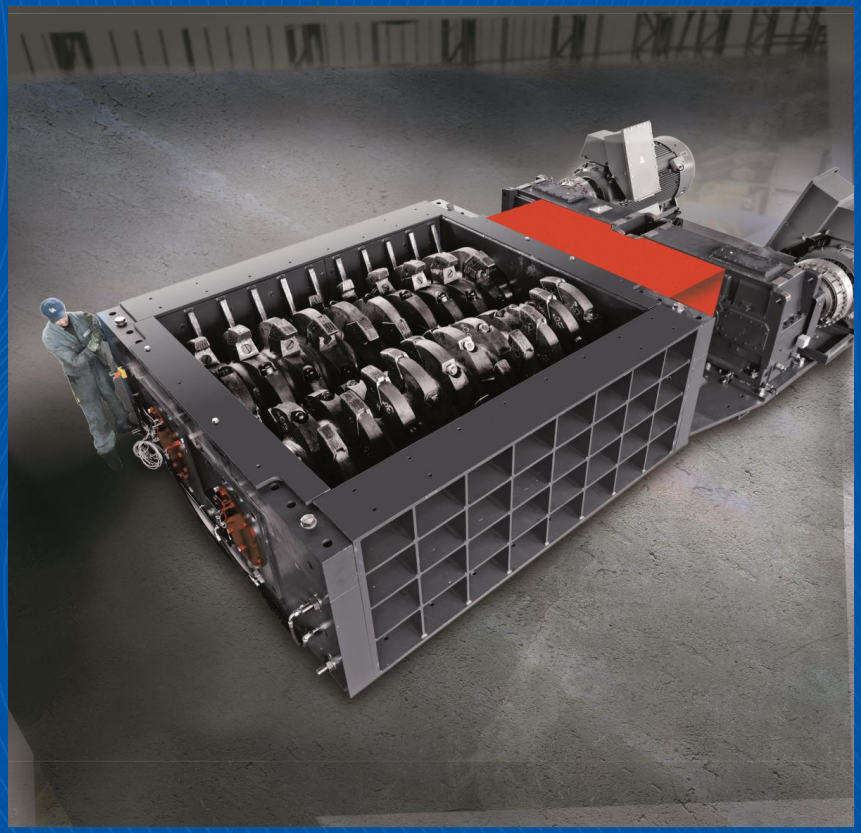
Universidad
Politécnica
de Cartagena

www.upct.es

Universidad Politécnica de Cartagena

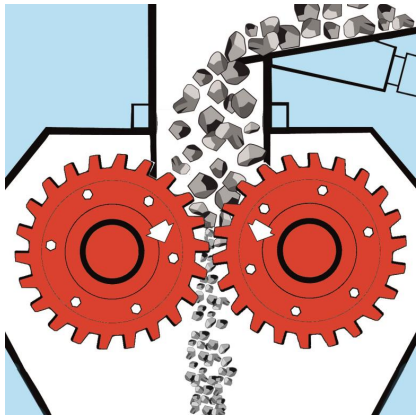
TECNOLOGÍA MINERALÚRGICA



TEMA 3: REDUCCIÓN DE TAMAÑO - TRITURACIÓN

PARTE 3

Universidad Politécnica de Cartagena



3 REDUCCIÓN DE TAMAÑO: TRITURACIÓN – PARTE 3

Trituradores de Cilindros

3.12. Introducción.
3.13. Trituradores de Cilindros Dentados.
3.14. Trituradores de Cilindros Lisos.
3.15. Trituradores de un Solo Cilindro.
3.16. Otros Tipos de Trituradores de Cilindros.
3.17. Cálculos Teóricos de Velocidad y Tamaño Máximo.

Trituradores de Cilindros. Introducción

Descripción General

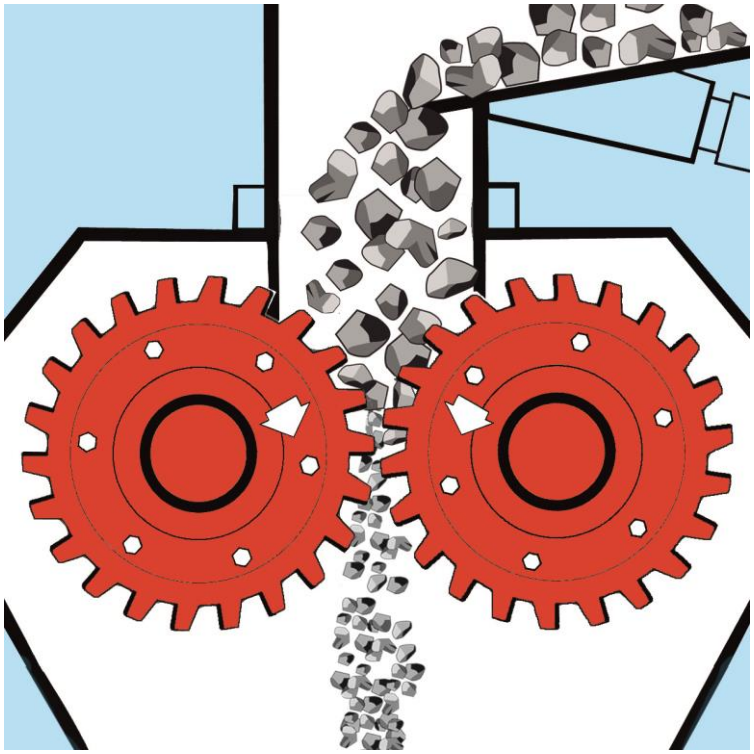
- **Este tipo de equipos fragmenta el material comprimiéndolo entre dos cilindros que se encuentran posicionados paralelamente y separados por una distancia muy pequeñas que es la que da el reglaje de la máquina.**

- **Cada cilindro presenta una velocidad de giro con sentido opuesto a la del otro cilindro, esto facilita el arrastre del material de alimentación hacia la zona de fragmentación.**

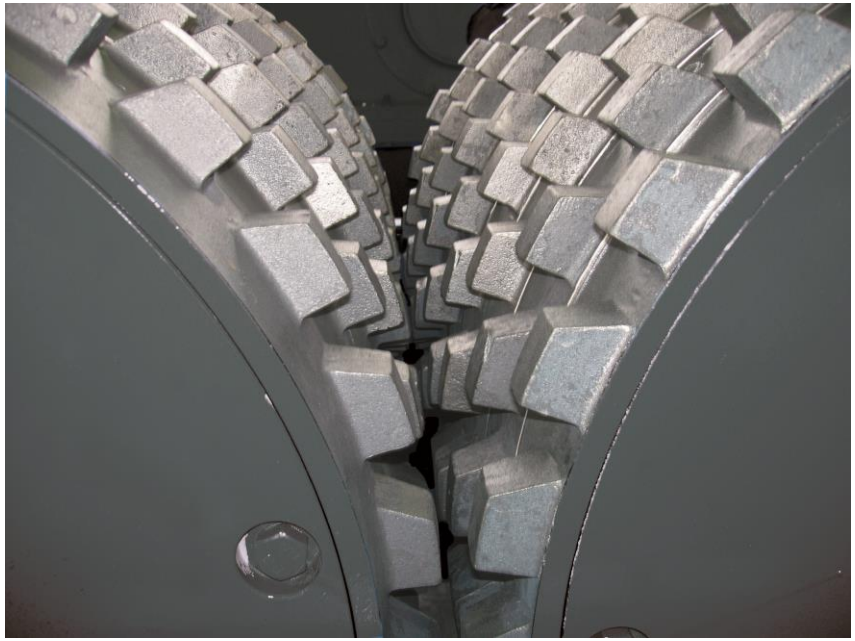
- **El giro de los cilindros se lleva a cabo a través de motores eléctricos independientes para cada cilindro, lo que puede permitir que cada cilindro posea su propia velocidad de giro, diferente o similar.**

- **Los molinos de cilindros, son aún adecuados para la trituración de materiales como caliza, pizarras, arenisca, esquistos, yesos, mineral de hierro de dureza media, carbones, fosfatos, creta, etc.**

- **Puesto que el bastidor de estas máquinas es bajo, con una estructura simple y más compacta, esto hace que el peso de la máquina sea más ligero con respecto a otras (1/2~1/3 del peso de otros equipos de la misma capacidad).**



(Figura 1) Esquema simple de funcionamiento de un triturador de doble cilindro dentado.



(Figura 2) Cilindros dentados (Cortesía de Sandvik Minerals).

(Figura 3) Cilindros dentados en equipo móvil (Cortesía de EXTEC).

Trituradores de Cilindros. Introducción

Descripción General

- **Aunque aún se siguen empleando, sin embargo en aquellas etapas donde se puede instalar un cono, esta opción es la preferible.**

- **Aunque no hay que descartar su empleo para el manejo de materiales pegajosos, friables (fácilmente desmenuzables) y de baja abrasividad.**

- **A diferencia de los equipos comentados hasta ahora (mandíbulas y giratorias), donde existían diferentes fases de compresión y abertura, aquí la reducción de tamaño se consigue a través de una sola fase de presión.**

(Figura 4) Triturador de doble cilindro con capacidad entre 3-6 t/h de capacidad, un tamaño de alimentación de 50mm y un producto de 11mm (Cortesía SGS). Motores de 7.5kW.

Trituradores de Cilindros Dentados

- **La trituración se consigue a través de esfuerzos de compresión generados entre los dos cilindros y a la cizalladura que le imprimen los dientes al material.**

- **Como su nombre indica, estarán formados por dos cilindros dentados. Los dientes podrán ser cuchillas, dientes de tiburón, picas, estrías, resaltes, etc.**

- **El diseño de los dientes y su disposición sobre los cilindros se hace en base a la obtención de una fragmentación regular con una mínima producción de finos (sobretriturados).**

- **Las filas de dientes se disponen intercaladas, actuando de alguna forma como cribas, ya que obligan a los fragmentos a reducirse para poder pasar por los espacios libres dejados entre las filas de cuchillas.**

- **Estos equipos se pueden emplear en minas a cielo abierto para tratar el Todo-Uno (en inglés "Run of Mine" o ROM) en etapas primarias, aunque también pueden encontrarse en etapas secundarias y terciarias.**

Trituradores "Rollsizer":

- **Los trituradores del tipo *Sizer* o DDC-Sizer (del inglés, "*Direct Drive Crusher*"), presentan los motores directamente acoplados a los cilindros a través de engranajes dentados (cajas reductoras y articulaciones Cardan).**

- **Capacidad de tratar minerales industriales de dureza media, pegajosos y/o blandos: carbones, arcillas, margas, caliza, etc.**

- **Estos equipos se colocan generalmente en las etapas primarias para producir un producto con un rango de tamaños bien definidos y libre de sobretamaños (grandes bloques). En etapas secundarias puede dar un tamaño inferior a los 50 mm.**

- **Las capacidades van desde las 50 tph hasta las 5000 tph, donde los grandes equipos admiten bloques de 1700 mm.**

- **La razón de reducción varía entre 3:1 y 6:1, dependiendo de la aplicación y del diseño del *RollSizer*.**

Trituradores "Sizer" de AUBEMA (Grupo Sandvik Minerals)

Figura 5

Crushing plant for processing of overburden, Thailand

Figura 6

Primary Crusher (Center-Sizer) with special picks

"Sizer" de Krupp Fördertechnik

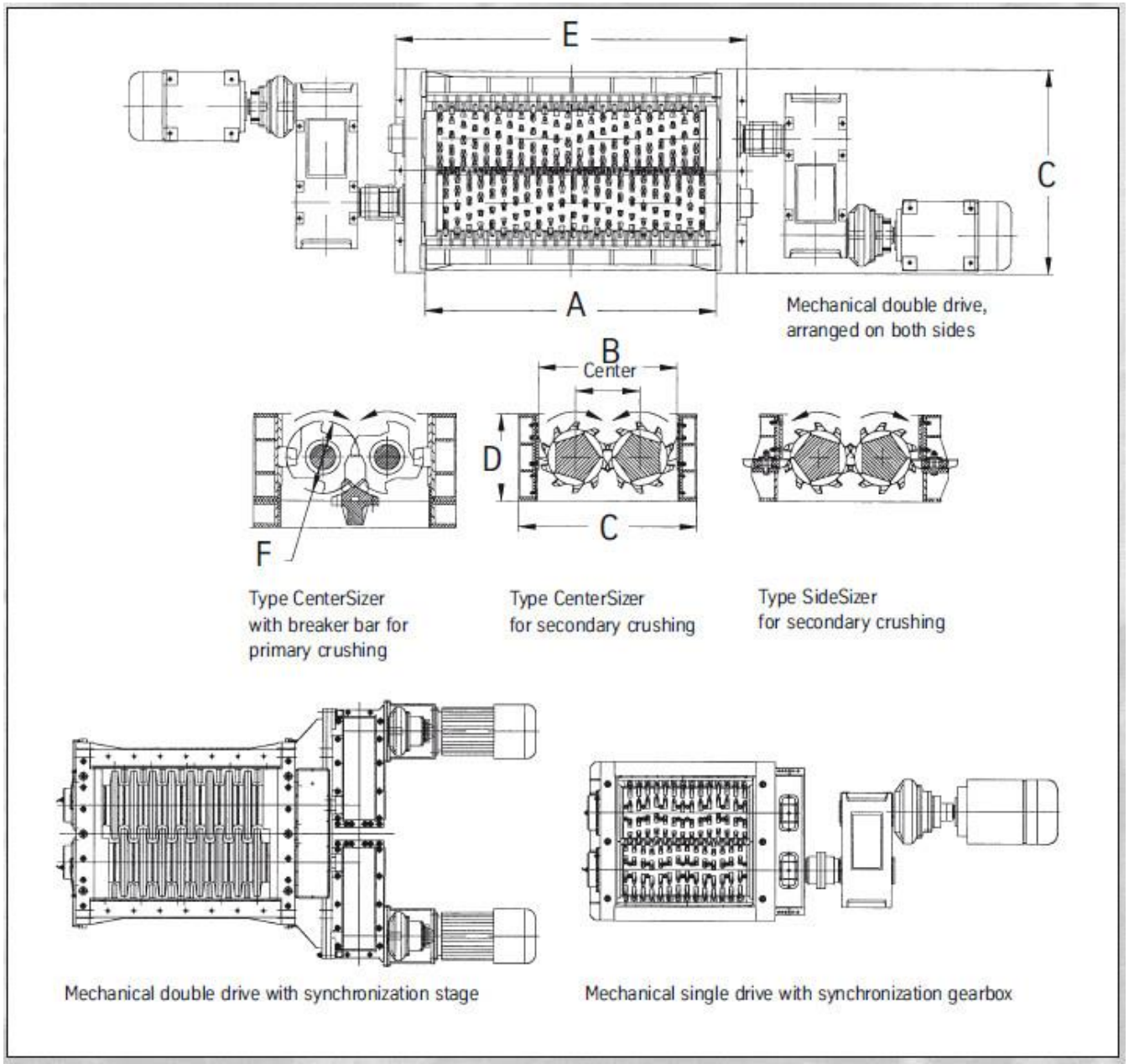


Figura 7

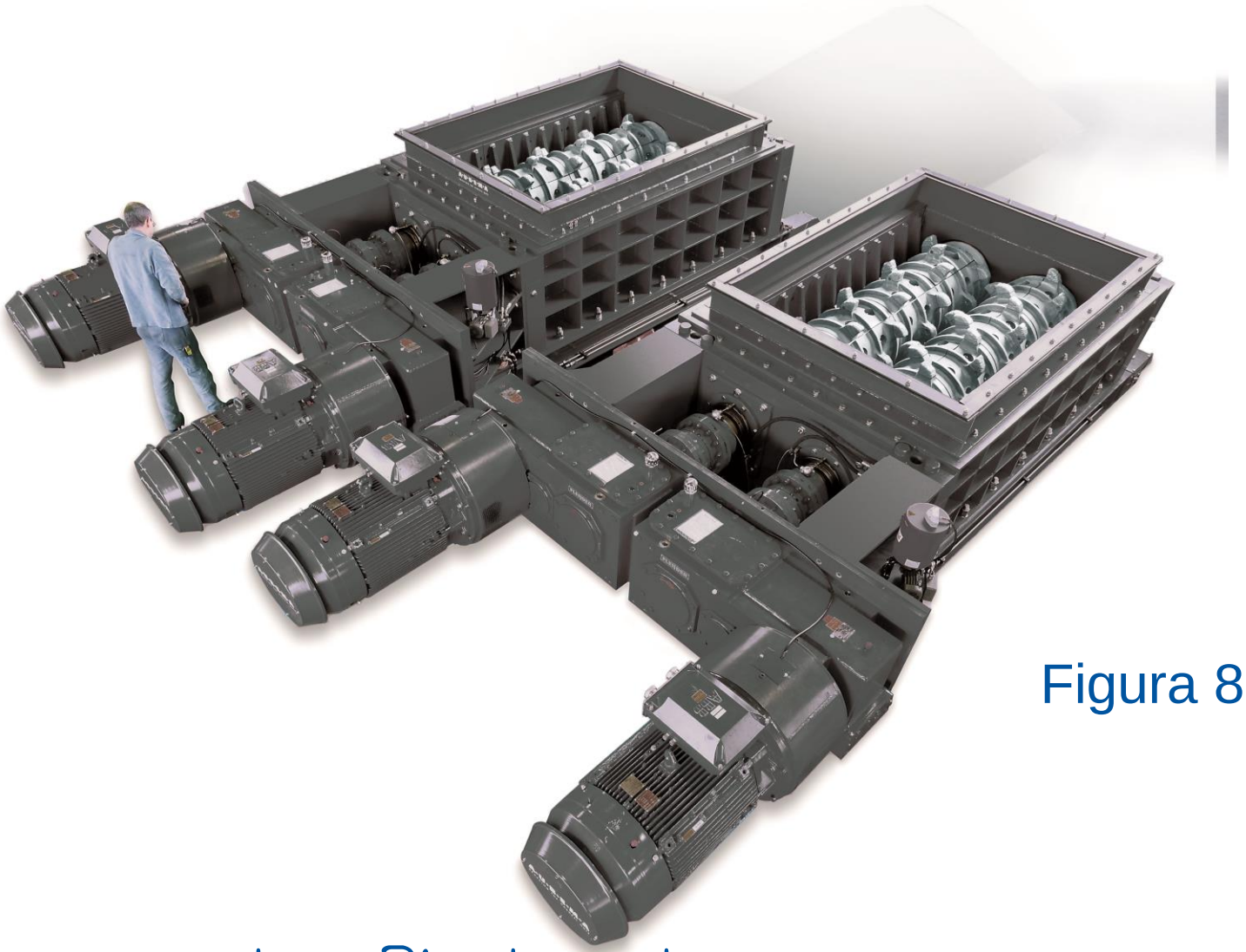


Figura 8

"RollSizer" Modelo CR610 de Sandvik

Sistema "Centre-Sizer" y "Side-Sizer"

Figura 9

Trituradores "Roll Crusher":

- **Son los trituradores de cilindros dentados tradicionales.**
- **Los motores se encuentran situados lateralmente al bastidor, donde pueden estar acoplados directamente a los cilindros o, transmitir el giro a los cilindros por medio del uso de volantes y bandas de goma en V.**
- **Existen modelos para ser instalados en etapas primarias y secundarias (las etapas terciarias generalmente están reservadas para los trituradores de cilindros lisos).**
- **Admiten materiales de dureza media o blandos, donde se pueden presentar con características de pegajosidad: carbones, margas, calizas, dolomías, pizarras, etc.**
- **Las capacidades pueden alcanzar las 14000 tph, admitiendo fragmentos donde su longitud mayor puede alcanzar los 1700 mm (etapa primaria).**
- **La razón de reducción está entre 3:1 y 6:1.**

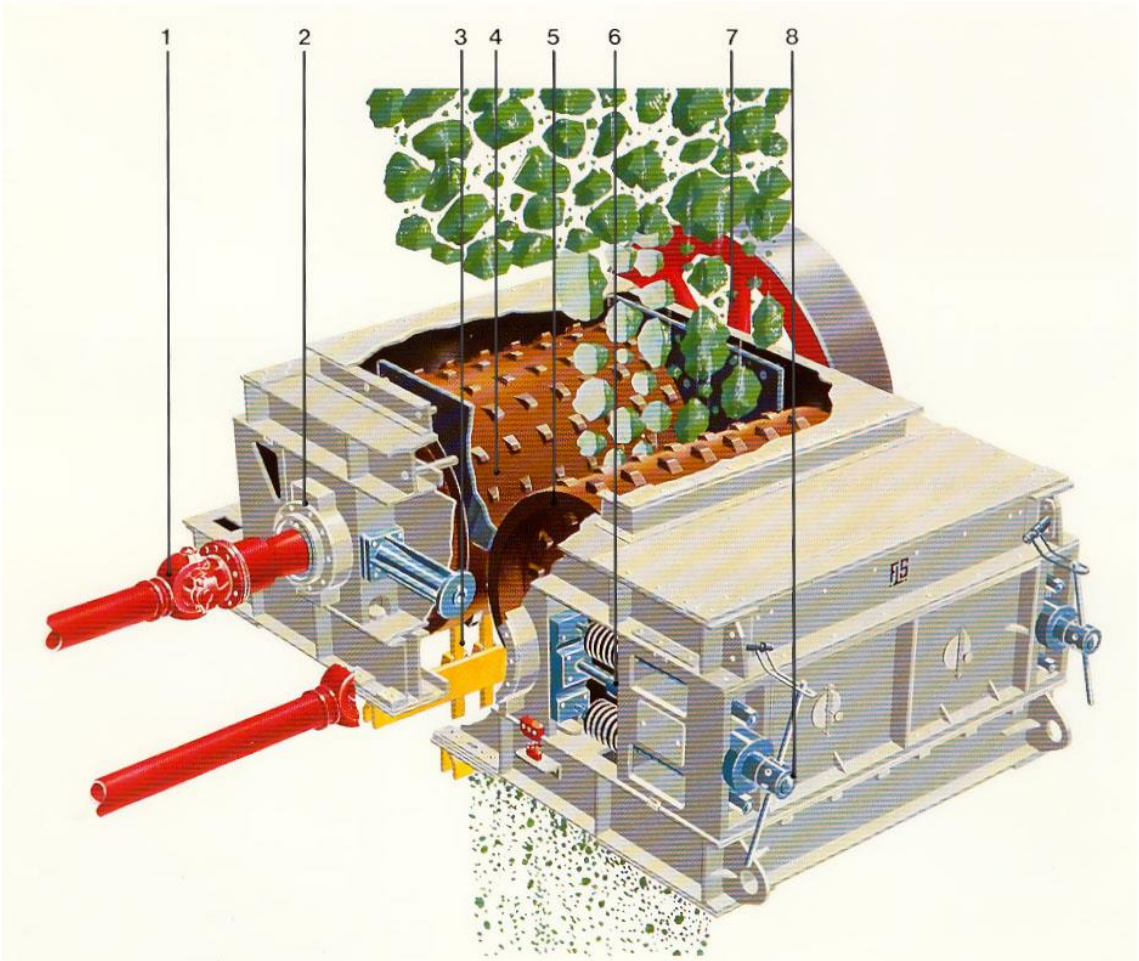


Figura 10

Molino de cilindros usando articulación Cardan (Cortesía FLS Smith)

