

# GEOMET2016

3<sup>rd</sup> International Seminar on Geometallurgy

## Una nueva Prueba de Bajo Costo para Complementar la Prueba Bond Estándar para la Caracterización Geometalúrgica

Peter Amelunxen, Fernando Torres, Luis Panduro, Patricio Berríos  
*Aminpro*

[www.gecamin.com/geomet](http://www.gecamin.com/geomet)



Universidad de Concepción  
Instituto GEA



**GECAMIN**  
Conferences for Mining

# La Prueba Bond Estándar

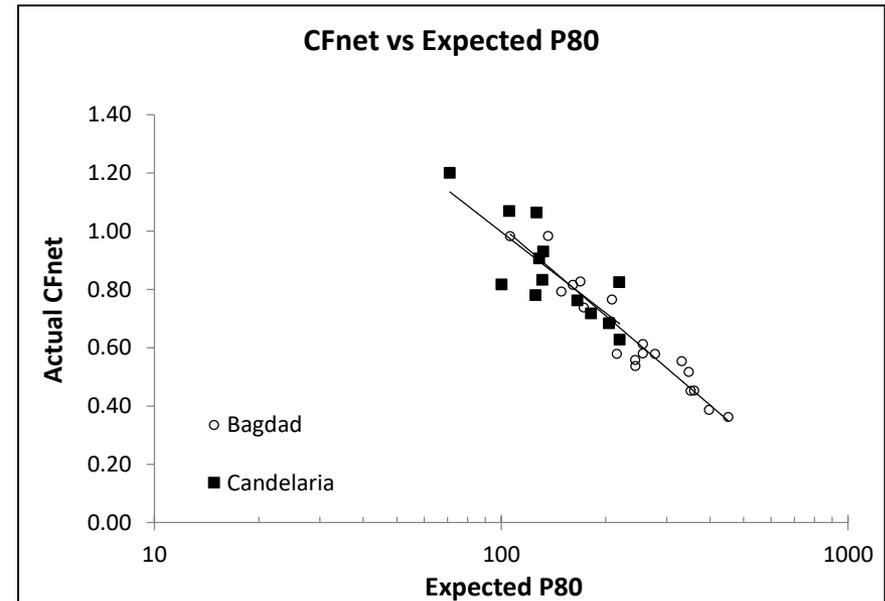
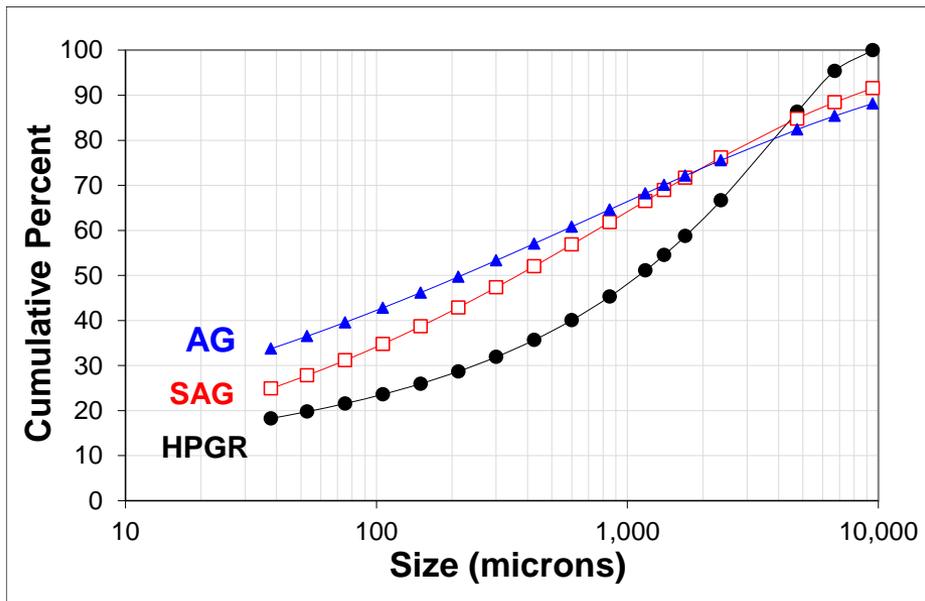
- Procedimientos publicado en 1933
- Ecuación Bond propuesta por 1ª vez en 1952
- Originalmente se propuso una “ley universal”

$$\left(\frac{kWh}{t}\right)_{pinion} = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}}\right) CF_{net}$$

- El valor del  $Cf_{net}$  depende del tipo del circuito
- $Cf_{net} = 1.0$  para:
  - Molino de humedo de 6' de diametro
  - Circuito cerrado con ciclones
  - Alimentado por un Molino de barras

