



VI Congreso de
Correas Transportadoras

27 y 28 de marzo 2014

Hotel Sheraton Miramar, Viña del Mar / Chile

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CORREAS TRANSPORTADORAS LARGAS



EFRAÍN BOZO GODOY

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**.



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.

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.

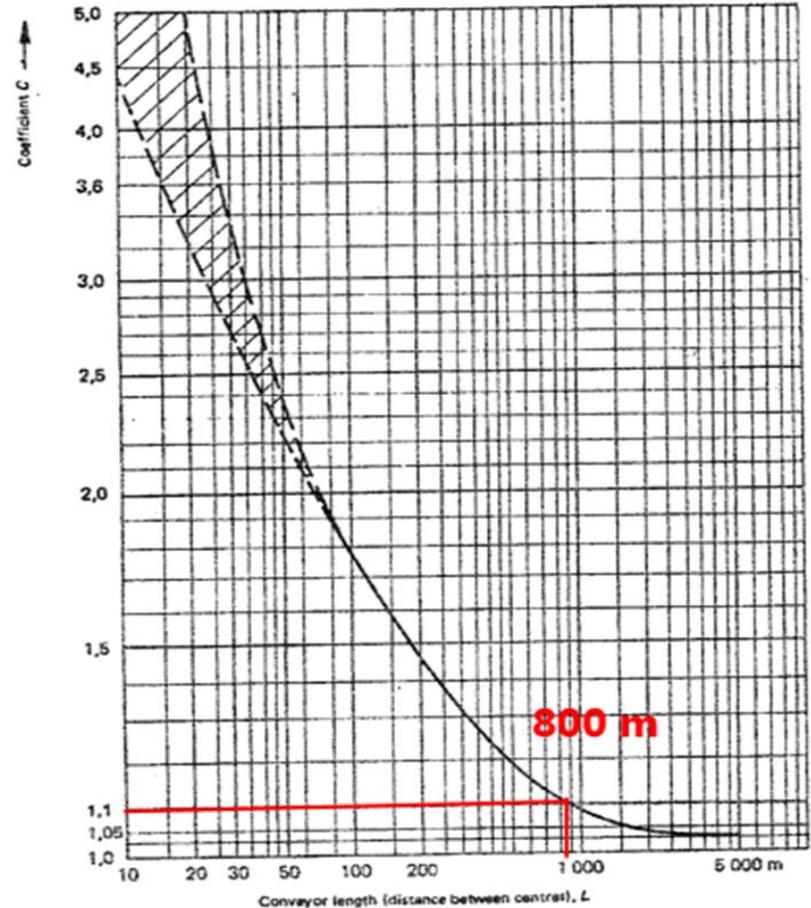
Se consideran correas mayores a 80m, considerando que, a partir de esta longitud, las resistencias secundarias se pueden reemplazar por un factor en las resistencias principales

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

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 $C \leq 1.1$, esto es, una correa larga es la que tiene más de 800 metros.



Correa Larga > 800 m

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

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 \implies

$$F_U = CF_H + F_{St}$$

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

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

g : Aceleración debido a la gravedad, $9,81 \text{ m/s}^2$

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

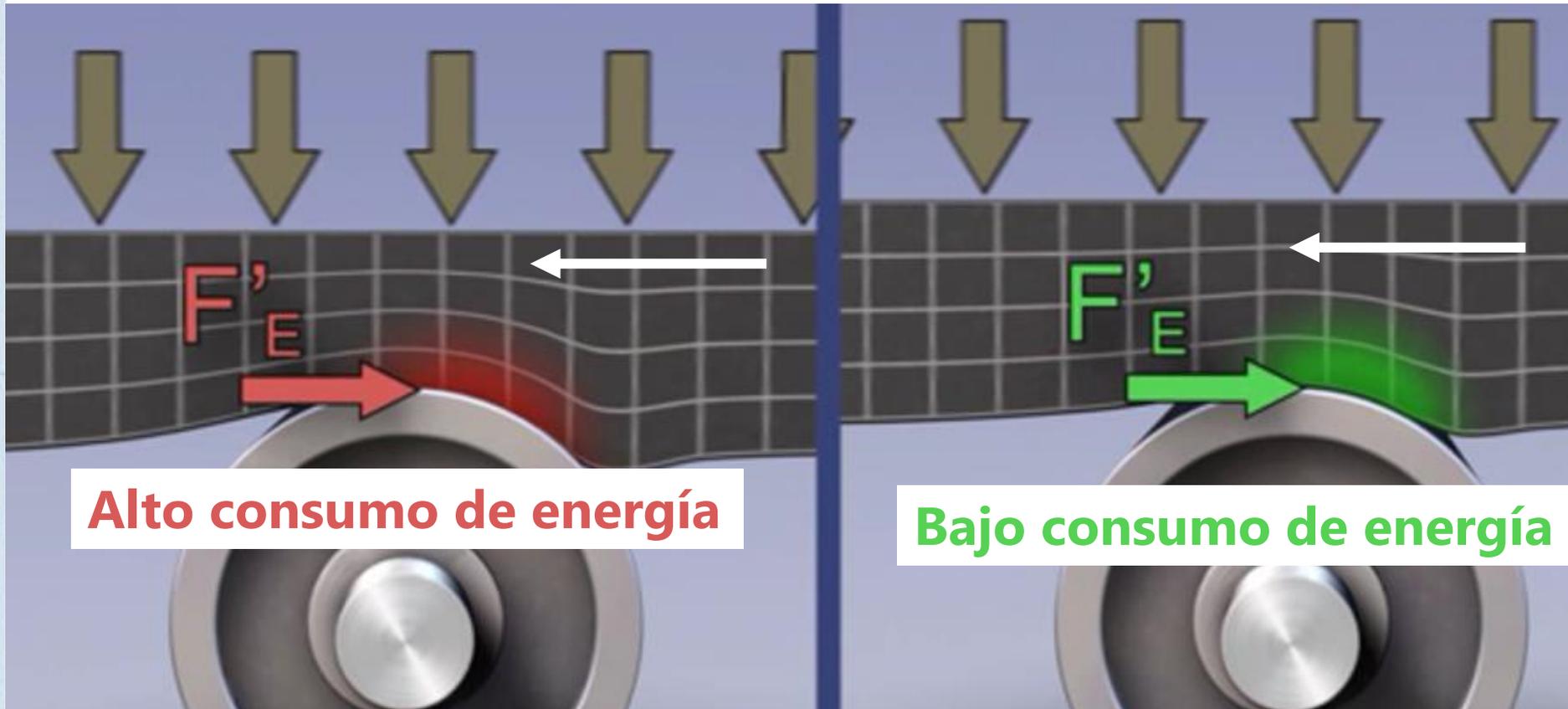
q_B : Masa de la correa a lo largo del lado de carga y de retorno, por metro

