



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL PROCESO DE CONFECCIÓN DE HORMIGÓN  
PREMEZCLADO MEDIANTE EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESISTENCIAS A  
LA COMPRESIÓN**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**CÉSAR ÁLVARO TORRES FARÍAS**

PROFESOR GUÍA:  
JACQUES BORNAND ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
DAVID CAMPUSANO BROWN  
JUAN HENRÍQUEZ CARO

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil  
POR: César Torres Farías  
FECHA: 26/08/2019  
PROFESOR GUÍA: Jacques Bornand Araya

## **EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL PROCESO DE CONFECCIÓN DE HORMIGÓN PREMEZCLADO MEDIANTE EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN**

El hormigón, es el material utilizado mayoritariamente en la industria de la construcción. Por este motivo, es muy importante controlar la calidad su proceso de producción. El control estadístico de procesos permite identificar las desviaciones o variaciones en distintos procesos productivos. Las cartas de Shewhart, CUSUM y EWMA son herramientas efectivas para detectar variaciones.

El principal objetivo del trabajo es obtener una evaluación de distintas plantas de hormigón premezclado, a través del análisis de una serie de resistencias a la compresión de hormigones.

Para ello se obtienen registros de resistencias a la compresión a 28 días en probeta cilíndrica de distintos grados de hormigón y de distintas plantas hormigoneras chilenas en distintos períodos comprendidos entre los años 2016 y 2018. Se escogen siete plantas hormigoneras denominadas A1, A2, A3, B1, B2, C1 y D1; y cuatro grados de hormigón por cada planta a analizar; H20, H25, H30 y H35. Cada serie de resistencias de los 28 hormigones, presenta distintas desviaciones estándar y se clasifica preliminarmente su estándar de control según la ACI214R-11. Finalmente, se aplican las herramientas Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA a través el programa computacional Minitab 2018, realizando el análisis correspondiente de las alertas que entregan.

De los 28 hormigones analizados, 21 tienen una buena o excelente calidad en su proceso de producción, lo que representa un 75% de los hormigones analizados.

Los 7 hormigones restantes no tienen una buena calidad en sus procesos productivos. En particular 4 hormigones tienen una deficiente calidad en su proceso de producción: H35, Planta B2; H25, Planta C1; H30, Planta C1; y H35, Planta C1. Estas resistencias tienen bajo estándar de control y un elevado porcentaje de alertas de desviaciones CUSUM. Por otra parte, el hormigón HB35 de la planta A2 y el hormigón HB20 de la planta C1 trabajan al límite; el HB20 de la planta A1 tiene un estándar de control "Justo" y un elevado porcentaje de alertas CUSUM que lo clasifican como un hormigón "Malo".

A partir del análisis de los gráficos resultantes, se obtiene que CUSUM Tabular, es el método de control gráfico que tiene mejor desempeño en el control de calidad del proceso productivo de hormigón premezclado, debido a que:

- Es el método que entrega más alertas de descontrol en el proceso.
- Las alertas son tempranas, permitiendo tomar acciones correctivas con mayor anticipación.
- Es más fácil de interpretar

No obstante lo anterior, para que CUSUM tenga un desempeño óptimo, debe ser calibrado de acuerdo al control de la planta que lo utilice y no debe ser utilizado en períodos en que las plantas tengan variaciones muy grandes en sus resistencias objetivo. En estos períodos CUSUM podría entregar alertas que no correspondan necesariamente a que el proceso esté fuera de control.

# Dedicatoria

A mi familia querida  
y en especial a mis padres,  
Sonia Farías Ibacache y  
Carlos Torres Bravo, por su apoyo,  
confianza y amor incondicional.  
Este trabajo, y lo que he logrado,  
es en gran parte gracias a  
ustedes. Los amo.

También dedico este trabajo  
con mucho amor  
a mi hijo Joaquín.  
Eres lo más importante de  
mi vida, hijo mío.

# Agradecimientos

A mi profesor guía, Jacques Bornand. Gracias por el apoyo en todo este proceso.

A mi profesor co-guía, Juan Henríquez y al profesor David Campusano. Gracias por formar parte de este trabajo.

A mi familia por el constante apoyo y consejos en momentos de dificultad. Gracias por siempre creer en mí incluso en momentos en que ni yo creía poder lograr terminar este proceso.

A todos mis amigos, conocidos y compañeros que de una u otra forma me ayudaron a sobrellevar todo este (muy) largo proceso universitario.

Especial agradecimiento a las personas que fueron pilares fundamentales en largos períodos de este proceso, y que por distintas circunstancias ya no son parte de mi vida. Sin su apoyo y contención en momentos críticos, nada de esto sería posible.

## TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. Objetivos .....	12
1.2.1. Objetivos Generales .....	12
1.2.2. Objetivos Específicos.....	12
1.3. Metodología .....	13
1.4. Resultados esperados .....	14
2. Revisión Bibliográfica .....	15
2.1. Calidad de un proceso productivo.....	15
2.2 Variabilidad de los procesos .....	16
2.2.1. Causas Comunes .....	16
2.2.2. Causas Asignables .....	17
2.3. Variabilidad en la resistencia del hormigón .....	18
2.3.1. Variaciones en las propiedades del hormigón .....	18
2.3.2. Variaciones debidas a discrepancias en el proceso de ensayo .....	18
2.4. Control Estadístico de Procesos .....	19
2.4.1. Bases de las cartas de control gráfico .....	19
2.4.2 Gráficos de Control de Medias, Shewhart X .....	20
2.4.2.1. Elección de los límites de control .....	21
2.4.2.2. ARL (Average Run Length) .....	21
2.4.2.3. Patrones en Cartas de Control de Shewhart .....	22
2.4.3. Cartas de Control CUSUM.....	23
2.4.4. CUSUM Tabular.....	24
2.4.4.1. Diseño de CUSUM Tabular .....	25
2.4.5. Gráficos de Control EWMA.....	26
2.4.5.1. Ecuaciones de la gráfica EWMA .....	26
2.4.6. Estadística del hormigón.....	29
2.4.6.2. Estándares de Control .....	32
3. Resultados y análisis.....	33
3.1. Serie de Datos Analizados .....	33
3.1.1. Pre clasificación de hormigones. ....	35

3.1.2. Pruebas consideradas en el análisis gráfico .....	37
3.2. Resultados gráficos por planta.....	38
3.2.1. Resultados Hormigones Planta A1 .....	38
3.2.1.1. Resultados HB20.0(90)20-10 .....	39
3.2.1.2. Resultados HB25.0(90)20-10 .....	42
3.2.1.3. Resultados HB30.0(90)20-12 .....	47
3.2.1.4. Resultados HB35.0(90)20-10 .....	50
3.2.2. Resultados Hormigones Planta A2 .....	52
3.2.2.1. Resultados HB20.0(90)20-10 .....	53
3.2.2.2. Resultados HB25.0(90)20-10 .....	58
3.2.2.3. Resultados HB30.0(90)20-12 .....	64
3.2.2.4. Resultados HB35.0(90)20-10 .....	67
3.2.3. Resultados Hormigones Planta A3 .....	69
3.2.3.1. Resultados HB20.0(90)20-10 .....	70
3.2.3.2. Resultados HB25.0(90)20-10 .....	73
3.2.3.3. Resultados HB30.0(90)20-12 .....	76
3.2.3.4. Resultados HB35.0(90)20-10 .....	79
3.2.4. Resultados Hormigones Planta B1 .....	81
3.2.4.1. Resultados HB20.0(90)20-10 .....	82
3.2.4.2. Resultados HB25.0(90)20-10 .....	84
3.2.4.3. Resultados HB30.0(90)20-10 .....	87
3.2.4.4. Resultados HB35.0(90)20-10 .....	90
3.2.5. Resultados Hormigones Planta B2 .....	95
3.2.5.1. Resultados HB20.0(90)20-10 .....	96
3.2.5.2. Resultados HB25.0(90)20-10 .....	99
3.2.5.3. Resultados HB30.0(90)20-10 .....	103
3.2.5.4. Resultados HB35.0(90)20-10 .....	107
3.2.6. Resultados Hormigones Planta C1 .....	110
3.2.6.1. Resultados HB20.0(90)20-10 .....	111
3.2.6.2. Resultados HB25.0(90)20-12 .....	114
3.2.6.3. Resultados HB30.0(90)20-10 .....	118
3.2.6.4. Resultados HB35.0(90)20-10 .....	122

3.2.6.4.1. Análisis Carta Shewhart .....	123
3.2.7. Resultados Hormigones Planta D1 .....	124
3.2.7.1. Resultados HN20.0(90)20-08 .....	125
3.2.7.2. Resultados HB25.0(90)20-10 .....	127
3.2.7.3. Resultados HB30.0(90)20-10 .....	130
3.2.7.4. Resultados HB35.0(90)20-10 .....	133
4. Análisis general de resultados.....	137
4.1. Resistencias promedio y requerida de los hormigones .....	137
4.2. Observaciones generales de los métodos de control.....	138
4.3. Rapidez de alertas de desviaciones.....	138
4.4. Cantidad de alertas .....	140
4.5. Evaluación de la calidad de los procesos .....	142
4.6. Comentarios y Conclusiones .....	157
5. Conclusiones.....	159
6. Bibliografía .....	161



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Estándar de control de hormigones analizados. ....	37
Gráfico 2: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta A1. ....	39
Gráfico 3: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta A1. ....	42
Gráfico 4: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta A1, datos depurados. ....	45
Gráfico 5: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-12, Planta A1. ....	47
Gráfico 6: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta A1. ....	50
Gráfico 7: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta A2. ....	53
Gráfico 8: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta A2, datos depurados. ....	55
Gráfico 9: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta A2. ....	58
Gráfico 10: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta A2, datos depurados. ....	61
Gráfico 11: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-12, Planta A2. ....	64
Gráfico 12: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta A2. ....	67
Gráfico 13: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta A3. ....	70
Gráfico 14: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta A3. ....	73
Gráfico 15: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-12, Planta A3. ....	76
Gráfico 16: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta A3. ....	79
Gráfico 17: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta B1. ....	82
Gráfico 18: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta B1. ....	84
Gráfico 19: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-10, Planta B1. ....	87
Gráfico 20: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta B1. ....	90
Gráfico 21: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta B1, datos depurados. ....	93
Gráfico 22: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta B2. ....	96
Gráfico 23: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta B2. ....	99
Gráfico 24: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-10, Planta B2. ....	103
Gráfico 25: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta B2. ....	107
Gráfico 26: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta C1. ....	111
Gráfico 27: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-12, Planta C1. ....	114

Gráfico 28: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-10, Planta C1. ....	118
Gráfico 29: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta C1. ....	122
Gráfico 30: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HN20.0(90)20-08, Planta D1. ....	125
Gráfico 31: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta D1. ....	127
Gráfico 32: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-10, Planta D1. ....	130
Gráfico 33: Shewhart X, CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta D1. ....	133
Gráfico 34: Resistencias promedio v/s resistencia requerida. ....	137
Gráfico 35: Distribución porcentaje de alertas CUSUM.....	142
Gráfico 36: CUSUM HB20-90%-20 C/10, Planta A1, distintas desviaciones estándar. ....	148
Gráfico 37: CUSUM HB25(90)20-10, Planta A2, distintas desviaciones estándar. ....	149
Gráfico 38: CUSUM HB30(90)20-12, Planta A2, distintas desviaciones estándar. ....	150
Gráfico 39: CUSUM HB35(90)20-10, Planta A2, distintas desviaciones estándar. ....	151
Gráfico 40: CUSUM HB20(90)20-10, Planta A2, distintas desviaciones estándar. ....	152
Gráfico 41: CUSUM HB25(90)20-10, Planta A3, distintas desviaciones estándar. ....	153
Gráfico 42: CUSUM HB20.0(90)20-10, Planta C1, distintas desviaciones estándar. ...	154
Gráfico 43: CUSUM HB30.0(90)20-10, Planta D1, distintas desviaciones estándar. ...	155

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Desempeño de ARL con $k=0,5$ y $h= 4$ o $h=5$ .....	25
Tabla 2: ARL para distintos parámetros de Gráficos EWMA (Lucas & Saccucci, 1990).....	28
Tabla 3: Factor estadístico $t$ en función del número de muestras (NCh1998Of.89) .....	31
Tabla 4: Estándares de control para $f_c' \leq 35$ Mpa (350 kgf/cm <sup>2</sup> ), adaptado de ACI214R-11. ....	32
Tabla 5: Plantas y hormigones utilizados en el análisis. ....	34
Tabla 6: Períodos de muestras consideradas (fechas de confección de muestras).....	35
Tabla 7: Clasificación de hormigones según estándares de control (ACI214R-11).....	36
Tabla 8: Tiempos de alertas. ....	139
Tabla 9: Cantidad de alertas. ....	141
Tabla 10: Clasificación CUSUM según porcentaje de alertas entregadas. ....	142
Tabla 11: Clasificación ACI versus clasificación CUSUM. ....	143
Tabla 12: Ejemplo explicativo 1.....	144
Tabla 13: Ejemplo explicativo 2.....	146
Tabla 14: Clasificación CUSUM y ACI para distintas desviaciones estándar.....	157

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proceso bajo control estadístico (Besterfield, 2009). .....	16
Figura 2: Proceso fuera de control estadístico (Besterfield, 2009). .....	17
Figura 3: Carta de Control típica (Montgomery, 2009). .....	20
Figura 4: Carta Shewhart con comportamiento cíclico (Montgomery, 2009). .....	22
Figura 5: Ejemplo Gráfica CUSUM (Montgomery, 2009) .....	23
Figura 6: Ejemplo Gráfica CUSUM Tabular según Minitab (Montgomery, 2009). .....	26
Figura 7: Ejemplo modelo EWMA (Montgomery, 2009). .....	28
Figura 8: Ilustración de la distribución de resistencias del hormigón (Ian Gibb and Tom Harrison, 2008).....	30
Figura 9: Ejemplo Explicativo 1 .....	145
Figura 10: CUSUM Ejemplo explicativo 1. ....	145
Figura 11: Ejemplo explicativo 2.....	146
Figura 12: CUSUM ejemplo explicativo 2.....	147

# 1. Introducción

## 1.1. Introducción

El hormigón premezclado es el material más utilizado en las obras de construcción en Chile. Por este motivo es fundamental para las plantas pre mezcladoras tener la mayor cantidad de información del comportamiento de sus productos y así poder tomar decisiones respecto a realizar ajustes orientados a mejorar la calidad del hormigón y disminuir su costo de producción.

No obstante lo anterior, el proceso productivo de hormigón en Chile no tiene, en muchos casos, métodos confiables de seguimiento y control. Es común que se utilice como base de toma de decisiones la “experiencia” y no herramientas de control que pueden ser más precisas a la hora de alertar desviaciones en el proceso.

En la actualidad existe un gran número de cartas o gráficos de control disponibles para el estudio de un proceso productivo. Las utilizadas mayoritariamente en distintas industrias son las cartas de control Shewhart, EWMA y CUSUM, que trabajan con un valor objetivo y parámetros que definen límites de control del proceso. Estos límites de control determinan si el proceso productivo está bajo control estadístico o fuera de control estadístico.

El presente trabajo tiene como propósito aplicar las cartas de control gráfico Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA a resistencias a la compresión a 28 días en probeta cilíndrica de distintos hormigones de distintas plantas pre mezcladoras chilenas, obtener una evaluación de la calidad del proceso de confección del hormigón premezclado y determinar la validez de la utilización de estas herramientas en la industria del hormigón premezclado.

## 1.2. Objetivos

A continuación se presentan los objetivos generales y específicos del trabajo realizado.

### 1.2.1. Objetivos Generales

- Evaluar la calidad del proceso productivo de hormigones premezclados en Chile a partir de la aplicación de los métodos gráficos Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA a resistencias a la compresión a 28 días de distintos hormigones y plantas hormigoneras.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar desvíos y tendencias de resistencias por planta hormigonera.
- Analizar la validez de los métodos de control de procesos en la realidad del rubro hormigonero chileno.

- Determinar qué método funciona mejor en el control del proceso de producción de hormigón.
- Comprobar si los métodos utilizados son útiles para alertar anticipadamente sobre resistencias bajas o muy altas de hormigón y así permitir realizar modificaciones al proceso productivo para disminuir la variabilidad de las resistencias en el tiempo y así optimizar los costos de producción.