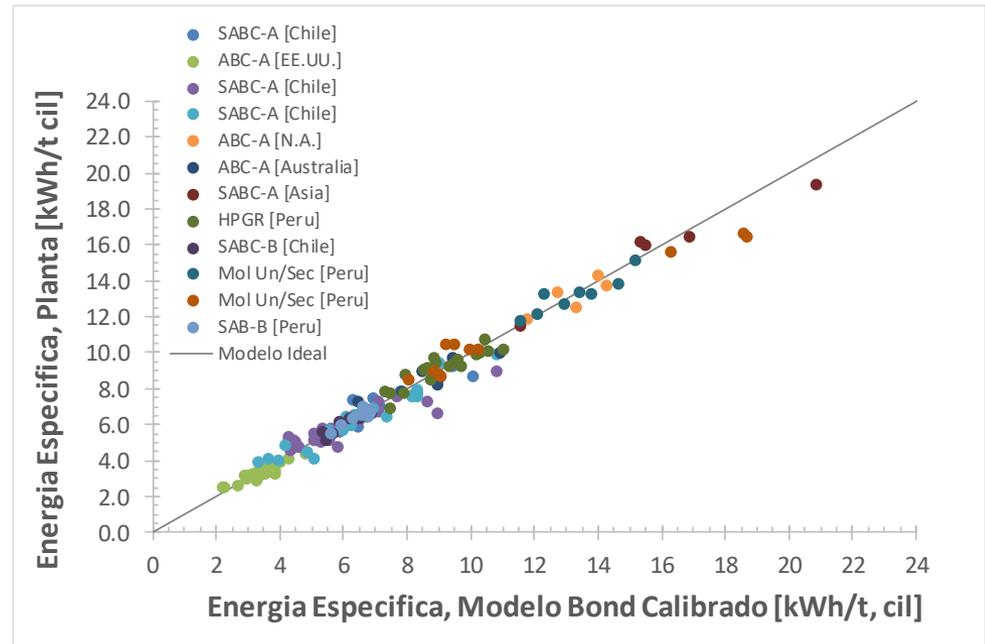
# Valor del CF<sub>net</sub>

Site	Circuit Type	SPI	Wi	T80	P80	Ball Mill kWh/t Plant	Ball Mill kWh/t Bond Eq'n	Average CFnet	% Minus P80 Material in BM Feed
Bagdad	Autogenous	112	13.3	2379	211	3.4	5.7	0.64	57
Candelaria	Semi-Autogenous	123	13.3	2322	135	7.3	8.6	0.86	43
Cerro Verde	HPGR	n/a	15.4	3769	162	9.2	9.5	0.97	30



# Modelo Bond Calibrado

- Para medir el CFnet, hay que realizar muestreos
  - Mínimo 6 por línea/planta para medir la tendencia
  - Medir  $W_i$  en la alimentación
  - Calcular kWh/t (modelo) y comparar con planta



R	0.987
R <sup>2</sup>	0.974
Erro promedio	6%
N	160 muestreos
No. de Plantas	12
Config Circuitos:	ABC, SABC, SABC-B, Unitaria, Secundaria

# Fuentes Principales de Error

- Muestreos en Planta
- Medición de Potencia de los equipos
- Pruebas de laboratorio



# Prueba Bond Estándar

- Bond Estándar
  - Ensayo de ciclo cerrado con un tamaño de malla de cierre fijo
    - El Índice de trabajo (WI) para un tamaño de malla no es aplicable para otros tamaño de malla.
  - 8 horas para completar una sola prueba
  - Reproducibilidad inherente de 2,5% ( $1\sigma$ ).
    - No Incluye la preparación de la muestra
      - Reproducibilidad de masa de alimentación
      - Reproducibilidad de perfil granulométrico.

Mill	Test	gpr	F80	P80	WI(st)	WI(mt)
1	125	1.82	2697	182.62	14.51	15.99
1	126	1.85	2697	182.88	14.32	15.78
1	129	1.89	2697	187.16	14.33	15.80
2	128	1.73	2697	171.68	14.52	16.01
2	132	1.85	2697	179.16	14.13	15.57
3	123	1.81	2697	160.02	13.32	14.68
3	124	1.85	2697	174.43	13.89	15.31
3	127	1.78	2697	170.58	14.14	15.59
3	134	1.83	2697	175.00	14.05	15.48
3	135	1.93	2697	178.55	13.64	15.03
3	150	1.83	2697	168.93	13.69	15.09
3	151	1.85	2697	172.56	13.79	15.20