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

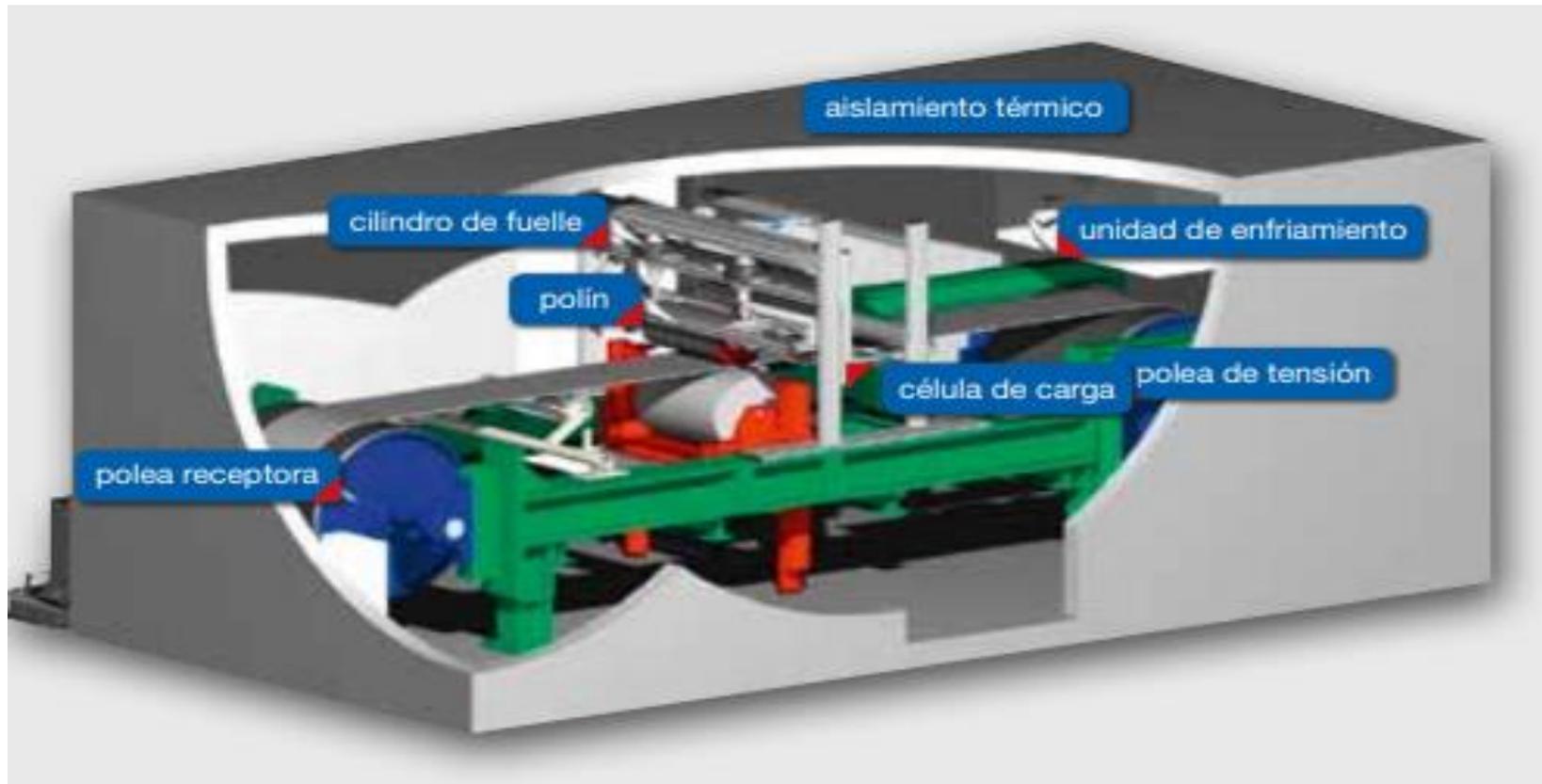
La indentación es la deformación de la cinta sobre los rodillos. A mayor indentación mayor consumo de energía, mayor valor del factor ficticio de fricción.

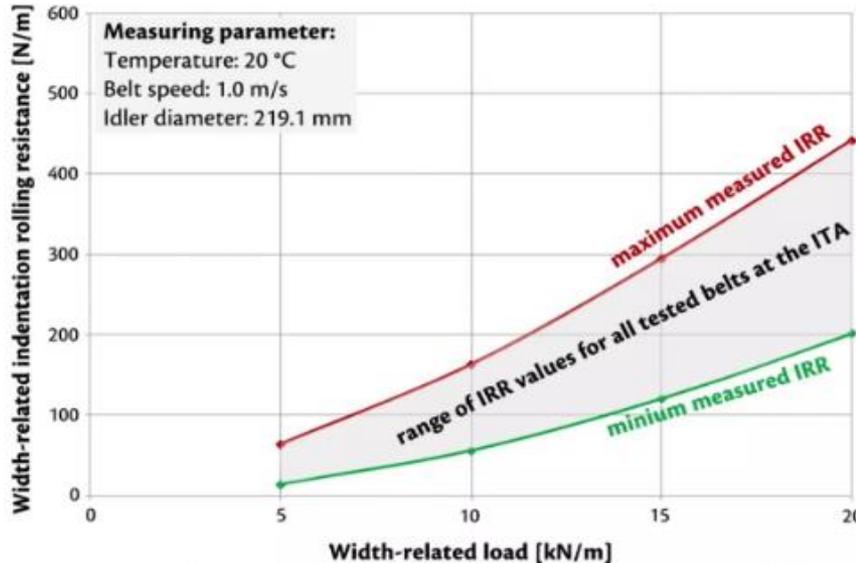


Para una carga y velocidad definida, y considerando que no existe problemas operacionales, las siguientes variables impactan e inciden en la indentación:

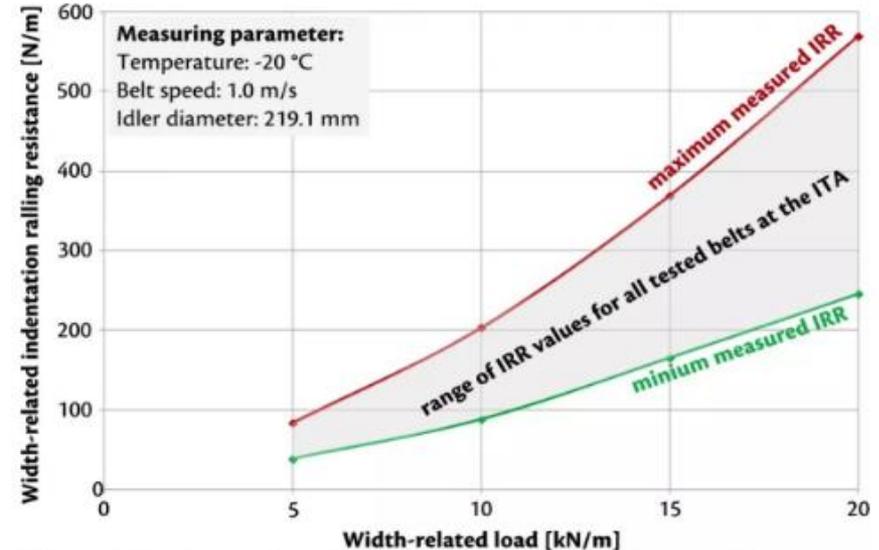
- Calidad de la cubierta de la cinta, especialmente en el lado de carga
- Espesor de la cubierta de la cinta
- Resistencia a la rodadura de los rodillos
- Diámetro del rodillo, principalmente el rodillo central
- Descentramiento de la carga
- Ángulo de artesa o de acanalamiento
- Flexión longitudinal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

