

HECHOS EN CONCRETO

¿Como lograr la resistencia a la compresión del concreto (f'_{cr})?: el aporte del cemento

José Mauricio Cárdenas

Juan Fernando Arango Londoño, PhD.

ALION
SEMENTOS MOLINS corona

Contenido

Introducción

Repasemos algo de estadística

Recordando $f'c$

Investigando resultados bajos

Qué es $f'cr$

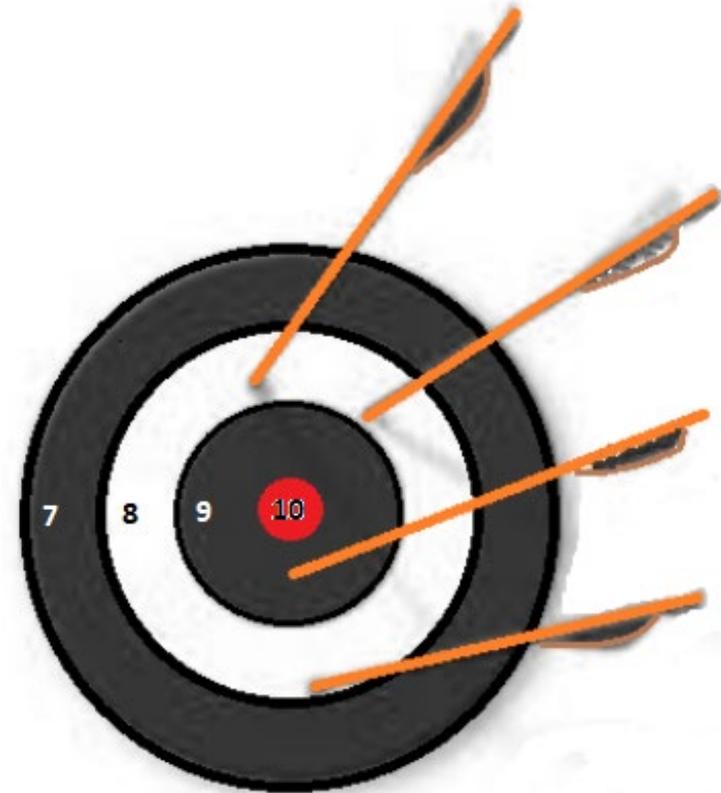
Influencia en $f'c$ de diferentes factores

Futuro del $f'cr$



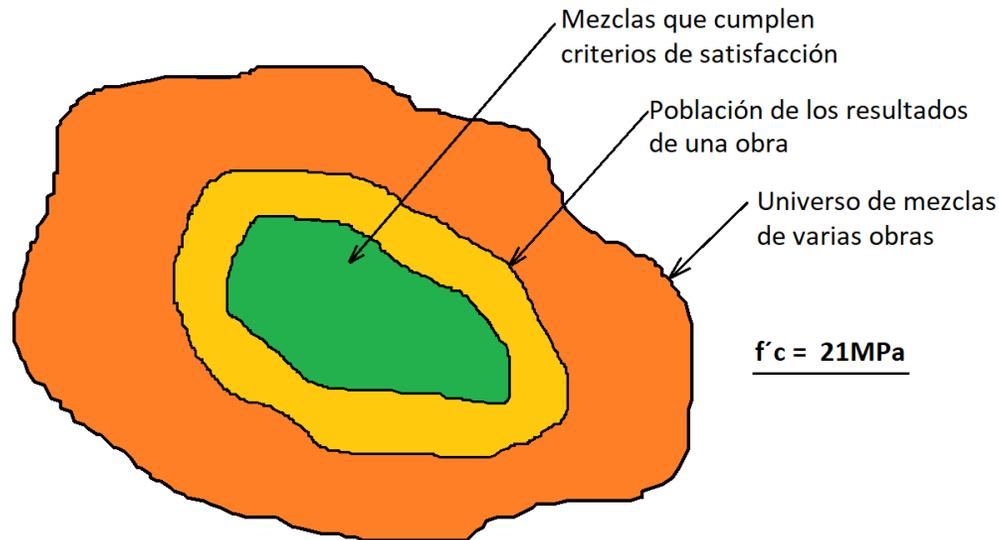
Repasemos un poco de estadística

- Los resultados de resistencia del concreto son **probabilísticos**.
- Esto se debe a que está preparado con componentes heterogéneos.
- Son causadas por **variaciones** en la elaboración, el transporte, la colocación, el curado, el transporte de muestras y los ensayos de laboratorio.
- Algunas variaciones son “naturales” y otras son gestionables.



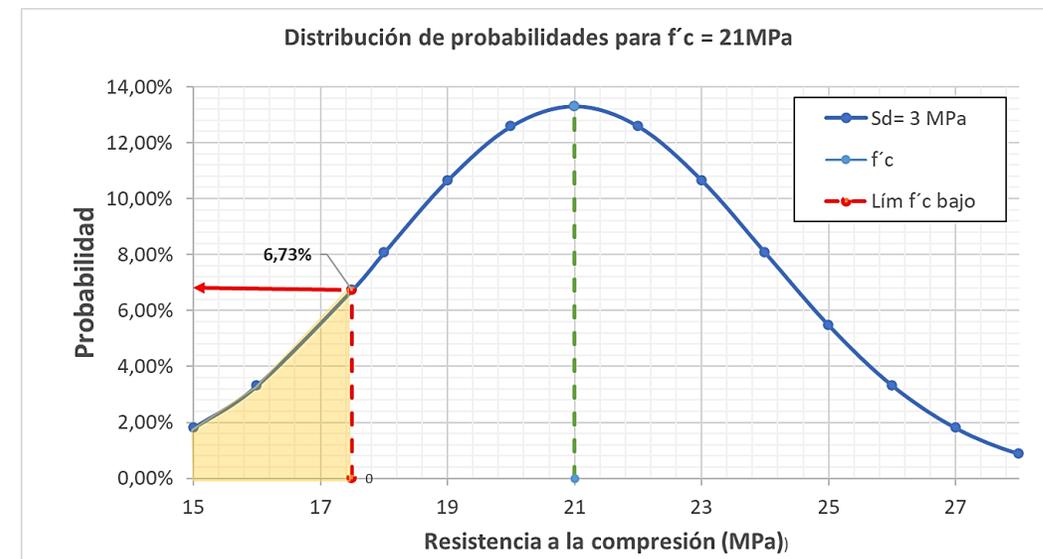
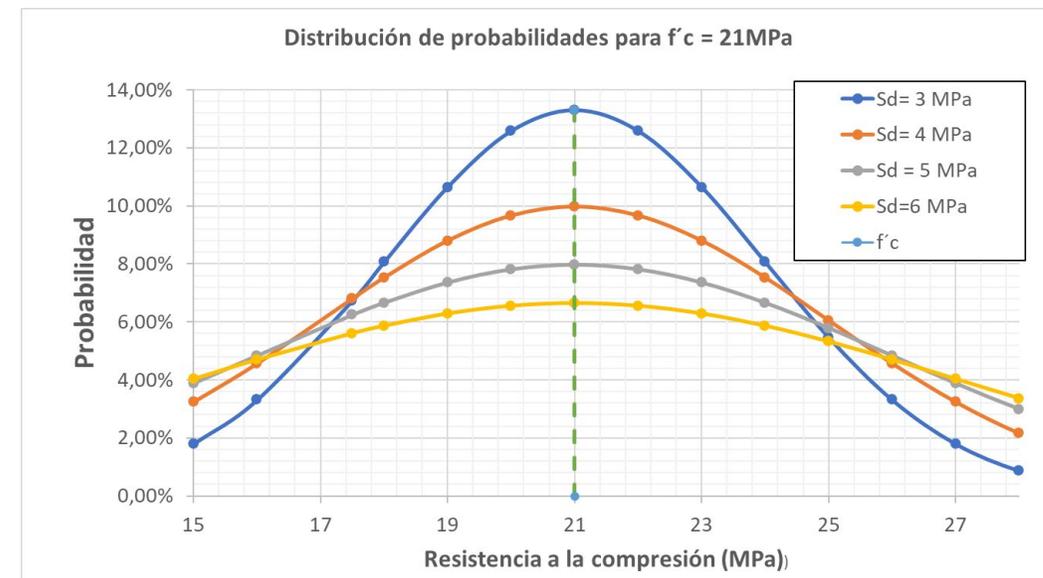
Repasemos un poco de estadística