## Reproducibility - Between Mills

Promedio (total)	1.83	2697	175	14.03	15.46
Desv. Es. (total)	0.05	0.00	7.04	0.36	0.39
<b>Error (1<math>\sigma</math>)</b>	<b>2.6%</b>	<b>0.0%</b>	<b>4.0%</b>	<b>2.5%</b>	<b>2.5%</b>
Error (2 $\sigma$ )	5.2%	0.0%	8.0%	5.1%	5.1%

## Reproducibility - Single Mill

Promedio (total)	1.83	2697	175	14.03	15.46
Desv. Es. (single mill)	0.05	0.00	4.02	0.19	0.21
<b>Error (1<math>\sigma</math>)</b>	<b>2.5%</b>	<b>0.0%</b>	<b>2.3%</b>	<b>1.4%</b>	<b>1.4%</b>
Error (2 $\sigma$ )	5.0%	0.0%	4.6%	2.7%	2.7%

# Error del Work Index

## Comparando Entre Laboratorios

- Estudio 1 – 4.5% desviación estandar<sup>1</sup>
- Estudio 2 – 5.1% desviación estandar<sup>2</sup>
- Estudio 3 – 2.6% to 6.2% error relativo<sup>3</sup>
- Estudio 4 – 3.4% desviación estandar<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Angove, J., and Dunne, R., “That’s a big number– or is it?”, Randol Gold Forum ‘97, 1997

<sup>2</sup>Unpublished client study. 65 samples performed at 5 international laboratories

<sup>3</sup>Kaya, E., Fletcher, P.C., and Thompson, P., “Reproducibility of the Bond work index with different standard ball mills”, SME Annual Meeting, Phoenix, AZ, 2002

<sup>4</sup>Baily, C., Lane, G., Morrell, S., and Staples, P., “What can go wrong in comminution Circuit design?” AusIMM 10<sup>th</sup> Mill Operators Conference, Adelaide, South Australia

# Porque hay mas error entre laboratorios?

- Carga de bolas

Nominal Ball Size, in [cm]	Bond's Original		Charge 1		Charge 2		Charge 3		Charge 4	
	# of Balls	Wt. (g)	# of Balls	Wt. (g)	# of Balls	Wt. (g)	# of Balls	Wt. (g)	# of Balls	Wt. (g)
1.45 [3.68]	43	8,800	43	9,106	43	8,901	25	5,885	18	4,508
1.17 [2.97]	67	7,209	67	7,402	67	7,206	39	4,801	36	5,378
1.00 [2.54]	10	672	10	660	10	605	60	3,945	58	4,208
0.75 [1.91]	71	2,012	71	2,125	78	2,168	68	3,331	71	3,426
0.61 [1.55]	94	1,432	94	832	66	1,063	93	2,163	102	2,605
0.50 [1.27]					21	182				
Total	285	20,125	285	20,125	285	20,125	285	20,125	285	20,125

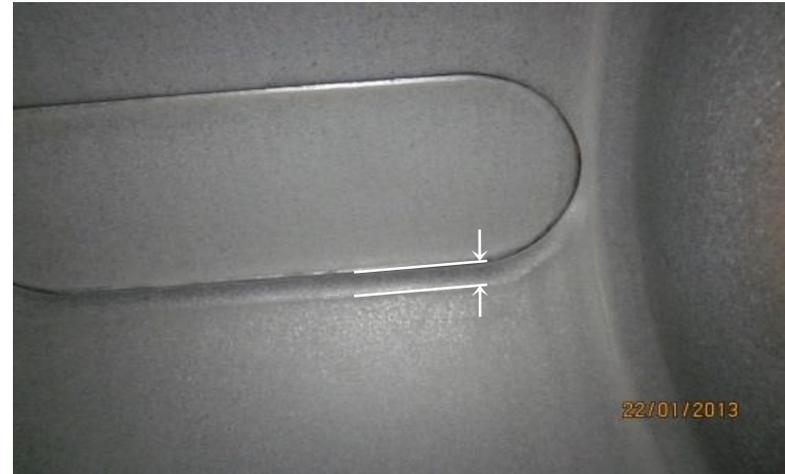
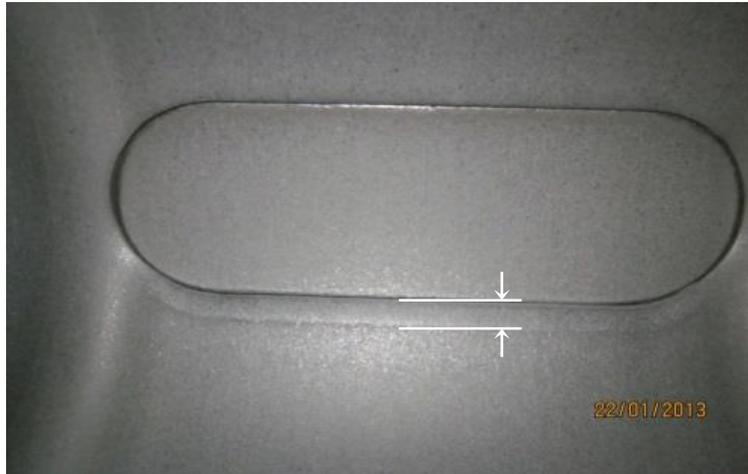
- Diseño de molinos



