VI Congreso de
Correas Transportadoras

27 y 28 de marzo 2014

Hotel Sheraton Miramar, Viña del Mar / Chile

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CORREAS TRANSPORTADORAS LARGAS

PROCONM

Transporte Limpio



EFRAÍN BOZO GODOY

Agradecimiento

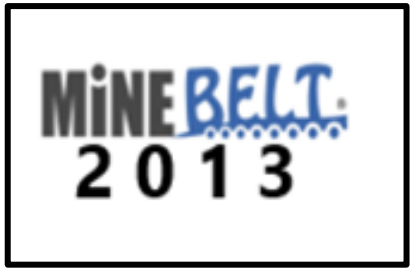
La tecnología y práctica del manejo de material es dinámica y requiere estar conectado con la realidad y discutir problemas con otros especialistas.

Tengo la suerte de tener dos amigos, dos gurús en manejo de material, que son mis consultores, siempre se dan el tiempo para atender y conversar problemas técnicos. Si no hay amigos, no hay pasión en esta profesión. Un gran abrazo y agradecimiento para **Fabian Rubio** y **Ricardo Tobar.**

Introducción

Una correa transportadora que opera con bajo consumo específico de energía implica que disipa menos energía, lo que no sólo es un impacto económico positivo, sino que también reduce el riesgo de incendio.

Esta presentación fue expuesta por primera vez en Iquique en el congreso de MiniBelt 2013, al cual fuimos invitados por mi gran amigo, gurú en M&C, Carlos Morales, con el título "**Análisis Teórico-Práctico de Potencia en Correas Transportadoras Largas**".



Al año siguiente expusimos sobre el mismo tema en Viña del Mar, invitado por Edoctum, que es la que publico. Contiene actualizaciones que permiten complementar algunos temas.

Normas y Criterio

Proconm utiliza para el cálculo, análisis y diagnóstico de correas existentes software propio basado en la norma ISO 5048 o la DIN 22101, que son similares.

El criterio para definir cuando una correa es eficiente energéticamente está basado en el factor ficticio de fricción presente en las resistencias principales de estas normas.

Se consideran correas mayores a 80m, considerando que, a partir de esta longitud, las resistencias secundarias se pueden reemplazar por un factor en las resistencias principales

ISO 5048: Continuous mechanical handling equipment – Belt conveyors with carrying idlers – Calculation of operating power and tensile forces

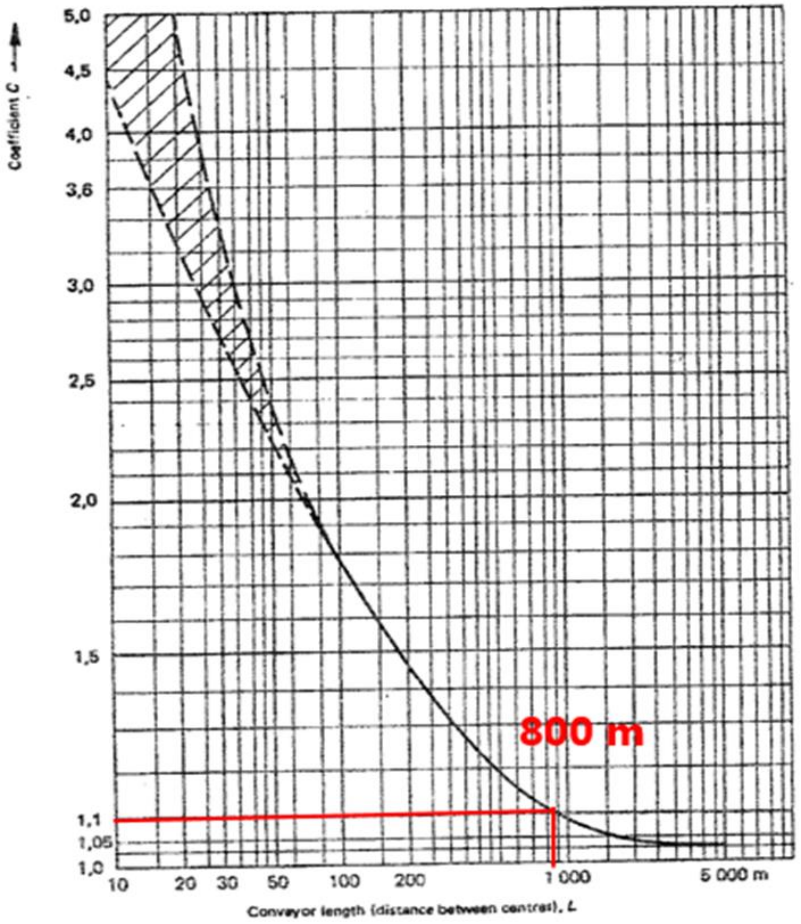
DIN 22101: Continuous conveyors – Belt conveyors for loose bulk materials – Basis for calculation and dimensioning

Definición de Correa Larga

Para correas de longitud mayor a 80 m, las resistencias secundarias se pueden representar como un porcentaje de las resistencias principales con un coeficiente C.

Una correa larga la vamos a definir cuando las resistencias locales tengan una incidencia inferior al 10%. Es decir, cuando C ≤ 1.1**,** esto es, una correa larga es la que tiene más de 800 metros.

Correa Larga > 800 m



Cálculo con Norma ISO 5048

$$F_U = F_H + F_N + F_{S1} + F_{S2} + F_{St}$$

F_U: Resistencias periférica requerida (Te, según CEMA)

F_H: Resistencias principales

F_N: Resistencias especiales secundarias ($F_N = CF_H$)

F_{S1}: Resistencias especiales principales

F_{S2}: Resistencias especiales secundarias

F_{St}: Resistencias a la pendiente

Si no existen resistencias especiales ⟹ $F_U = CF_H + F_{St}$

Resistencias Principales

$$F_H = L f g(2q_G + q_B + q_{RO} + q_{RU})$$

L: Longitud del transportador (distancia entre centros de las poleas), en metros

g: Aceleración debido a la gravedad, 9,81 m/s^2

q_{RO}: Masa de las partes giratorias de los polines lado de carga, por metro

q_{RU}: Masa de las partes giratorias de los polines lado de retorno, por metro

q_B: Masa de la correa a lo largo del lado de carga y de retorno, por metro

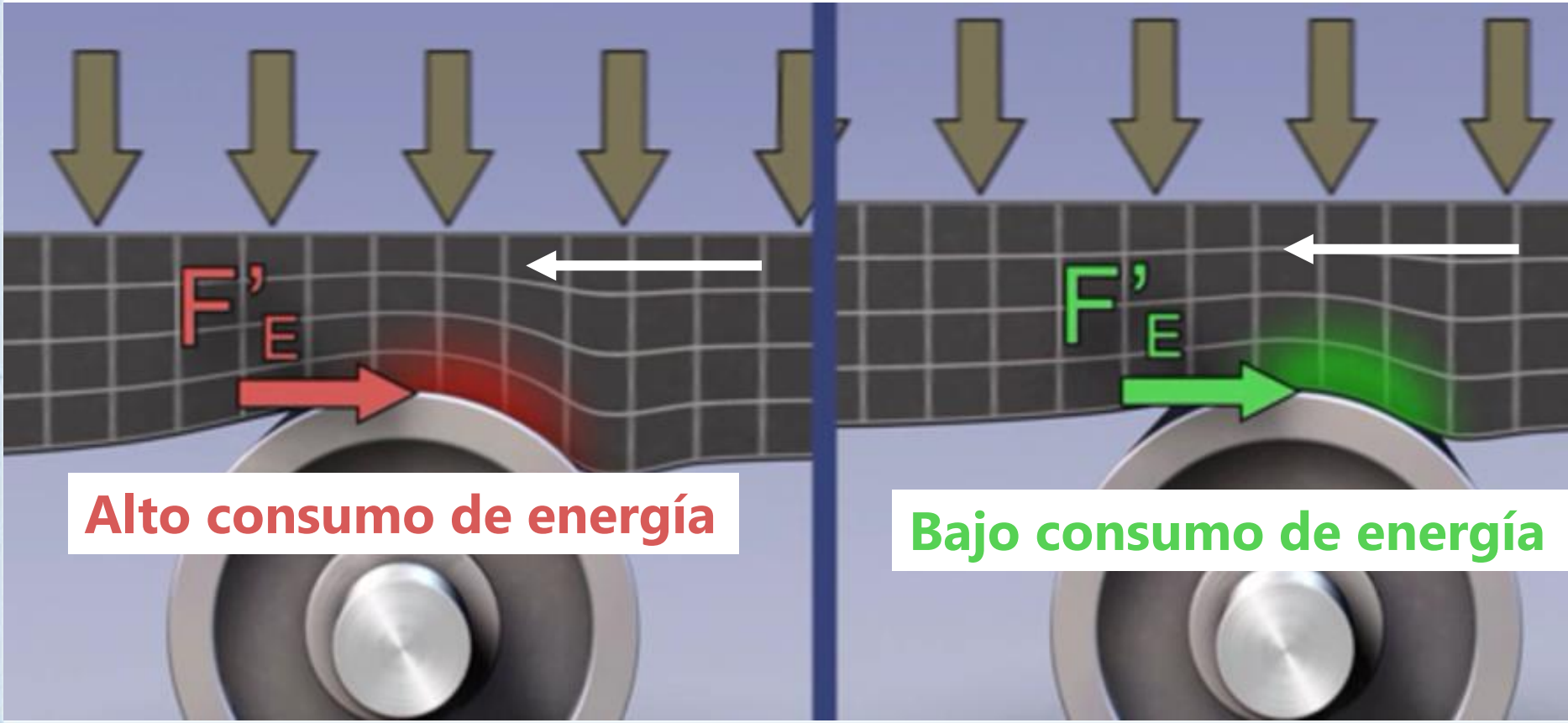
q_G: Masa del material que lleva la correa, por metro

f: Coeficiente de factor ficticio, que define la eficiencia de la correa

La magnitud de f depende de la indentación

Indentación

La indentación es la deformación de la cinta sobre los rodillos. A mayor indentación mayor consumo de energía, mayor valor del factor ficticio de fricción.