### 1.3. Metodología

La metodología utilizada para llevar a cabo el presente trabajo de título consiste en:

1. Revisión de bibliografía en que se desarrolle el tema de control estadístico de procesos (CEP).
2. Obtención de datos (planillas Excel) de resistencias de hormigón de laboratorio de control de hormigones en Chile, para ensayos a 28 días realizados entre Enero de 2016 y Marzo de 2019. Se consideran hormigones H20, H25, H30 y H35 con mayor volumen despachado para 7 plantas hormigoneras distintas; 5 plantas de la Región Metropolitana y 2 de Viña Del Mar.
3. Análisis de las planillas de datos y elección de plantas y hormigones que presenten la mayor cantidad de escenarios posibles al aplicar métodos de control gráfico de acuerdo a la variabilidad de sus datos.
4. Pre-clasificación de los hormigones escogidos de acuerdo a su estándar de control según ACI214R-11.
5. Con los datos escogidos, realizar cartas de control de Shewhart  $\bar{X}$ , EWMA y CUSUM en Minitab 2018.
6. Determinación de las alertas señaladas por cada carta de control.
7. Análisis cuantitativo y cualitativo de las alertas de los distintos escenarios obtenidos al aplicar métodos de control para cada planta y hormigón escogido.
8. Análisis comparativo del funcionamiento de las tres cartas de control en el proceso productivo de hormigón.
9. Comprobar si métodos son coherentes con la preclasificación de cada hormigón.
10. Elección de la carta de control estadístico que presente el mejor desempeño en el análisis, que entregue las alertas más rápido y sea más riguroso para tener un control óptimo de la calidad del proceso.
11. Establecer parámetros de clasificación de la variabilidad de las resistencias analizadas con el método escogido y junto a la preclasificación de la ACI214R-11, determinar la calidad del proceso productivo de los hormigones.
12. Para los hormigones en que no sea coherente el estándar de calidad y la clasificación de acuerdo al método de control escogido, realizar los gráficos de control del método escogido para desviaciones estándar de 25 kgf/cm<sup>2</sup>, 30 kgf/cm<sup>2</sup>, 35 kgf/cm<sup>2</sup>, 45 kgf/cm<sup>2</sup> y 50 kgf/cm<sup>2</sup> que representan estándares de control Excelente, Muy Bueno, Bueno, Justo y Pobre según ACI214R-11.
13. Obtener una evaluación final de la calidad del proceso de confección de los hormigones seleccionados.

## 1.4. Resultados esperados

- Obtener evaluación de calidad de los procesos productivos de hormigón mediante herramientas de control gráfico.
- Obtener el método que mejor funciona al ser aplicado a las resistencias de hormigón de acuerdo a la cantidad de alertas, qué tan temprano se generan las alertas y la facilidad de interpretación de sus desviaciones.
- Obtener una identificación de los casos en que los métodos de control son válidos en el control del proceso de confección de hormigón premezclado y los casos en que tienen poca o nula validez.

## 2. Revisión Bibliográfica

Es necesario profundizar en los conceptos tratados en la investigación, por tanto se requiere realizar una revisión bibliográfica que ayude al lector a comprender de buena forma los análisis y resultados del trabajo realizado. En este capítulo se presenta una recopilación de antecedentes de todos los temas y conceptos involucrados, que a grandes rasgos son los siguientes:

- Calidad y variabilidad de un proceso productivo.
- Control estadístico de procesos
- Gráfica de Shewhart  $\bar{X}$
- Gráfica CUSUM
- Gráfica EWMA
- Estadística del hormigón

### 2.1. Calidad de un proceso productivo

La calidad se ha transformado en uno de los más importantes factores de decisión para los consumidores al elegir entre distintos productos o servicios. Independiente del rubro de las empresas o del tipo de productos que se realicen, comprender y mejorar la calidad de los procesos involucrados es clave para el éxito de las empresas.

La calidad se puede analizar en 8 dimensiones (Garvin, 1987):

**Desempeño:** Las principales características operativas de un producto, es decir, qué tan bien funciona cuando está en uso.

**Confiabilidad:** La probabilidad de que un producto falle dentro de un tiempo determinado.

**Durabilidad:** La cantidad de uso que un producto puede soportar antes de que sea necesario reemplazar o reparar.

**Estética:** Todo lo relativo a cómo se ve exteriormente un producto (forma, color, sonido, etc.).

**Características:** Relativo a las cualidades adicionales de un producto más allá de sus características básicas.

**Calidad percibida:** El impacto que la marca tiene, la “reputación” de sus productos, la imagen de la empresa y la publicidad.

**Conformidad:** El grado en que el producto cumple con las especificaciones técnicas, estándares o normativas preestablecidas.

Se observa entonces que la calidad tiene diversas dimensiones para ser medida y por lo tanto es complejo precisar su definición.



Una posible definición, y que será la adoptada en este trabajo, es que la calidad es la “aptitud para el uso” y también se puede definir como una característica inversamente proporcional a la variabilidad. Esto implica que si la variabilidad de un producto disminuye, entonces la calidad se incrementa. A partir de esto se define el concepto “mejora de la calidad” como la reducción de la variabilidad en los procesos y productos (Montgomery, 2009).

Es importante entonces controlar los procesos productivos con la finalidad de disminuir la variabilidad de estos y así mejorar la calidad.

## 2.2 Variabilidad de los procesos

La variabilidad es inversamente proporcional a la calidad y por lo tanto, es el factor principal a controlar y disminuir para así mejorar la calidad del proceso.

Existen dos causas de la variabilidad; las causas comunes y las causas asignables.

### 2.2.1. Causas Comunes

En cualquier proceso productivo, independientemente de lo bien diseñado que esté, siempre va a existir una cierta variabilidad inherente. Esta variabilidad es el resultado de muchas causas pequeñas, que en su gran mayoría no se pueden evitar. Son fuentes de variabilidad que pertenecen al proceso y son inherentes a él.

Cuando en un proceso es afectado por este tipo de causas, se puede determinar su variación y para disminuir este tipo de variabilidad, se deben realizar modificaciones en el sistema, debido a que esta variabilidad surge a partir de cómo está diseñado el proceso productivo.

Si un proceso está funcionando sólo con causas comunes de variabilidad, se dice que está “bajo control estadístico”.

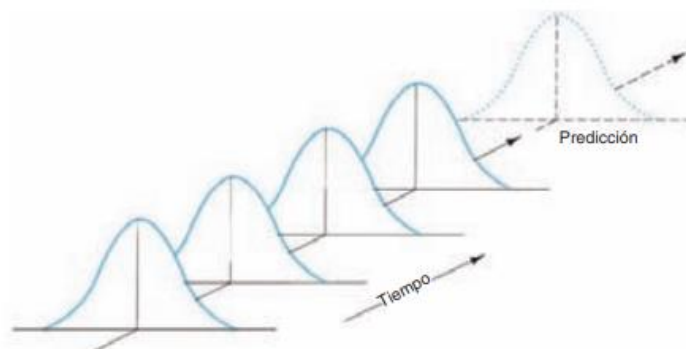


Figura 1: Proceso bajo control estadístico (Besterfield, 2009).

En la figura 1 se pueden apreciar gráficas de distribución normal, donde se visualiza un proceso bajo control estadístico, Como se puede apreciar, la media del proceso bajo control, no cambia en el tiempo aunque si existen variaciones comunes.

## 2.2.2. Causas Asignables

Otro tipo de variabilidad es la debida a fuentes externas al proceso, que provienen principalmente de 3 fuentes: Máquinas mal ajustadas o mal controladas, errores de operadores o materias primas defectuosas. Este tipo de variabilidad es, generalmente, más grande y notoria que las debidas a causas comunes, y representan un nivel inaceptable en el rendimiento del proceso (Montgomery, 2009).

Cuando un proceso es afectado por causas asignables de variación, su comportamiento cambia impredeciblemente pues son provocadas por eventos puntuales y extraordinarios. Este tipo de variabilidad es de fácil detección y se puede remediar pronto.

Si un proceso está operando en presencia de causas asignables, se dice que está “fuera de control estadístico”.

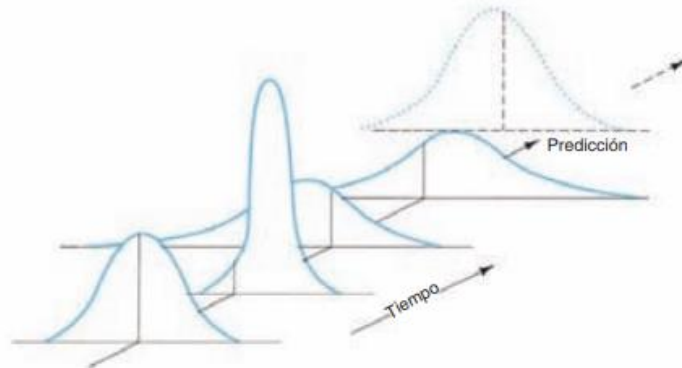


Figura 2: Proceso fuera de control estadístico (Besterfield, 2009).

En la figura 2 se ilustra un proceso fuera de control estadístico y el efecto de las causas asignables de variación en función del tiempo. La naturaleza excepcional e inestable de las variaciones hace imposible predecir variaciones futuras. Se deben encontrar y corregir las causas asignables antes de que pueda continuar un proceso natural y estable (Besterfield, 2009).

Para saber cómo intervenir el proceso, es de vital importancia determinar cuál es el tipo de causa actuante, y para eso se utilizan las herramientas de control estadístico de procesos.

## 2.3. Variabilidad en la resistencia del hormigón

El hormigón es un material compuesto principalmente de cemento, árido, agua y aditivos. Debido a que es un material heterogéneo, existen muchos factores que afectan las resistencias de los ensayos a compresión. Estos factores van desde la elección de las materias primas, hasta las condiciones de confección, curado y el mismo ensayo de las probetas de hormigón que se confeccionan en obra. A partir de esto, se determinan dos fuentes de variaciones en las resistencias del hormigón: variaciones en las propiedades del hormigón y variaciones debidas a las discrepancias en el proceso de ensayo.

### 2.3.1. Variaciones en las propiedades del hormigón

Estas variaciones se deben principalmente a modificaciones de los materiales utilizados en la confección de las probetas de hormigón que posteriormente serán ensayadas. Algunos de estos factores son (Sharma, 1972):

- Cambios en la relación agua/cemento, como resultado de un deficiente o nulo control del agua total en las mezclas de hormigón
- Variabilidad en la granulometría de los áridos utilizados
- Variaciones en las características de los áridos. Esto se debe principalmente a que se utilizan distintas fuentes de obtención de los áridos.
- Variaciones en las características del cemento, debido a que pueden obtenerse de más de una fábrica, a que se cambie el tipo de cemento utilizado o a que existan variaciones la producción del cemento (distintas finuras, porcentajes de adiciones, etc.).
- Variaciones en la temperatura y condiciones de curado durante el amasado del cemento, confección de las probetas y en el período de endurecimiento.

### 2.3.2. Variaciones debidas a discrepancias en el proceso de ensayo

Desde la confección de muestras, hasta el ensayo de las probetas en el laboratorio, se pueden generar diversas fuentes de variación, tales como (Sharma, 1972):

- Procedimientos de toma de muestras inadecuados (Mal vibrado de las probetas, muestra tomada antes del 10% o después del 90% de la descarga el camión mixer, etc.).
- Falta de uniformidad para confeccionar las probetas de ensayo.
- Cambios en las condiciones de curado
- Manipulación inadecuada de las probetas.
- Traslado inadecuado de las probetas desde la obra hacia el laboratorio de ensayo.
- Moldes defectuosos
- Deficiencias en las máquinas de ensayo del laboratorio de ensayo.
- Procedimientos inadecuados en ensayo de las probetas de hormigón.

## 2.4. Control Estadístico de Procesos

Si un proceso cumple o excede las expectativas de un cliente, debe ser producido por un proceso que es estable o repetible, es decir, el proceso debe operar con poca variabilidad en torno a un valor objetivo. El control estadístico de procesos es una poderosa herramienta que logra la estabilidad de los procesos mediante la reducción de su variabilidad.

El control estadístico de procesos es uno de los mejores desarrollos tecnológicos del siglo XX, porque es fácil de usar, tiene un impacto significativo y se puede aplicar a cualquier proceso (Montgomery, 2009).

Las 7 mayores herramientas del control estadístico de procesos, son:

1. Histograma o diagrama de tallo y hoja
2. Hoja de verificación
3. Gráfico de Pareto
4. Diagrama de causa y efecto
5. Diagrama de concentración de defectos
6. Diagramas de dispersión
7. Cartas de control

De las 7 herramientas de control de procesos antes mencionadas, las cartas de control son las más sofisticadas.

### 2.4.1. Bases de las cartas de control gráfico

Una típica carta de control gráfico es la mostrada en la figura 3. El gráfico de control es una visualización gráfica de una característica de calidad que se ha medido a través del tiempo, y se utiliza para identificar la variabilidad presente en un proceso productivo. Es una herramienta de monitoreo de procesos muy útil.

La carta contiene una línea central que representa el valor promedio de la característica de calidad medida y corresponde a la situación en que el proceso se encuentra “bajo control” (Montgomery, 2009). Además, existen dos líneas horizontales, llamadas Límite de Control Superior (LCS) y Límite de Control Inferior (LCI). Estas líneas se escogen de manera tal que, si el proceso está bajo control, prácticamente todos los puntos deben estar dentro del rango LCS-LCI. Sin embargo y a pesar de que todos los puntos pueden estar dentro del rango de los límites de control, su comportamiento “no aleatorio” puede entregar una señal de que el proceso esté fuera de control a pesar de estar dentro de los límites de control.

Generalmente, existen motivos para que un patrón especial no aleatorio aparezca en un gráfico de control. Si este motivo se puede encontrar y eliminar, es posible mejorar el proceso productivo.

Los límites de control en un gráfico de control no son usados para determinar si el producto es aceptable pero indica que hay un cambio en el proceso y genera acciones correctivas (Obla, 2014).

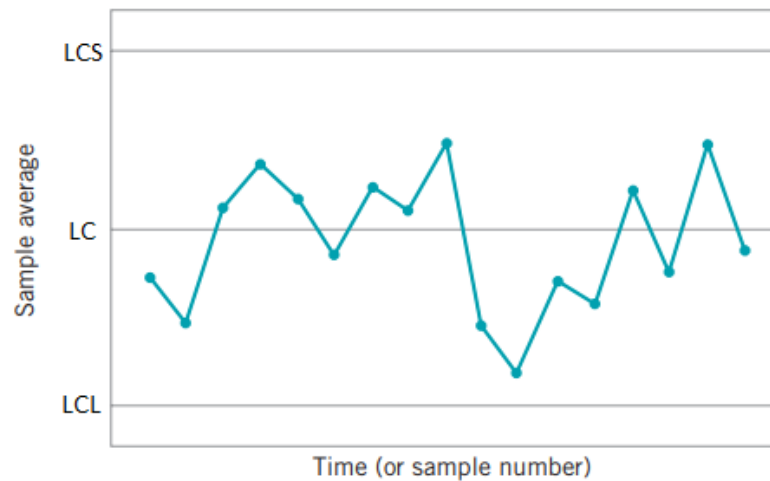


Figura 3: Carta de Control típica (Montgomery, 2009).

## 2.4.2 Gráficos de Control de Medias, Shewhart $\bar{X}$

La carta de Control comúnmente utilizada es la que desarrolló Walter A. Shewhart (Shewhart, 1931). Shewhart propuso gráficos de control que se basan en el seguimiento de la variabilidad intrínseca de un proceso, a través del monitoreo del valor de un estadístico.

Si se considera  $W$  como una característica de calidad a evaluar, el modelo general de Shewhart, define la línea de control superior (LCS), la línea central ( $\mu_w$ ) y la línea de control inferior se la siguiente manera:

$$LCS = \mu_w + L \cdot \left(\frac{\sigma_w}{n}\right)$$

$$\text{Línea Central} = \mu_w$$

$$LCL = \mu_w - L \cdot \left(\frac{\sigma_w}{n}\right)$$

Dónde:

$\mu_w$ : Media de la característica de interés  $w$ .

$L$ : Distancia de la Línea Central a las Líneas de Control.

$\sigma_w$ : Desviación estándar de la característica de interés  $w$ .

$n$ : Número de mediciones de cada muestra

Todos los modelos que se desarrollan de acuerdo a estos principios, se conocen como Cartas de Control de Shewhart, y en particular, los parámetros indicados anteriormente

constituyen una carta que controla posibles cambios en la media del proceso, Shewhart  $\bar{X}$ .

#### 2.4.2.1. Elección de los límites de control

Especificar los puntos de control es una de las decisiones más críticas al construir una Carta de Control. Al mover los límites más lejos de la línea central, es decir, al incrementar el valor de L, se disminuye el riesgo de tener puntos que caigan fuera de los límites de control cuando no hay una causa asignable en el proceso. Esto se conoce como error tipo I. Sin embargo, al alejar los límites de control de la línea central, se aumenta la probabilidad de que un punto caiga dentro de los límites cuando el proceso realmente está fuera de control. Esto se conoce como error tipo 2.

Si se acercan los límites de control a la línea central, se produce el efecto inverso: aumenta el error tipo 1 y disminuye el error tipo 2 (Montgomery, 2009).

Una forma de determinar los límites de control para las cartas de Shewhart, es a través de la longitud promedio de corrida (ARL por sus siglas en inglés).

#### 2.4.2.2. ARL (Average Run Length)

El ARL es el promedio de puntos graficados previamente a que un punto indique una condición de proceso fuera de control (Montgomery, 2009). Para cualquier carta de control de Shewhart, el ARL se puede calcular de la siguiente manera:

$$ARL = \frac{1}{p}$$

Dónde p es la probabilidad de que un punto exceda los límites de control.

Para el caso de las cartas de Shewhart, se utilizan líneas de control habitualmente situadas a 3 desviaciones estándar de la media. Para esta elección, se tiene una probabilidad  $p=0,0027$  de que un punto caiga fuera de los límites de control. A partir de este valor, se obtiene un ARL cuando el proceso está en control de  $1/0,0027=370$ . Esto significa que si el proceso está en control, una señal fuera de control puede ser generada cada 370 muestras.

Las cartas de control de Shewhart utilizan sólo información acerca del proceso con los últimos puntos graficados, e ignoran la información de la secuencia completa de puntos. Esto hace que estas cartas de control sean insensibles a pequeños desvíos de la media del proceso (1,5 desviaciones estándar o menos).