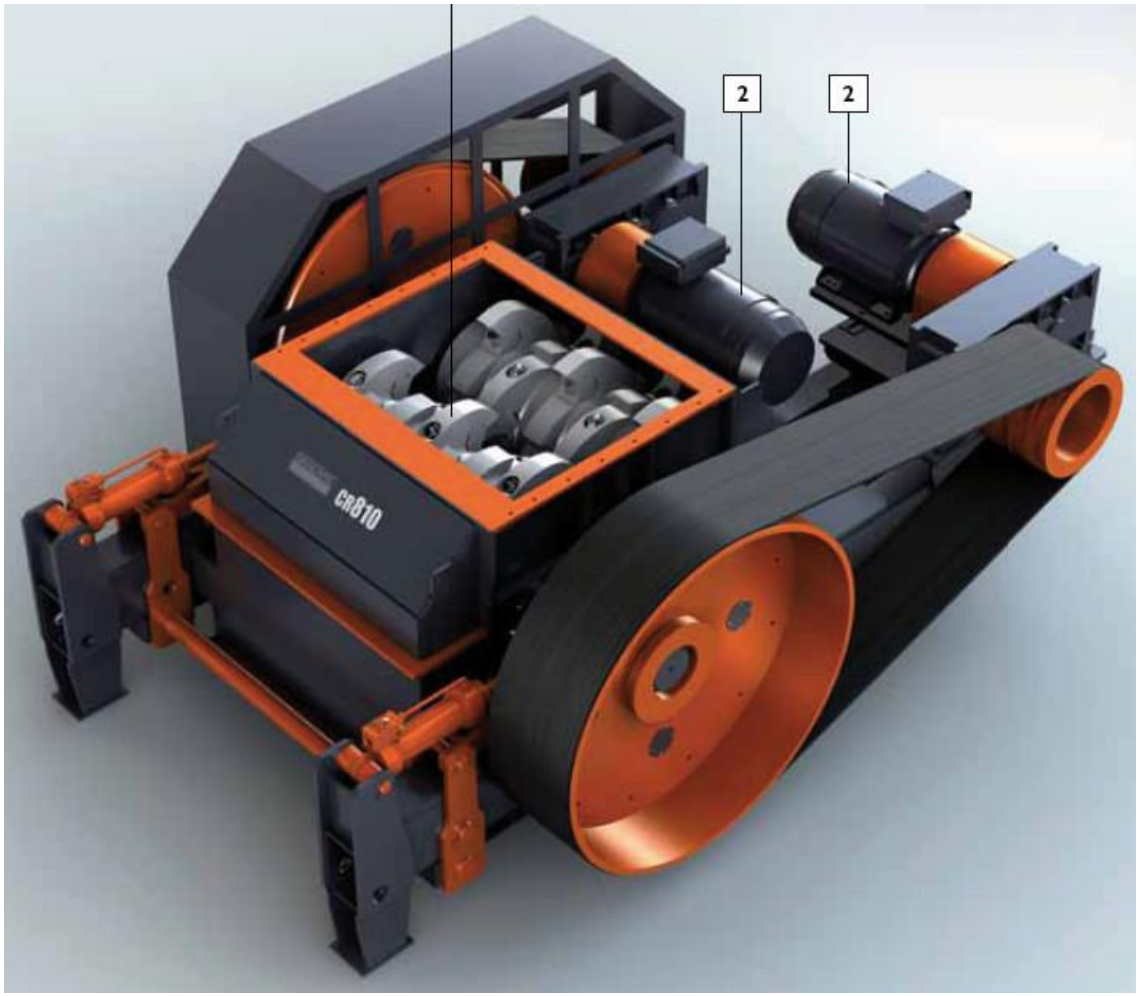


Figura 11

Molino de cilindros dentados con los cilindros movidos a través de bandas de goma (Cortesía Sandvik Minerals)

- **Estos equipos están especialmente indicados para material de dureza media a blanda (<1000-1100 kg/cm^2) y poco abrasivo (<5-6% de sílice): calizas, dolomías, caolín, yeso, pizarra y carbones.**

- **En trituración primaria los tamaños de alimentación serán de 1500 mm y el tamaño del producto será de 0-300 mm.**

- **En trituración secundaria los tamaños de alimentación serán 0-300 mm y el tamaño del producto final de 0-40 mm.**

- **La abertura de la entrada de alimentación no debe ser inferior a la dimensión del reglaje del molino de cilindros anterior y su longitud debe ser 4-5 veces el reglaje.**

- **Se emplearán cilindros dentados en una etapa secundaria cuando en la etapa anterior también exista cilindros dentados (uniformidad en el flujo de material procesado).**

- **Etapa terciaria: Alimentación de 0-40 mm y un producto de 0-15 mm, se puede emplear cilindros lisos en esta etapa.**

Diseño y Montaje de los Dientes

- **Los cilindros podrán presentarse como:**
  - **Una camisa de acero al manganeso sobre la cual van los dientes, o bien fundidos, o bien colocados por sistemas de fijación.**
  - **Un conjunto de segmentos en forma de placas donde los dientes van fijados alrededor de un alma cilíndrica y poligonal.**
  - **Un conjunto de cilindros dentados colocados directamente alrededor del eje del cilindro.**
- **Los cilindros pueden estar movidos por motores eléctricos (cada cilindro con su motor independiente), bien unidos directamente al eje (Sizer), o utilizando articulaciones, o bien indirectamente empleando cintas de gomas en V.**

Apilamiento de placas o bases con dientes (Sandvik Minerals)

Figura 12

Algunos diseños de dientes (Pennsylvania Crushers)

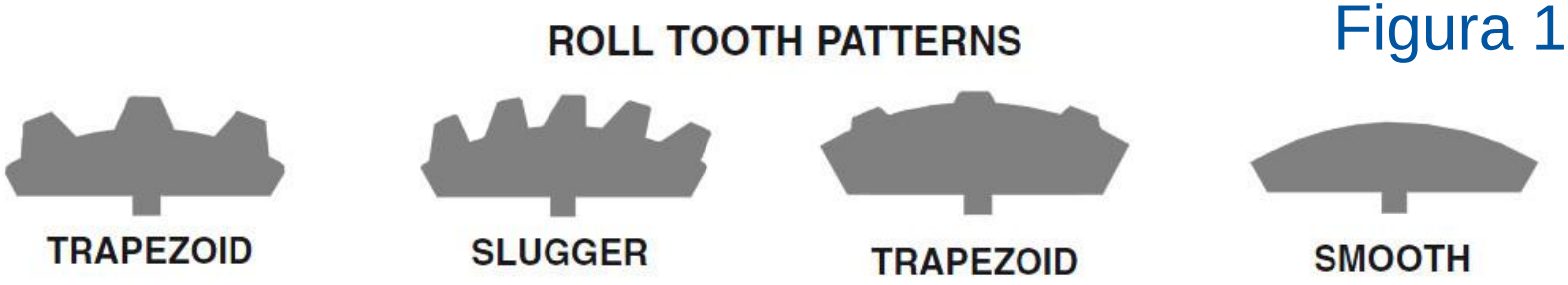
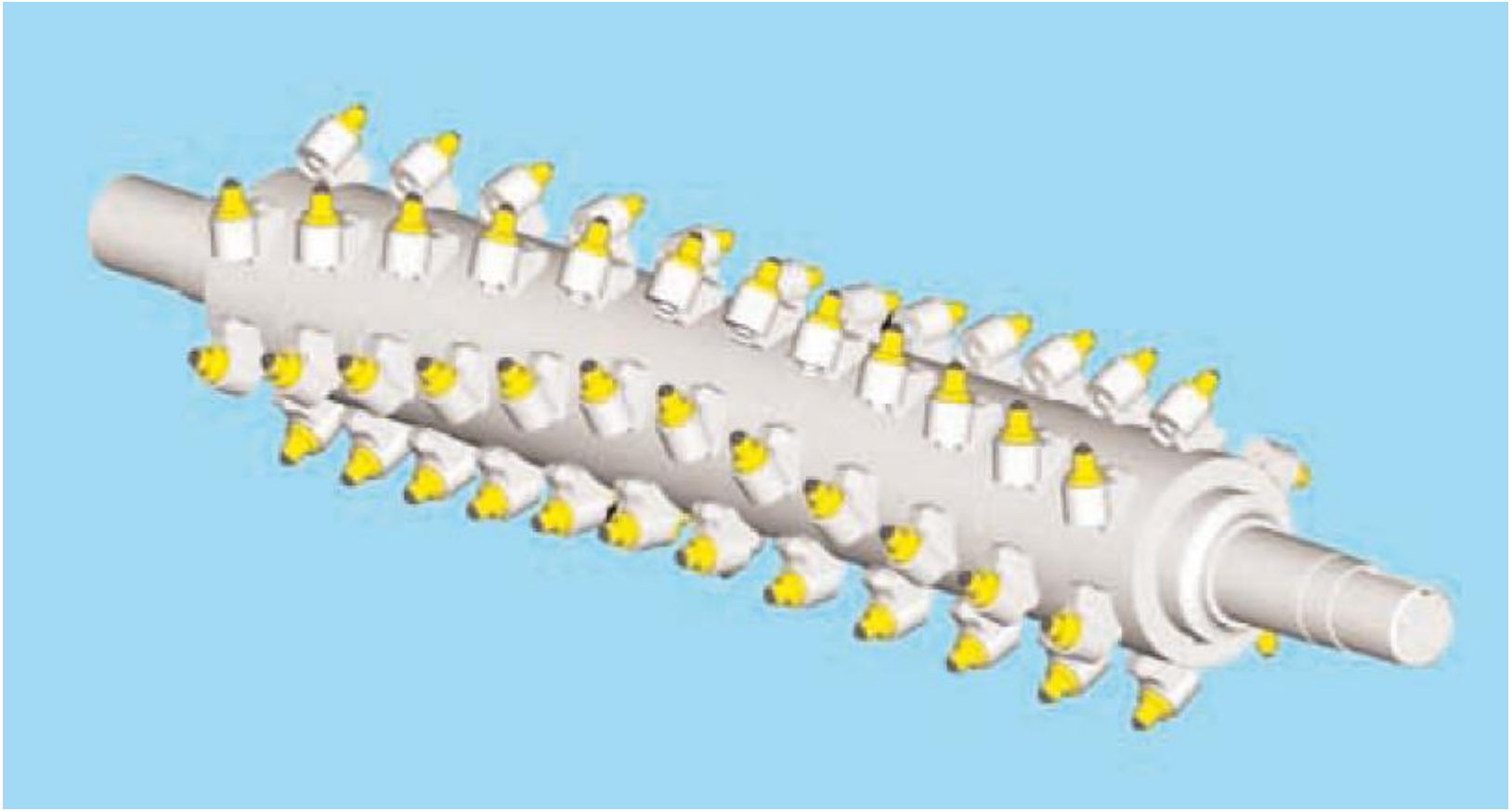


Figura 13

Figura 14



Picas montadas sobre cilindro (Pennsylvania Crushers)

Figura 15

Placas con dientes fundidos sobre ellas (Krupp Fördertechnik)

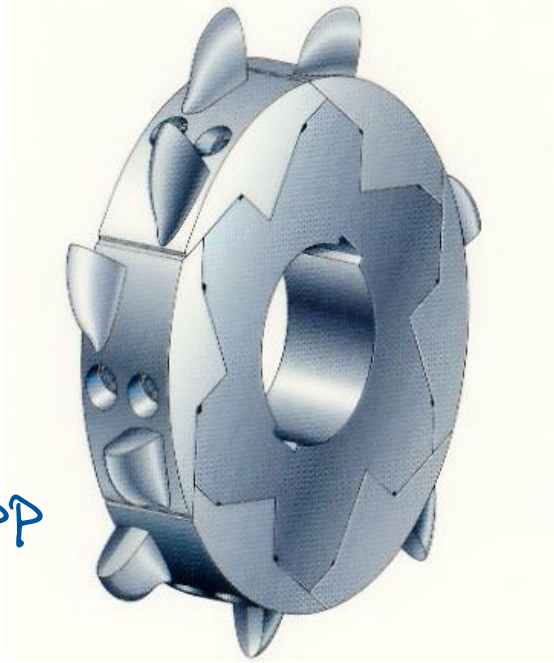


Figura 16

Segmentos dentados intercambiables (Krupp Fördertechnik)

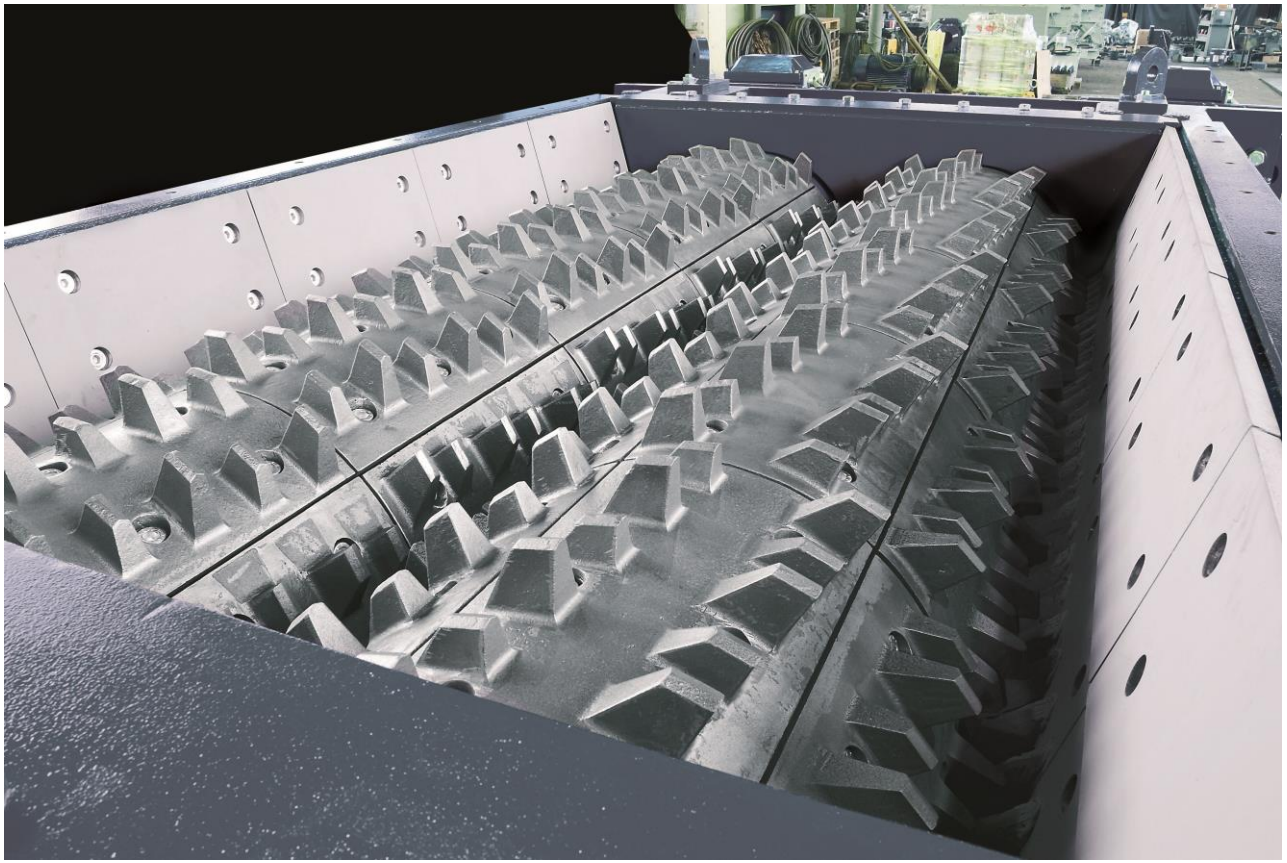


Figura 17

Placas con dientes fundidos sobre ellas (Sandvik Minerals)

Trituradores de Cilindros Dentados

- **Es común que uno de los cilindros vaya montado contra unos topes que son presionados por unos muelles o sistema hidráulico.**

- **Este sistema actúa como sistema de seguridad (retrocede el rodillo) ante el paso de material intriturable por la máquina como es el caso de piezas metálicas.**

- **Por otro lado, el otro cilindro permite su desplazamiento ya que va montado sobre soportes o tornillos que permiten regular su posición con respecto al otro cilindro (control de la abertura de salida o reglaje).**

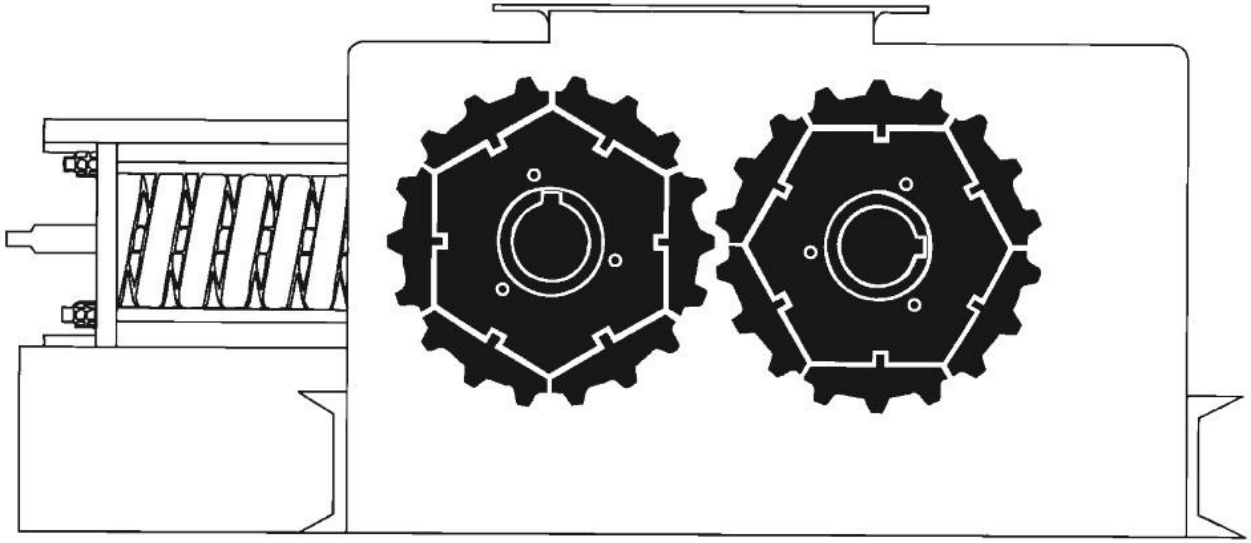


Figura 18

Figura 19

Eje dentado en taller de fabricación (Sandvik Minerals)

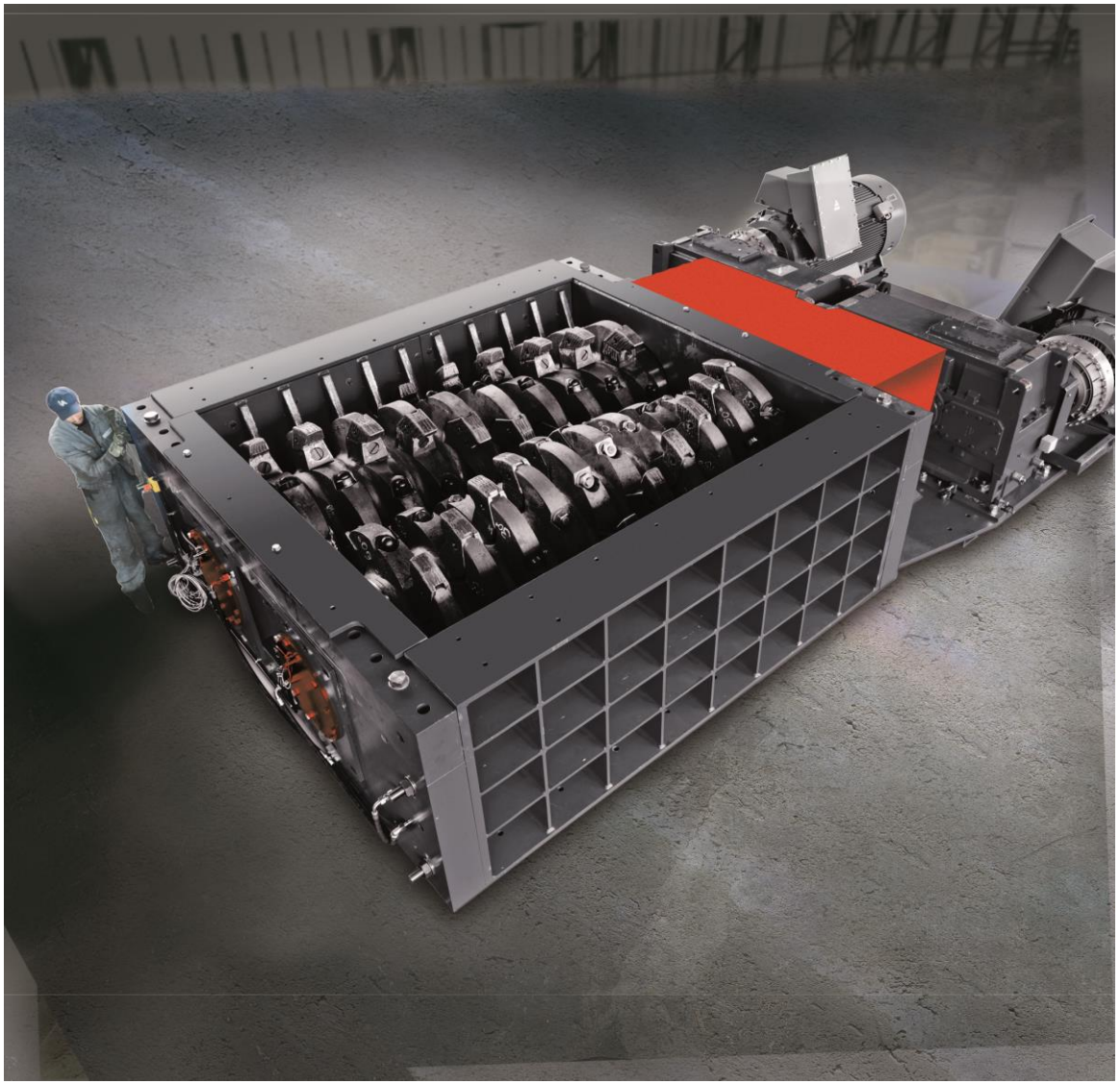
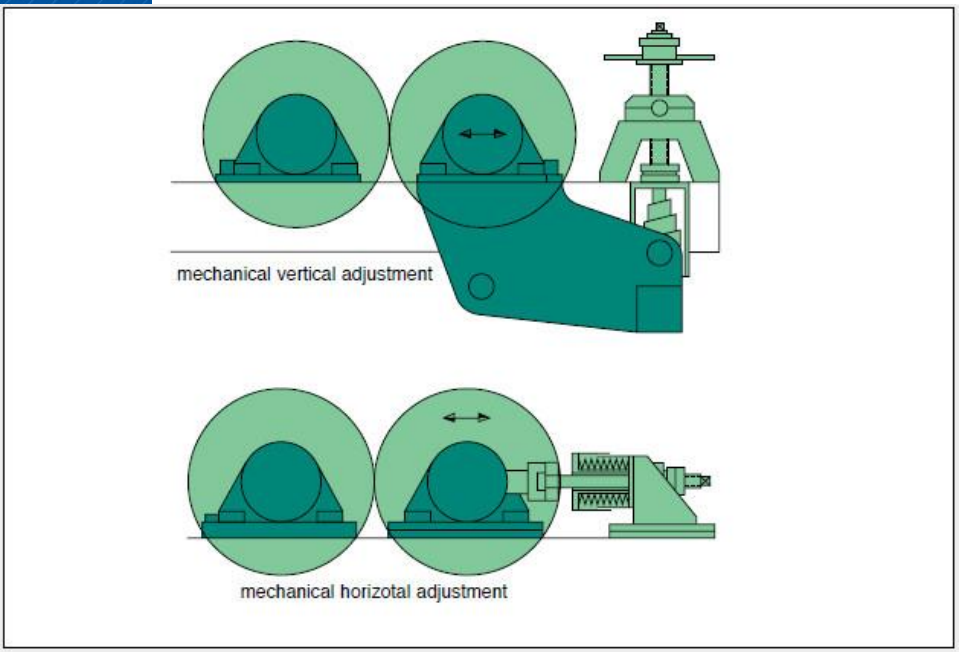