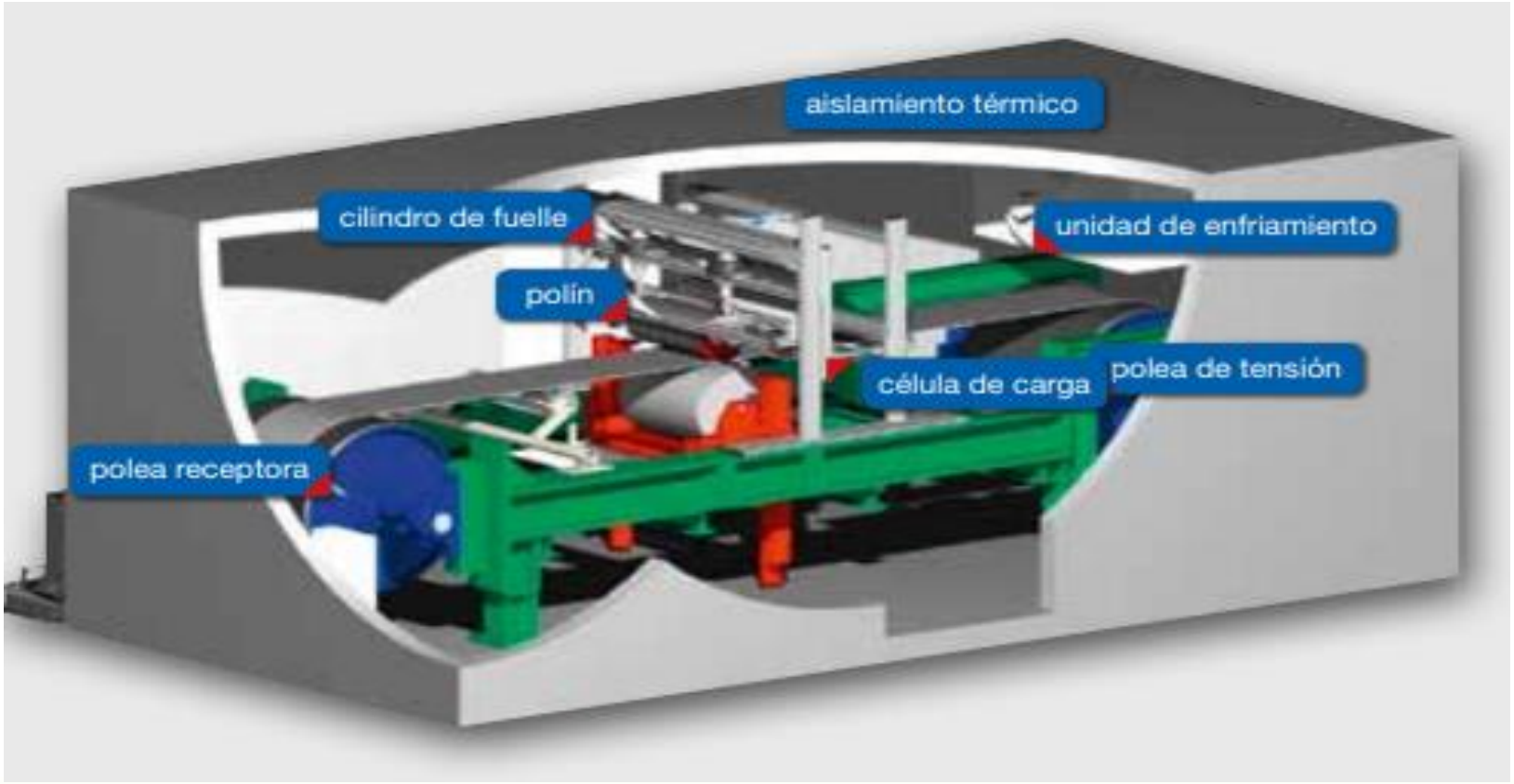
Variables que Inciden en la Indentación

Para una carga y velocidad definida, y considerando que no existe problemas operacionales, las siguientes variables impactan e inciden en la indentación:

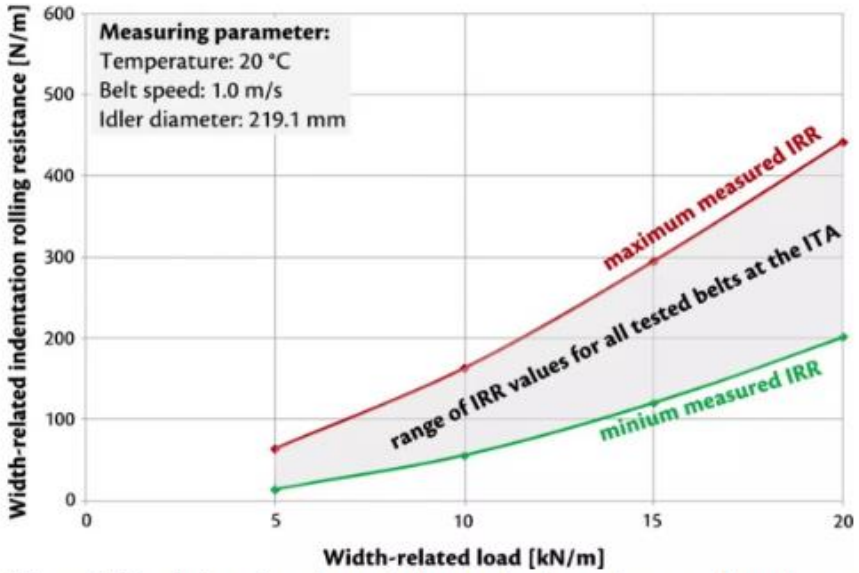
- Calidad de la cubierta de la cinta, especialmente en el lado de carga
- Espesor de la cubierta de la cinta
- Resistencia a la rodadura de los rodillos
- Diámetro del rodillo, principalmente el rodillo central
- Descentramiento de la carga
- Ángulo de artesa o de acanalamiento
- Flexión longitudinal
- Flexión transversal
- Flapeo u oscilaciones excesivas
- Temperatura ambiente

Máquina ITA para medir la indentación, según DIN 22123

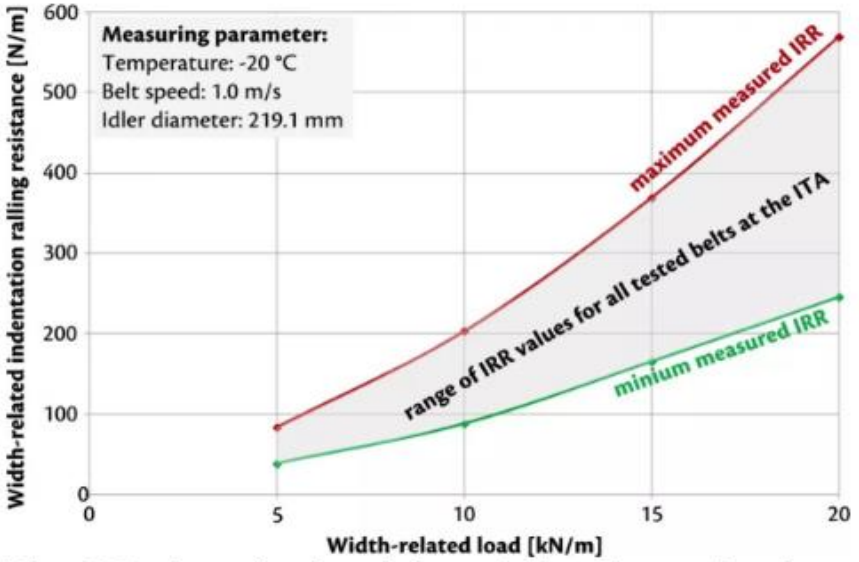
Esta máquina mide el **IRR** (Indentation Rolling Resistance). Acondicionada para regular la temperatura de -50^{0}C hasta 60^{0}C, la velocidad hasta 8 m/s y el diámetro del rodillo



Máquina ITA ejemplo de resultados



Higo. 4: Resistencia a la rodadura relacionada con el ancho a una temperatura de banda de 20 °C sobre la carga relacionada con el ancho para el tipo de banda ST 4500 16: 8.



Higo. 5: Resistencia a la rodadura relacionada con el ancho a una temperatura de la banda de -20 °C sobre la carga relacionada con el ancho para el tipo de banda ST 4500 16: 8.

