

Una vez que se dispone de todos los valores de la resistencia másica de la torta r_m correspondiente a las presiones de experimentación, se grafica $r_m = f(P)$ según muestra la Figura 3.

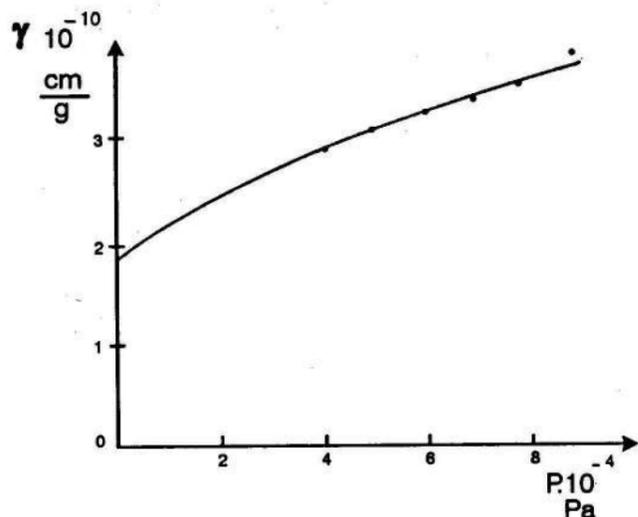


FIGURA 3. Comportamiento de la resistencia másica de la torta r_m en función de la presión.

A partir de la Figura 3 se obtiene el valor de $r_{m,1} = 1,9 \cdot 10^{10}$ cm/g como el intercepto de la curva con el eje de las ordenadas. Posteriormente se completa la Tabla 2.

TABLA 2. Resultados parciales para obtener la dependencia empírica $r_m = f(P)$

$P \cdot 10^{-4}$ (Pa)	Ln (P)	Ln (r_m)	Ln ($r_m - r_{m,1}$)
4,90	10,80	24,18	23,26
5,89	10,98	24,23	23,39
6,87	11,14	24,26	23,45
7,85	11,27	24,31	23,57
8,83	11,39	24,39	23,72

Una vez realizado el análisis de regresión a los valores de $\ln(r_m - r_{m,1})$ vs $\ln(P)$ y $\ln(r_m)$ vs P, quedan ajustadas las rectas (8a) y (9a) como sigue:

$$\ln(r_m - r_{m,1}) = 15,16 + 0,748 \ln(P)$$

y

$$\ln(r_m) = 23,91 + 5,15 \cdot 10^{-6} \cdot P$$

En la Tabla 3 aparecen los resultados de regresión de acuerdo con las ecuaciones (8a) y (9a).

TABLA 3. Resultados del análisis de regresión

	Ecuación (8a)	Ecuación (9a)
Coefficiente de correlación múltiple	0,981	0,987
Coefficiente de determinación R^2	0,963	0,974
R^2 ajustado	0,951	0,965
Error típico	0,039	0,015
F	78	112
$F_{crítico}$	0,003	0,0018

De la Tabla se deduce que el mejor ajuste corresponde a la ecuación (9a), luego en la ecuación (9):

$$r_{m,2} = e^{23,91} = 2,42 \cdot 10^{10} \text{ cm/g}$$

$$S_2 = 5,15 \cdot 10^{-6}$$

Por lo que queda definitivamente:

$$r_m = 2,42 \cdot 10^{10} \cdot e^{5,15 \cdot 10^{-6} \cdot P}$$

donde [P] = Pa ; [r_m] en cm/g .

CONCLUSIONES

Al someter a filtración la suspensión acuosa formada por la clase (-0,045) mm del mineral que se suministra a la empresa Moa Nickel S.A. «Pedro Soto Alba» con una concentración de 35 %, el medio filtrante tela Belting parcialmente obstruida, la temperatura alrededor de 30 °C y el intervalo de presión de 0,5 - 0,9 at se obtuvo como resultado que el proceso ocurre de acuerdo al mecanismo de filtración «con formación de torta».