- Un **buen diseño** y control del concreto garantizan una menor variabilidad. A menor variabilidad menor probabilidad de resultados no satisfactorios.
- A fin de cuentas, todas las variaciones se reflejarán en los resultados de los cilindros, que son el **control** (actual).
- La **eficiencia operacional** es una herramienta para lograrlo.



Repasemos un poco de estadística

- Los resultados del **concreto suelen tener una distribución normal**.
- A mayor desviación estándar, más “plana” es la forma de la distribución normal.
- A mayor desviación, mayor probabilidad de que se generen valores más alejados de la media, es decir, mayor probabilidad que hayan valores bajos de resistencia a la compresión.
- El área bajo la curva, a la izquierda de un valor, es la probabilidad de obtenerlo.



¿Qué es la resistencia a la compresión ($f'c$)?

$$f'c = \text{Resistencia especificada a la compresión del concreto} + \text{Durabilidad}$$

- Se mide a la edad especificada por el diseñador de edificación, igual o menor a 28 d. Según concepto de la Comisión Asesora Permanente para la Norma Sismo Resistente, Acta 121, del 15 mayo 2014.
- La durabilidad se diseña según la Sección C.4 de la NSR-10 en edificación y según C.23 para tanques y obras de ingeniería ambiental.

¿Qué es un concreto satisfactorio en resistencia?

Cumple si:

Si el resultado individual de un ensayo supera un valor mínimo de resistencia

y

Verificar la variabilidad entre pruebas consecutivas

$f'c$ satisfactorio

=

Si ningún resultado de ensayo de resistencia individual es menor que un valor dado

y

“Promedio móvil” es mayor o igual a $f'c$

Cumple si:

Para $f'c < 35\text{MPa}$: $f'c - 3,5\text{ MPa}$
Para $f'c \geq 35\text{ MPa}$: $f'c - 0,1 \cdot f'c$

y

Cualquier promedio de tres resultados consecutivos $\geq f'c$

Ejemplo de verificación de la satisfacción

Historial de una obra para $f'c = 21$ MPa

Número de muestra	$f'c$ obtenido (MPa)	Promedio de tres resultados consecutivos ($\geq f'c$, MPa)	Número de muestra	$f'c$ obtenido (MPa)	Promedio de tres resultados consecutivos ($\geq f'c$, MPa)
1	22,02		28	28,99	28,11
2	25,48		29	23,32	26,48
3	19,32	22,27	30	24,56	25,62
4	19,31	21,37	31	22,94	23,61
5	36,66	25,10	32	22,49	23,33
6	22,28	26,09	33	19,98	21,80
7	24,83	27,92	34	39,27	27,25
8	20,33	22,48	35	29,01	29,42
9	28,19	24,45	36	26,78	31,69
10	24,62	24,38	37	22,05	25,95
11	28,13	26,98	38	20,51	23,12
12	19,46	24,07	39	24,93	22,50
13	33,21	26,93	40	22,68	22,71
14	31,02	27,90	41	21,72	23,11
15	25,75	29,99	42	26,15	23,51
16	19,51	25,43	43	31,94	26,60
17	27,86	24,37	44	24,64	27,58
18	23,41	23,60	45	29,12	28,57
19	24,31	25,19	46	31,11	28,29
20	34,21	27,31	47	16,67	25,63
21	27,58	28,70	48	24,27	24,02
22	13,85	25,21	49	32,18	24,37
23	20,04	20,49	50	21,59	26,01
24	17,53	17,14	51	18,73	24,17
25	19,74	19,10	52	23,85	21,39
26	28,21	21,82			
27	27,14	25,03			

Criterios de satisfacción:

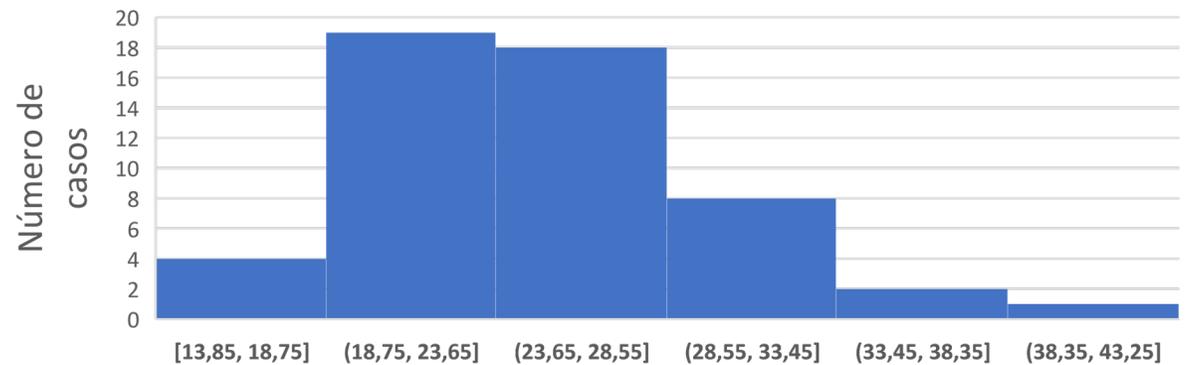
- $f'c = 21$ MPa.
- $f'c$ mínima: 21 MPa - 3,5MPa = **17,5 MPa**.
- $f'c \geq 21$ MPa para la media móvil de 3 promedios consecutivos de las mezclas.

- El análisis estadístico de la población arroja una desviación estándar de 4,5 MPa y una media de $f'c$ de 25,02 MPa.

