

## **UNIDAD PILOTO DE TRANSPORTE NEUMÁTICO EN FASE DILUIDA: PÉRDIDA DE CARGA EN CURVAS “T” (TES) CON BRIDAS DE LARGURAS DISTINTAS**

Fernando Marques Fernandes <sup>\*1</sup>, Sabrina Martins dos Santos <sup>2</sup>, Deovaldo de Moraes Júnior <sup>3</sup>, Marlene Silva de Moraes <sup>4</sup>, Luis Renato Bastos Lia <sup>5</sup> y Elias Basile Tambourgi <sup>6</sup>

<sup>\*1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad Santa Cecilia

Calle Oswaldo Cruz nº 277, Santos, São Paulo, Brasil - e-mail: [fmarques@unisanta.br](mailto:fmarques@unisanta.br)

<sup>2, 3, 4 e 5</sup> Departamento de Ingeniería Química – Universidad Santa Cecilia

Calle Oswaldo Cruz nº 277, Santos, São Paulo, Brasil - e-mail: [bastos@unisanta.br](mailto:bastos@unisanta.br)

<sup>6</sup> Departamento de Ingeniería de Sistemas Químicos – Universidad Estadual de Campinas  
Caixa Postal 6066, Campinas, São Paulo, Brasil - e-mail: [eliastam@feq.unicamp.br](mailto:eliastam@feq.unicamp.br)

### **RESUMEN**

En el transporte neumático, partículas de sólidos se desplazan a través de una tubería, usándose aire u otro gas como fluido transportador. Este sistema puede utilizarse para partículas que varían de polvos a *pellets* de 100  $\mu\text{m}$  a 1 cm y densidades de 16 a 3200  $\text{Kg/m}^3$ .

Se denomina transporte neumático en fase diluida la técnica de transporte con concentración menor que 1% en volumen, con velocidad en general entre 5 a 25 m/s y presión abajo de 1 atm y fase densa con concentración arriba de 30% en volumen, y velocidad entre 0,25 a 2,5 m/s.

El principal inconveniente de ese sistema es el desgaste del equipamiento, causado por el impacto de las partículas sólidas principalmente en las curvas. Las curvas “T” (tes) con salida lateral a pesar de que introduzcan una mayor pérdida de carga en relación a las curvas, permiten el acumulo de partículas que funcionan como colchón amortiguador.

El trabajo ha tenido por objetivo estudiar la pérdida de carga en curvas “T” (tes) con salida lateral con variación de la camada del colchón amortiguador. Para este estudio se utilizó polietileno de baja densidad como el sólido a ser transportado. El equipamiento se constituye básicamente de: ventilador con palas de 210 mm de diámetro, motor de 1 CV, tubos en acrílico con largura de aproximadamente 4 metros con enchufes piezométricos por toda su extensión, válvula rotativa en PVC (para insertar el sólido en la tubería), tubo recto de 1 m antes del distribuidor y un colector en aluminio con nueve partes.

Se concluye para el caso estudiado que, la utilización de aumento de las camadas del colchón de partículas en las curvas “T” (tes) para reducción de la pérdida de carga no sufrió alteración significativa, añadiéndoselas apenas para la protección de la tubería.

**Palabras Claves:** transporte neumático; pérdida de carga, colchón amortiguador.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Generalidades**

El transporte neumático tiene como principio desplazar un producto en forma de partículas a través de una corriente de gas dentro de una tubería estanca. Para evitarse sedimentos del producto en la tubería de transporte, se hace necesario mantener una velocidad mínima en la línea. Se obtiene esa velocidad a través de la diferencia de presión entre el punto de introducción y el punto de extracción del producto, necesaria para vencer las pérdidas de carga provocadas por un desagüe turbulento bifásico. Buscando la reducción del desgaste, no es rara la sustitución de curvas por otras en "T" (tes) salida lateral, a pesar de que esto acarree una mayor pérdida de carga. Las curvas en "T" (te) con salida lateral permiten el acumulo de una pequeña cantidad de partículas que funcionan como amortiguador (colchón) y reducen el desgaste.