Para el caso del control de resistencias de hormigón, los límites de control recomendados son a  $\pm 2$  desviaciones estándar, ya que un cambio en el proceso podría ser identificado ya que existe sólo un 0,2 % de probabilidad que dos puntos consecutivos queden fuera de los límites de control establecidos en  $\pm 2$  desviaciones estándar y un 0,8% de probabilidad de que 7 resultados consecutivos estén a un lado del promedio (Obla, 2014).

### 2.4.2.3. Patrones en Cartas de Control de Shewhart

Una carta de control puede indicar una condición fuera de control estadístico cuando uno o más puntos caen fuera de los límites de control o cuando los puntos graficados exhiben patrones de comportamiento no aleatorios (Montgomery, 2009).

Existen una serie de patrones adicionales para complementar los límites de control típicos de las cartas de Shewhart (Western Electric Corporation, 1956).

1. Un punto graficado fuera de los límites de control 3 sigmas.
2. Dos de tres puntos consecutivos graficados fuera de límites de control 2 sigmas.
3. Cuatro de cinco puntos graficados a una distancia de 1 sigma o más allá de la Línea Central.
4. Ocho puntos consecutivos graficados a un lado de la Línea Central.

Además, se propone una regla adicional que determina que el proceso está fuera de control estadístico cuando seis puntos consecutivos aumenten o decrezcan constantemente (Montgomery, 2009).

Otro factor importante de considerar, son los procesos que muestran un comportamiento cíclico (figura 4), es decir, valores sobre la media del proceso o bajo la media del proceso. Si bien las resistencias caen dentro de los límites de control, un patrón de este tipo puede indicar un problema en el proceso (Montgomery, 2009).

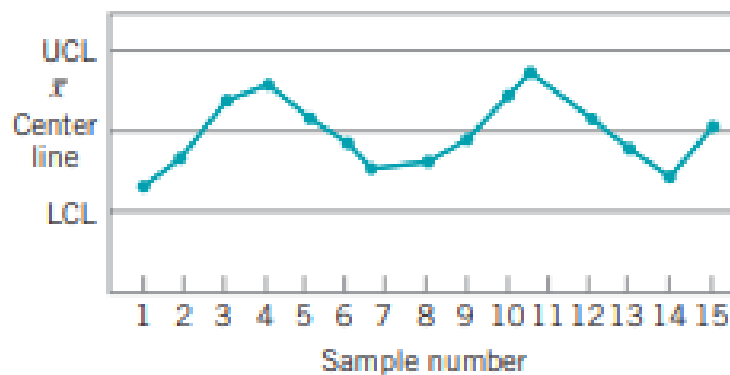


Figura 4: Carta Shewhart con comportamiento cíclico (Montgomery, 2009).

El uso de estas reglas puede permitir que se detecten cambios de proceso más pequeños y más rápidamente de lo que sería si el único criterio fuera la infracción habitual del límite de control de tres sigma (Montgomery, 2009).

Estos límites preventivos o criterios extra de tendencias consideran otros puntos graficados (no sólo el último punto de la carta), pero reducen la simplicidad de interpretación de la carta (Reyes Aguilar, 2008).

### 2.4.3. Cartas de Control CUSUM

Como se vio anteriormente, las cartas de control de Shewhart tienen un buen desempeño en detectar desviaciones superiores a 1,5 desviaciones estándar. Estas alertas pueden ser muy tardías para pequeñas desviaciones del proceso. Esto era tolerable ya que era común pensar que los pequeños desvíos en los procesos incurrieran en pequeñas pérdidas, por lo tanto no detectarlos no era catastrófico. Este razonamiento es erróneo ya que pequeños desvíos pueden acumular grandes cantidades de daño a los procesos (Hawkins & Zamba, 2003).

CUSUM es una herramienta que cubre esta desventaja de las cartas de Shewhart ya que es conocido por tener mejor desempeño en la detección de pequeños desvíos del proceso en torno a la media (Testik, 2007).

Si se considera  $\mu_0$  como el valor objetivo del proceso y  $\bar{x}_i$  el  $i$ -ésimo promedio de muestra de tamaño de subgrupo  $n$ , entonces la gráfica de control de suma acumulada se confecciona con la cantidad:

$$C_i = \sum_{j=1}^i (\bar{x}_j - \mu_0)$$

$C_i$ : Es la cantidad que acumula las desviaciones de las medias al valor objetivo hasta la  $i$ -ésima muestra.

Gráficamente la carta CUSUM se ve como se muestra en la figura siguiente:

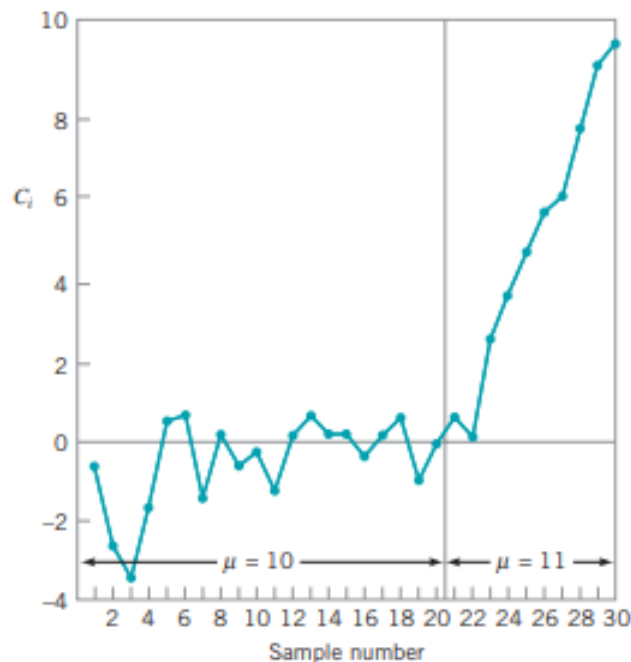


Figura 5: Ejemplo Gráfica CUSUM (Montgomery, 2009)



En la figura se observan las desviaciones de las primeras 20 muestras en torno al valor objetivo de media (para ese tramo), igual a 10. Todas las desviaciones, positivas y negativas, se mueven en torno al valor cero, lo que implica que el proceso está en control estadístico.

A partir de la muestra 21, se observa una suma acumulada de desviaciones positivas. La media del proceso cambia a 11 y por lo tanto el proceso está fuera de control estadístico.

Una mejor forma de exponer la información de las sumas acumuladas, es a través del CUSUM Tabular o CUSUM Algorítmico.

#### 2.4.4. CUSUM Tabular

A continuación se mostrará cómo un CUSUM Tabular puede ser construido para monitorear la media de un proceso productivo. El CUSUM puede ser construido para muestras de observaciones individuales,  $n=1$  o para muestras con más de una observación,  $n>1$  (para el caso de estudio,  $n=2$  ya que se consideran dos resistencias a 28 días por cada muestra de hormigón).

El CUSUM Tabular trabaja con la acumulación de desviaciones desde  $\mu_0$  que están sobre el valor objetivo  $C^+$  y acumulación de desviaciones desde  $\mu_0$  que están bajo el valor objetivo  $C^-$ .

Estos valores se calculan de acuerdo a lo siguiente:

$$C_i^+ = \text{Máx} [0, x_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+]$$

$$C_i^- = \text{Máx} [0, (\mu_0 - K) - x_i + C_{i-1}^-]$$

Dónde los valores iniciales son  $C_i^+ = C_i^- = 0$ .

En las ecuaciones anteriores,  $K$  se denomina como el valor de holgura y comúnmente se escoge como la mitad de la diferencia entre el valor objetivo  $\mu_0$  y el valor fuera de control que se quiere medir  $\mu_1$ . Si el cambio a medir se expresa en desviación estándar, se tiene  $\mu_1 = \mu_0 + \delta \cdot \sigma$ . Esto implica que:

$$K = \frac{\delta}{2} \cdot \sigma = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2}$$

Para el CUSUM tabular también es necesario definir los límites de control, que están determinados por el valor de  $H$ .

#### 2.4.4.1. Diseño de CUSUM Tabular

Para diseñar el CUSUM Tabular, es necesario definir el valor de referencia  $K$  y el intervalo e decisión  $H$ . Usualmente se recomienda que estos parámetros se seleccionen para tener un buen ARL (sobre 370).

Si se define  $H=h \cdot \sigma$  y  $K=k \cdot \sigma$ , donde  $\sigma$  es la desviación estándar del proceso (si tamaño de subgrupo es  $n>1$ , se utiliza  $\bar{\sigma}=\sigma/\sqrt{n}$ ). Valores de  $h=5$  y  $k=0,5$ , dan buenas propiedades de ARL frente a desviaciones de  $1\sigma$  en la media del proceso (Montgomery, 2009).

En la tabla siguiente se puede ver el desempeño del ARL en las cartas CUSUM, con los parámetros de  $h$  y  $k$  indicados (Hanif, Hussain, Jamal, & Amir, 2012).

Desvío en la media (múltiplos de $\sigma$ )	$h=4$	$h=5$	Carta de Control de Shewhart
0	168	465	370,4
0,25	74,2	139	281,1
0,5	26,6	38	155,2
0,75	13,3	17	81,2
1	8,38	10,4	43,9
1,5	4,75	5,75	15
2	3,34	4,01	6,3
2,5	2,62	3,11	3,2
3	2,19	2,57	2
4	1,71	2,01	1,2

Tabla 1: Desempeño de ARL con  $k=0,5$  y  $h= 4$  o  $h=5$ .

Notar un desvío de  $1\sigma$  puede ser detectado con 8,38 muestras para  $h=4$  y con 10,4 muestras para  $h=5$  en el caso de CUSUM. Si se compara esto con las cartas de Shewhart, éstas necesitan 43,9 muestras para poder detectar este desvío (Montgomery, 2009). Esto verifica que CUSUM puede detectar más rápidamente pequeños desvíos en comparación con las cartas de Shewhart. Sin embargo, para desvíos mayores a  $2,5\sigma$ , las cartas de Shewhart presentan un mejor desempeño como se muestra en la tabla 1.

Es muy útil presentar un gráfico del CUSUM Tabular. Para esto, es más simple visualmente tener las desviaciones positivas sobre la línea cero y las desviaciones negativas bajo esta línea. El programa Minitab grafica las desviaciones negativas bajo la línea media (figura 4) y realiza el cálculo de acuerdo a lo siguiente:

$$C^- = \text{Mín} (0, x_i - \mu_0 + k + C_{i-1}^-)$$

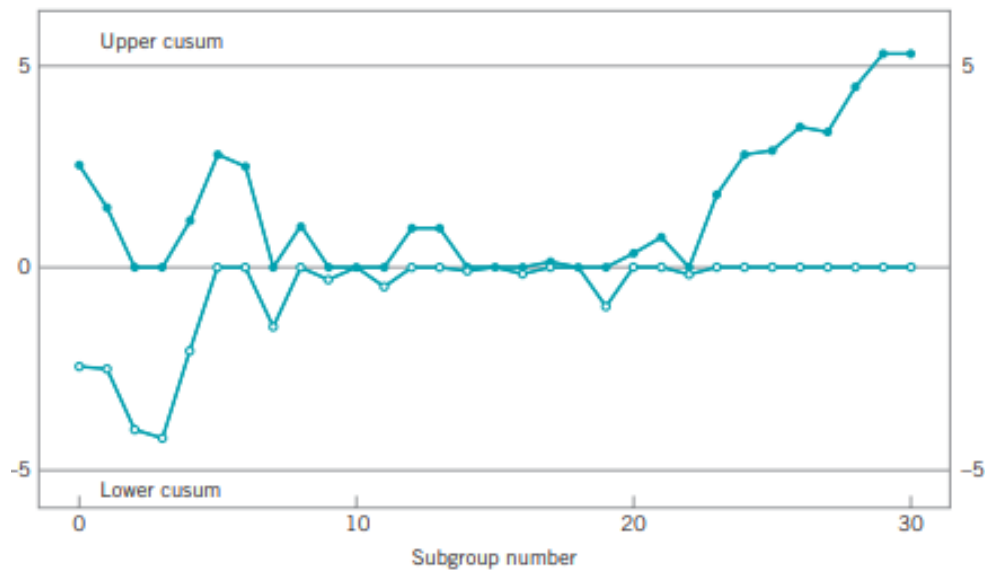


Figura 6: Ejemplo Gráfica CUSUM Tabular según Minitab (Montgomery, 2009).

Existen una serie de problemas “indeseados” al aplicar las cartas CUSUM, y en general cualquier método de control estadístico. Un problema importante es la aparición de valores discordante o aberrante dentro de la serie de resultados. Un valor discordante encontrado en una serie de valores no refleja un desvío del sistema, sino que, por el contrario, debe ser excluido del tratamiento estadístico del conjunto de resultados para no conducir a decisiones incorrectas por parte del analista.

Convencionalmente, los valores individuales que se aparten más de 3 desviaciones estándar respecto al valor de referencia se consideran “aberrantes”, y no deben ser considerados en el análisis estadístico. De todos modos, la aparición de valores de este tipo es motivo suficiente para evaluar las causas que los originaron (Instituto del Cemento Portland Argentino, 2015).

### 2.4.5. Gráficos de Control EWMA

Los gráficos de control EWMA o promedios móviles exponencialmente ponderados, son gráficos utilizados para llevar a cabo el control estadístico de un proceso.

Fueron introducidas por Roberts (Roberts, 1959) como una alternativa a los gráficos de Shewhart en la detección de desviaciones pequeñas. El gráfico EWMA, al igual que CUSUM tiene información actual y del pasado dándole mayor ponderación a la información actual, por lo que es más eficiente en la detección de cambios pequeños.

#### 2.4.5.1. Ecuaciones de la gráfica EWMA

El valor de cada punto se define como:

$$Z_i = \lambda * X_i + (1 - \lambda) * Z_{i-1}$$

El valor inicial  $Z_0$  se toma como valor objetivo del proceso,  $\mu_0$ .

La Línea Central y los límites de control superior e inferior de la carta EWMA están dados por:

$$LCS = \mu + L^* \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\lambda - (1 - \lambda)^{2i}}{2 - \lambda}}$$

$$\text{Línea Central} = \mu_0$$

$$LCI = \mu - L^* \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\lambda - (1 - \lambda)^{2i}}{2 - \lambda}}$$

Dónde:

L: Parámetro que depende del  $ARL_0$  deseado

$\sigma$ : Desviación estándar del proceso

n: Tamaño del subgrupo

$\lambda$ : Valor entre 0 y 1.

$\mu_0$ : Valor Objetivo del proceso

Según lo establecido por Montgomery (Montgomery, 2009)  $\lambda$  tiene un buen desempeño en el intervalo  $[0,05 - 0,25]$ , por lo tanto una buena regla es utilizar valores de  $\lambda$  pequeños. En efecto, a menor valor de  $\lambda$ , se tiene un mayor peso de los datos pasados y menor peso del valor presente.

Para un valor de  $L=3$ , se puede trabajar con  $\lambda$  más grandes. Pero si  $\lambda$  está en el rango  $(0-0,1]$ , es recomendable reducir el ancho de los límites de control utilizando valores de  $L$  entre 2,6 y 2,8.

Esto también se ve reflejado en los estudios realizados por Lucas y Sacucci (Lucas & Saccucci, 1990) en donde se obtienen tablas de ARL para distintos valores de  $\lambda$  y  $L$ .

Desvío en la media [Múltiplo de $\sigma$ ]	L=3,054	2,998	2,962	2,814	2,615
	$\lambda = 0,40$	0,25	0,2	0,1	0,05
0,00	500	500	500	500	500
0,25	224	170	150	106	84,1
0,50	71,2	48,2	41,8	31,3	28,8
0,75	28,4	20,1	18,2	15,9	16,4
1,00	14,3	11,1	10,5	10,3	11,4
1,50	5,9	5,5	5,5	6,1	7,1
2,00	3,5	3,6	3,7	4,4	5,2
2,50	2,5	2,7	2,9	3,4	4,2
3,00	2	2,3	2,4	2,9	3,5
4,00	1,4	1,7	1,9	2,2	2,7

Tabla 2: ARL para distintos parámetros de Gráficos EWMA (Lucas & Saccucci, 1990).

De acuerdo a la tabla 2, si se utilizan valores de  $\lambda=0,1$  y  $L=2,7$ , se espera que para detectar una desviación de  $1\sigma$ , se tenga un ARL de 10,3 muestras. Esto es aproximadamente equivalente a usar los parámetros  $h=5$  y  $k=0,5$  en CUSUM (ARL=10,4).

Para efectos del trabajo realizado, se utiliza  $\lambda=0,1$  y  $L=2,7$ , pues presenta un mejor desempeño en la detección de cambios pequeños. En la detección de desvíos superiores a  $2,5\sigma$ , tiene un comportamiento similar a CUSUM, aunque levemente menos eficiente.

Finalmente, las cartas de Shewhart siguen siendo mejores en detectar cambios más grandes en la media del proceso a analizar.