Está máquina entrega resultados para las siguientes variables:

- Calidad las cubiertas de la cinta
- Espesor de la cubierta
- Diámetro del rodillo
- Temperatura ambiente

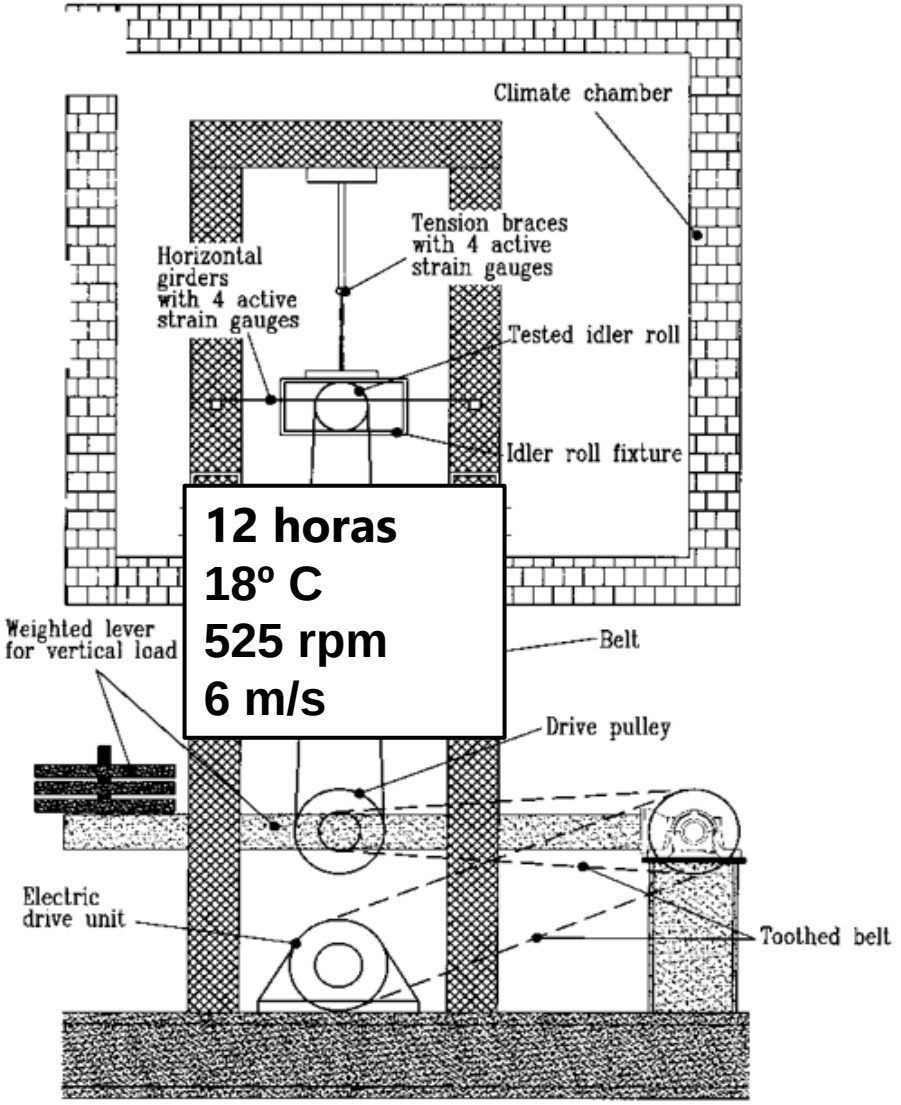
Los fabricantes tienen cinta para eficiencia energética con mediciones de IRR

Máquina para medir la resistencia a la rodadura del rodillo, RFR

En la Figura se muestra el banco de pruebas de la Universidad de Hannover, Alemania, para obtener datos sobre valores de resistencia a la rodadura de los polines, "Rolling Frictional Resistance", RFR

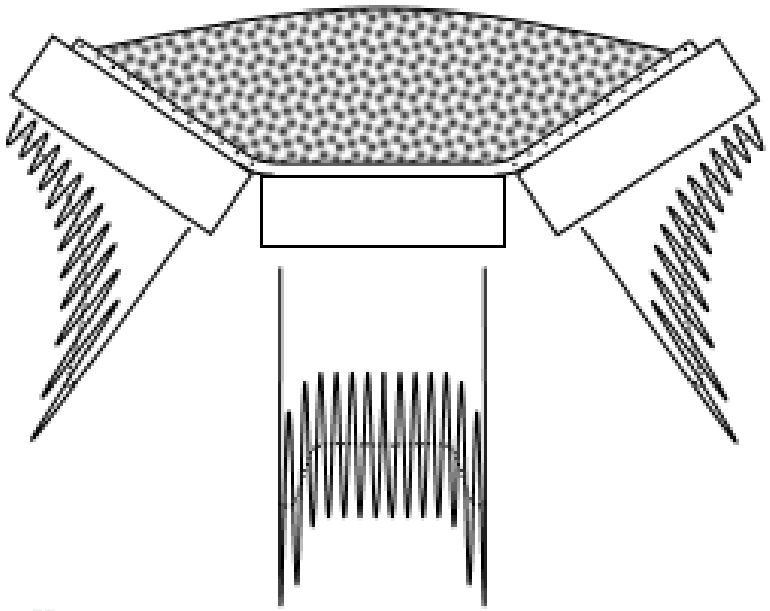
La UTFSM y la USACH, al parecer también poseen esta máquina.

La experiencia dice que se han logrado mediciones de RFR desde 2 N hasta 20 N.

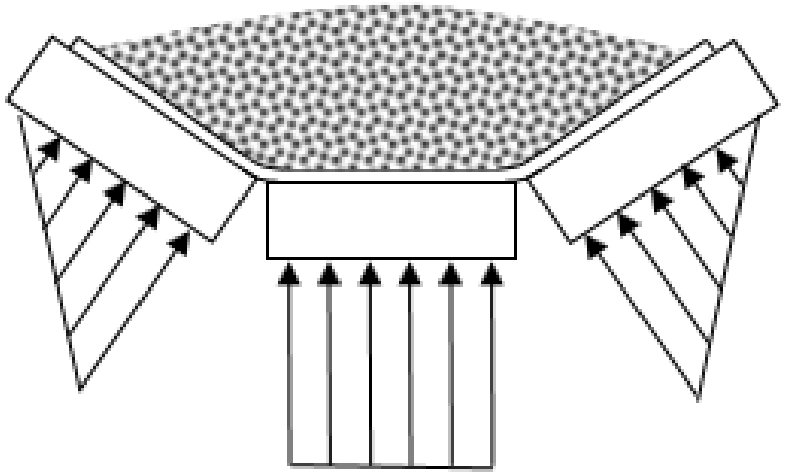


Cinta con cables versus cinta con telas

La presión de contacto entre la cinta y los rodillos es totalmente irregular para la cinta con cables. Por consiguiente, el calor generado en la indentación es mayor o las pérdidas son de mayor magnitud en comparación con una cinta de telas como muestra las figuras para la misma carga.



Cinta con cables



Cinta con telas

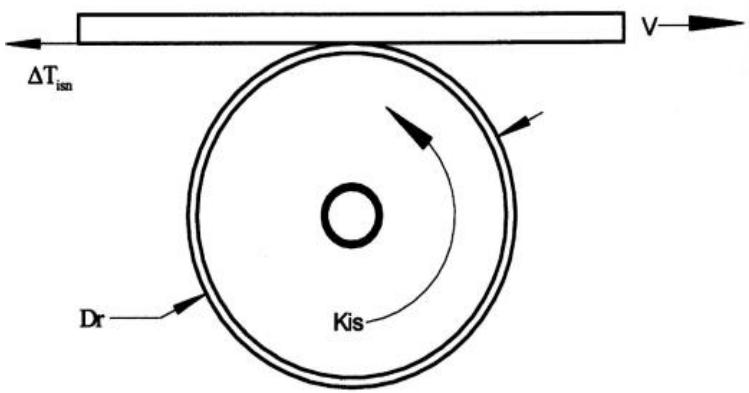
Problema del sobredimensionamiento

El tipo de polín CEMA tiene asociado las características del rodamiento o el par de rozamiento Kis. En la siguiente tabla, extraída del CEMA VI, se muestran valores. A mayor capacidad mayor es la resistencia al rozamiento del polín. Por tanto, no es conveniente sobredimensionar ya que el consumo de potencia será mayor.

Table 6.19 Maximum expected individual idler roll seal torques for various CEMA idler series. (Use with R_{ris} and R_{riv} discussed below)

Idler Series	Kis (in x lbf)	KiV (in x lbf/rpm)
B	3.00	0.004
C	3.25	0.004
D	4.00	0.004
E	7.25	0.003

*K_{is} can be measured as described in Appendix F. By testing at three different belt speeds a value for K_{iv} can be determined for a specific idler.



Rodamiento rígido de bolas tiene menor RFR

De acuerdo con la siguiente Tabla del CEMA VI, para un mismo tipo de polín CEMA, el coeficiente de fricción Ciw varía según sea el tipo de rodamiento. Los rodamientos rígidos de bolas tienen menos fricción que los rodamientos de rodillos cónicos.

Table 6.21
Idler rotating resistance load factor C_{iw}

Idler Series	Taper Roller	Deep Groove Ball
B	0.00155	0.00125
C	0.0017	0.00145
D	0.0017	0.00185
E	0.0029	0.00255

$$\Delta T_{iWn} = \frac{C_{iw} \times (W_b + W_m)}{\frac{D_r}{2}} \times L_n$$

Coeficiente de fricción

A mayor diámetro del polín menor RFR

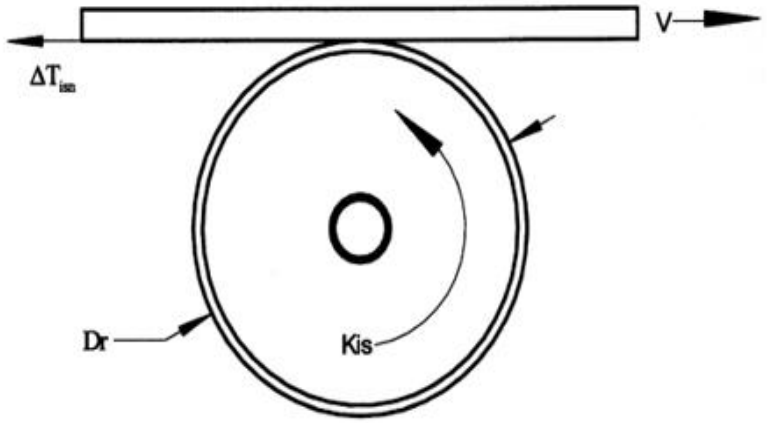
Para un mismo tipo de polín CEMA, si el diámetro es mayor la resistencia disminuye. Esto es, un rodillo de mayor diámetro consume menos potencia.