Análisis de satisfacción:

- Las muestras 22 y 47 requieren investigación de resultados bajos.
- Las muestras 23 a 25, indican que se debe ajustar la fórmula, pero no requiere investigación de resultados bajos.

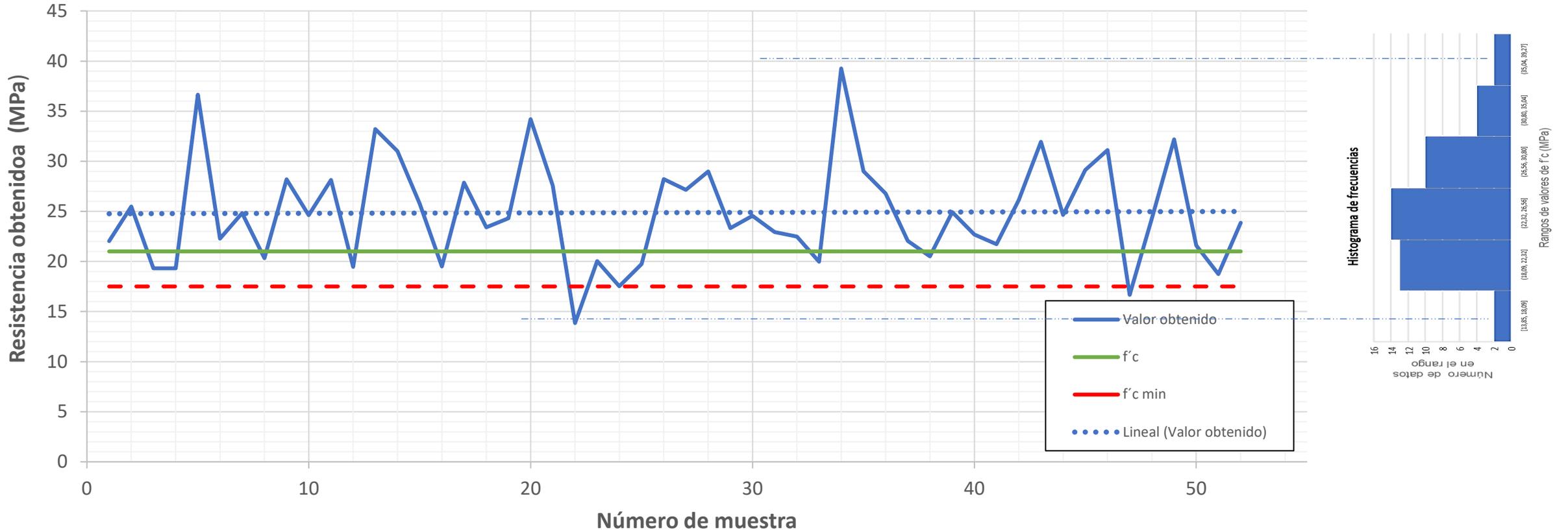
Histograma de frecuencias



Rangos de frecuencias

Ejemplo de verificación de la satisfacción

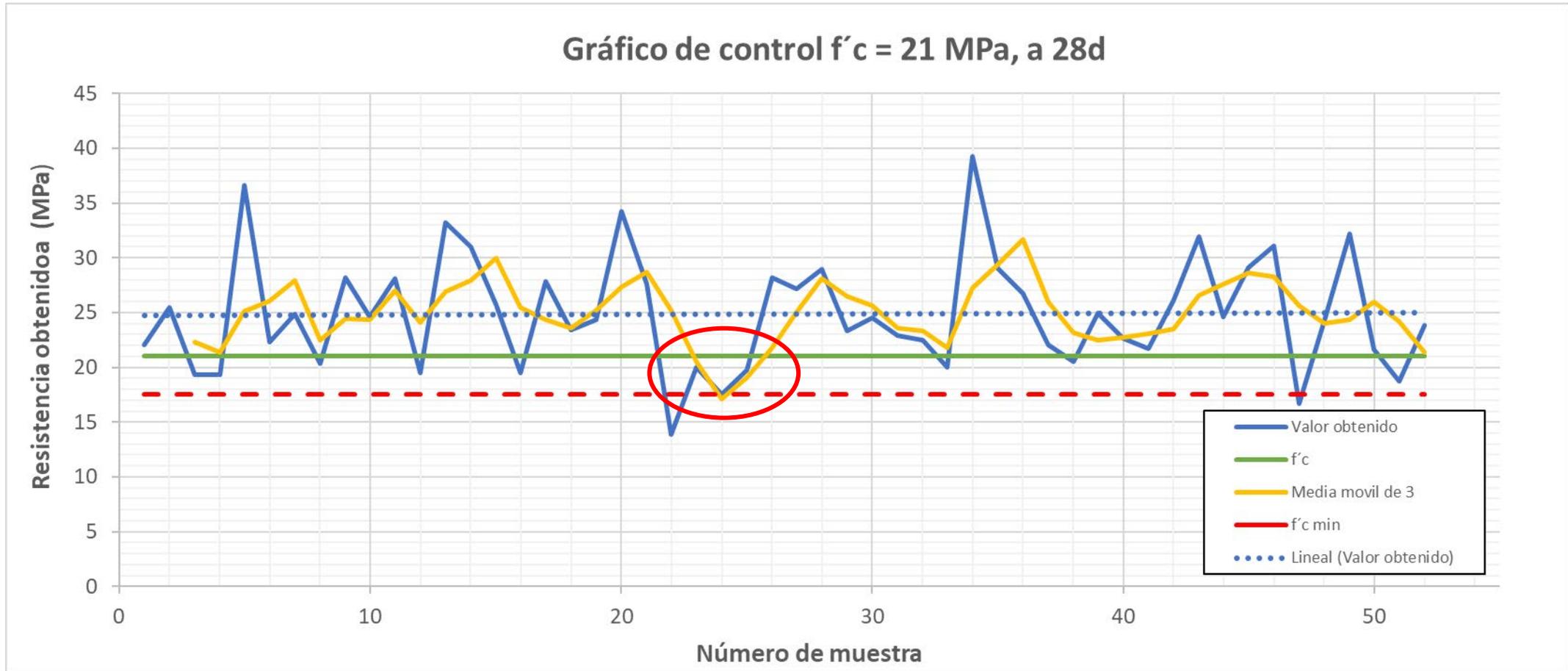
Gráfico de control $f'c = 21$ MPa, a 28d



Análisis de satisfacción:

- Las muestras 22 y 47 requieren investigación de resultados bajos.