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





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:

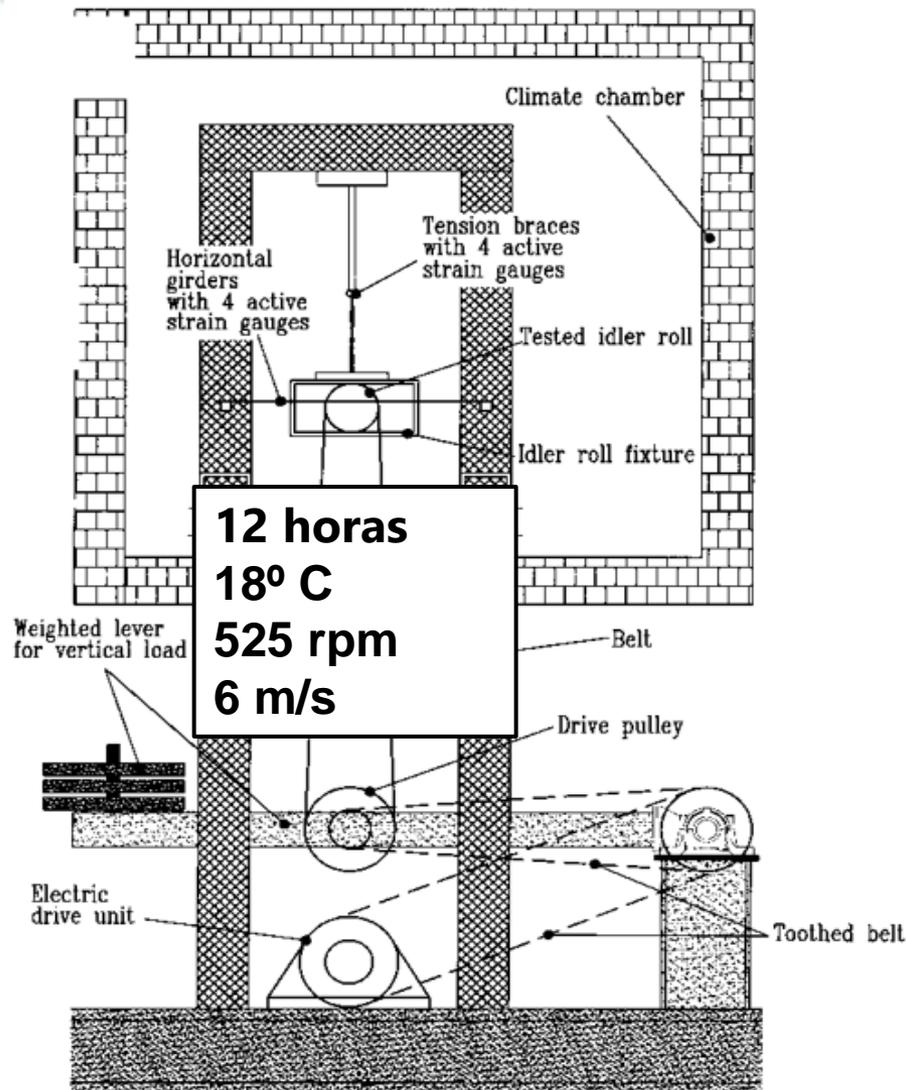
- Calidad las cubiertas de la cinta
- Espesor de la cubierta
- Diámetro del rodillo
- Temperatura ambiente

Los fabricantes tienen cinta para eficiencia energética con mediciones de IRR

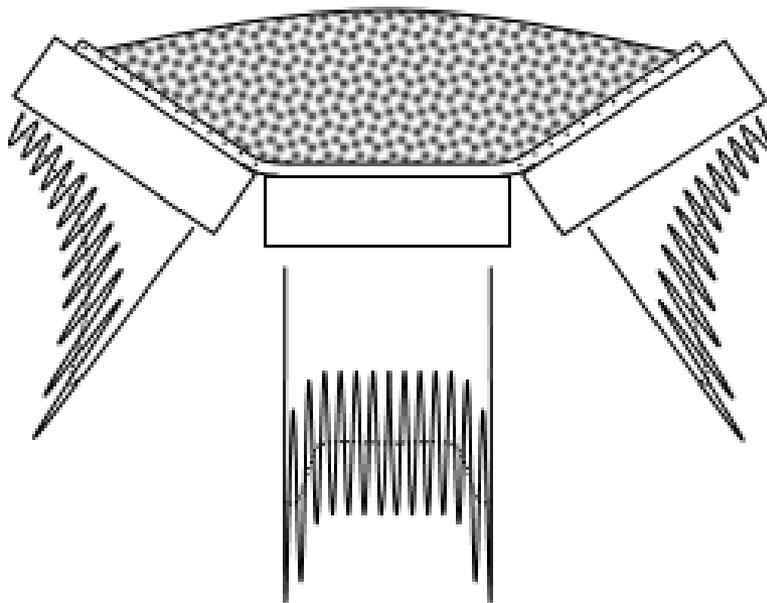
En la Figura se muestra el banco de pruebas de la Universidad de Hannover, Alemania, para obtener datos sobre valores de resistencia a la rodadura de los polines, "Rolling Frictional Resistance", RFR

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

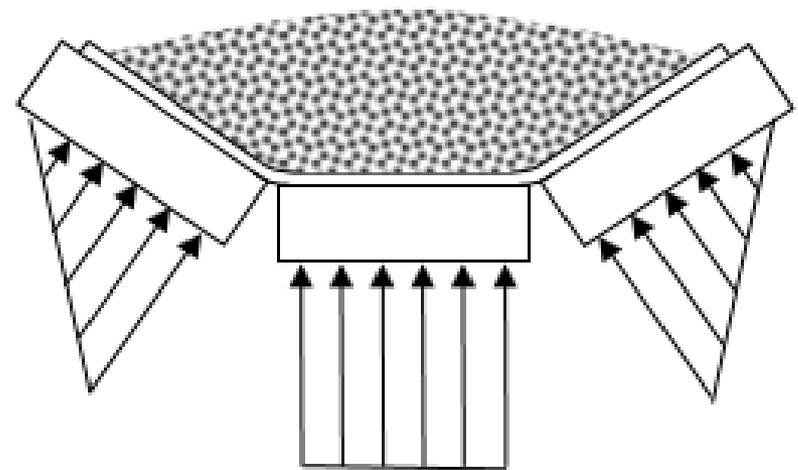
La experiencia dice que se han logrado mediciones de RFR desde 2 N hasta 20 N.