Según RWE, **las pérdidas por indentación decrecen hiperbólicamente al aumentar el diámetro del polín**.

Este cambio de diámetro se justifica aún más si el polín está trabajando muy cerca de la velocidad crítica o de la velocidad nominal del rodamiento considerando que el aro exterior gira.

$$\Delta T_{isn} = \left[\left(\frac{3.82 \times V}{D_r} - 500\right) K_{iv} + K_{is}\right] \times \frac{1}{\frac{D_r}{2}} \times \frac{K_{iT} \times n_r}{S_{in}} \times L_n$$

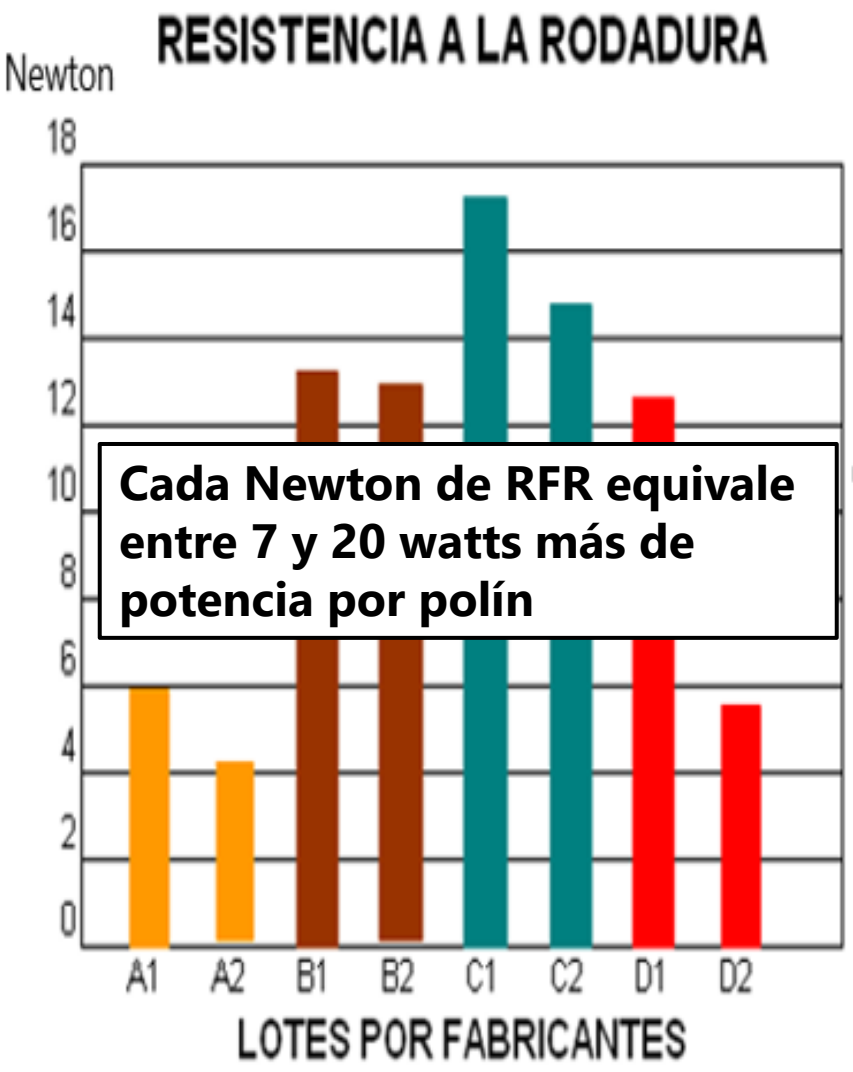
Diámetro del rodillo



Ejemplo de aplicación en Codelco-Andina POCB

El año 2010, nuestro prestigiado asesor, Carlos Amaranti, realizó una presentación titulada "Aumento de Capacidad de la Correa Transportadora A-7, de Codelco Andina", que tiene una longitud de 4,7 kilómetros.

Esta presentación considera la medición de la resistencia de los polines por lote para 4 fabricantes. Se puede apreciar que los resultados mostrados en el gráfico tienen importante diferencia, inclusive dentro de lotes del mismo fabricante.



Cada Newton de RFR equivale entre 7 y 20 watts más de potencia por polín

Estos ensayos fueron solicitados por el Proyecto Optimización Caso Base (POCB) de Codelco-Andina para la correa A-7

Aplicación en correa A-7 de Codelco-Andina en POCB

Con sólo cambiar el tipo de polín y su diámetro se logró un aumento de capacidad del 30% sin pérdida de producción.

Antes

Capacidad: 2.000 t/h
Porcentaje de carga: 53%
Diámetro polín: D5
Tipo de rodamiento: Rodillos cónicos
Par de rozamiento: Mediano
Factor de fricción: 0.020 (medido)

Después

Capacidad: 2.600 t/h (aumentó en un 30%)
Porcentaje de carga: 70%
Diámetro polín: D6
Tipo de rodamiento: Rígido de bolas
Par de rozamiento: Bajo
Factor de fricción: 0.016 (medido)

Se mantuvo constante

Velocidad: 4,5 m/s (900 FPM)
Ancho del polín: 42”
Sistema motriz: 3 motores, 310 kW c/u

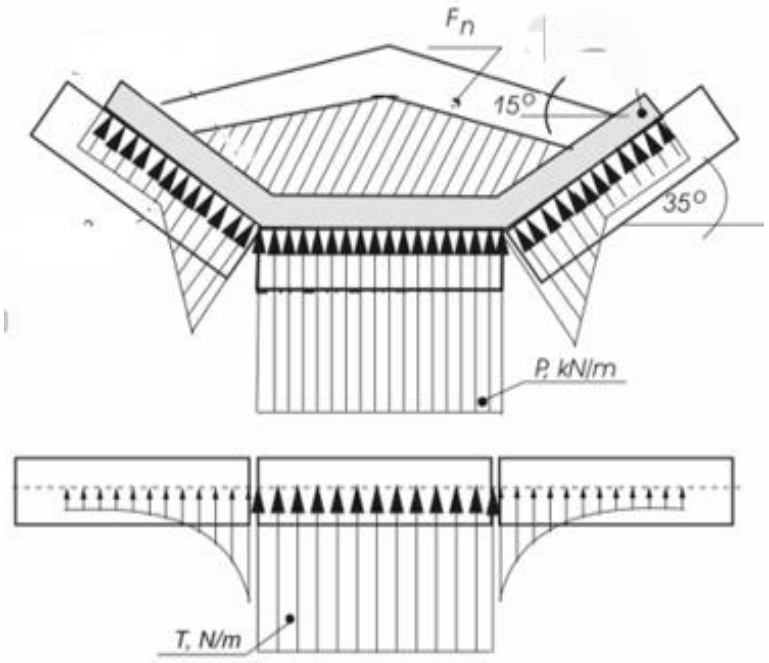


Polín estándar de baja indentación y menor consumo de energía

Un polín estándar puede ser de baja energía si se cumple lo siguiente:

- Usar un diámetro mayor
- Utilizar rodamientos rígidos de bola
- Sellos tipo centrífugos, sin contacto.
- Excentricidad mínima
- Tolerancias de fabricación más exigentes que se pueden lograr con automatización

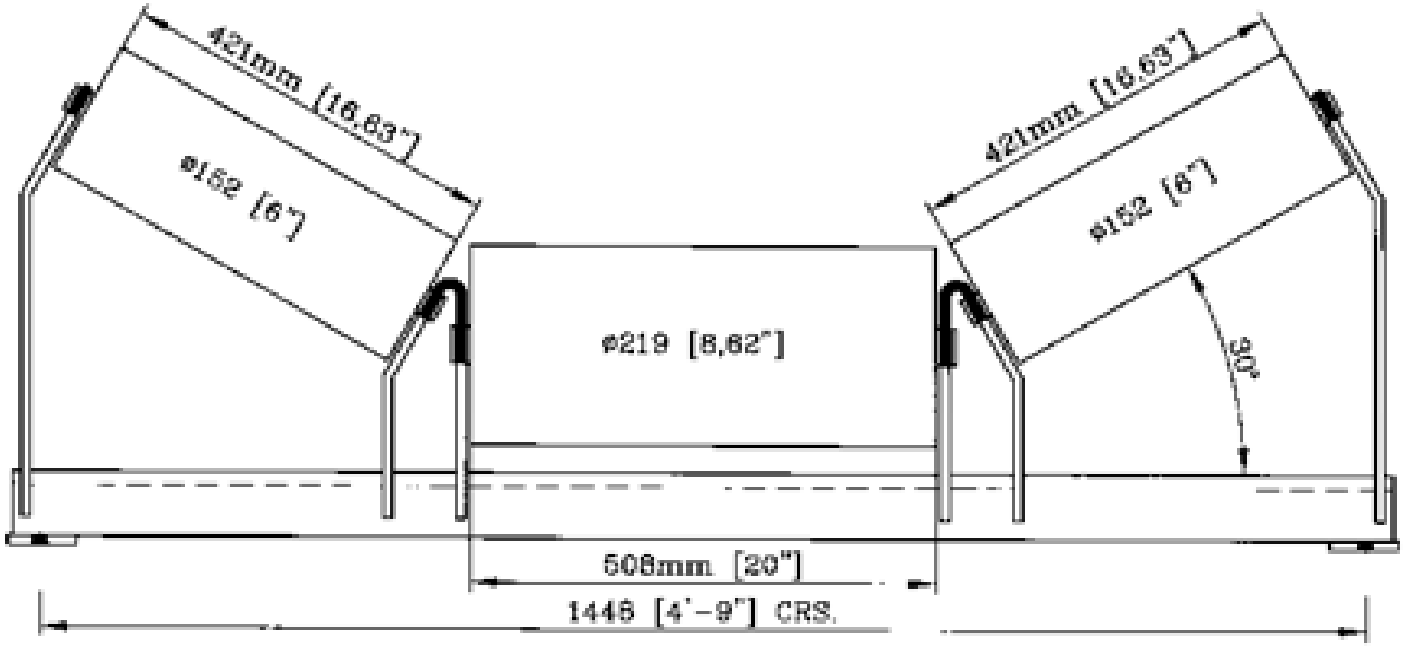
Distribución de la presión en los rodillos		
Ángulo del polín	**Rodillo del centro**	**Cada Rodillo lateral**
20	**60**	**20**
35	**68**	**16**
45	**75**	**13**



Rodillo del centro tiene una mayor solicitación. Por tanto, la indentación o deformación es mayor en esa zona.