Gráficamente el modelo EWMA se puede apreciar en la figura 7:

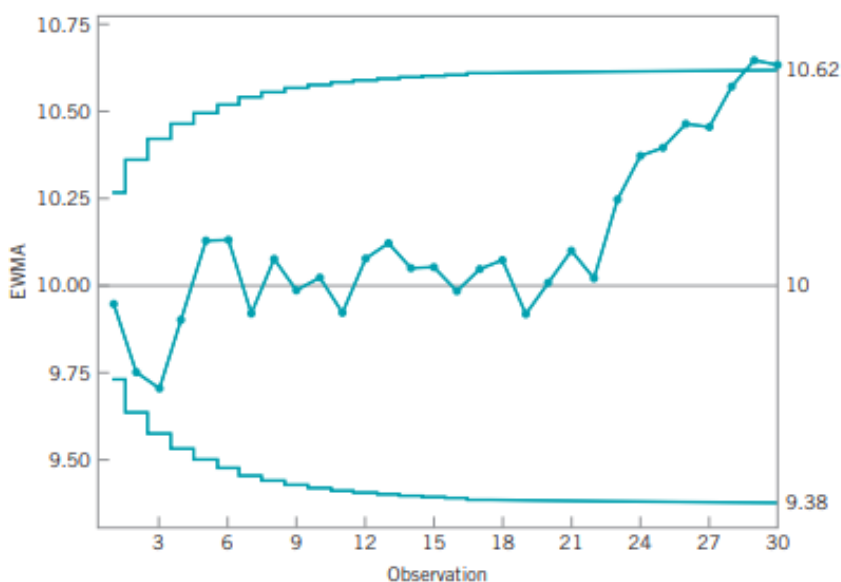


Figura 7: Ejemplo modelo EWMA (Montgomery, 2009).

En el ejemplo se observan la Línea Central y ambos límites de control. En los puntos 29 y 30 el proceso sale de control de acuerdo a lo criterios de EWMA, quedando sobre el límite de control superior. Si bien el proceso se encuentra “fuera de control estadístico” en los puntos 29 y 30, los desvíos de la media comienzan a generarse en el punto 24 en donde existe un “aviso” de que el proceso pueda entrar en estado “fuera de control estadístico”.

#### 2.4.6. Estadística del hormigón

Los resultados de resistencia a compresión de probetas de hormigón, tienden a seguir una distribución del tipo normal, es decir, el comportamiento de las resistencias está determinado por el promedio de los datos y su desviación estándar ( $k\sigma$ ), la cual es una medida de la dispersión de los valores individuales respecto al promedio. Una alta desviación estándar indica que los resultados están alejados del valor promedio, ya sea sobre o bajo él. Por otra parte, una desviación estándar baja, indica que la dispersión de los valores es baja, ya sea por encima o por debajo del valor promedio.

El área bajo la curva de distribución normal entre dos valores de  $x$ , representa la probabilidad de que un valor se encuentre dentro de ese rango de valores. El punto denominado “Extremo” determina el área bajo la distribución normal entre valores, como por ejemplo la resistencia a compresión, donde la frecuencia es efectivamente cero. En el caso de la resistencia a compresión el extremo más bajo o los valores más bajos son importantes (Gibb & Harrison, 2010).

Otros conceptos importantes del hormigón tienen que ver con la característica principal que mide el desempeño de los hormigones: la resistencia.

Según la Nch170, se definen los siguientes conceptos:

- **Resistencia especificada (Specified Characteristic Strength):** Es la resistencia establecida en el proyecto.
- **Resistencia Mecánica:** Tensión máxima que soporta el hormigón (de compresión, de tracción, indirecta por flexión, otros).
- **Resistencia Media Requerida para Dosificación (Target Mean Strength):** Valor medio de la resistencia mecánica que se necesita alcanzar para satisfacer la resistencia especificada.

En la figura 7 se muestra la distribución normal de las resistencias de hormigón.

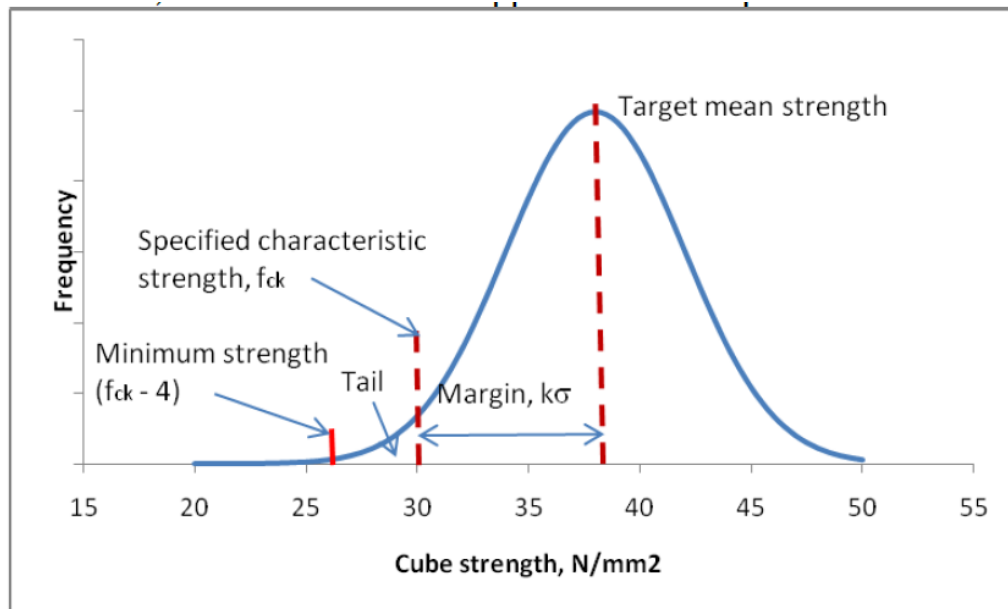


Figura 8: Ilustración de la distribución de resistencias del hormigón (Ian Gibb and Tom Harrison, 2008).

La resistencia media requerida para dosificación, según la Nch1998 es:

$$f_r = f'_c + s \cdot t$$

Donde  $t$  es un factor estadístico que depende de la confiabilidad o fracción defectuosa del hormigón estudiado. La fracción defectuosa del hormigón corresponde a la fracción del total de resistencias de un hormigón, expresado en porcentaje con resistencias menores a un valor especificado. Este valor generalmente corresponde a un 10% o 20%.

La tabla siguiente de la NCh1998Of.89 muestra los valores del factor  $t$  según cantidad de muestras y fracción defectuosa del hormigón.

Número de Muestras	Fracción Defectuosa [%]		
	5	10	20
3	2,920	1,886	1,061
4	2,353	1,638	0,978
5	2,132	1,533	0,941
6	2,015	1,476	0,920
7	1,943	1,440	0,906
8	1,895	1,415	0,896
9	1,860	1,397	0,889
10	1,833	1,383	0,883
11	1,812	1,372	0,879
12	1,796	1,363	0,876
13	1,782	1,356	0,873
14	1,771	1,350	0,870
15	1,761	1,345	0,868
16	1,753	1,341	0,866
17	1,746	1,337	0,865
18	1,740	1,333	0,863
19	1,734	1,330	0,862
20	1,729	1,328	0,861
21	1,725	1,325	0,860
22	1,721	1,323	0,859
23	1,717	1,321	0,858
24	1,714	1,319	0,858
25	1,711	1,318	0,857
26	1,708	1,316	0,856
27	1,706	1,315	0,856
28	1,703	1,314	0,855
29	1,701	1,313	0,855
<b>30 o más</b>	1,645	1,282	0,842

Tabla 3: Factor estadístico t en función del número de muestras (NCh1998Of.89)

La cantidad de muestras consideradas para los hormigones considerados en el estudio superan las 30 muestras, por lo tanto el factor t utilizado en todos los casos es 1,282.

Por otra parte, y para calcular la resistencia objetivo, es muy importante conocer la desviación estándar del proceso. Cuando la cantidad de muestras n es mayor a 35, una buena estimación de la desviación estándar del proceso se puede realizar con la fórmula de desviación estándar típica (Gibb & Harrison, 2010).

$$s = \sum_i \left( \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \right)$$



Con  $\bar{x}$  el promedio de las muestras,  $x_i$  el valor de la muestra  $i$  y  $n$ , la cantidad de muestras consideradas.

#### 2.4.6.2. Estándares de Control

Uno de los propósitos primarios de conocer el comportamiento estadístico del hormigón, es identificar fuentes de variabilidad. Esta información puede ser utilizada para determinar apropiadamente los pasos para mantener el control de la calidad del hormigón. Para determinar el estándar de control de calidad, se puede utilizar la variación global del proceso como parámetro o la variación entre lotes de hormigón. Para efectos de esta investigación, se utilizará la desviación general del proceso ya que se cuenta con datos históricos para plantas y hormigones.

La tabla siguiente es una adaptación de la tabla 4.3 de la ACI214R-11 que muestra los estándares de control para hormigones con  $f_c' \leq 35$  [Mpa]. Se consideran los estándares de calidad para pruebas generales de construcción.

<b>Variación General</b>					
<b>Clase de operación</b>	<b>Desviación Estándar para distintos estándares de control [kgf/cm<sup>2</sup>]</b>				
	<b>Excelente</b>	<b>Muy bueno</b>	<b>Bueno</b>	<b>Justo</b>	<b>Pobre</b>
<b>Pruebas generales de construcción</b>	Bajo 27,44	27,44 a 33,32	33,32 a 40,18	40,18 a 47,04	Sobre 47,04

Tabla 4: Estándares de control para  $f_c' \leq 35$  Mpa (350 kgf/cm<sup>2</sup>), adaptado de ACI214R-11.

## 3. Resultados y análisis

En esta sección, se presentan los resultados de la aplicación de las herramientas de control gráfico a una serie de hormigones y plantas de hormigón premezclado de la Región Metropolitana y Viña Del Mar.

Posterior a la presentación de los resultados, se realiza un análisis de los métodos y los resultados presentados para hacer la evaluación de la calidad de los hormigones seleccionados.

### 3.1. Serie de Datos Analizados

Para poder probar y analizar los métodos Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA, fueron escogidos 4 hormigones distintos, H20, H25, H30 y H35, producidos en 7 plantas hormigoneras distintas. Para resguardar la privacidad de los datos, sólo se mencionarán la nomenclatura de los hormigones. Las plantas se denominarán: Plantas A1, A2, A3, B1, B2, C1 y D1.

Como se tienen suficientes datos de los hormigones (enero de 2016 hasta marzo de 2019), el promedio y la desviación estándar se calculan en base a los datos de resistencias obtenidos.

Para algunos hormigones considerados, se tienen datos de resistencias que no siguen la tendencia de las resistencias o que son discordantes para el comportamiento del hormigón. Como se vio en la revisión bibliográfica, este tipo de datos pueden generar error en la interpretación de las cartas de control con posibles malas decisiones a partir de estos datos. Si bien es importante conocer las causas que originan estas desviaciones que no siguen la tendencia del hormigón, no se deben considerar en el análisis.

Considerando lo mencionado anteriormente, se tiene la tabla 5, que presenta un resumen de los datos utilizados (en paréntesis los datos obtenidos luego de depurar las resistencias, eliminando las resistencias discordantes).

Además, en la tabla 6 se muestran los períodos considerados para cada hormigón. Las fechas indicadas en la tabla corresponden a fechas de confección de las probetas cilíndricas de hormigón. También se muestra la frecuencia de muestreo en el período considerado. De la tabla, se ve que en general las frecuencias de muestreo más bajas, corresponden a las plantas C1 y D1 de Viña Del Mar

Planta	Grado	Nº Muestras	Promedio [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Resistencia Requerida [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Desviación Estándar [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Zona
<b>A1</b>	HB20.0(90)20-10	100	238,7	245,0	35,2	RM
	HB25.0(90)20-10	122 <b>(121)</b>	282,8 <b>(281,8)</b>	285,7 <b>(282,6)</b>	27,9 <b>(25,5)</b>	
	HB30.0(90)20-12	180	322,0	334,5	27,0	
	HB35.0(90)20-10	59	385,2	383,2	26,0	
<b>A2</b>	HB20.0(90)20-10	52 <b>(49)</b>	243,9 <b>(236,6)</b>	250,2 <b>(233,1)</b>	39,3 <b>(25,9)</b>	RM
	HB25.0(90)20-10	150 <b>(147)</b>	291,9 <b>(289,6)</b>	291,4 <b>(285,6)</b>	32,4 <b>(27,8)</b>	
	HB30.0(90)20-12	129	337,0	333,9	26,5	
	HB35.0(90)20-10	148	405,8	394,8	35,0	
<b>A3</b>	HB20.0(90)20-10	129	229,3	232,0	25,0	RM
	HB25.0(90)20-10	90	290,6	284,4	26,9	
	HB30.0(90)20-12	107	324,9	332,1	25,1	
	HB35.0(90)20-10	53	381,1	390,3	31,5	
<b>B1</b>	HB20.0(90)20-10	20	317,2	235,7	26,9	RM
	HB25.0(90)20-10	90	317,9	286,9	28,8	
	HB30.0(90)20-10	78	338,9	345,3	35,3	
	HB35.0(90)20-10	67 <b>(66)</b>	393,9 <b>(392,0)</b>	393,5 <b>(388,5)</b>	33,9 <b>(30,0)</b>	
<b>B2</b>	HB20.0(90)20-10	61	325,0	233,0	25,7	RM
	HB25.0(90)20-10	131	332,7	291,0	32,0	
	HB30.0(90)20-10	86	356,4	339,5	30,8	
	HB35.0(90)20-10	97	411,1	407,2	44,6	
<b>C1</b>	HB20.0(90)20-10	47	251,5	260,7	47,4	Viña
	HB25.0(90)20-12	198	309,4	310,2	47,0	
	HB30.0(90)20-10	198	367,6	363,3	49,4	
	HB35.0(90)20-10	65	404,1	410,4	47,1	
<b>D1</b>	HN20.0(90)20-08	27	314,9	247,7	36,3	Viña
	HB25.0(90)20-10	200	287,3	280,1	23,5	
	HB30.0(90)20-10	200	345,4	334,6	27,0	
	HB35.0(90)20-10	200	396,1	384,3	26,7	

Tabla 5: Plantas y hormigones utilizados en el análisis.

Planta	Hormigón	Nº Muestras	Período de Confección de muestras	Días	Muestras/Día
A1	HB20.0(90)20-10	100	17/12/2015 - 11/08/2017	603	0,17
	HB25.0(90)20-10	121	17/12/2015 - 11/08/2017	603	0,20
	HB30.0(90)20-12	180	10/11/2016 - 16/02/2018	463	0,39
	HB35.0(90)20-10	59	05/04/2016 - 01/02/2019	1032	0,06
A2	HB20.0(90)20-10	49	17/12/2015 - 11/08/2017	603	0,08
	HB25.0(90)20-10	147	17/12/2015 - 11/08/2017	603	0,24
	HB30.0(90)20-12	129	23/08/2017 - 07/12/2018	471	0,27
	HB35.0(90)20-10	148	17/12/2015 - 11/02/2019	1152	0,13
A3	HB20.0(90)20-10	129	04/12/2015 - 05/08/2016	245	0,53
	HB25.0(90)20-10	90	09/12/2015 - 05/12/2017	727	0,12
	HB30.0(90)20-12	107	17/12/2015 - 11/08/2017	603	0,18
	HB35.0(90)20-10	53	21/04/2016 - 01/03/2019	1044	0,05
B1	HB20.0(90)20-10	20	22/09/2018 - 01/03/2019	160	0,13
	HB25.0(90)20-10	90	12/12/2017 - 10/01/2019	394	0,23
	HB30.0(90)20-10	78	12/12/2017 - 10/01/2019	394	0,20
	HB35.0(90)20-10	66	12/12/2017 - 10/01/2019	394	0,17
B2	HB20.0(90)20-10	61	25/09/2018 - 01/03/2019	157	0,39
	HB25.0(90)20-10	131	04/12/2017 - 27/02/2019	450	0,29
	HB30.0(90)20-10	86	12/12/2017 - 10/01/2019	394	0,22
	HB35.0(90)20-10	97	12/12/2017 - 01/03/2019	444	0,22
C1	HB20.0(90)20-10	47	04/12/2015 - 26/02/2019	1180	0,04
	HB25.0(90)20-12	198	04/12/2015 - 11/02/2019	1165	0,17
	HB30.0(90)20-10	198	04/12/2015 - 26/02/2019	1180	0,17
	HB35.0(90)20-10	65	28/12/2015 - 05/12/2018	1073	0,06
D1	HN20.0(90)20-08	27	04/12/2015 - 18/02/2019	1172	0,02
	HB25.0(90)20-10	200	04/12/2015 - 28/02/2019	1182	0,17
	HB30.0(90)20-10	200	22/12/2015 - 27/02/2019	1163	0,17
	HB35.0(90)20-10	200	17/12/2015 - 02/03/2019	1171	0,17

Tabla 6: Períodos de muestras consideradas (fechas de confección de muestras).

### 3.1.1. Pre clasificación de hormigones.

Por otra parte, de acuerdo a la desviación estándar de cada planta, y al analizar sólo hormigones con  $f_c'$  inferior o igual a 35 Mpa (o 350 kgf/cm<sup>2</sup>), se tiene la clasificación de la tabla 7 (entre paréntesis los datos obtenidos luego de depurar las resistencias).