Figura 20

Molino de cilindros dentados con acoplamiento directo de motores eléctricos (Cortesía Sandvik Minerals)

Sistemas para la regulación del reglaje (Cortesía Aubema, Grupo Sandvik Minerals)



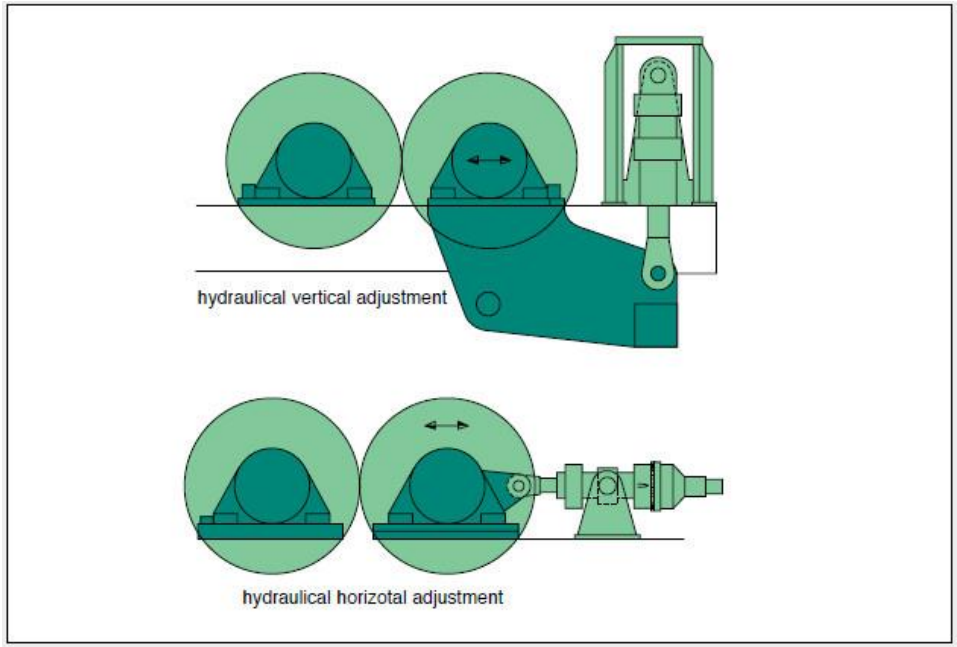


Figura 21

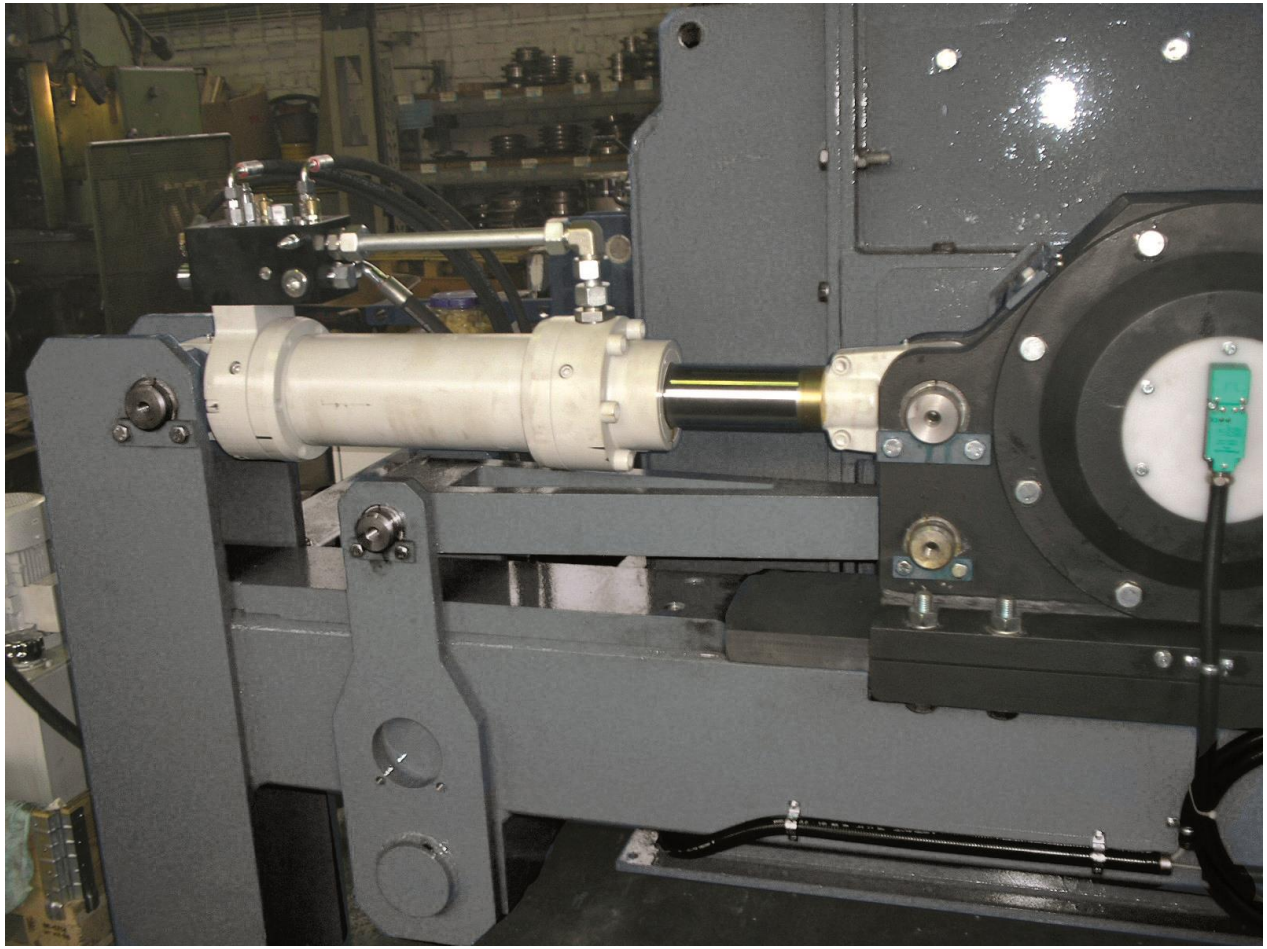
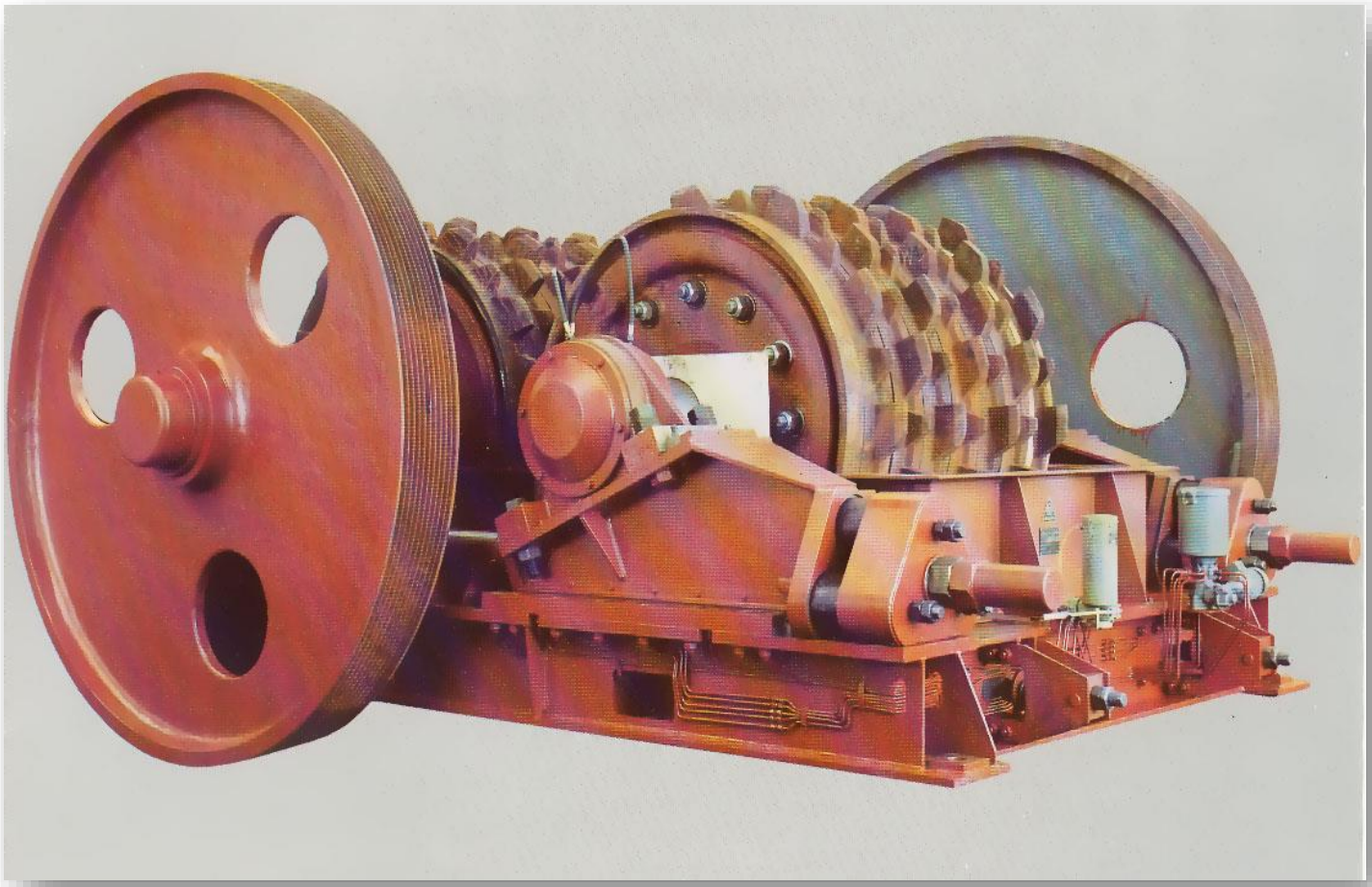


Figura 22

Sistema hidráulico de ajuste del cilindro móvil (Cortesía Sandvik Minerals)

Figura 23



Equipo de 2x250 KW, 95ton. de peso, 2200 mm diámetro y una capacidad de 1250 m^3/h (trituración primaria)

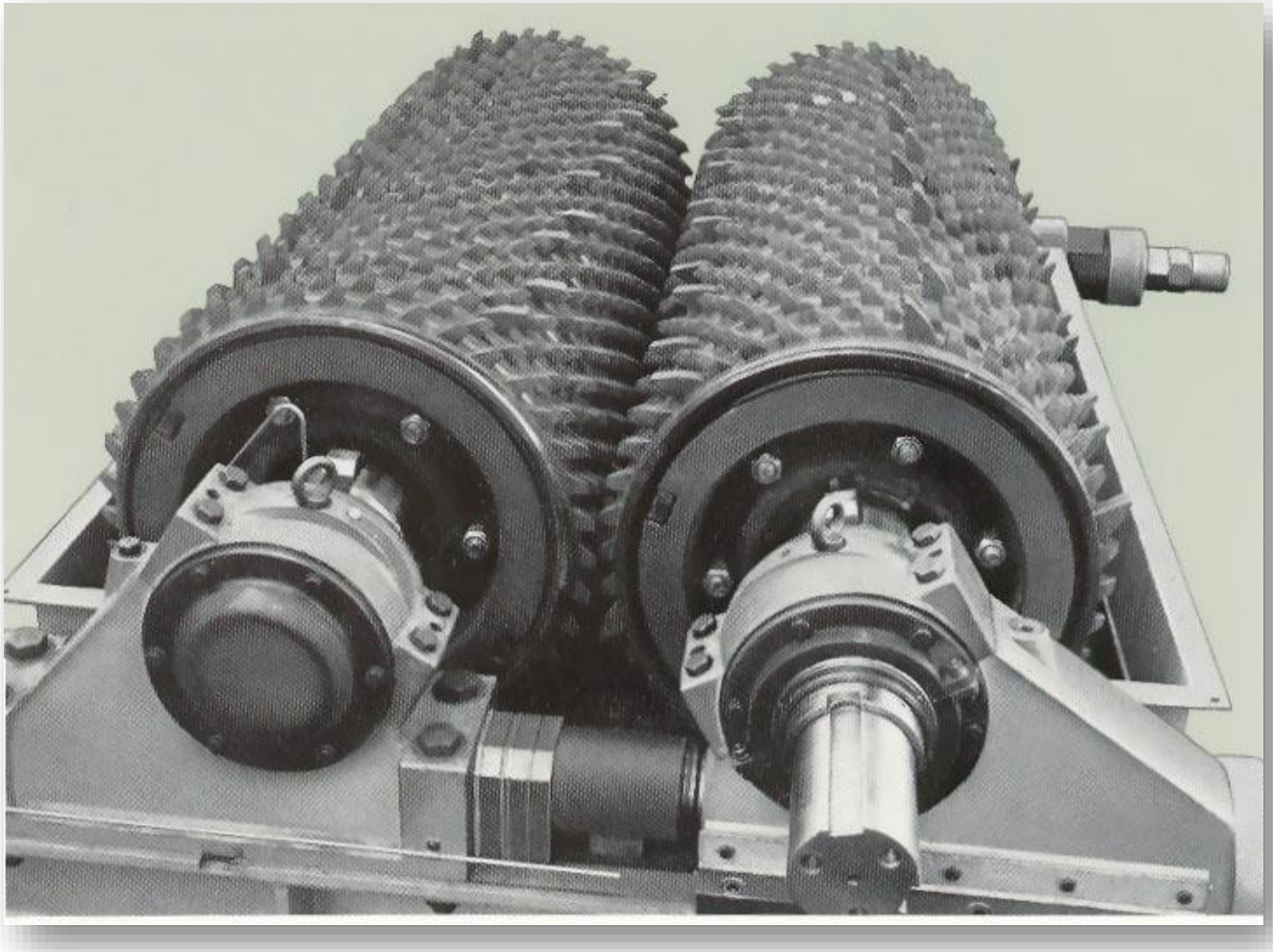
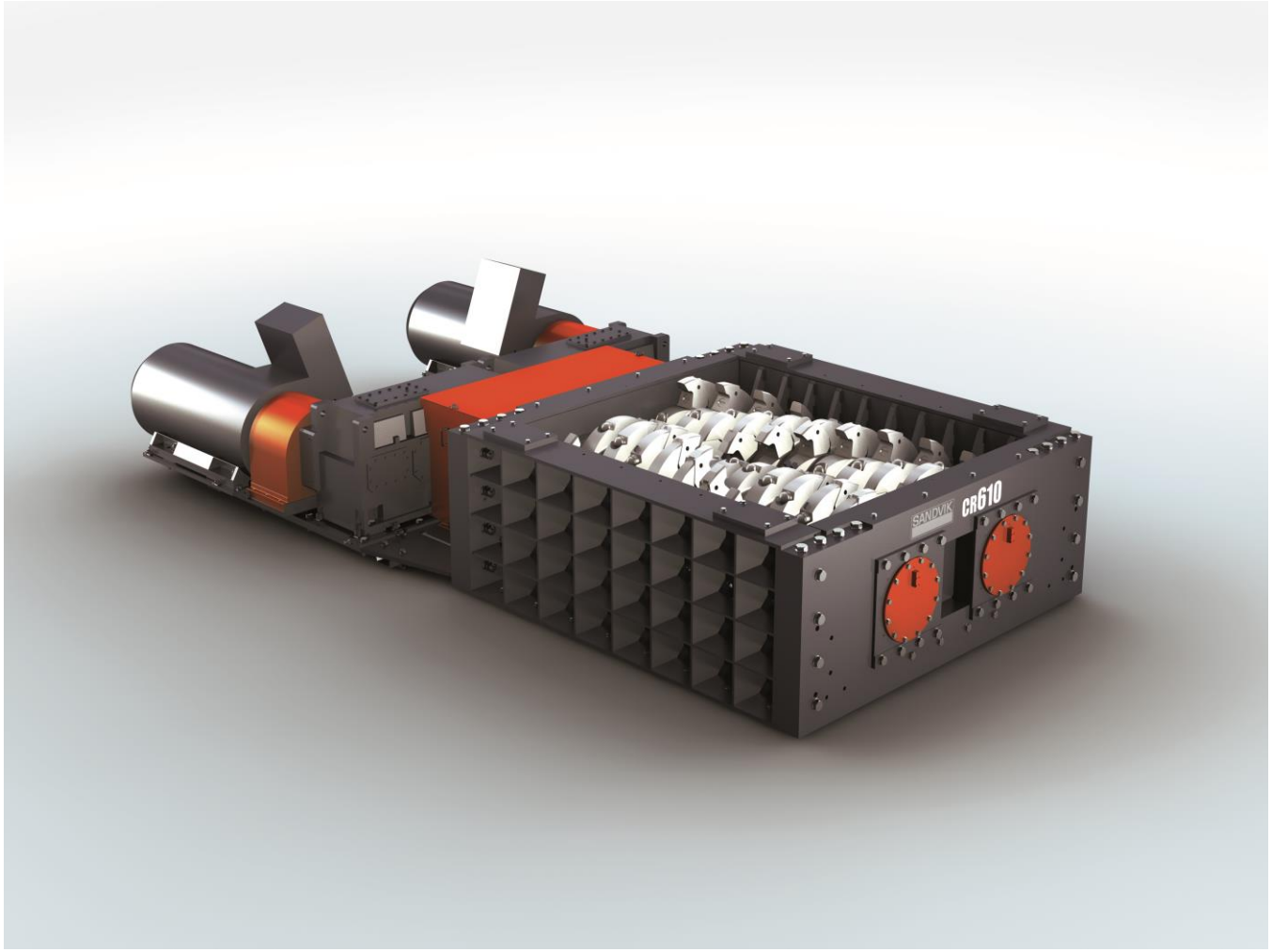


Figura 24

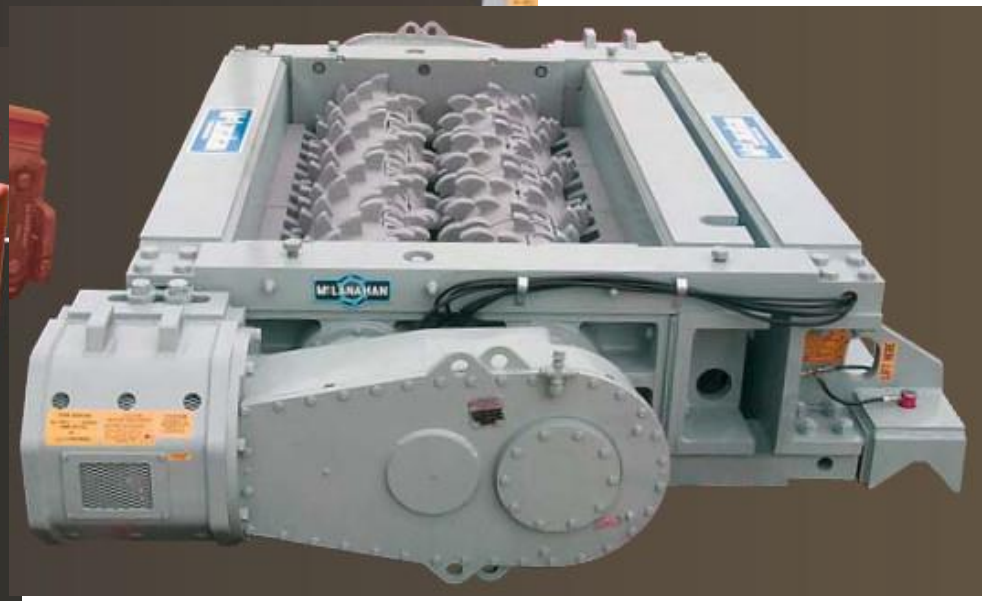
Equipo de 2x75 KW, 1250 mm diámetro (trituración secundaria)

Figura 25



Equipo CR610 de Sandvik

Figura 26



Mclanahan Corporation (DDC = "Direct Drive Crusher")