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



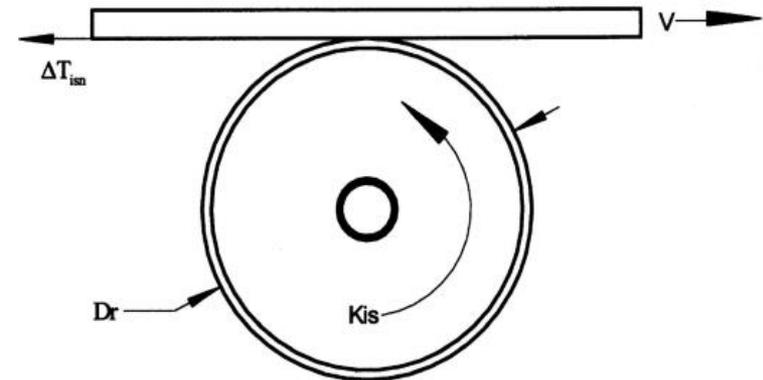
Cinta con telas

El tipo de polín CEMA tiene asociado las características del rodamiento o el par de rozamiento K_{is} . 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_{TIS} and R_{TIV} discussed below)

Idler Series	K_{is} (in x lbf)	K_{iv} (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 C_{iw} 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

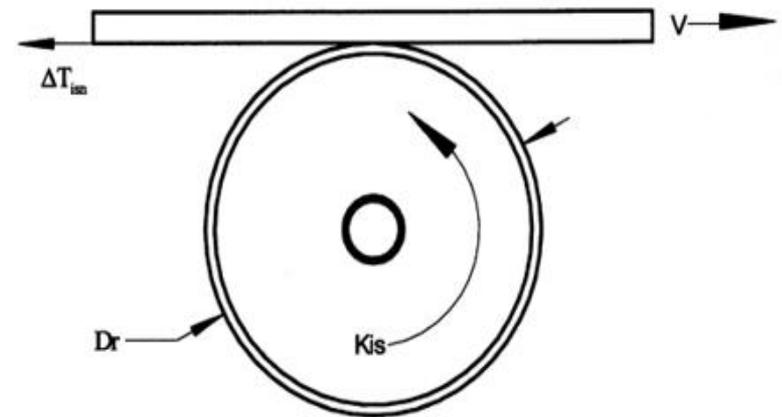
Para un mismo tipo de polín CEMA, si el diámetro es mayor la resistencia disminuye. Esto es, un rodillo de mayor diámetro consume menos potencia.

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.

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

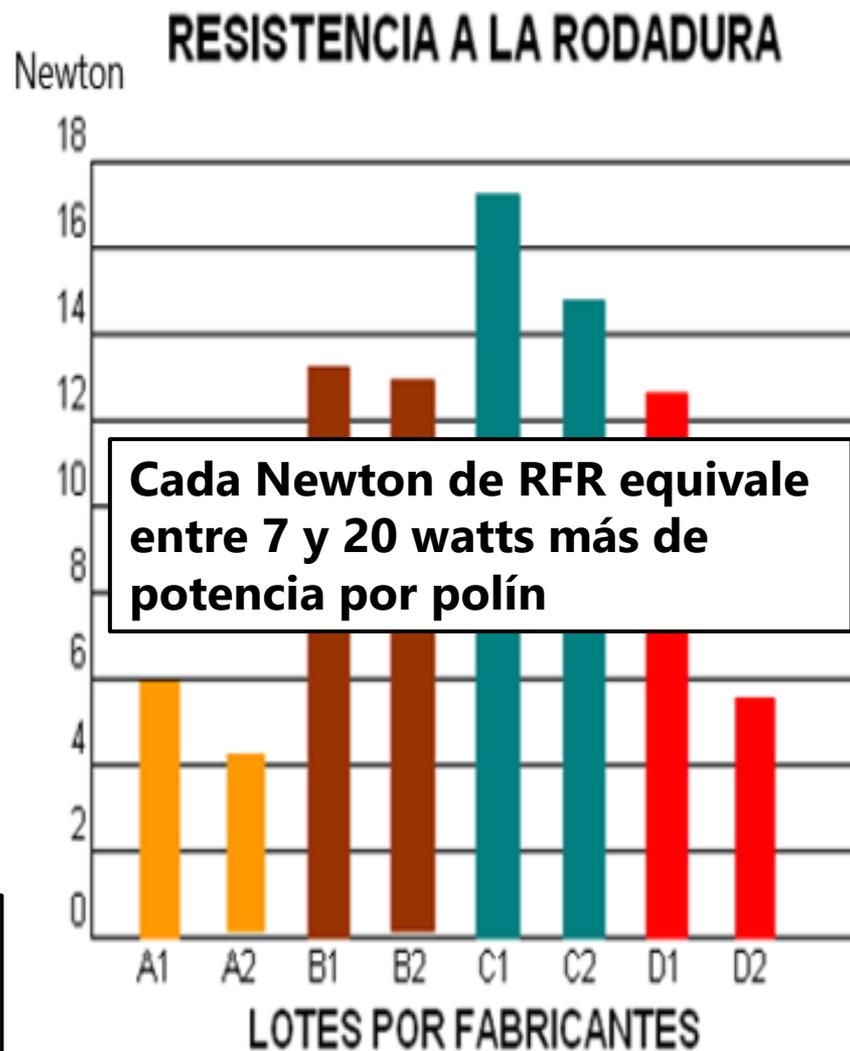
Diámetro del rodillo



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.

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



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

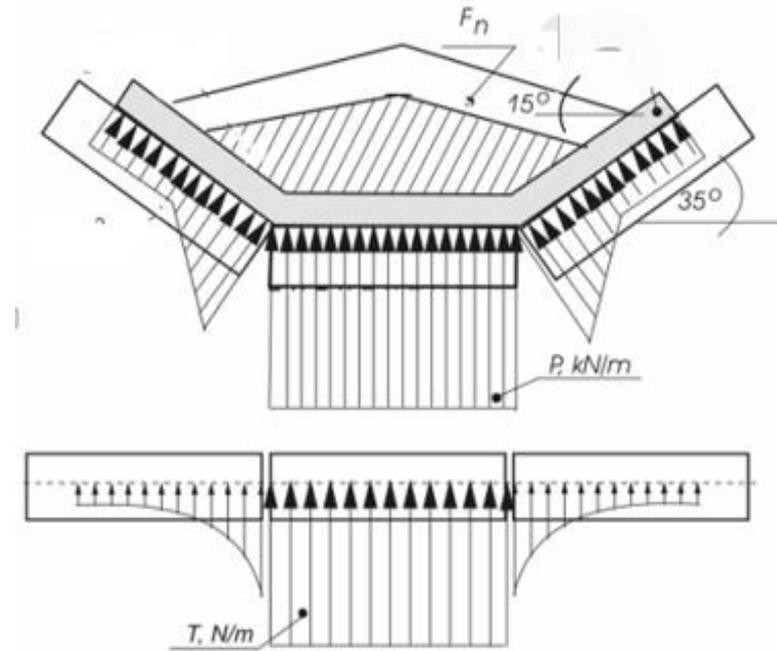


Un polín estándar puede ser de baja energía si se cumple lo siguiente:

- 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

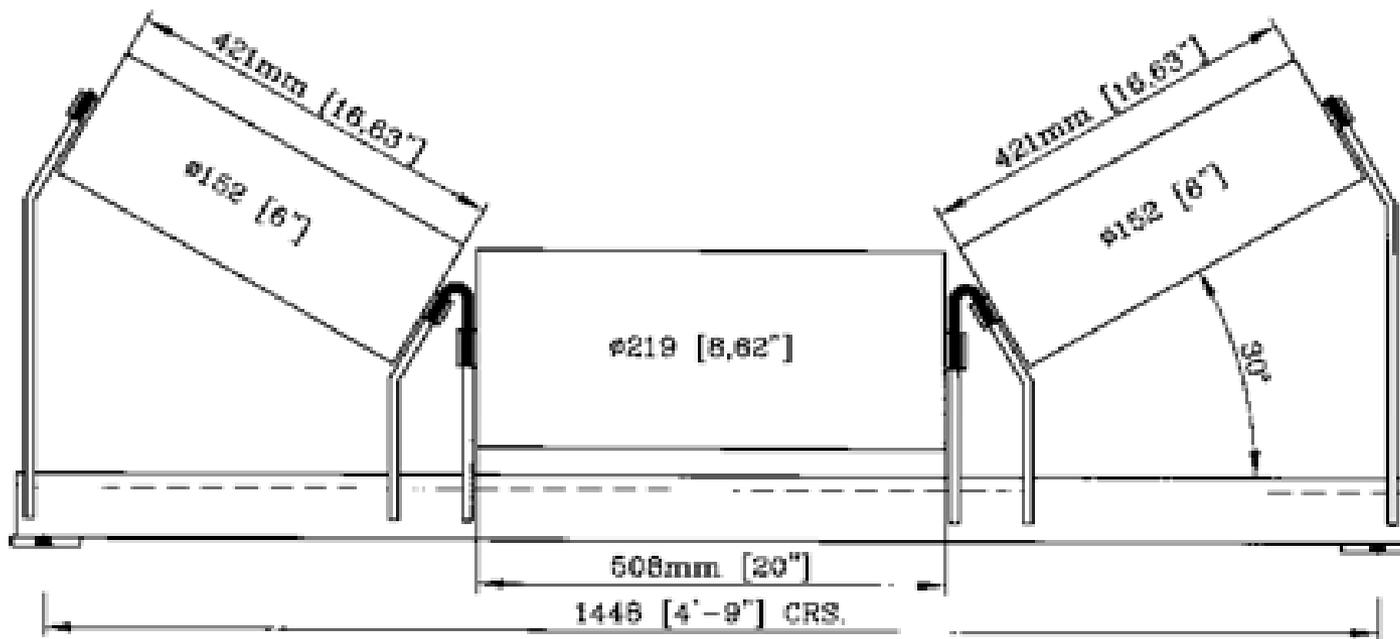


Rodillo del centro tiene una mayor sollicitación. Por tanto, la indentación o deformación es mayor en esa zona.

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.

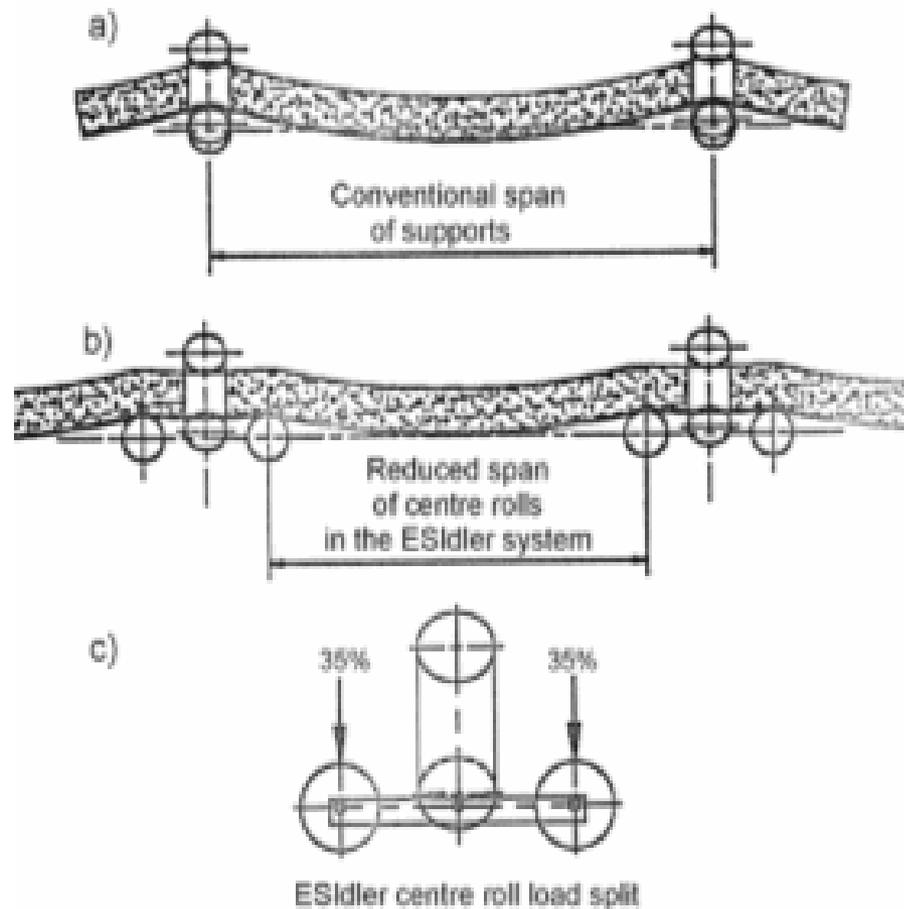


Polín especial de baja energía con 2 rodillos en el centro



Los dos rodillos centrales tienen la posibilidad de inclinarse 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.





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 $RFR < 4$**

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



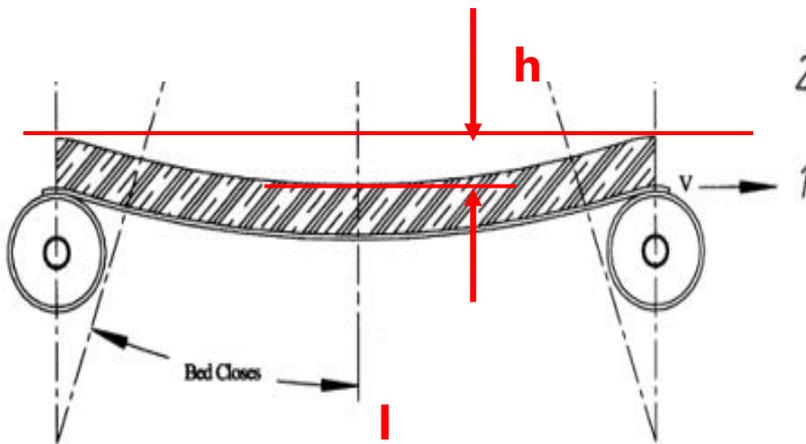
Flexión longitudinal

SAG < 1% (DIN 22101)

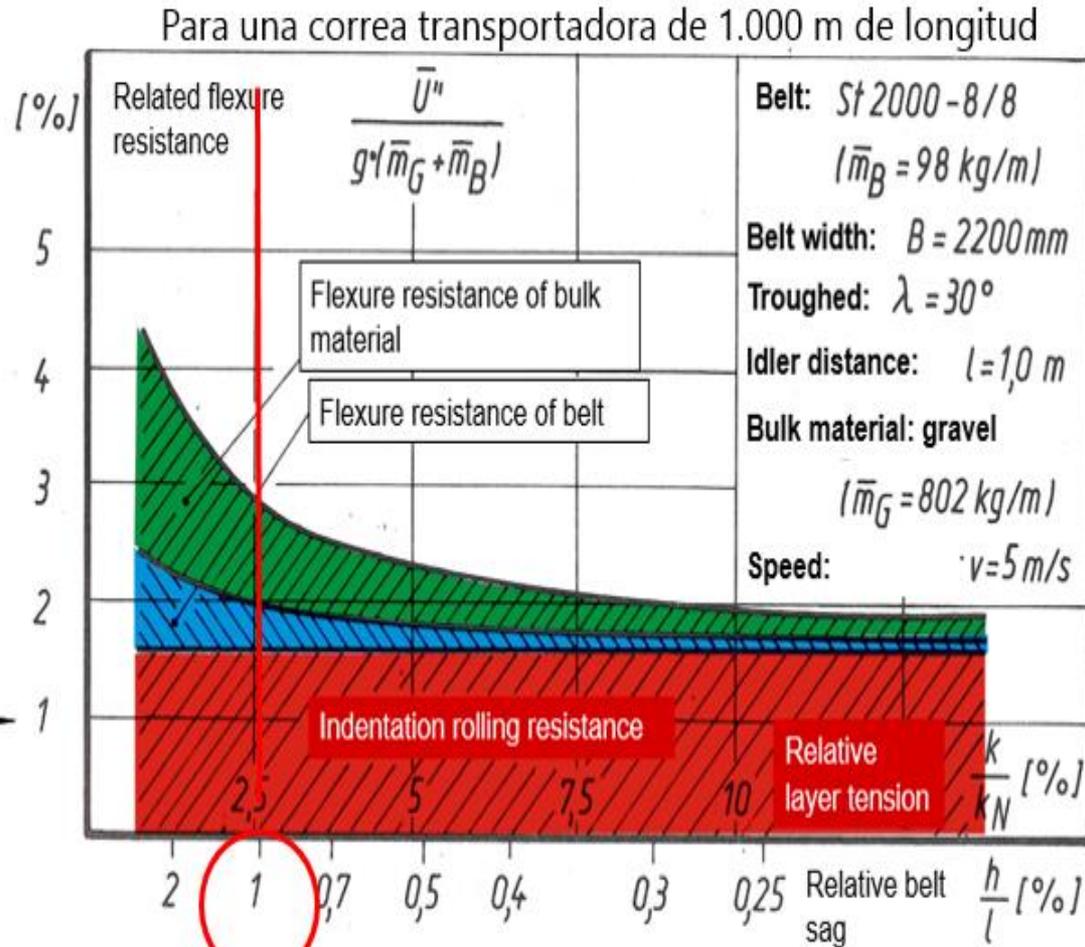


Una flecha mayor a 1% aumenta la amplitud de la oscilación disminuyendo la vida útil de los rodamientos y aumenta considerablemente la tensión. Por tanto, se recomienda:

SAG o flecha $h/l < 1\%$

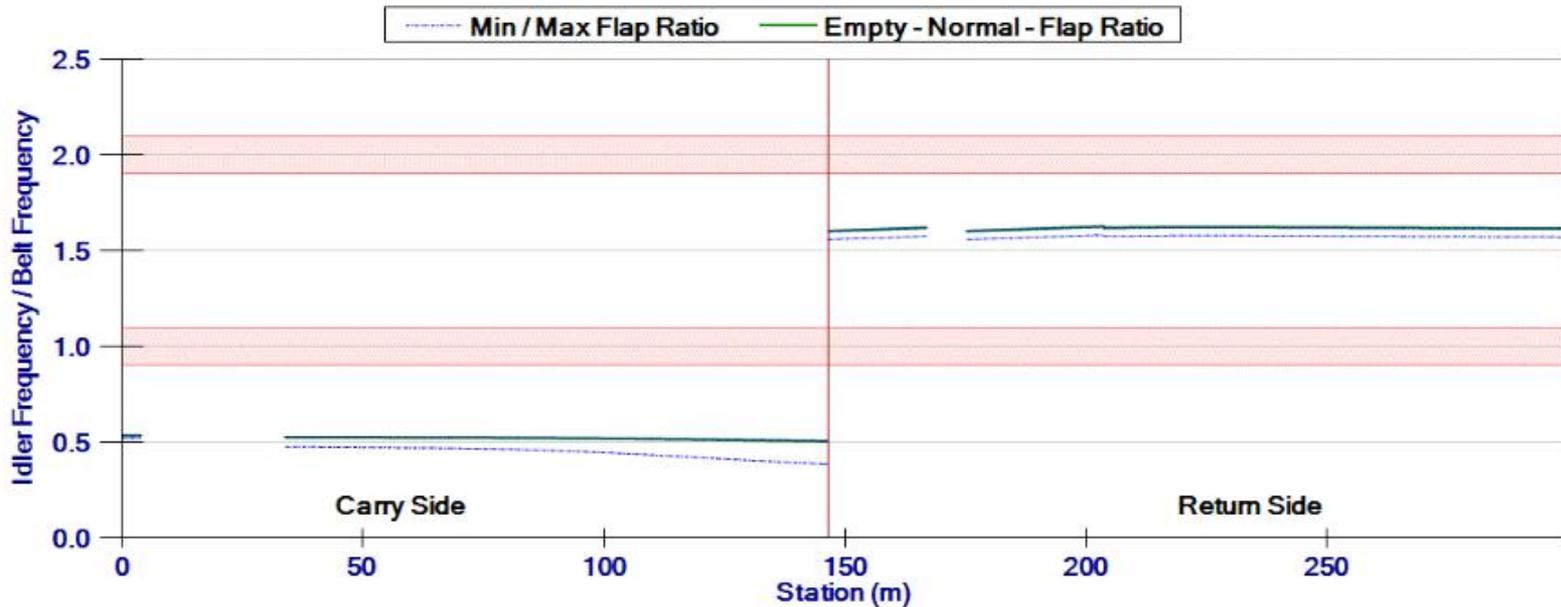


Recomendación para flexión longitudinal
Utilizar SAG máximo 1%

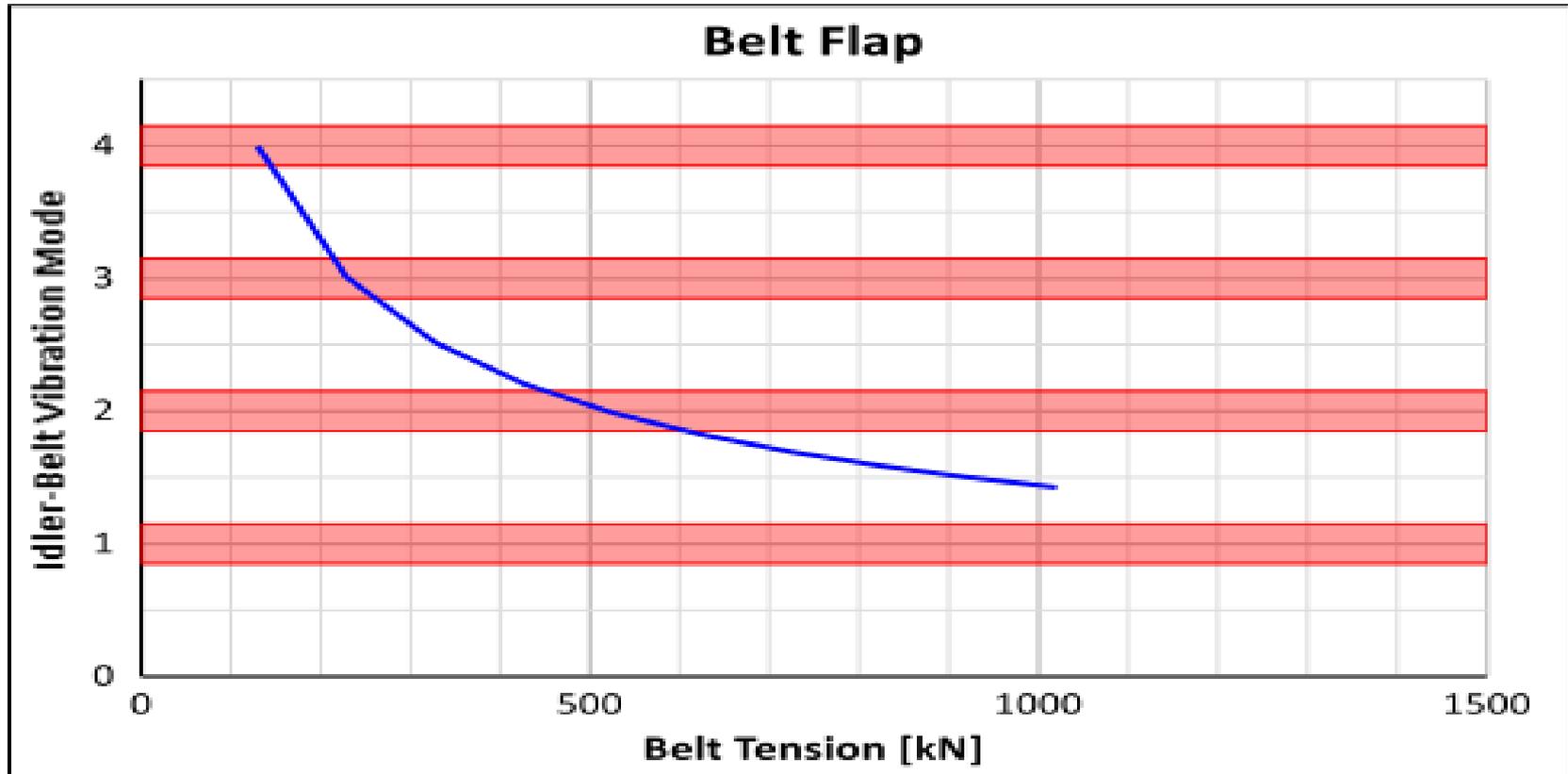


Source: Funke 1973

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



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

Hace un par de meses estuvimos viendo un problema de flap en una correa que tenía la unidad motriz en el retorno, alrededor de 300 metros después de la cabeza de cola. Se revisó todo para todos los posibles casos completamente cargada, vacía, secciones inclinadas. Todo estaba dimensionado para el peor caso, pero se pasó que cuando la correa opera a menos carga la tensión entre la polea de cabeza y la unidad motriz cambia, y esto hace que cambie la frecuencia natural de la correa, cuando corria a un 60% justo coincidía con el primer modo y vibraba toda la estructura. Cuando la correa estaba vacía la frecuencia natural de la correa estaba bajo la de los polines y cuando subía a capacidad de diseño estaba sobre.

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.



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.

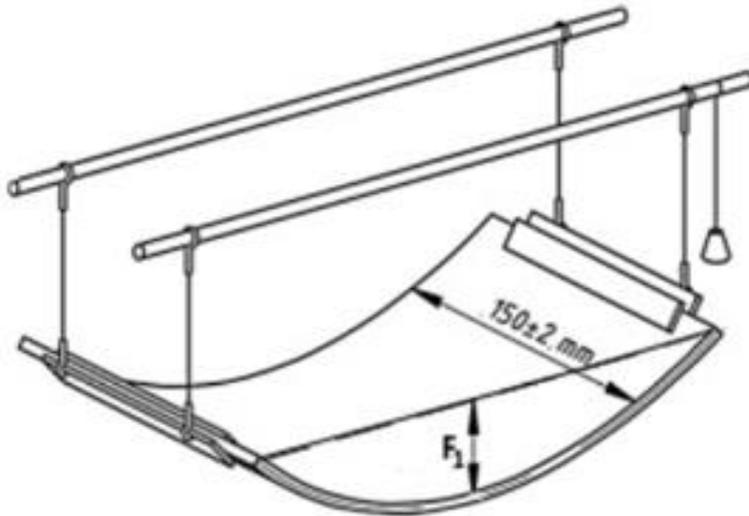


Tabla 11, IS 1891, Parte 1: Valores Mínimos para la Flexibilidad Transversal: F/L

Ángulo Polín de Carga, en Grados	Valor Mínimo para F/L
$\leq 20^\circ$	0.08
$> 20 \leq 25^\circ$	0.10
$> 25 \leq 30^\circ$	0.12
$> 30 \leq 35^\circ$	0.14
$> 35 \leq 40^\circ$	0.16
$> 40 \leq 45^\circ$	0.18



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.



Impacto y logros

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 sollicitaciones sobre cada estructura o soporte
7. Disminuyen las sollicitaciones sobre cada polea
8. Momento torsor de menor magnitud en la polea motriz
9. Sistema motriz completo con menor torque
10. Menores sollicitaciones y SAG implica disminución de vibraciones
11. Mayor vida útil de componentes
12. Impacto positivo sobre el medio ambiente

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



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.

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 riesgo 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.



Otros ejemplos

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

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

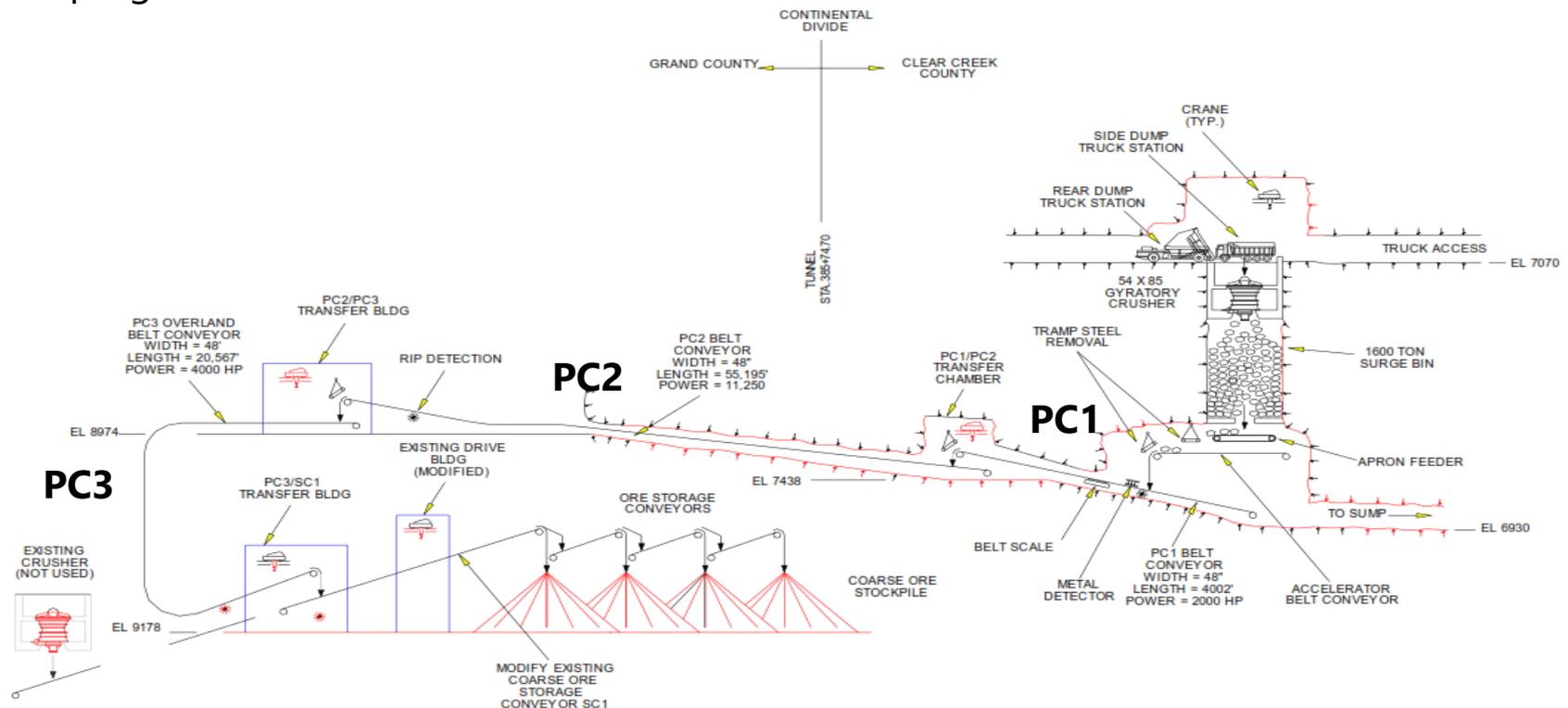
Después

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



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.



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

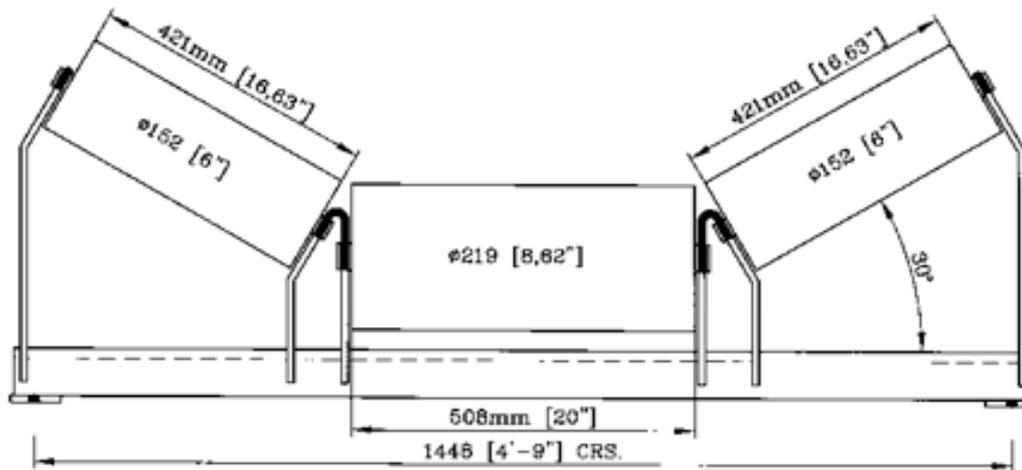
Alto: 76 m

Potencia instalada: 3.000 kW

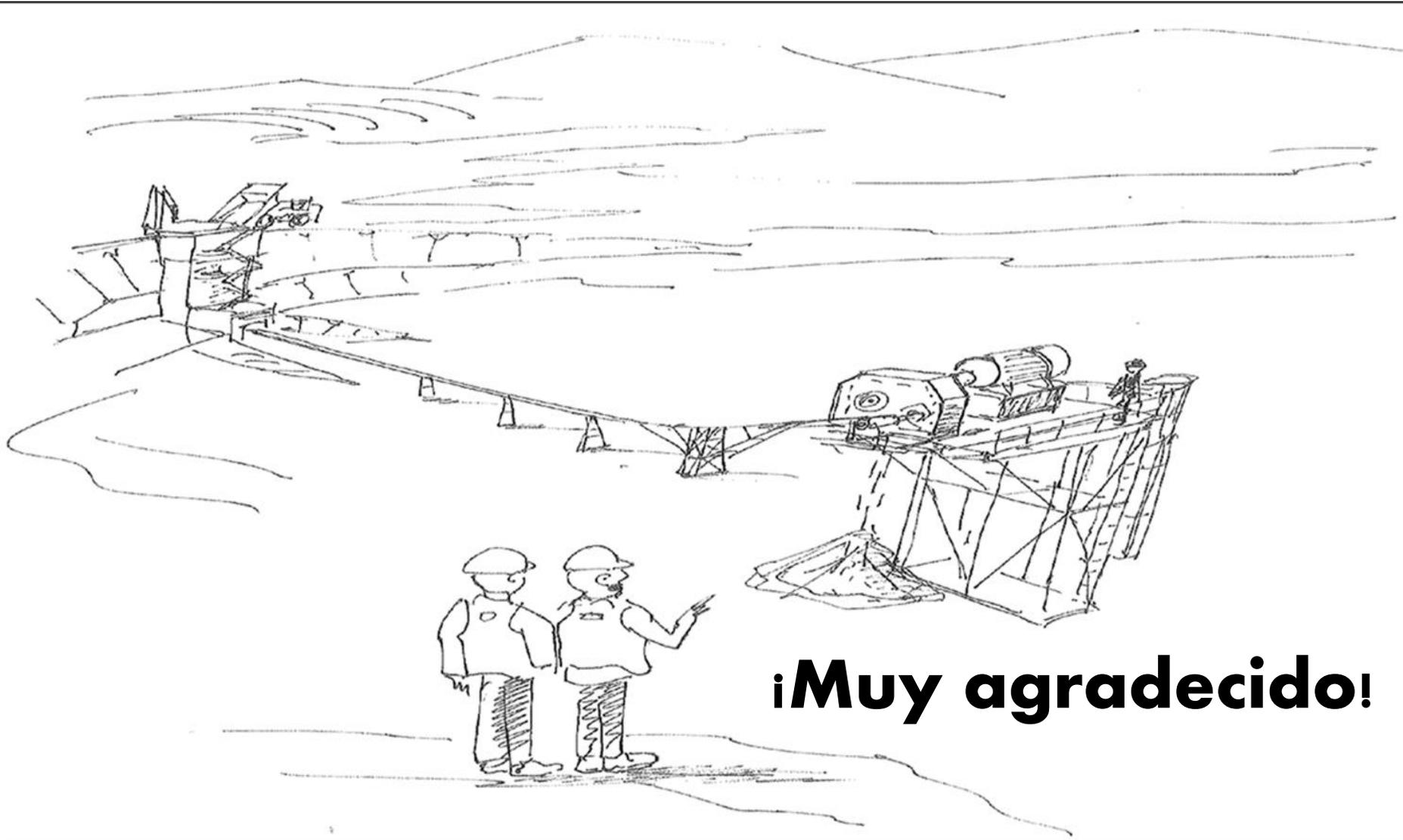


Tanto los polines como las cintas utilizadas para los transportadores Henderson se probaron en la Universidad de Hanover para determinar la IRR y RFR.

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



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



¡Muy agradecido!