Planta	Grado	Desviación Estándar [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Estándar de Control
A1	HB20.0(90)20-10	35,2	Bueno
	HB25.0(90)20-10	27,9 <b>(25,5)</b>	Muy Bueno <b>(Excelente)</b>
	HB30.0(90)20-12	27,0	Excelente
	HB35.0(90)20-10	26,0	Excelente
A2	HB20.0(90)20-10	39,3 <b>(25,9)</b>	Bueno <b>(Excelente)</b>
	HB25.0(90)20-10	32,4 <b>(27,8)</b>	Muy Bueno <b>(Muy Bueno)</b>
	HB30.0(90)20-12	26,5	Excelente
	HB35.0(90)20-10	35,0	Bueno
A3	HB20.0(90)20-10	25,0	Excelente
	HB25.0(90)20-10	26,9	Excelente
	HB30.0(90)20-12	25,1	Excelente
	HB35.0(90)20-10	31,5	Muy Bueno
B1	HB20.0(90)20-10	26,9	Excelente
	HB25.0(90)20-10	28,8	Muy Bueno
	HB30.0(90)20-10	35,3	Bueno
	HB35.0(90)20-10	33,9 <b>(30,0)</b>	Bueno <b>(Muy Bueno)</b>
B2	HB20.0(90)20-10	25,7	Excelente
	HB25.0(90)20-10	32,0	Muy Bueno
	HB30.0(90)20-10	30,8	Muy Bueno
	HB35.0(90)20-10	44,6	Pobre
C1	HB20.0(90)20-10	47,4	Pobre
	HB25.0(90)20-12	47,0	Justo
	HB30.0(90)20-10	49,4	Pobre
	HB35.0(90)20-10	47,1	Pobre
D1	HN20.0(90)20-08	36,3	Bueno
	HB25.0(90)20-10	23,5	Excelente
	HB30.0(90)20-10	27,0	Excelente
	HB35.0(90)20-10	26,7	Excelente

Tabla 7: Clasificación de hormigones según estándares de control (ACI214R-11).

A partir de la tabla 6, se realiza el gráfico 1, en donde se aprecia visualmente las distintas desviaciones estándar para cada uno de los 28 hormigones y en que estándar de control se sitúan los hormigones para cada planta hormigonera analizada.

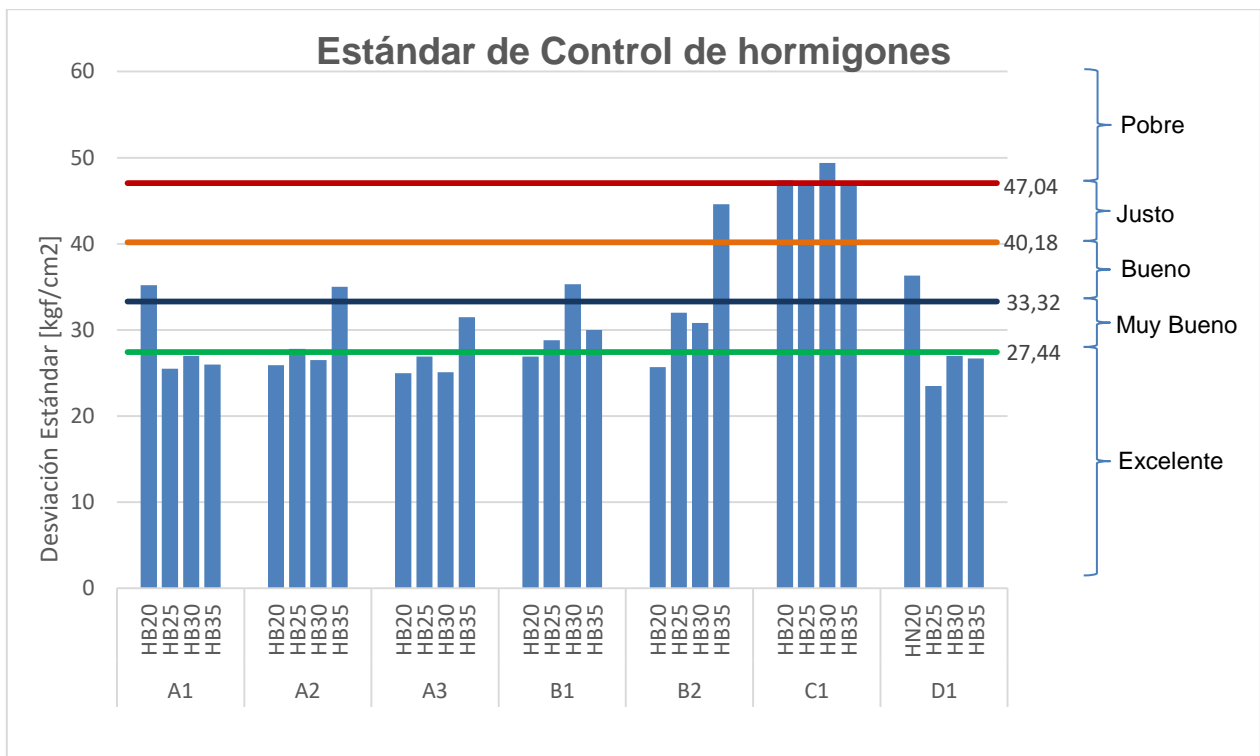


Gráfico 1: Estándar de control de hormigones analizados.

En el gráfico 1 se observan los distintos estándares de control para los hormigones analizados, donde la mayoría tiene estándares de “Bueno” a “Excelente”. Por otra parte, se muestra que los hormigones de la planta C1 son los que tienen las mayores desviaciones estándar y estándares de control “Justo” y “Pobre”.

### 3.1.2. Pruebas consideradas en el análisis gráfico

Se consideran distintas pruebas o criterios para determinar si un punto o una tendencia de puntos se encuentran fuera de control estadístico en cada uno de los métodos.

Para el caso de las cartas de Shewhart, se consideran las siguientes pruebas dadas por el programa computacional Minitab:

- Prueba 1: Un punto fuera más allá de 3 desviaciones estándar.
- Prueba 3: Seis o más puntos consecutivos, todos ascendentes o todos descendentes.
- Prueba 2: Ocho puntos consecutivos sobre o bajo la línea central.
- Prueba 5: Dos de tres puntos consecutivos más allá de 2 desviaciones estándar de la Línea Central (en un mismo lado de la Línea Central).

Para los casos de CUSUM y EWMA, se considera que el proceso está fuera de control si algún punto cae fuera de los límites de control superior e inferior determinados en la revisión bibliográfica.

## 3.2. Resultados gráficos por planta

La presentación de los resultados se realizará de acuerdo a la estructura siguiente:

- Gráficos por planta hormigonera para cada uno de sus 4 hormigones analizados.
- Cada gráfico obtenido consta de los resultados al aplicar los 3 métodos de control considerados en esta investigación. En orden descendente se presentan las gráficas Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA.

Posteriormente, para cada gráfico se realiza:

- Una descripción detallada de las alertas entregadas por la carta Shewhart.
- Una descripción detallada de las alertas entregadas por la carta CUSUM.
- Una descripción detallada de las alertas entregadas por la carta EWMA.
- Una síntesis en la que el lector encontrará un análisis comparativo de las 3 cartas de control de acuerdo a sus alertas, comentarios sobre las resistencias de las muestras en análisis y un análisis de coherencia entre el estándar de control del hormigón (preclasificación según ACI214R-11) y la cantidad de alertas que entregan los métodos de control. En los hormigones donde resistencias discordantes fueron eliminadas, se incluye en la síntesis un análisis de la influencia de estos datos en el comportamiento de las cartas de control.

### 3.2.1. Resultados Hormigones Planta A1

A continuación se presentan los resultados obtenidos al aplicar los métodos de control a los hormigones HB20, HB25, HB30 y HB35 de la Planta hormigonera A1.

3.2.1.1. Resultados HB20.0(90)20-10

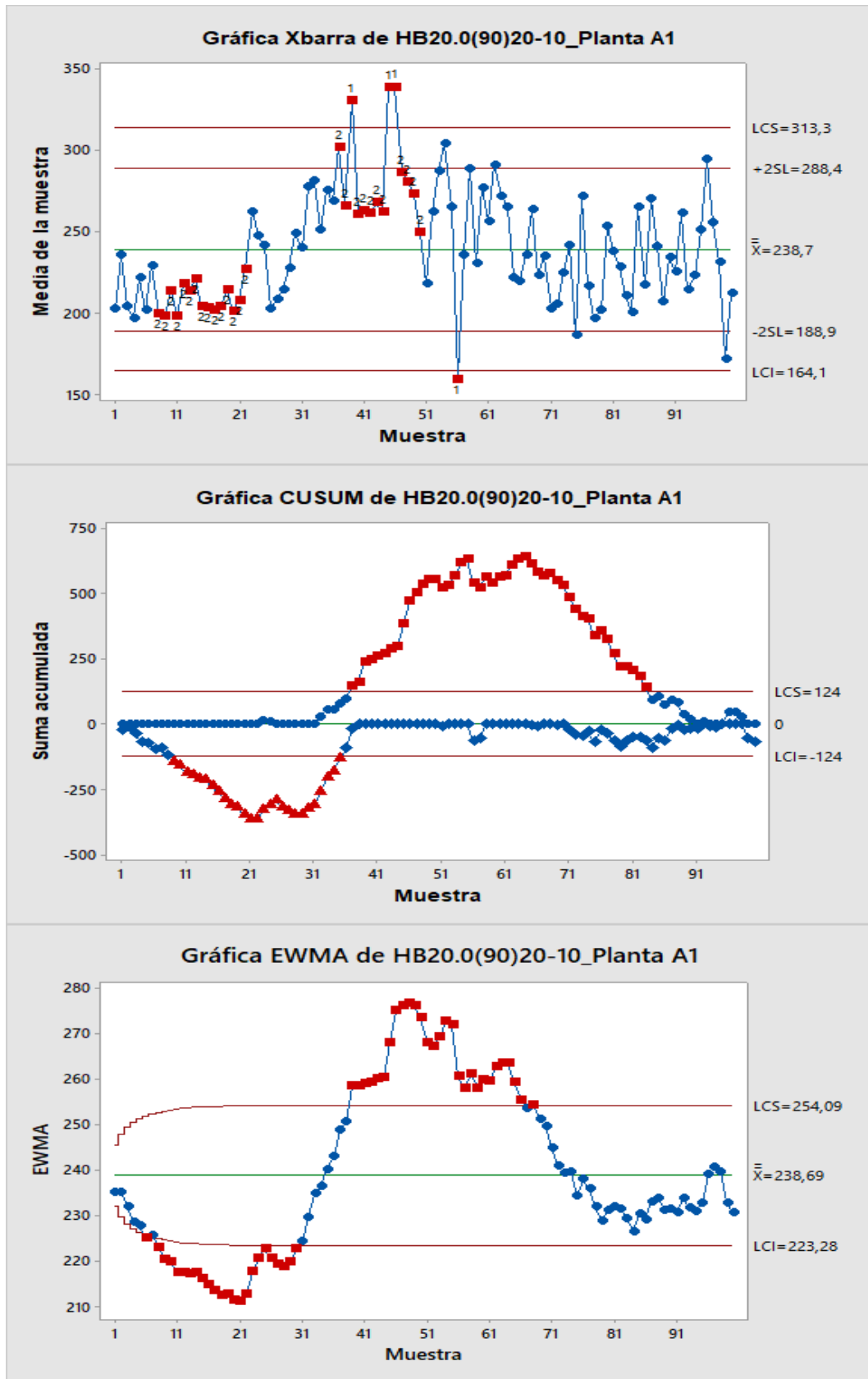


Gráfico 2: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta A1.



### 3.2.1.1.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 2, se observa:

- Los puntos 39, 45, 46 y 56 están más allá de 3 desviaciones estándar de la Línea Central, lo que implica que el proceso se encuentra fuera de control estadístico en esos puntos.
- Existen dos períodos del proceso en que más de ocho puntos consecutivos bajo la media (período 1 desde la muestra 1 a la muestra 22) y posteriormente existen 14 puntos consecutivos sobre la media del proceso (período 2, desde la muestra 30 hasta la muestra 50). Este cambio de la media no es aleatorio, por ende se asume que el proceso está fuera de control estadístico en ambos períodos. A nivel del proceso de hormigón, esto se explica por cambios en dosificaciones del producto, puesto que inicialmente en el período 1, el proceso está en una media de 209,5, bajo la media del proceso, y muy por debajo de la resistencia requerida (245,0). Luego de este período, existe una mejora de las resistencias del proceso, trabajando en torno a una media de 278,2, sobre la resistencia requerida y la media general del proceso.
- El proceso también falla en los puntos 39 y 46, ya que son períodos en que las resistencias de las muestras están más allá de dos desviaciones estándar.
- Finalmente, a partir de la muestra 61 aproximadamente, existe aleatoriedad en el proceso, sin existir fallas en ningunas de las pruebas, por lo tanto el proceso está bajo control estadístico.

### 3.2.1.1.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 2, se observa:

- Constantes desviaciones en torno a la media del proceso.
- Hasta el punto 8 graficado, el proceso se encuentra bajo control estadístico.
- A partir del punto 9, el proceso se encuentra bajo el límite de control  $H^-$  y las resistencias tienen desviaciones negativas constantes hasta el punto 22. En todo este período las resistencias son menores a la resistencia promedio de 238,7 kgf/cm<sup>2</sup>.
- A partir del punto 22 hasta el 26 aproximadamente, se observa una mejora en el proceso que tiene desviaciones positivas respecto a la media, pero nuevamente se generan desviaciones negativas hasta el punto 28. En este período se observa fluctuación en torno a una desviación negativa, que implica que el proceso está funcionando bajo la media, lo que se correlaciona con el gráfico Shewhart.
- A partir de la muestra 29 y hasta la muestra 35, se generan desviaciones positivas constantes respecto a la media y el proceso vuelve a estar en control estadístico en la muestra 36.
- Desde el punto 37 hasta el 83, el proceso excede el límite de control  $H^+$ , por tanto el proceso vuelve a estar fuera de control estadístico. Se observan pequeñas fluctuaciones desde la muestra 51 hasta la 68, pero en torno a un valor por sobre la media del proceso.

- Desde la muestra 69 se generan desviaciones negativas y el proceso vuelve a estar en control estadístico en la muestra 84, donde se observa que los desvíos fluctúan aleatoriamente en torno a 0 hasta la muestra 100.

#### 3.2.1.1.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 2, se observa:

- El proceso se encuentra en control estadístico hasta el punto 5.
- A partir de la muestra 6, el proceso se encuentra fuera de control teniendo una tendencia de desviaciones negativas respecto a la media.
- A partir de la muestra 22 el proceso presenta una tendencia positiva, pero decae nuevamente a partir del punto 25.
- Hasta la muestra 30 el proceso sigue fuera de control estadístico y con una media ponderada que oscila en torno a los 217 kgf/cm<sup>2</sup>, bajo la media de 238,7 y bajo la resistencia requerida de 245,0 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Entre los puntos 31 y 38 el proceso está bajo control estadístico, pero con una clara tendencia positiva que supera los límites de control en la muestra 39. Se genera un comportamiento de la resistencia en torno a una media ponderada de 265 kgf/cm<sup>2</sup> aproximadamente, sobre la media del proceso y sobre la resistencia requerida.
- A partir de la muestra 65 el proceso presenta una tendencia a la baja y está en control estadístico a partir del punto 68. Finalmente el proceso se mantiene dentro de control estadístico, pero fluctuando en torno a una resistencia de 230 kgf/cm<sup>2</sup> que es bajo la media del proceso y bajo la resistencia requerida.

#### 3.2.1.1.4. Síntesis

Los 3 métodos muestran que el proceso está trabajando en torno a valores objetivos distintos, presentando claramente dos períodos. CUSUM y EWMA son más evidentes en evidenciar los períodos que Shewhart.

CUSUM y Shewhart dan aviso anticipado de las desviaciones respecto a CUSUM Para este hormigón, EWMA alerta en la muestra 6, Shewhart en la muestra 8 y CUSUM en la muestra 9. Por tanto EWMA es el método que permitiría tomar acciones correctivas más anticipadamente para eliminar las causas asignables presentes en el proceso y volverlo al estado de control estadístico.

Si bien el proceso de confección de este hormigón presenta una clasificación “Buena” de acuerdo a la desviación estándar de los datos, los métodos dan muchas alertas que indican que no está bajo control estadístico. Esto se debe a que es claro que en el período considerado se trabaja en torno a valores de medias distintos: Un primer período desde la muestra 1 a la 31 (media 209,5 aprox.) y un segundo período desde la muestra 32 hasta la 81 (media 278,2 aprox.).