Ejemplo de verificación de la satisfacción



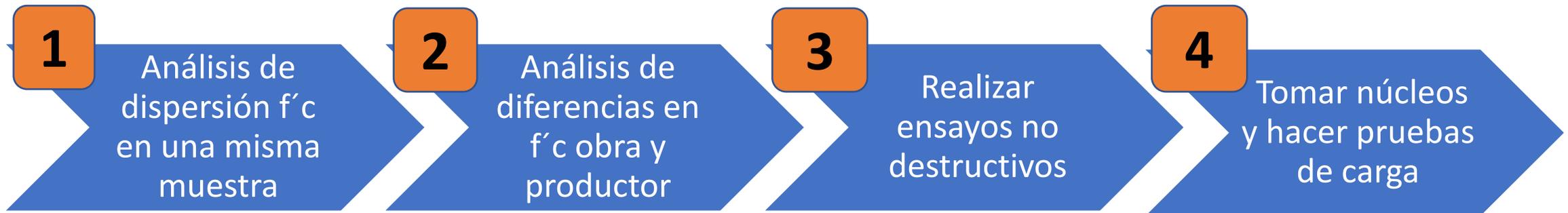
Análisis de satisfacción:

- Las muestras 23 a 25, indican que se debe ajustar la fórmula, pero no requiere investigación de resultados bajos.

Investigación de resultados bajos

- La investigación de resultados bajos está detallada en NSR-10, sección C.5.6.5.
- Comprende una serie de pasos que buscan **asegurar capacidad de carga y durabilidad**.
- Antes de llegar a núcleos y pruebas de carga se deben analizar las condiciones previas.

Los pasos en la investigación de resultados bajos



Investigación de resultados bajos

1

Análisis de dispersión $f'c$ en una misma muestra

- Esas diferencias de resistencia entre especímenes de una misma muestra no están en la estructura.
- Son un primer indicativo de que algo anda mal en el procedimiento de muestreo y ensayo.
- Verificar el correcto muestreo y curado en obra, temperatura, entre otros.
- Verificar conformidad del laboratorio de ensayo y posibles observaciones del informe.
- No se debería compensar inmediatamente la mezcla de concreto.



Investigación de resultados bajos

2

Análisis de diferencias en $f'c$ obra y productor

- Verificar el correcto muestreo y curado en obra.
- Verificar origen de diferencias entre laboratorios de ensayo.
- Verificar en productor los procedimientos y registros de dosificación.
- Corregir, si es necesario, el diseño de mezcla para la resistencia objetivo con las desviaciones de la obra.
- Verificar si se reduce o no la capacidad de carga del componente: es posible que no se requiera el $f'c$ obtenido.



Investigación de resultados bajos

3

Realizar
ensayos no
destructivos

- Suelen ser comparativos para el mismo concreto en una obra. No son cuantitativos de $f'c$.
- Esclerómetro, sólo como indicador de uniformidad.
- Ensayos de Pull-out.
- Pruebas de ultrasonido, referenciadas al concreto de la obra (cumple/no cumple).

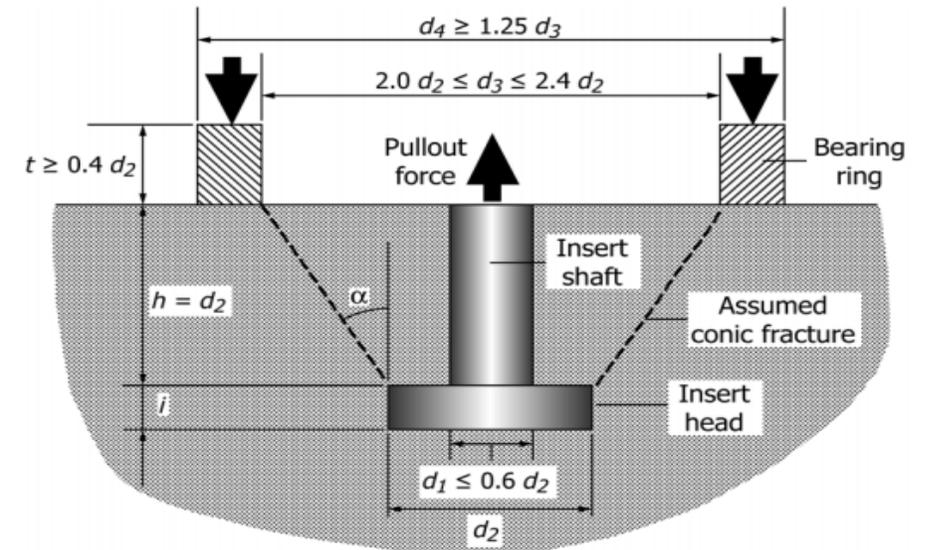


FIG. 1 Schematic Cross Section of Cast-in-Place Pullout Test

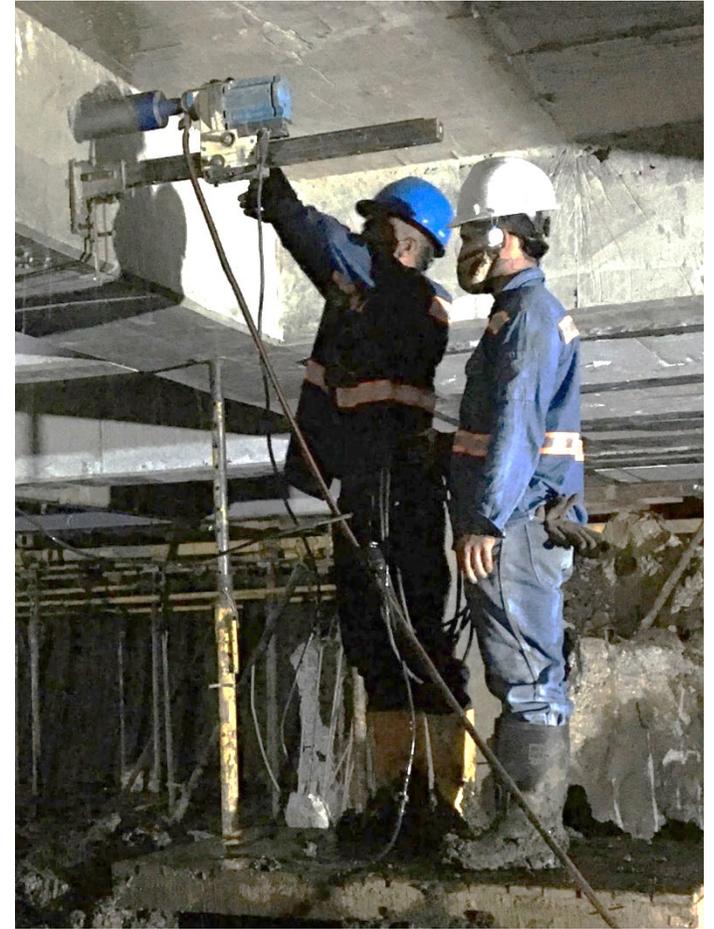
Tomado de ASTM C900-19.

Investigación de resultados bajos

4

Tomar núcleos y hacer pruebas de carga

- Considerar usarlo **como último recurso**.
- Resultados son la **combinación** entre las características de la mezcla, el proceso de colocación y curado de la obra; asentamientos y retracción; y el funcionamiento del elemento.
- Tomar muy en serio el procedimiento la norma de extracción (NTC 3658 o ASTM C42). Deben ser **especificados** por el responsable de los diseños: no dejarlo al criterio de los técnicos.
- Aprobación: muestra $f'c_{eq}$ ($\geq 85\% f'c$), y ninguno individual por debajo de $75\% f'c$. A cualquier edad.
- Analizarlos usando guía ACI 214.4.
- En caso de que por núcleos no se logre la aprobación, continuar con pruebas de carga, o tomar otras medidas.