De las ecuaciones empíricas estudiadas que describen el comportamiento de la resistencia específica de la torta en función de la presión, la que mejor se ajusta a los datos experimentales tiene la forma:

$$r_m = 2,42 \cdot 10^{10} \cdot e^{5,15 \cdot 10^{-6} \cdot P}$$

donde [P] = Pa ; [r_m] en cm/g .

BIBLIOGRAFÍA

GÓMEZ, A. y G.J. GONZÁLEZ: *Desagüe de suspensiones lateríticas. Mecanismo de filtración y compresibilidad*, Informe de investigación, CICT-ISMM, Moa, 1995.

HERNÁNDEZ, A.: *Propuestas tecnológicas para la preparación del mineral alimentado a la empresa Cmde. «Pedro Soto Alba»*, Informe de investigación, CICT-ISMM, Moa, 1994.

MALINOVSKAIA, T.A.: *Rasdelenie suspensii v jimicheskoi promishlennosti*, 246 pp., Jimia, Moskva, 1983.

PAVLOV, K.F.: *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*, 612 pp., Jimia, Moscú, 1976.

Obtención y caracterización de una termita base para soldar aceros

Lic. Elizabeth Rodríguez González
Lic. Lorenzo Perdomo González
Dr. Rafael Quintana Puchol

Centro de Investigaciones de Soldadura

RESUMEN: Se analiza la posibilidad de obtención de una termita base a partir de materias primas cubanas y se realiza la caracterización de la misma para ser utilizada en la soldadura de aceros de bajo contenido de carbono. Como materia prima se utiliza cascarilla proveniente del proceso de laminado de las cabillas de Antillana de Acero y chatarra de aluminio de la EINPUD «Primero de Mayo». Se realiza un tratamiento previo a la materia prima y se logran las condiciones de reacción óptimas mediante un experimento factorial 2^k. La evaluación de los resultados se realiza mediante un análisis espectral de emisión semicuantitativo visual de los elementos de interés (Al, Mo, Si, Mn, Cr y Ni), análisis gravimétrico de Si y análisis gasovolumétrico de C y S.

ABSTRACT: An analysis of the obtention and characterization of a base thermite was carried out expecting its further utilization for welding low-carbon steels using cuban raw materials: wastes from sheeting of belayin-pins and aluminium dross. A previous treatment is undertaken by these raw material and the reaction conditions are optimized through a 2^k factorial experiment. The results were evaluated by means of spectral analysis of semi-quantitative emission of the elements: Al, Mo, Si, Mn, Cr, and Ni, gravimetric analysis of Si and gasovolumetric analysis of C and S.

El procedimiento de soldadura por termita es un proceso de unión de metales basado en la reacción termoquímica de carácter exotérmico que se produce frecuentemente entre un óxido metálico y un elemento reductor, que generalmente es el aluminio. Este tipo de reacción es aplicada en la obtención de metales puros como el cromo y el vanadio en procesos de metalurgia extractiva. Fue el propio Goldschmidt, al comprobar la gran cantidad de energía que se liberaba en la reacción exotérmica, quien propuso su aplicación en la soldadura.

Este procedimiento de soldadura comenzó su desarrollo a inicios del presente siglo, mostrándose como un método ideal para la unión de secciones metálicas con espesor que supera los 100 mm. Su aplicación más frecuente ha sido sustituir uniones mecánicas por las uniones soldadas en el tendido y acondicionamiento de las vías de sistemas de transporte público y de mercancías que utilizan carriles como medio de dirección y apoyo (O'Brien, 1992). Es utilizada tanto en las uniones acero-acero, como en las acero-cobre y cobre-cobre, desarrolladas más recientemente y aplicadas en sistemas de conducción eléctrica.

Las formulaciones de termitas varían en dependencia del mineral que se utilice para ella, y por ende, al variar este varían las propiedades de la termita. De acuerdo con esto se valoraron alternativas de formulaciones de termitas mediante la aplicación de diseño de experimento 2^k y se caracterizaron químicamente los depósitos obtenidos (Lorenzo, 1994; López, 1988).

Las reacciones aluminotérmicas representativas en nuestro caso son:



Es de gran importancia destacar que la relación óxido metálico:aluminio en esta reacción estequiométrica es de tres partes de óxido de hierro por una parte de aluminio. Sin embargo, se utilizó la cascarilla que tiene un contenido de hierro superior al del óxido de hierro comercial, y la reacción ocurre completamente, esto se debe a que la energía desprendida en la reacción exotérmica es capaz de fundir todo el hierro en la mezcla.

Parte experimental

Se realizaron 10 experimentos para comprobar la posibilidad de formular una termita base con materias primas cubanas (cascarilla y aluminio en virutas). Para ello se preparó una mezcla de tres partes en peso de cascarilla y una parte en peso de virutas de aluminio para cada muestra.

Al tener en cuenta que las materias primas cubanas no reunían las condiciones óptimas para lograr un desarrollo satisfactorio de la reacción aluminotérmica, se realizó

un tratamiento previo a las mismas para lograr su total acondicionamiento, el cual consistió en:

1. Tamizar la cascarilla y tomar la clase granulométrica que represente el mayor contenido de hierro (1 - 0,5 mm).
2. Colocar la cascarilla en la estufa durante dos horas aproximadamente y a una temperatura de 130 °C, logrando de esta forma un secado completo de la misma.
3. Las virutas de aluminio se lavan previamente con hidróxido de sodio diluido, aproximadamente durante 15 minutos para eliminar la grasa.
4. Las virutas de aluminio lavadas se colocan en la estufa durante dos horas, a una temperatura de 100 °C. Luego se trituran y tamizan hasta lograr un tamaño de grano menor de un milímetro.
5. Se pesan las cantidades estequiométricas de aluminio y cascarilla para la formulación de la termita base.

Se realizó un diseño de experimento (factorial 2^k) que permitió obtener, a partir de esta termita, el depósito metálico óptimo en cuanto a composición química, aspecto externo, forma en que ocurre la reacción y rendimiento.

Las variables independientes incluidas en el diseño fueron: la granulometría de la cascarilla, la compactibilidad de la mezcla y la relación másica aluminio-cascarilla. En total se realizaron 16 ensayos (uno en cada punto del diseño y su réplica), evaluando en los mismos los aspectos antes mencionados.

El diseño se realizó a partir de una masa constante de termita de 90 g para todos los experimentos, variando sólo la relación másica entre el aluminio y la cascarilla (Tabla 1).

TABLA 1. Esquema del diseño de experimento

Exp.	X ₁	X ₂	X ₃
1	0,9	5	1:3
2	0,65	5	1:3
3	0,9	3	1:3
4	0,65	3	1:3
5	0,9	5	1:2
6	0,65	5	1:2
7	0,9	3	1:2
8	0,65	3	1:2

Donde:

- X₁: Granulometría de la cascarilla;
 X₂: Compactibilidad de la mezcla: 5 máxima compactibilidad y 3 no se compacta;
 X₃: Relación másica aluminio-cascarilla.

Debemos señalar que en los 16 ensayos la reacción fue rápida, aunque en aquellos donde no se compacta la mezcla, es mucho más espontánea y se obser-

van proyecciones de partículas hacia la abertura superior del reactor. Por otro lado, el aspecto externo del metal es muy similar en todos los ensayos; sin embargo, se observa una menor presencia de poros en los depósitos de los cuatro primeros puntos.

A los depósitos metálicos obtenidos se les realizó un análisis espectral semicuantitativo empleándose patrones certificados (Tabla 2).