3.2.1.2. Resultados HB25.0(90)20-10

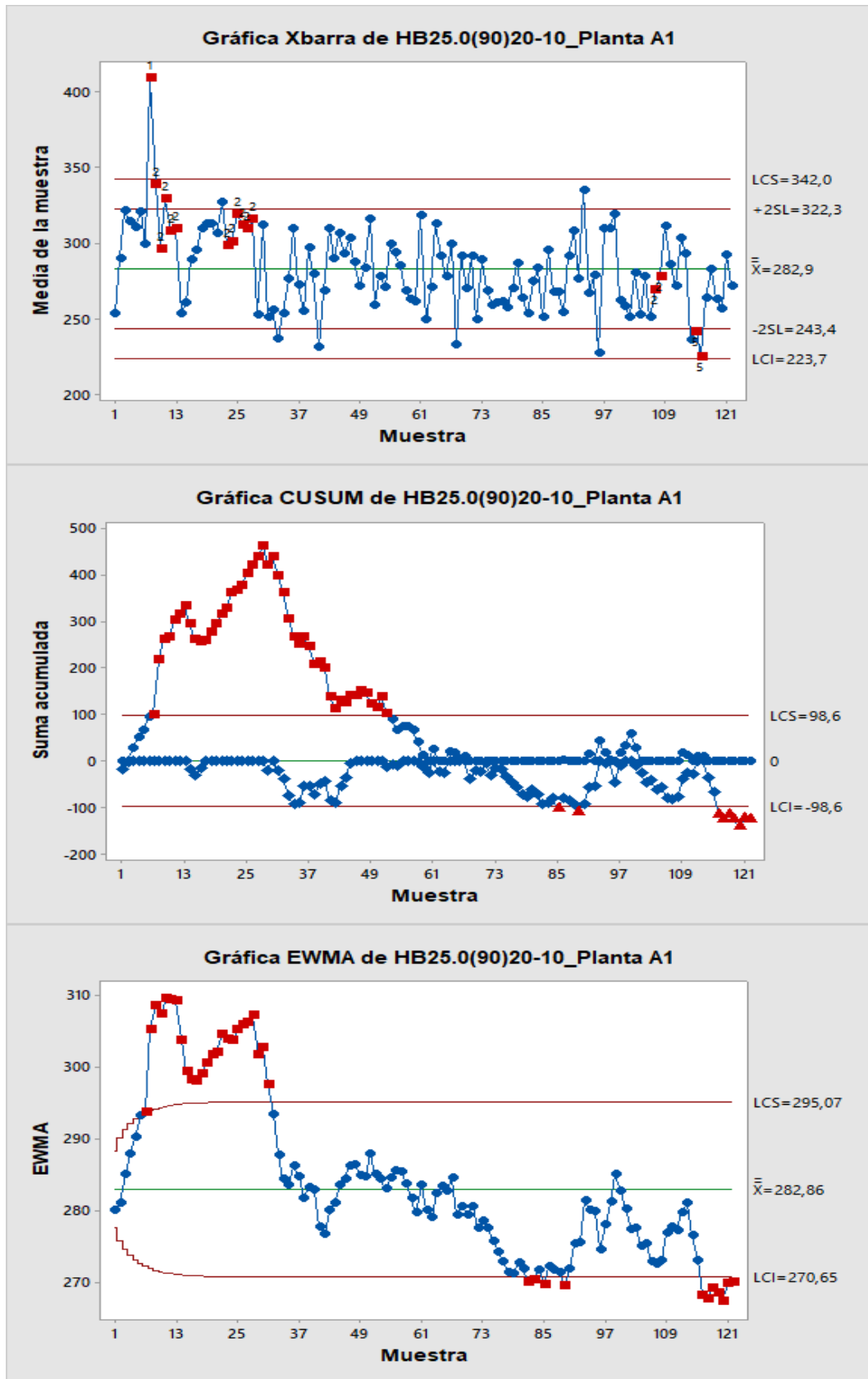


Gráfico 3: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta A1.

### 3.2.1.2.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 3, se observa:

- Sólo un punto está más allá de 3 desviaciones estándar, **muestra 8**. En este punto el proceso se encuentra fuera de control.
- Luego, existen 3 períodos en que existen 8 o más muestras consecutivas sobre o bajo la media del proceso: Período 1, desde la muestra 1 a la muestra 23 (sobre la media del proceso); período 2 desde la muestra 15 hasta la muestra 28 (sobre la media del proceso); y período 3, desde la muestra 99 a la 108 (bajo la media del proceso). En los períodos 1 y 2, se observa que la planta trabaja sobre la media general del proceso y sobre la resistencia requerida que es  $285,7 \text{ kgf/cm}^2$ . La planta en el período 3 trabajo bajo la media del proceso. En estos tres períodos la planta hormigonera funciona fuera de control estadístico.
- Luego existen dos series de dos muestras consecutivas más allá de 2 desviaciones estándar, muestras 9, 11 y muestras 115, 116. El proceso se encuentra fuera de control estadístico en estos puntos.
- Finalmente, aproximadamente desde la muestra 30 a la 100, la planta trabaja dentro de los parámetros de control, no presentando patrones que indiquen anomalías en el proceso, por tanto se encuentra en control estadístico en el período indicado.

### 3.2.1.2.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 3, se observa:

- Un comportamiento mucho más evidente de que el sistema está fuera de control estadístico. Esto se refleja en el desvío positivo desde el punto 7 hasta el punto 14, donde el proceso está fuera de control estadístico.
- Posteriormente, se generan fluctuaciones hasta el punto 52 en que el proceso continúa estando fuera de control estadístico.
- A partir del punto 53, el proceso se encuentra en bajo control estadístico y esta tendencia permanece hasta el final, exceptuando los puntos 85, 89 y desde el 116 hasta el 122.

### 3.2.1.2.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 3, se observa:

- La primera alerta también se genera en el punto 7. El proceso está fuera de control estadístico hasta el punto 31, fluctuando en este período en torno a una media aproximada de  $302 \text{ kgf/cm}^2$  que es superior a la media del proceso de  $286,9 \text{ kgf/cm}^2$  y a la resistencia media objetivo de  $285,2 \text{ kgf/cm}^2$ .
- Desde la muestra 32 y hasta el final, el proceso se mantiene en control estadístico, exceptuando los puntos 82, 83, 85 y 89 y el rango 117 a 122.

La carta de Shewhart no permite visualizar tan claramente esa tendencia a la baja desde la muestra 73, pero si muestra claramente el desvío excesivo de la resistencia de la muestra 8. Este punto se considera como “aberrante” ya que escapa de la tendencia global de la planta y por lo tanto es necesario eliminarlo del análisis, pero si averiguar las causas del desvío.

En el gráfico 4 se presentan las cartas de control gráfico aplicadas sobre los datos depurados.

Al eliminar el punto fuera de tendencia de los datos, se obtiene un análisis más representativo de la calidad del proceso de la planta. La media del proceso ahora es 281,82 kgf/cm<sup>2</sup> y la desviación estándar también disminuye quedando en 25,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Con esto, se modifican las 3 cartas, haciendo más exigentes los límites de control y dando otras alertas, como se observa en el gráfico 4.

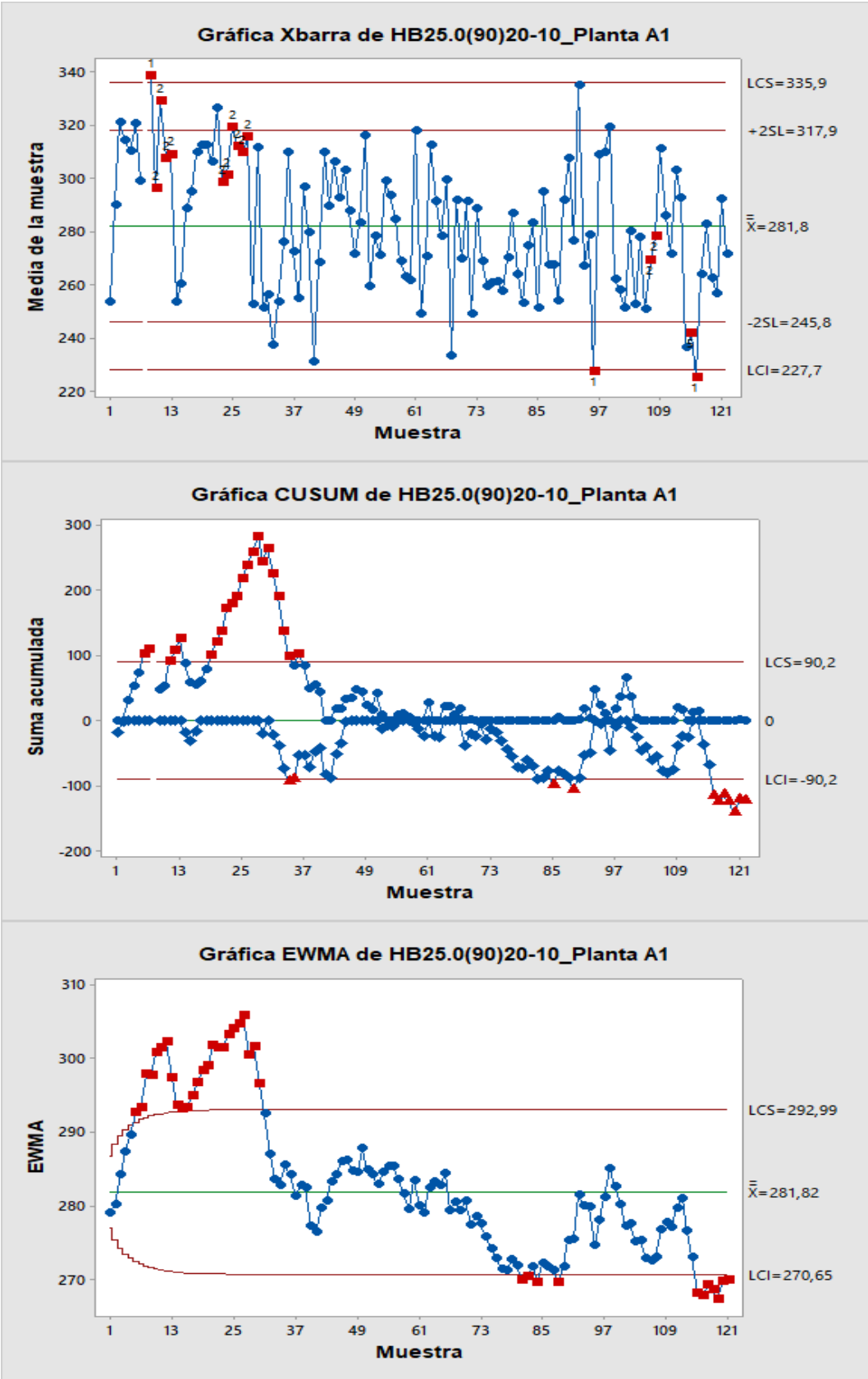


Gráfico 4: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta A1, datos depurados.

#### 3.2.1.2.4. Síntesis

Si bien la planta presenta múltiples alertas, el proceso se encuentra fuera de control mayoritariamente en desviaciones positivas, lo que significa que el hormigón cumple con la resistencia especificada a 28 días. El problema se genera hacia el final del período considerado, pues la resistencia del hormigón comienza a disminuir a partir de la muestra 73, llegando a encontrarse el proceso fuera de control estadístico en dos períodos, según lo que se muestra para CUSUM y EWMA en el gráfico 3 .

Al hacer la comparación entre los métodos antes de depurar y después de depurar los datos, se observa que si bien el proceso sigue estando fuera de control estadístico en los mismos períodos, las desviaciones son menores en magnitud para los métodos, especialmente CUSUM que para el caso inicial alcanza desviaciones de casi 500 kgf/cm<sup>2</sup> y en el caso depurado alcanza desviaciones cercanas a los 300 kgf/cm<sup>2</sup>.

Los puntos “aberrantes” dentro de un gráfico de control pueden conducir a realizar correcciones equivocadas dentro del proceso, por eso es bueno conocer el origen de estas desviaciones (las causas asignables presentes) y determinar si es necesario considerarlas dentro del análisis de la planta.

El estándar de control para este hormigón cambia de “Bueno” a “Excelente” al eliminar los datos discordantes. Esto se correlaciona con las alertas mostradas en el gráfico 4, que muestra un proceso en general dentro de los límites de control y estable.

3.2.1.3. Resultados HB30.0(90)20-12

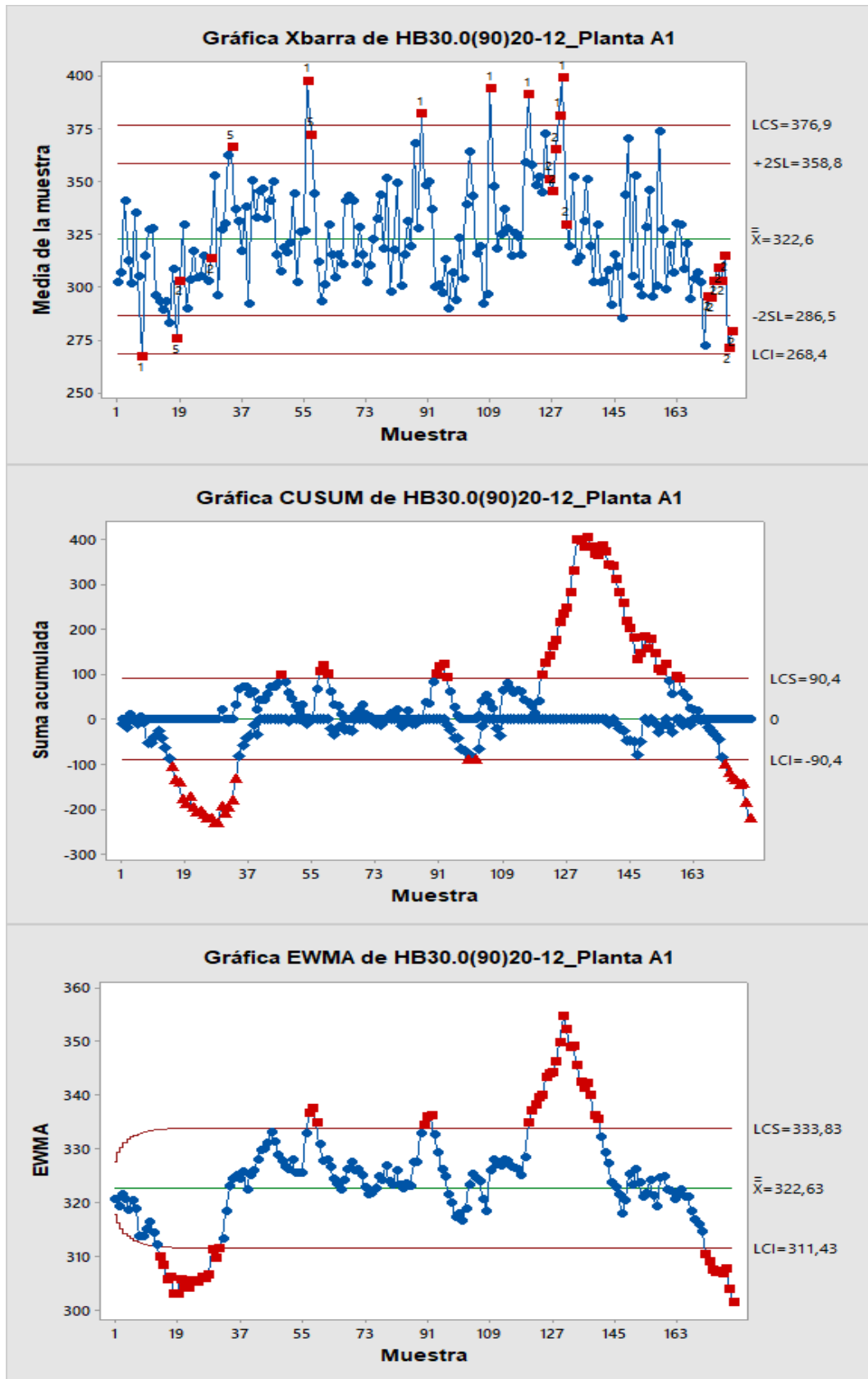


Gráfico 5: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-12, Planta A1.



#### 3.2.1.3.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 5, se observa:

- El proceso está fuera de control en los puntos 8, 56, 89, 109, 120, 129 y 130, pues estos puntos están más allá de los límites de control. En especial el punto 8 es muy crítico desde el punto de vista de la calidad del hormigón, pues está bajo la media del proceso de 322,3 y bajo la resistencia requerida de 334,5 kgf/cm<sup>2</sup>.
- En los puntos 19 y 28 se cuentan 8 muestras consecutivas bajo la media del proceso. Desde los puntos 127 hasta el 131 se tienen más de 8 muestras consecutivas sobre la media del proceso y sobre la resistencia requerida. Desde el punto 172 se acumulan más de 8 muestras consecutivas bajo la media del proceso. Esto persiste hasta la muestra 179. Entre los puntos 28 y 131, se observa un proceso con comportamiento estable y siempre trabajando sobre la media del proceso y la resistencia requerida.
- En los puntos 18, 34, 57, 89, 120, 129, 130 y 179 se tienen 2 puntos consecutivos más allá de dos desviaciones estándar.

#### 3.2.1.3.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 5, se observa:

- El proceso está fuera de control estadístico (bajo línea de control H<sup>-</sup>) desde el punto 15 hasta el punto 33. Desde el punto 34 hasta el 45, el proceso se encuentra bajo control estadístico.
- En el punto 46, el proceso está fuera de control.
- Desde el punto 57 al 59, se presenta un nuevo peak en que el proceso está fuera de control estadístico, pero esta vez sobre H<sup>+</sup>. Desde el punto 60 al 89, el proceso está controlado.
- Nuevamente entre los puntos 90 y 93, se genera un nuevo peak fuera de control estadístico más allá de H<sup>+</sup>. En los puntos 99 y 101, también existe condición fuera de control.
- Entre los puntos 120 y 159, se genera una gran desviación positiva más allá de H<sup>+</sup>. Entre los puntos 160 y 171 el proceso se encuentra bajo control, pero en clara tendencia de desvíos negativos. Finalmente entre los puntos 172 y 179, se producen desviaciones negativas que caen bajo la línea de control H<sup>-</sup>.

#### 3.2.1.3.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 5, se observa:

- Entre los puntos 14 y 31 el promedio móvil decae bajo la línea de control inferior. Desde el punto 32 al 56 el proceso está bajo control estadístico.

- Entre los puntos 57 y 59, el promedio móvil tiene un peak positivo, pero fuera de la línea de control superior. Desde la muestra 60 a la 89, se observa un proceso dentro de los límites de control
- Entre las muestras 90 y 92, nuevamente se presenta un peak positivo fuera de los límites de control. Luego, desde la muestra 93 hasta la 119, el proceso vuelve a estar en control.
- Desde el punto 120 hasta el 140 se observa un aumento de las resistencias y el proceso está fuera de control sobre la línea de control superior. Desde el punto 141 hasta el 170 el proceso está bajo control
- Desde el punto 171 hasta el 179 las resistencias decaen y el proceso queda fuera de control.

#### 3.2.1.3.4. Síntesis

En este análisis, el primer método que detecta un desvío es Shewhart. Esto se debe a que CUSUM y EWMA, fueron optimizados con parámetros para detectar desvíos de 1 desviación estándar. La alerta de Shewhart en el punto 8 es un desvío grande respecto a la media. Shewhart tiene mejor desempeño en desvíos grandes que CUSUM y EWMA. Para estos desvíos grandes y repentinos se deben tomar acciones correctivas inmediatamente (utilización de otras materias primas, cambios en la dosificación, cambio del agua, etc.).

Las cartas de EWMA y CUSUM en el gráfico 5, tienen características similares. EWMA tiene alertas más tempranas en casi todos estados “fuera de control”,

CUSUM por su parte es el método que más alertas entrega en este caso, lo que implica que el control de este método es más sensible y estricto que los otros dos.

El estándar de control de este hormigón es “Excelente”, pero en el gráfico 5 se observan alertas que a priori no muestran un proceso excelente en cuanto a las desviaciones de sus resistencias respecto a la resistencia promedio.

3.2.1.4. Resultados HB35.0(90)20-10

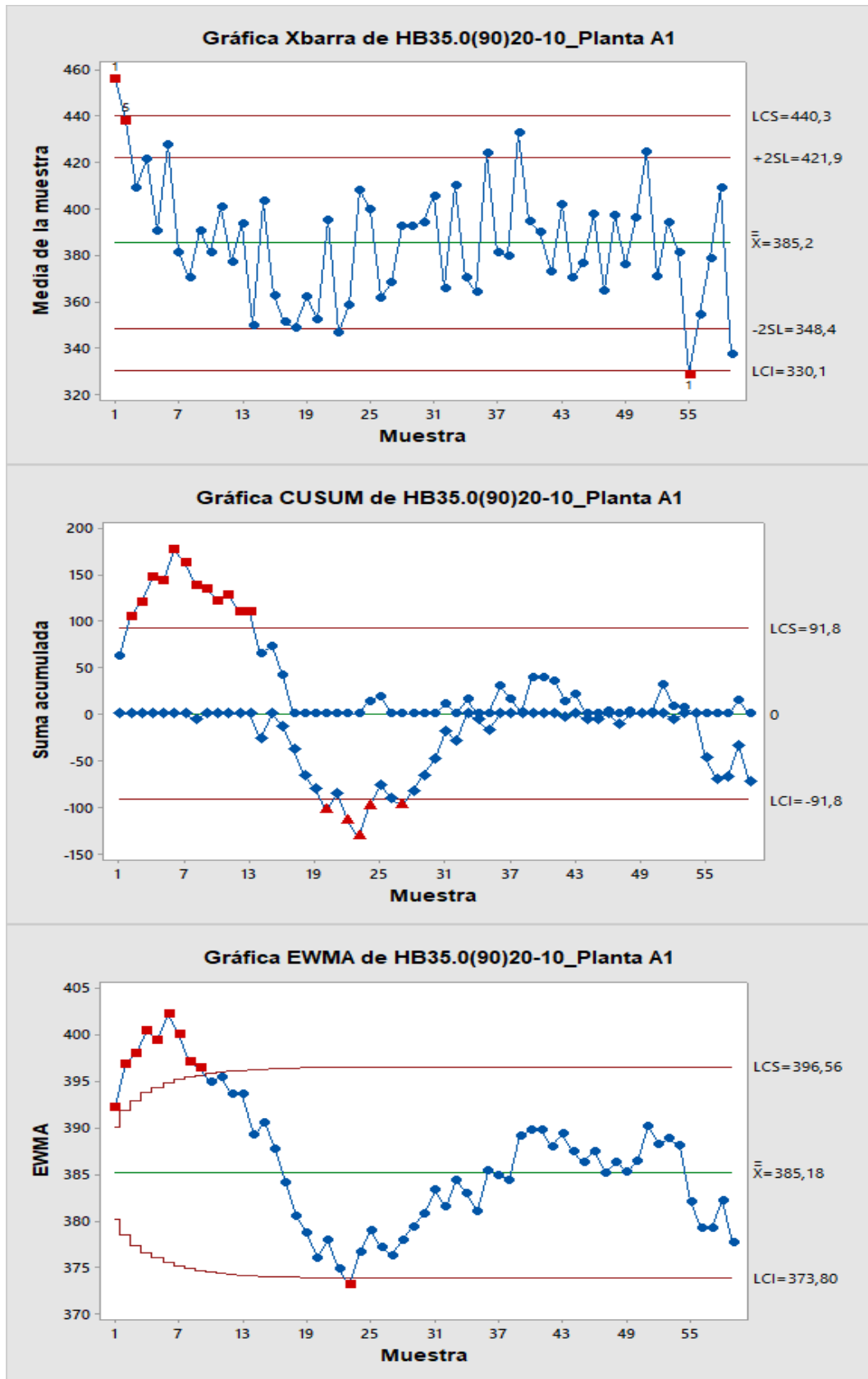


Gráfico 6: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta A1.

#### 3.2.1.4.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 6, se observa:

- El proceso está fuera de control en dos puntos que caen más allá e 3 desviaciones estándar: punto 1 (Sobre la línea de control superior) y punto 55 (bajo la línea de control inferior).
- En el punto 2 existen dos puntos consecutivos más allá de dos desviaciones estándar. El proceso está fuera de control en este punto.

#### 3.2.1.4.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 6, se observa:

- Desde la muestra 2 a la 13 se tienen desvíos positivos más allá de  $H^+$ . El proceso está fuera de control estadístico.
- Entre los puntos 20 y 27 se observan desvíos negativos fuera de la línea de control inferior  $H^-$ .

#### 3.2.1.4.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 6, se observa:

- El proceso se encuentra fuera de control estadístico entre los puntos 1 y 9 (promedio móvil sobre la media del proceso) y en el punto 23 (promedio móvil bajo la media del proceso).

#### 3.2.1.4.4. Síntesis

Se observa a partir de las 3 cartas del gráfico 6 que el proceso viene decayendo en sus primeras resistencias para posteriormente estabilizarse en su mayoría dentro de los límites de control hasta el final del proceso.

En el comienzo la planta trabaja sobre la resistencia promedio del período del proceso. Luego se realizan las acciones correctivas pertinentes (posibles ajustes de dosificación para disminuir costos) y la media del proceso comienza a disminuir. En las cartas de CUSUM y EWMA se observan alertas entre los puntos 20 y 27. Estas alertas no las detecta Shewhart debido a que son desvíos acumulados pequeños en torno a la media del proceso.

El hormigón HB35.0 tiene una media que está sobre la resistencia requerida y una desviación estándar de 26 kgf/cm<sup>2</sup>. No tiene resistencias que se escapen mucho de la tendencia de la planta, lo que resulta en pocas alertas de descontroles en el proceso. El hormigón de la planta A1 se pre clasifica como “Excelente” lo que es coherente con el comportamiento gráfico de acuerdo a las cartas de control.

### 3.2.2. Resultados Hormigones Planta A2

A continuación se presentan los resultados obtenidos al aplicar los métodos de control a los hormigones HB20, HB25, HB30 y HB35 de la Planta hormigonera A2.

3.2.2.1. Resultados HB20.0(90)20-10

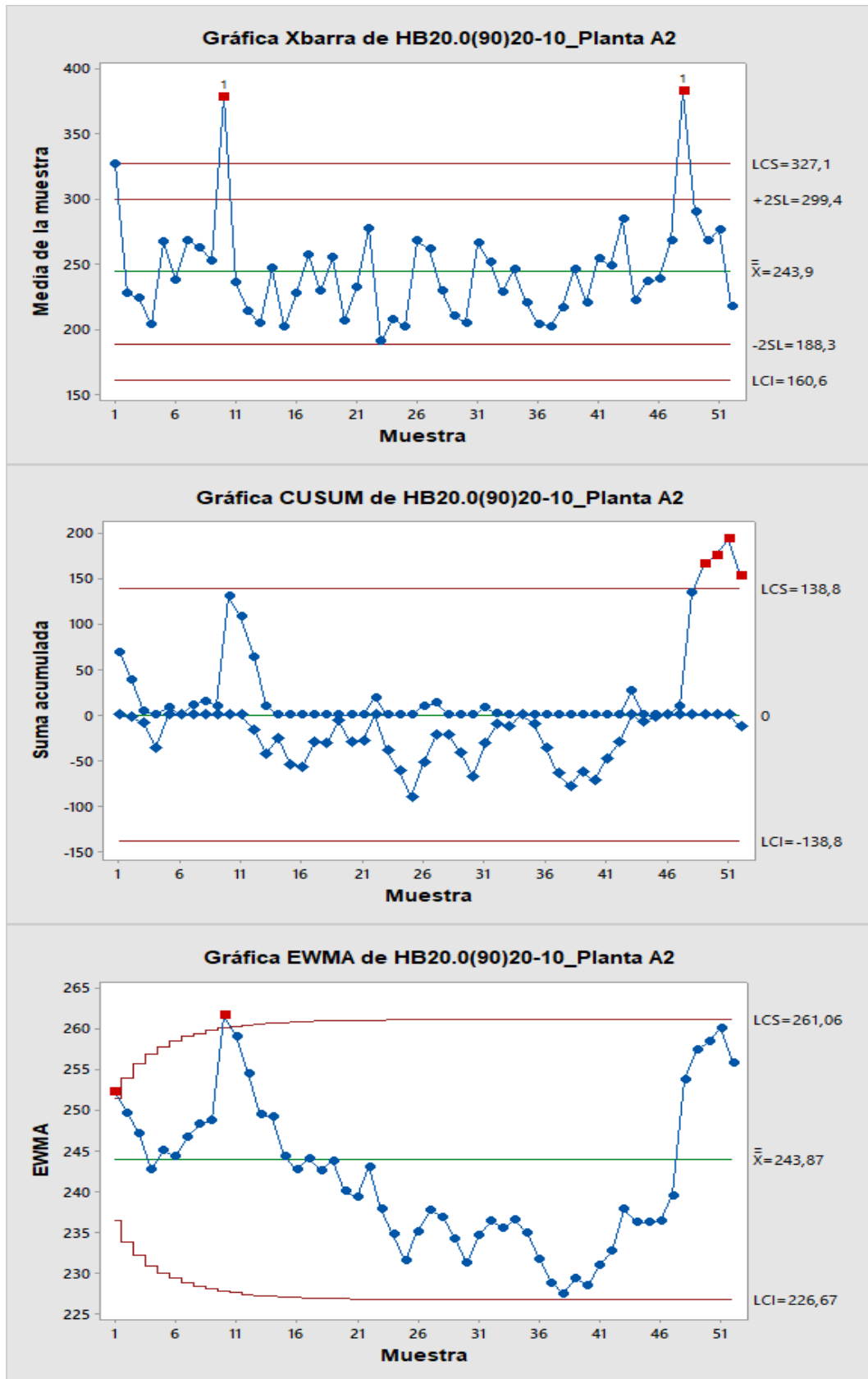


Gráfico 7: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta A2.

### 3.2.2.1.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 7, se observa:

- El proceso se encuentra bajo control estadístico, excepto en los puntos 10 y 48 que se encuentran más allá de 3 desviaciones estándar de la media.

### 3.2.2.1.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 7, se observa:

- El proceso de acuerdo a este método se encuentra bajo control estadístico, excepto en los últimos 4 puntos (49, 50, 51 y 52) donde superan la línea de control superior  $H^+$ .

### 3.2.2.1.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 7, se observa:

- En los puntos 1 y 10 el proceso se encuentra fuera de control estadístico, por lo tanto alguna causa afecta la calidad del proceso productivo de la planta A2.

Los puntos 10 y 48 pueden considerarse “aberrantes”, ya que escapan notoriamente a la tendencia global de la planta. Adicionalmente el punto 1 tampoco está dentro de la tendencia general del proceso en este período. Estos puntos, si bien es necesario considerarlos en el análisis para saber por qué están tan desviados del proceso, no permiten un correcto análisis de la calidad del proceso en el período considerado, y pueden conducir a decisiones erróneas respecto de acciones correctivas a considerar en el proceso.

A partir de lo anterior, los puntos 1, 10 y 48 son eliminados del análisis. La media en este nuevo contexto es  $236,62 \text{ kgf/cm}^2$ , la desviación estándar es  $25,87 \text{ kgf/cm}^2$  y la resistencia requerida es  $233,11 \text{ kgf/cm}^2$  (La media del proceso es ahora mayor a la resistencia requerida). El estándar de control de la planta A2 para este grado cambia de “Bueno” a “Excelente”.

En el gráfico 8 se presentan los gráficos con los datos depurados.

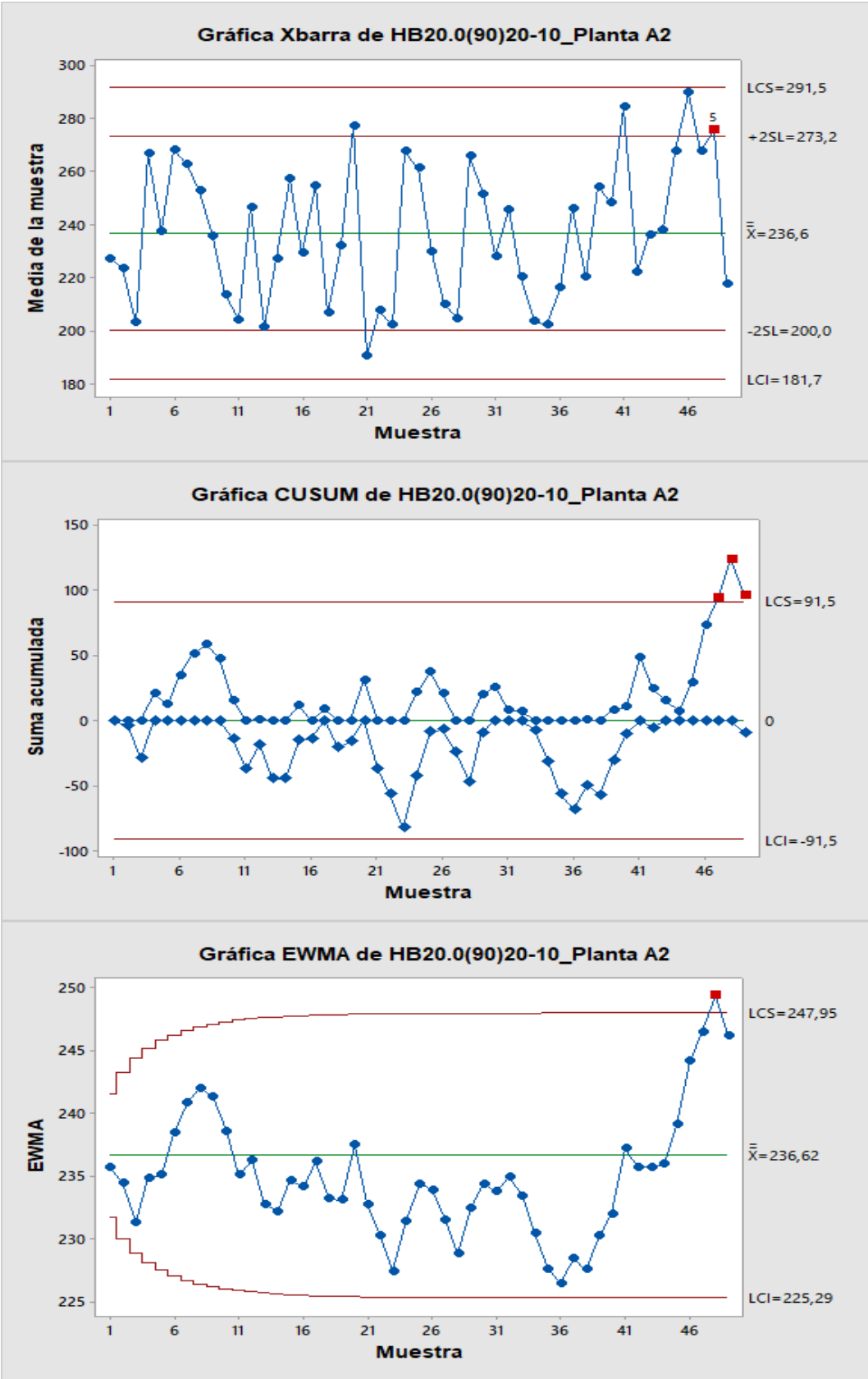


Gráfico 8: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta A2, datos depurados.



#### 3.2.2.1.4. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 8, se observa:

- Una alerta en el punto 48 en que existen dos puntos consecutivos más allá de dos desviaciones estándar. A diferencia de la carta Shewhart del gráfico 6, ya no hay alerta de muestras más allá de 3 desviaciones estándar. En el punto 48, el proceso está fuera de control estadístico.

#### 3.2.2.1.5. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 8, se observa:

- El proceso se encuentra fuera de control estadístico entre los puntos 47-49. A diferencia de la carta CUSUM del gráfico 6, no existe la alerta del final del período analizado.