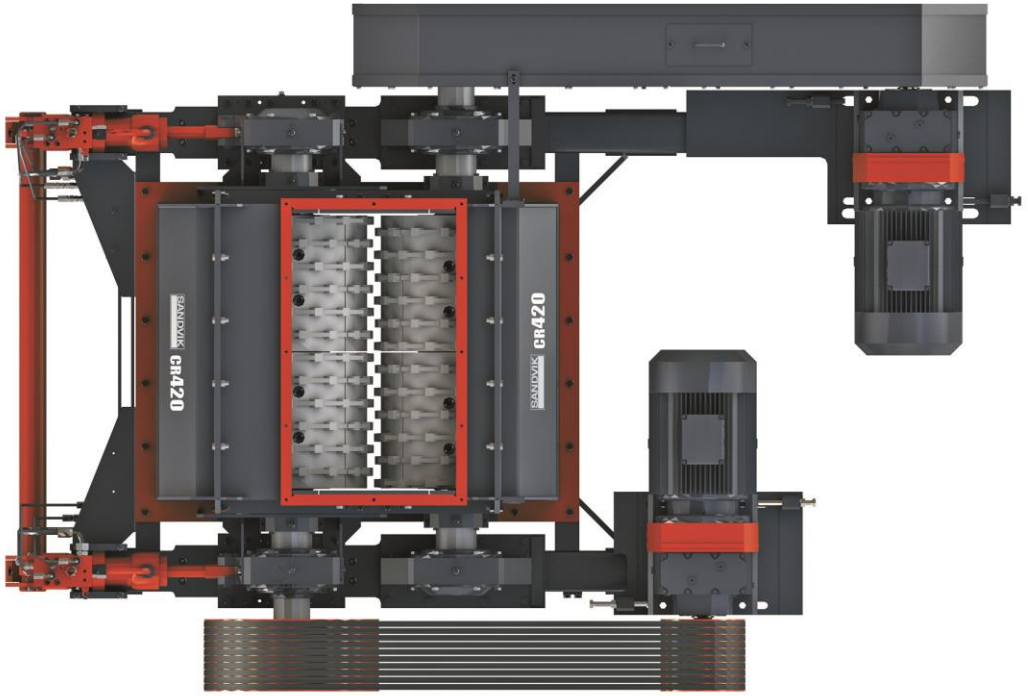
Figura 27

Equipo CR800 Hybrid de Sandvik Minerals, trabajando

Figura 28

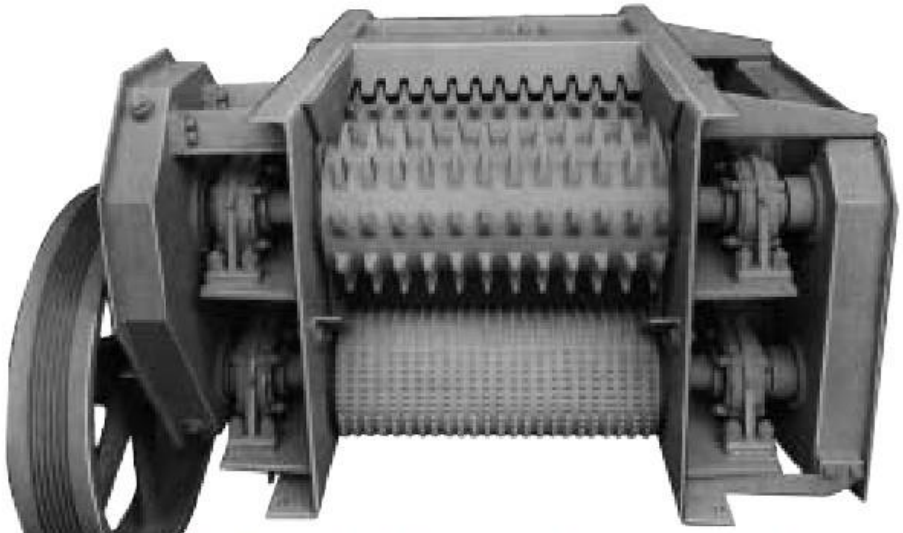
Equipo CR600 Sizer de Sandvik Minerals en puesto primario.

Figura 29



Equipo CR420 de Sandvik Minerals

Equipo de cuatro cilindros de McLanahan Corp.



NOTE: Front of crusher is removed to show access to rolls.

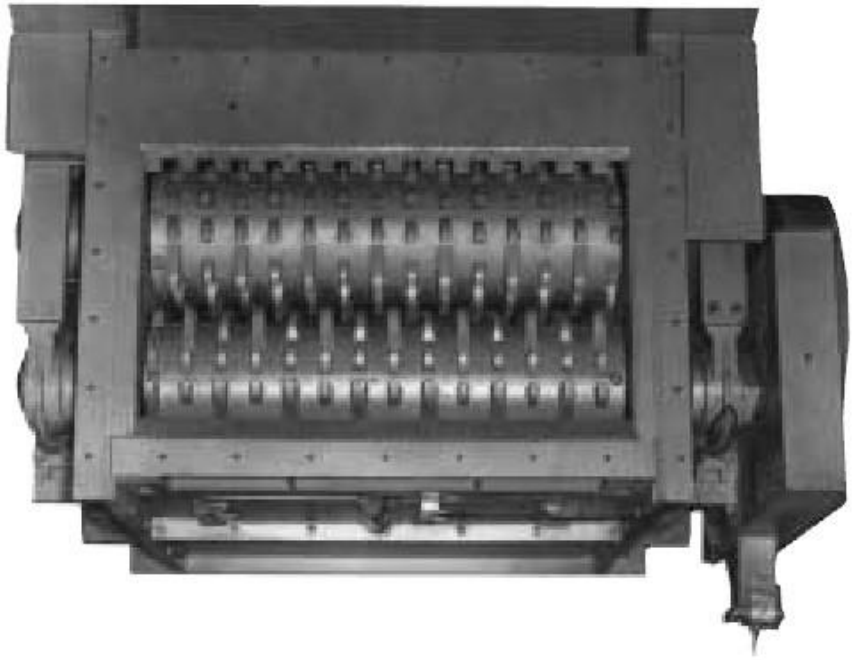
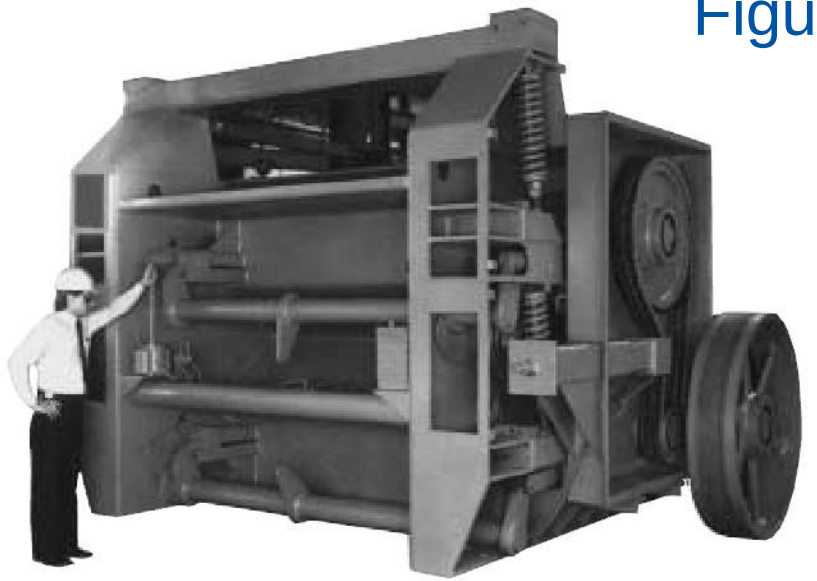


Figura 30



CAPACITY

PRODUCT SIZE	CRUSHER SIZE				
	24"X48"	24"X60"	24"X72"	24"X84"	24"X96"
1 1/2"	485	605	725	845	965
2"	645	805	965	1125	1285
3"	970	1210	1450	1690	1930

NOTE: Capacities in chart above are based upon average friable material weighing 50 PFC and are given in S.T.P.H. Capacities based on standard roll speeds. Under certain conditions, faster roll speeds are possible, yielding much higher capacities. Smaller product sizes can be achieved if maximum feed size is reduced

Principales ventajas de estos equipos:

- **Máquinas robustas, sencillas y de fácil mantenimiento.**
- **Mas económicas que las trituradoras de mandíbulas.**
- **Manejan sin problemas materiales húmedos, pegadizos y friables.**
- **Altura de los equipos reducida.**
- **Dispositivo de seguridad eficaz.**
- **Dan una granulometría muy regular, exenta de grandes fragmentos o de finos.**
- **No se requieren sistemas de eliminación de polvo, ya que generan muy poco.**

Principales desventajas de estos equipos:

- **No son recomendables para tratar minerales muy duros o abrasivos.**
- **Razón de reducción baja (4:1), lo que obliga a disponer de numerosas etapas.**
- **La alimentación debe ser cuidadosa, ya que no permite una acumulación excesiva de material sobre los cilindros (problemas de *ahogamiento y producción de finos*).**
- **Para poder alcanzar buenas razones de reducción se requieren mayores diámetros de cilindros en relación al tamaño de las partículas de alimentación.**

Principales desventajas de estos equipos:

Maximum diameter of rock gripped in crushing rolls relative to roll diameter

Roll diameter (mm)	*Maximum size of rock gripped* (mm) *Reduction ratio*				
	2	*3*	*4*	*5*	*6*
200	6.2	4.6	4.1	3.8	3.7
400	12.4	9.2	8.2	7.6	7.3
600	18.6	13.8	12.2	11.5	11.0
800	24.8	18.4	16.3	15.3	14.7
1000	30.9	23.0	20.4	19.1	18.3
1200	37.1	27.6	24.5	22.9	22.0
1400	43.3	32.2	28.6	26.8	25.7

Dimensionado de un triturador de cilindros dentados

Parámetros principales para el dimensionado de un Triturador de Cilindros Dentados:

- **Diámetro máximo (D_{max}) y Diámetro de los Cilindros.**
- **Capacidad y reglaje.**
- **Granulometría y porcentaje de paso por la malla de reglaje.**
- **Potencia absorbida y potencial motor.**

D_{max} y Diámetro de los Cilindros

- **El diámetro de los cilindros vendrá dado en función del tamaño máximo del bloque de mineral que hay que triturar (D_{max}):**

$$D_{\max} = 0.33 \times \varnothing_{cilindro}$$

- **Trituradoras de Serie Normal**

$$D_{\max} = (0.33 - 0.67) \times \varnothing_{cilindro}$$

- **Trituradoras de Serie Pesada**

Reglaje:

- **En los trituradores de cilindros dentados, el reglaje viene definido por la separación o espacio que existe entre la punta de un diente y la superficie cóncava del cilindro que hay enfrente.**

Capacidad:

- **El dato de la capacidad se obtendrá, bien a partir de información facilitada por los fabricantes de equipos, o bien empleando fórmulas empíricas si se dispone de los datos de aquellas variables que intervienen en ellas.**

Capacidad. Datos de Fabricantes:

hybrid	weight kg U.S. tons	max. feed size mm in	max. capacity mtph stph	A* mm in	B* mm in	C* mm in	D* mm in	E* mm in
CR810/08-20	28000–30000 30.86–33.07	600 23.62	2000 2205	800 31.5	2000 78.74	4300–4500 169.29–177.17	4900–5500 192.91–216.54	2000 78.74
CR810/08-25	35000–40000 38.58–44.09	600 23.62	2500 2756	800 31.5	2500 98.43	4500–4700 177.17–185.04	5400–5900 212.6–232.28	2000 78.74
CR810/08-30	40000–45000 44.09–49.6	600 23.62	3000 3307	800 31.5	3000 118.11	5500–5700 216.54–224.41	5500–6000 216.54–236.22	2000 78.74
CR810/10-15	21000–25000 23.15–27.56	800 31.5	2000 2205	1000 39.37	1500 59.06	3800–4000 149.61–157.48	5000–6250 196.85–246.06	2100 82.68
CR810/10-20	30000–35000 33.07–38.58	800 31.5	2650 2921	1000 39.37	2000 78.74	4500–4700 177.17–185.04	5000–6500 196.85–255.91	2100 82.68
CR810/10-25	40000–45000 44.09–49.6	800 31.5	3350 3693	1000 39.37	2500 98.43	4700–4900 185.04–192.91	5500–6800 216.54–267.72	2100 82.68
CR810/10-30	50000–55000 55.12–60.63	800 31.5	4000 4409	1000 39.37	3000 118.11	5500–5700 216.54–224.41	5500–7000 216.54–275.59	2100 82.68
CR810/12-15	30000–38000 33.07–41.89	1200 47.24	3000 3307	1200 47.24	1500 59.06	3800–4000 149.61–157.48	5900–6250 232.28–246.06	2200 86.61
CR810/12-20	38000–45000 41.89–49.6	1200 47.24	4000 4409	1200 47.24	2000 78.74	4100–4300 161.42–169.29	6100–6350 240.16–250	2200 86.61
CR810/12-25	50000–60000 55.12–66.14	1200 47.24	5000 5512	1200 47.24	2500 98.43	4400–4600 173.23–181.1	6300–6550 248.03–257.87	2200 86.61
CR810/12-30	70000–80000 77.16–88.18	1200 47.24	6000 6614	1200 47.24	3000 118.11	4700–4900 185.04–192.91	6300–6600 248.03–259.84	2200 86.61

Capacidad. Datos de Fabricantes:

hybrid	weight kg U.S. tons	max. feed size mm in	max. capacity mtph stph	A* mm in	B* mm in	C* mm in	D* mm in	E* mm in
CR810/14-20	65000–75000 71.65–82.67	1600 62.99	5350 5897	1400 55.12	2000 78.74	7200–7700 283.46–303.15	6000–6400 236.22–251.97	2900 114.17
CR810/14-25	75000–85000 82.67–93.7	1600 62.99	6650 7330	1400 55.12	2500 98.43	7700–8200 303.15–327.83	6400–6700 251.97–263.78	2900 114.17
CR810/14-30	85000–95000 93.7–104.72	1600 62.99	8000 8818	1400 55.12	3000 118.11	8200–8700 322.83–342.52	6700–7000 263.78–275.59	2900 114.17
CR810/14-35	95000–100000 104.72–110.23	1600 62.99	9300 10251	1400 55.12	3500 137.8	8700–9200 342.52–362.2	7000–7300 275.59–287.4	2900 114.17
CR810/14-40	100000–110000 110.23–121.5	1600 62.99	10650 11740	1400 55.12	4000 157.48	9200–10500 362.2–413.39	7500–7800 295.28–307.09	2900 114.17
CR810/20-25	140000–160000 154.32–176.37	1600 62.99	6650 7330	2000 78.74	2500 98.43	9900–10400 389.76–409.45	8500–8800 334.65–346.46	3700 145.67
CR810/20-40	220000–240000 242.51–264.55	1600 62.99	10650 11740	2000 78.74	4000 157.48	11400–11800 448.82–464.57	8900–9000 350.39–354.33	3700 145.67

Capacidad. Datos de Fabricantes:

center sizer	kg U.S. tons	mm in	mtph stph	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in
CR610/08-12	19000–21000 20.94–23.15	750 29.53	1000 1102	800 31.5	1200 47.24	2200 86.61	1950 76.77	2800–3000 110.24–118.11	4400–4900 173.23–192.91	–	800 31.5
CR610/08-15	21000–23000 23.15–25.35	750 29.53	1250 1378	800 31.5	1500 59.06	2200 86.61	2050 80.71	2900–3100 114.17–122.05	4500–5600 117.17–220.47	–	800 31.5
CR610/08-20	25500–27500 28.11–30.31	750 29.53	1700 1874	800 31.5	2000 78.74	2200 86.61	3000 118.11	3000–3300 118.11–129.92	5000–5800 220.47–228.35	–	800 31.5
CR610/08-25	29000–31500 31.97–34.72	750 29.53	2150 2370	800 31.5	2500 98.43	2200 86.61	3250 127.95	3100–3400 122.05–133.86	6000–6300 236.22–248.03	–	800 31.5
CR610/08-30	33500–39000 36.93–42.99	750 29.53	2550 2810	800 31.5	3000 118.11	2500 98.43	3800 149.61	2700–3900 106.3–153.54	6800–7200 267.72–283.46	7500–8500 295.28–334.65	800 31.5
CR610/08-40	40000–46000 44.09–50.71	750 29.53	3450 3802	800 31.5	4000 157.48	2500 98.43	5000 196.85	4200–4400 165.35–173.23	7800–8400 307.09–330.71	8500–9000 334.65–354.33	800 31.5
CR610/10-20	28000–32000 30.86–35.27	1200 47.24	3450 3802	1000 39.37	2000 78.74	2600 102.36	3000 118.11	3000–3300 118.11–129.92	5500–6000 216.54–236.22	–	1000 39.37
CR610/10-25	33500–38000 36.93–41.89	1200 47.24	4300 4740	1000 39.37	2500 98.43	2800 110.24	3500 137.8	3100–3500 122.05–137.8	6100–6500 240.16–255.91	–	1000 39.37
CR610/10-30	40000–45000 44.09–49.6	1200 47.24	5150 5677	1000 39.37	3000 118.11	3500 137.8	3800 149.61	3500–3900 137.8–153.54	6900–7700 271.65–303.15	7300–9000 287.4–354.33	1000 39.37
CR610/10-35	46000–53000 50.71–58.42	1200 47.24	6000 6614	1000 39.37	3500 137.8	3500 137.8	4500 177.17	4500–4800 177.17–188.98	8000–8350 314.96–328.74	8500–9500 334.65–374.02	1000 39.37
CR610/10-40	50000–57000 55.12–62.83	1200 47.24	6850 7551	1000 39.37	4000 157.48	3500 137.8	5000 196.85	4500–4800 177.17–188.98	9000–9200 354.33–362.2	9100–9500 358.27–374.02	1000 39.37
CR610/14-25	82000–89000 90.39–98.11	1800 70.87	5700 6283	1400 55.12	2500 98.43	3500 137.8	4000 157.48	4300–4800 169.29–188.98	7200–7700 283.46–303.15	7650–8000 301.18–314.96	1400 55.12
CR610/14-30	90000–100000 99.21–110.23	1800 70.87	6850 7551	1400 55.12	3000 118.11	3500 137.8	4400 173.23	4300–4800 169.29–188.98	7600–7850 299.21–309.06	8300–9000 326.77–345.33	1400 55.12
CR610/14-35	105000–115000 115.74–126.77	1800 70.87	8000 8819	1400 55.12	3500 137.8	3500 137.8	5000 196.85	4500–4800 177.17–188.98	8000–8350 314.96–328.74	8900–9500 350.39–374.02	1400 55.12
CR610/14-40	120000–130000 132.28–143.3	1800 70.87	9150 10086	1400 55.12	4000 157.48	3600 141.73	5100 200.79	4500–4800 177.17–188.98	9200–9350 362.2–368.11	9100–9500 358.27–374.02	1400 55.12

Capacidad. Datos de Fabricantes:

Mclanahan Corporation

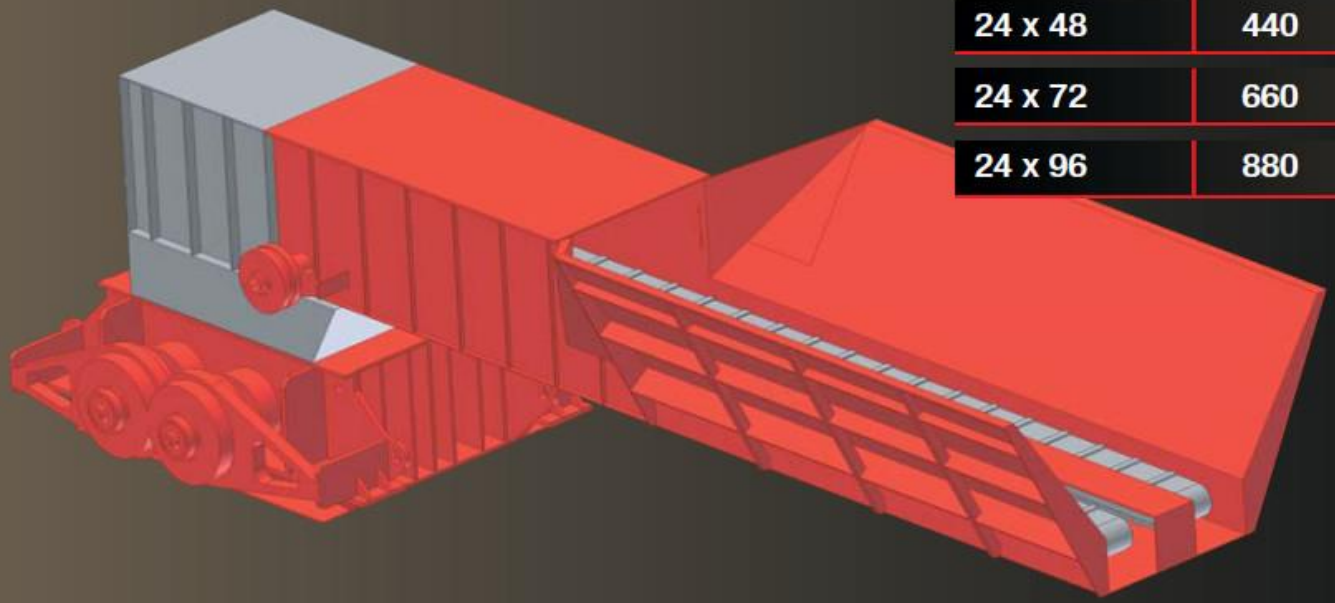
Primary & Secondary Sizing

SIZE	PRODUCT SIZE 4" (101mm) STPH	4" (101mm) MTPH	5" (127mm) STPH	5" (127mm) MTPH	6" (152mm) STPH	6" (152mm) MTPH	8" (203mm) STPH	8" (203mm) MTPH	10" (254mm) STPH	10" (254mm) MTPH
20 x 48	795	720	992	900	1190	1080	1587	1440	1984	1800
20 x 72	1192	1080	1488	1350	1785	1620	2380	2160	2976	2700
20 x 96	1590	1440	1984	1800	2380	2160	3174	2880	3968	3600

CAPACITIES ARE BASED UPON AVERAGE FRIABLE MATERIAL (50lb/ft³ OR 800kg/m³) AND MAY VARY DEPENDING UPON APPLICATION DETAILS.