TABLA 2. Resultados del análisis espectral semicuantitativo

Experimento	Contenido de los elementos (%)					
	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	Al
1	≅ 0,70	> 0,44	≅ 0,08	< 1	> 1	+++
2	≅ 0,70	≅ 0,44	≅ 0,08	≤ 1	> 1	+
3	≅ 0,70	≅ 0,44	≅ 0,08	≅ 0,38	> 1	++
4	≅ 0,70	≅ 0,44	≅ 0,08	> 0,38<1	> 1	++
5	< 0,70	≅ 0,44	<< 0,08	> 1	>> 1	++++
6	< 0,70	≅ 0,44	<< 0,08	> 1	>> 1	++++
7	< 0,70	≅ 0,44	<< 0,08	> 1	>> 1	++++
8	< 0,70	≅ 0,44	<< 0,08	> 1	>> 1	++++

Es necesario señalar que el contenido de aluminio en las muestras no se observa en valores numéricos, ya que en los patrones certificados utilizados en el análisis no se reporta la composición química de este elemento.

El silicio se encuentra presente en el depósito en un rango de concentración apreciable. Teniendo en cuenta las propiedades que le confiere al depósito obtenido, se hizo un análisis químico de este elemento por vía húmeda, utilizando la técnica gravimétrica según la norma cubana NC 04-56 1983 (Tabla 3).

TABLA 3. Resultados de la determinación de silicio

Experimento	Contenido de silicio (%)
5	1,88
6	1,81
7	1,73
8	1,73

El contenido de carbono y de azufre se determinó por el método gasovolumétrico, según las normas NC 04-20 1979 y NC 04-74 1985 (Tabla 4).

TABLA 4. Resultados de la determinación de carbono y azufre

Experimento	Carbono (%)	Azufre (%)
1	0,28	0,034
2	0,22	0,022
3	0,24	0,034
4	0,24	0,030

Se realizó un análisis estadístico al emplear el método de Statgraph, se tomó a X₁, X₂ y X₃ como variables independientes y Y (rendimiento de la reacción aluminotérmica) como variable dependiente.

Análisis de los resultados

En los resultados del análisis espectral semicuantitativo se hace notar la diferencia que existe en el contenido de aluminio (ver Tabla 2). Para la relación másica 1:3 la variación del contenido de dicho elemento presenta, supuestamente, una influencia más marcada en los parámetros granulometría y compactibilidad que en cualquier otro parámetro en el transcurso de la reacción. Cuando la relación másica de la mezcla es 1:2, no se observa diferencia en cuanto al contenido de aluminio en el depósito, es decir, los parámetros granulometría y compactibilidad no son influyentes sobre el porcentaje de este elemento en el metal. Esto está en correspondencia con la cantidad que se tomó del mismo para que ocurriera la reacción de acuerdo con la relación másica aluminio:cascarilla, siendo los cuatro últimos los que presentan un mayor contenido de aluminio en comparación con los cuatro primeros.

El contenido de silicio es mayor en los cuatro últimos depósitos, debido a que este elemento está asociado al aluminio y al aumentar la relación másica de aluminio en la termita, aumenta el contenido de silicio en el depósito. El contenido de este elemento en cada relación másica empleada se mantiene constante, debido a que su papel reductor está subordinado a las funciones reductoras del aluminio, porque la cantidad de silicio en la mezcla es mucho menor que la de aluminio; además, la energía libre de formación de óxido de aluminio es mayor, modularmente, que la del óxido de silicio.

El contenido de cromo en los depósitos es constante y aproximadamente igual a 0,44 %, ya que el cromo forma carburos y los mismos son altamente solubles en la aleación obtenida.

El comportamiento del manganeso es similar al del silicio y el aluminio, porque a pesar de que en la relación másica 1:2 la cantidad de cascarilla es menor, también hay presencia de manganeso en la chatarra de aluminio, lo que hace que se incremente el contenido de este en los cuatro últimos experimentos. La solubilidad del óxido de manganeso en los aluminatos es mucho mayor que la del óxido de cromo, y es por ello que la composición del metal es más rica en manganeso que en cromo. Esto se atribuye a que el manganeso se oxida mucho más fácil que el resto de los elementos, forma carburos de alta solubilidad en el depósito, y a que la solubilidad del carburo en el metal es mayor que la del óxido en la escoria en la relación 1:3, y para la relación 1:2 hay cierta compensación entre las solubilidades del óxido y el carburo.