¿Preguntas?

Definiendo f'_{cr}

Qué es f'_{cr}

- f'_{cr} es la **resistencia objetivo o requerida** para el diseño de una mezcla. Se calcula como **$f'_{c} +$ un valor de sobrerresistencia.**
- Es un método de diseño de mezcla basado en que la **probabilidad** de que se produzcan resultados bajos sea menor que 1% (1 en 100) que el mínimo de f'_{c} aceptable.
- Como todo lo probabilístico, de manera implícita se acepta que **es posible que ocurran valores bajos** de resistencia.
- Desde el punto de vista económico y la confiabilidad, el método **premia la excelencia operativa**: a mayores controles y baja dispersión, menor será el valor de sobrerresistencia, adicional para determinar f'_{cr} .

Qué no es f'_{cr}

- No es un criterio de aceptación o rechazo del concreto en la obra: ver satisfacción de f'_{c} .
- No es un método para proporcionar los ingredientes de las mezclas (receta). Ese es un proceso diferente.
- No es un valor de referencia que se debe obtener en un ensayo: es un valor promedio (media) de una población de ensayos. Si no hay población, se asume como un valor objetivo.

Calculando...

f'_{cr}

Datos de históricos (*)

Mezclas de prueba, o que no cumplen requisitos de datos históricos de obra

Cuando no hay experiencia en obra ni mezclas de prueba

Número de ensayos*	Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra †
Menos de 15	Emplee la tabla C.5.3.2.2
15	1.18
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$

Caso excepcional.

- 1) $f'_{cr} > f'_c + 8,3$
- 2) No permitido para $f'_c > 35\text{MPa}$
- 3) Requiere aprobación del diseñador

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c \leq 35$	Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones (C.5-1) y (C.5-2) $f'_{cr} = f'_c + 1.34s_s$ (C.5-1) $f'_{cr} = f'_c + 2.33s_s - 3.5$ (C.5-2)
$f'_c > 35$	Usar el mayor valor obtenido con las ecuaciones (C.5-1) y (C.5-3) $f'_{cr} = f'_c + 1.34s_s$ (C.5-1) $f'_{cr} = 0.90f'_c + 2.33s_s$ (C.5-3)

Precaución: aún con el uso de estos valores, habrá alta probabilidad de que lograr la satisfacción de f'_c cuando la estabilidad de las materias primas, el control de dosificación, mezclado, y los procesos de ensayo son pobres.

Entendiendo f'_{cr}

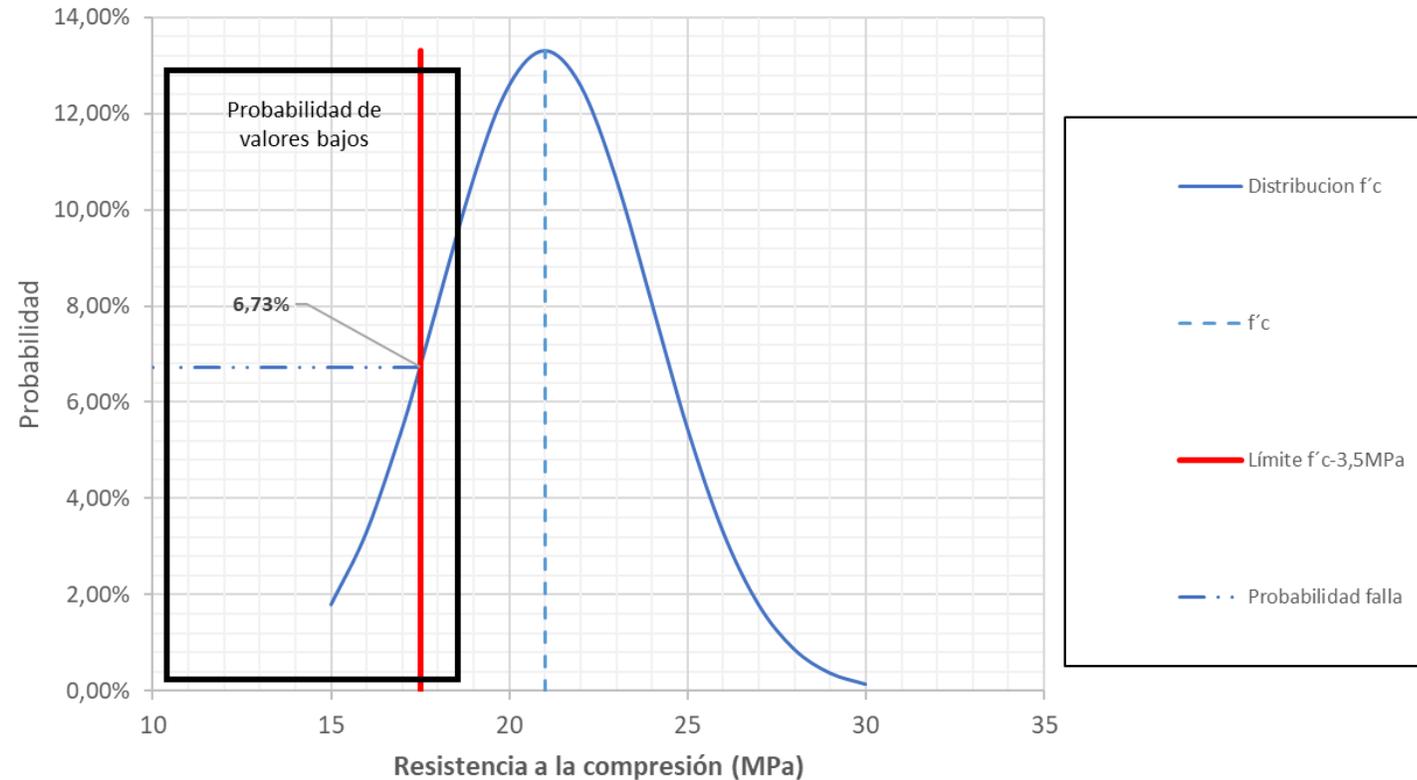
¡Volvemos a la estadística!