Tertiary Sizing

SIZE	PRODUCT SIZE 2" (50mm) STPH	2" (50mm) MTPH	3" (76mm) STPH	3" (76mm) MTPH
24 x 48	440	400	660	600
24 x 72	660	600	992	900
24 x 96	880	800	1322	1200



Capacidad. Fórmulas empíricas:

Barry A. Wills

$$T = 188.5 \cdot N \cdot D \cdot W \cdot s \cdot \delta \quad kg \cdot h^{-1}$$

Donde:

- ***T*** **= Capacidad de la máquina (kg·h^{-1})**
- ***N*** **= velocidad de los cilindros (rev·min^{-1})**
- ***D*** **= Diámetro del cilindro (m)**
- ***W*** **= Ancho del cilindro (m)**
- ***s*** **= Distancia entre los cilindros (reglaje) (m)**
- **δ = densidad del material de alimentación (t·m^{-3})**

Capacidad. Fórmulas empíricas:

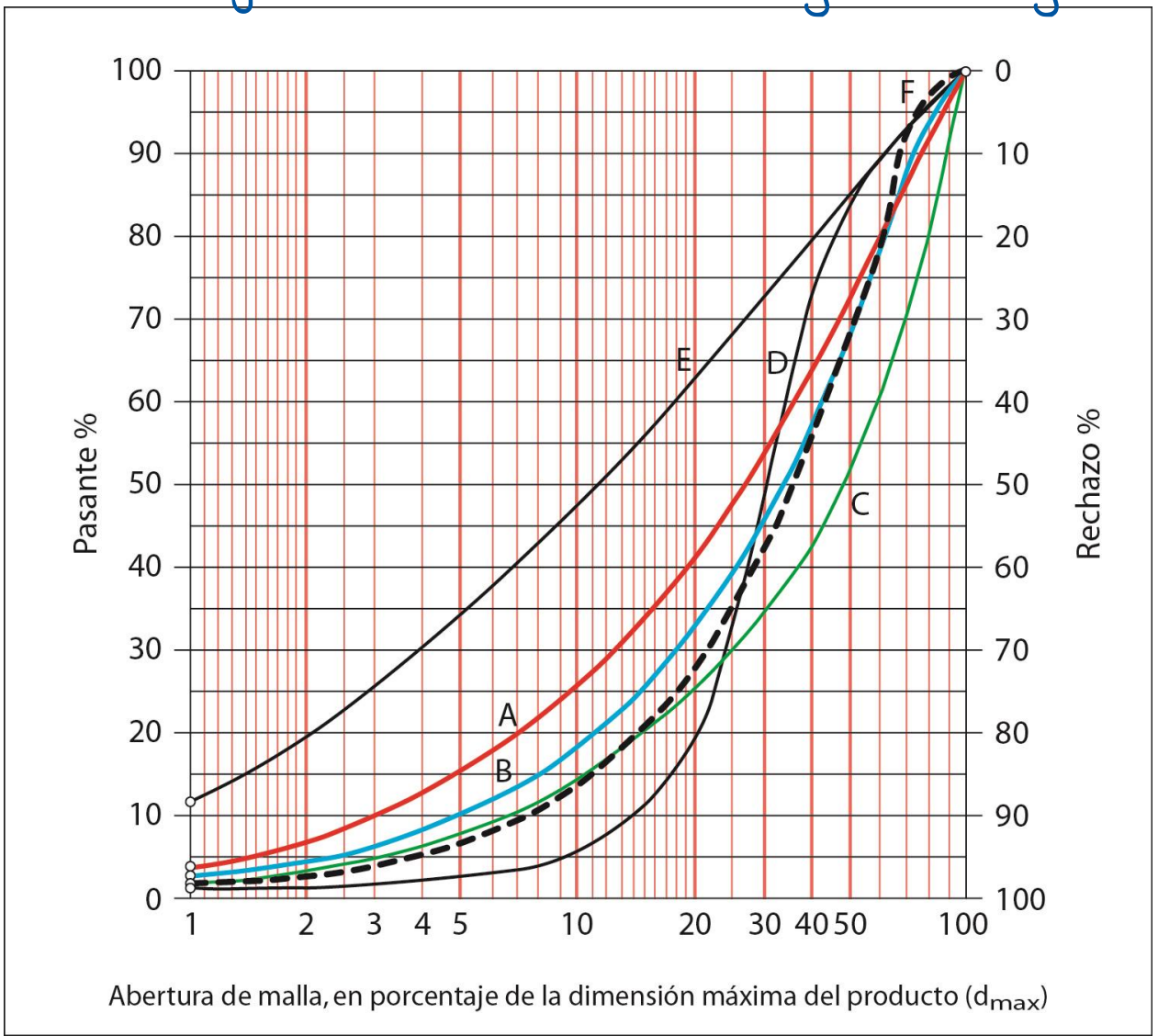
Para carbones

$$T = k \cdot d \cdot v \cdot L \quad t/h$$

- ***T*** **= Capacidad de la máquina (t/h)**
- ***k*****= Coeficiente que depende del tipo de mineral a tratar:**
  - ***k*** **= 0.4 para antracitas.**
  - ***k*** **= 0.5 para carbón duro.**
  - ***k*** **= 0.6 para carbón medio.**
  - ***k*** **= 0.8 para carbón blando o friable.**
- ***d*** **= Dimensión de la malla por la que pasa el 95% del material triturado, d_{95} (mm)**
- ***v*** **= Velocidad periférica de los cilindros (m/s)**
- ***L*** **= Longitud de los cilindros (m)**

Granulometría:

La granulometría del producto obtenido con un triturador de cilindros se asemeja a la curva F de la siguiente figura.



Granulometría:

. La curva anterior (curva a trazos negros) representa en el eje de abscisas la abertura de malla cuadrada, dado como % de la dimensión máxima del producto, y en ordenadas los % de paso o rechazo del material para dicha malla.

Normalmente el paso del producto obtenido, será de un 80% a 85% por la criba de abertura igual al reglaje.

Cálculo de la Potencia

La potencia absorbida, según Bond, viene dada por:

$$P_a = 10 \cdot w_i \cdot \frac{1}{0.907} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \cdot Q$$

Siendo:

- **P_a = Potencia absorbida (kW).**
- **Q = Capacidad de la giratoria (tph).**
- **Nota: si w_i se da en kWh/t, no hace falta dividir por 0.907.**
- **La potencia útil para un triturador de cilindros dentados es igual a: $P_m = 1.3 \cdot P_a$**

Trituradores de Cilindros Lisos

- **Presentan la misma morfología que la expuesta para el caso de los equipos de trituración de cilindros dentados, con la única diferencia que en lugar de incorporar cilindros dentados montan cilindros lisos.**

- **Pueden presentarse trituradores ofreciendo un diseño de cilindro con acanaladuras con el fin de mejor la fricción y mejorar el arrastre del mineral hacia la zona de compresión y trituración.**

- **Estas acanaladuras están realizadas sobre placas individuales que se montan sobre el cilindro forrándolo completamente.**

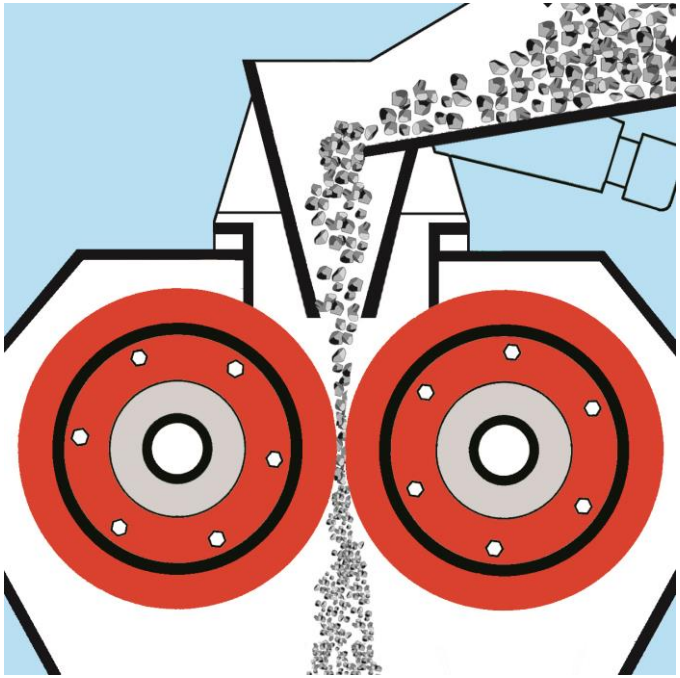
- **La alimentación puede ser a tragante lleno, donde se mantendrá siempre mineral sobre los dos rodillos. Esta situación da lugar a esfuerzos de compresión y roce sobre las partículas minerales y como consecuencia el equipo trabaja a su máxima capacidad aunque con el inconveniente de una mayor producción de finos.**

- **O puede ser en una capa, lo que exige que el material se alimente de forma cuidada (capa monograno). Favoreciéndose la compresión casi pura entre los cilindros y reduciéndose la producción de finos, inconveniente: menor capacidad.**

Trituradores de Cilindros Lisos

- **La razón de reducción de estos equipos suele estar en 5:1. Las capacidades pueden llegar a las 250 t/h.**

Figura 31

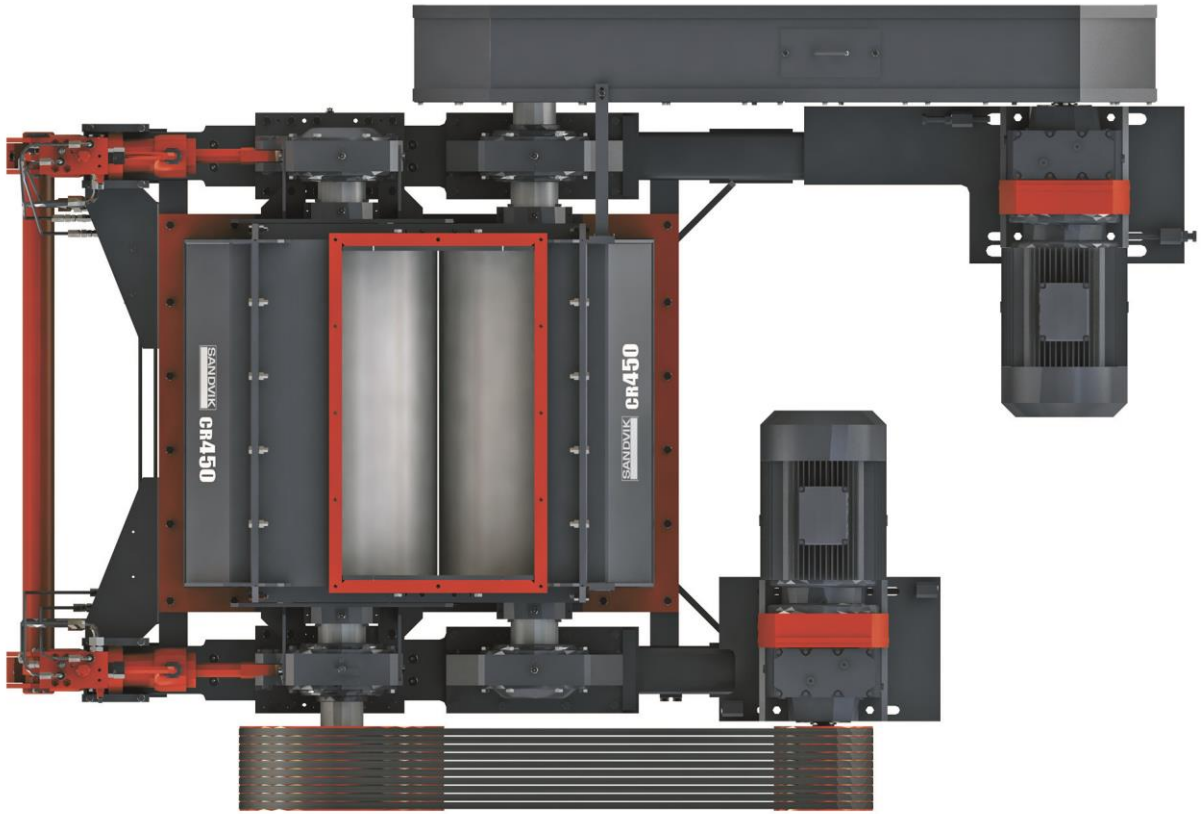


Alimentación en una capa

- **Este tipo de equipos se sitúan en etapas secundarias, terciarias y en molienda gruesa (2-3 mm).**

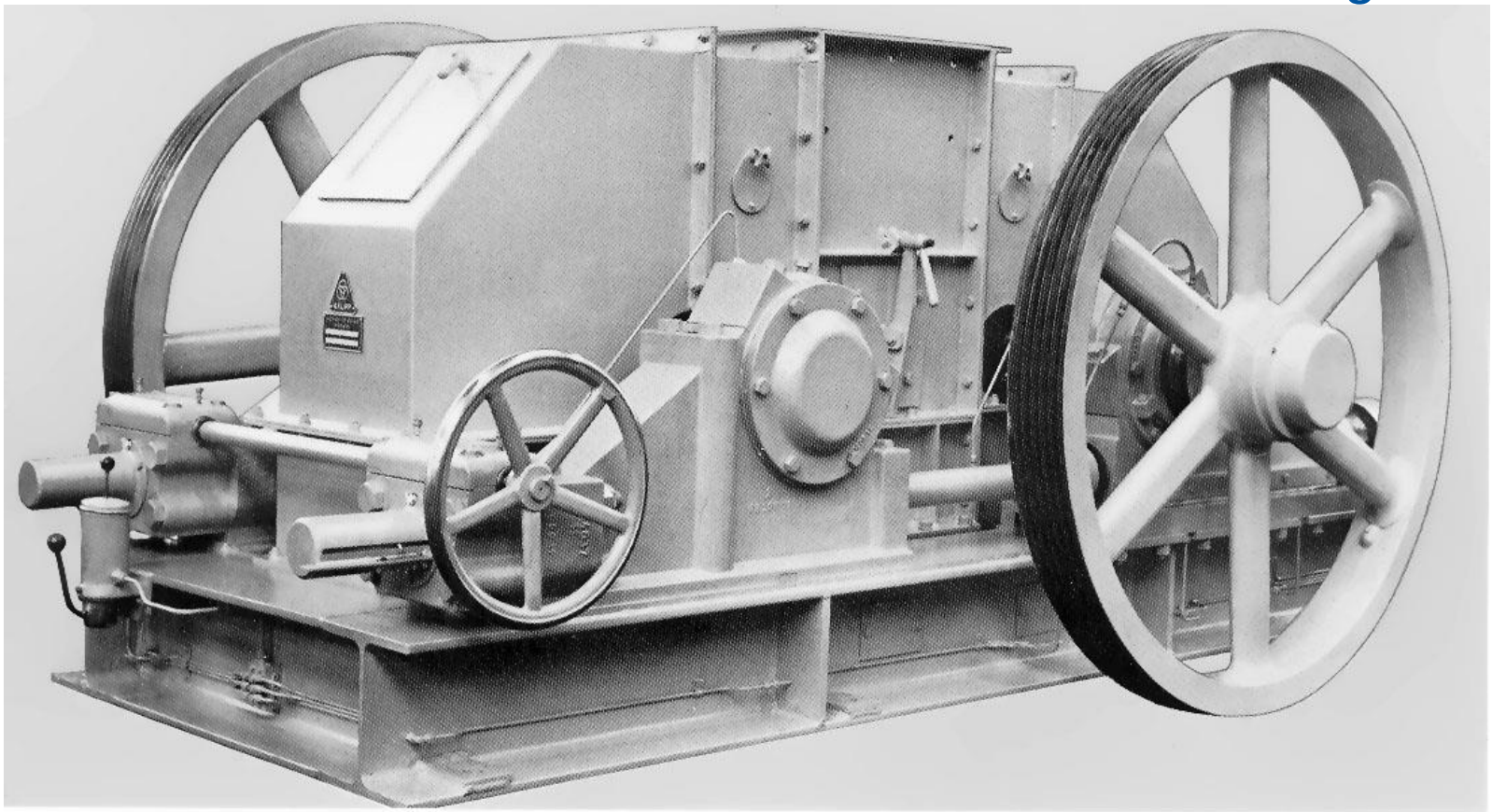
- **Se utilizan en la trituración de materiales como sales, carbón, coque, vidrio (reciclado), fertilizantes. Tienen una fuerte competencia por parte de los impactores o molinos de martillos (mineral blandos o de dureza media) y por los conos (minerales duros y abrasivos).**

Figura 32



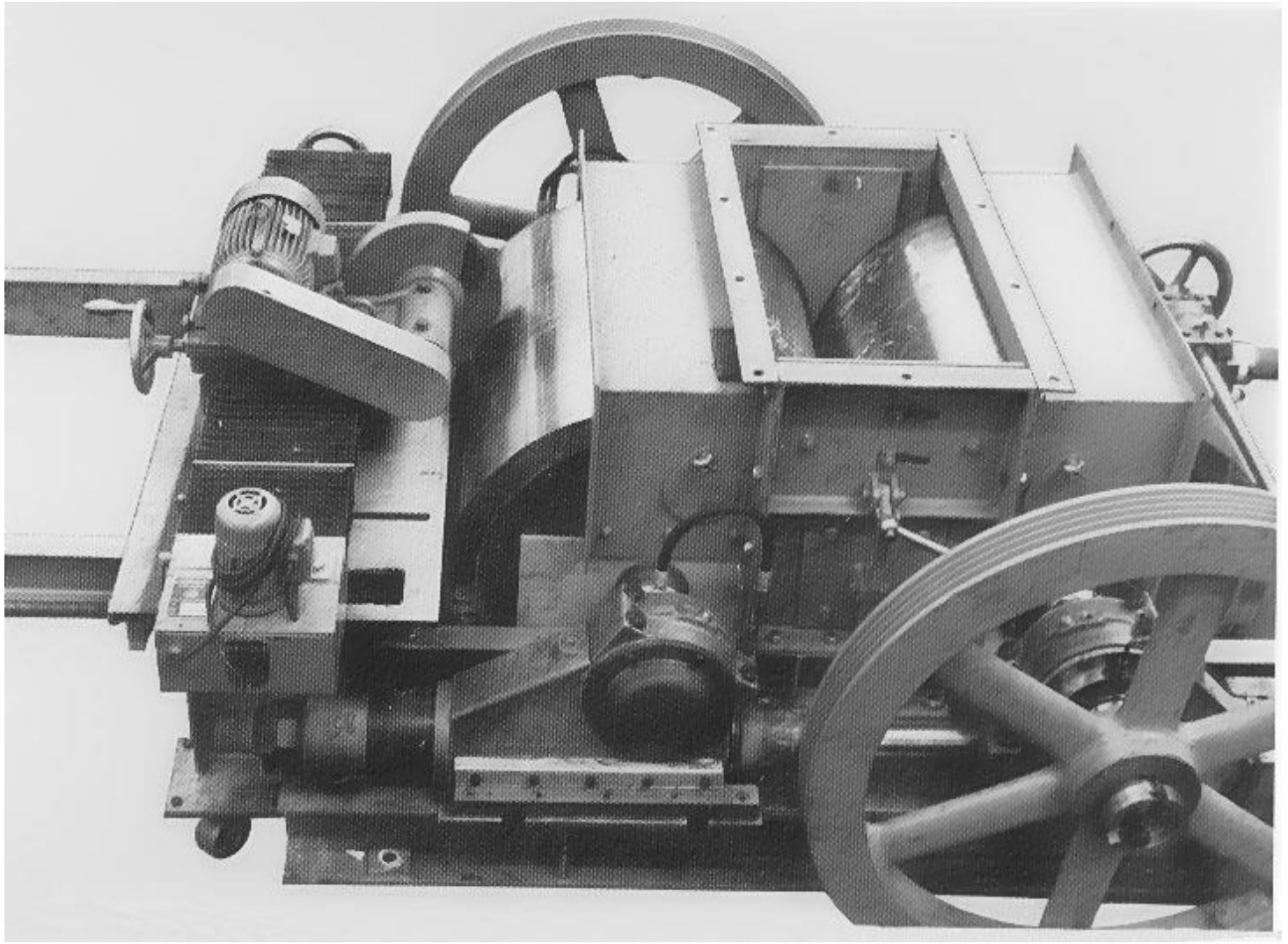
Equipo CR450 de Sandvik Minerals

Figura 33



Equipo de ∅ 1.8 m, 58 ton., 2x75 KW, 140 tph de Krupp Fördertechnik

Figura 34



Equipo de Krupp Fördertechnik

Principales ventajas de estos equipos:

- **Máquinas robustas, sencillas y de fácil mantenimiento.**
- **Dispositivo de seguridad contra intriturables eficaz.**
- **Manejan sin problemas materiales húmedos, pegadizos y friables.**
- **Altura de los equipos reducida.**
- **Dan una granulometría muy regular, exenta de grandes fragmentos o de finos, sobre todo a una sola capa y en circuito cerrado.**

Principales desventajas de estos equipos:

- **No son recomendables para tratar minerales muy duros o abrasivos.**
- **Razón de reducción de (6:1), trabajando a tragante lleno, pero con una producción excesiva de finos.**
- **La alimentación debe ser cuidadosa, ya que no permite una acumulación excesiva de material sobre los cilindros (problemas de *ahogamiento y producción de finos*).**
- **Exige un incremento importante del diámetro de los cilindros cuando se enfrentan a pequeños incrementos del tamaño de alimentación.**

Dimensionado de un triturador de cilindros lisos

Parámetros principales para el dimensionado de un Triturador de Cilindros Lisos:

- **Diámetro máximo (D_{max}) y Diámetro de los Cilindros.**
- **Capacidad y reglaje.**
- **Granulometría y porcentaje de paso por la malla de reglaje.**
- **Potencia absorbida y potencial motor.**

D_{max} y Diámetro de los Cilindros

- **El diámetro de los cilindros (∅) vendrá dado en función del tamaño máximo del bloque de mineral que hay que triturar (D_{max}):**

$$\varnothing_{cilindro} \geq 14 \times D_{\max}$$

- **Para minerales secos (coeficiente de fricción elevado) y velocidad de los cilindros baja (4-6 m/s)**

$$\varnothing_{cilindro} \geq 33 \times D_{\max}$$

- **Para minerales húmedos (coeficiente de fricción bajo) y velocidad de los cilindros alta (8-10 m/s)**

Reglaje:

- **En los trituradores de cilindros lisos, el reglaje viene definido por la separación o espacio que existe entre las caras externas de los cilindros a través de la línea que une los ejes.**

Capacidad:

- **El dato de la capacidad se obtendrá, bien a partir de información facilitada por los fabricantes de equipos, o bien empleando fórmulas empíricas si se dispone de los datos de aquellas variables que intervienen en ellas.**