Las variaciones del contenido de molibdeno y níquel en las relaciones másicas 1:3 y 1:2 se deben, fundamentalmente, a la solubilidad, que es mayor en la escoria que en el depósito. Esto está avalado por la presencia de

cantidades apreciables de molibdeno y níquel en la escoria, teniendo en cuenta que la materia prima aluminica no presenta níquel ni molibdeno.

El análisis de carbono y azufre se le realizó a los cuatro primeros puntos del diseño, ya que consideramos que son los de composición química más representativa para la soldadura. Al observar el contenido de carbono que se reporta en la Tabla 4, podemos decir que este elemento está presente en el metal, debido, fundamentalmente, a que el reactor utilizado en la reacción aluminotérmica es de grafito y además, la cascarilla es portadora de este elemento, lo que permite que el carbono se difunda hacia el depósito para formar carburos con el cromo y el manganeso presentes en el metal.

El contenido de azufre en las muestras está en correspondencia con lo reportado para este elemento como impureza permanente en los aceros.

La presencia de poros en la muestra está relacionada con la deficiente separación que existe entre el metal y la escoria al no utilizar fundentes, y por otro lado, es posible que la velocidad de la reacción sea muy rápida. Estos dos factores le proporcionan al depósito un aspecto externo algo deformado.

Al hacer un análisis de la ecuación del modelo que expresa la relación existente entre las variables independientes y sus interacciones con la variable de salida tenemos:

$$\text{Rend} = 44,37 - 1,02 \text{ Granul.} + 0,076 \text{ Comp.} + 5,21 \text{ Rel} - 0,13 \text{ Granul Comp} + 0,76 \text{ Granul. Rel.} + 0,49 \text{ Granul. Comp. Rel.}$$

donde se puede ver que las tres variables que más influyen sobre el rendimiento del proceso aluminotérmico en orden decreciente son: la relación másica aluminio-cascarilla, la granulometría de la cascarilla y las interacciones entre la granulometría y la relación aluminio-cascarilla. Con estos resultados experimentales, en cuanto al rendimiento de la reacción, nos damos cuenta, que la relación másica aluminio-cascarilla es el factor que más influye sobre los resultados obtenidos. La granulometría tiene un efecto negativo sobre el rendimiento y las interacciones de la granulometría con la relación másica de la mezcla provocan un efecto positivo sobre el mismo, aunque mucho menos acentuado que el efecto que tiene la relación másica aluminio-cascarilla.

Podemos decir además, que el efecto que produce la compactibilidad en los rangos estudiados sobre el rendimiento es muy pequeño, aunque ejerce un efecto sustancial sobre la forma en que ocurre la reacción. Debemos señalar que el análisis de la compactibilidad de la mezcla fue cualitativo, lo que nos limita para emitir un criterio más concluyente acerca de la influencia de esta sobre el comportamiento de la reacción.

CONCLUSIONES

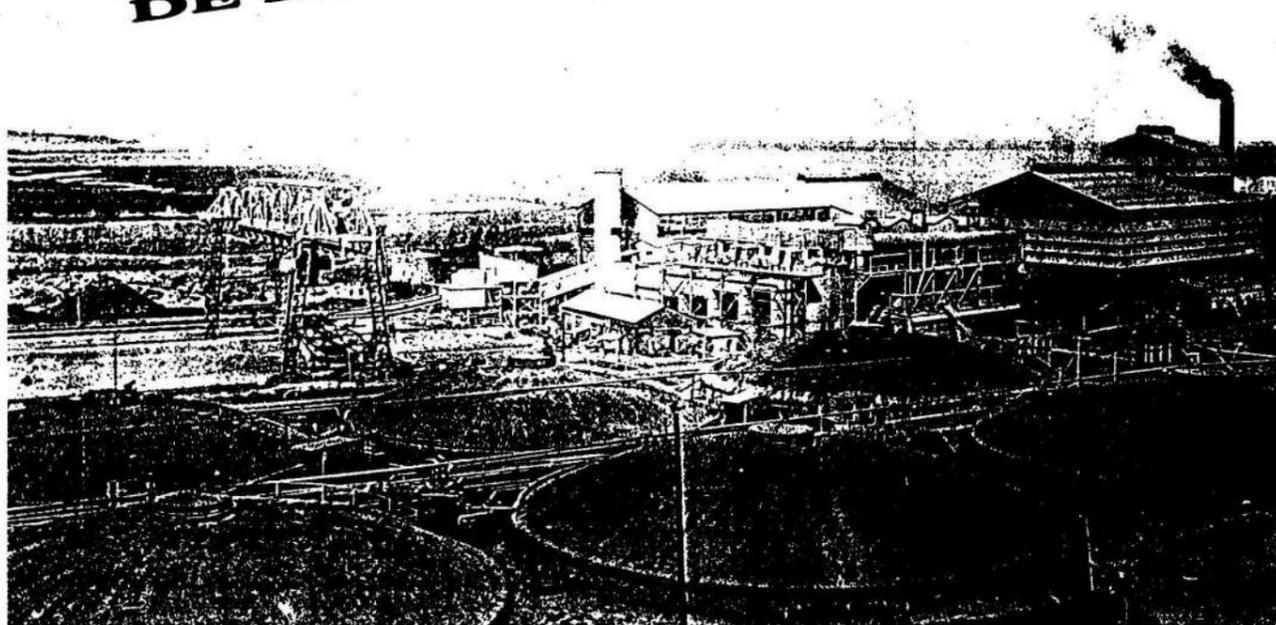
1. Las materias primas empleadas presentan perspectivas en la formulación de termitas.

- Los resultados de la caracterización química de los depósitos de las uniones soldadas por termita, aseguran un posible campo de aplicación en la soldadura de aceros.
- Al optimizar el diseño de experimentos, la ecuación de regresión obtenida, demuestra que la variable que más influye sobre el desarrollo de la reacción aluminotérmica es la relación másica aluminio:cascarilla.
- Al analizar los resultados del diseño de experimento podemos decir que el segundo es el que presenta las mejores características para ser utilizado en la soldadura de aceros con un tamaño de granos de la cascarilla de 0,65 mm máxima compactibilidad y relación másica aluminio-cascarilla 1:3.
- Según la valoración económica, la obtención de un kilogramo de metal depositado tiene un costo bajo, lo que demuestra la factibilidad de la utilización de estas materias primas en la formulación de termitas para la soldadura.

BIBLIOGRAFÍA

- GARCÍA ZAYAS, JESÚS: *Metalurgia y Electricidad*, no. 612, pp. 92-99, junio, 1989.
- : *Metalurgia y Electricidad*, no. 624, pp. 133-141, julio-agosto, 1990.
- O'BRIEN, R.L.: *Welding Handbook*, vol. 2, Ed. Miami American Welding Society, 1992.
- LORENZO PÉREZ, CELIA ROSA: *Alternativas de obtención de termitas para soldar aceros al carbono*, Trabajo de Diploma, 1994.
- LÓPEZ PLANES, REINALDO: *Diseño estadístico de experimentos*, pp. 203, Ed. Científico-Técnica, 1988.
- Análisis espectral cualitativo y semicuantitativo visual de muestras metálicas. Procedimiento analítico del Centro de Investigaciones de Soldadura*, Villa Clara.
- NC 04-56 1983: *Determinación gravimétrica de silicio*.
- NC 04-20 1979: *Determinación del contenido de carbono por el método gasovolumétrico en hierro fundido y aceros*.
- NC 04-74 1985: *Determinación del contenido de azufre por el método gasovolumétrico en hierro fundido y aceros*.