### **1.2 Objetivo**

El trabajo ha tenido como objetivo determinar la pérdida de carga de una curva "T" (te) con salida lateral y la variación de esta pérdida con bridas de larguras distintas.

## **2. REPASO BIBLIOGRÁFICA**

Se puede transportar los sólidos de diversas maneras, como por ejemplo: transporte mecánico (correa, helicoidal y recipiente), hidráulico, neumático, por carretera y por ferrocarril. Es importante resaltar que en la sección hay que llevarse en cuenta el tamaño del material y sus propiedades, factores y costes de adquisición, operación y mantenimiento.

Según Gomide [1] el transporte neumático es un dispositivo muy empleado en la movimentación y elevación de sólidos finos en la industria química. La distancia de transporte puede variar de algunos pocos metros hasta largas distancias (400m) situación para la cual particularmente está recomendado el transportador neumático (ver apartado 6).

### **2.1 Uso Práctico**

De acuerdo con Silva [2], el transporte neumático, se lo utiliza en todos los sectores industriales donde se manosean materiales en forma de partículas (polvos, granulados) o sectores de envase (latas, cajas) con aplicación en industrias químicas, metalúrgicas, fábricas de cemento, producción y transformación de materiales plásticos, industrias de papel, industrias gráficas, industrias alimenticias (ver apartado 6). Se lo aplica en materiales que se presentan en forma de granulados o en forma de polvos para productos fibrosos. Esa modalidad de transporte permite realizar un conjunto de operaciones de manoseo de productos en cantidades que pueden variar de algunos centenares de kilogramos para varias decenas de toneladas por hora, en circuitos que pueden alcanzar varias centenas de metros.

## 2.2 Clasificación del Transporte Neumático

Dependiendo de como se lo va a aplicar, distintos regímenes de transporte son utilizados, tales como, transporte en fase diluida y densa. El régimen operacional está determinado por la velocidad superficial del gas y por el caudal de masa del sólido, definida por la razón de la tasa de flujo de masa del polvo, por la tasa de flujo de masa del gas.

### 2.2.1 Fase Diluida

El transporte en fase diluida se caracteriza por: altas velocidades de gas (más que 5m/s), bajas concentraciones de sólidos (menos que 1% en volumen) y bajas caídas de presión por unidad de largura de línea de transporte (típicamente menor que 5 mbar/m). Está limitado a pequeñas extensiones y transporte continuo de sólidos a tasas menores que 10 toneladas/hora.

El sistema puede operar con presión positiva (inferior a 1 bar), presión negativa o emplear una combinación de las dos. La Figura 1 A y B demuestran un sistema en fase diluida donde el material está mezclado con el aire y las partículas están totalmente en suspensión.



Figura 1 – Transporte en fase diluida

### 2.2.2 Fase Densa

El transporte en fase densa se caracteriza por: bajas velocidades de gas (1 - 5 m/s), altas concentraciones de sólidos (más que 30% en volumen), altas caídas de presión por unidad de largura del tubo (comúnmente mayor que 20 mbar/m) y una baja relación aire/ material. Estos sistemas se utilizan de presiones positivas para impulsar el material a través de la tubería, de la misma forma se dá cuanto a la extrusión con la ayuda de un compresor de aire de alta presión como fuente de energía. Las ventajas principales de esa fase surgen de las bajas exigencias de volumen de gas que generalmente requieren bajos consumos de energía por kilogramo de producto cargado y provocan menor desgaste. La figura 2 presenta los principales tipos de fase densa: (A) fase densa continua, (B) fase densa discontinua, respectivamente.