Capacidad. Fórmulas empíricas:

$$T = 3.6 \cdot L \cdot e \cdot v \cdot \rho_a \quad t/h$$

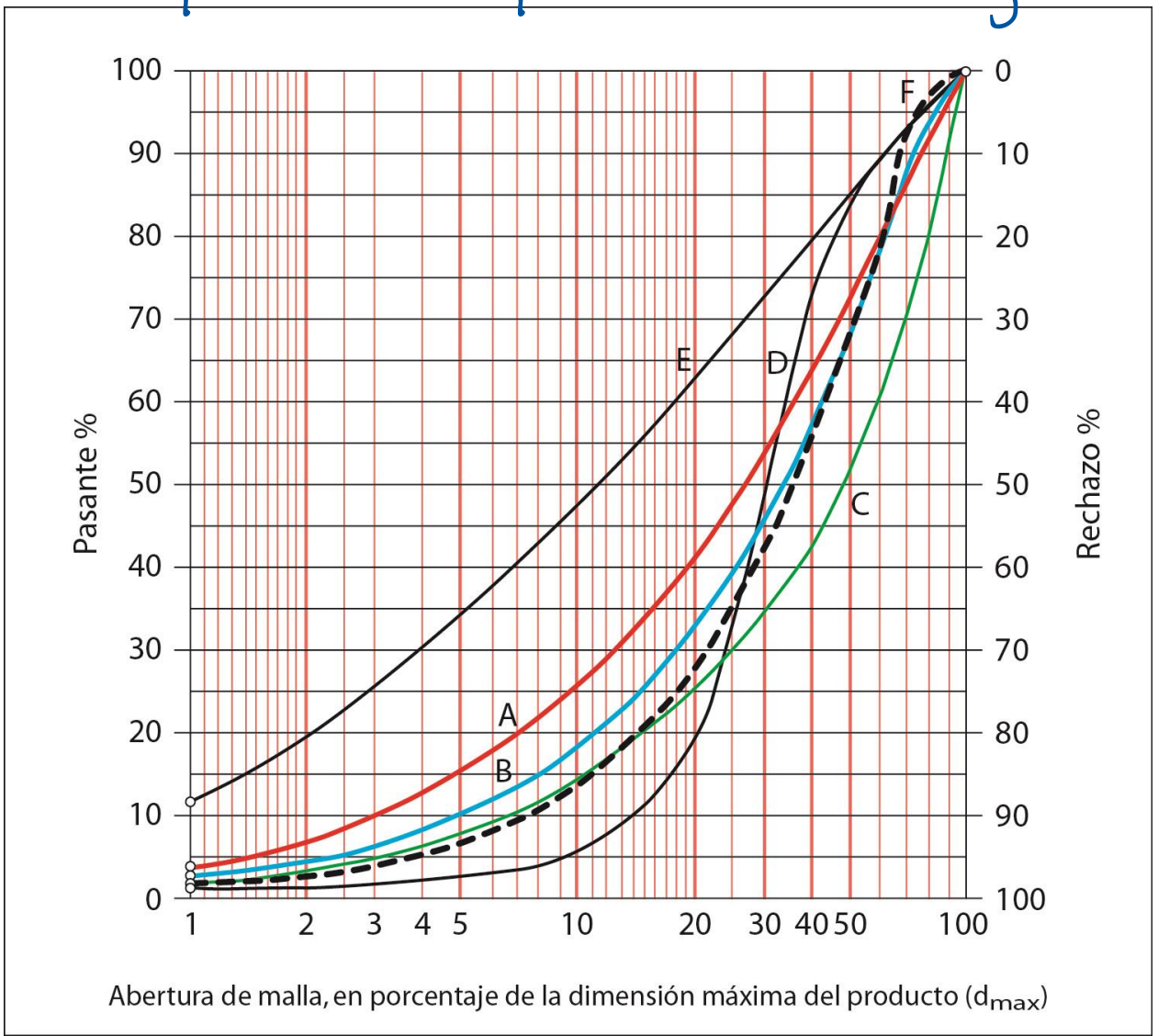
- ***T*** **= Capacidad de la máquina (t/h)**
- ***L*** **= Longitud del cilindro (m)**
- ***e*** **= Separación entre los cilindros, reglaje (mm)**
- ***v*** **= Velocidad periférica de los cilindros (m/s)**
- ρ_a **= Densidad aparente (t/m^3)**

Capacidad. Datos de Fabricantes:

smooth roll crusher	weight[1,2] kg U.S. tons	max. feed size mm in	max. capacity [3] mtph stph	A[1] mm in	B[1] mm in	C[1,2] mm in	D[1,2] mm in	E[1] mm in
CR450/06-05	4500–5500 4.96–6.06	10 0.39	12 13.23	600 23.62	500 19.69	1700–1900 66.93–74.8	3200–3400 125.98–133.86	1100 43.31
CR450/06-10	7500–8500 8.27–9.37	10 0.39	25 27.56	600 23.62	1000 39.37	2300–2500 90.55–98.43	3600–3900 141.73–153.54	1250 49.21
CR450/08-05	7000–8000 7.72–8.82	15 0.59	15 16.53	800 31.5	500 19.69	1700–1900 66.93–74.8	3300–3700 129.92–145.67	1250 49.21
CR450/08-10	9500–10500 10.47–11.57	15 0.59	30 33.07	800 31.5	1000 39.37	2500–2700 98.43–106.3	4100–4300 161.42–169.29	1350 53.15
CR450/10-10	18000–20000 19.84–22.05	25 0.98	35 38.58	1000 39.37	1000 39.37	2500–2700 98.43–106.3	5000–5200 196.85–204.72	1800 70.87
CR450/10-15	23000–25000 25.35–27.56	25 0.98	60 66.14	1000 39.37	1500 59.06	3000–3200 118.11–125.98	5000–5200 196.85–204.72	1950 76.77
CR450/12-10	22000–24000 24.25–26.46	35 1.38	40 44.09	1200 47.24	1000 39.37	2800–3000 110.24–118.11	5900–6250 232.28–246.06	2100 82.68
CR450/12-15	27000–29000 29.76–31.97	35 1.38	65 71.65	1200 47.24	1500 59.06	3400–3600 133.86–141.73	5900–6250 232.28–246.06	2100 82.68

Granulometría:

La granulometría del producto obtenido con un triturador de cilindros lisos dependerá del tipo de alimentación y del circuito.



Granulometría:

. La curvas anteriores representan en el eje de abscisas la abertura de malla cuadrada, dado como % de la dimensión máxima del producto, y en ordenadas los % de paso o rechazo del material para dicha malla.

En la figura anterior se tiene que:

- Curva C: Cilindros alimentados en una sola capa y en circuito abierto.
- Curva D: Cilindros alimentados en una sola capa y en circuito cerrado.
- Curva E: Cilindros alimentados a tragante lleno y en circuito cerrado.

Normalmente el paso del producto obtenido, será de un 85% por la criba de abertura igual al reglaje.

Cálculo de la Potencia

La potencia absorbida, según Bond, viene dada por:

$$P_a = 10 \cdot w_i \cdot \frac{1}{0.907} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \cdot Q$$

Siendo:

- **P_a = Potencia absorbida (kW).**
- **Q = Capacidad de la giratoria (tph).**
- **Nota: si w_i se da en kWh/t, no hace falta dividir por 0.907.**
- **La potencia útil para un triturador de cilindros dentados es igual a: $P_m = 1.3 \cdot P_a$**

Trituradores de un Solo Cilindro

- **Equipos compuestos por un cilindro, generalmente dentado, y por una placa o mandíbula, pivotante o fija, anclada al bastidor del equipo.**

Equipo de 53 ton. y 1600 mm ∅ (AUBEMA)

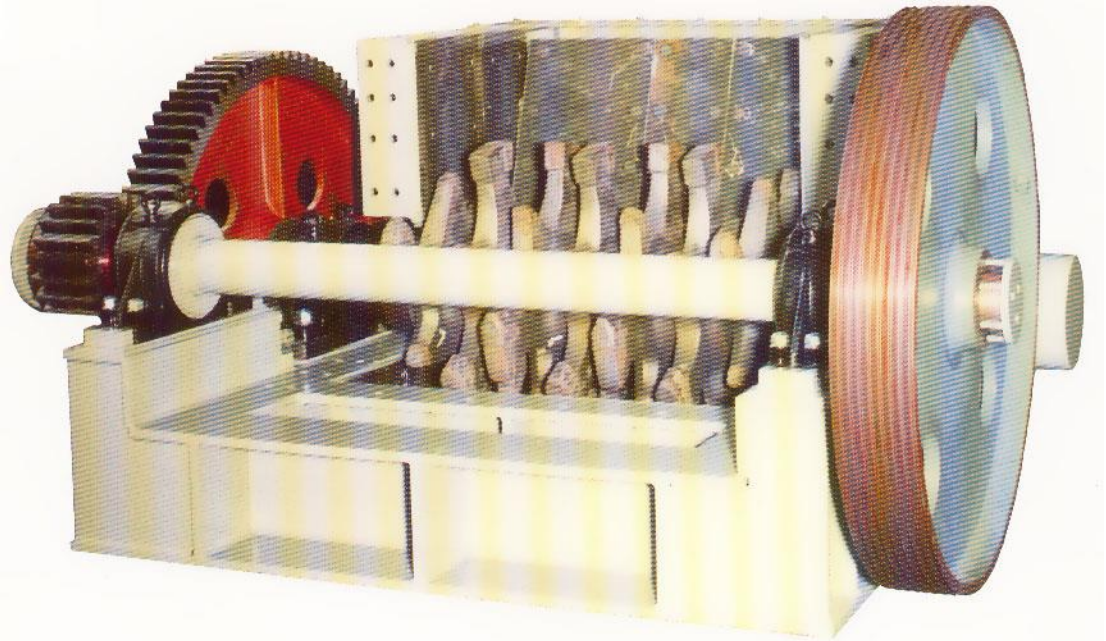
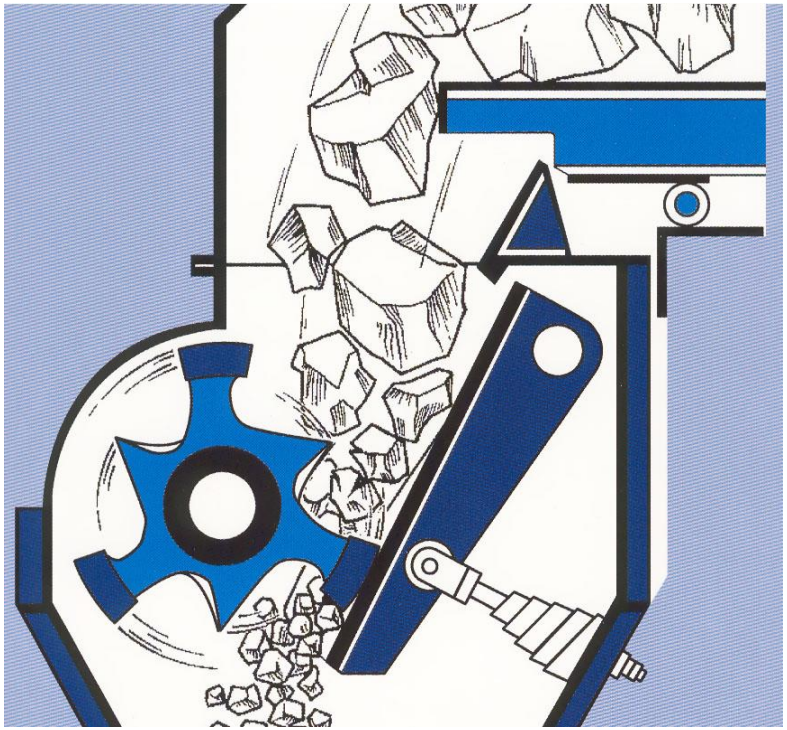


Figura 35

- **Con el giro del cilindro dentado el material es arrastrado y comprimido contra la plancha metálica, donde será triturado por compresión y cizalladura, hasta alcanzar el tamaño que le permita pasar por los dientes del cilindro y dejar la máquina como producto final.**

- **El bastidor está fabricado de acero fundido donde se incorporan los cojinetes de los ejes y contra-ejes y el sistema de suspensión de la placa.**

Figura 36

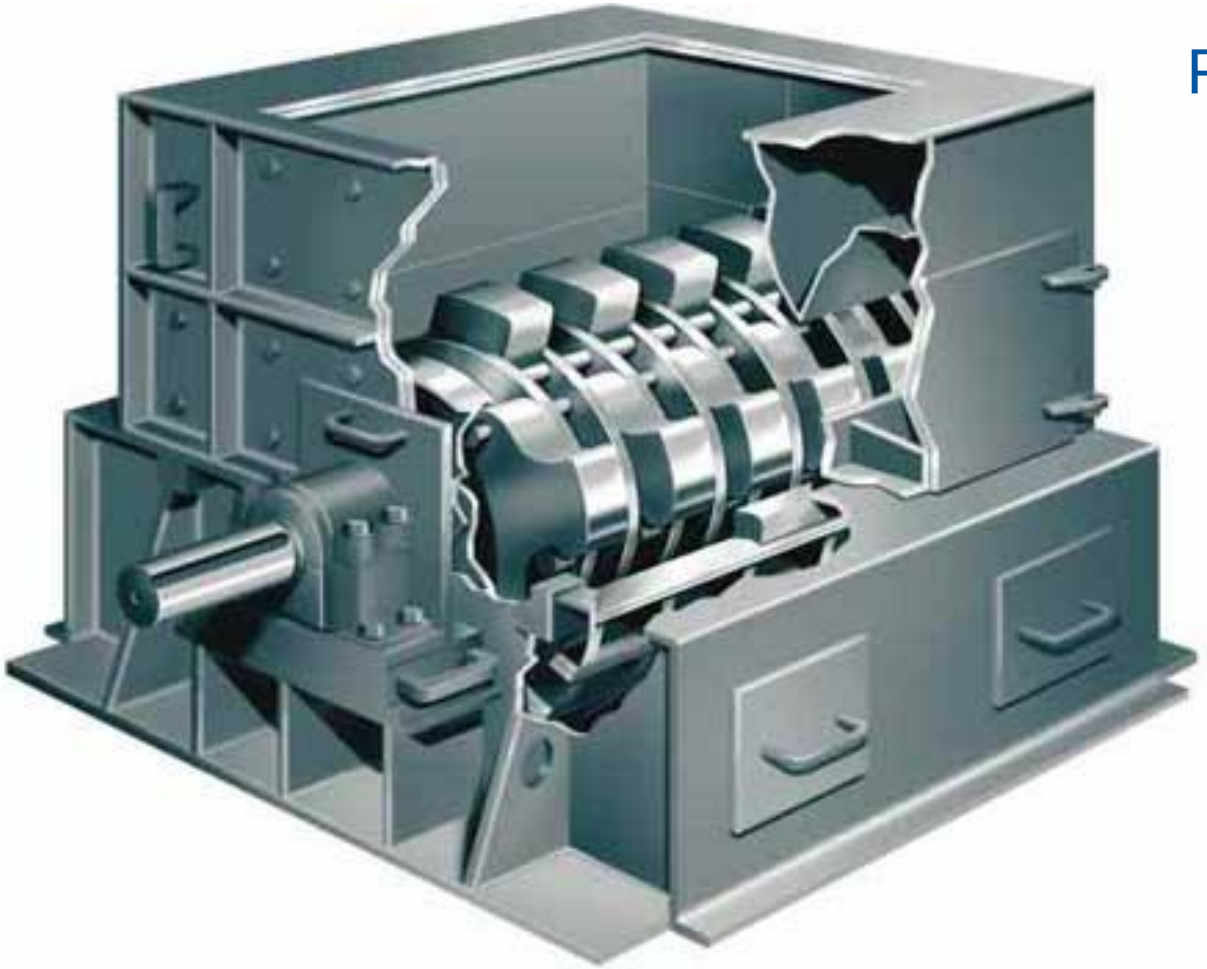


Equipo de AUBEMA

- **El cilindro se fabrica en acero y forrado por la camisa porta-dientes.**

- **Por otro lado, la mandíbula está protegida por placas de acero al manganeso (antidesgaste), acanaladas. Esta plancha es regulable y sirve de sistema de seguridad contra los intriturables.**

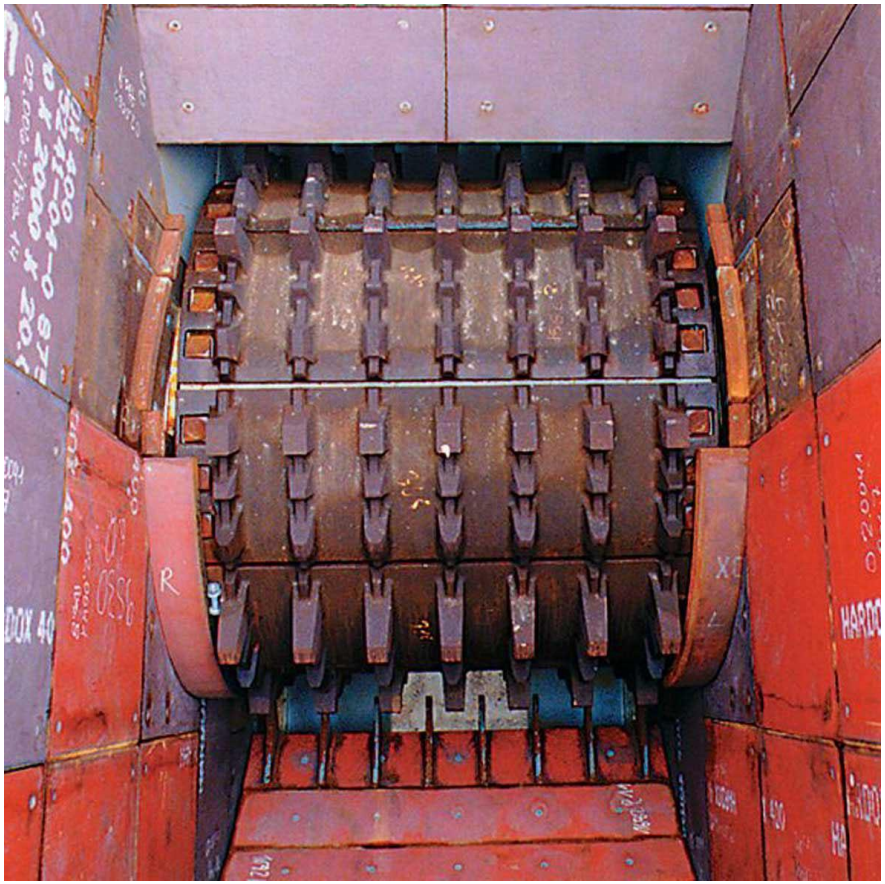
Figura 37



Equipo Jeffrey-Rader

Trituradores de un Solo Cilindro

- **En equipos de tamaño grande la camisa que envuelve al cilindro dispone de alveolos o soportes para anclar los dientes de forma individual.**



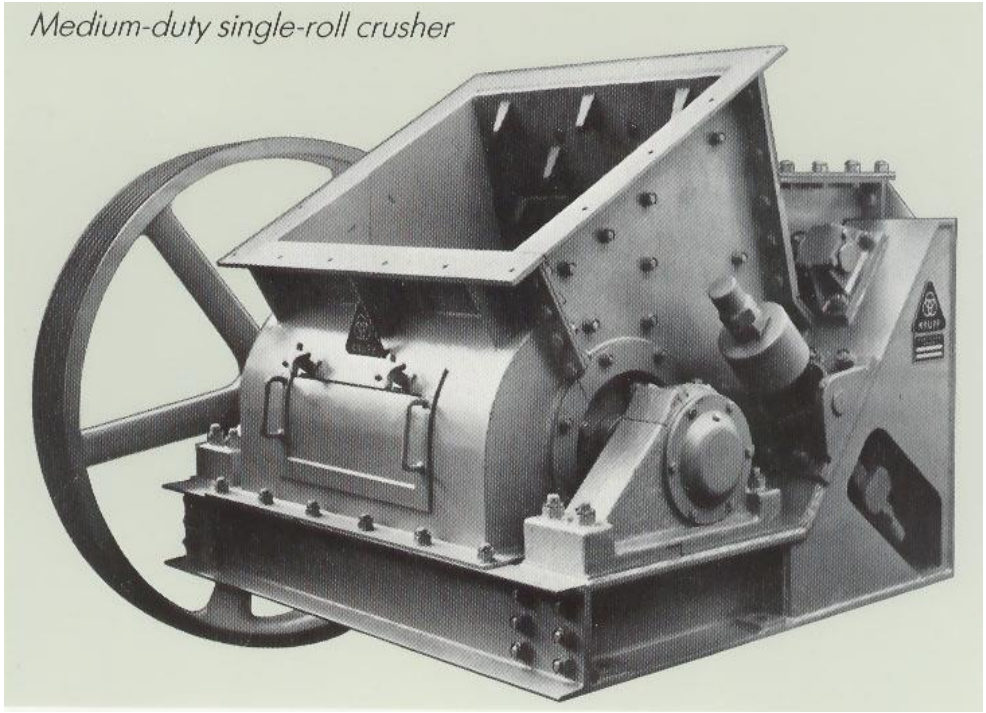
Equipo de 150 tph y 1600 x 1400 mm ∅ (Cortesía de FAM), para la trituración de yeso

Figura 38

- **En modelos de menor tamaño, los dientes están fundidos a las placas individuales que conforman el forro o camisa del cilindro.**

Trituradores de un Solo Cilindro

- **La razón de reducción es estas máquinas es de 4-6:1.**



Equipo de 1500 mm ∅ (Krupp Fördertechnik), para trabajos con una exigencia media.