Supuestos

- $f'_c=21$ MPa
- Distribución normal de los datos
- Para todos la $S_d=3$ MPa
- Coeficiente de variación: 14% (“bueno”)

En este caso:

Si se diseñara para $f'_{cr} = 21$ MPa, 6,3 de cada 100 mezclas pueden tener resultados bajos



Entendiendo f'_{cr}

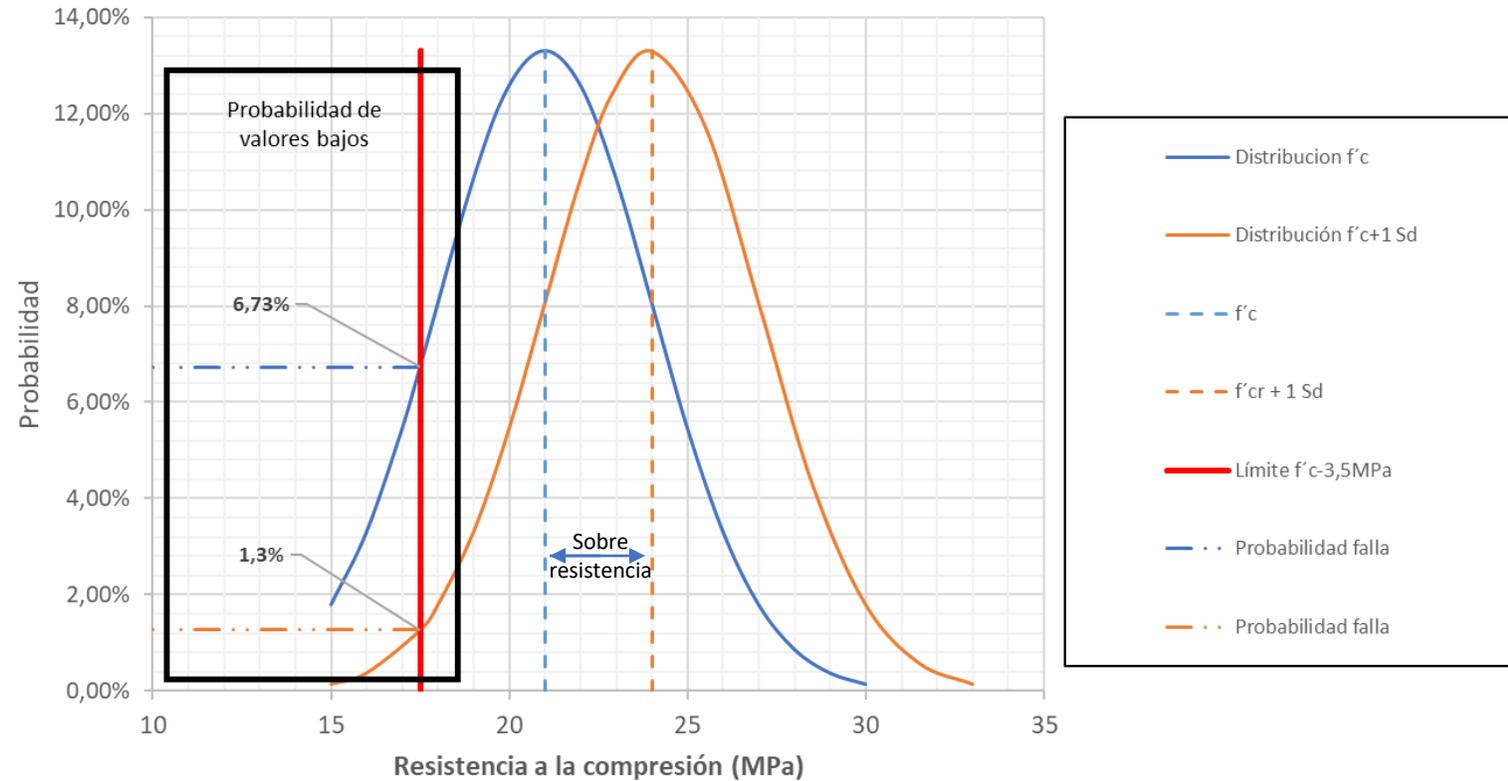
¡Volvemos a la estadística!

Supuestos

- $f'_{c}=21$ MPa
- Distribución normal de los datos
- Para todos la $Sd=3$ MPa
- Coeficiente de variación: 14% (“bueno”)

En este caso:

Si se diseñara para $f'_{cr}=24$ MPa, 1,3 de cada 100 mezclas pueden tener resultados bajos



Entendiendo f'_{cr}

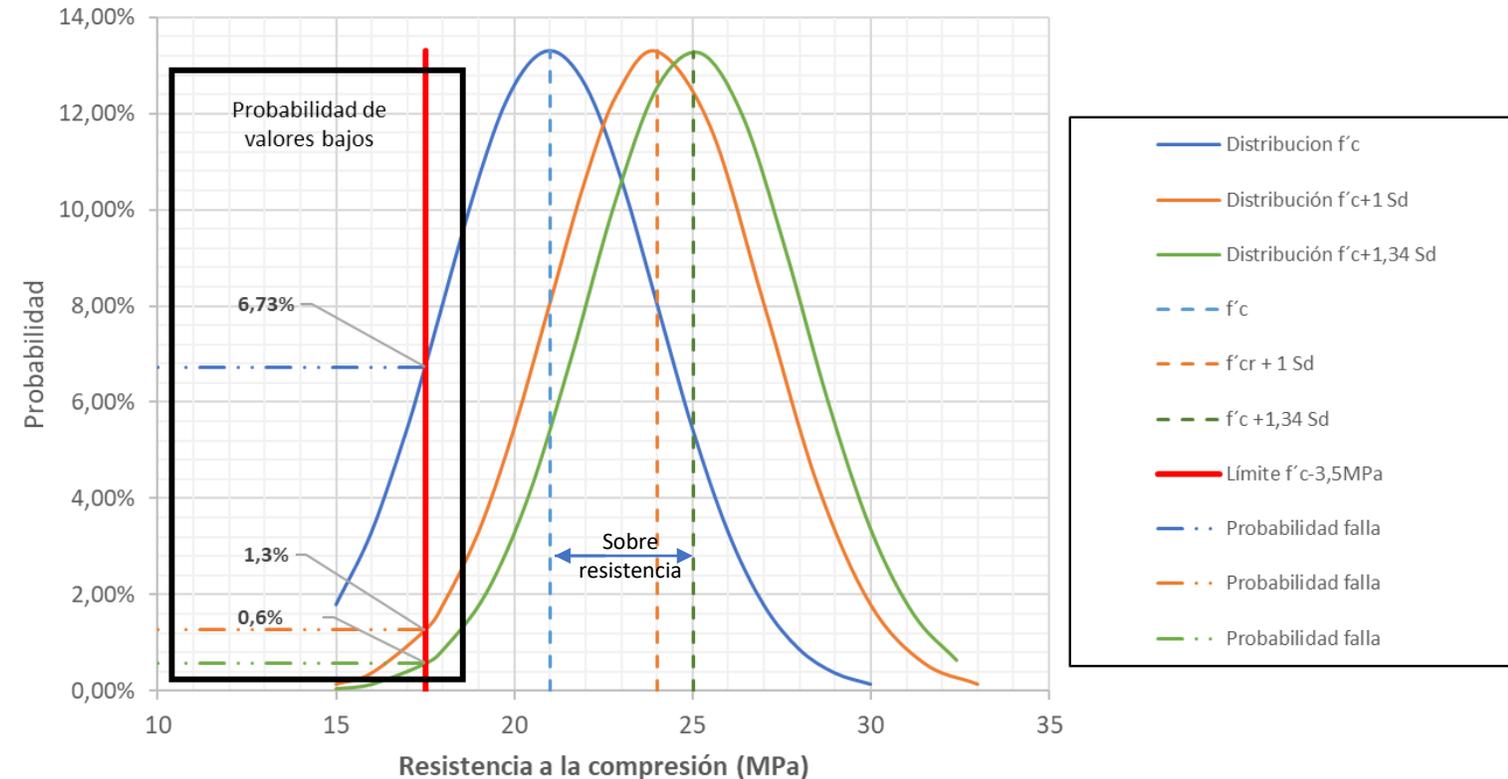
¡Volvemos a la estadística!