- Dimensiones de Molinos
  - 12" x 12" (dos lab.)
  - 12 ¼" x 12 ¼" (un lab.)
  - 12" x 11 ¾" (un lab)
  - 12" x 11 ½" (un lab)



# Ubicación de la puerta de acceso



# Otras Desventajas e la prueba

- Requiere mucha muestra
  - Entre 8 y 15 kg para realizar una prueba
- Requiere mucho tiempo
  - Aproximadamente 8 horas para realizar una prueba
- Es relativamente cara
  - En Peru cuesta entre \$300 y \$450 por prueba
  - En EE.UU. cuesta ~\$1000 por prueba
- Consideraciones ergonomicas
  - Genera ruido y polvo

# Alternativas de Pruebas Bond Wi

- Se han investigado pruebas Bond cortas y rápidas durante décadas.
  - Métodos Comparativos
    - Bruce & Berry (1966)
  - Métodos empíricos
    - Smith & Lee (1968)
  - Métodos fenomenológicos
    - Kapur 1970, Karra 1981, Yap et al. 1982, Aksani & Sonmez 1999)
  - Método Corto
    - JKTeck® (2013)

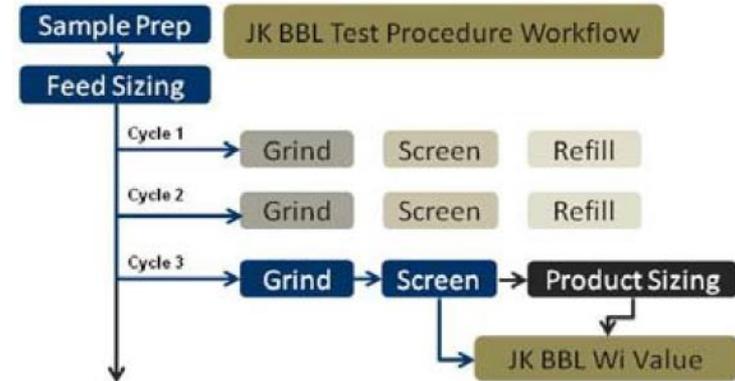
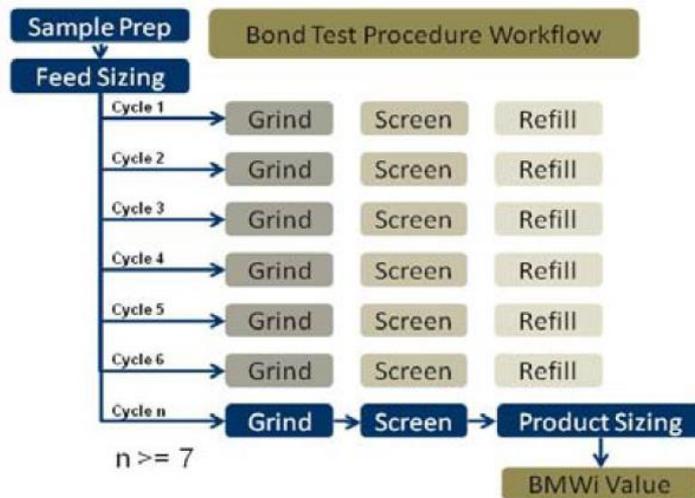
Metodos Ciclo Abierto

Metodo Ciclo Cerrado

# JKTech Bond Light

- Bond Estandar

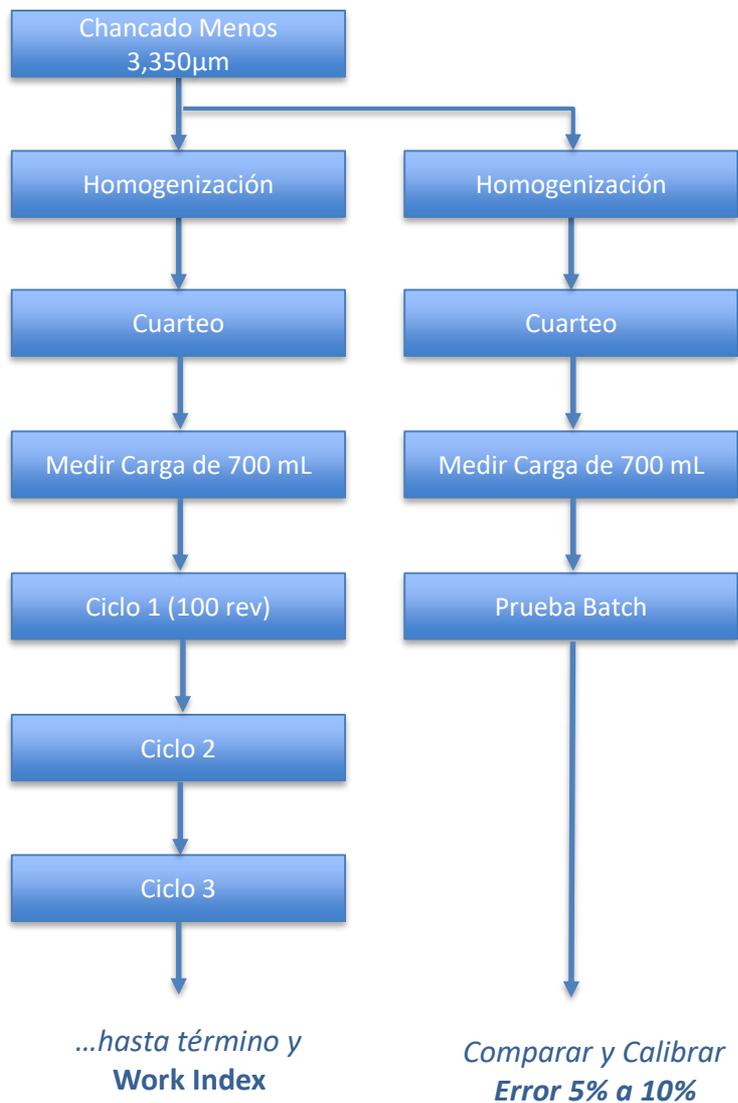
- Bond Light



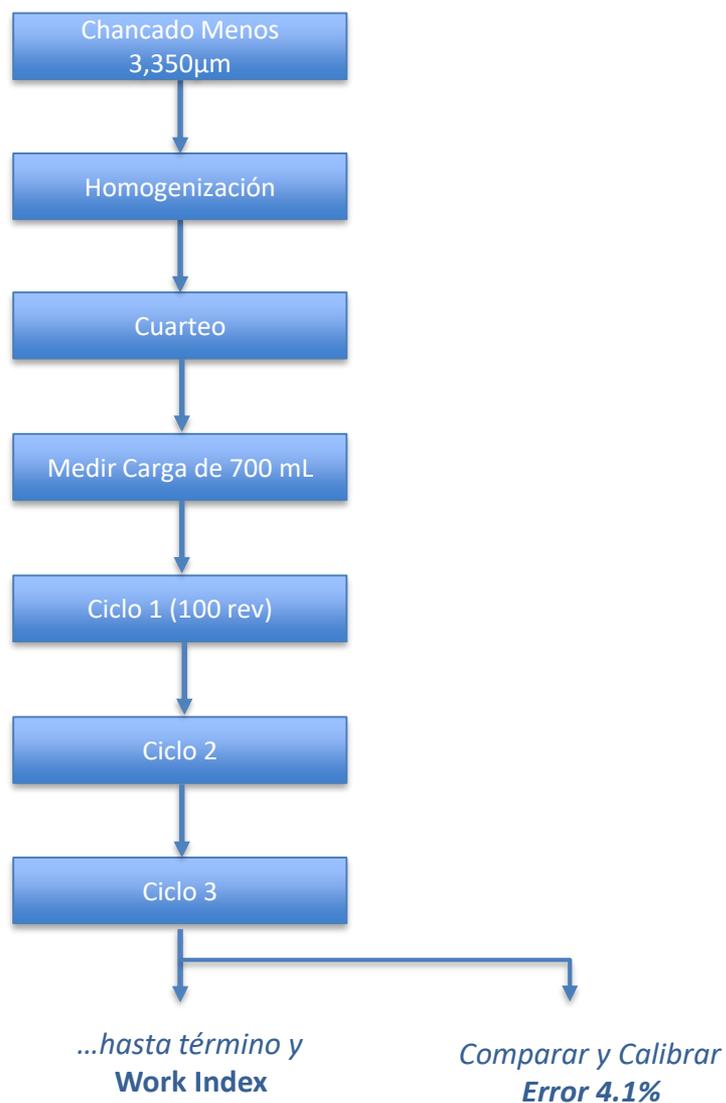
Cycle Number	1	2	3	4	5
Error	11.7%	5.4%	<b>4.1%</b>	3.7%	3.4%