Polín especial de baja energía con mayor diámetro al centro

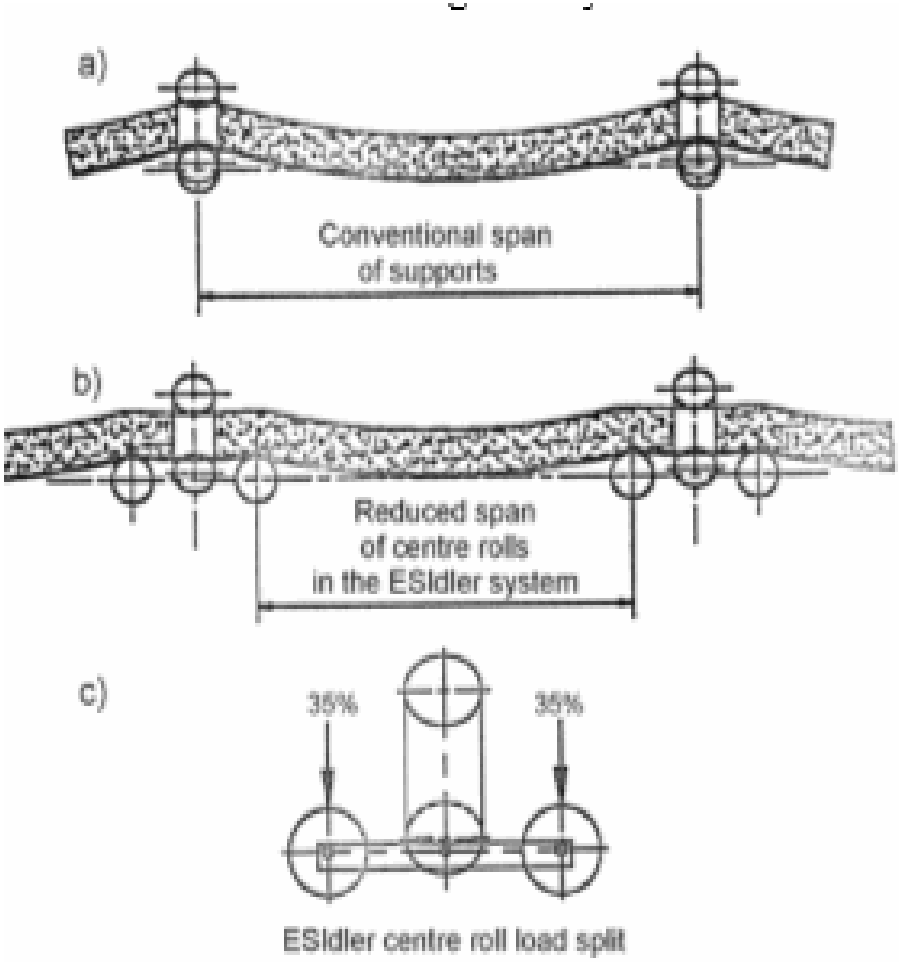
El rodillo central de diámetro mayor permite reducir la resistencia a la indentación. Como los rodillos laterales llevan una menor carga, su diámetro puede ser inferior, quedando la configuración final como se muestra en la Figura. Este tipo de diseño ha tenido éxito considerable. Desconocemos si ha sido instalado en Chile.



Polín especial de baja energía con 2 rodillos en el centro

Los dos rodillos centrales tienen la posibilidad de inclinar y adaptarse a la curvatura de la correa, permite reducir el span y la carga sobre los rodillos. Como resultado, la RFR (Rolling Frictional Resistance) disminuye en relación con un polín estándar de 3 rodillos en alrededor del 20% al 30%. Se trata de una reducción significativa en la RFR.

Un aumento de la resistencia a la rodadura por el cuarto rodillo se justifica con una gran reducción de la resistencia a la fricción de rodadura.



ESIdler centre roll load split

Recomendaciones para polines

1. Usar el mayor diámetro de polín posible

Según RWE, **las pérdidas por indentación decrecen hiperbólicamente al aumentar el diámetro del polín**. Usar polines de diámetro mínimo 7" para una velocidad de 6 m/s

2. Usar mayor diámetro en el rodillo del centro

A objeto de uniformar la indentación.

3. No sobredimensionar o usar mínimo par de rozamiento

El tipo de polín CEMA tiene asociado las características del rodamiento o el par de rozamiento. Por tanto, no es conveniente sobredimensionar ya que el consumo de potencia será mayor. Por ejemplo, si se necesita un polín CEMA D, colocar un polín CEMA D y no un polín CEMA E.

4. Usar rodamiento rígido de bolas

Para un mismo tipo de polín CEMA, el coeficiente de fricción varía según sea el tipo de rodamiento. Los rodamientos rígidos de bolas tienen menos fricción que los rodamientos de rodillos cónicos.

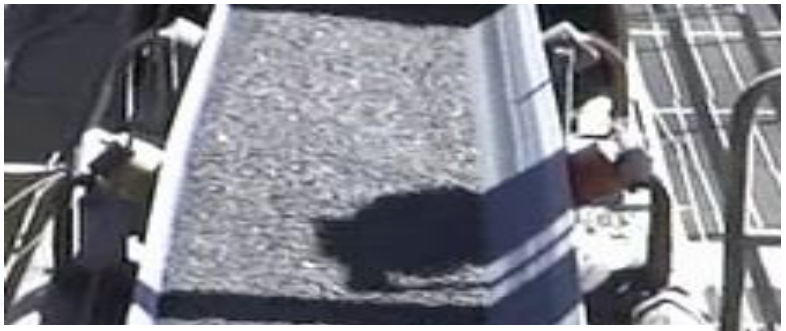
Estas variables están contenidas en la resistencia a la rodadura del polín RFR. **Se recomienda utilizar RFR < 4**

Impacto del descentramiento de la cinta

Si la carga se distribuye irregularmente a lo largo del polín, la profundidad de la indentación es desigual. Se provoca deslizamiento. La pérdida por indentación aumenta notablemente.

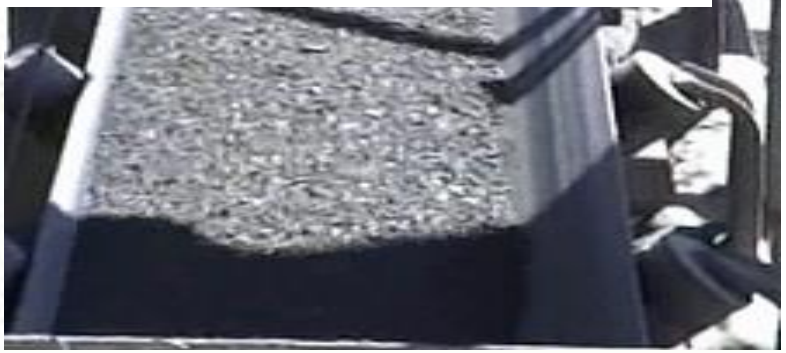
El desalineamiento aumenta el consumo de energía. El desalineamiento aumenta el consumo de energía