Supuestos

- $f'_c=21$ MPa
- Distribución normal de los datos
- Para todos la $S_d=3$ MPa
- Coeficiente de variación: 14% (“bueno”)

En este caso:

Si se diseñara para $f'_{cr}=24$ MPa, 0,6 de cada 100 mezclas pueden tener resultados bajos, cumpliendo el requisito normativo de que sea $< 1/100!$



Influencia en $f'c$ de los cementantes

Son el 12% a 25% de la masa (peso) de una mezcla y su estabilidad impacta directamente $f'cr$.

Ir más allá del \$/kg y de la eficiencia cementante: \$/kg producto vs aporte a la dispersión!

Afectan principalmente las variaciones:

- Cuando un cemento hidráulico presenta alta dispersión o variaciones en sus resultados.
- Cuando los cementantes suplementarios tienen alta dispersión. Residuos (Ceniza no tratada) vs industriales (Metacaolín).

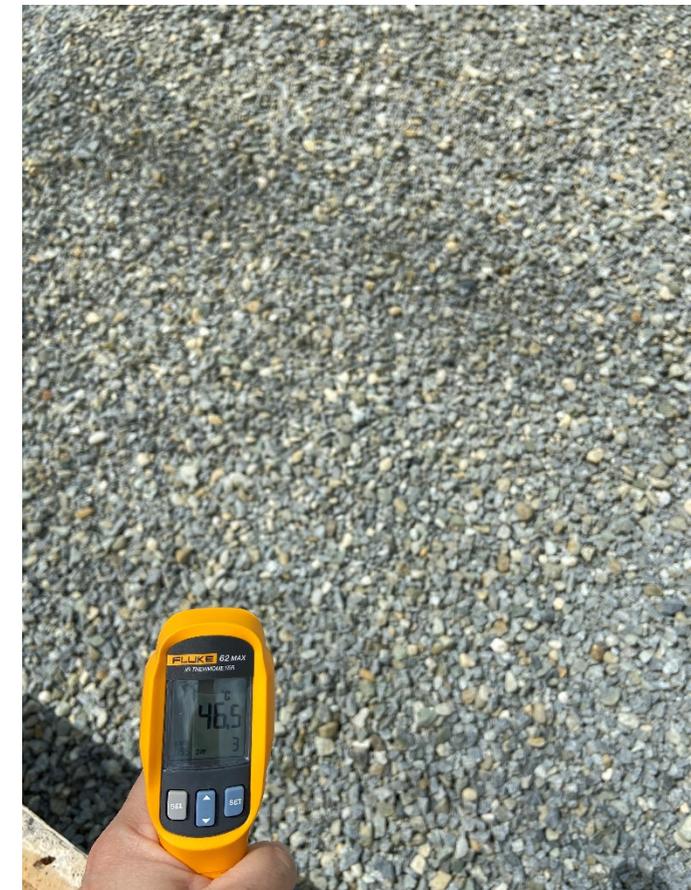
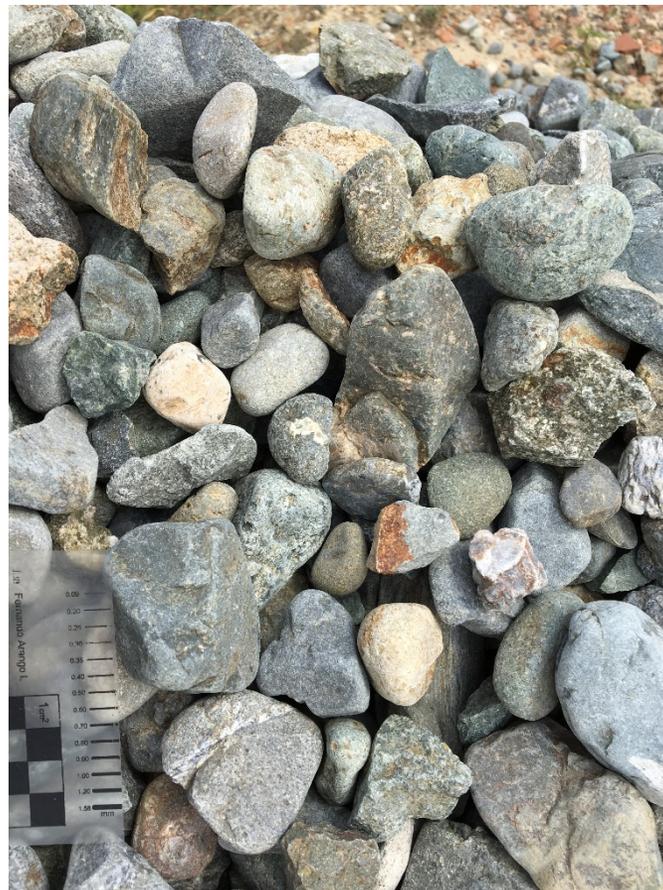


Influencia en $f'c$ de los agregados

Son el 70% a 80% de la masa (peso) de la mezcla.

Afectan principalmente las variaciones en:

- Granulometría
- Textura y forma
- Absorción
- Resistencia del agregado
- Contaminantes
- Temperatura del agregado al momento de hacer la mezcla (variación en manejabilidad y tiempo de fraguado)



Influencia en $f'c$ de mezclas de obra y curado

En un porcentaje importante de casos la resistencia a la compresión de las mezclas de obra son inferiores que las obtenidas en el laboratorio en mezclas de prueba, a pesar de que se diseñaron para $f'cr$.

- Los diseños **se deben reajustar**, aumentando el contenido de cemento.
- **Varias posibilidades:**
 - Que la obra tiene mayor desviación que el laboratorio.
 - Que los valores de sobre diseño son muy bajos para las condiciones “reales” de control de obra.
 - Que **no hay estabilidad** en el proceso, materias primas, muestreo y ensayos.
 - Que los procedimientos de muestreo y curado no son adecuados.

Se requiere que el muestreo sea realizado por personal calificado!!



Influencia en $f'c$ de los ensayos de laboratorio

- Tomarse en serio los requisitos de transporte, curado y ensayo.
- Utilizar laboratorios reconocidos y confiables.
- Todo ensayo tiene precisión y sesgo que suman a la variación de los resultados.
- Nuevos requisitos más estrictos para los cilindros:
 - Paralelismo de caras
 - Desviación del eje
 - Entre otros...
- Análisis de descarte de los resultados erráticos dentro de una misma muestra.



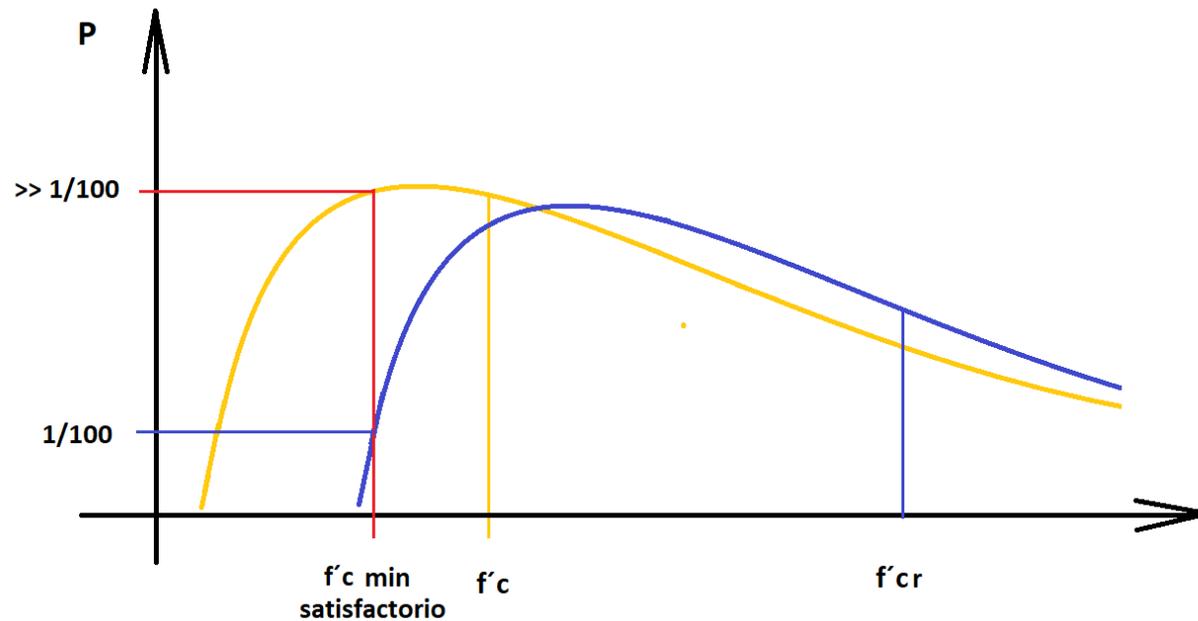
Futuro del f'_{cr}

- ACI 318-19, que es la base para la actualización de la NSR-10, ya no incluye de manera explícita el método descrito en esta presentación. De hecho, los retiró desde su versión 2014.
- ACI 318-19 entrega dos alternativas de resistencia de diseño requerida (Sección 26.4.3.1):
 - Usar **ACI 301, Artículo 4.2.3.2**, que es el procedimiento que hoy tratamos en esta conferencia.
 - Usar ACI 214R (NTC 2275-97, pero ojo, es 214R de 1977)
 - **Otro método alternativo aceptable** para el profesional facultado para diseñar, que cumpla con la probabilidad equivalente a la del método ACI 301 (probabilidad de falla $<1/100$).

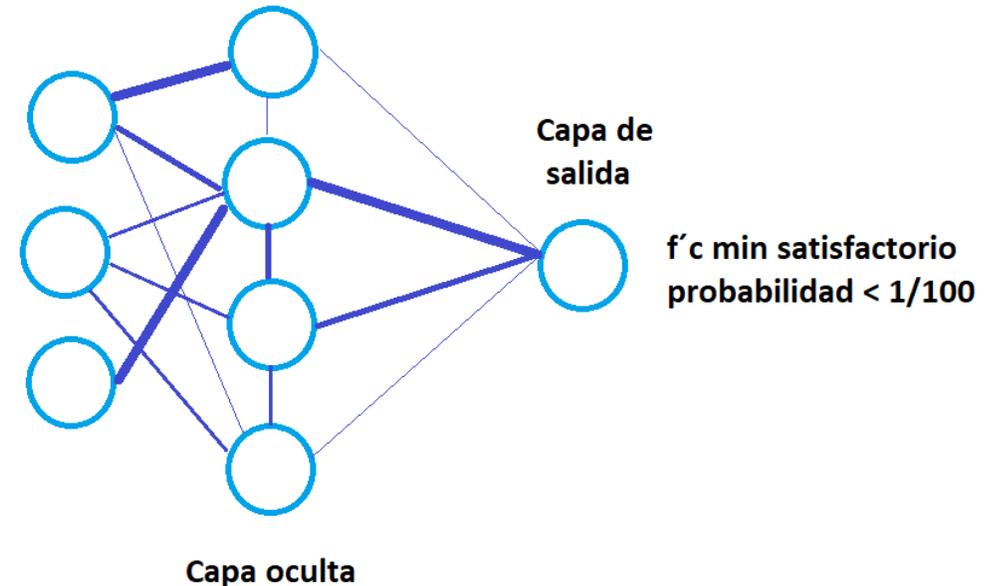


Futuro del f'_{cr}

- La distribución de los datos de resistencia obtenida no siempre es de tipo normal simétrica. En el peor de los casos puede ser normal desviada a la izquierda.
- Hay más métodos de control proceso que permitan 1/100 de probabilidad para f'_{cr} . Por ejemplo, los descritos en ACI 214R, o por sistemas expertos, redes neuronales, diseño de experimentos, entre otros.



Capa de entrada



Conclusiones

1. Los resultados del concreto varían con un comportamiento estadístico. Se debe diseñar f'_{cr} para que haya una probabilidad de que ocurra una baja resistencia menor que 1 cada 100.
2. Un cemento con comportamiento estable facilita disminuir la sobre resistencia de diseño. Cambia el enfoque de \$/kg, pasando a por \$/kg eficiencia; y ahora \$/kg estable para bajar f'_{cr} .
3. La excelencia operativa permite disminuir la variación: algunos son gestionables.
4. Igualmente lo hacen otras materias primas: agregados, aditivos, agua, entre otras; los procesos de muestreo y laboratorio.

HECHOS EN
CONCRETO

¿Preguntas finales?

ALION
SEMENTOS
MOLINS corona

Si necesitas más información para tus proyectos de infraestructura, **¡Contáctanos!**

Hernán Pimentel

**Gerente de Ventas Sector Constructor,
Transformador e Infraestructura**

hpimentel@alion.com.co

320 4919197

Juan Fernando Arango L.

Jefe de Soporte Técnico

jfarangol@alion.com.co

310 8250924

Línea Siempre Firme

- **Medellín:** 6044747
- **Bogotá:** 3905454
- **Bucaramanga:** 6985555
- **Cali:** 4868888
- **Pereira** 3402422
- **WhatsApp:** 310 2751300
- siemprefirme@alion.com.co

¡Gracias!

ALION
SEMENTOS
MOLINS corona