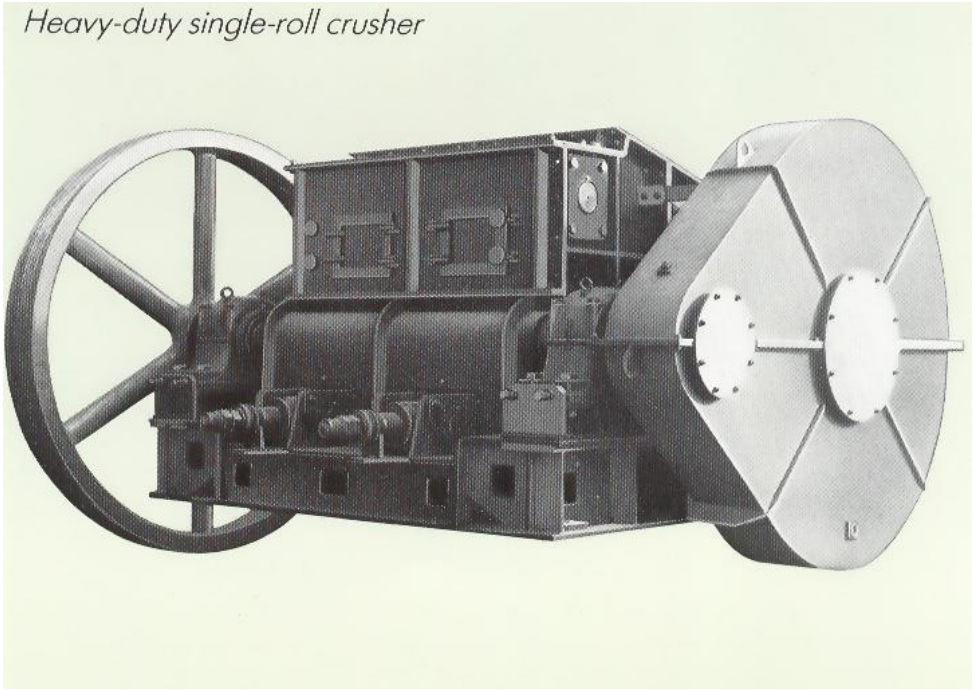
Figura 39

- **En trituración primaria admitirán bloques de 1500 mm para proporcionar un tamaño final comprendido entre 80-300 mm (según equipo).**

- **Al igual que los anteriores modelos son adecuados para triturar carbones, fosfatos, calizas, sales, esquistos, material de demolición, etc.**

Trituradores de un Solo Cilindro

- **La selección de estos equipos se lleva a cabo relacionando el diámetro (∅) del equipo y el tamaño máximo de los fragmentos de la alimentación (D_{max}).**



Equipo de Krupp Fördertechnik, para trabajos con una exigencia alta (etapas primarias).

Figura 40

- **Materiales de dureza media:** $\varnothing_{cilindro} > 2 \times D_{\max}$
- **Materiales blandos:** $\varnothing_{cilindro} > 1.5 \times D_{\max}$
- **Al igual que lo expuesto anteriormente, la selección se puede llevar a cabo empleando los datos técnicos que suministran los numerosos fabricantes.**

Figura 41

Equipo de 150 tph y 1600 x 1400 mm ∅ (Cortesía de FAM), para la trituración de yeso

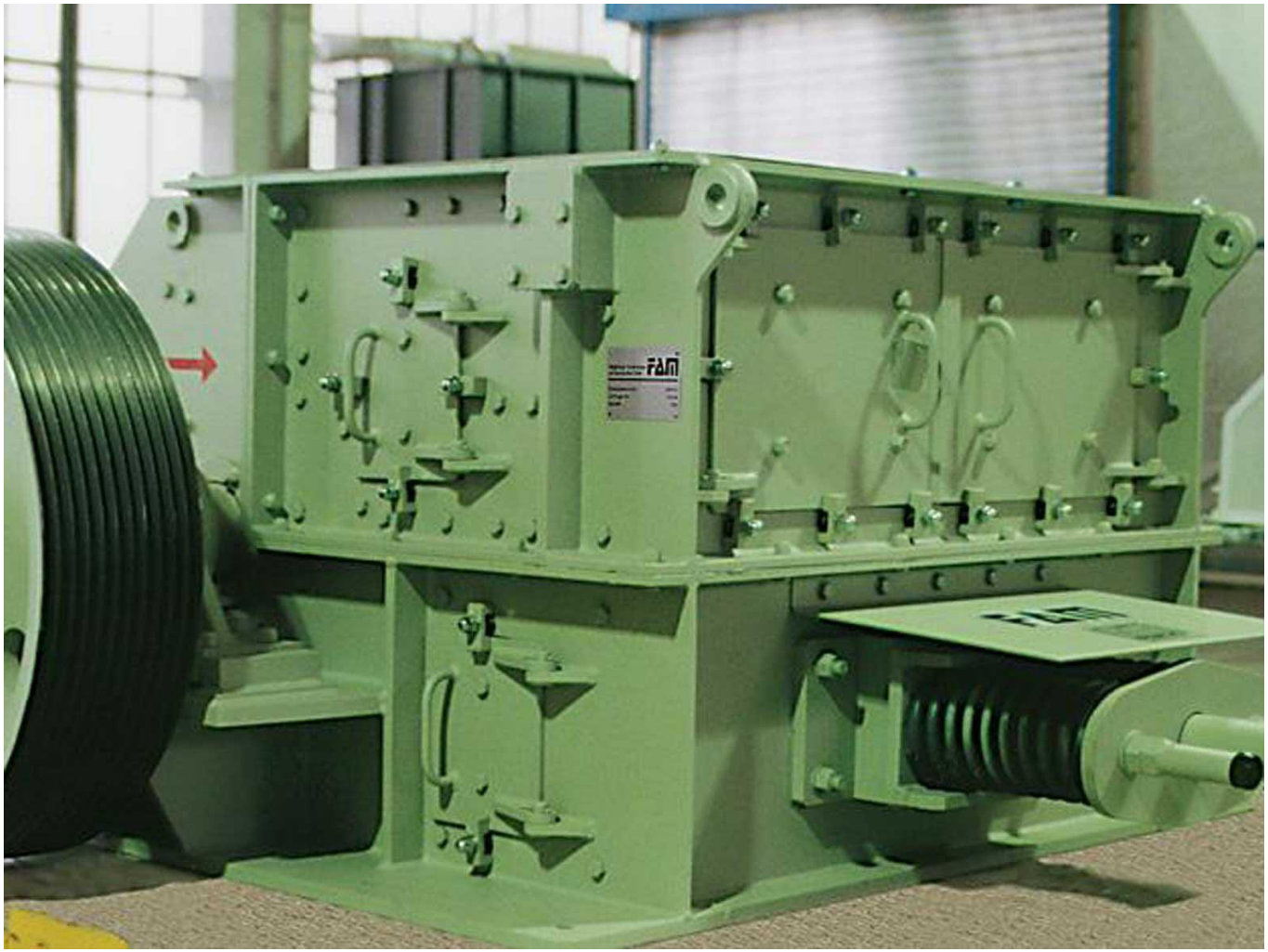
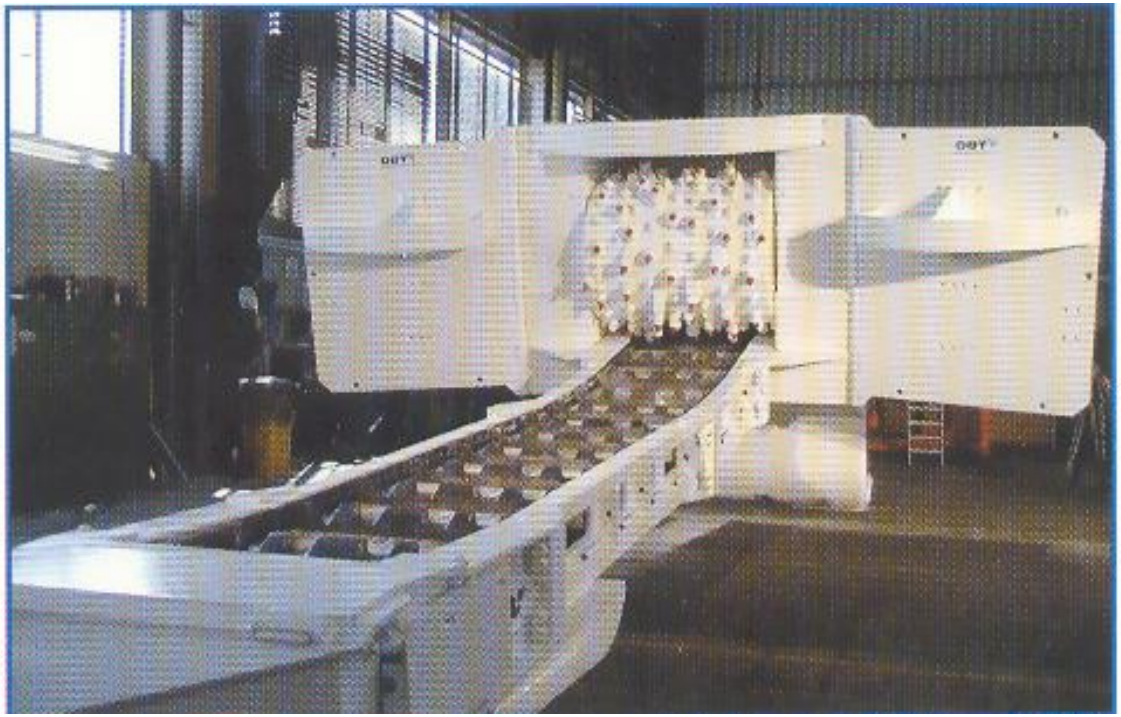


Figura 42

Equipo de 300 tph y 1200 x 800 mm ∅ (Cortesía de FAM), para la trituración de sal de roca.

Triturador Continuo de un Cilindro

- **Equipos de trituración continua a través de un transportador blindado de placas.**

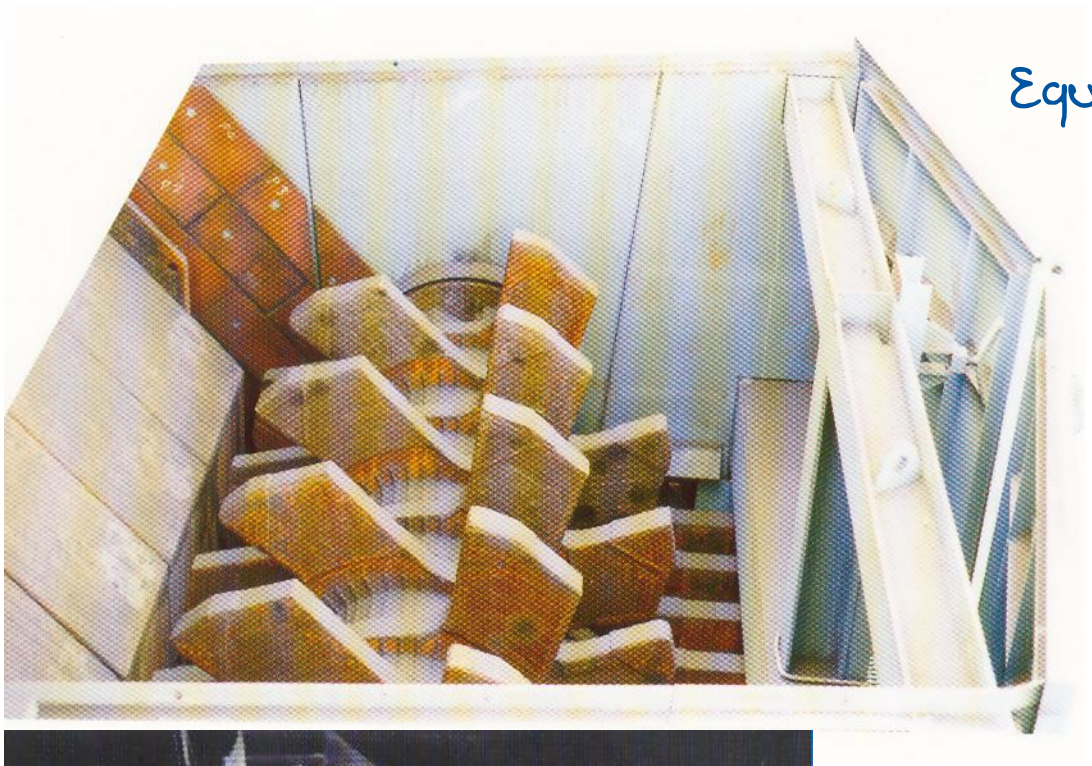


Equipo de Mackina-Westfalia

Figura 43

- **Equipos que admiten tamaños de bloque de 1750x1200 mm para dejarlos en un producto final comprendido entre 150-250 mm.**

- **Ideales en el tratamiento de escombros o materiales de demolición.**



Equipo de AUBEMA (Grupo Sandvik Minerals)

Figura 44

Equipo de Mackina-Westfalia

Figura 45

Prensas de Rodillos de Alta Presión

- **Este equipo fue desarrollado en Alemania (1984) y es conocido por sus siglas en inglés HPGR (*High-Pressure Grinding Rolls*), también denominado "*High Compression Roller Mill*".**

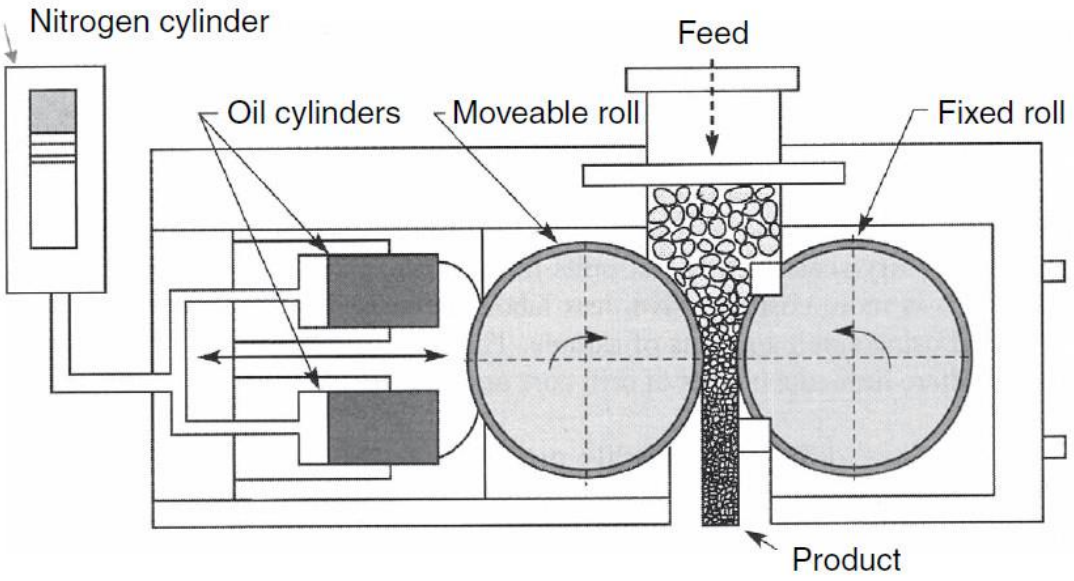
- **Los equipos de cilindros anteriores generalmente ejercen una presión, contra las partículas minerales, comprendida entre 10-30 MPa.**

- **El HPGR ejerce 125-375 MPa de presión, a través de la acción de un sistema hidráulico que mueve unos pistones lo cuales presionan sobre el rodillo móvil y éste contra la lámina de mineral (pulpa con un 70% de sólidos en volumen) situada entre los dos cilindros.**

- **Bajo tal presión, el producto obtenido es una torta compactada conteniendo una alta proporción de finos y partículas que presentan microfracturación.**

- **Posteriormente la torta es introducida en un molino de bolas para separar las liberar las partículas finas (desaglomerado de la torta).**

- **Este equipo presenta la ventaja de que la energía consumida va a ser inferior (0.8 -3.0 kWh/t) a la de un molino de bolas trabajando solo (15-25 kWh/t).**



Esquema de trabajo del equipo HPGR (Cortesía JKMRC)

Figura 46

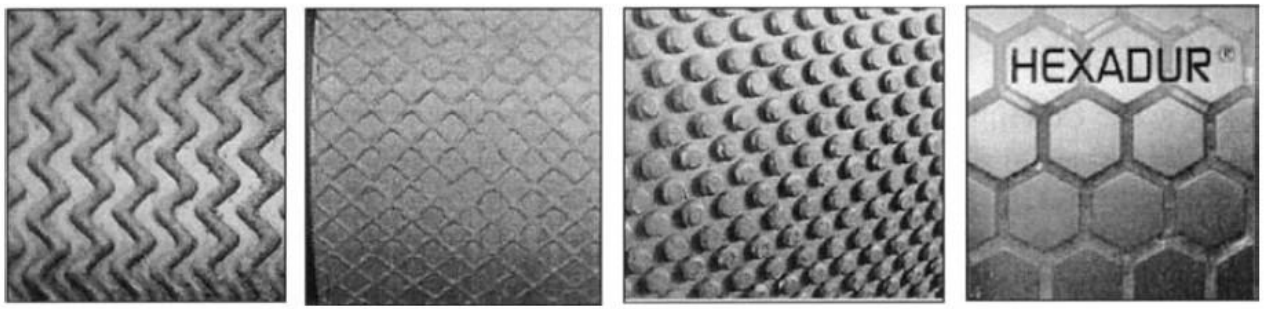


Figura 47

HPGR roll surface types: welded, chevron, studded and hexadur (Courtesy Humboldt Wedag Australia)

Superficie de un cilindro HPGR (Cortesía de KHD Humboldt Wedag)

Figura 48

Prensa de Rodillos de alta presión

- **El empleo de este tipo de molinos se ha extendido enormemente y se encuentran actualmente en las plantas de fabricación de cemento (ya que se requiere moler el clinker desde los 50 mm a las 90µm), de procesamiento de minerales con diamantes, ya que se ha encontrado que mejora la liberación de éstos, y en plantas de procesamiento de minerales de hierro.**

- **Hay evidencias de que usando este equipo se incrementa el grado de liberación de las especies minerales, con lo cual es un equipo idóneo para su implantación en plantas de trituración de minerales industriales y de base metal.**

Nominal operating conditions and capacities for various sizes of high-pressure grinding rolls

Type	Units	10.0–120/120	12.5–140/140	15.0–140/160	20.0–170/180
Roll diameter, *D*	mm	1,200	1,400	1,400	1,700
Roll width, *W*	mm	1,200	1,400	1,600	1,800
Total force, *F*	KN	10,000	12,500	15,000	20,000
Max. specific force, F_{sp}	N/mm^2	6.9	6.4	6.7	6.5
Max. speed, *v*	m/s	1.55	1.80	1.80	2.2
Max. throughput, *M*	t/h	480	770	880	1,470
Max. power, *P*	kW	2 × 1,000	2 × 1,500	2 × 2,000	2 × 3,000

Source: KHD Humboldt Wedag AG.

Equipo HPGR de KHD Humboldt Wedag

Principio de Operación del HPGR (1)

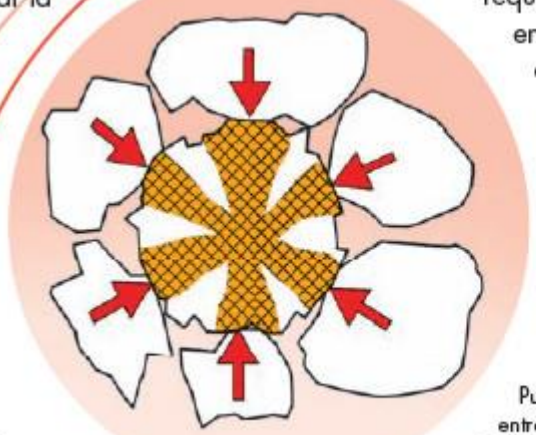
Principio de operación

La conminución de alta presión se consigue empleando un tipo avanzado de rodillos de molienda. Contrariamente a los rodillos convencionales de trituración, las partículas son trituradas mediante compresión en un lecho relleno y no por el contacto directo de partículas con los dos rodillos.

Este lecho de partículas es creado por presión entre dos rodillos en rotación opuesta. Entre estos rodillos se prensa una camada de partículas hasta una densidad del 85% aproximadamente de la densidad actual del material. Esta compresión se consigue aplicando una elevada presión, con un valor pico de hasta 300 Mpa aproximadamente, excediendo la resistencia de compresión del material alimentado. Durante este proceso de compactación, el material es molido con una extensa distribución de tamaños de partículas con una elevada proporción de materiales finos, compactados en forma de escamas.

El proceso de trituración consiste en dos etapas discretas. En la primera, el material alimentado que entra el espacio entre los rodillos es sometido a una aceleración para alcanzar la velocidad periférica del rodillo. Como consecuencia de la abertura cada vez más estrecha entre los rodillos, el material es compactado gradualmente, sometiéndose las partículas grandes a una trituración previa. Asimismo se produce cierto grado de reorientación de las partículas que llenan los intersticios entre las partículas.

En la próxima etapa, el material pretriturado entra en una zona de compactación. Esta zona requiere de una abertura entre los rodillos definido por un sector por un ángulo de 7° aproximadamente.

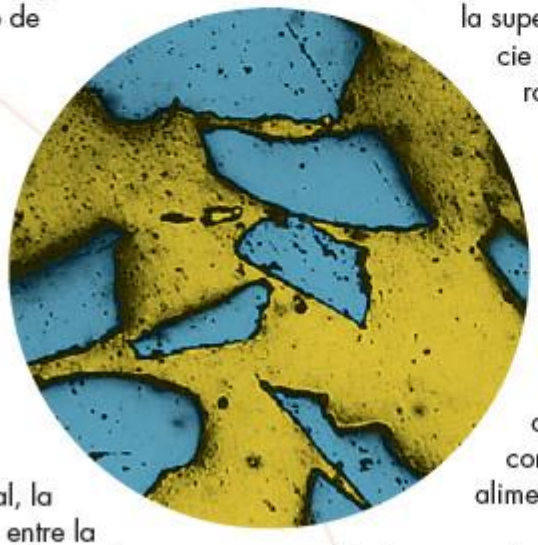


Puntos de contacto múltiples entre partículas: Conminución entre partículas

Principio de Operación del HPGR (II)

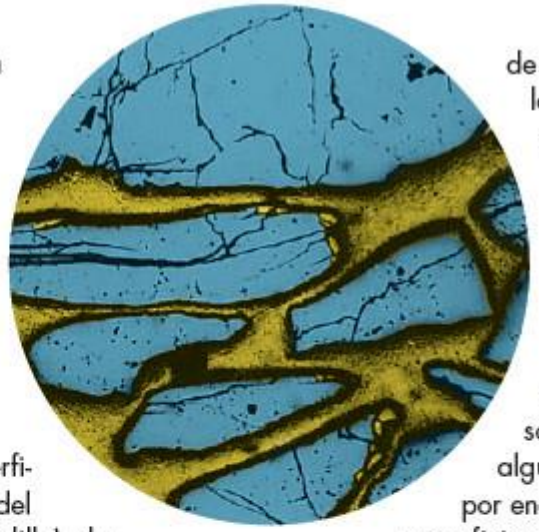
En esta zona de compresión, la presión alcanza un valor pico. La fuerza de prensado actúa en principio en todas las partículas que atraviesan la zona de compresión, a través de puntos de contacto múltiples entre las partículas en la camada de compresión, resultando en la desintegración de la mayoría de las partículas.