APROVECHAMIENTO DE RECURSOS MINERALES



Metodología integral para evaluar la efectividad de utilización del volumen de trabajo del equipamiento bioquímico, químico e hidrometalúrgico

Dr. Ing. José I. Rodríguez Domínguez
 Lic. Javier Barriel Creagh
 Lic. Oris Silva Dieguez
 Lic. Alfonso Fuentes Martín
 Dr. Académico I.N. Beloglasov*

Instituto Superior Minero Metalúrgico
 * Instituto de Minas de San Petersburgo, Universidad técnica,
 San Petersburgo, Rusia

RESUMEN: Debido a la gran importancia que reviste la utilización eficiente del volumen útil de trabajo de los agregados hidrometalúrgicos de acción continua, se propone una metodología que permita determinar con gran facilidad los índices de efectividad de trabajo de los reactores. Los valores de estos índices reflejan los diferentes aspectos operacionales del equipamiento hidrometalúrgico, permitiendo su utilización en la práctica del cómputo ingenieril asociado con la estimación de la eficiencia de utilización de estos equipos.

ABSTRACT: In connection with the special importance of the problem of estimating the utilization efficiency of the working volume of continuous action hydrometallurgical apparatus, methods for determining the values of the indexes are proposed. The system of indexes reflects the different aspects of operation of continuous action hydrometallurgical equipment, in consequence of which they can be widely used in the practice of engineering calculations, associated with the estimation of efficiency of utilization of technological facilities of different type.

Para elevar los indicadores técnico-económicos del equipamiento bioquímico, químico e hidrometalúrgico, es necesario periódicamente evaluar el estado técnico de funcionamiento de los mismos, no sólo para medir el nivel de productividad, sino además para lograr el perfeccionamiento ulterior de estos agregados.

El sistema de indicadores que se utilice para medir la efectividad de trabajo del equipamiento debe reflejar el conjunto de fenómenos que tienen lugar en el equipo investigado.

La efectividad de trabajo del equipamiento bioquímico, químico e hidrometalúrgico con régimen periódico, semicontinuo o continuo donde es necesario lograr el grado exigido de conversión de los componentes deseados a la salida del reactor investigado; en la gran mayoría de los casos depende sólo del tiempo de retención de interacción de las fases reaccionantes bajo condiciones pre-establecidas de realización del proceso en el volumen útil de trabajo del reactor. Consecuentemente para alcanzar los parámetros óptimos de funcionamiento del equipo es imprescindible lograr que la magnitud de la función de distribución del tiempo de retención de las partículas en el mismo y la magnitud de la función cinética (o grado de transformación de los componentes objetivos) en el intervalo de tiempo $\Delta\tau$, adquieran valores máximos bajo la condición de que la magnitud del mismo intervalo tienda al mínimo. [6]

Este efecto en la práctica usualmente se logra de diferentes formas:

Por ejemplo, para disminuir la no homogeneidad del tiempo de retención de las partículas, se aumenta el número de peldaños en la cascada de reactores hidrometalúrgicos; se incrementa la altura de la capa hirviente con el mezclado del flujo con los agentes gaseosos; se utiliza también la recirculación del flujo de salida, etcétera. Con el objetivo de disminuir la prolongación de las curvas cinéticas es necesaria la intensificación de este proceso a través de la correcta elección de los valores óptimos de temperatura, concentración, pH de la disolución, etcétera. [4] Es importante señalar que independientemente de que se optimice o no el régimen hidrodinámico, o el proceso cinético, en cada uno de los casos considerados, existe una tendencia a alcanzar los valores máximos en los cambios de la función de distribución del tiempo de retención de las partículas en el equipo, o en la función cinética en un intervalo mínimo $\Delta\tau = \tau_R - \tau_r$. De lo expuesto anteriormente se infiere que para cualquier intervalo (Δt) podemos plantear:

- Para la función de distribución del tiempo de retención de las partículas en la instalación (equipo o cascada)

$$\beta F = F(\tau_r) - F(\tau_r) = F(\tau_r) - F(\tau_r) \quad (1)$$

donde: β_F es el coeficiente de utilización del volumen de trabajo del equipo.