## Calibración Metodos

### Comparativos / Empíricos / Fenomenológicos



## Calibración Método JK Bond Light

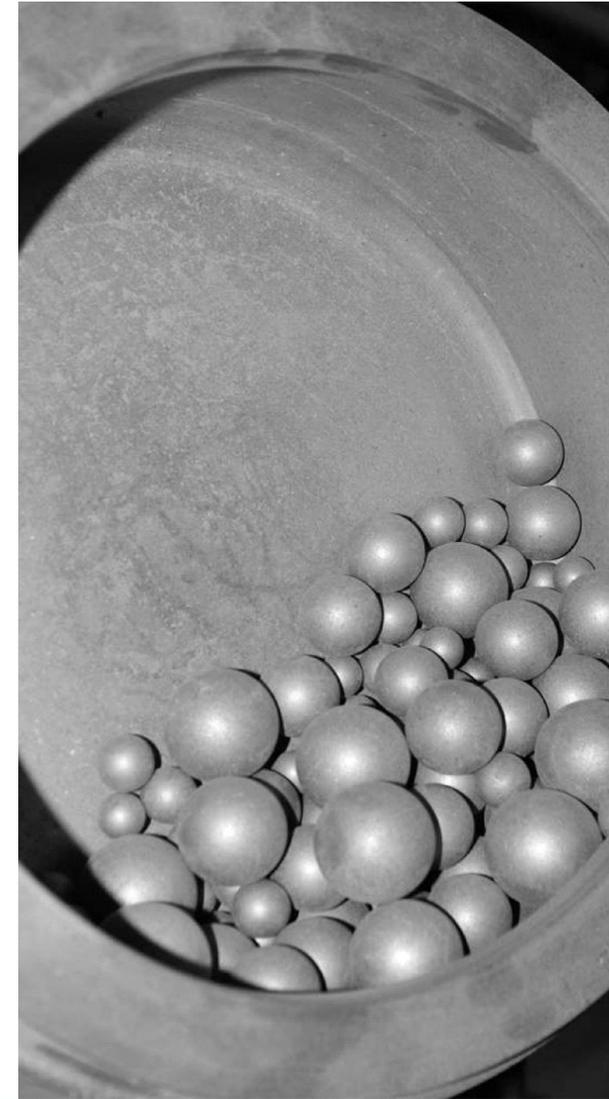


# La Prueba MiniBond Ideal

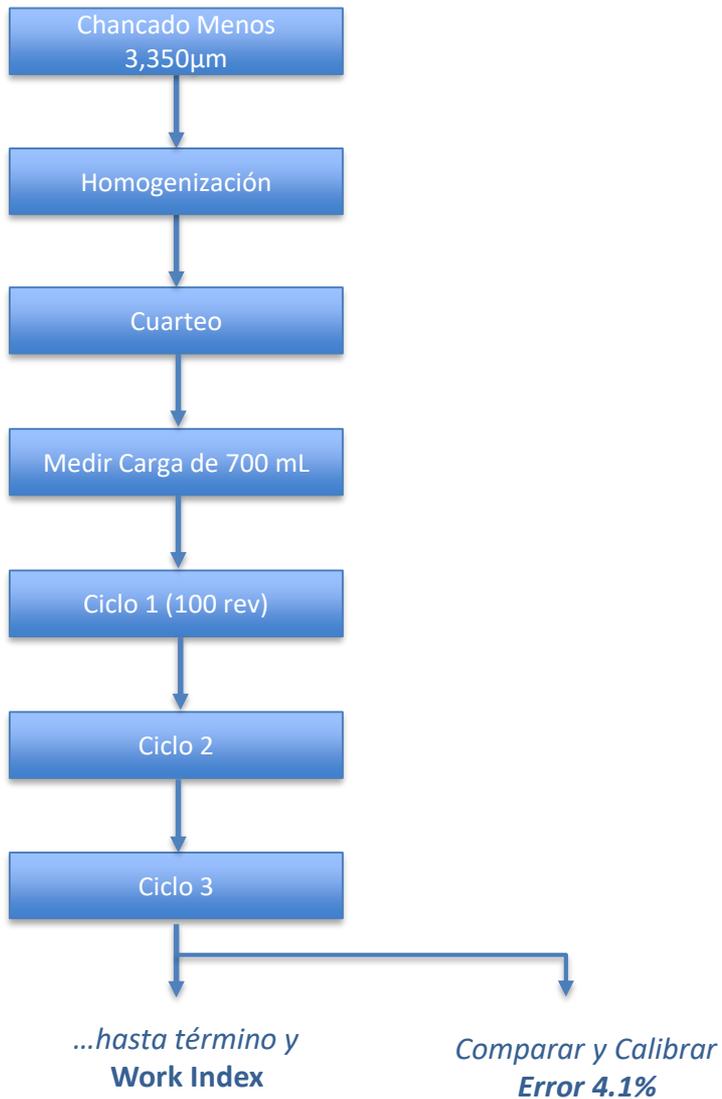
- Fácil de realizar (producción en ensamblaje)
  - Un ciclo sin recirculación de carga
  - Pruebas pensadas para permitir futuros cambios de calibración.
    - Repetir solamente la calibración, no todo el trabajo
- Baja masa de muestra
  - Reducir los requisitos de muestreo y preparación
- Molino de uso específico
  - Molino de carga frontal para reducir la varianza debido al desgaste de la puerta.
  - Diseñado para aproximarse lo más posible a la cinética de molienda en un molino Bond.
    - Mejorar las estadísticas de calibración
- Bajo costo
  - Procedimientos y equipos diseñados ergonómicamente para reducir los costos de desgaste, mantenimiento y interpretación técnica

# Prueba MiniBond

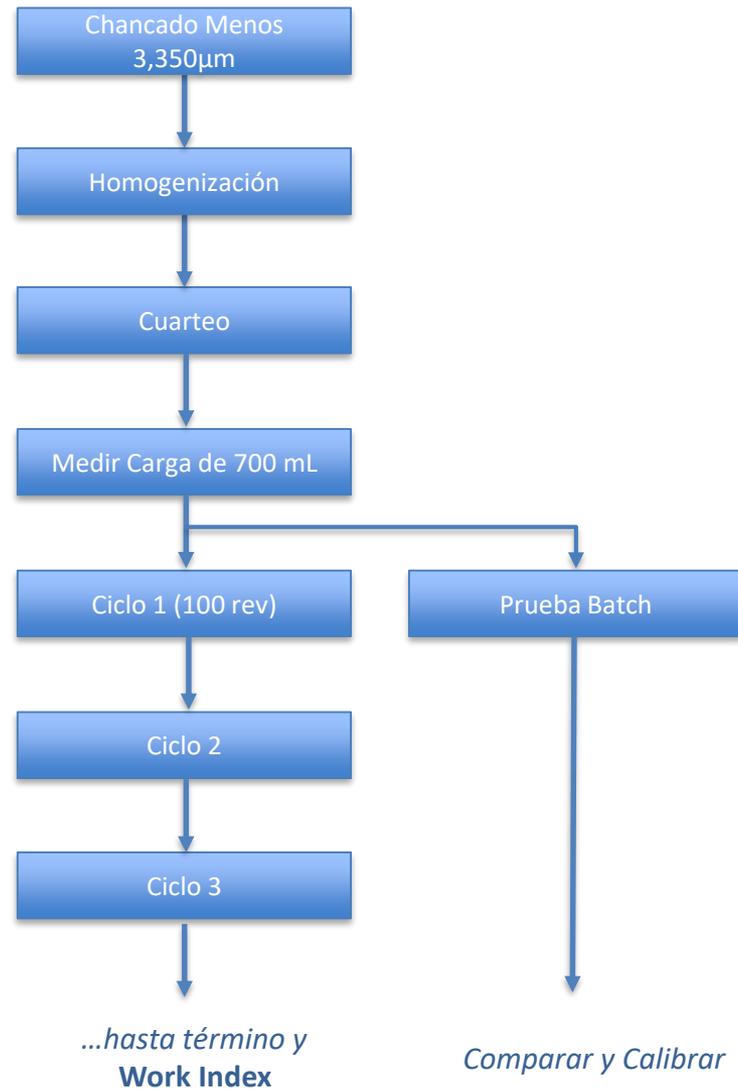
- Molino MiniBond
  - Molino ergonómico de carga frontal, mejorando la reproducibilidad
  - Molino a escala del molino estándar (masa, volumen y superficie)
  - Requiere una masa significativamente menor
- Un operador por tres molinos, dos en preparación de muestras
  - 25 pruebas Bond por día
- Altamente reproducible
  - 0.4% C.O.V. para duplicados ciegos



## Calibración Método JK Bond Light

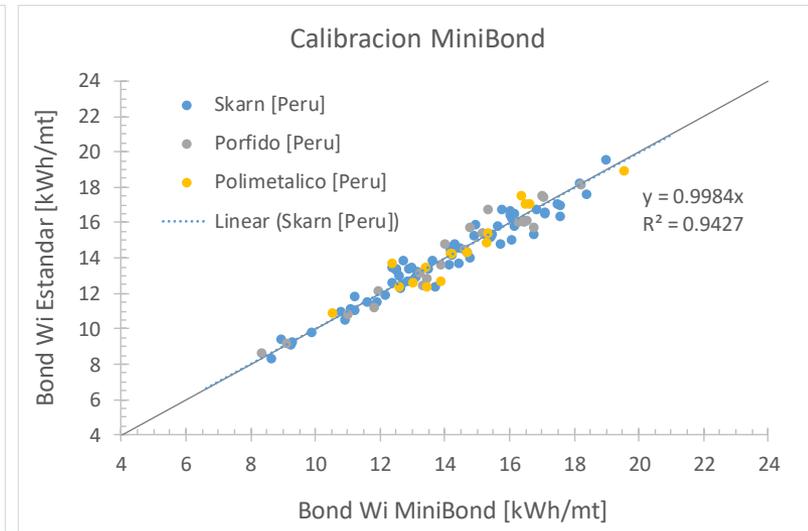
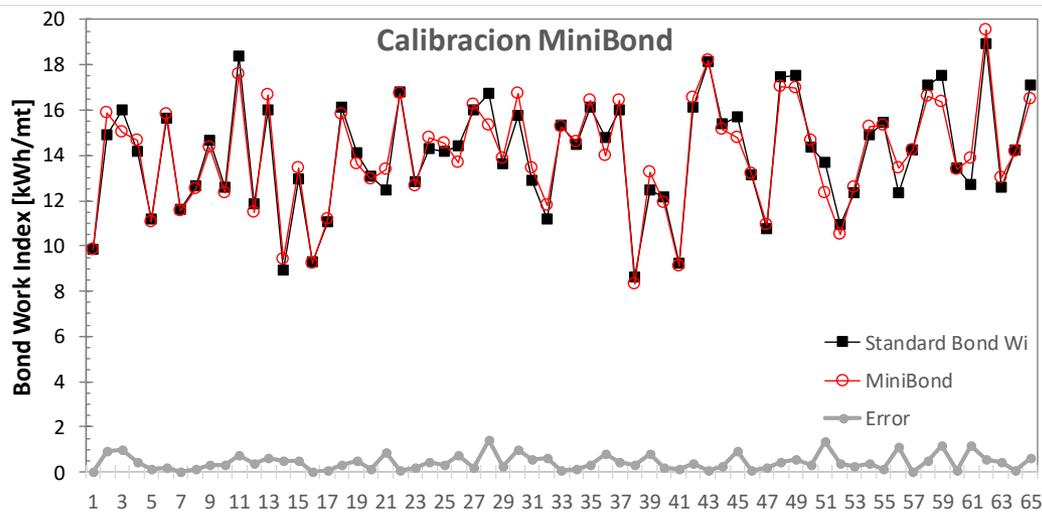


## Calibración Método JK Bond Light



# Calibración

- Calibración realizada con 65 muestras de variabilidad de Bond Wi, de tres tipos de mineral, 10 UGM
- Coeficiente de Correlacion Pearson de 0.9724 [ $R^2=0.943$ ]
- Error promedio de 3.12%, desviación estándar del error de 2.43%



# Análisis de Error (y error de análisis)

Test Type:	MiniBond	Standard Bond	Units
Budget Available:	\$100,000	\$100,000	USD
Cost:	\$50	\$450	\$/test
No. of Tests:	2000	222	No.
Average kWh/t	15.00	15.00	kWh/t, metric
Standard Deviation of Test*	4.7%	4.0%	% of mean
	0.70	0.60	kWh/t, metric
Standard Error of Mean**:	0.001	0.003	kWh/t, metric
Relative Standard Error of Mean:	1.57%	4.02%	% of mean
Tests/Day	25	1.5	Tests per day
Time	80	149	days
	16	30	weeks

## Notes

\*for the MiniBond, total error is the sum of the Standard Bond test error and the MiniBond test error, which is calculated at 2.43% of the mean specific energy based on calibration dataset statistics

\*\*Standard error of the mean does not include error reduction due to spatial correlation and the use of geostatistical estimation techniques. It is therefore likely to be conservative.

# Conclusiones

- Más cobertura
  - Casi 10 veces el número de pruebas
  - Requiere 10% de la masa por prueba – no destruye testigo de sondaje
  - Menos de la mitad del error estándar del promedio
  - El bajo costo permite el uso de la geoestadística
- Resultados más rápidos
  - ¡Entrega de resultados en casi la mitad de tiempo!