Durante el proceso se generan microfisuras dentro de las partículas que resultan en una debilitación de estas partículas para una fase de molienda subsiguiente. El prensado en la camada de partículas reduce el desgaste dado que la acción trituradora principal, la cual no tiene lugar entre la superficie de los rodillos y el material sino entre partículas de material en la camada de partículas.



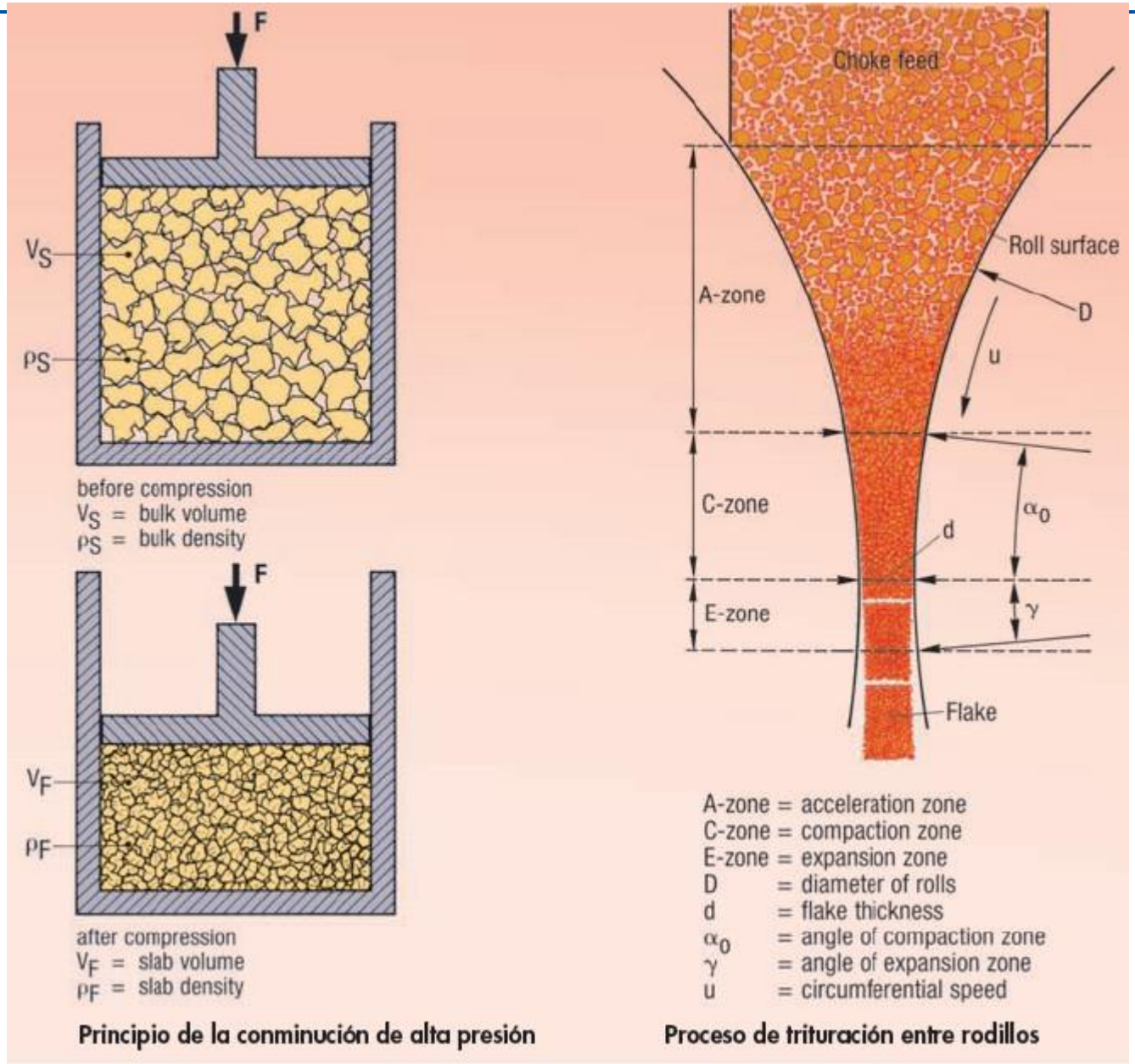
El rendimiento de una Prensa de Rodillos depende de, la capacidad de los rodillos de introducir el material alimentado a la abertura (Gap) entre los rodillos (fricción en la superficie del rodillo), de las características del material molido (p. ej. cohesión interna, humedad) y de las condiciones de operación (p. ej. velocidad de los rodillos, condiciones de alimentación).

La fricción en la superficie de los rodillos puede ser diminuida aplicando un revestimiento reticulado de soldadura, en los rodillos, tal como un patrón en V invertida o bien estoperoles insertados de metal duro que sobresalen algunos milímetros por encima de la superficie del rodillo (patente de KHD).



Muestra de cuarzita tras la conminución en una trituradora de laboratorio por mandíbula (arriba) y en una Prensa de Rodillos (abajo), acusando muchas microfisuras.

Principio de Operación del HPGR (III)



Principio de la conminución de alta presión

Proceso de trituración entre rodillos

Cálculo de la Capacidad del HPGR

La capacidad calculada de una Prensa de Rodillos puede ser determinada por lo general aplicando las siguientes ecuaciones:

$$Q = q \times D \times W \times v$$

$$Q = s \times W \times v \times \rho \times 3.6$$

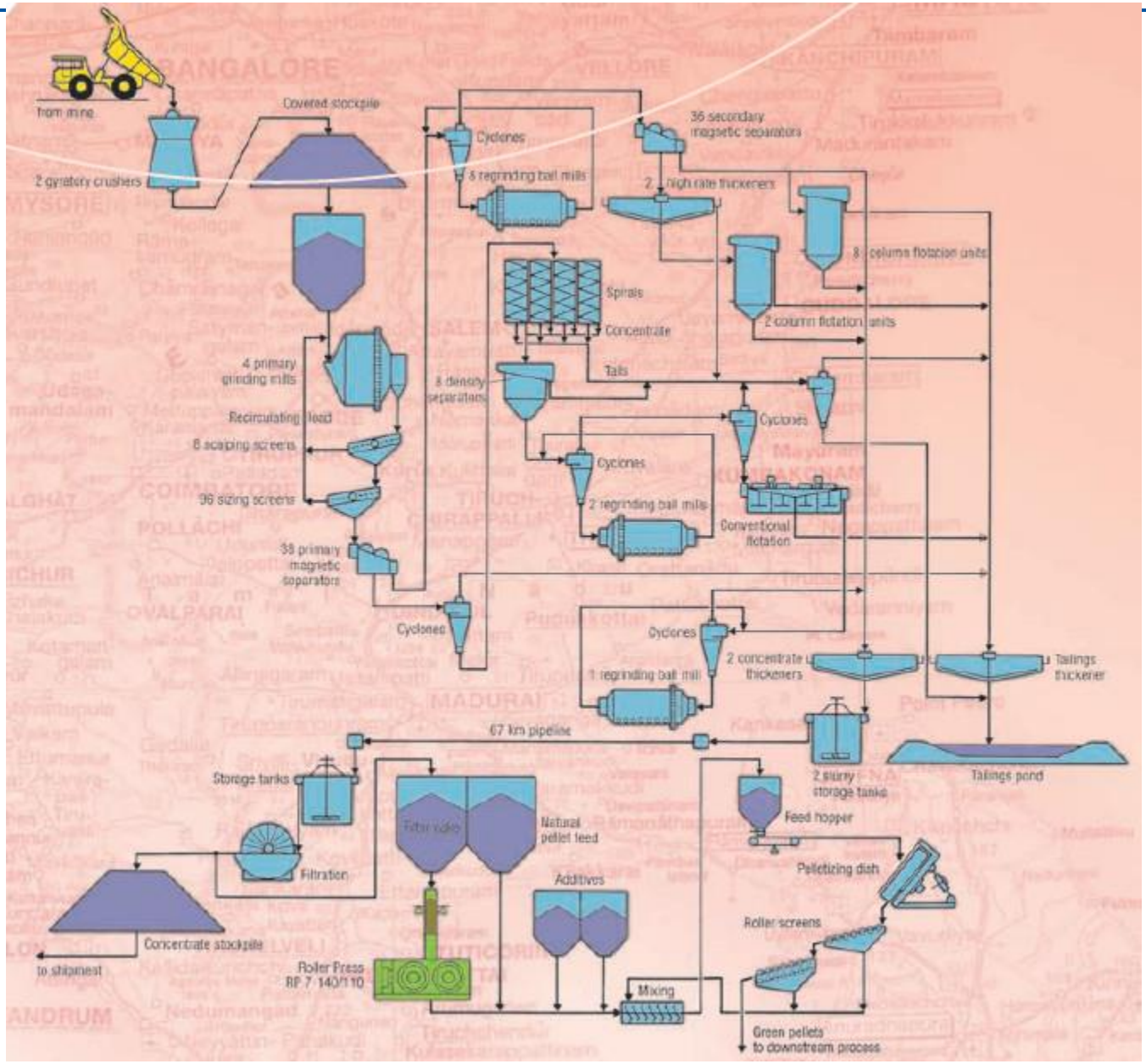
Donde:
- Q = capacidad calculada de la Prensas de Rodillos, t/h
- q = rendimiento específico, ts/m^{3}h
- D = diámetro del rodillos, m
- W = anchura del rodillo, m
- v = velocidad periférica del rodillo, m/s
- ρ = densidad de escamas, t/m^3
- s = anchura de la escama, mm

Datos Técnicos del HPGR

Datos técnicos de series de construcción estándar
(a pedido suministramos otras dimensiones de Prensas de Rodillos)

Tamaño	Rodillo diámetro [cm]	Rodillo ancho [cm]	Aprox. peso máquina [t]	Dimensiones de instalación L [m]	A [1)] [m]	H [m]	Capacidad [t/h]
Unidad piloto	80	25	24	3.8	3.0	1.81	30-80
PR 3.6	120	50-63	36	4.45	3.0	1.96	100-320
PR 5.0	120	80-120	49.5	5.0	3.30	2.14	200-750
PR S 7	140	80-110	98	9.95	5.7	3.55	300-900
PR S 10	140	110-140	128	10.15	6.25	3.85	400-1100
PR S 13	170	110-140	151	10.35	6.75	3.85	500-1500
PR S 16	170	140-180	208	10.95	7.35	4.05	650-2100
PR S 20	200	140-180	230	12.65	7.75	4.7	900-2900
PR S 25	250	180	354	13.65	7.75	5.2	1800-4200

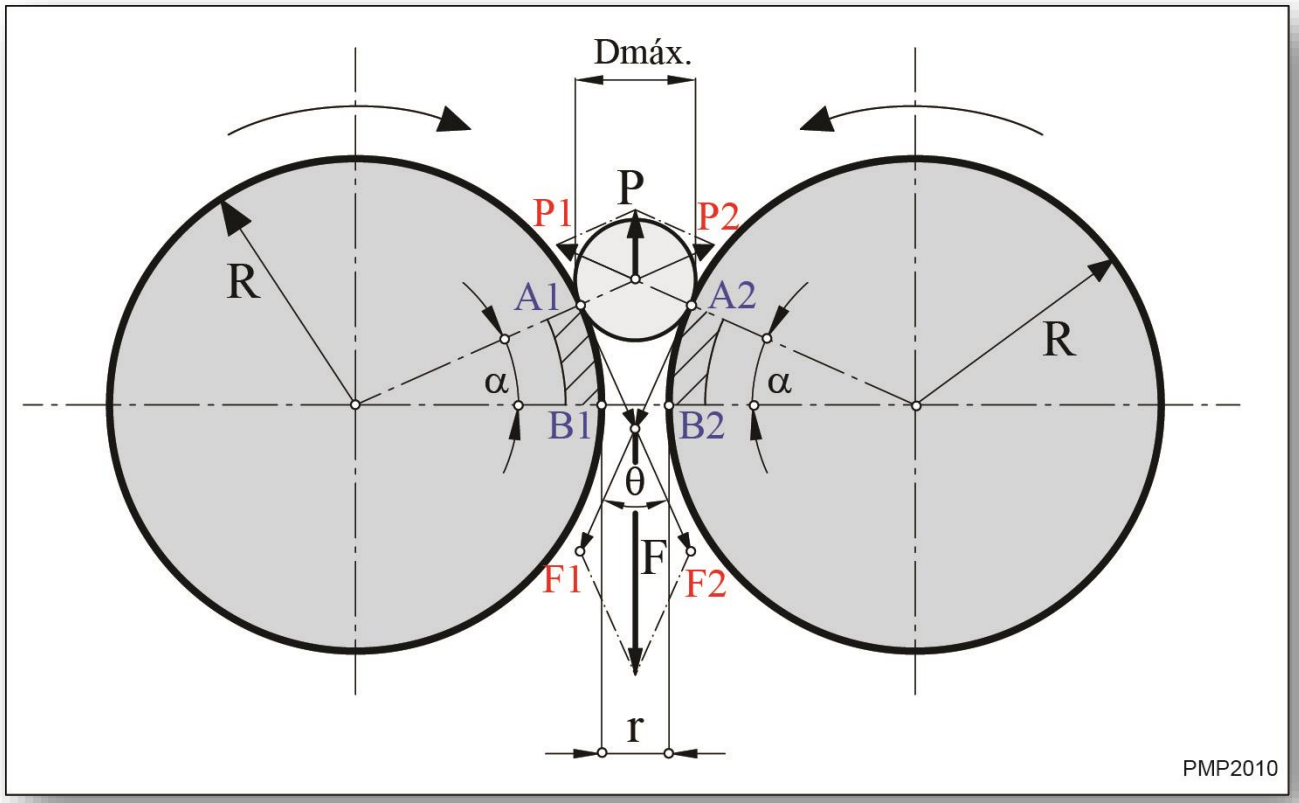
Posición de un HPGR en planta de mineral de hierro



Cálculo del tamaño máximo de partícula, D_{max}

- **Estos cálculos son válidos sólo para cilindros lisos o finamente acanalados.**

Figura 49



- **En la Figura 49 se representa una partícula de mineral siendo atrapada por dos cilindros con giros enfrentados.**

- **Según el diagrama de fuerzas, aparecen dos fuerzas de fricción F1 y F2 en los puntos de contacto (tangenciales) A1 y A2. La suma de dichas fuerzas genera una fuerza total F, aplicada a la partícula mineral, con sentido hacia abajo.**

- **Por otro lado, los esfuerzos de compresión sobre la partícula, P1 y P2, dan lugar a una resultante vertical, P, con sentido hacia arriba.**

- **Para que la partícula sea atrapada por los cilindros y evitar los fenómenos de rebotes, debe cumplirse que el ángulo α tome cierto valor para que el ángulo de alimentación, θ, ($\theta = 2 \cdot \alpha$) sea inferior al ángulo de fricción del mineral con la superficie del cilindro.**

- **El tamaño máximo de partícula (D_{max}) admisible por un equipo de cilindros se obtendría de la siguiente relación:**

$$\cos\alpha = \frac{2R + r}{2R + D_{\max}}$$

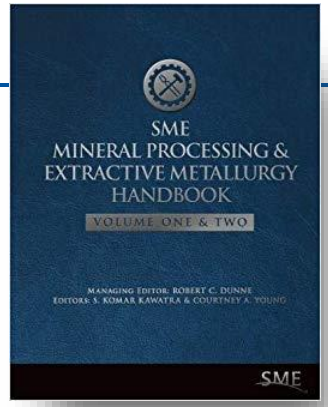
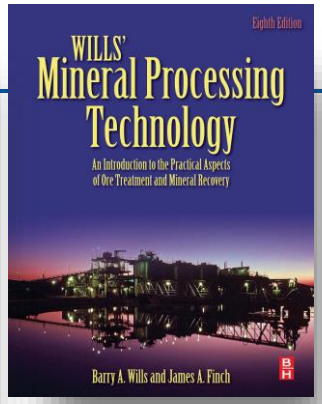
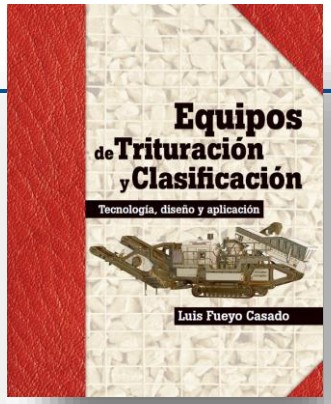
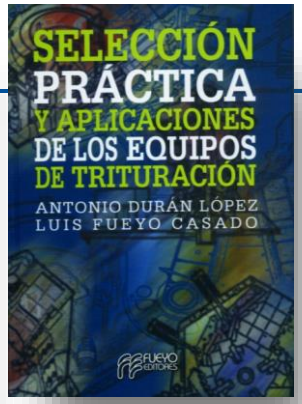
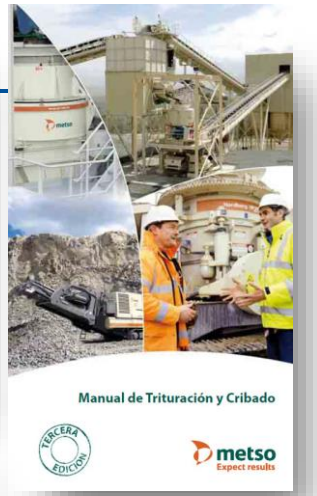
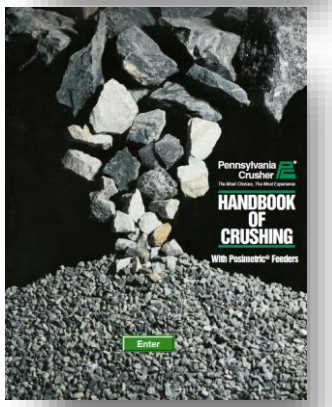
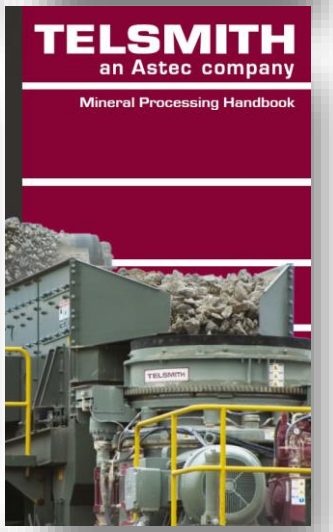
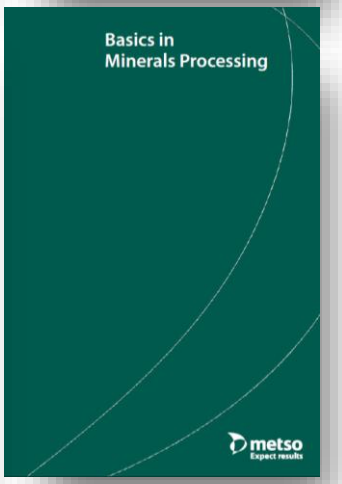
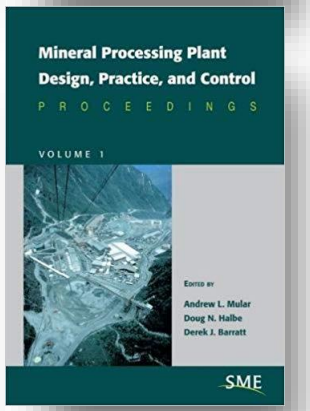
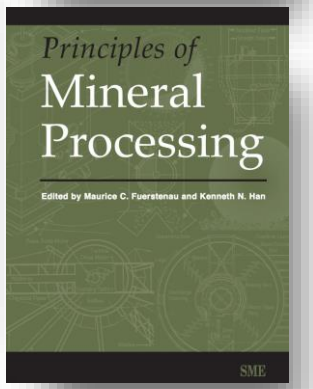
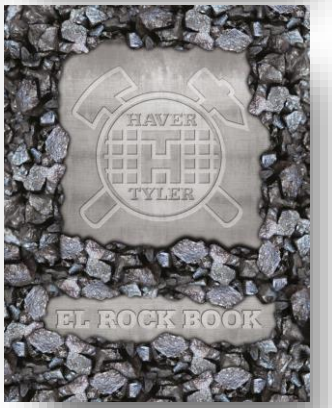
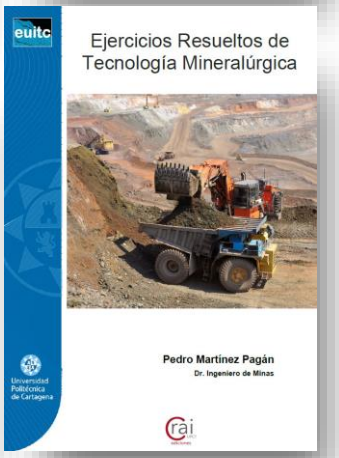
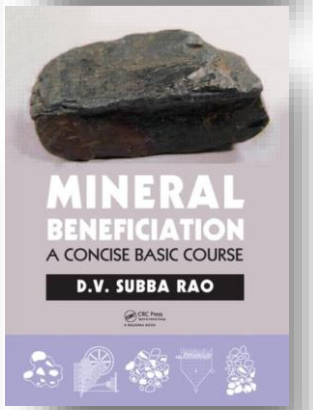
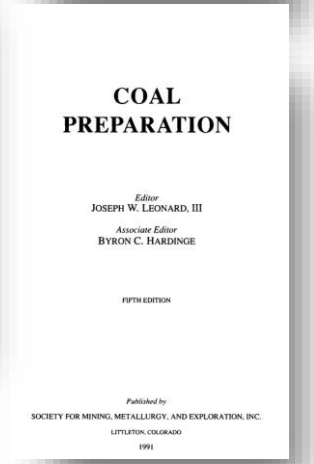
Cálculo de la velocidad aplastamiento, V

- **La velocidad de aplastamiento es la velocidad con la que las partículas pasan de una diámetro *D* a otro *r*.**

- **Es decir, el tiempo que se tarda en recorrer un longitud de arco situada sobre la superficie de los cilindros y que iría desde A1 hasta B1 (ver Figura 49). Por lo tanto esto último se puede representar como:**

$$V = \frac{2 \cdot R \cdot (1 - \cos\alpha) \cdot 60 \cdot 360}{\alpha \cdot n}$$

- **Siendo, n la velocidad de giro de los cilindros (rpm); y α en ángulo a recorrer.**

- **Estas velocidades de aplastamiento se mueven entre 0.3 y 1 m/s. Superiores a las registradas para las trituradoras de mandíbulas y giratorias. Sin embargo, son inferiores a las que proporcionan los molinos de percusión.**

Referencias: