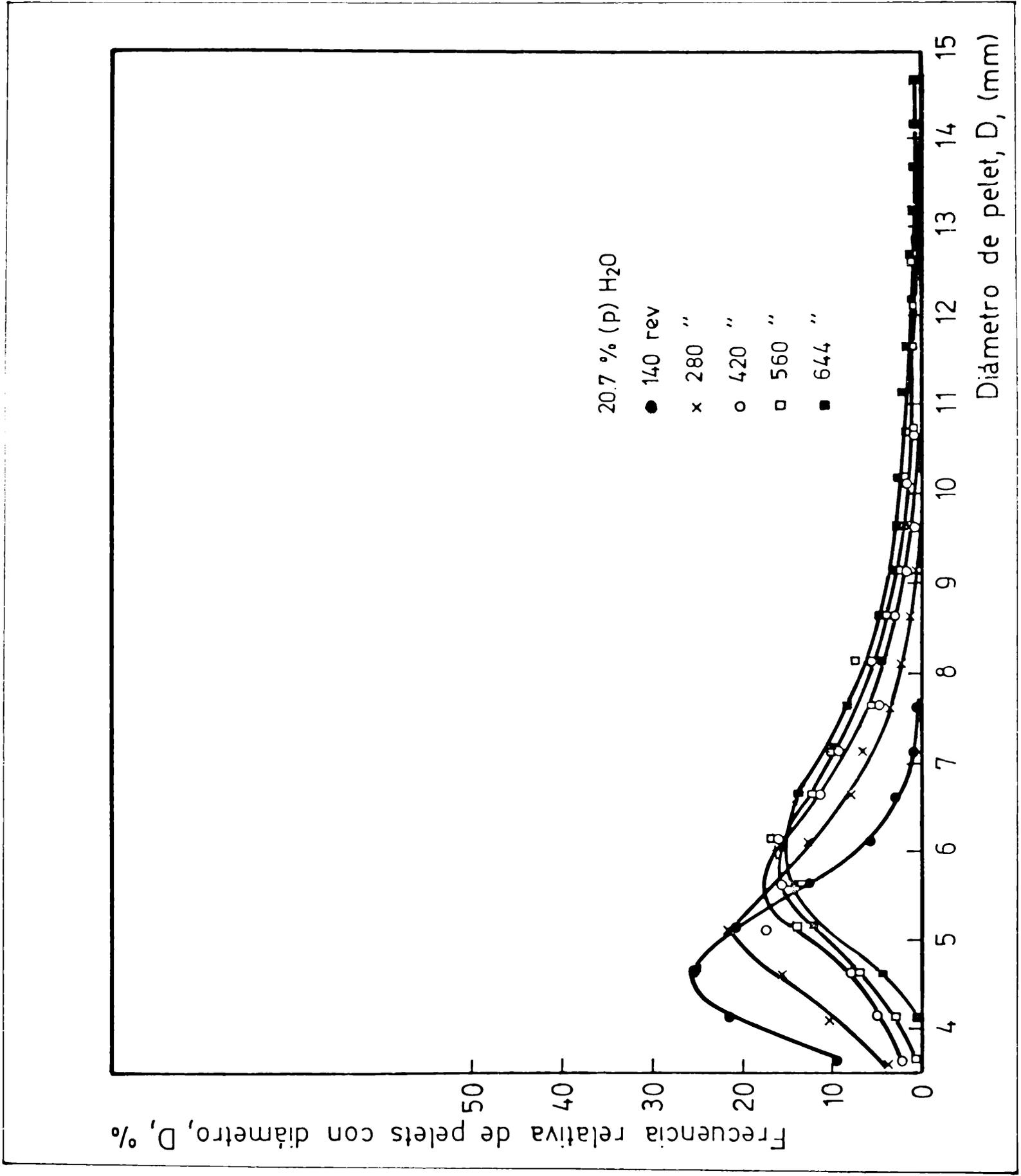


FIGURA 5.4(f). - Distribuciones de frecuencias relativas de pelets con 20,7%(p)H₂O a 140, 280, 420, 560 y 644 revoluciones del disco.

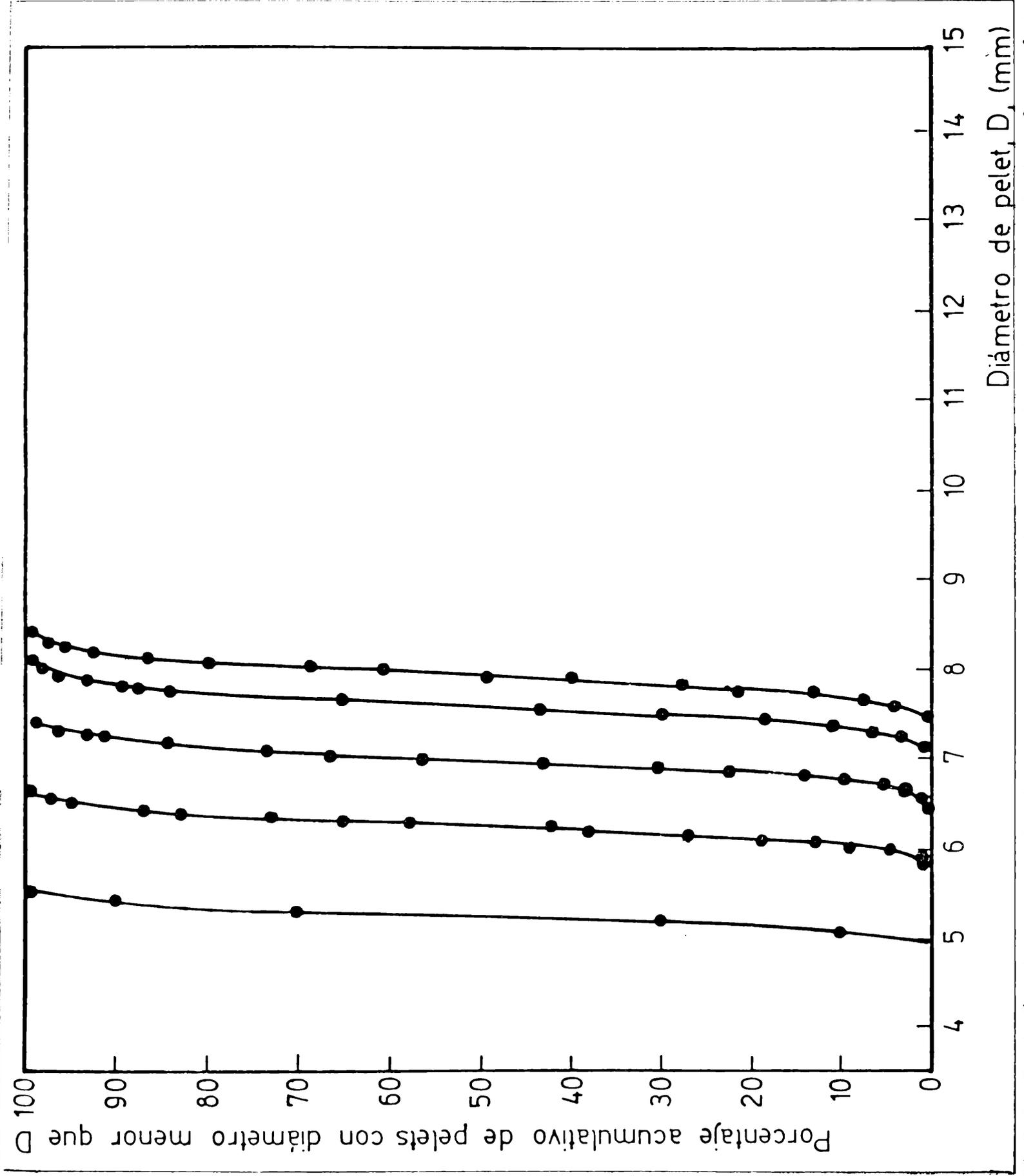


FIGURA 5.5.-Distribuciones granulométricas acumulativas de pelets obtenidas en una simulación numérica.

Al graficar el aumento de los diámetros característicos de las distribuciones, \bar{D} , en función del número de revoluciones, N (Figura 5.6.), para los distintos contenidos de agua, se observa que la pendiente de las curvas disminuye al aumentar el número de revoluciones.

Si el crecimiento es proporcional a la superficie, la representación del cuadrado del diámetro promedio en función del tiempo, o sea la variación de \bar{D} con la raíz cuadrada del número de revoluciones debería dar rectas. Esto se evidencia en la Figura 5.7., confirmándose así la suposición hecha sobre el crecimiento proporcional a la superficie. Asimismo, se ve que para contenidos de agua de 27,0% y 25,9 % las pendientes de las rectas, calculadas por regresión lineal de los datos experimentales valen 0.155 y 0.142, respectivamente, mientras que para los contenidos de agua de 24,7%, 23,6%, 22,4% y 20,7%, las pendientes varían entre 0.119 y 0.129 (Apéndice I, Tabla I.2.).

Estos dos comportamientos definidos, en diferentes zonas de contenidos de agua dentro del rango de peletizabilidad, pueden atribuirse a los distintos estados de mojado de la superficie en cada uno de los casos (7).

A altos contenidos de agua, la superficie está cubierta de una película continua de líquido (estado capilar) lo cual facilita la transferencia del agua a toda la superficie del sistema. Por otra parte, para contenidos de agua bajos, se presenta una superficie parcialmente mojada (estado pendular). En estas condiciones, los pelets que reciben directamente la alimentación líquida por su ubicación en el lecho, tienen mayor probabilidad de incorporar finos, lo que se traduce en los efectos de ensanchamiento y sesgo de las distribuciones, descritos anteriormente.

Por otra parte, dado que existe una dependencia exponencial entre el tiempo necesario para alcanzar un determinado diámetro promedio y el contenido de agua (33), el gráfico de $\log N$ en función del contenido de agua debe dar una

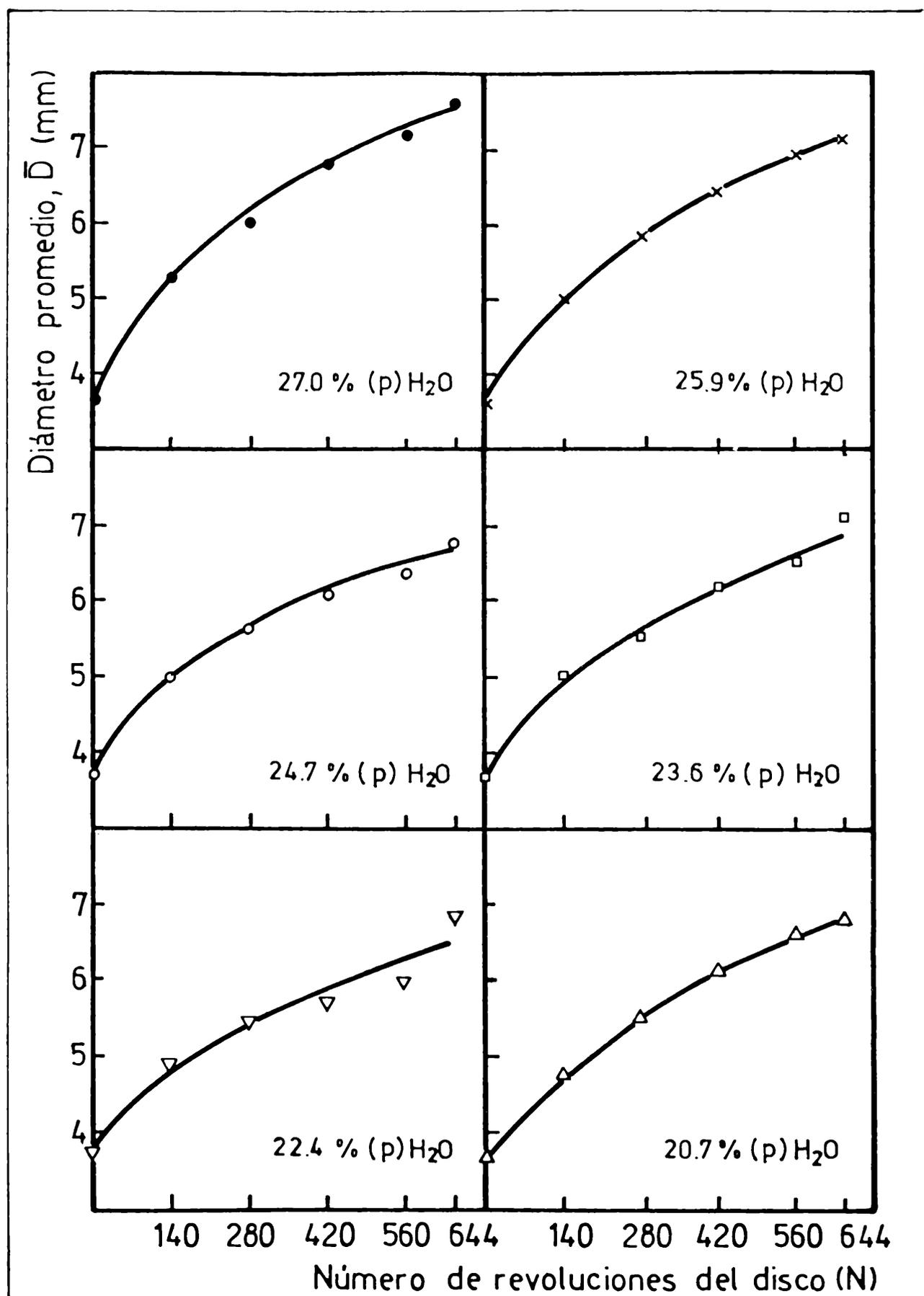


FIGURA 5.6.-Curvas de crecimiento de pellets de gibbsita para 27,0; 25,9; 24,7; 23,6; 22,4 y 20,7% (p)H₂O.

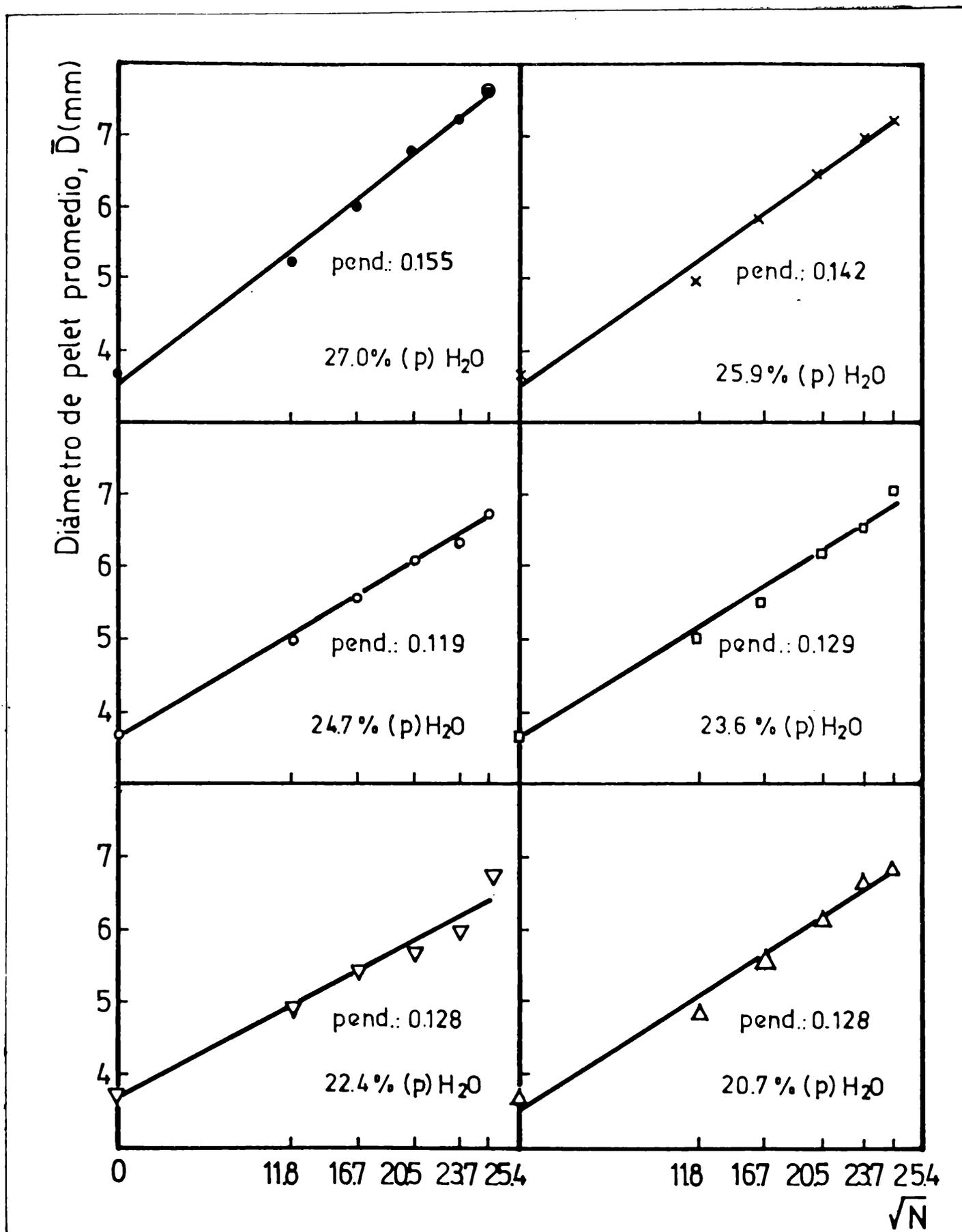


FIGURA 5.7.-Variación del diámetro promedio de los pelets de gibbsita con la raíz cuadrada del número de revoluciones del disco para 27,0; 25,9; 24,7; 23,6; 22,4 y 20,7 % (p) H_2O .

familia de rectas paralelas para los distintos diámetros promedio.

Este concepto está desarrollado para sistemas experimentales en "batch" que aseguran distribuciones normales de los tamaños de los pelets, como consecuencia de un mojado uniforme de la superficie total del lecho. En los sistemas con alimentaciones continuas de sólido y líquido, esto se satisface sólo en una parte del rango de peletizabilidad, donde las condiciones de mojado son similares a las de los sistemas "batch". Esto es para contenidos de agua altos, es decir para estado capilar de mojado de la superficie. En nuestro sistema, estas condiciones se satisfacen para los dos contenidos mayores de agua utilizados (27,0 y 25,9 %).

Esto se ve reflejado en el hecho que para contenidos de agua menores a los citados, las distribuciones de tamaños se sesgan hacia el lado de los diámetros mayores (Figuras 5.3.a-f). Por lo tanto sólo debería esperarse una dependencia exponencial como la descrita, para los dos contenidos de agua superiores.

En el resto del rango de peletizabilidad, el mojado no uniforme de la superficie favorecerá el crecimiento excesivo de algunos pelets y producirá el sesgo de las distribuciones de tamaños. Estos lechos alcanzarán, entonces, un diámetro promedio dado en un número de vueltas menor que el que sería necesario si la misma cantidad de agua se hallara distribuida uniformemente. Es así que en la zona de contenidos de agua inferiores, el valor absoluto de la pendiente deberá disminuir. Este efecto será más evidente para tiempos largos, cuando las diferencias entre los pelets de crecimiento preferencial y el resto del lecho se hacen más notables.

En la figura 5.8., se representan los números de vueltas necesarios para alcanzar determinados diámetros promedio, en función del contenido de agua (Apéndice I, Tabla I.3.).

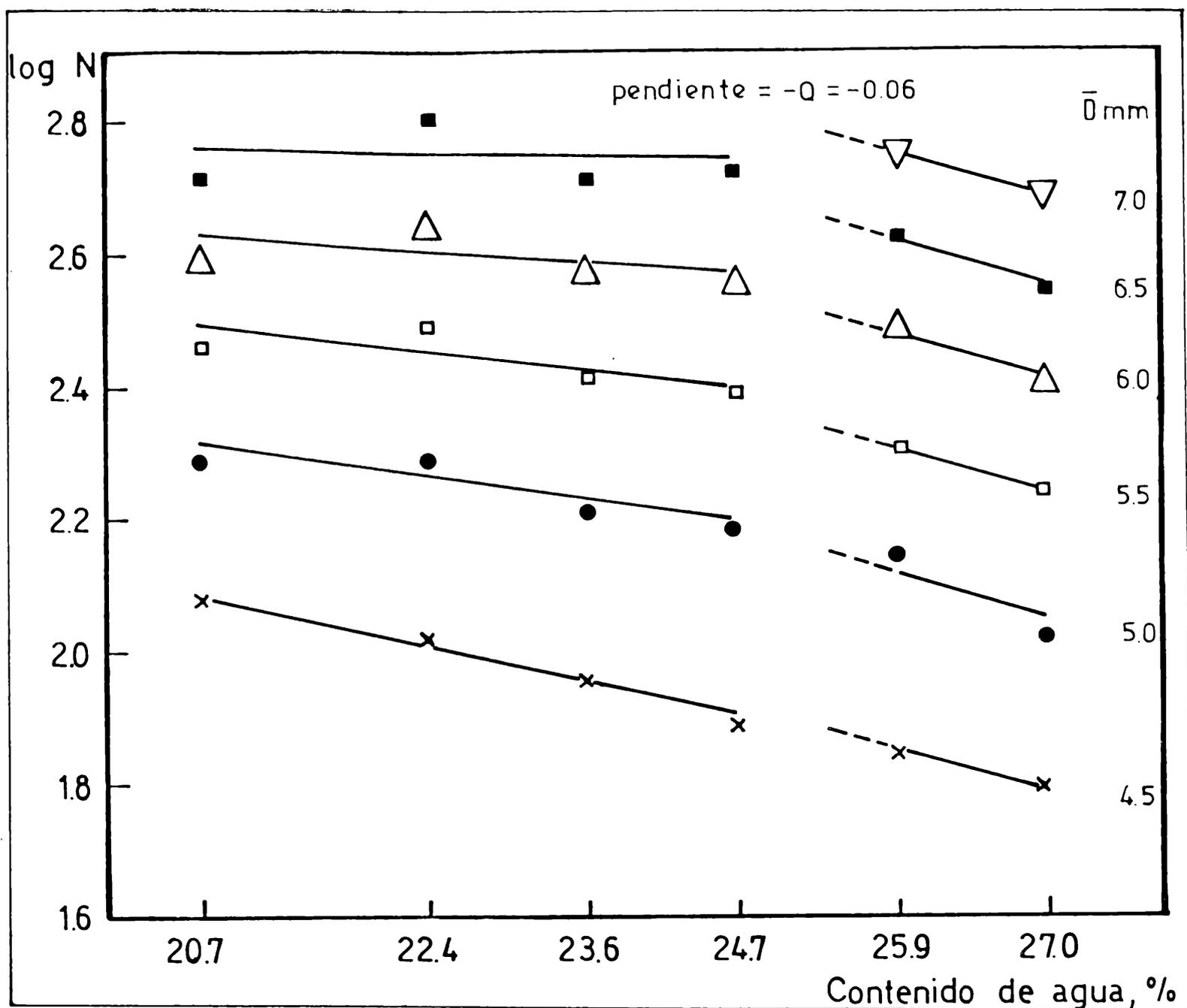


FIGURA 5.8.-Tiempo necesario para alcanzar determinados diámetros de pelets en función del contenido de agua.

Se observa, para los contenidos de agua superiores, que se cumple la relación exponencial prevista, con una pendiente $-Q = -0,06$ para todos los diámetros considerados. Los índices de peletizabilidad calculados son 1,62 y 1,55 para 27,0 y 25,9 % (p) de agua.

Debe tenerse en cuenta:

i) que para sistemas semi-continuos, el mojado de los pelets es menos uniforme aunque más eficiente que en sistemas "batch" en el sentido que el rango de

peletizabilidad es más amplio en los primeros, obteniéndose pelets con contenidos de agua para los cuales no se formarían en "batch".

ii) que el rango de peletizabilidad para los sistemas "batch" coincide con los contenidos de agua altos del rango de peletizabilidad para los sistemas semi-continuos.

En este sentido, se realizaron experiencias de peletización de gibbsita en sistema "batch" en el rango de 20,7 a 27% de agua, observándose que por debajo de 25% el contenido de agua era insuficiente para permitir la existencia de pelets bien formados. Esto limita la amplitud del rango de peletizabilidad en "batch", siendo de alrededor de 2% de agua, comparable con la amplitud obtenida por Sastry(33) en la peletización en "batch" de taconita que fue de 0,8% de agua.

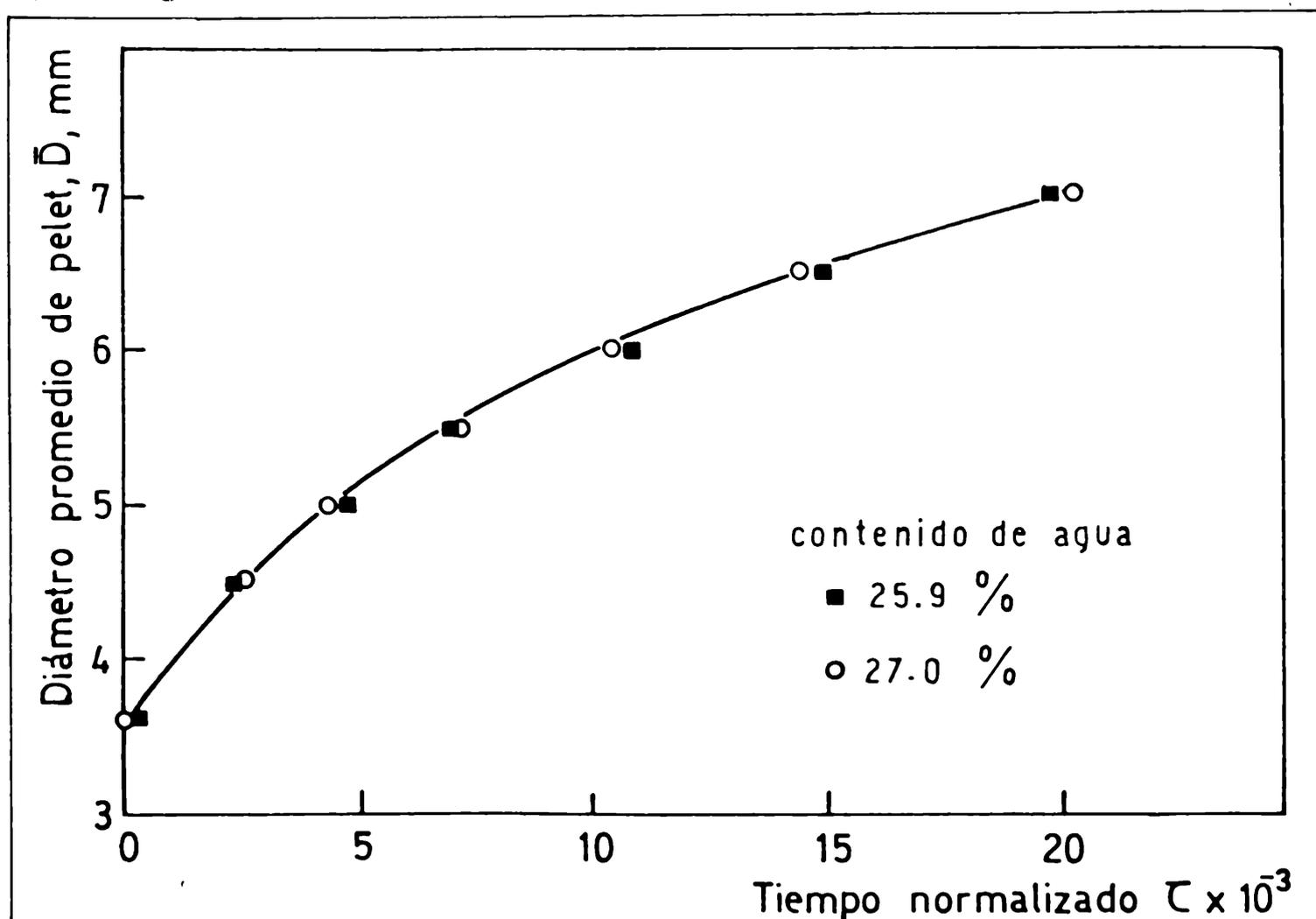


FIGURA 5.9.-Curva de crecimiento de pelets normalizada para 27,0 y 25,9%(p)H₂O.

Ya que el valor de Q es independiente del diámetro promedio de pelet considerado, el índice de peletizabilidad puede tomarse como parámetro normalizador del tiempo de peletización. En la Figura 5.9. se grafica el aumento de \bar{D} en función del tiempo normalizado, τ , obteniéndose una única curva de crecimiento para los porcentajes de agua para los cuales tiene validez el concepto de índice de peletizabilidad.

En la tabla 5.3. se muestran los valores de τ calculados, para peletizaciones con alimentaciones líquidas de 27,0 y 25,9 %(p) de agua.

	\bar{D} , mm	N	$e^{2,3 \cdot \beta}$	$\tau (= Ne^{2,3 \cdot \beta}) \times 10^{-3}$
A=27,0% $\beta=1,62$ ($\beta=0,06A$)	4,5	63	41,51	2,6
	5,0	105		4,4
	5,5	175		7,3
	6,0	252		10,5
	6,5	350		14,5
	7,0	490		20,3
A=25,9% $\beta=1,55$ ($\beta=0,06A$)	4,5	70	35,34	2,5
	5,0	140		4,9
	5,5	203		7,2
	6,0	308		10,9
	6,5	427		15,1
	7,0	560		19,8

TABLA 5.3.- Cálculo de los valores del tiempo de peletización normalizado, τ , utilizando el índice de peletizabilidad, β , como parámetro normalizador.

Los valores de los índices de peletizabilidad (1,62 y 1,55) obtenidos para la peletización de gibbsita en un sistema semi-continuo donde el mecanismo de crecimiento es por formación de capas, son más bajos que los determinados por Sastry (33) para taconita (entre 6,2 y 6,8 para contenidos de agua crecien

tes) en un sistema "batch". Esto se debe a que en el último caso existe un mojado más uniforme de la superficie.

5.1.7. CONCLUSIONES

- Las condiciones experimentales usadas, alimentación continua de finos y de agua y peletización a partir de una carga inicial de núcleos de granulometría acotada, han permitido aislar el mecanismo de crecimiento de pelets por formación de capas.
- En todo el rango de peletizabilidad, que se cubrió totalmente (desde 27,0% hasta 20,7 % de agua respecto del peso de finos agregados), se mantiene el mecanismo de crecimiento y el crecimiento de los pelets es proporcional a su superficie.
- Se encontró que el sistema presenta dos comportamientos diferentes en distintas regiones del rango de peletizabilidad debido a los distintos estados de mojado de la superficie, a altos y bajos contenidos de agua. Para bajos contenidos, no se mantiene la uniformidad de mojado de la superficie en toda la carga del disco. En consecuencia hay un aumento preferencial de tamaño de algunos pelets con ensanchamiento y sesgo de las curvas de distribución hacia el lado de los diámetros mayores.
- Para este sistema, con crecimiento por formación de capas, se observó que se cumple una dependencia exponencial entre el tiempo necesario para alcanzar un determinado diámetro y el contenido de agua, análoga a la dependencia que existe en sistemas "batch", cuando el mecanismo predominante de crecimiento es por coalescencia.
- La validez de esta relación exponencial se limita a la zona del rango de peletizabilidad correspondiente a los contenidos de agua altos, con estado de mo

jado capilar.

Esto limita el ámbito de aplicabilidad del concepto de índice de peletizabilidad a dicha zona.

- Los índices de peletizabilidad determinados para el sistema en estudio, resultaron más bajos que los determinados por otros autores para sistemas "batch".
- La amplitud del rango de peletizabilidad en sistemas "batch" es menor que para sistemas semi-continuos y corresponde a la zona de contenidos de agua altos.

5.2. Correlación entre las características de las materias primas y variables operativas con las características finales de los pelets obtenidos

5.2.1. INTRODUCCION

Se trabajó con materiales de diferentes naturaleza y características, y empleando distintos modos de operación para determinar la influencia de distintos parámetros de operación (velocidades de alimentación de líquido y sólido, tiempo de rodamiento) en las propiedades mecánicas y texturales finales de los pelets obtenidos (porosidad, resistencia a la compresión bajo carga).

5.2.2. MATERIALES Y EQUIPOS

Para estudiar la influencia de la variable "tiempo de rodamiento", en las características finales de porosidad y resistencia mecánica de los pelets obtenidos, se peletizaron blenda, arcilla y gibbsita. Las características de estos materiales se dan en la Tabla 5.4.

Los ligantes empleados en esta serie de ensayos fueron 0,5% de mogul y 0,5% de bentonita sódica para la peletización de blenda; 0,5% de mogul para la peletización de arcilla y 3% de mogul para la peletización de gibbsita.

Material	Composición	Densidad real (g/cm ³)	Análisis granulométrico (%)			
			finos**			gruesos*
			74 <d(μm)<149	44< d(μm)<74	d(μm)< 44	2,38<d(mm)<4
Arcilla	Caolinita +(26%) cuarzo	2,52	36	13	51	100
Blenda	Mineral de Zn (50% SZn, Pb, Cu, Fe)	3,83	41	10	49	100
Gibbsita	Al ₂ O ₃ · 3H ₂ O	2,40	30	30	40	100

* Semillas de peletización cargadas inicialmente al disco.

** Material fino adicionado.

TABLA 5.4.- Características de los materiales peletizados para el estudio de la influencia del tiempo de rodado en las propiedades mecánicas y texturales de los pelets obtenidos.

El objeto de utilizar distintos ligantes y en distintas proporciones, para cada material, fue el de medir valores altos de resistencia a la compresión, de modo tal que las diferencias de dichos valores a distintos tiempos de rodado fueran aceptables.

Las características del mogul empleado como ligante fueron descriptas en el punto 5.1.1. La bentonita sódica, está constituida principalmente por montmorillonita y presenta su estructura en capas de octaedros de alúmina entre tetraedros de sílice. Las últimas capas tienen cargas negativas por sustituciones de Si⁺⁴ por Al⁺³, entrando cationes sodio entre las capas. Cuando se agrega agua a la bentonita

ta, se produce la separación de las capas, e hinchamiento del material acompañado por aumento de plasticidad, por lo que la bentonita favorece la formación de pelets.

Las peletizaciones se realizaron en un disco peletizador de 35 cm de diámetro y 7,5 cm de altura de pared periférica. El alimentador de sólidos finos fue de tipo vibratorio, con una tolva y un motor con eje excéntrico para conferir el movimiento vibratorio a la pala de descarga. La velocidad de caída del sólido y por consiguiente su velocidad de alimentación al disco se varían por regulación de la abertura de descarga de la tolva.

Por otra parte la alimentación de líquido, está constituida por un contenedor de agua graduado en cuyo cierre se practicaron tres aberturas, una para la entrada de un tubo para recarga de agua, otra con un tubo corto para la entrada de aire a presión y la última para entrada de dos tubos concéntricos, el interno largo sumergido en el líquido (para salida del líquido) y el externo corto (para entrada de aire). La entrada de aire cumple dos funciones: ejerce presión sobre la superficie del líquido para impulsarlo por el tubo interno, y a la salida causa que la alimentación líquida se realice en forma de fina lluvia, requerimiento para un mojado más uniforme.

Se realizó además otra serie de ensayos peletizando gibbsita con el objeto de estudiar la influencia de la variación de las velocidades de alimentación líquida y sólida en la resistencia mecánica de pelets con igual contenido de agua. Las características granulométricas del material, la clase y cantidad de ligante usado y el equipo empleado fueron idénticos a los descritos en el punto 5.1., para el estudio de crecimiento de pelets.

5.2.3.- TECNICAS OPERATIVAS

Las peletizaciones fueron programadas según dos modos diferentes de operar.

Se trabajó en: 1) sistema "discontinuo" para efectuar el estudio de la influencia del tiempo de rodamiento en la porosidad y resistencia mecánica de los pelets; 2) sistema "semi-continuo" en la peletización de gibbsita, con el fin de estudiar la resistencia de pelets y su relación con las velocidades de alimentación de sólidos y de líquido.

Un sistema discontinuo implica una carga inicial de semillas, entendiéndose por tales, a material de granulometría gruesa, logradas por tamizado del material original en algunos casos o fabricándolas en otros casos, pasando el material sólido, humedecido, a través de un tamiz y con rodamiento posterior en un peletizador hasta obtener forma esférica y la granulometría requerida. Estas semillas cumplen la función de iniciadores de aglomeración, a partir de las cuales crecen los pelets por agregado de finos y agua, compactándose por rodamiento. Los posteriores agregados de agua y finos (material de granulometría fina juntamente con los ligantes, en caso de usarlos) se realizan a tiempos preestablecidos en cantidades perfectamente controladas.

En el estudio de la influencia del tiempo de rodado en las propiedades mecánicas y texturales de pelets de arcilla, blenda y gibbsita, también se operó en forma discontinua cargando inicialmente al disco núcleos de granulometría entre 4,00 y 2,38 mm (tamices N°5 y N°8 de la serie ASTM).

En la peletización de los tres materiales se realizaron 15 adiciones de finos mezclados con el o los ligantes a los tiempos prefijados (Tabla 5.5.) dejándose rodar el material hasta el siguiente tiempo de agregado.

La elección de los tiempos de agregados se efectuó en base a los resultados de experiencias previas que permitieron fijar igual secuencia para arcilla y gibbsita, pero diferente para blenda de acuerdo al comportamiento de cada material.

Arcilla, Gibbsita	Tiempo total (min)	80	112	128	160	192	240	272	320								
	N° de agregado	1a15	1a15	1a15	1a15	1a15	1a15	1a15	1a15								
	Intervalos (min)	5	7	8	10	12	15	17	20								
Blenda	Tiempo total (min)	94	133	149	172	188	211	275	413								
	N° de agregado	1a 9	10a 15														
	Intervalos (min)	5	7	7	10	8	11	9	13	10	14	11	16	15	20	21	32

TABLA 5.5.- Tiempos totales de peletización e intervalos entre los sucesivos agregados, para las peletizaciones de arcilla, blenda y gibbsita.

En la serie de experiencias previas también se determinó la cantidad de agua a utilizar en la peletización de cada material, expresada como porcentaje en peso respecto del total de sólido alimentado. En la Tabla 5.6. se detallan las condiciones operativas fijadas para la peletización de los tres materiales.

Los agregados de finos se fijaron de la siguiente forma: para blenda se efectuaron 8 agregados de 50g cada uno, 2 de 100g y 5 de 150g con adiciones de agua correspondientes al 11% respecto de esas cantidades; para arcilla, los 8 primeros agregados fueron de 30g cada uno, 2 de 60g y 5 de 90g con 16% de agua; y para gibbsita, el primer agregado fue de 20g, 7 de 30g, 2 de 60g y 5 de 90g con 23% de agua. Fijadas todas las condiciones, la variable de peletización a

estudiar, "tiempo de rodamiento", fue manejada modificando la amplitud de los intervalos de tiempo entre los agregados sucesivos en cada experiencia. Tales intervalos incluyeron un tiempo de rodamiento con adición de finos (que se mantuvo constante) y un tiempo de rodamiento sin alimentación (variable).

Material	Arcilla	Blenda	Gibbsita
Masa total (g)	900	1500	1000
f/g *	90/10	90/10	80/20
Inclinación del disco (°)	43	43	43
Velocidad de giro (rpm)	9	9	14
Ligantes	1% Mogul	0,5% Mogul 0,5% Bentonita	3% Mogul
% H ₂ O **	16	11	23
N° de agregados	15	15	15

* Relación entre la cantidad de material menor de 149 μ m y los núcleos de granulometría entre 2,38 y 4 mm.

** Respecto del peso de finos agregados.

TABLA 5.6.- Condiciones operativas de los ensayos de peletización de arcilla, blenda y gibbsita.

Para el estudio de resistencia de pelets en función de la variación de velocidades de alimentación, las condiciones de operación son las mismas que las

descriptas para estudio de crecimiento en el punto 5.1. Se disminuyen las velocidades de alimentación de líquido y sólidos, manteniendo constante la relación líquido/sólido (23,6% de agua en todas las experiencias) y con aumento del tiempo total de peletización. (Tabla 5.7.).

Exp.	Tiempo total(min)	H ₂ O (ml/min)	Finos (g/min)
1	40	4,7	19,9
2	42	4,5	19,1
3	44	4,3	18,2
4	46	4,1	17,4
5	48	3,9	16,5
6	52	3,6	15,3

TABLA 5.7.- Velocidades de alimentación de líquido (ml/min) y sólidos (g/min) para el estudio de su influencia en la resistencia de pelets de gibbsita.

La diferencia fundamental entre esta serie de ensayos y aquella donde se estudió la influencia del tiempo de rodado en las propiedades de pelets de arcilla, blenda y gibbsita, es que en este caso las alimentaciones son continuas, no existiendo tiempos de rodamiento sin alimentación o sea que, este caso de operación en sistema semi-continuo se asimilaría al anterior (discontinuo) para tiempos extremadamente cortos.

5.2.4. PARAMETROS A MEDIR Y EXPRESION DE RESULTADOS

En la peletización de arcilla, blenda y gibbsita fueron medidas dos propiedades de los pelets: su resistencia a la compresión bajo carga y su porosidad total. Ambas se correlacionaron gráficamente para los distintos materiales con el tiempo de rodado y entre sí. Por otra parte se midieron los valores de resistencia a la compresión de pelets de gibbsita de 8, 10 y 12 mm de diámetro, obtenidos con distintas velocidades de alimentación de líquido y sólido.

Fueron determinadas las variaciones de porosidad de pelet a lo largo del diámetro y de pelets de distinto diámetro con el contenido de agua. Las determinaciones experimentales se realizaron sobre pelets de gibbsita obtenidos con distintos contenidos de agua (Tabla 5.1.), dentro del rango de peletizabilidad del material.

5.2.5. TECNICAS DE MEDIDA

5.2.5.1. Determinación de los valores de resistencia a la compresión bajo carga.

Con fines de comparación de datos los ensayos de resistencia a la compresión de pelets deben realizarse sobre pelets de igual diámetro, dado que existe una relación directa entre la carga de rotura y una potencia del diámetro (7,45).

Por otra parte, las determinaciones deben hacerse sobre un número suficientemente grande de pelets y el dato de resistencia a la compresión expresado como kg/pelet será el promedio aritmético de tales determinaciones.

La determinación de resistencia a la compresión puede realizarse de dos formas diferentes, que conducen a resultados comparables entre sí: con aumento de carga constante o con velocidad de deformación constante. Para las determinaciones realizadas con aumento de carga constante, se empleó un equipo cuya ca-

racterística principal es que posee un brazo de palanca corto, en el extremo del cual se coloca el pelet a analizar, entre dos placas planas y el otro largo, donde se aplica la carga por descarga continua de gotas de mercurio. El valor de resistencia a la compresión está dado por el peso del mercurio cargado hasta la rotura del pelet, y se expresa en kg/pelet.

En las determinaciones en las que se utilizó velocidad de deformación constante, se empleó un analizador de resistencia Instron, en el que se fijó la velocidad de deformación en 40mm/min (velocidad de avance del cabezal). El valor de resistencia a la compresión corresponde al primer máximo del gráfico deformación-tiempo, cuando se produce la rotura del pelet. Ese valor se toma como resistencia a la compresión expresado en kg/pelet.

Aunque tanto en uno como en otro caso, el método no es rigurosamente correcto debido a que la superficie del pelet no es plana, por lo cual la aplicación de la carga resulta puntual, los valores obtenidos son comparables entre sí, si se toman pelets de igual diámetro.

5.2.5.2. Determinaciones de porosidad.

La porosidad total de los pelets se determinó con un porosímetro de mercurio, por medición del volumen aparente ocupado por un peso conocido de pelets mediante desplazamiento de un volumen de mercurio, y conocida la densidad real del material, determinada previamente por picnometría.

Determinado el peso del porosímetro vacío y el peso del mismo totalmente lleno con mercurio, se determinó el volumen de mercurio, obteniendo de tablas, la densidad del mercurio a la temperatura de trabajo.

El volumen aparente de los pelets se calculó por diferencia entre los dos volúmenes de mercurio, mientras que la densidad aparente de los pelets se obtu

vo a partir del peso de pelets y su volumen aparente. Como además se determinó previamente la densidad real del material, se obtuvo el volumen real a partir del peso de los pelets. La porosidad total se calculó como el volumen de poros respecto del volumen aparente (volumen de poros más volumen de sólido). Los ensayos en todos los casos se realizaron por duplicado y el valor promedio se expresó como fracción de vacíos.

En los casos en que se emplearon núcleos de peletización de densidad diferente a la del material fino, los datos de porosidad total que se dan son valores corregidos.

Además de los valores de porosidad total (P_T), fueron determinadas, por el mismo método, las porosidades de pelets desgastados por abrasión hasta un diámetro igual a $2/3$ del diámetro inicial ($P_{2/3}$). Por otra parte los valores de la porosidad de la capa externa de los mismos pelets (P_C), fueron calculados según la expresión:

$$P_T \cdot V_T = P_{2/3} \cdot V_{2/3} + P_C \cdot V_C$$

donde,

V_T = volumen total del pelet, cm^3 .

$V_{2/3}$ = volumen del pelet gastado hasta un diámetro equivalente a $2/3$ D inicial, cm^3

V_C = volumen de la capa externa del pelet, cm^3

5.2.6. RESULTADOS Y DISCUSION

5.2.6.1. Influencia del tiempo de rodamiento en las características mecánicas y texturales de pelets.

En las Figuras 5.10., 5.11. y 5.12. se representaron los valores de resistencia a la compresión y de porosidad total en función del número de revoluciones del disco, de cada uno de los tres sistemas analizados (pelets de arcilla, blenda y gibbsita respectivamente).

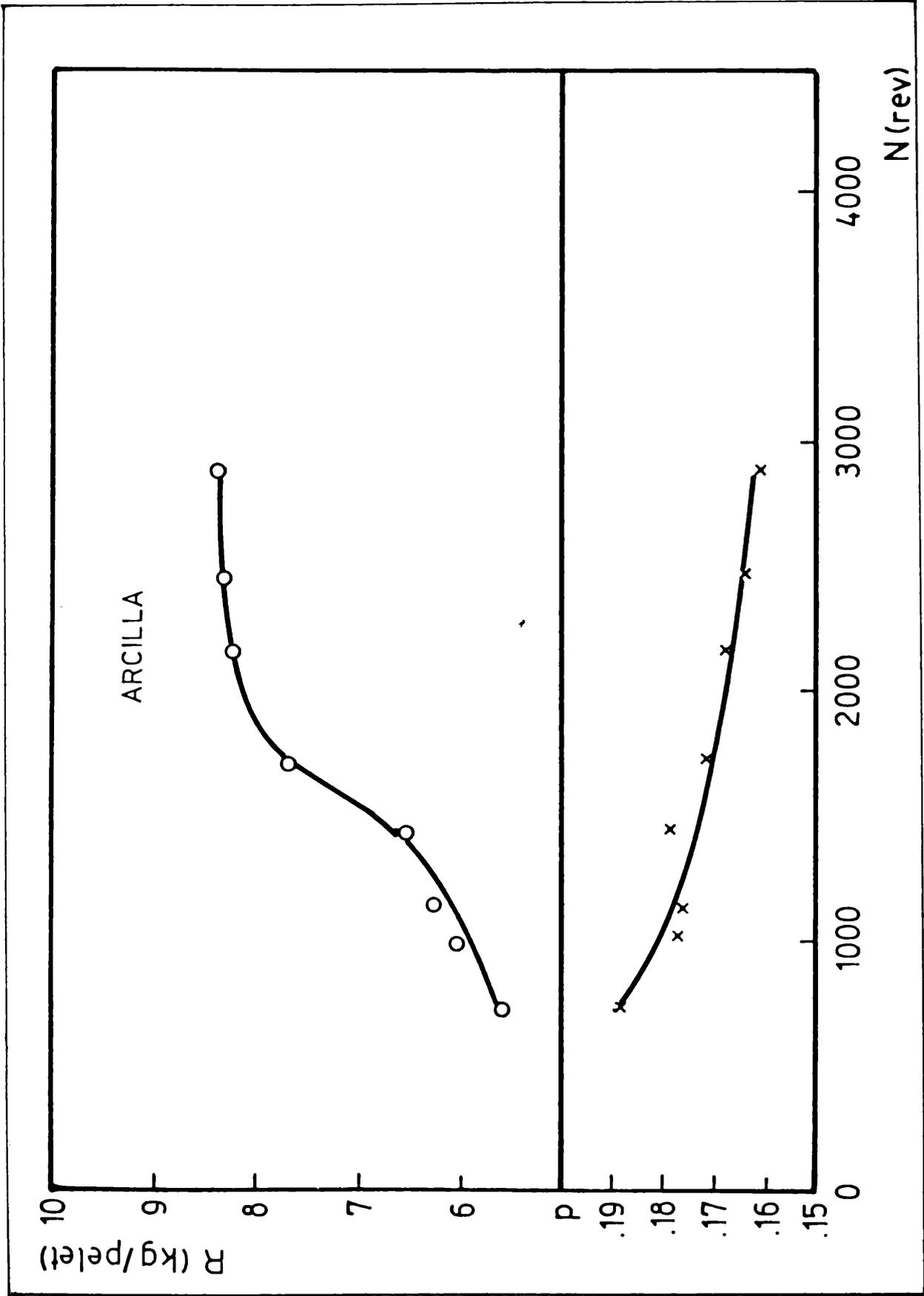


FIGURA 5.10. -- Resistencia a la compresión bajo carga (R) y fracción de vacíos (P) de pellets de arcilla en función del número de revoluciones del disco (N).

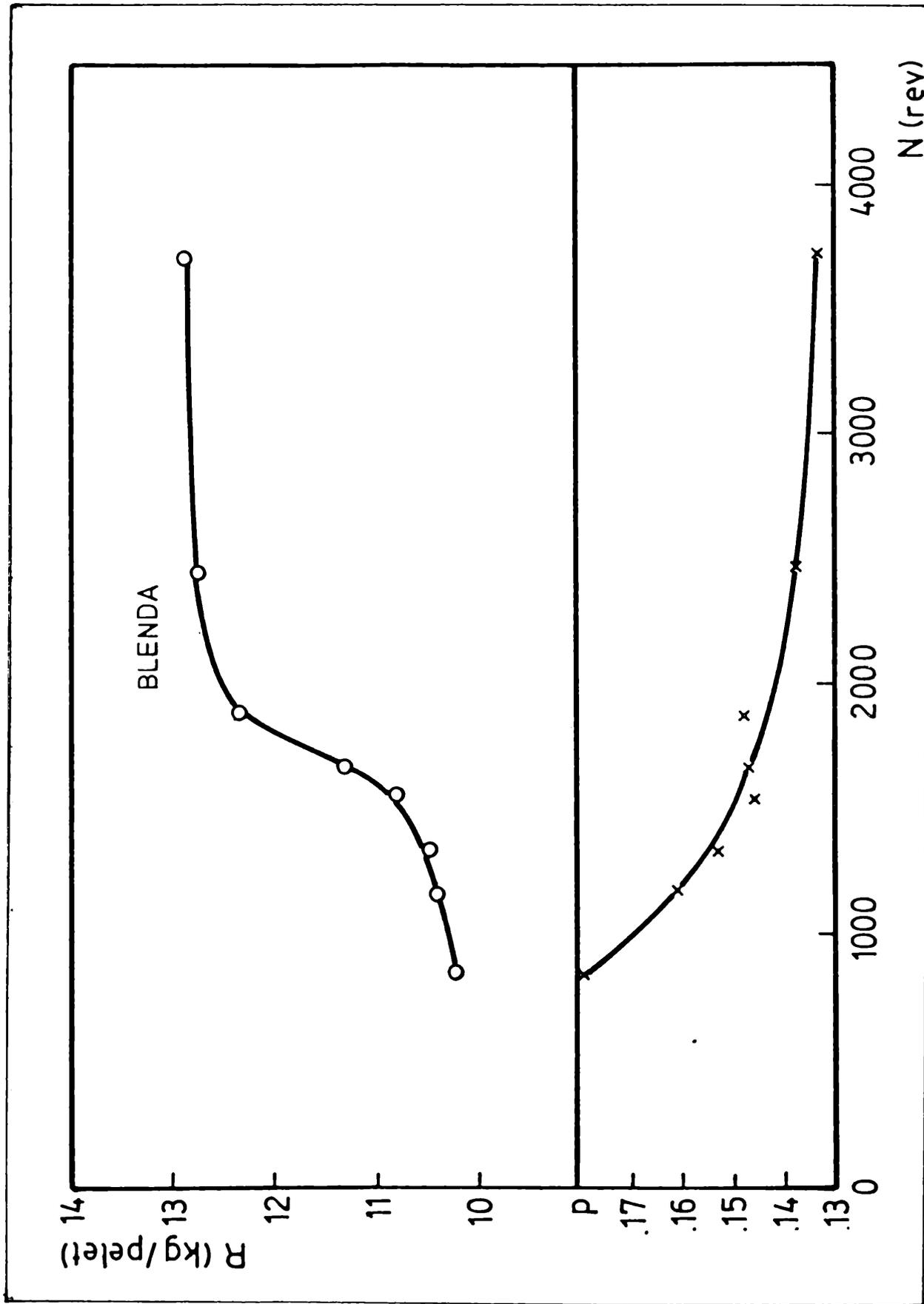


FIGURA 5,11.-Resistencia a la compresión bajo carga (R) y fracción de vacíos (P) de pellets de blenda en función del número de revoluciones del disco (N).

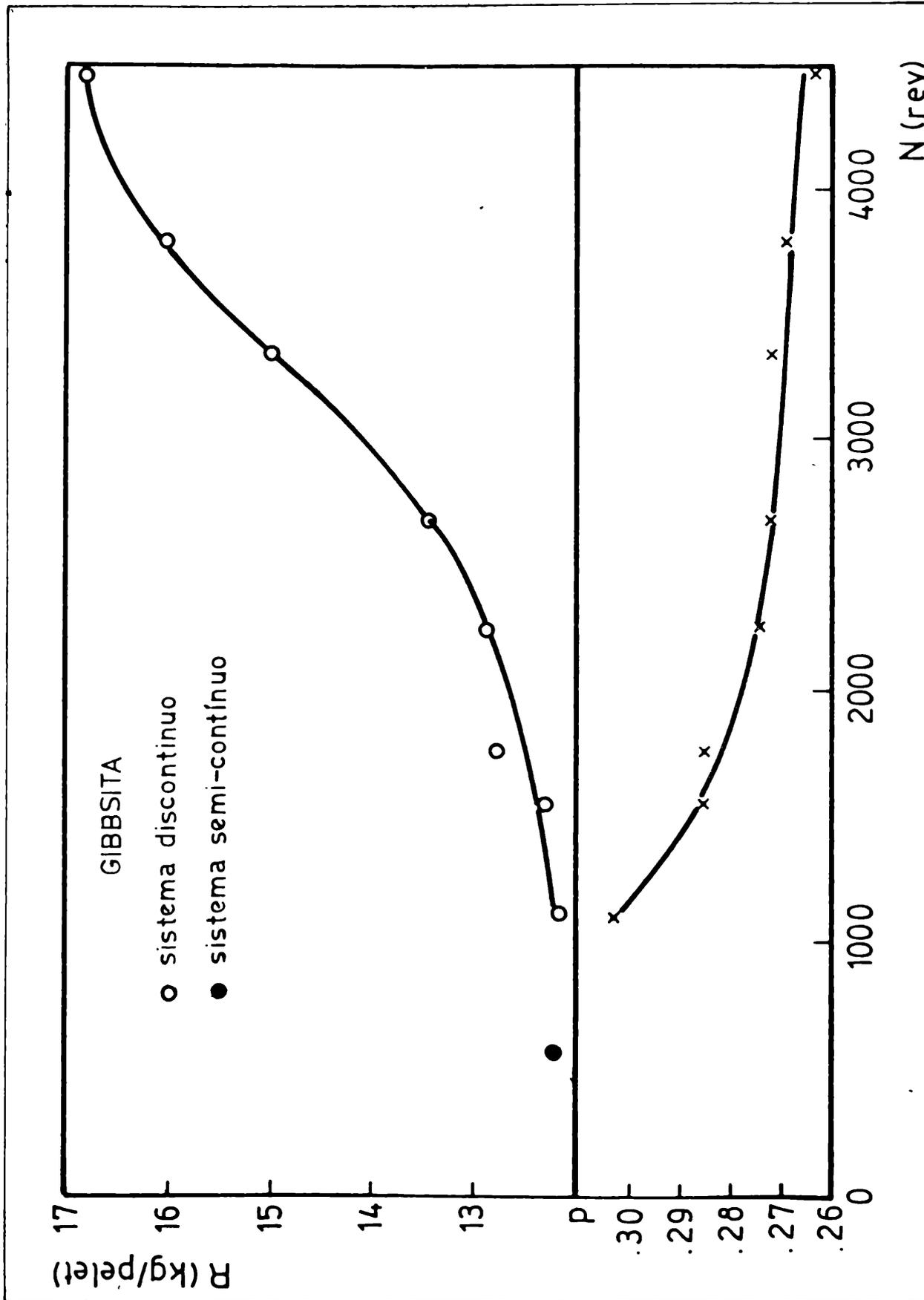


FIGURA 5.12.-Resistencia a la compresión bajo carga (R) y fracción de vacíos (P) de pellets de gibbsita en función del número de revoluciones del disco (N).

En los tres casos se observó un comportamiento cualitativo similar. A mayores tiempos de rodado, los valores de resistencia fueron superiores. Por otra parte, a partir de un cierto tiempo de rodamiento para cada sistema estudiado, se observó un aumento brusco de los mismos. Una explicación de este comportamiento puede encontrarse considerando la forma de fractura de los pelets en el ensayo de compresión.

El límite de resistencia del pelet está dado por la aparición de una fisura superficial en el punto de aplicación de la fuerza. La propagación de esta fisura es la que causa el desmoronamiento de la estructura total del pelet. Es decir, que el valor de la resistencia del pelet está dado por la resistencia en la superficie.

La densificación en cada pelet se produce desde el centro hacia la superficie por acomodación de partículas y simultánea expulsión del líquido hacia la misma. En base a esto, se puede proponer que esta densificación tiene lugar a través del desplazamiento de un "frente de densificación" en dicha dirección. Cuando este frente alcanza la superficie del pelet un pequeño incremento en el tiempo de rodado sin alimentación corresponderá a un apreciable aumento en la resistencia total del pelet. A partir de este instante, la influencia del tiempo de rodado será cada vez menor, hasta hacerse despreciable cuando se alcance la máxima compactación que permita la distribución granulométrica de los finos.

En cuanto a la porosidad, se observó en todos los casos una disminución continua de la misma con el aumento del tiempo de rodado. Este efecto es menos marcado a mayor número de revoluciones del disco. Los rangos de valores de porosidad de pelets de blenda y de arcilla son similares coincidentemente con similares distribuciones granulométricas de los finos peletizados (Apéndice III, Tabla III.1).

En la Figura 5.13. (55) se observan las porosidades de sistemas compuestos por partículas esféricas de tres tamaños (gruesos, medios y finos) mezclados en proporciones diferentes. El empaquetamiento más denso se logra con 50% de gruesos, 10% de medios y 40% de finos, con una porosidad de 22%, observándose que la porosidad es mayor cuando aumenta la cantidad de medios de la mezcla. Esto está de acuerdo con el hecho de que las porosidades de pelets de gibbsita resultaron mayores que las de blenda y arcilla siendo la distribución granulométrica de los finos de gibbsita diferente de las otras dos y con mayor abundancia de medios, por lo que resultó en este caso un empaquetamiento menos denso.

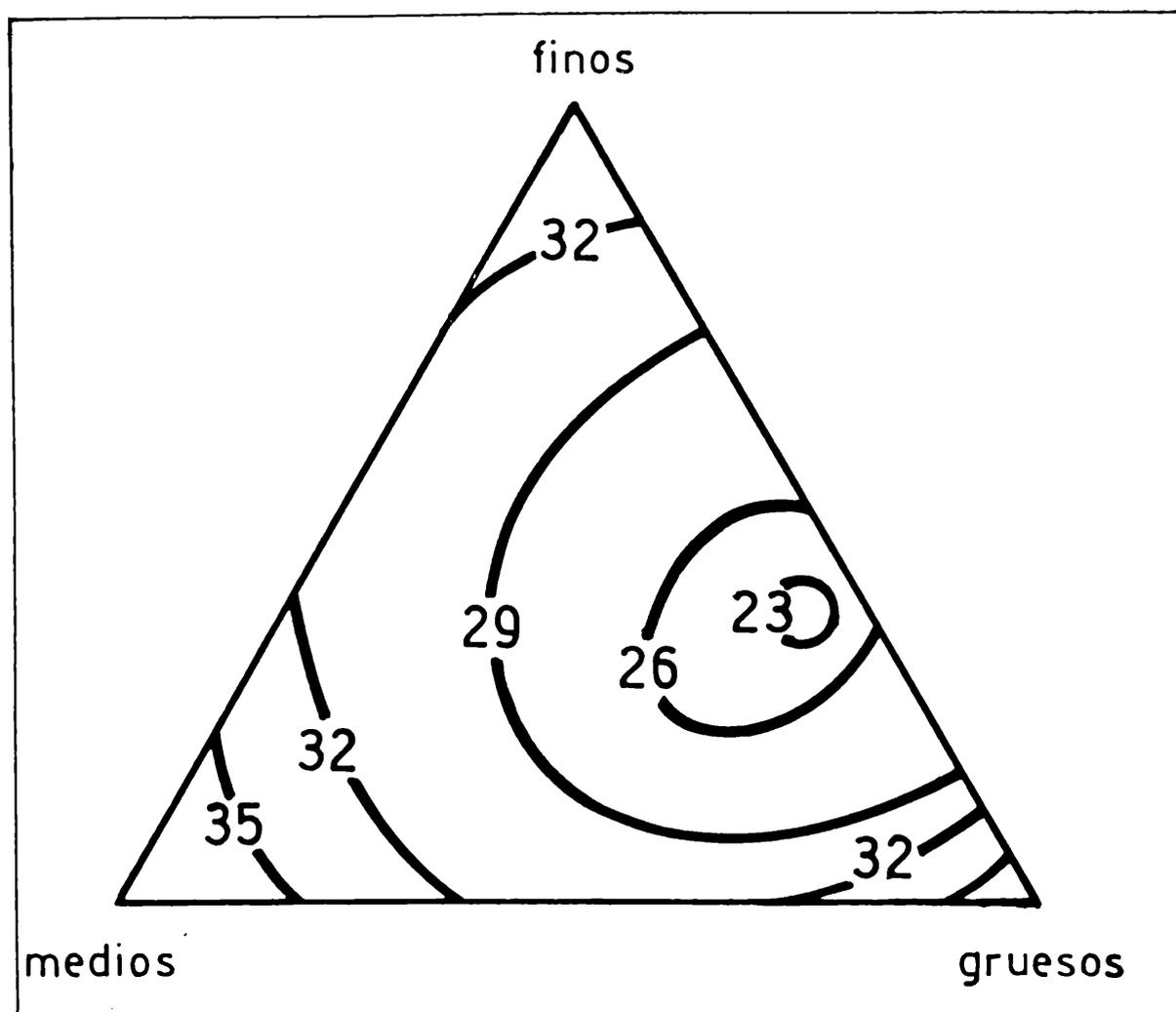


FIGURA 5.13.-Variaciones de porosidad para sistemas ternarios de partículas esféricas. Norton (55).

El comportamiento observado sugiere un mecanismo por el cual las partículas de finos, incorporadas inicialmente al azar sobre la superficie de los pelets en formación, van tendiendo a adoptar una configuración más densa con aumento del número de puntos de contacto entre cada partícula y sus vecinas más próximas y consiguiente disminución de la porosidad.

Los resultados descritos en este punto pueden ser interpretados, de acuerdo a lo indicado por Capes y Danckwerts (26,37) a través de una fenomenología donde las modificaciones de porosidad y resistencia mecánica del pelet pueden ser asimiladas a un modelo de densificación con migración radial del líquido desde el centro del pelet hacia la superficie y consecuente consolidación por capas hacia afuera con la contribución favorable del tiempo de rodamiento.

5.2.6.2. Influencia del tiempo de rodado total en la resistencia a la compresión de pelets obtenidos en sistema semi-continuo.

Simultáneamente con los ensayos descritos en el punto 5.2.6.1. se trabajó con gibbsita, pero en sistema semi-continuo, donde se variaron las velocidades de alimentación de líquido y sólido (aumento del tiempo total de rodamiento, pero manteniendo la relación agua/sólido o sea manteniendo el porcentaje de agua adicionado).

Fueron determinados los valores de resistencia a la compresión sobre pelets de 8, 10 y 12 mm de diámetro, en muestras tomadas a 560 revoluciones (las velocidades de alimentación de sólido y líquido se dieron en la Tabla 5.7.).

Los valores de resistencia promedio de las determinaciones individuales se dan en la Tabla 5.8., junto con las desviaciones estándar y los coeficientes k y n de la expresión que relaciona el diámetro de pelet con su resistencia.

Exp.	D,mm	R,kg/pelet	σ_{n-1}	ln R	ln D	ln k	k	n	coefic. correl.
1	8	10,7	1,6	2,37	2,08	-0,07	0,93	1,2	0,993
	10	13,2	2,0	2,58	2,30				
	12	17,1	1,5	2,84	2,48				
2	8	9,4	1,8	2,24	2,08	-0,77	0,46	1,4	0,995
	10	12,3	2,5	2,51	2,30				
	12	16,8	1,7	2,82	2,48				
3	8	7,0	1,7	1,94	2,08	-0,87	0,42	1,4	0,958
	10	10,8	2,8	2,38	2,30				
	12	12,0	2,1	2,48	2,48				
4	8	10,3	1,5	2,33	2,08	-0,32	0,73	1,3	0,996
	10	13,1	2,5	2,57	2,30				
	12	17,1	1,7	2,84	2,48				
5	8	7,7	2,1	2,03	2,08	-1,66	0,19	1,8	0,997
	10	10,7	2,8	2,37	2,30				
	12	15,5	2,6	2,74	2,48				
6	8	9,9	1,6	2,29	2,08	-0,21	0,81	1,2	0,991
	10	13,6	1,6	2,61	2,30				
	12	15,9	1,7	2,77	2,48				
Pro- medio	8	9,2		2,21	2,08	-0,65	0,52	1,4	0,999
	10	12,3	-	2,51	2,30				
	12	15,8		2,76	2,48				

TABLA 5.8.- Resistencia a la compresión de pelets de gibbsita de 8,10 y 12mm de diámetro y cálculo de los coeficientes de la expresión $R=kD^n$

Al considerar pelets de 10 mm de diámetro y comparar los valores obtenidos para las distintas experiencias con diferentes velocidades de alimentación de líquido y sólido se observan variaciones entre 10,7 kg/pelet y 13,6 kg/pelet. Estas diferencias están en el orden de las desviaciones de las determinaciones.

No ocurre lo mismo cuando se calculan las desviaciones de las determinaciones de resistencia de los pelets obtenidos en operaciones discontinuas. En este caso los valores de resistencia dentro del tiempo total de rodamiento estu-

diado (4480 revoluciones) varían entre 12 y 17 kg/pelet con desviaciones de sólo 0,5 kg/pelet como máximo. Esto es consecuencia no sólo de la diferencia en el modo de alimentación, que en el último caso involucra lapsos de rodamiento sin alimentación, sino de los tiempos totales considerados. Dichos tiempos totales, al trabajar con alimentaciones continuas varían entre 40 y 52 minutos y son mucho menores que el tiempo mínimo (80 minutos) al cual se realizaron las operaciones en discontinuo. En la Figura 5.12. se representa además el promedio de los valores de resistencia de los pelets de 10 mm de diámetro, para sistema semi-continuo y 560 revoluciones.

Considerando los pelets de distintos diámetros de cada experiencia, se observa un aumento de resistencia de los mismos con el tamaño. Este aumento de los valores de resistencia responde a una expresión del tipo:

$$R = k \cdot D^n$$

donde,

R = resistencia a la compresión, kg/pelet.

D = diámetro de pelet, mm.

k = factor de resistencia, $\text{kg}/(\text{mm})^n$.

n = exponente que depende de la distribución de enlaces en los pelets.

Para pelets con distribución radial y uniforme de enlaces, n vale 2, mientras que para enlaces concentrados en las capas externas, los valores son menores hasta un valor mínimo de 1 (45). En nuestro caso, se han calculado (Tabla 5.8.) los exponentes n para los pelets de 12, 10 y 8 mm de diámetro y se obtuvieron valores comprendidos entre 1,2 y 1,8. El valor de n obtenido con los valores de resistencia promedio es de 1,4 (Figura 5.14.), lo que indica que los enlaces responsables de la resistencia medida no son radiales sino que las partículas están unidas preferencialmente a sus vecinas de la misma capa, como consecuencia del mecanismo de crecimiento.

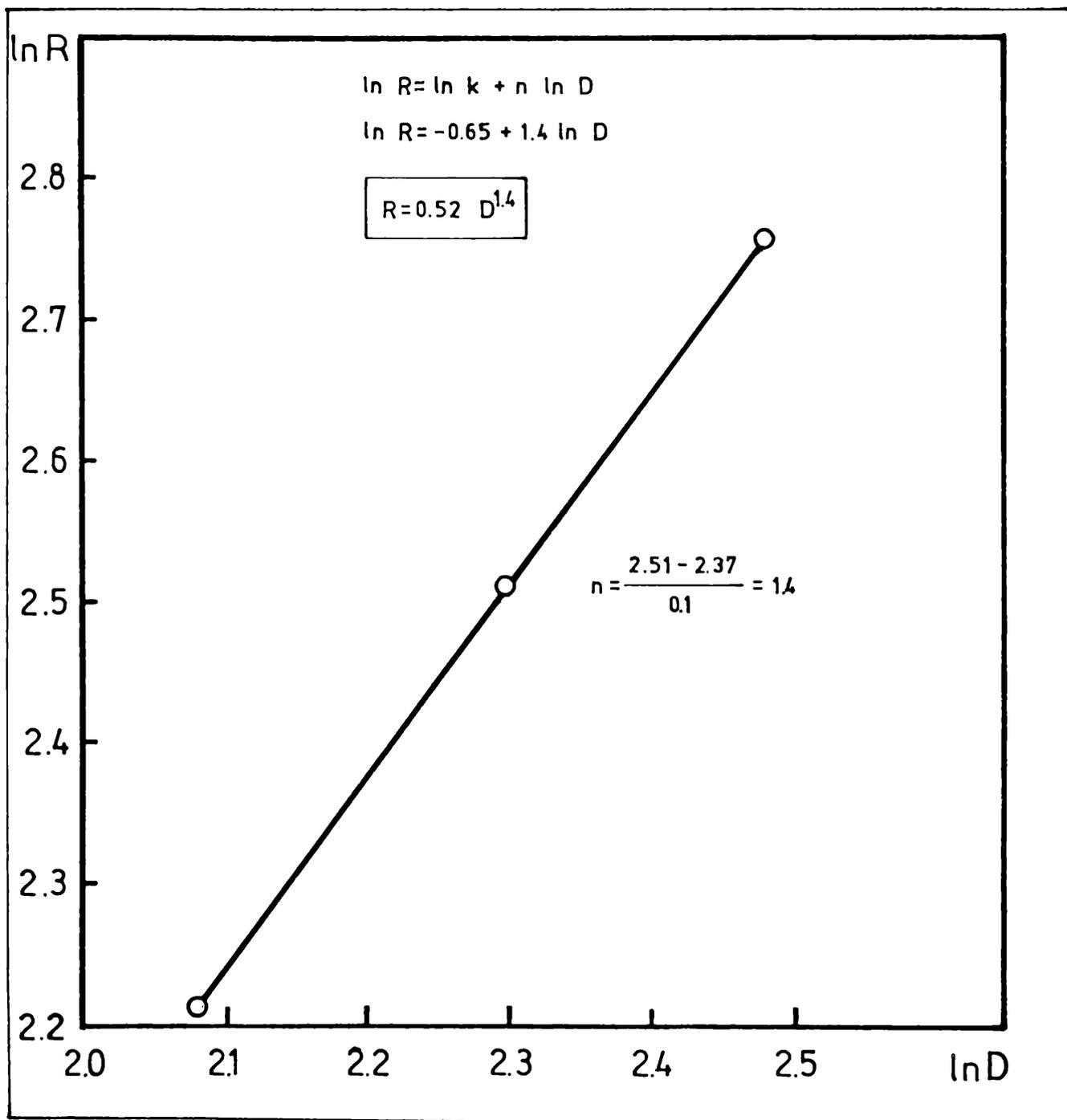


FIGURA 5.14.-Dependencia exponencial entre la resistencia a la compresión (R) de pelets de gibbsita y su diámetro (D).

5.2.6.3. Variaciones de la porosidad del pelet a lo largo del diámetro y de pelets de distinto diámetro con el contenido de agua.

En el Apéndice III, Tabla III.1. se da el cálculo de los valores de densi-

dad real corregida por el aporte del núcleo de mayor densidad ($3,06 \text{ g/cm}^3$) que los finos de gibbsita ($2,40 \text{ g/cm}^3$). Estos valores se emplearán en el cálculo de la porosidad de pelets pertenecientes a distintos cortes granulométricos ($> 12,7 \text{ mm}$; $12,7/11,0$; $11,0/9,5$; $9,5/8,0$; $8,0/6,75$; $6,75/6,25$ y $6,25/5,5$) separados por tamizado. Dichos valores de porosidad se dan en el Apéndice III, Tabla III.2. y en el Apéndice IV se explica y ejemplifica el método de cálculo de las porosidades.

En la Figura 5.15. se representan los valores de porosidad total corregida ($P_{T\text{corr}}$) en función del diámetro promedio de las fracciones de pelets analizadas para los distintos contenidos de agua.

Dentro del rango de peletizabilidad, la porosidad total de los pelets resulta ser independiente del contenido de agua empleado en cada peletización.

La totalidad del volumen de poros del interior de los pelets está ocupada por agua. De tal modo el rango de peletizabilidad del sistema debe extenderse por sobre este valor, puesto que es necesario un exceso de agua para mantener húmeda la superficie del pelet. Si se expresan los contenidos de agua en términos de fracción de volumen, respecto del volumen total del sistema (Tabla 5.9), se observa que estos valores son ligeramente superiores al valor promedio de la porosidad total de los pelets ($P_{T\text{corr}} = 0,32$).

$\%(p)H_2O$	27,0	25,9	24,7	23,6	22,4	20,7
Vol. H_2O /Vol. total	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,33

TABLA 5.9.- Fracciones volumétricas de agua correspondientes a los distintos contenidos de agua.

Además puede observarse en la Figura 5.15., que en el caso de los pelets de

mayor diámetro, la porosidad tiende a aumentar con el diámetro de pelet, efecto probablemente derivado de la posición que ocupan los pelets más grandes en la parte superior del lecho, donde la compactación es menos marcada que en la parte inferior y en los bordes.

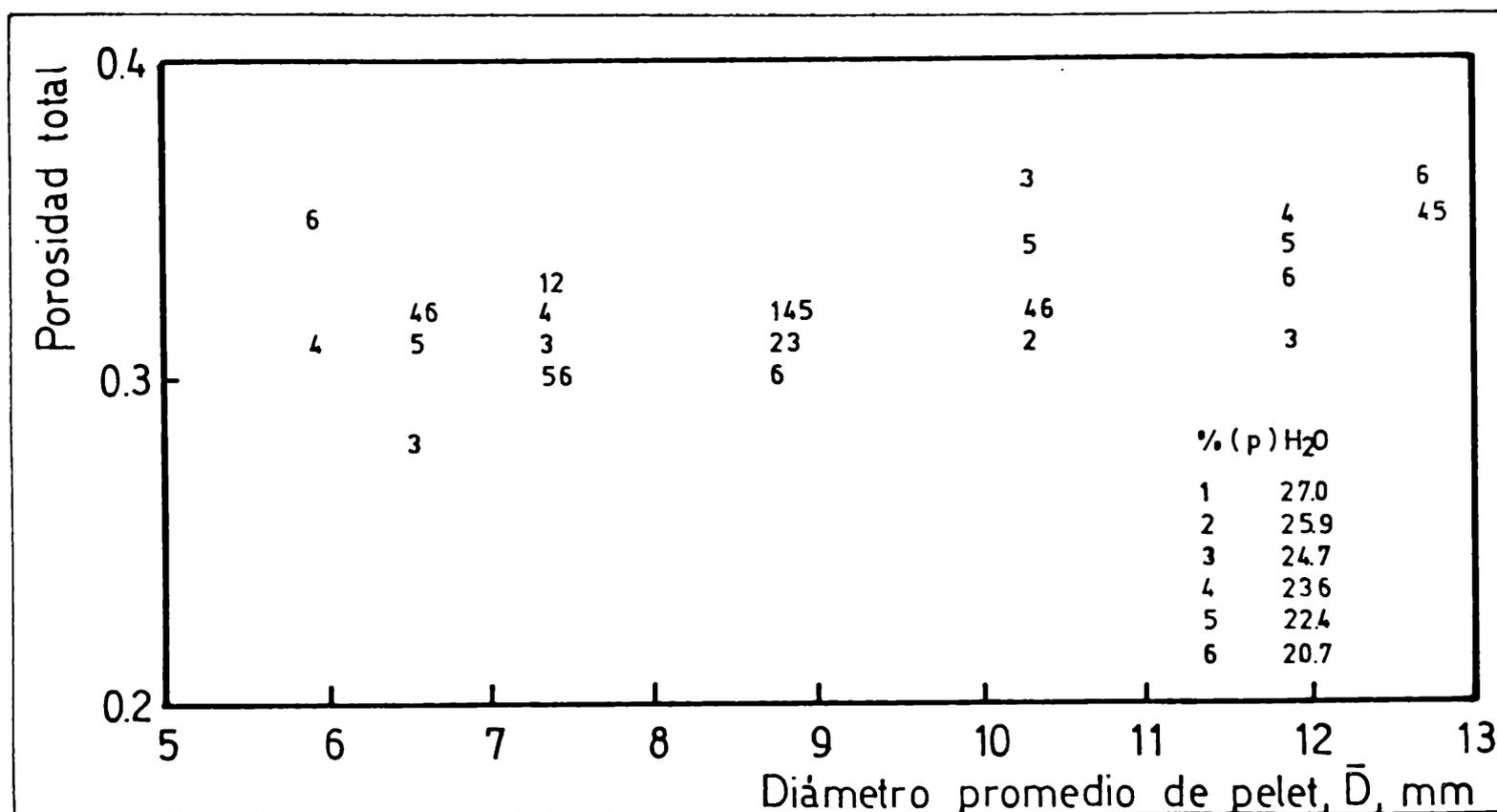


FIGURA 5.15.-Variación de porosidad de pelets de gibbsita con el diámetro promedio de pelet para los distintos contenidos de agua.

Además algunos pelets fueron desgastados por abrasión hasta un diámetro equivalente a los dos tercios del diámetro inicial. O sea que los pelets de las fracciones 9,5/8,0 y 8,0/6,75 mm con 27,0% H₂O y de las fracciones 11,0/9,5; 9,5/8,0 y 8,0/6,75 mm con 23,6% H₂O, se gastaron hasta diámetros de 5,8 y 5,0 mm y 6,8; 5,8 y 5,0 mm, respectivamente. Sobre los pelets gastados hasta los diámetros indicados fue determinada la porosidad y se corrigieron esos valores, de acuerdo a las densidades corregidas por efecto del núcleo (Apéndice III, Tabla III.1.).

Con los datos de porosidad total (P_T corr) y porosidad de los pelets con diámetro igual a dos tercios del inicial ($P_{2/3}$ corr) y los volúmenes calculados a partir de los diámetros de las fracciones (Apéndice III, Tabla III.1.) se calcularon los valores de porosidad de la capa externa de los pelets, es decir la parte eliminada por abrasión (Apéndice IV).

En el Apéndice III, Tabla III.3. se dan valores de P_T corr, $P_{2/3}$ corr y P_C , calculados a partir de los anteriores.

En la Figura 5.16. se representa la variación de los promedios de los valores de porosidad dentro del pelet en función de un radio adimensional $r^* = r/R$ donde R es el radio del pelet y r es la distancia considerada desde el borde hacia el centro (Apéndice IV).

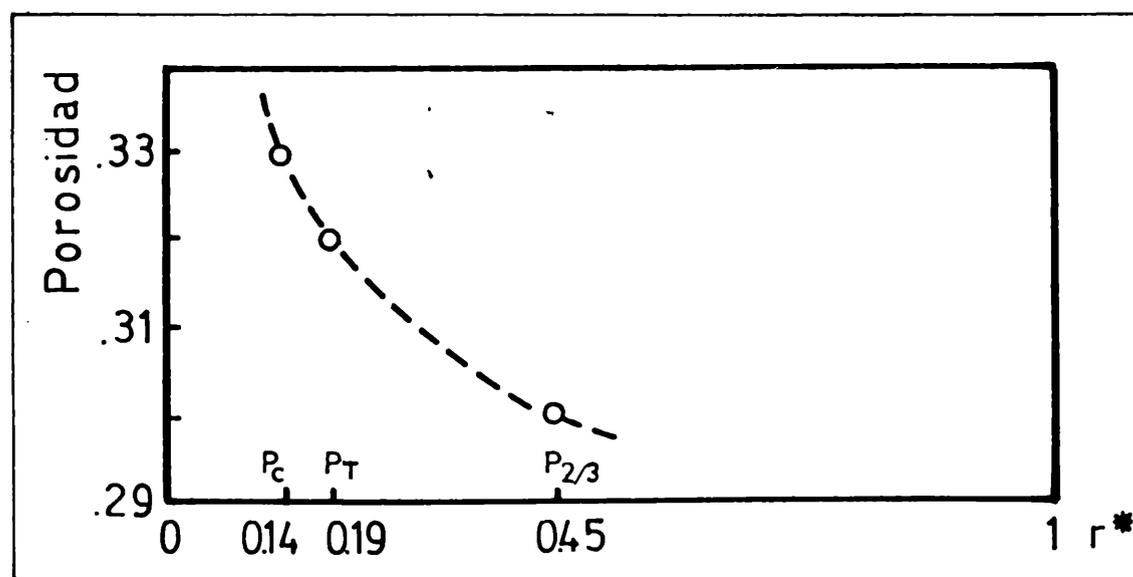


FIGURA 5.16.-Variación de la porosidad de pelets de gibbsita a lo largo de su diámetro.

Se observa una disminución continua de los valores de porosidad para los valores crecientes de r^* .

Si bien la dispersión de los valores de porosidad provenientes de diferentes experiencias impidió comparar los valores absolutos obtenidos en cada uno de

los casos, el comportamiento individual de cada una de las muestras fue similar.

5.2.7. CONCLUSIONES

- La resistencia a la compresión de los pelets secos aumenta con el tiempo de rodado.
- La función que relaciona ambos parámetros presenta un punto de inflexión a un tiempo de rodamiento dado para cada sistema.
- Dado que la resistencia medida corresponde a la resistencia del pelet en su superficie y que la densificación se produce desde el centro hacia el borde, se puede identificar el tiempo de rodado al cual se presenta el punto de inflexión en las curvas resistencia-tiempo con el momento en que la densificación alcanza la superficie.
- La resistencia a la compresión es función del diámetro del pelet según una expresión del tipo: $R = k \cdot D^n$, donde el exponente n mostró un valor de 1,4 para gibbsita peletizada en sistema semi-continuo.
- El valor del exponente n encontrado, sugiere que los enlaces entre las partículas que constituyen el pelet no están distribuidos radialmente sino por capas.
- La porosidad total de los pelets disminuye con el tiempo de rodamiento en forma continua, debido a que el empaquetamiento de las partículas de finos se hace cada vez más denso.
- La porosidad total de los pelets no depende del contenido de agua de la alimentación. Además, se observó una ligera tendencia a aumentar con el diámetro de pelet debido a la distribución de éstos en el lecho, de acuerdo a su tamaño.

- La porosidad varía a lo largo del diámetro de pellet, disminuyendo desde el borde hacia el centro.
- Los valores de porosidad total de los pellets son ligeramente inferiores al porcentaje de agua empleado en la peletización, expresado en forma volumétrica, debido al exceso de agua en la superficie de los pellets.

6. CONSIDERACIONES GENERALES

En esta sección se presentan los resultados discutidos en las secciones 5.1. y 5.2. estableciendo las conclusiones generales que constituyen el aporte fundamental de este trabajo.

Las condiciones experimentales empleadas, con el fin de aislar el mecanismo de crecimiento de pelets por formación de capas, permitieron: i) establecer similitudes y diferencias con sistemas "batch" donde otros mecanismos controlan el crecimiento; ii) caracterizar el comportamiento del sistema en relación a: materias primas, variables operativas y características de los pelets obtenidos.

Así, fue establecido un comportamiento diferente del sistema en distintas zonas del rango de peletizabilidad, que resultó ser más amplio que para sistemas "batch". Para altos contenidos de agua, dentro de dicho rango de peletizabilidad, existe una dependencia exponencial entre el tiempo necesario para alcanzar un determinado diámetro de pelet y el porcentaje de agua alimentado. Esto hace que el concepto de índice de peletizabilidad aplicable a sistemas "batch," tenga validez limitada a dicha zona para sistemas con alimentación continua.

En todo el rango de peletizabilidad, se mantiene el mecanismo de crecimiento y el crecimiento de cada pelet es proporcional a su superficie.

Es posible controlar en cierto modo la distribución de tamaños final de los pelets ya que uno de los parámetros que la modifica es el contenido de agua empleado en la peletización. Cuando se trabaja con bajos contenidos de agua, no existe un mojado uniforme de toda la superficie del sistema y se obtiene un crecimiento preferencial de pocos pelets respecto de la totalidad del lecho, produciéndose el sesgo de las curvas de distribución hacia el lado de los diá-

metros mayores.

Las características texturales y mecánicas de los pelets dependen de otro tipo de variables operativas, tales como el tiempo de rodamiento. La función que relaciona la resistencia a la compresión de los pelets con dicho parámetro presenta un punto de inflexión para un tiempo de rodamiento característico para cada sistema peletizado, el que puede ser relacionado con el tiempo al cual la densificación alcanza la superficie. En cambio, la porosidad disminuye continuamente al aumentar el tiempo de rodamiento, dado que el empaquetamiento de las partículas de finos se hace cada vez más denso.

La dependencia de estas propiedades con el tamaño de pelet presenta, en el caso de la resistencia a la compresión, una proporcionalidad directa con una potencia del diámetro menor que 2, lo que sugiere que los pelets están constituidos por capas sucesivas de material fino. La compactación de estas capas produce una disminución de la porosidad desde el borde hacia el centro.

Tanto la resistencia a la compresión como la porosidad de los pelets, son fuertemente dependientes de otros parámetros tales como la FORMA y TAMAÑO de las partículas de finos.

Estudios posteriores sobre este aspecto que contribuyan a acotar más aún el problema, presentarían el inconveniente de la imposibilidad de aislar las variables si se encaran sobre sistemas reales como los tratados en el presente trabajo. Por este motivo, deberían ser encarados sobre sistemas "ideales" en los cuales se trabaje con:

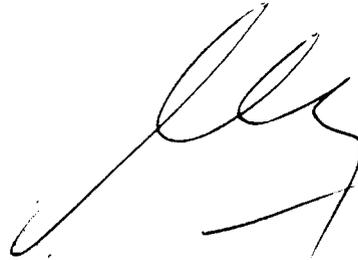
- partículas muy finas de uno o pocos tamaños, bien definidas en cuanto a los diámetros y a la relación entre ellos;
- distribución homogénea de líquido a lo largo de todo el lecho de peletización;

- discos peletizadores de diámetro grande;
- tiempos de peletización muy largos.

En estos sistemas podrán determinarse:

- formas de empaquetamiento entre las partículas y las fuerzas que actúan entre ellas;
- distribución de poros en el interior del pelet;
- porosidad total y resistencia a la compresión.

Se podrá, entonces, intentar la extrapolación de los resultados obtenidos a casos más reales.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Agglomeration: Feature Report. Chem. Eng. 51:161(1951).
2. Agglomeration of Iron Ores. Section 3: Pelletizing.
3. Cooke, R.B.; Ban, T.E.: "Agglomerating Iron Ore Concentrates". Chem. Eng. Progress 51(8):364-368(1955).
4. Floyd, S.B.; Engelleitner, W.H.: "The Theory and Practice of Disc Balling". The Inst. for Briq. and Agglom., Aug. 15, 16 and 17 (1967).
5. Capes, C.E.: "A Note on Size Distribution in Granulation, Balling and Wet Pelletization". The Chem. Eng. 207:78-80(1967).
6. Morawski, F.P.: "The Pelletizing Process". Soc. of Min. Eng. 15(5):48-52 (1963).
7. Newitt, D.M.; Conway-Jones, J.M.; "A Contribution to the Theory and Practice of Granulation". Trans. Instn. Chem. Eng. 36:422-442(1958).
8. Puddington, I.E.; Sparks, B.D.: "Spherical Agglomeration Processes". Minerals Sci. Eng. 7(3):282-288(1975).
9. Brandenberger, H.: "Granulating and Preheating a Glass Batch (frit)". Glass 1965:68-69.
10. Engelleitner, W.H.: "Pelletizing Disc Applications in Ceramic Processing". Ceramic Age 1966:24-45.
11. Engelleitner, W.H.: "Pelletizing as Applied to the Ceramic Field". Ceram. Bull. 54(2):206-207(1975).
12. Engelleitner, W.H. "Agglomeration in the Glass Industry". The Glass Industry 1978:16-27.
13. Fogel, R.: "Physical Variables Affecting Granulation of Superphosphate". J. Appl. Chem. 10:139-144(1960).
14. Gur'yanova, M.F.: "Granulation of the Glass Batch". Glass and Ceramics 16(5):264-266(1959).

15. Gur'yanova, M.F.; Frolov, Y.A.: "Granulating the Glass Batch Containing Coarse Sand". *Steklo i Keramika* 18(10):26-27(1961).
16. Hardesty, J.O.: "Agglomeration: a Chemical Engineering Tool for Granulating Mixed Fertilizers". *Chem. Eng. Progress* 51(6): 291-295(1955).
17. Hardesty, J.O.; Ross, W.H.: "Factors Affecting Granulation of Fertilizer Mixtures". *Ind. and Eng. Chem.* 30:668-672(1938).
18. Kapur, P.C.: "Self-Preserving Size Spectra of Comminuted Particles". *Chem. Eng. Sci.* 27: 425-431(1972).
19. Meyer, K.: "Pelletizing of Iron Ores". Springer-Verlag(Berlin-Heidelberg N. York)(1980).
20. Snerrington, P.J.: "The Granulation of Sand as an Aid to Understanding Fertilizer Granulation". *The Chem.Eng.* 1968(220):201-215.
21. Tigerschiold, M.: "Aspects on Pelletizing of Iron Ore Concentrates". *J. of the Iron and Steel Institute* 1954:13-24.
22. Whitmore, O.J.; Varela, J.A.: "Shape and Density of Kaolin Grog Particles". *Ceram. Bull.* 59(2):207-210(1980).
23. Rumpf, H.: "The Strength of Granules and Agglomerates". *Agglomeration* (Knepper, Ed.) Interscience, N. York, 379-418(1962).
24. Abouzeid, A.Z.M.; Seddik, A.A.; El Sinbawy, H.A.: "Pelletization Kinetics of an Earthy Iron Ore and the Physical Properties of the Pellets Produced". *Powder Technology* 24:229-236(1979).
25. Bhrany, U.N.; Johnson, R.T.; Myron, T.L.; Pelczarski, E.A.: "Dynamics of Pelletization". *Agglomeration* (Knepper, Ed.) Interscience, N York, 229-249 (1962).
26. Capes, C.E.; Danckwerts, P.V.: "Granule Formation by the Agglomeration of Damp Powders. Part.I" *Trans.Instn.Chem.Eng.* 43:116-123(1965).

27. Cross, M.: "Mathematical Model of Balling-Drum Circuit of a Pelletizing Plant". *Ironmaking and Steelmaking* 1977(3):159-169.
28. Kapur, P.C.: "Kinetics of Wet Pelletization". Ph. D. Thesis. Univ. of California. 1967.
29. Kapur, P.C.; Fuerstenau, D.W.: "Kinetics of Green Pelletization". *Trans. Soc. of Min.Eng.* 229:348-355 (1964).
30. Kapur, P.C.; Fuerstenau, D.W.: "Size Distributions and Kinetic Relationships in the Nuclei Region of Wet Pelletization". *Ind. and Eng. Chem. Process, Des. and Dev.* 5(1):5-10(1966).
31. Kapur, P.C.; Fuerstenau, D.W. "A Coalescence Model for Granulation". *Ind. and Eng. Chem. Process, Des. and Develop.* 8(1):56-62(1969).
32. Linkson, P.B.; Glastonbury, J.R.; Duffy, G.J.: "The Mechanism of Granule Growth in Wet Pelletizing". *Trans. Instn. Chem. Eng.* 51:251-259 (1973).
33. Sastry, K.V.S.: "The Agglomeration of Particulate Materials by Green Pelletization" Ph. D. Thesis, Univ. of California. 1970.
34. Sastry, K.V.S.; Fuerstenau, D.W.: "Mechanisms of Agglomerate Growth in Green Pelletization". *Powder Technology* 7:97-105(1973).
35. Stirling, H.T.: "Advances in Balling and Pelletizing". *Agglomeration* (Knepper, Ed.) Interscience, N. York, 177-206(1962).
36. Rumpf, H.: "Grundlagen und Methoden des Granulierens". *Chem. Ing.Tech.* 30(3):144-158 (1958).
37. Capes, C.E.; Danckwerts, P.V.: "Granule Formation by the Agglomeration of Damp Powders. Part II". *Trans. Instn. Chem. Eng.* 43:125-130(1965).
38. Cavalieri, A.L.; Pereira, E.; Porto López, J.M. "Estudio de variables de peletización . Parte II." *Rev. Latinoamericana, Ing. Quím. y Quím. Apl.* 12:67-76 (1982).

39. Cavalieri, A.L.: "Peletización de minerales de cinc". Informe reservado para Compañía Metalúrgica Austral Argentina (UMAA) (1979).
40. Cavalieri, A.L.; Krenkel, T.G.: "Peletización en Cerámica". Actas del VII Congreso Argentino e Internacional de Cerámica. Tomo I, 59-76(1979).
41. Cavalieri, A.L.; Porto López, J.M.; Pereira, E.: "Peletización de mezclas para fritas cerámicas". Informe reservado para Compañía Argentina de Productos Enlozados y Anexos (CAPEA) (1982).
42. Krenkel, T.G.; Cavalieri, A.L.; Luchessi, P.: "Influencia del agua y la granulometría del material sobre el diámetro de las bolas verdes en la peletización de un mineral constituido por sulfuro de cinc". Rev. Metalurgia CENIM 15(4): 246-251(1979).
43. Ryshkewitch, E.: "Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zirconia". J. Am. Ceram. Soc. 36(2):65-68 (1953).
44. Klar, E. and Shaffer, W.M.: "On the Nature of Green Strength of Compacted Metal Powders". Met. Trans. 7:1470-1472(1976).
45. Capes, C.E.; Coleman, R.D.: "The Size-Strength Relationship for Pellets". Metall. Trans. 5(12):2604-2605 (1976).
46. Capes, C.E.: "Mechanism of Pellet Growth in Wet Pelletization". Ind. and Eng. Chem. Process, Des. and Dev. 6(3): 390-392 (1967).
47. Meissner, H.P.; Michaels, A.S.; Kaiser, R. "Rate of Pelletization of Zinc Oxide Powders". Ind. and Eng. Chem. Process, Des. and Dev. 5(1):10-14(1966).
48. Sastry, K.V.S; Fuerstenau, D.W.: "Size Distribution of Agglomerates in Coalescing Dispersed Phase Systems". Ind. and Eng. Chem. Fundam. 9:145-149(1970).
49. Kapur, P.C.: "The Crushing and Layering Mechanism of Granule Growth". Chem. Eng. Sci. 26:1093-1099 (1971).

50. Kapur, P.C.: "Kinetics of Granulation by Non-random Coalescence Mechanism".
Chem. Eng. Sci. 27:1863(1972).
51. Ouchiyaama, N.; Tanaka, T.: "Mathematical Model in Kinetics of Granulation".
Ind. Eng. Chem. Process. Des. and Dev. 13(4):383-389(1974).
52. Ouchiyaama, N.; Tanaka, T.: "The Probability of Coalescence in Granulation
Kinetics". Ind. Eng. Chem. Process, Des. and Dev. 14(3):286-289(1975).
53. Ouchiyaama, N.; Tanaka, T.: "Estimation of the Number of Contacts Between
Randomly Mixed Solid Particles". Ind.Eng.Chem.Fundam. 19:338-340(1980).
54. Ouchiyaama, N.; Tanaka, T.: "Stochastic Model for Compaction of Pellets
in Granulation". Ind. Eng. Chem. Process, Des. and Dev. 19:555-560(1980).
55. Norton, F.H.: "Elements of Ceramics". Addison-Wesley Publishing Co.,
Cambridge, Mass. (1955),p.83.

Otras referencias:

- Aguiar Mendes, M.M. de: "Noticias sobre o processo de pelotizaçao dos mineiros
de ferro". XVI Congreso Anual Da ABM Porto Alegre, (1961).
- Anderegg, F.O.: "Grading Aggregates. The Application of Mathematical
Formulas to Mortars". Ind. and Eng. Chem. 23:1058-1064(1931).
- Ball, D.F.; Butler, F.G.; Ratter, H: "Some Studies of Pellet Firing.
Dehydration of Green Iron Ore Pellets". Iron and Steel 39:88-92(1966).
- Banks, G.N.; Campbell, R.A.; Viens, G.E.: "Iron Ore Pelletizing -A Literature
Survey". Trans. Canad. Inst. Min. Metall. 65:432-437(1962).
- Barlow, C.G.: "The Manufacture of Granules, Pellets and Tablets". The Chem.
Eng. 1968:196-201.
- Capes, C.E.; Sutherland, J.P.: "Formation of Spheres from Finely Divided
Solids in Liquid Suspension". Ind. and Eng. Chem. Process, Des. and Dev.
6(1):146-154(1967).

- Church, J.M.; Shinnar, R.: "Stabilizing Liquid-Liquid Dispersions by Agitation". Ind. and Eng. Chem. 53(6):479-483(1961).
- Cooper, A.R.; Eaton, L.E.: "Compaction Behavior of Several Ceramic Powders". J. Am. Ceram. Soc. 45(3):97-101(1962).
- Dias Brosh, C.; Barchese, E.: "Pelotizaçao por vibraçao". Metal 24(133): 921-931(1968).
- Epstein, B.: "Logarithmico-Normal Distribution in Breakage of Solids". Ind. and Eng. Chem. 40(12):2284-2291(1948).
- Ficher, R.A.: "On the Capillary Forces in an Ideal Soil". J. Agric.Sci. 16:492-505(1926).
- Flank, W.H.: "Behavior of Kaolinite Pellets at Elevated Temperatures". Clays and Clay Minerals 27(1):11-18(1979).
- Friedlander, S.K.; Wang, C.S.: "The Self-Preserving Particle Size Distribution for Coagulation by Brownian Motion". J. Coll.Int.Sci.22:126-132(1966).
- Furnas, C.C.: "Grading Aggregates". Ind. and Eng. Chem. 23(9):1052-1058 (1931).
- Greenwalt, R.B.; Cofield, G.E.: "The Circular Grate System for Iron Ore Pelletizing". Min. Congress Journal 1968:39-45.
- Haines, W.B.: "Studies in the Physical Properties of Solids. Part IV". J.Agric. Sci. 17:264-290(1927).
- Haines, W.B.: "Studies in the Physical Properties of Solids. Part V". J. Agric. Sci. 20:97-116(1930).
- Haley, K.N.; Apuli, W.E.: "Pelletizing on a Horizontal Grate Machine". Agglomeration (Knepper, Ed.) Interscience, N. York, 931-964(1962).
- Han, Ch.D.: "Steady-State Behavior of Continuous Granulators". Chem. Eng. Sci. 25:875-883(1970).

- Harbison, C.R.: "Pelletizing Quick and Easy". Proc. Inst. for Briq. and Aggl. 14: (1975).
- Kapur, P.C.: "Self-Preserving Size Spectra of Comminuted Particles". Chem. Eng. Sci. 27: 425 (1972).
- Kirchhof, S.: "Granulating of Glass Batches". Steklo i Keramika 1966:44.
- Knudsen, F.P.: "Effect of Porosity on Young's Modulus of Alumina". J. Am. Ceram. Soc. 45(2):94-95 (1962).
- Macavei, Gh.: "A General Relationship for Scaling-up Granulating Pans". Brit. Chem. Eng. 10(9):610-614 (1965).
- Mason, G.; Clark, W.C.: "Liquid Bridges Between Spheres". Chem. Eng. Sci. 20:859-866 (1965).
- Meissner, H.P.; Michaels, A.S.; Kaiser, R.: "Spontaneous Pelletization in Fine Powders". Ind. and Eng. Chem. Process, Des. and Dev. 3(3):197-201 (1964).
- Meissner, H.P.; Michaels, A.S.; Kaiser, R.: "Crushing Strength of Zinc Oxide Agglomerates". Ind. and Eng. Chem. Process, Des. and Dev. 3(3):202-205 (1964).
- Mugele, R.A.; Evans, H.D.: "Droplet Size Distribution in Sprays". Ind. and Eng. Chem. 43(6):1317-1324 (1951).
- Niesz, D.E.; Bennet, R.B.; Snyder, M.J.: "Strength Characterization of Powder Aggregates". Ceram. Bull. 51(9):677-680 (1972).
- Patankar, A.N.; Mandal, G.: "The Packing of Some Non-Spherical Solid Particles". Trans. J. Brit. Ceram. Soc. 79:59-66 (1980).
- Perry, R.H.; Chilton, C.H.: "Size Enlargement". Chemical Engineer's Handbook (ed. Mc.Graw-Hill.) 5th ed. 8-57/65.
- Phelps, D.D.; Anthes, J.A.: "Improvements in the Grate Pelletizing Process". Proc. AIME, Blast Furnace, Coke Oven and Raw. Materials Conference. 22:317-331 (1962).

- Ranich, R.L.: "Balling Drums versus Balling Discs: An Economic Evaluation". Proc. Inst. for Briquetting and Agglomeration Conference 14:(1975).
- Rowen, H.E.: "Protecting the Environment During Agglomeration". Proc. Inst. for Briquetting and Agglomeration Conference 14:(1975).
- Valentas, K.J.; Bilous, O.; Amundson, N.R.: "Analysis of Breakage in Dispersed Phase Systems". Ind. and Eng. Chem. Fundam. 5(2):271(1966).
- Valentas, K.J.; Bilous, O.; Amundson, N.R.: "Breakage and Coalescence in Dispersed Phase Systems". Ind. and Eng. Chem. Fundam. 5(4):533-542(1966).

APENDICE ITABLAS CORRESPONDIENTES AL PUNTO 5.1.

- I.1.: Diámetros promedios de pelets y sesgo de las distribuciones de frecuencia, para distintos contenidos de agua.
- I.2.: Cálculo de las pendientes y ordenadas al origen de las rectas correspondientes a las curvas del gráfico \bar{D} vs. N , para los distintos contenidos de agua.
- I.3.: Cálculo de valores de $\log N$ a partir de los valores de tiempo de peletización N , para distintos valores de \bar{D} , obtenidos del gráfico de \bar{D} vs. N (figura 5.5.).

Contenido de agua, % (p)		número de revoluciones (N)				
		140	280	420	560	644
27,0	\bar{D} ,mm	5,30	6,08	6,80	7,22	7,68
	sesgo	0,20	-0,93	-0,83	-1,20	-0,78
25,9	\bar{D} ,mm	5,01	5,88	6,49	6,98	7,24
	sesgo	0,36	-0,68	-0,31	-0,33	-0,49
24,7	\bar{D} ,mm	5,00	5,63	6,11	6,37	6,79
	sesgo	0,53	0,76	0,91	1,05	0,88
23,6	\bar{D} ,mm	5,02	5,55	6,21	6,54	7,14
	sesgo	0,53	0,71	0,57	0,95	0,72
22,4	\bar{D} ,mm	4,90	5,42	5,67	5,94	6,82
	sesgo	0,31	0,39	0,52	0,72	0,89
20,7	\bar{D} ,mm	4,80	5,53	6,16	6,67	6,86
	sesgo	0,54	0,63	0,67	1,06	1,34

TABLA I.1.: diámetros promedio de pelets y sesgo de las distribuciones de frecuencia, para distintos contenidos de agua.

$\%(\text{p})\text{H}_2\text{O}$	ordenada	pendiente	Coef. corr.
27,0	3,599	0,155	0,997
25,9	3,567	0,142	0,995
24,7	3,660	0,119	0,998
23,6	3,579	0,129	0,990
22,4	3,535	0,128	0,992
20,7	3,535	0,128	0,992

TABLA I.2.: Cálculo de las pendientes y ordenadas al origen de las rectas correspondientes a las curvas del gráfico \bar{D} vs \sqrt{N} , para los distintos contenidos de agua.

\bar{D} (mm)	N, logN	Contenido de H ₂ O, % (p)					
		27,0	25,9	24,7	23,6	22,4	20,7
4,5	N	63	70	77	91	105	119
	logN	1,799	1,845	1,886	1,959	2,021	2,076
5,0	N	105	140	154	161	196	196
	logN	2,021	2,146	2,188	2,207	2,292	2,292
5,5	N	175	203	245	259	308	287
	logN	2,243	2,307	2,389	2,413	2,489	2,458
6,0	N	252	308	357	371	434	392
	logN	2,401	2,489	2,553	2,569	2,637	2,593
6,5	N	350	427	532	518	644	525
	logN	2,544	2,630	2,726	2,714	2,809	2,720
7,0	N	490	560	-	-	-	-
	logN	2,690	2,748	-	-	-	-

TABLA I.3.: Cálculo de valores de logN a partir de los valores de tiempo de peletización N, para distintos valores de \bar{D} , obtenidos del gráfico \bar{D} vs N (Figura 5.5.).

APENDICE II

CALCULO DE LAS DISTRIBUCIONES DE TAMAÑO DE PELET CON SUCE-SIVAS INCORPORACIONES DE FINOS

Se calcula el aumento de tamaño de los pelets de un lecho de peletización, por incorporación de los finos de la alimentación en forma proporcional a su superficie.

Se supone la distribución de diámetros dividida en intervalos y en cada intervalo se aplica una función probabilística para el aumento de tamaño de los pelets.

Para realizar el cálculo:

i) Se ingresa con 200 g de núcleos de 0,37 cm de diámetro. Se incorporan en total 800 g de finos en cuatro alimentaciones de 174g cada una y una de 104g.

ii) Se divide la distribución de diámetros en N intervalos de longitud:

$(D_{\text{máx}} - D_{\text{mín}}) / 20$ ó 5×10^{-3} , según el que sea mayor, a partir del diámetro mínimo (como máximo se fija 20 intervalos).

iii) Se alimentan A_1 gramos de finos, para repartirlos entre los N intervalos y se calcula la fracción de superficie total del intervalo:

$$\frac{\sum_{1}^{N_i} 4\pi R^2}{\sum_{1}^N \sum_{1}^{N_i} 4\pi R^2} = \text{FSTI.}$$

El intervalo que se considera, tomará $\text{FSTI} \cdot A_1$ gramos de finos.

iv) Se divide el número de núcleos del intervalo N_i , de la siguiente forma:

$$P_N = 0,1 \cdot N_i$$

$$0,2 \cdot N_i$$

$$0,4 \cdot N_i$$

$$0,2 \cdot N_i$$

$$0,1 \cdot N_i$$

y los núcleos del intervalo tomarán:

$$\text{el } 10\% = \frac{\text{FSTI} \cdot A_1}{N_i} 0,8 = G_1$$

$$\text{el } 20\% = \frac{\text{FSTI} \cdot A_1}{N_i} 0,9 = G_2$$

$$\text{el } 40\% = \frac{\text{FSTI} \cdot A_1}{N_i} 1,0 = G_3$$

$$\text{el } 20\% = \frac{\text{FSTI} \cdot A_1}{N_i} 1,1 = G_4$$

$$\text{el } 10\% = \frac{\text{FSTI} \cdot A_1}{N_i} 1,2 = G_5$$

- v) Los finos tomados por cada uno de los núcleos producirán un incremento del volumen del mismo de $\Delta V = G_i / \rho_{\text{apar}}$ (ρ_{apar} = densidad aparente = $1,6 \text{ g/cm}^3$).
- vi) El nuevo volumen de los núcleos será: $V_{\text{nuevo}} = V_{\text{anterior}} + \Delta V$, con lo que se calcula el diámetro nuevo: $D_{\text{nuevo}} = (6 V_{\text{anterior}} / \pi)^{1/3}$.
- vii) Terminado el cálculo para los N intervalos se rearma la distribución promediando los diámetros de cada intervalo de longitud ii).
- viii) Comienza el ciclo siguiente.

```

c  CALCULO DE LA DISTRIBUCION DEL AUMENTO DE DIAMETRO DE NUCLEOS CON
c  SUCESIVAS INCORPORACIONES DE FINOS
c
c  DESCRIPCION DE LAS VARIABLES QUE DEBEN INGRESARSE PARA EL USO DEL
c  PROGRAMA
c
c  NTN  NRO. TOTAL DE NUCLEOS
c  NI   NRO. DE INTERVALOS
c  NIMAX NRO. MAXIMO DE INTERVALOS
c  KA   CANTIDAD DE ALIMENTACIONES
c  GM   GRAMOS DE NUCLEOS
c  GF   GRAMOS TOTALES DE FINOS
c  AMINI ANCHO MINIMO DEL INTERVALO
c  ALIM VECTOR DE DIMENSION KA. GRAMOS DE FINOS ALIMENTADOS CADA VEZ.
c  NNI  VECTOR DE DIMENSION MAXIMA=20. NRO. DE NUCLEOS EN C/INTERV.
c  DIAM VECTOR DE DIMENSION MAXIMA=20. DIAMETRO DE LOS NUCLEOS DE CA-
c  DA INTERVALO. EN CM.
c  RO   VECTOR DE DIMENSION MAXIMA=20. DENSIDAD DE LOS NUCLEOS DE CADA
c  INTERVALO. EN G/CM  3.
c  DIRO MATRIZ DE DIMENSION 10 x 2. RELACION ENTRE DIAMETROS Y DENSIDA-
c  DES. DIRO(1.1)=DIAMETRO. DIRO(1.2)=DENSIDAD.
c
c  DESCRIPCION DE LAS VARIABLES AUXILIARES
c
c  FR   FRECUENCIA RELATIVA
c  FRA  FRECUENCIA RELATIVA ACUMULADA
c  FSTI FRACCION DE SUPERFICIE TOTAL DEL INTERVALO
c  GFI  GRAMOS DE FINOS POR INTERVALO
c  RADIO RADIO DE LOS NUCLEOS
c  SUMA SUMA DE LAS SUPERFICIES DE LOS NUCLEOS POR INTERVALO.
c  SUM  SUMA TOTAL DE LAS SUPERFICIES DE LOS NUCLEOS.
c  PNNI PORCENTAJE DE NUCLEOS DEL INTERVALO
c  GFTI GRAMOS DE FINOS TOMADOS POR CADA NUCLEO DEL INTERVALO
c  DV   AUMENTO DEL VOLUMEN DE CADA NUCLEO
c  VA   VOLUMEN ANTERIOR DE C/NUCLEO. LA PRIMERA VEZ ES EL VOL.INICIAL
c  VN   VOLUMEN NUEVO DE CADA NUCLEO
c  DN   DIAMETRO NUEVO DE LOS NUCLEOS DE CADA INTERVALO. VECTOR DE
c  LONGITUD MAXIMA 100.
c  NDN  CUENTA EL NUMERO DE INTERVALOS PARA LA VEZ SIGUIENTE (ANTES
c  DE REORDENAR LA DISTRIBUCION)
c  SPRO SUMA DE DIAMETROS QUE ENTRARAN EN C/INTERVALO.
c  NPRO CUENTA LA CANTIDAD DE DIAMETROS QUE HAY EN SPRO.
c  NNS  SUMA LA CANTIDAD DE NUCLEOS QUE TENDRA EL NUEVO INTERVALO.

0001  DIMENSION ALIM(10).DIAM(50).RO(50).DIRO(10.2).MNI(50).MNIP(500).
      1      RADIO(50).SUMA(50).PNNI(5).GFTI(5).DN(500).VA(50).
      2      GFI(50).FR(50).
c
c  LECTURA E IMPRESION DE LAS VARIABLES INICIALES
c
0002  READ(5.10)NTN.NI.NIMAX.KA
0003  READ(5.20)GM.GF.AMINI

```

```

0004 WRITE(6.9)NTN.NI.KA.AMINI.NIMAX.GF.GM
0005 9 FORMAT(1H1.' DATOS INICIALES'./).
      1 . NRO.TOT.DE NUCLEOS ='.15.
      2 . NRO.INICIAL DE INTERVALOS=''.15./'.
      3 . NRO. DE ALIMENTACIONES ='.15.
      4 . ANCHO MAXIMO DEL INTERV. ='.F5.3./'.
      5 . NRO.MAXIMO DE INTERVALOS=''.15.
      6 . GMS.TOT.DE FINOS ='.G12.6./'.
      7 . GRAMOS DE NUCLEOS ='.G12.6)
0006 10 FORMAT(14I5)
0007 20 FORMAT(7F10.0)
0008 READ(5.20)(ALIM(I).I=1.KA)
0009 WRITE(6.21)
0010 21 FORMAT(1H0.' CANTIDAD DE GRAMOS POR ALIMENTACION.)
0011 WRITE(6.22)(I.ALIM(I).I=1.KA)
0012 22 FORMAT(/2(2x.14.2x.G14.8))
0013 READ(5.30)(NNI(I).DIAM(J).RO(I).I=1.NI)
0014 DO 40 I=1.10
0015 READ(5.20)(DIRO(I.J).J=1.2)
0016 40 CONTINUE
0017 WRITE(6.23)
0018 23 FORMAT(1H0.'NUC/INT DIAMETRO FRECUENCIA FRECUENCIA
      1 ./:. RELATIVA REL.ACUM'
      2 ./)
0019 FRA=0.
0020 DO 25 I=1.NI
0021 FR(I)=NNI(I) 100./NTN
0022 FRA=FRA+FR(I)
0023 WRITE(6.24)NNI(I).DIAM(I).FR(I).FRA
0024 24 FORMAT(1H.4x.15.3(2x.G14.8))
0025 25 CONTINUE
0026 30 FORMAT(15.2F10.0)
      c
      c COMIENZO DEL CALCULO PARA CADA ALIMENTACION
      c
0027 DO 150 K=1.KA
0028 SUM=0
0029 NDN=0
0030 DO 50 I=1.NI
0031 RADIO(I)=DIAM(I)/2.
0032 VA(I)=4./3. 3.1415927 RADIO(I) 3
0033 SUMA(I)=NNI(I) 4. 3.1415927 RADIO(I) 2
0034 SUM=SUM+SUMA(I)
0035 50 CONTINUE
      c
      c COMIENZO DEL CALCULO PARA CADA INTERVALO
      c
0036 53 DO 70 I=1.NI
0037 FSTI=SUMA(I)/SUM
0038 GFI(I)=FSTI ALIM(k)
      c
      c SI HAY ALGUN INTERVALO QUE RESULTE CON MENOS DE 10 NUCLEOS SE ESTIMA
      c QUE TODOS TOMAN LO NORMAL
      c

```

```

0039   IF(NNI(1).GE.10)GO TO 55
0040   NDN=NDN+1
0041   NNIP(NDN)=NNI(1)
0042   IF(NNI(1).NE.0)GO TO 604
0043   DN(NDN)=DIAM(1)
0044   GO TO 70
0045604 VN=VA(1)+GF(1)/NNI(1)/1.6.
0046   DN(NDN)=(6. VN/3.1415927) (1./3.)
0047   GO TO 70
0048 55 PNNI(1)=NNI(1).1
0049   PNNI(2)=NNI(1).2
0050   PNNI(3)=NNI(1).4
0051   PNNI(4)=NNI(1).2
0052   PNNI(5)=NNI(1).1
0053   GFTI(1)=GFI(1)/NNI(1) 0.8
0054   GFTI(2)=GFI(1)/NNI(1) 0.9
0055   GFTI(3)=GFI(1)/NNI(1)
0056   GFTI(4)=GFI(1)/NNI(1) 1.1
0057   GFTI(5)=GFI(1)/NNI(1) 1.2
0058   DO 60 J=1.5
0059   DV=GFTI(J)/1.6
0060   VN=VA(1)+DV
0061   NDN=NDN+1
0062   DN(NDN)=(6. VN/3.1415927) (1./3.)
0063   NNIP(NDN)=PNNI(J)+.5
0064 60 CONTINUE
0065 70 CONTINUE
      c
      c UNA VEZ TERMINADO EL CALCULO PARA TODOS LOS INTERVALOS SE ORDENA EN
      c FORMA DECRECIENTE EL VECTOR QUE CONTIENE LOS NUEVOS DIAMETROS
      c
0066   DO 80 I=1. NDN
0067   DO 80 J=1. NDN
0068   IF(DN(I).LE.DN(J)GO TO 80
0069   AUX=DN(I)
0070   DN(I)=DN(J)
0071   DN(J)=AUX
0072   AUX=NNIP(I)
0073   NNIP(I)=NNIP(J)
0074   NNIP(J)=AUX
0075 80 CONTINUE
0076   L=0
0077   DO 81 I=1. NDN
0078   IF(NNIP(I).NE.0)GO TO 82
0079   L=I
0080 81 CONTINUE
0081 82 IF(L.EQ.0)GO TO 83
0082   NDN=NDN-L
0083   DO 84 I=1. NDN
0084   DN(I)=DN(I+L)

```

```

0085 NNIP(I)=NNIP(I+L)
0086 84 CONTINUE
      C
      C SE CALCULA EL ANCHO DEL INTERVALO, COMO EL DIAMETRO MAXIMO MENOS
      C EL DIAMETRO MINIMO DIVIDIDO VEINTE LO QUE DARA UN MAXIMO DE VEINTE
      C INTERVALOS.
      C
0087 83 IF(K.NE.1)GO TO 99
0088 DO 85 I=1.NDN
0089 DIAM(I)=DN(I)
0090 NNI(I)=NNIP(I)
0091 85 CONTINUE
0092 NI=NDN
0093 GO TO 141
0094 99 AI=ABS(DN(1)-DN(NDN))/20.
0095100 DMAXI=DN(1)+AI
0096 DMINI=DN(1)
0097 NPRO=0
0098 L=0
0099 SPRO=0.
0100 NNS=0
0101 DO 120 I=1.NDN
0102108 IF(DMINI.LE.DN(I).AND.DN(I).LT.DMAXI)GO TO 110
0103 IF(I.EQ.NDN)GO TO 110
0104 IF(NPRO.EQ.0)GO TO 199
0105 L=L+1
0106 DIAM(L)=SPRO/NPRO
0107 NNI(L)=NNS
0108 NNS=0
0109 SPRO=0
0110 NPRO=0
0111 GO TO 109
0112199 L=L+1
0113 DIAM(L)=(DMINI+DMAXI)/2.
0114 NNI(L)=0
0115109 DMINI=DMAXI
0116 DMAXI=DMAXI+AI
0117 GO TO 108
0118110 SPRO=SPRO+DN(I)
0119 NPRO=NPRO+1
0120 NNS=NNS+NNIP(I)
0121120 CONTINUE
0122 L=L+1
0123 DIAM(L)=SPRO/NPRO
0124 NNI(L)=NNS
0125 NI=L
0126 NTN=0
0127 DO 139 I=1.NI
0128139 NTN=NTN+NNI(I)
0129141 WRITE(6.23)
0130 DO 142 I=1.NI
0131142 FR(I)=NNI(I) 100./NTN

```

```

0132   FRA=0.
0133   DO 145 I=1,N1
0134   FRA=FRA+FR(I)
0135   WRITE(6,24)NNI(I).DIAM(I).FR(I).FRA
0136145 CONTINUE
0137150 CONTINUE
0138   STOP
0139   END

```

DATOS INICIALES

```

NRO.TOT.DE NUCLEOS      = 2095   NRO.INICIAL DE INTERVALOS=    1
NRO.DE ALIMENTACIONES  =    5   ANCHO MAXIMO DEL INTERV. =0.010
NRO.MAXIMO DE INTERVALOS=   20   GMS.TOT.DE FINO      = 800.000
GRAMOS DE NUCLEOS      = .950000E-01

```

CANTIDAD DE GRAMOS POR ALIMENTACION

```

 1  174.00000          2  174.00000
 3  174.00000          4  174.00000
 5  104.00000

```

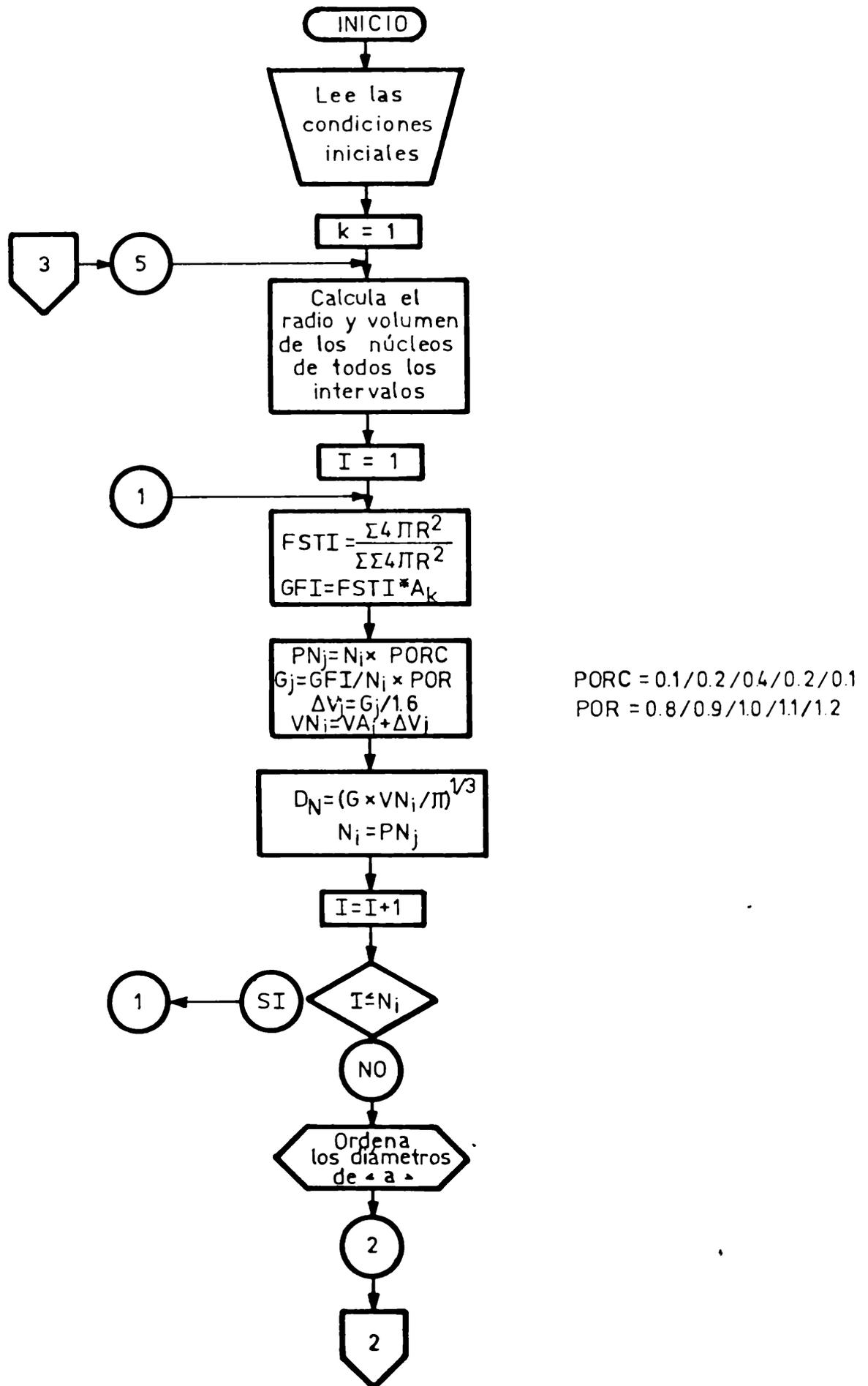
NUC/INT	DIAMETRO	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA REL.ACUM
2095	.37000000	100.00000	100.00000

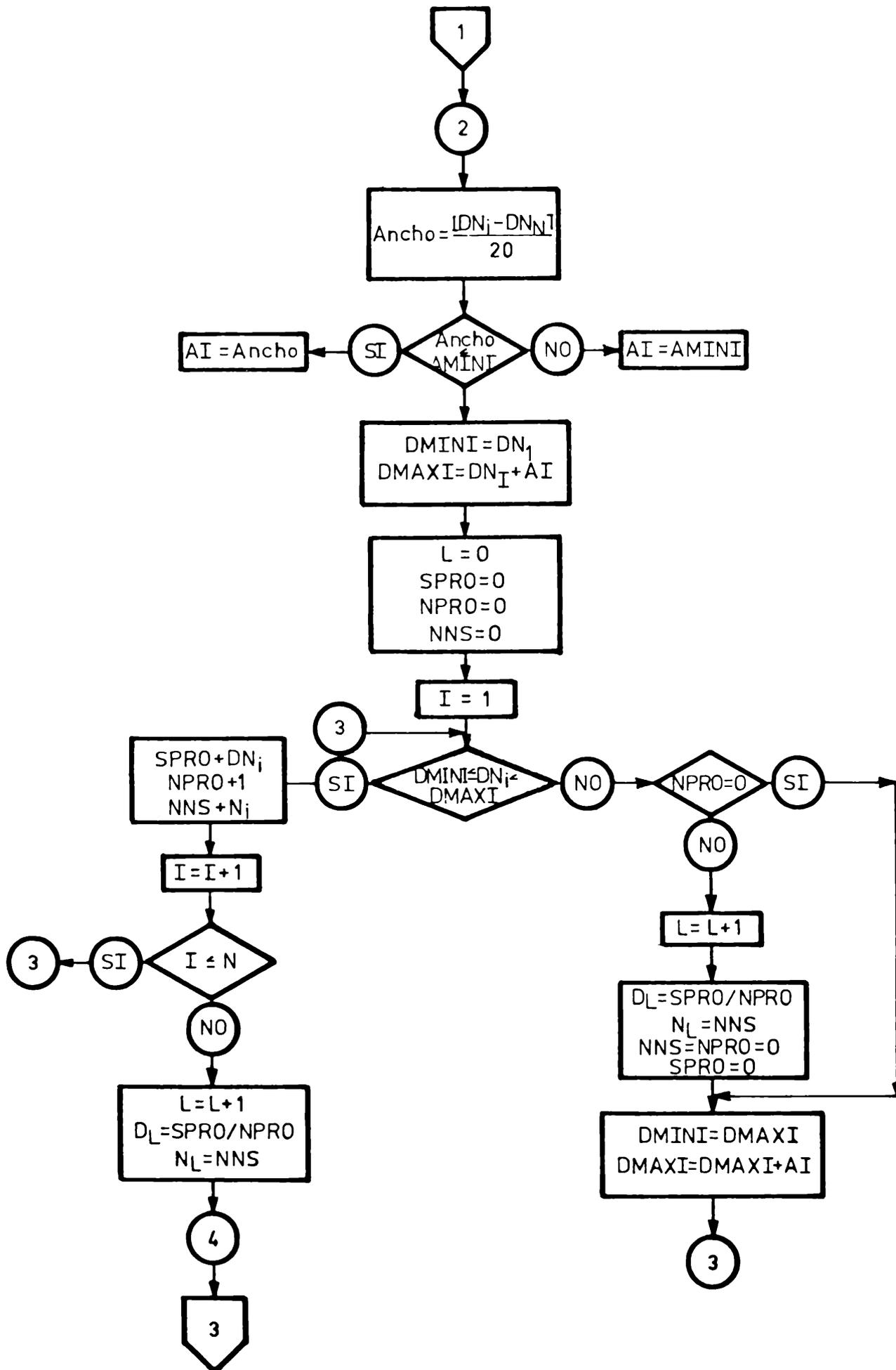
NUC/INT	DIAMETRO	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA REL.ACUM
210	.50653350	10.023866	10.023866
419	.51909906	20.000000	30.023865
838	.53108400	40.000000	70.023865
419	.54255110	20.000000	90.023865
210	.55355293	10.023866	100.04773

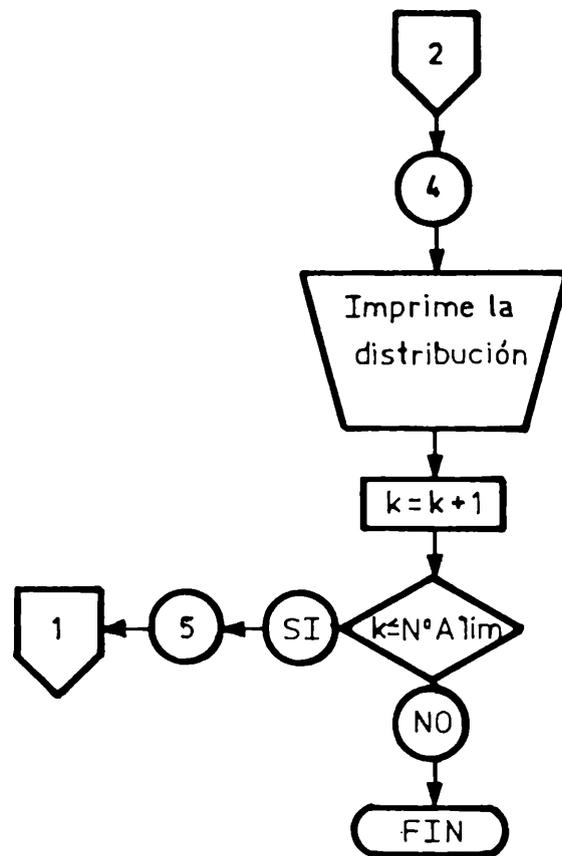
NUC/INT	DIAMETRO	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA REL.ACUM.
21	.58686310	1.0004759	1.0004759
0	.59299326	.0	1.0004759
42	.59546584	2.0009527	3.0014286
42	.59968382	2.0009527	5.0023813
84	.60382694	4.0019054	9.0042868
84	.60833830	4.0019054	13.006192
126	.61193275	6.0028582	19.009048
168	.61675370	8.0038109	27.012848
231	.62135983	11.005240	38.018082
84	.62494534	4.0019054	42.019974
335	.62907106	15.959980	57.979950
147	.63335001	7.0033340	64.983276

168	.63731420	8.0038109	72.987076
210	.64221144	10.004764	82.991837
84	.64534956	4.0019054	86.993729
168	.65063429	8.0038109	94.997528
0	.65429497	.0	94.997528
42	.65722126	2.0009527	96.998474
63	.66453362	3.0014286	99.999893
NUC/INT	DIAMETRO	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA REL.ACUM
2	.64714962	.95328867E-01	.95328867E-01
8	.65468657	.38131553	.47664440
20	.66110003	.95328879	1.4299326
20	.66608649	.95328879	2.3832207
55	.67041111	2.6215439	5.0047646
95	.67560112	4.5281219	9.5328865
94	.68118477	4.4804573	14.013344
176	.68632126	8.3889418	22.402283
166	.69172442	7.9122972	30.314575
265	.69729638	12.631077	42.945648
281	.70302325	13.393708	56.339355
216	.70798600	10.295519	66.634872
138	.71253145	6.5776930	73.212555
239	.71833688	11.391801	84.604355
140	.72473449	6.6730213	91.277374
38	.72810221	1.8112488	93.088623
72	.73223615	3.4318390	96.520462
50	.73866081	2.3832216	98.903671
23	.74777156	1.0962820	99.999939
NUC/INT	DIAMETRO	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA REL.ACUM
4	.70931673	.19029492	.19029492
14	.71587688	.66603231	.85632724
18	.72115231	.85632730	1.7126541
33	.72640610	1.5699329	3.2825871
74	.73248303	3.5204563	6.8030434
87	.73794496	4.1389151	10.941958
158	.74381953	7.5166502	18.458603
246	.75023824	11.703139	30.161728
279	.75687909	13.273073	43.434799
127	.76348734	6.0418644	49.476654
333	.76820785	15.842054	65.318695
188	.77452374	8.9438629	74.262558
178	.77957320	8.4681253	82.730682
133	.78445584	6.3273067	89.057983
86	.78971630	4.0913410	93.149323
63	.79563922	2.9971447	96.146454
43	.80091238	2.0456705	98.192123

17	.80531073	.80875355	99.000870
14	.81031084	.65603231	99.666901
7	.81773281	.33301616	99.999908
NUC/INT	DIAMETRO	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA REL.ACUM
8	.74280101	.37968671	.37968671
15	.74917817	.71191263	1.0915985
22	.75440538	1.0441380	2.1357365
44	.76000327	2.0882769	4.2240133
74	.76568007	3.5121021	7.7361155
107	.77144086	5.0783100	12.814425
178	.77746123	8.4480295	21.262451
142	.78256160	6.7394390	28.001877
255	.78781164	12.102515	40.104385
193	.79406661	9.1599426	49.264328
244	.79935193	11.580445	60.844772
169	.80432510	8.0208826	68.865646
233	.80960482	11.058376	79.924011
144	.81485844	6.8343611	86.758362
115	.82061273	5.4579964	92.216354
68	.82665765	3.2273369	95.443680
41	.83148646	1.9458942	97.389572
26	.83584380	1.2339811	98.623550
18	.84127522	.85429519	99.477844
11	.84826785	.52206928	99.999908







APENDICE IIITABLAS CORRESPONDIENTES AL PUNTO 5.2.

- III.1.: Cálculo de las densidades reales de pelets de gibbsita (corregidas por el aporte de núcleos) de distintos cortes granulométricos y desgastados hasta 6,80; 5,80 y 5,00 mm de diámetro .
- III.2.: Valores de porosidad total, corregidos por efecto del núcleo, para distintas fracciones granulométricas de pelets y para diferentes contenidos de agua alimentada.
- III.3.: Valores P_T , $P_{2/3}$ y P_C para 27,0 y 23,6% (p) agua alimentada.

Fracción granulométrica (mm)	R (mm)	R^3 (mm ³)	$V_T = \frac{4}{3} \pi R^3$ (mm ³)	$V_G = V_T - 26$ (mm ³)	$\rho_{\text{real corr}} = \frac{V_G}{V_T} + 3,06 \frac{V_N}{V_T}$ (g/cm ³)
+12,7	6,35	256	1072	1046	2,41
12,7 / 11,0	5,93	208	871	845	2,42
11,0 / 9,5	5,13	135	565	539	2,43
9,5 / 8,0	4,38	84	352	326	2,46
8,0 / 6,75	3,69	50	209	183	2,49
6,75 / 6,25	3,25	34	142	116	2,54
6,25 / 5,5	2,94	25	105	79	2,58
6,80	3,40	39	163	137	2,52
5,80	2,90	24	101	75	2,60
5,00	2,50	16	67	41	2,68

TABLA III.1.: Cálculo de las densidades reales de pelets de gibbsita (corregidas por el aporte de núcleos) de distintos cortes granulométricos y desgastados hasta 6,80; 5,80 y 5,00 mm de diámetro.

Fracción (mm) \ % (p) H ₂ O	27,0	25,9	24,7	23,6	22,4	20,7
+ 12,7				0,35	0,35	0,36
12,7 / 11,0			0,31	0,35	0,34	0,33
11,0 / 9,5		0,31	0,36	0,32	0,34	0,32
9,5 / 8,0	0,32	0,31	0,31	0,32	0,32	0,30
8,0 / 6,75	0,33	0,33	0,31	0,32	0,30	0,30
6,75 / 6,25			0,28	0,32	0,31	0,32
6,25 / 5,5				0,31		0,35

TABLA III.2.- Valores de porosidad total, corregidos por efecto del núcleo, para distintas fracciones granulométricas de pelets y para diferentes contenidos de agua alimentada.

%(p)H ₂ O	27,0		23,6		
Fracción (mm)	9,5/8,0	8,0/6,75	11,0/9,5	9,5/8,0	8,0/6,75
D original =2R(mm)	8,75	7,38	10,25	8,75	7,38
D gastado =2R _{2/3} (mm)	5,80	5,00	6,80	5,80	5,00
P _T corr	0,32	0,33	0,32	0,32	0,32
P _{2/3} corr	0,31	0,31	0,31	0,30	0,29
P _C	0,32	0,34	0,32	0,33	0,33
\bar{P}_T	0,32				
$\bar{P}_{2/3}$	0,30				
\bar{P}_C	0,33				

TABLA III.3.: Valores de P_T , $P_{2/3}$ y P_C para 27,0 %(p) y 23,6 %(p) de agua alimentada.

APENDICE IV

IV.1. CALCULO DE LA DENSIDAD REAL CORREGIDA DE PELETS DE GIBBSITA

Los pelets de gibbsita tienen núcleos de densidad $3,06 \text{ g/cm}^3$ y de granulometría comprendida entre $4,00$ y $3,36 \text{ mm}$ (tamices N°5 y 6 de la serie ASTM).

El volumen de un núcleo (V_N) con $3,68 \text{ mm}$ de diámetro promedio es:

$$V_N = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{3,68}{2} \right)^3 = 26 \text{ mm}^3$$

Para cada fracción granulométrica de pelets se calcula el volumen total (V_T) de acuerdo al radio del pelet promedio en esa fracción, siendo la parte del volumen total del pelet constituido por gibbsita (V_G), menor que el volumen total de una cantidad igual al volumen de núcleo:

$$V_G = V_T - V_N$$

La densidad real corregida será la suma del aporte de la densidad de gibbsita ($2,40 \text{ g/cm}^3$) proporcional a la fracción volumétrica que le corresponde respecto del total (V_G/V_T) y del aporte de la densidad del núcleo ($3,06 \text{ g/cm}^3$) proporcional a su fracción volumétrica (V_N/V_T). Calculamos la densidad real corregida de pelets con diámetros pertenecientes a la fracción comprendida entre $11,0$ y $9,5 \text{ mm}$.

El radio promedio de pelet de esta fracción es $5,13 \text{ mm}$ (promedio aritmético entre los valores límites de la fracción).

$$V_T = \frac{4}{3} \pi 135 \text{ mm}^3 = 565 \text{ mm}^3$$

$$V_G = V_T - 26 = (565 - 26) \text{ mm}^3 = 539 \text{ mm}^3$$

La densidad real corregida ($\delta_{\text{real corr.}}$) de los pelets de esta fracción será mayor que aquella de pelets con núcleos de gibbsita:

$$\delta_{\text{real corr}} = 2,40 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \frac{539}{565} + 3,06 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \frac{26}{565} = 2,43 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Para fracciones granulométricas de pelets con diámetro grande, como la utilizada para el cálculo, el aporte relativo del núcleo es muy pequeño y por lo tanto la densidad real corregida resulta muy cercana a la densidad real de gibbsita. No ocurre lo mismo para los pelets pequeños, donde el aporte del núcleo es muy importante. Por ejemplo para la fracción de pelets con diámetros entre 6,25 y 5,5 mm, la densidad real corregida resulta igual a 2,58 g/cm³.

En el Apéndice III, Tabla III.1. se dan los valores calculados de la densidad real corregida de todas las fracciones analizadas.

IV.2. DATOS EXPERIMENTALES

Se tienen los datos del peso del porosímetro vacío, del porosímetro totalmente lleno con mercurio, del porosímetro lleno parcialmente por pelets y del porosímetro con pelets más mercurio. Para ejemplificar la secuencia de cálculo (TABLA IV.1) tomamos la misma fracción elegida para el cálculo de densidad real corregida (pelets con diámetros comprendidos entre 11,0 y 9,5 mm) y con 23,6% (p)agua.

A la porosidad total obtenida de esta manera, hay que hacerle una nueva corrección debido a que el núcleo es de porosidad nula, y así la porosidad corregida (P_T corr.) será mayor que la calculada (P_T calc) debido a que en el cálculo se consideró que todo el volumen del pelet era de igual porosidad.

$$P_T \text{ corr} = P_T \text{ calc} \frac{V_T}{V_G}$$

Muestra: pelets con diámetros entre 11,0 y 9,5 mm con 23,6 % (p)H ₂ O de alimentación.		
1) Densidad real de la muestra	g/cm ³	2,43
2) Peso porosímetro vacío	g	95,5
3) Peso porosímetro + Hg	g	1759,4
4) Peso porosímetro + pelets	g	193,4
5) Peso porosímetro + pelets + Hg	g	1063,2
6) Densidad del Hg a T °C = 19°C	g/cm ³	13,5483
7) Volumen porosímetro: (3-2)/6	cm ³	122,8
8) Volumen aparente: 7-(5-4)/6	cm ³	58,6
9) Peso de la muestra ensayada: 4-2	g	97,9
10) Volumen real: 9/1	cm ³	40,3
11) Densidad aparente: 9/8	g/cm ³	1,67
12) Volumen de poros: 8-10	cm ³	18,3
13) Porosidad total calculada: 12/8		0,31
14) Porosidad total corregida: 13 $\frac{565}{539}$		0,32

TABLA IV.1.- Cálculo de la porosidad corregida de pelets de gibbsita.

IV.3. CALCULO DE LA POROSIDAD DE LA CAPA EXTERNA DE LOS PELETS

La porosidad de la capa externa de los pelets (P_C) se calcula a partir de las porosidades totales corregidas (P_{Tcorr}) y de las porosidades corregidas de pelets gastados hasta diámetros equivalentes a los dos tercios del diámetro inicial ($P_{2/3 corr}$), calculadas ambas según el método descrito en IV.1. y IV.2.

$$P_C = \frac{P_T \text{ corr } V_T - P_{2/3} \text{ corr } V_{2/3}}{V_T - V_{2/3}}$$

Para los pelets con diámetros entre 11,0 y 9,5 mm y gastados hasta diámetros de 6,8 mm, con 23,6% de agua se tienen los siguientes valores:

$$P_T \text{ corr} = 0,32$$

$$P_{2/3} \text{ corr} = 0,31$$

$$V_T = 565 \text{ mm}^3$$

$$V_{2/3} = 163 \text{ mm}^3$$

con lo cual resulta $P_C = 0,32$

IV.4. CALCULO DE LOS VALORES DEL RADIO DE PELET ADIMENSIONAL

Se define un radio adimensional $r^* = r/R$ donde R es el radio del pelet y r es la distancia variable, medida desde el borde del pelet hacia el centro.

Se desean calcular los radios adimensionales que corresponden a las distancias a los puntos medios de porosidad total, porosidad de un pelet de volumen igual a las dos terceras partes del volumen total y porosidad de la capa externa. Estas distancias deben ser tales que, a partir de ese punto, hacia el centro y hacia el borde del pelet queden volúmenes iguales.

Para el cálculo, se consideran los pelets pertenecientes a la fracción entre 11,0 y 9,5 mm.

Para la porosidad total:

$$V_G = 539 = \frac{4}{3} \pi (R^3 - R_N^3)$$

$$\frac{V_G}{2} = \frac{4}{3} \pi (R'^3 - R_N^3) \quad \text{donde } R' = R - r$$

$$R' = \sqrt[3]{\frac{270 \times 3}{4\pi} + \left(\frac{3,68}{2}\right)^3} = 4,14 \text{ mm}$$

$$r = R - R' = 5,13 - 4,14 = 0,99 \text{ mm}$$

$$r^* = \frac{r}{R} = \frac{0,99}{5,13} = 0,19$$

Para la porosidad de pelets gastados ($P_{2/3}$) con volumen igual a las dos terceras partes del volumen sin gastar:

$$V_G = 137 = \frac{4}{3} \pi (R^3 - R_N^3)$$

$$\frac{V_G}{2} = 69 = \frac{4}{3} \pi (R'^3 - R_N^3)$$

$$R' = \sqrt[3]{\frac{69 \times 3}{4\pi} + \left(\frac{3,68}{2}\right)^3} = 2,83 \text{ mm}$$

$$r = R - R' = 5,13 - 2,83 = 2,30 \text{ mm}$$

$$r^* = \frac{r}{R} = \frac{2,30}{5,13} = 0,45$$

Para la porosidad de la capa externa (P_C):

$$V_G \text{ capa} = 539 - 137 = 402 \text{ mm}^3$$

$$V_G = 539 = \frac{4}{3} \pi (R^3 - R_N^3)$$

$$539 - \frac{402}{2} = 338 = \frac{4}{3} \pi (R'^3 - R_N^3)$$

$$R' = \sqrt[3]{\frac{338 \times 3}{4\pi} + \left(\frac{3,68}{2}\right)^3} = 4,43 \text{ mm}$$

$$r = R - R' = 5,13 - 4,43 = 0,70 \text{ mm}$$

$$r^* = \frac{r}{R} = \frac{0,70}{5,13} = 0,14$$

En todos los casos:

R_N = radio del núcleo, mm

R = radio del pelet, mm

r = distancia desde el borde hasta el punto considerado, mm.

R' = distancia desde dicho punto al centro del pelet, = $R-r$, mm.

r^* = radio adimensional = r/R