El desalineamiento aumenta el consumo de energía

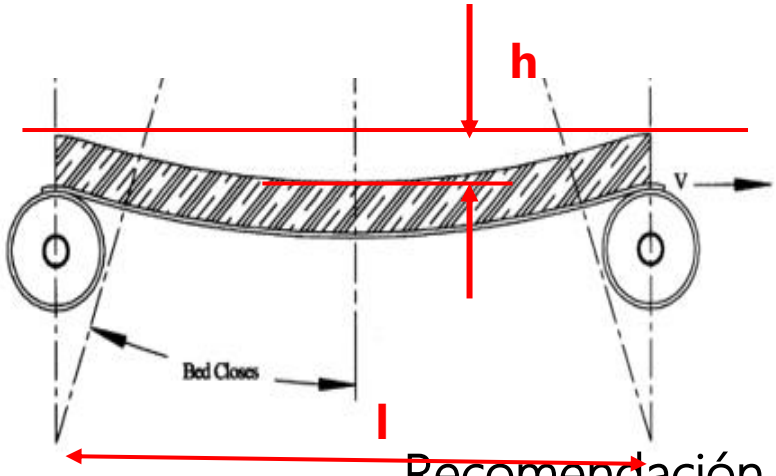


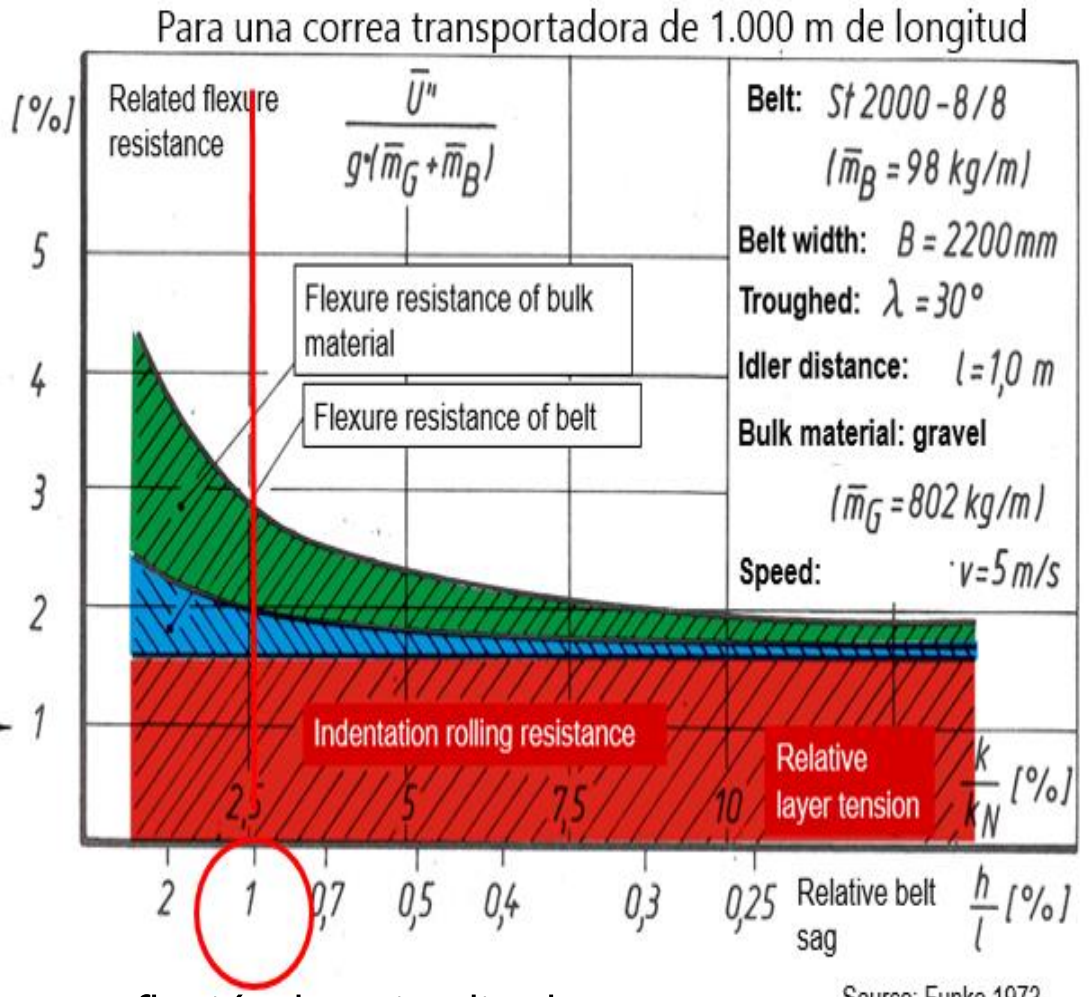


Flexión longitudinal
SAG < 1% (DIN 22101)

Una flecha mayor a 1% aumenta la amplitud de la oscilación disminuyendo la vida útil de los rodamientos y aumenta considerablemente la tensión. Por tanto, se recomienda:

SAG o flecha h/l < 1%



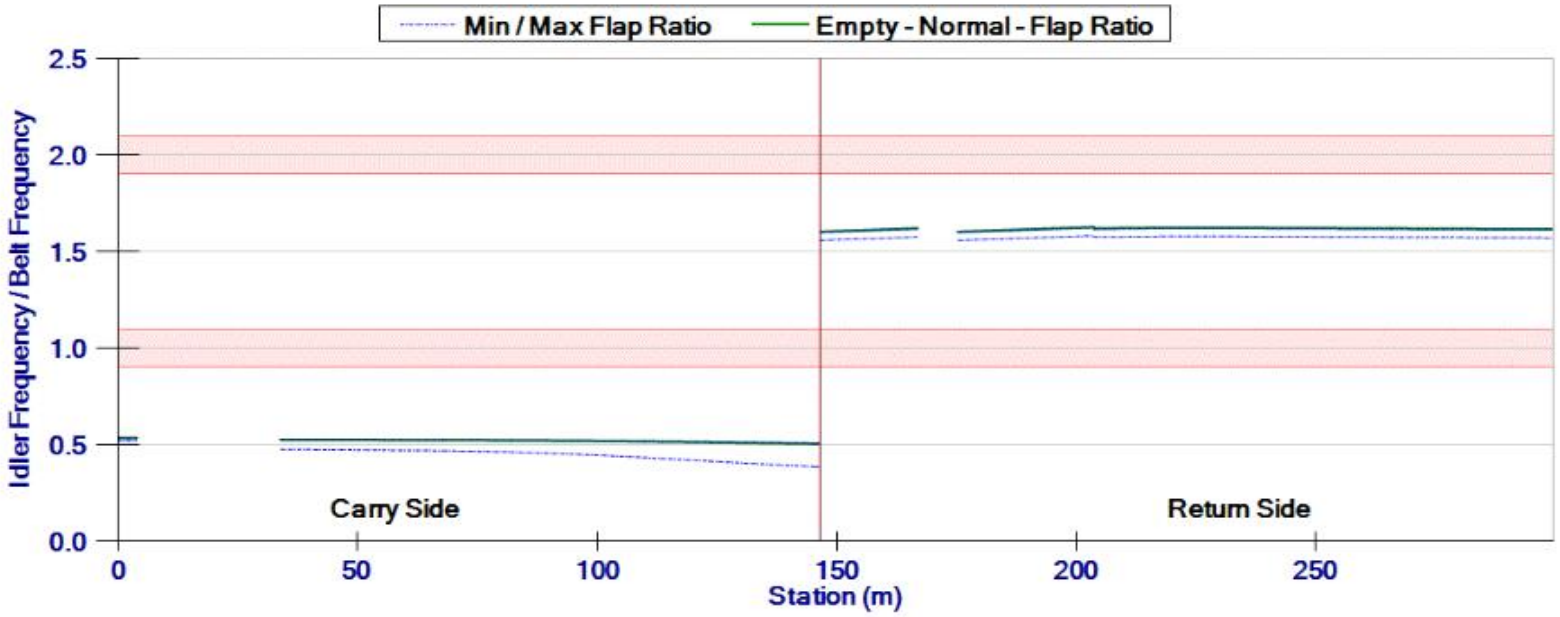


Source: Funke 1973

Recomendación para flexión longitudinal
Utilizar SAG máximo 1%

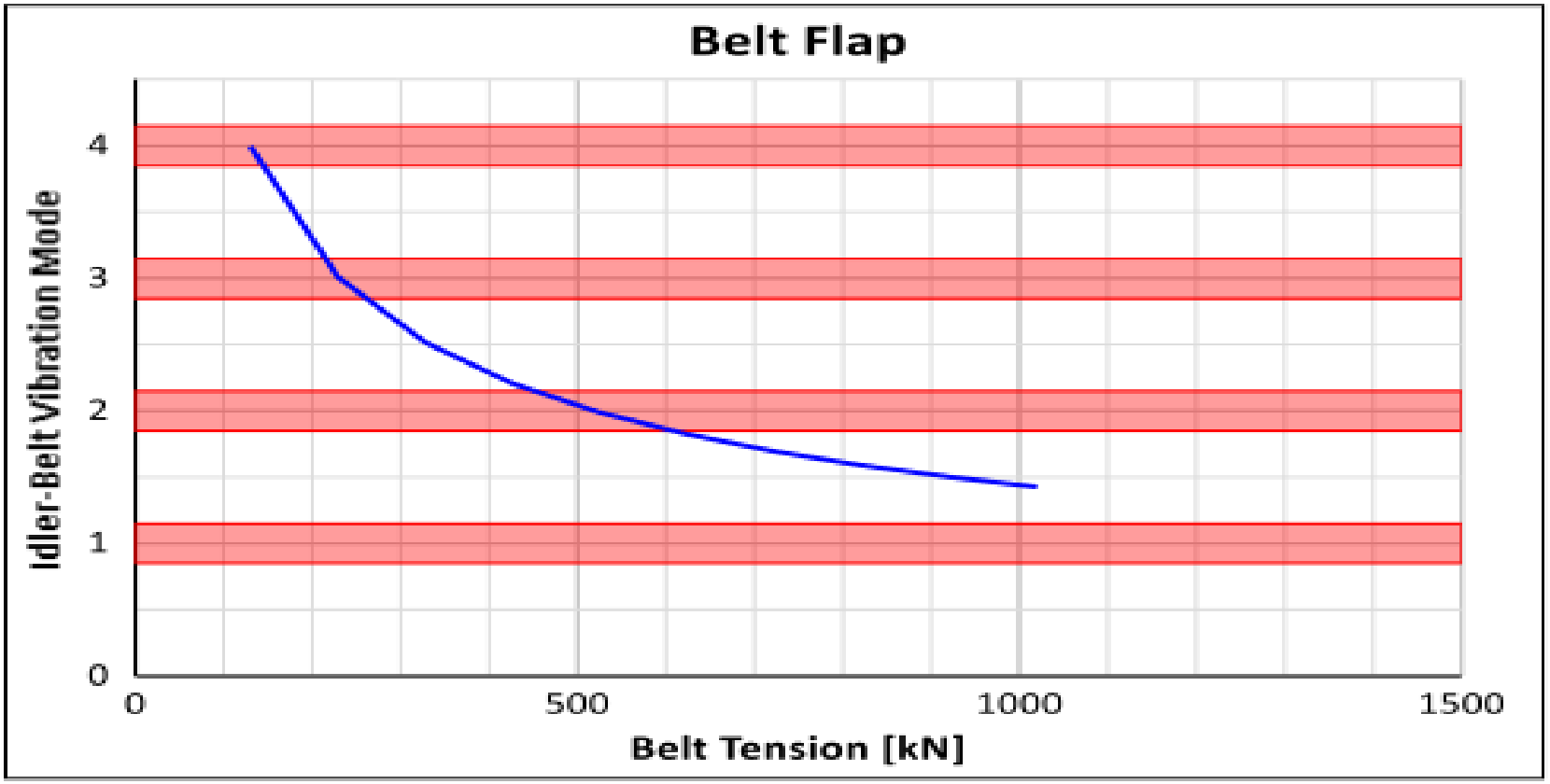
Flapeo

Los últimos proyectos han estado definiendo la distancia entre polines en 1,5 m, cumpliendo con la flexión longitudinal o flecha máxima. Sin embargo, es necesario revisar el flapeo de la correa que puede ocurrir cuando la frecuencia natural de la correa coincide con la frecuencia de rotación de los rodillos



Riesgo de Flapeo en aumento de velocidad

Correa existente, proyecto para aumentar velocidad de 6,8 m/s a 7,5 m/s



En este ejemplo, el flapeo estará presente en algunos sectores de la correa, lo que reducirá la vida útil de los rodillos. Hay que buscar solución

PROCONM
Transporte Limpio

Experiencia de un especilista

BELT

Hace un par de meses estuvimos viendo un problema de flap en una correa que tenia la unidad motriz en el retorno, alrededor de 300metros despues de la cabeza de cola. Se reviso todo para todos los posibles caso completamente cargada, vacia, secciones inclinadas. declinadastodo estaba dimensionado para el peor caso, pero se paso que cuando la correa opera a menos carga la tension entre la polea de cabeza y la unidad motriz cambia, y esto hace que la cambie la frecuencia natural de la correa, cuando corrian a un 60% justo coincidia con el primer modo y vibraba toda la estructura. Cuando la correa estaba vacia la frecuencia natural de la correa estaba bajo la de los polines y cuando subia a capacidad de diseno estaba sobre.

0:41

Flexibilidad transversal

Si la cinta no descansa en los 3 rodillos completamente, especialmente si no toca el rodillo central, la indentación aumenta considerablemente en los rodillos laterales. Por este motivo, no se recomienda utilizar el polín de eficiencia energética con el rodillo del centro más corto.





Flexibilidad transversal

Para asegurar que la cinta apoye en los tres rodillos, se debe confirmar ancho mínimo de cinta o flexión transversal o ángulo de artesa según norma ISO 703 y norma india IS 1891, Parte 1.

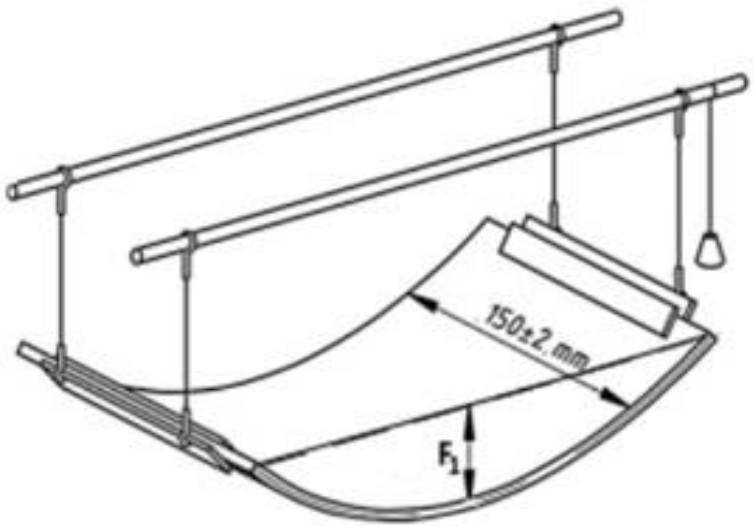


Tabla 11, IS 1891, Parte 1: Valores Mínimos para la Flexibilidad Transversal: F/L	
Ángulo Polín de Carga, en Grados	Valor Mínimo para F/L
≤ 20°	0.08
> 20 ≤ 25°	0.10
> 25 ≤ 30°	0.12
> 30 ≤ 35°	0.14
> 35 ≤ 40°	0.16
> 40 ≤ 45°	0.18

Recomendaciones para la cinta

1. Usar una cinta de alta calidad

Una cinta con cubierta de alta calidad o con mayor resistencia a la deformación y al desgaste. Recomendación: **Resistencia a la tracción > 200 kg/cm²**.

2. Usar un bajo espesor en la cubierta inferior

Un bajo espesor de cubierta disminuye el calor generado en la indentación, por consiguiente, se tiene menor energía y mayor duración de la vida útil de la cinta.

3. SAG o flecha menor a 1% según DIN 22101

Menor amplitud de las vibraciones y menor indentación.

4. Si es posible utilizar cintas de telas

Si la tensión máxima lo permite, preferir cinta de telas por sobre la cinta con cables.

5. Preocuparse de la cubierta superior

La cubierta superior está en contacto con los polines de retorno. Por tanto, rigen los mismos requisitos que para la cubierta inferior. Con la excepción que el desgaste es una variable de mayor preocupación.

6. Alejarse del riesgo de flapeo

Además de los problemas asociados a la operación y mantención, sin lugar a duda, el flapeo consume energía.

PROCONM
Transporte Limpio

BELT



Impacto y logros

Ventajas e impactos

Cuando se aplica el criterio de diseño de baja energía específica, no sólo se logra una menor potencia, también tiene impacto en lo siguiente:

1. Tensión máxima de la cinta de menor magnitud
2. Disminuye el peso de la cinta
3. Menor tensión en el retorno
4. Disminuye la carrera del tensor
5. Menor tensión del tensor
6. Disminuye el “tirón” o las solicitaciones sobre cada estructura o soporte
7. Disminuyen las solicitaciones sobre cada polea
8. Momento torsor de menor magnitud en la polea motriz
9. Sistema motriz completo con menor torque
10. Menores solicitaciones y SAG implica disminución de vibraciones
11. Mayor vida útil de componentes
12. Impacto positivo sobre el medio ambiente

Ventajas en el CAPEX

En una correa larga, diseñada desde la primera etapa con el criterio de eficiencia energética, se logra un **menor CAPEX** por lo siguiente:

- Cinta de menor capacidad.
- Sistema motriz de menor capacidad
- Poleas de menor diámetro de eje y más livianas
- Variadores de frecuencia o partidores suaves de menor capacidad
- Menor tamaño y capacidad de la sala eléctrica
- Sistema tensor de menor capacidad
- Menor espacio para el tensor
- Estructuras soportantes más livianas
- Menor costo en fundaciones y armaduras
- Estaciones de polines con algo menos de capacidad

Ventaja en correas existentes

En una correa existente ya no se puede disminuir el CAPEX. El gran impacto se tiene en el OPEX con el aumento de capacidad o disminución de la potencia. Esto se puede lograr por dos vías.

Implementación en el corto tiempo. Esto implica un cambio total rodillos y/o cinta con parada de planta. Es decir, con pérdida de producción durante su implementación, que se puede recuperar en el tiempo con el aumento de capacidad.

Implementación paulatina. Cambio paulatino y programado de rodillos y/o cinta durante paradas programadas. Esta opción demora más, pero, no genera pérdidas de producción.

Ventajas en OPEX, seguridad y medio ambiente

El **menor OPEX**, tanto en correas nuevas como existentes, se produce por lo siguiente:

- Menor consumo de energía específica
- Aumento de la disponibilidad por aumento en la vida útil de los componentes y tiempos de recambio
- Menor costo por recambio de cinta
- Menor costo por recambio de rodillos
- Etc.

Seguridad. Ante un posible corte de cinta o rotura de un eje de polea, una menor tensión máxima disminuye el riego de afectar a personas y el impacto sobre las instalaciones es menor.

Medio ambiente. En general, un menor consumo específico de energía tiene un impacto positivo en el medio ambiente al disminuir los gases contaminantes.

PROCONM
Transporte Limpio

BELT



Otros ejemplos

Cambio Total -Experiencia RWE

Antes

Capacidad: 2.300 t/h
Ancho de cinta: m (40")
Cinta: ST 2250
Calidad de la cubierta: Estándar DIN-X
Polín: Estándar
Factor de fricción: 0.017

Después

Capacidad: 3.300 t/h **(incremento en un 44%)**
Ancho de cinta: 1,1 m (44")
Cinta: ST 2100
Calidad de la cubierta: Optimizada de baja pérdida
Polín: Baja resistencia a la rodadura
Factor de fricción : 0.011

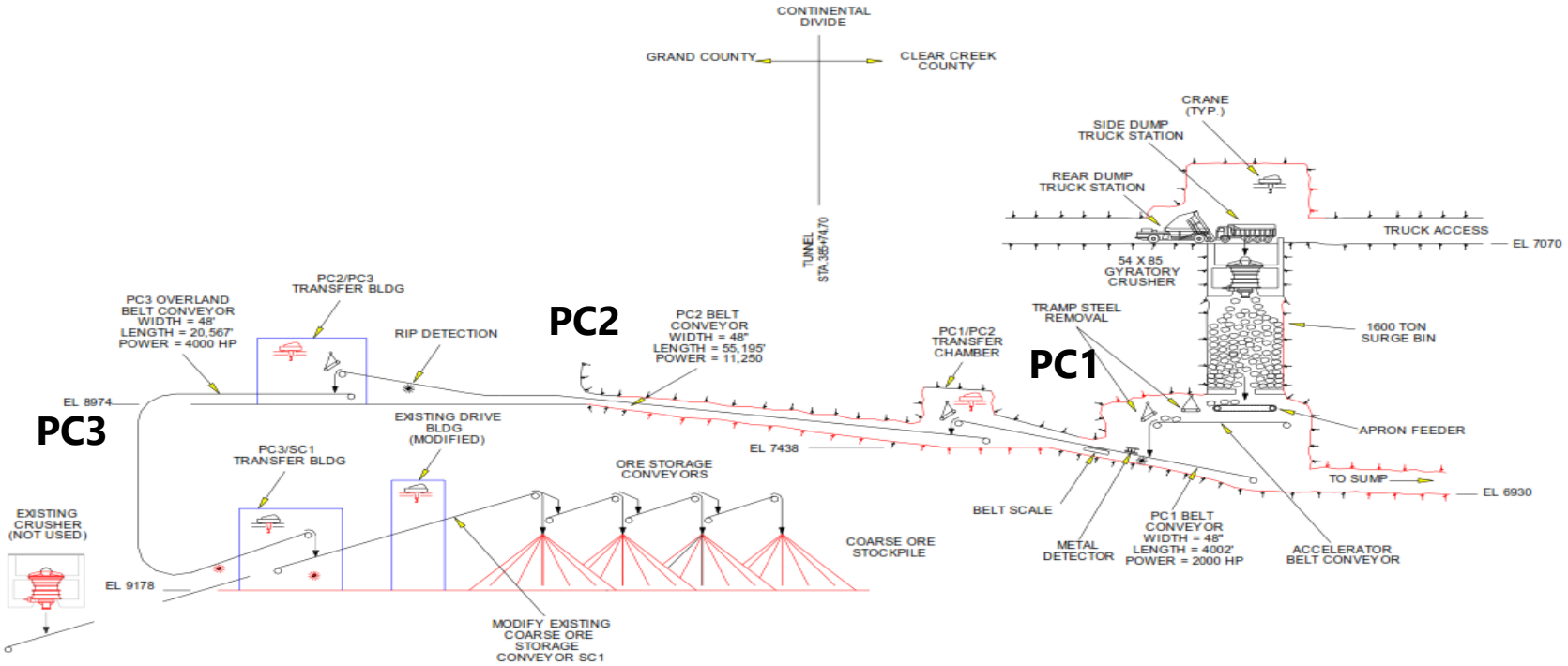
Lugar: KPC, Kalimantan Borneo
Mineral: carbón
Largo: 13 km
No se cambió el sistema motriz. Es decir, la potencia se mantuvo constante



Mina Henderson, un ejemplo de eficiencia energética

Proyecto Henderson 2000. Sistema de Transporte proyectado y construido pensando en lograr un bajo consumo de energía eléctrica. Está compuesto por tres correas transportadoras para mineral de molibdeno desde la mina hasta la planta, distantes 24 Km.

El proyecto finalizó con 14 millones de dólares por debajo del presupuesto y 3,5 meses antes de lo programado.



Mina Henderson, un ejemplo de eficiencia energética

Este sistema de transporte es uno de los más avanzados en cuanto a la eficiencia energética, logrando un **factor de fricción entre 0,008 y 0,0095**, un 23% por debajo del factor de diseño, los valores más bajos alcanzado hasta el momento.

Ancho de las correas 48”
Velocidad de las correas 4,5 m/s y 6,1 m/s.

Correa PC1
Largo: 1.220 m
Alto: 160 m
Potencia instalada: 1.500 kW

Correa PC2
Largo: 6.825 m
Alto: 475 m
Potencia instalada: 8.200 kW

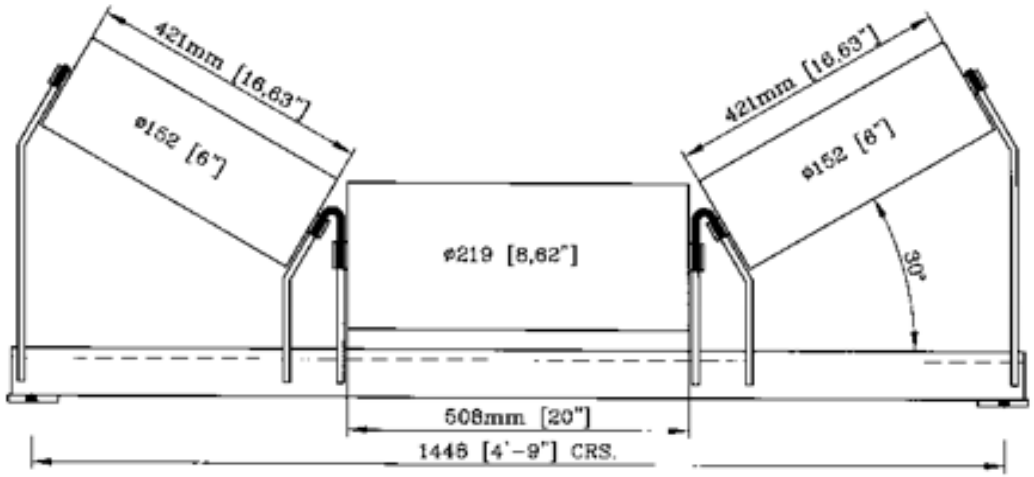
Correa PC3
Largo: 6.400 m
Alto: 76 m
Potencia instalada: 3.000 kW



Mina Henderson, un ejemplo de eficiencia energética

Tanto los polines como las cintas utilizadas para los transportadores Henderson se probaron en la Universidad de Hanover para determinar la IRR y RFR.

Polines. Se utilizó el polín con rodillo de mayor diámetro en el centro. El RFR arrojó 2 N por debajo del polín estándar.

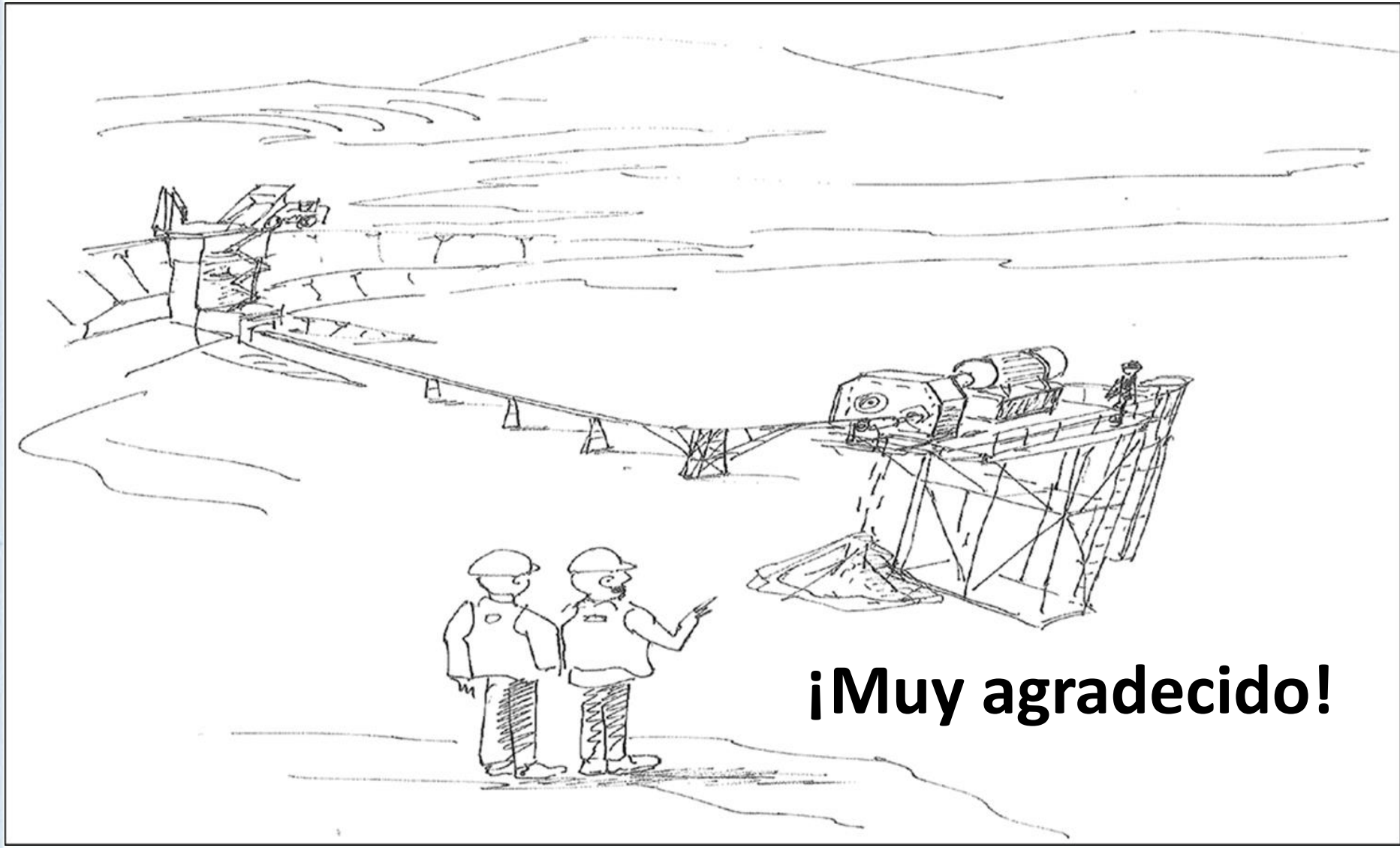


Ejemplos de correas largas y eficiencia energética

Descripción	Longitud (km)	Fricción ficticia	Eficiencia
Codelco-Andina Correa A-7	4,7	0,016	Regular
Codelco-Andina Correa 5	5	0,018	Regular
Cerro Verde Óxidos	3	0,011	Buena
Henderson	1	0,008	Muy buena
Henderson	6	0,012	Buena
KPC, Kalimantan	13	0,011	Buena
Escondida	1,2	0,020	Mala
Optimun Colliery	6	0,019	Mala
Batu Hijai	6	0,017	Regular
Koornfontein	6	0,019	Mala
Henderson	17	0,008	Muy buena
Escondida	1,8	0,020	Mala

PROCONM
Transporte Limpio

BELT



¡Muy agradecido!