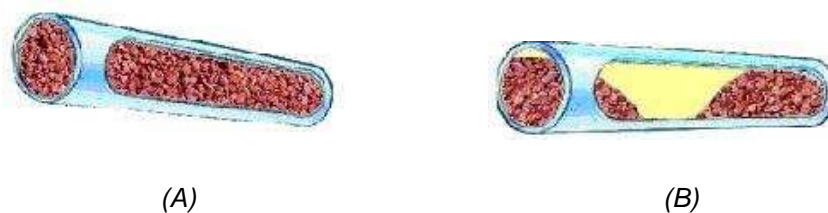


Figura 2 – Los principales tipos de transporte en fase densa

### 2.3 Velocidades

La velocidad de un transporte no puede ser excesiva, por razones de ahorro de potencia, disminución del desgaste abrasivo de las tuberías (especialmente en los codos) y en algunos casos, para disminuir el deterioro de las partículas causado por impactos. El tamaño, la densidad, la forma de las partículas y otros factores influyen en la velocidad mínima ideal de transporte. En el transporte neumático es posible distinguirse la velocidad de las partículas de la velocidad del gas. La tabla 1 enseña la relación entre la densidad y la velocidad del aire.

Tabla 1 – Relación entre la densidad y la velocidad del aire

Densidad Bulk		Velocidad del Aire		Densidad Bulk		Velocidad del Aire	
Lb/ft <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	ft/min	m/min	lb/ft <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	ft/min	m/min
10	160	2900	884	65	1024	7450	2270
15	240	3590	1094	70	1120	7700	2347
20	320	4120	1256	75	1200	8000	2438
25	400	4600	1402	80	1280	8250	2515
30	480	5050	1539	85	1360	8500	2591
35	560	5500	1676	90	1440	8700	2652
40	640	5840	1780	95	1520	9000	2743
45	720	6175	1882	100	1600	9200	2804
50	800	6500	1981	105	1680	9450	2880
55	880	6800	2072	110	1760	9700	2957
60	960	7150	2179	115	1840	9900	3118

### 2.4 Curvas

Las curvas son factores que de alguna manera complican el proyecto de sistemas de transporte neumático en fase diluida. Al proyectarse un sistema de transporte lo mejor es evitarlas o disminuir su uso, pues ellas aumentan la caída de presión en una línea y son también puntos de erosión y fricción de la partícula. Además de la caída de presión debido a la propia curva, hay también una caída de presión debido a la inmediata re-aceleración de la partícula por el gas. Hay que considerarse la largura del tubo recto necesario, antes que los sólidos alcancen nuevamente su velocidad de estado estacionario.

### 2.5 “T” (te) ciego

En el pasado, los proyectistas de sistemas de transportes neumáticos de fase diluida, intuitivamente pensaban que codos largos, inclinados gradualmente, reducirían la erosión y aumentarían la vida útil de la curva en relación a los codos de 90 grados.

Zenz [5] sin embargo, recomendó que curvas “T” (tes) ciegas fueran utilizadas en lugar de codo (ver apartado 6). La figura 3 presenta el “T” (te) ciego donde un pasaje encubierto forma una almohada de partículas inertes, colectadas en la ramificación cerrada, así que las partículas transportadas se chocan con las partículas inertes en la baliza y no en la superficie del metal, como en un codo.

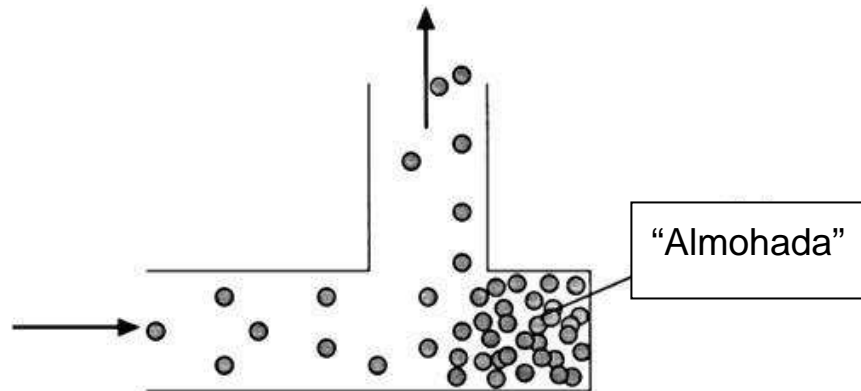


Figura 3 - Curva en “T” (te) ciega

### 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiales

La figura 4 es una representación esquemática de la unidad experimental donde se realizaron los estudios del sistema en curva “T”(te) y la figura 5 presenta una curva “T” y las bridas utilizadas en el experimento y la figura 6 presenta una foto del equipamiento.

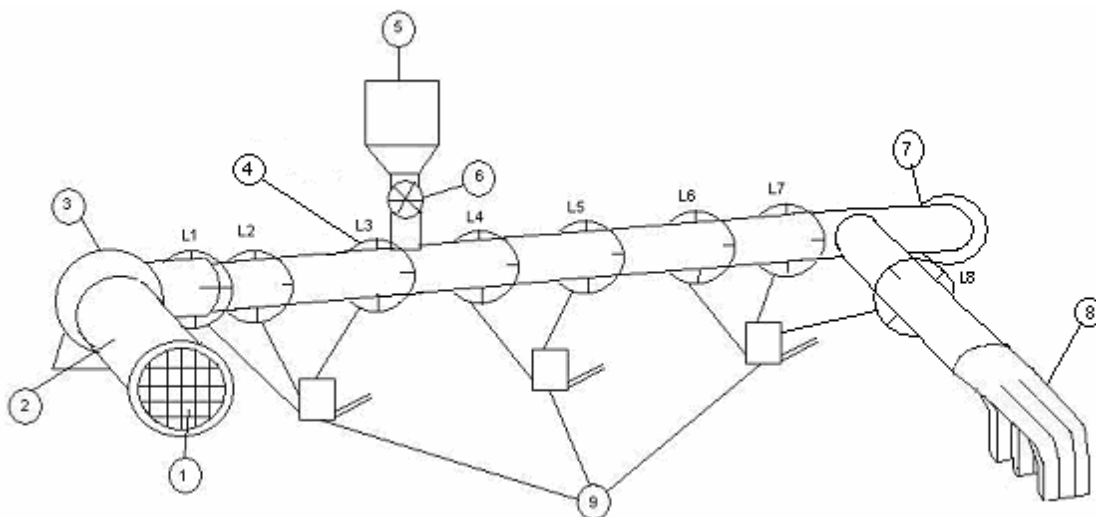


Figura 4 – Esquema del equipamiento utilizado: 1) entrada de aire del soplador; 2) conducto de succión del soplador; 3) soplador; 4) anillo piezométrico 5) silo de alimentación; 6) válvula rotativa; 7) Tes con prolongamientos y T (te) ciego; 8) colector con nueve salidas; 9) manómetros inclinados acoplados a los anillos piezométricos. Los puntos L7 y L8 se refieren a las presiones estudiadas. (P7 y P8).

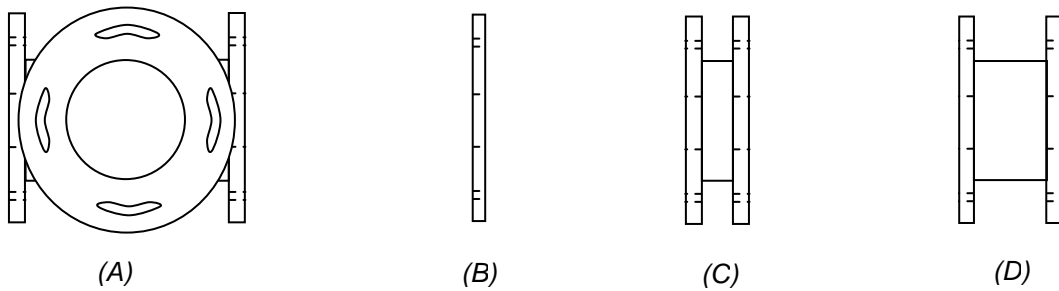


Figura 5 – (A) Curva “T” (te) con salida lateral para adaptación de brida ciega; (B) brida sin prolongamiento; (C) brida con prolongamiento de 60 mm y (D) brida con prolongamiento de 120 mm



