DISEÑO DE UN MOLINO DE BOLAS TIPO ATRITOR

F. Botero[1], J. Renteria[1,], J. G. Torres[1, 2] H. E. Jaramillo [1, 3], N. A. de Sánchez [1, 4,5,] H. Sánchez Sthepa [6]

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (4): 1425-1431

DISEÑO DE UN MOLINO DE BOLAS TIPO ATRITOR

F. Botero[1], J. Renteria[1,], J. G. Torres[1, 2] H. E. Jaramillo [1, 3], N. A. de Sánchez [1, 4,5,] H. Sánchez Sthepa [6]

1: Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales GCIM,
2: Joven Investigador Colciencias - UAO,
3: Departamento de Energética y Mecánica, Universidad Autónoma de Occidente, Cali Colombia.
4: Departamento de Ciencias Básicas de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente, Cali Colombia.
5: Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Colombia
6: Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Cali Colombia

** E-mail: hjsuarez@uao.edu.co*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008
Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

Este trabajo presenta el proceso de diseño de un molino de bolas tipo atritor para la producción de materiales compuestos mediante la técnica de aleación mecánica. Para iniciar los cálculos de diseño se asumieron algunas especificaciones como la capacidad del tazón de 2 l, la velocidad de rotación del impulsor 500 r.p.m. se realizó el diseño detallado del tazón contenedor, el impulsor, la cámara de refrigeración, la base de soporte del sistema. En el desarrollo de las fases del diseño se aplicaron herramientas computacionales; en el modelado paramétrico de todos los componentes se utilizó Solid Edge versión 14, para el análisis cinemático se utilizó Dynamic Designer y en el análisis estructural el software basado en la teoría de elementos finitos Algor. La importancia de este proyecto radicó en el diseño de un molino de bolas para la producción de aleaciones mecánicas con tecnología y diseño propio, y, con bajos costos de presupuesto para su construcción en comparación con las alternativas de molinos importados. Este molino también permitirá el desarrollo y la investigación en materiales compuestos en la Universidad y la región.

PALABRAS CLAVES: *Aleación mecánica, molinos de bolas Atritor, materiales compuestos, elementos finitos.*

Abstract

This paper reports the design process of a ball mill Atritor type, for the production of composite materials using the mechanical alloy technique. Design specifications as the bowl capacity; 2 liters and impeller rotational speed 500 rpm were selected. The bowl, the impeller, cooling chamber and system support base were detaily designed. Computational tools as Solid Edge were using in parametric modeling of all components; the finite element software was used for structural analysis and Dynamic designer for the Cinematic analysis. The importance of this project lies in the design of a ball mill to produce mechanical alloys with design and local technology, and low-cost compared with the imported alternatives. This mill will also allow the development and research of composite materials at the University and the region.

Key words: Alloy mechanics, ball mill Atritor type, composite materials, finite elements.

1. INTRODUCCION

Con el rápido avance de la tecnología, cada vez se incrementa la demanda de materiales con alta resistencia a la temperatura, al desgaste, rigidez y poco peso, ya que los materiales tradicionales no están en la capacidad de suplir estas características, creándose así la necesidad de desarrollar nuevos materiales, este tema ha llamado la atención de científicos y de ingenieros, quienes han descubierto en la técnica de aleación mecánica[1], un proceso sencillo y económico, comparado con el proceso de aleación en estado liquido, para producir nuevos materiales con excelente propiedades. Este proceso utiliza la energía de impacto para realizar aleaciones en estado sólido; lo cual abre un horizonte a la investigación, ya que se pueden alear materiales con puntos de fusión muy diferentes, como es el caso del metal y los polímeros.

Por medio del aleamiento mecánico se ha logrado obtener materiales compuestos con características especiales de resistencia a altas temperaturas, desgaste, y alta rigidez, con una muy buena relación entre resistencia y peso [1, 2]. Este

proceso se lleva a cabo satisfactoriamente utilizando energía de impacto para crear aleaciones en estado sólido, a partir de polvos elementales de cualquier tipo de material.

El desarrollo de nuevos materiales constituye una de las áreas de mayor interés, del país que pretenda ser competitivo industrialmente. El grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Occidente unió esfuerzos con el grupo de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle para diseñar y construir un molino de bolas tipo Atritor para obtener material compuesto mediante la técnica de aleamiento mecánico.

2. PROCESO DE DISEÑO

Se diseñó un molino de bolas tipo atritor a escala de laboratorio teniendo en cuenta que su construcción pueda llevarse a cabo con materiales y tecnologías propias de la región. Este equipo está en capacidad de moler 1 Kg de material, bajo una atmósfera controlada; a una velocidad de 500 r.p.m., el equipo cuenta con un sistema de refrigeración para extraer el calor generado durante la molienda.

2.1 Definición del problema

El propósito de diseñar un molino de bolas tipo atritor surgió de la necesidad de desarrollar aleaciones y materiales compuestos, mediante la técnica de aleamiento mecánico, la cual se lleva acabo en molinos de alta energía [3, 4] estos son equipos que agitan en su interior bolas de acero o cerámica, para producir la soldadura y fractura en frío de materiales, en polvo. La concepción de éste tipo de molinos es una innovación a nivel de Sur América ya que pocas instituciones cuentan con este tipo de equipo.

2.2 Síntesis de la solución

La forma en que se obtiene la aleación depende del equipo que se utilice para el proceso, esencialmente el principio del aleamiento mecánico siempre es el mismo, soldadura y fractura continua de las partículas de polvos, por medio de bolas y alta energía entregada a estas. La manera como se induce la energía en las bolas es una característica única de cada molino [5, 6] por lo cual se decidió estudiar la morfología de un molino de bolas tipo atritor

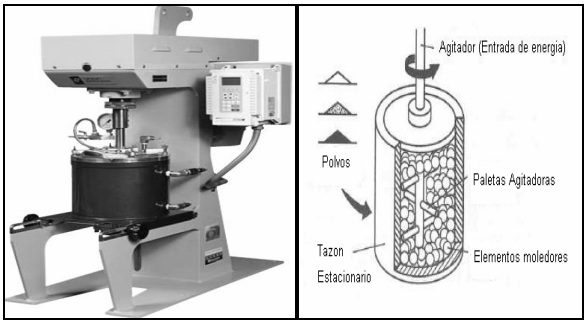


Figura 1. Imágenes de un molino atritor: a) Fotografía, b) Esquema de movimiento.

Como se aprecia en la Figura 1, un eje central dispuesto con paletas conocido como agitador, se introduce en un tazón donde están dispuestos los elementos moledores y polvos elementales, por medio del agitador se entrega la energía rotacional de entrada que se transfiere a la bolas y se convierte en energía de impacto, fricción y calor, de esta manera las partículas de material son deformadas, soldadas y fracturadas, este proceso es diferente, si se compara con los mecanismos de inducción de energía en otros molinos como el planetario, donde se produce por dos tipos de fuerzas, de impacto y fricción, ambas generadas entre las bolas y las paredes del recipiente que las contiene como consecuencia de la alta carga centrípeta y centrifuga que es proporcional a la velocidad de giro manipulada[1, 2]; o con el molino vibratorio en donde en cada ciclo del movimiento las bolas chocan entre si, los polvos y paredes del tazón, mezclando y aleando los materiales, la amplitud del movimiento puede llegar a ser de 5 cm y la frecuencia de oscilación 1200 Hz, estos factores producen velocidades en las bolas de 5m/s y una frecuencia de impacto elevada por lo que son los molinos de más alta energía y de menor tiempo requerido para la consecución de la aleación [1, 2].

2.3 Análisis y optimización de la solución

Para el rediseño y posterior construcción del molino, se partió del diseño presentado por F. Botero et al [7]. Se realizaron notables modificaciones con el fin de cumplir con los requerimientos, se obtuvo como resultado un molino de bolas tipo Atritor vertical, debido a su alta eficiencia y sencilla composición. Este molino consta básicamente de las siguientes partes: motor, impulsor, contenedor, cámara de refrigeración y base de soporte, ver figura 2.

El motor proporciona el movimiento para hacer girar el impulsor, que al rotar a alta velocidad choca con las bolas de acero y la mezcla de material en polvo presente en el contenedor, induciéndole alta energía de impacto.

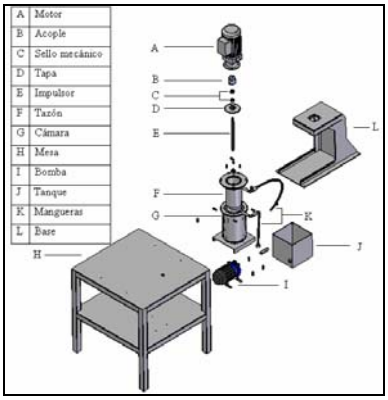


Figura 2. Despiece del conjunto que conforma el molino Atritor.

2.3.1 Diseño del tazón

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se considero que 1 Kg. de polvos seria la capacidad de trabajo del molino, para lo cual las relaciones entre bolas y polvo mas usadas son 10:1 y 20:1 [1, 2]. Se seleccionó una relación de 10:1, con el fin de evitar incrementos elevados de temperatura; ya que a mayor numero de bolas mayor número de colisiones lo cual resulta en un incremento de temperatura en el interior del molino.

Con la relación seleccionada la masa del conjunto de bolas a utilizar es la siguiente:

$$\frac{Masa\ de\ Bolas}{Masa\ de\ Polvo} = \frac{10}{1} \qquad (1)$$

Masa de bolas = 10 Kg. (2)

1.1.1 La capacidad de trabajo del tazón esta determinada por el volumen que ocupan los elementos moledores (bolas) y el espacio existente entre cada uno de ellos dentro del tazón que es aproximadamente el 38% del volumen total ocupado [2]. Se consideró que el material de los elementos moledores es igual que el material en el que se construirá el tazón en este caso AISI 420 para evitar contaminación.

El volumen aparente que ocupan las esferas es

$$V_{APARENTE} = \frac{V_{REAL}}{0.62} = \frac{M_{BOLAS}}{0.62\ \rho_{ACEIRO}} \qquad (3)$$

$$V_{APARENTE} = 2.01x10^{-3}\,m^3 \approx 2L$$

Por tanto el volumen aparente es la capacidad mínima que debe tener el tazón para contener la masa total de bolas, a este volumen se le denomina capacidad de trabajo, que para este caso es de 2 L

El tazón es básicamente un cilindro, redondeado en el fondo con el propósito de evitar esquinas donde se acumule material, su capacidad total es de 4 L, lo cual es el doble de la capacidad de trabajo, con el fin de evitar la excesiva fricción. En la figura 3 se presenta el esquema del tazón diseñado.



Figura 3. Especificaciones del tazón

2.3.2 Diseño del impulsor

El impulsor tiene la función de transmitirle energía cinética a las bolas, se seleccionó el mismo material del tazón con el fin de evitar contaminación del polvo procesado.

El impulsor consta de 11 paletas atornilladas a un eje central, de las cuales 10 de estas tienen la misma forma, la paleta restante es de forma diferente con el fin de lograr el acercamiento máximo al fondo del tazón para evitar acumulación de material y bolas, las paletas son removibles para facilitar su mantenimiento.

La figura 4 muestra una vista del eje y de las paletas que conforman el impulsor.

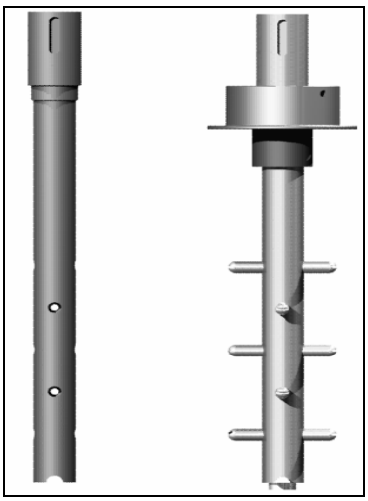


Figura 4. Vista del impulsor

La dimensión mínima del diámetro del eje requerida para transmitir la potencia del motor al contenido del tazón, se calculo teniendo en cuenta que el eje trabaja básicamente a torsión [4].

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3} < \tau_{adm} \qquad (4)$$

El calculo del torque aplicado al eje se realizó considerando un valor de 1500 Kw de potencia del motor y de 52rad/s como valor de la velocidad angular a la salida del motor, el calculo del esfuerzo admisible se realizó considerando un factor de seguridad de 2, y un valor de limite elástico de 345 MPa [8] correspondiente a un acero inoxidable AISI 420.

El valor del diámetro del eje esta dado por la ecuación 5.

$$d > \left[\frac{16T}{\pi\tau_{adm}}\right]^{1/3} > \left[\frac{16*29}{\pi*86.25}\right]^{1/3} \qquad (5)$$

$$d > 0.0119m$$

Para que el eje soporte las condiciones de torsión el diámetro debe ser mayor de 11mm**.**

2.3.3 Diseño de la base del sistema

La base del sistema es el elemento encargado de sostener la mayoría de los componentes del molino; está compuesta de un tramo de perfil en "I", tubos de sección cuadrada y chapa metálica, todos fabricados de acero estructural ASTM A-36. Para seleccionar el perfil se realizaron análisis por fluencia y pandeo. Se consideró un valor de 250 MPa [8], como el límite de fluencia del acero y un factor de seguridad de 2 para el cálculo del esfuerzo admisible del material.

Con el valor del limite de fluencia del material (S_y) y de las propiedades de la sección del perfil (S_{xx}) [5] se comprobó su capacidad

$$S_{xx} \geq \frac{M}{\sigma_{adm}} \qquad (6)$$

$$8.05x10^{-5}m^3 > 0.16x10^{-5}m^3$$

Debido a que se cumplió la condición se concluyó que el perfil no sufre deformación plástica con la carga aplicada. La figura 5 muestra una vista isométrica de la base.

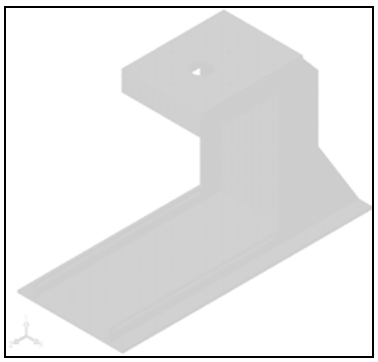


Figura 5. Base del molino

1.1.2 En el análisis por pandeo, la viga se analizó como una columna de carga excéntrica utilizando la formula de la secante [9] para determinar la carga máxima que puede soportar la viga sin deformarse plásticamente por pandeo.

$$\sigma_{Max} = n\sigma_{med}\left[1 + \frac{ec}{r^2}\sec\left(\frac{L}{2r}\sqrt{\frac{n}{E}\sigma_{med}}\right)\right] \qquad (7)$$

De la ecuación (7) se tiene que:

σ_{Max} es el limite de fluencia del material, **n** es el factor de seguridad, **e** es la excentricidad de la carga, **c** es la distancia a la fibra más alejada de la sección transversal, **r** el radio de giro de la columna en la dirección de la carga, **L** es la longitud de la columna y **E** es el Modulo de elasticidad del material.

Se consideró que la carga estaría aplicada sobre la

mitad de la sección de la viga, con el fin de que la estructura formada por los tubos se apoye en el centro del perfil, se tomó un valor de Modulo de elasticidad del material de 200 GPa [8]. Los valores de esfuerzo medio y de carga máxima que puede soportar la columna sin sufrir deformación plástica por pandeo se calcularon mediante la formula de la secante y el esfuerzo admisible respectivamente; obteniendo como resultados los siguientes valores:

$$\sigma_{med} = 7.94\text{x}10^{6}\text{Pa}. \quad (8)$$

$$P = \sigma_{med} * A \quad (9)$$
$$P = 21438N$$

Valores que no sobrepasaron la resistencia del material (S_Y).

2.3.4 *Diseño de la cámara de refrigeración*

El flujo total de calor a través de la superficie del tazón esta dado por la ecuación 10, en la cual se relaciona el flujo de calor a través de las paredes y el fondo del tazón. Este se calculó mediante las ecuaciones 11 y 12 respectivamente [10]; con el fin de determinar si el flujo de agua utilizado era suficiente para extraer el calor generado durante el proceso.

$$\dot{Q}_{TOTAL} = \dot{Q}_{paredes} + \dot{Q}_{fondo} \quad (10)$$
$$\dot{Q}_{TOTAL} = 759\,W$$

$$\dot{Q} = h_c A(T_{se} - T_e) \quad (11)$$

$$\dot{Q} = \frac{K_m A}{e}(T_{si} - T_{se}) \quad (12)$$

El cálculo de la cantidad de calor que puede extraer el agua que circula por la cámara, se realizó utilizando la ecuación 13 [10], para el calculo se asumió un incremento de temperatura del agua al pasar por la cámara de aproximadamente 2° C [6].

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (13)$$
$$\dot{Q} = 5268W$$

Como la cantidad de calor que extrae el sistema (5268 W) es mayor al valor generado (755), el sistema esta en la capacidad de extraer el calor con suficiencia.

La cámara de refrigeración es un cilindro con dos orificios para conexión de tubería de 12,7 mm de diámetro nominal, un orificio en la parte inferior y otro en la superior, que son respectivamente la entrada y salida del agua.

En la figura 6 se observa el modelo de la cámara de refrigeración obtenido mediante el programa Solid Edge y algunas de sus características.



Figura 6. Cámara de refrigeración.

2.4 Análisis por elementos finitos

Utilizando el software Solid Edge [11] y Algor [12] se diseño y analizó la base del molino. Se calculó el esfuerzo máximo, el desplazamiento máximo, las frecuencias naturales de vibración y el factor pandeo.

2.4.1 Análisis de la base del molino

Las cargas utilizadas para este análisis fueron, en la parte superior de la base 480 N y en la parte inferior 940 N, estos valores corresponden a los pesos de los componentes que debe sostener la base multiplicados por un factor de 2, con el objetivo de considerar los efectos dinámicos ocasionados por la vibración del motor.

La tabla 1 muestra los parámetros suministrados al Software Algor para realizar el análisis de la base del molino

Tabla 1. Parámetros utilizados para el análisis de la base del molino.

Tipo de elemento	*Numero de elementos*	*Modelo de material*
Brick de 4 nodos	15368	Lineal / Isotrópico

En la figura 7 se observa el análisis de la base obtenido mediante Elementos Finitos utilizando el software Algor.

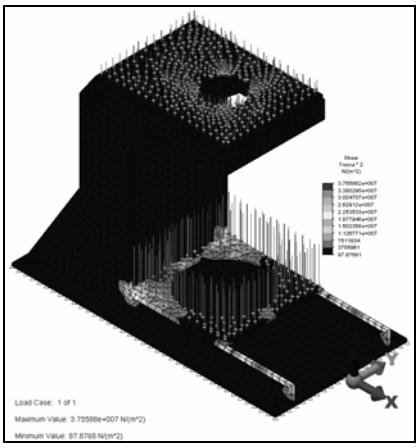


Figura 7. Análisis de la base mediante elementos Finitos.

En la tabla 2 se presentan los principales resultados del análisis y en la tabla 3 se muestran la 5 primeras frecuencias de vibración de la base del molino.

Tabla 2. Principales resultados del análisis de la base del molino

Desplazamiento Máximo [mm]	*Esfuerzo Máximo [MPa]*	*Factor de pandeo*
0,19	37,5	563,5

Tabla 8. Frecuencias de vibración de la base del molino

Forma modal	*Frecuencias de vibración [rev/s]*
1	205,3
2	265,4
3	286
4	538
5	594

En la tabla 2 se observa que el máximo esfuerzo obtenido fue de 37,5MPa, contra 250MPa del esfuerzo de fluencia, para un factor de seguridad de 6,7. Igualmente al obtener un factor de pandeo de 563,5, indica una gran seguridad del componente en este aspecto.

2.7 Prototipo virtual

El prototipo virtual que se muestra en la figura 8 se realizó utilizando el software Solid Edge.

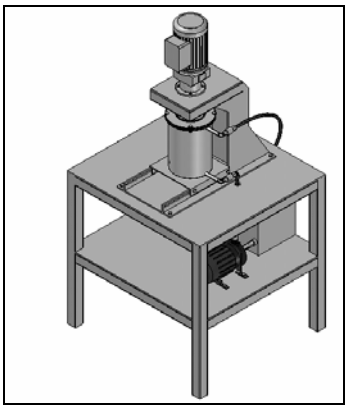


Figura 8. Prototipo Virtual del molino Atritor.

3. CONCLUSIONES

Las herramientas computacionales son una gran ayuda para el diseño con la que cuentan los ingenieros en la actualidad, ya que permiten predecir de manera muy cercana a la realidad el comportamiento tanto de materiales como sistemas, permitiendo así ahorro de tiempo, dinero y brindando mayor confiabilidad a los diseños.

Se diseñó y seleccionó todos los componentes de un molino de bolas tipo atritor, de tal forma que se llevó a cabo su construcción, con materiales y tecnología existentes en el país.

El utilizar molinos de bolas es una técnica sencilla y económica, comparada con los métodos tradicionales de alear metales; además brinda la posibilidad de combinar materiales metálicos con materiales no metálicos, abriendo así un horizonte para la investigación de nuevos materiales.

4. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo contó con el apoyo del Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, CENM, bajo el contrato RC-043-2005 suscrito con COLCIENCIAS.

5. REFERENCIAS

[1]. C. Suryanarayana, *Mechanical Alloying*

and Milling, Volume 46. USA: Elsevier, 2001, p. 1-184

[2] Man O Lilu, *Mechanical Alloying*, Londres: Kluwer Academic Publishers, 1998, p. 1-276

[3] Milfelner M**,** Franci C**.** *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 2003, 19, 99–106

[4] Abd el-rahman M.K**,** B.K. Mishra , R.K. Rajamani . *Mineral Engineering*. 2001, Vol. 14, No. 10, 1321-1328

[5] Gavrilov D, Vinogradov O, William J.D. *Powder Tecnology*. 1999, 101, 63-72

[6] H Mio, Kano J, Saito F, Kaneko K . *Materials Science and Engineering***.** 2002, A332, 75–80

[7] Botero F**,** Sanchez N. A**,** Jaramillo H. E. *Diseño de un Molino de bolas tipo atritor*. Santiago de Cali, 2004. 56 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de ingeniería.

[8]. Norton R, *Diseño de Maquinas*, 3. ed, México: Mc Graw-Hill, 1999, p. 759

[9] Bickford W, *Mecánica de Sólidos*, 1ª. ed, Méico: edición, Mc Graw-Hill 2001.

[10] Mills A, *Transferencia de Calor*, 1ª. ed, España: Irwin, 1995, p. 1629-1645

[11] Solid Edge, Versión 14, versión Académica

[12] Algor, versión 14.04, versión Académica Hill, Colombia, 1995.