Figura 6 – Foto del equipamiento utilizado

### 3.2 Método

Inicialmente se calibraron los instrumentos como: el cronómetro, el anemómetro y el tacómetro, para garantizar la precisión de los resultados. Se eligió el polietileno para utilizárselo en las experiencias y se fijó un caudal de alimentación se lo acopló al sistema de curvas y se conectó el inversor de frecuencia del ventilador y se eligió un caudal de aire. Después de establecido el caudal se apuntó las presiones en los dos puntos, antes y después del pasaje por la curva en “T” (te) donde se encontraban los enchufes piezométricos.

Se midió la velocidad del aire en la entrada del ventilador y después de la obtención de los datos descritos se conectó la válvula rotativa para empezarse el transporte del material. Durante el pasaje del material por la tubería, se demarcaron las nuevas presiones de los dos puntos en los enchufes piezométricos. La pérdida de carga se la calculó por la diferencia entre esos puntos. Este procedimiento se lo repitió para tres caudales de alimentación de sólido (0,06; 0,09 y 0,12 Kg/s) y para cinco caudales de aire, variándose entre 10 a 30 m/s.

### 4. RESULTADOS

Las tablas 2, 3 y 4 presentan los resultados experimentales, siendo P7 y P8 las presiones medidas en los puntos L7 y L8 de la figura 4. Los valores fueron obtenidos a través de manómetros inclinados y corregidos para indicar las presiones en mm de columna de agua.

Las figuras 7, 8 y 9 presentan la comparación entre los valores obtenidos para pérdida de carga en función de un caudal de sólido para las situaciones estudiadas.

Tabla 2 - Pérdida de carga en función de lo caudal de sólido para "T" (te) ciego

<b>Sin Sólidos</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
0	0	0	0
5	4	1,5	2,5
10	15,5	2,5	13
15	30,5	11	19,5
20	47,5	16	31,5
25	68,5	25	43,5
30	110,5	31,5	79
<b>Caudal de 0,06 Kg/s de Sólido</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
10	8,5	2	6,5
15	30	12,5	17,5
20	43,5	20,5	23
25	62,5	27	35,5
30	89	42,5	46,5
<b>Caudal de 0,09 Kg/s de Sólido</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
10	8	3	5
15	30	13	17
20	44	19,5	24,5
25	63	25,5	37,5
30	89,5	39	50,5
<b>Caudal de 0,12 Kg/s de Sólido</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
10	8,5	1,5	7
15	26	8,5	17,5
20	44,5	19	25,5
25	63	26,5	36,5
30	87,5	36,5	51

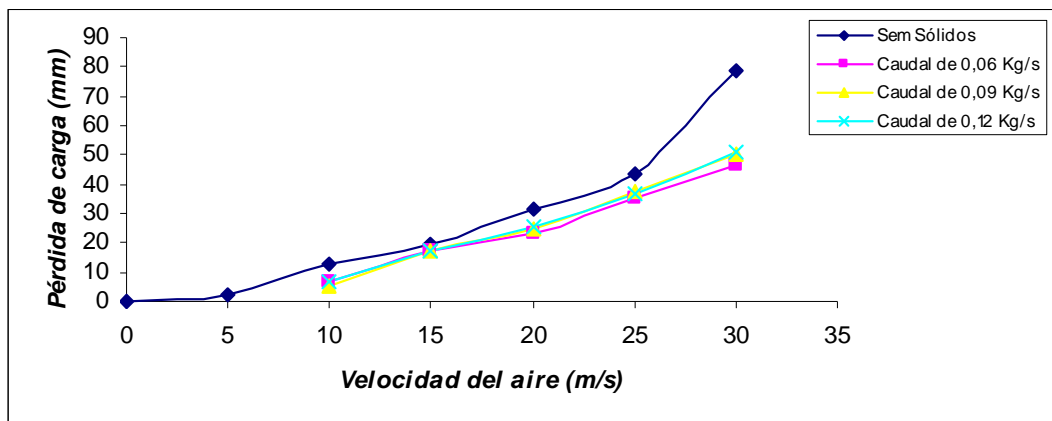


Figura 7 – Pérdida de carga en función de la velocidad del aire para "T" Ciego

Tabla 3 - Pérdida de carga en función de lo caudal de sólido para "T" (te) con prolongamiento de 60 mm

<b>Sem Sólidos</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
0	0	0	0
5	2,5	2	0,5
10	10	4,5	5,5
15	23,5	10,5	13
20	36,5	17	19,5
25	44	20	24
30	72,5	30,5	42
<b>Caudal de 0,06 Kg/s de Sólido</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
10	9,5	4	5,5
15	22,5	10,5	12
20	40,5	17,5	23
25	49	22	27
30	76,5	35	41,5
<b>Caudal de 0,09 Kg/s de Sólido</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
10	9,5	4	5,5
15	22	8,5	13,5
20	40,5	18	22,5
25	61	25	36
30	79,5	34,5	45
<b>Caudal de 0,12 Kg/s de Sólido</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
10	9,5	3,5	6
15	21,5	10	11,5
20	41,5	22	19,5
25	58,5	27	31,5
30	71,5	32	39,5

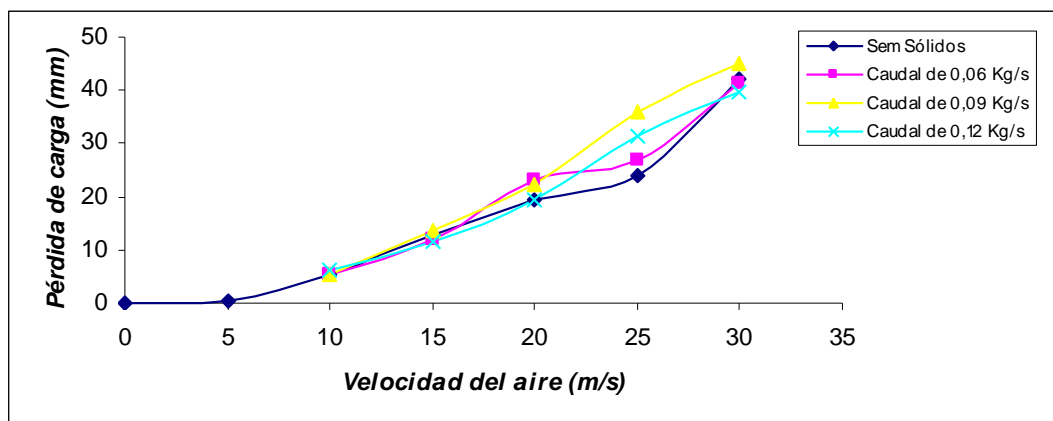


Figura 8 – Pérdida de carga en función de la velocidad del aire para "T" con prolongamiento de 60 mm

Tabla 4 - Pérdida de carga en función de lo caudal de sólido para "T" (te) con prolongamiento de 120 mm

<b>Sem Sólidos</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
0	0	0	0,0
5	4	1	3,0
10	10	4,5	5,5
15	21,5	7,5	14
20	31,5	14,5	17
25	50	21,5	28,5
30	70	32,5	37,5
<b>Caudal de 0,06 Kg/s de Sólido</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
10	10,5	4,5	6
15	19,5	8,5	11
20	31,5	14,5	17
25	52,5	23,5	29
30	73	32	41
<b>Caudal de 0,09 Kg/s de Sólido</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
10	10	4	6
15	20,5	9,5	11
20	35	16	19
25	52,5	23,5	29
30	74	33	41
<b>Caudal de 0,12 Kg/s de Sólido</b>			
$V_{DESPLAZAMIENTO}(m/s)$	$P7 (mm)$	$P8 (mm)$	$\Delta P = P7 - P8 (mm)$
10	9	4	5
15	20	8	12
20	37,5	17	20,5
25	52,5	24	28,5
30	73	32,5	40,5

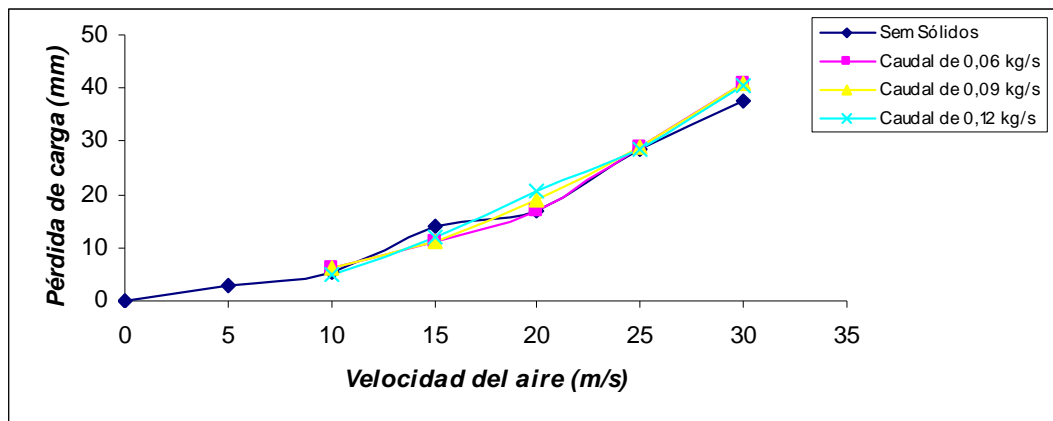


Figura 9 – Pérdida de carga en función de la velocidad del aire para "T" con prolongamiento de 120 mm

## **5. CONCLUSIONES**

De acuerdo con las figuras 7, 8 y 9 se concluye que el uso de la curva "T" (te) ciega y el prolongamiento de 60 y 120 mm no tuvieron influencia significativa en la pérdida de carga, en todas las velocidades de aire (10 a 30 m/s).

No obstante se recomienda para el transporte neumático de polietileno en fase diluida el uso de mínimo de un complemento de 60 mm para la formación (hechura) de la almohada, con el objetivo de proteger el sistema de curvas de posibles desgastes.

Para un análisis comparativo se presentó la curva con dos secciones: para la velocidad de 30m/s y caudal de 0,12kg/s, una pérdida de carga de 37 mm de columna de agua y el "T" (te) para las mismas condiciones presentó una pérdida de 41 mm de columna de agua.

El responsable por el proyecto debe hacer un análisis, si, la mayor pérdida de carga del "T" (te) en relación a la curva, con el consecuente aumento de consumo de energía, compensará el menor desgaste del "T" (te).

## **6. REFERENCIAS**

- [1] Gomide, R., *Operações Unitárias – 1º Volume: Operações com Sistemas Sólidos Granulares*, Livraria Kosmos Editora Ltda, Rio de Janeiro - RJ, 1983.
- [2] Silva, D. R. da, *Transporte Pneumático – Tecnologia, Projetos e Aplicações na Indústria e nos Serviços*, Artliber Editora Ltda, São Paulo – SP, 2005.
- [3] Coutinho, F. M. B. et al, *Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações*, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.
- [4] Marcus, R. D. et al, *Pneumatic conveying of solids*, Trabalho apresentado no XXIX ENEMP, São João Del-Rei - MG, 1990.
- [5] Zenz, F.A. - *Convey ability of materials of mixed particle size*, Ind. Eng. Fund. 3(1): 65-75, 1964.

## **Agradecimientos**

*Les agradecemos a la Dirección de la Universidad Santa Cecilia por el apoyo que recibimos durante la ejecución de este trabajo.*