#### 3.2.2.1.6. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 8, se observa:

- El proceso se encuentra fuera de control estadístico en el punto 48. En el gráfico 6 la carta EWMA presentaba alertas sólo en las primeras muestras, no al final como en la situación depurada.

#### 3.2.2.1.7. Síntesis

En el gráfico 7 se tienen distintos puntos donde los métodos indican desvíos o que el proceso está fuera de control. Existe una correlación en las desviaciones de los 3 métodos, es decir, en la carta de Shewhart se observan dos desviaciones muy grandes del proceso, lo que se refleja en el gráfico CUSUM y también en EWMA. En el caso de CUSUM, la alerta se presenta en los puntos finales del proceso y no al comienzo como señala Shewhart en el punto 10. Por otra parte, en el método EWMA ocurre lo contrario; las alertas se señalan en las muestras iniciales y sólo se ve un desvío pronunciado al final del proceso, pero sin que se excedan los límites de control.

Si bien la planta trabaja en torno a una media de 243,9 kgf/cm<sup>2</sup>, bajo la resistencia requerida que indica la Nch1998.Of89 de 250,2, la resistencia a 28 días, excepto en el punto 23, está siempre sobre los 200 kgf/cm<sup>2</sup> según lo que muestra la carta Shewhart, que es la resistencia esperada para un hormigón H20.

Respecto a la depuración de los datos, el proceso se observa más estable en el gráfico 8 que en el gráfico 7. CUSUM alerta que el proceso está fuera de control estadístico más tempranamente que Shewhart y EWMA. Esto se debe a que se eliminan los desvíos grandes del proceso donde CUSUM no tiene un buen desempeño.

Otro punto importante a considerar, es que con los datos depurados los 3 métodos de control coinciden en el período donde señalan la alerta de “descontrol” del proceso. Se observa coherencia en los comportamientos de los datos en las 3 cartas mostradas en el gráfico 8 a diferencia del gráfico 7 donde no existe relación en las alertas destacadas por cada método.

El estándar de control para este hormigón es “Excelente” lo que tiene coherencia de acuerdo a lo mostrado en el gráfico 8.

3.2.2.2. Resultados HB25.0(90)20-10

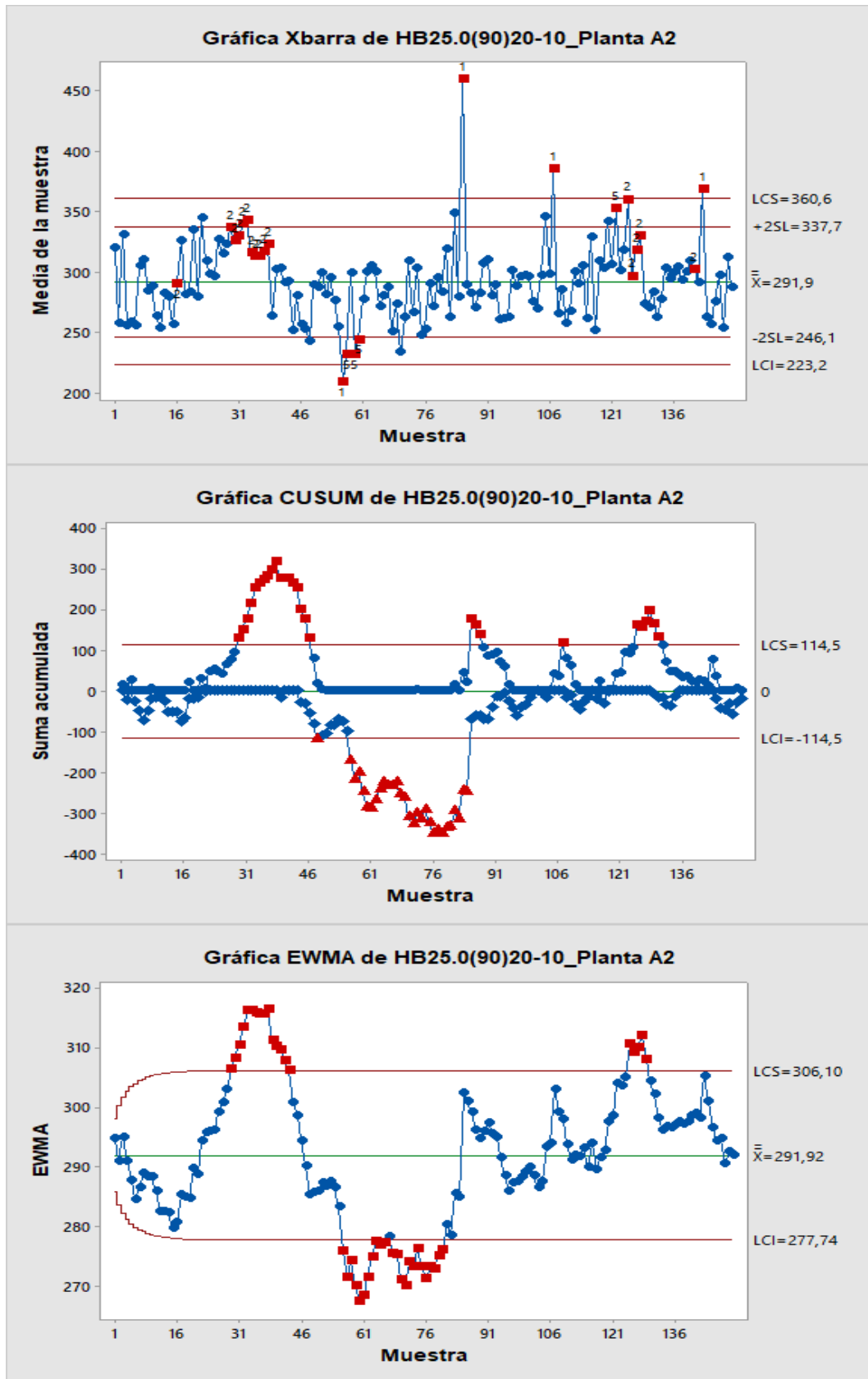


Gráfico 9: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta A2.

### 3.2.2.2.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 9, se observa:

- Hay 4 puntos más allá de 3 desviaciones estándar, indicando que el proceso se encuentra fuera de control estadístico. Los puntos son 56, 85, 107 y 143. Como se puede apreciar en el gráfico, sólo el punto 56 viene precedido por una tendencia a la baja de la resistencia del hormigón. Los puntos 85, 107 y 143, son desvíos puntuales y totalmente fuera de la tendencia de la resistencia del hormigón (puntos discordantes y no representativos de las resistencias de la planta para este hormigón).
- Hay 4 períodos en que 8 resistencias consecutivas están por sobre o debajo de la línea central. El primer período acumula 8 puntos consecutivos bajo la media del proceso en el punto 16, el segundo acumula 8 o más resistencias sobre el promedio del proceso entre los puntos 29 y 38; el tercer período acumula más de 8 resistencias sobre la media a partir del punto 15 y se siguen acumulando hasta el punto 18. Finalmente en el punto 141 nuevamente se acumulan más de 8 puntos sobre la media del proceso.
- Existen 7 períodos en que hay 2 o más resistencias consecutiva a un lado de 2 desviaciones estándar. El proceso está fuera de control estadístico en los puntos 33, 57, 59, 60, 85, 107, 122.

### 3.2.2.2.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 9, se observa:

- Del punto 29 hasta el punto 46 el proceso se encuentra fuera de control estadístico. En este período, hasta el punto 38 aproximadamente el proceso se va desviando por sobre la resistencia media. A partir del punto 39, se observa cómo los desvíos se comienzan a reducir y tienden a volver a la media del proceso.
- En el punto 48 nuevamente el proceso está fuera de control estadístico, y es el primer aviso de que el proceso comenzará a desviarse, pero esta vez bajo la Resistencia Promedio.
- En el punto 56 se produce un gran desvío negativo que hace que las resistencias del proceso fluctúen siempre bajo la media hasta el punto 87 donde vuelve a estar bajo control estadístico.
- En el punto 107 y desde el 125 hasta el 130 el proceso nuevamente está fuera de control estadístico, pero hacia al final del período las desviaciones fluctúan en torno a cero.

### 3.2.2.2.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 9, se observa:

- Desde el punto 29 hasta el punto 43, el proceso se encuentra fuera de control estadístico puesto que está operando sobre la Resistencia Promedio. En este período se genera un aumento de la media, desde el punto 29 hasta el 33, luego del punto 34 al 38 se estabiliza en aproximadamente  $315 \text{ kgf/cm}^2$  y decae la media ponderada desde el punto 35 al 43.
- Entre los puntos 44 y 55 el proceso se encuentra bajo control estadístico de acuerdo a la media del período global.
- Entre los puntos 56 y 80, el proceso nuevamente se encuentra fuera de control estadístico y la resistencia media ponderada fluctúa en torno a  $275 \text{ kgf/cm}^2$ . Dentro de este período, sólo el punto 67 se encuentra bajo control estadístico de acuerdo a la media global considerada.
- Entre los puntos 81 y 124 el proceso está bajo control estadístico, pero con tendencia ascendente de la media ponderada.
- Finalmente, desde el punto 125 hasta el 129, el proceso se encuentra fuera de control estadístico.
- Desde el punto 130 hasta el final del período considerado, el proceso está fuera de control estadístico.

Como se mencionó en el análisis de la carta Shewhart del gráfico 9, existen 3 puntos, 85, 107 y 143 que están fuera de tendencia y que son puntos aislados, es decir, no vienen precedidos por crecimientos o decrecimientos constantes y sucesivos en la resistencia de las muestras.

Estos puntos son eliminados y en el gráfico 10 se presentan las cartas del hormigón HB25 para la planta A2 con los datos depurados.

La media del proceso cambia de  $291,9 \text{ kgf/cm}^2$  a  $289,6 \text{ kgf/cm}^2$ , la resistencia requerida de  $291,4 \text{ kgf/cm}^2$  a  $285,6 \text{ kgf/cm}^2$  y la desviación estándar de  $32,4 \text{ kgf/cm}^2$  a  $27,8 \text{ kgf/cm}^2$ . La clasificación del estándar de control de la planta para este hormigón se mantiene "Muy Bueno".

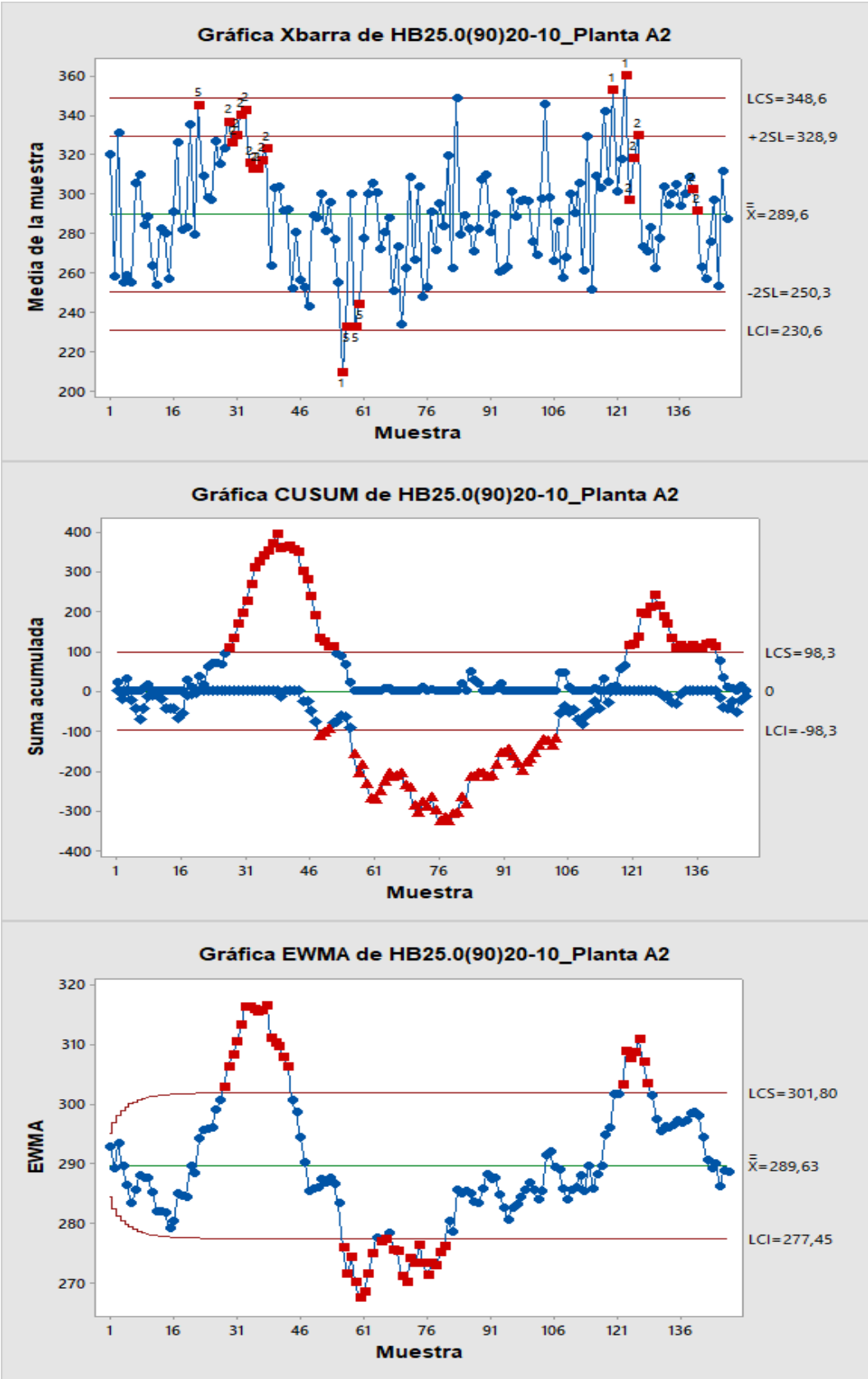


Gráfico 10: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta A2, datos depurados.

#### 3.2.2.2.4. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 10, se observa:

- En los puntos 56, 120 y 123, el proceso se encuentra fuera de control estadístico pues las resistencias están más allá de 3 desviaciones estándar de la media.
- Respecto al análisis de las tendencias de las resistencias, desde el punto 29 hasta el 38 el proceso presenta 8 muestras consecutivas en que la resistencia está bajo la resistencia promedio. Esto se repite en los puntos 123, 124, 125 y 126; y en los puntos 139 y 140.
- En los puntos 22, 31, 32, 33, 57, 59, 60 y 120, se tienen dos puntos consecutivos más allá de 3 desviaciones estándar de la media (puntos 57, 59 y 60, por 2 desviaciones bajo la media).

#### 3.2.2.2.5. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 10, se observa:

- Entre los puntos 27 y 51, el proceso se encuentra fuera de control estadístico.
- Entre los puntos 56 y 103, las resistencias se desvían negativamente respecto a la media del proceso, y están fuera de control estadístico.
- Desde el punto 120 hasta el punto 140, el proceso se encuentra fuera de control estadístico.

#### 3.2.2.2.6. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 10, se observa:

- Desde el punto 28 al 43, el proceso se encuentra fuera de control estadístico sobre la media del proceso.
- Desde el punto 56 al 80, nuevamente el proceso está fuera de control estadístico, bajo la media del proceso.
- Desde el punto 122 hasta el 128 nuevamente el proceso está fuera de control estadístico, pero sobre la media del proceso.

#### 3.2.2.2.7. Síntesis

Respecto al hormigón de esta planta, si bien presenta una preclasificación según ACI de un estándar de control “Bueno”, para efectos del control de los desvíos del proceso, tiene muchas alertas, lo que implica que durante el proceso existe variación en la desviación estándar que genera alteraciones frecuentes en el proceso.

En el gráfico 10, la carta CUSUM presenta muchas más alertas que Shewhart y EWMA. Esto implica que los datos discordantes afectan mucho en este caso las alertas que entrega CUSUM y por lo tanto se podrían tomar decisiones equivocadas en el proceso si esos datos no son eliminados. CUSUM alerta más tempranamente los descontrolados efectivos del proceso en este caso de datos depurados.

CUSUM alerta más tempranamente los descontroles efectivos del proceso en este caso de datos depurados.

De acuerdo a las alertas indicadas, se concluye que la planta tiene un sistema de control deficiente del proceso, o que por algún motivo o por solicitudes del cliente, se modifican las dosificaciones del hormigón de acuerdo a la resistencia que se requiera.

Respecto a la calidad del hormigón producido, se presentan dos períodos que señalan los 3 métodos en que las resistencias son superiores a la resistencia media del proceso. La resistencia media del proceso es mayor a la resistencia especificada a 28 días para este hormigón de aproximadamente  $250 \text{ kgf/cm}^2$ , por tanto en estos períodos la planta cumple y no tendría problemas ni devolución del hormigón por sus clientes.

En el tramo central del período, en la carta de Shewhart, se observa que no se cumple la resistencia especificada a 28 días, pues hay muestras que están bajo 2 desviaciones estándar ( $250,3 \text{ kgf/cm}^2$ ). Esta situación se acentúa luego de la eliminación de datos que están fuera de tendencia sobre la media del proceso.

El estándar de control para este hormigón es “Muy Bueno”, sin embargo el proceso muestra muchas desviaciones respecto a la resistencia promedio, lo que no guarda coherencia con la clasificación inicial.



3.2.2.3. Resultados HB30.0(90)20-12

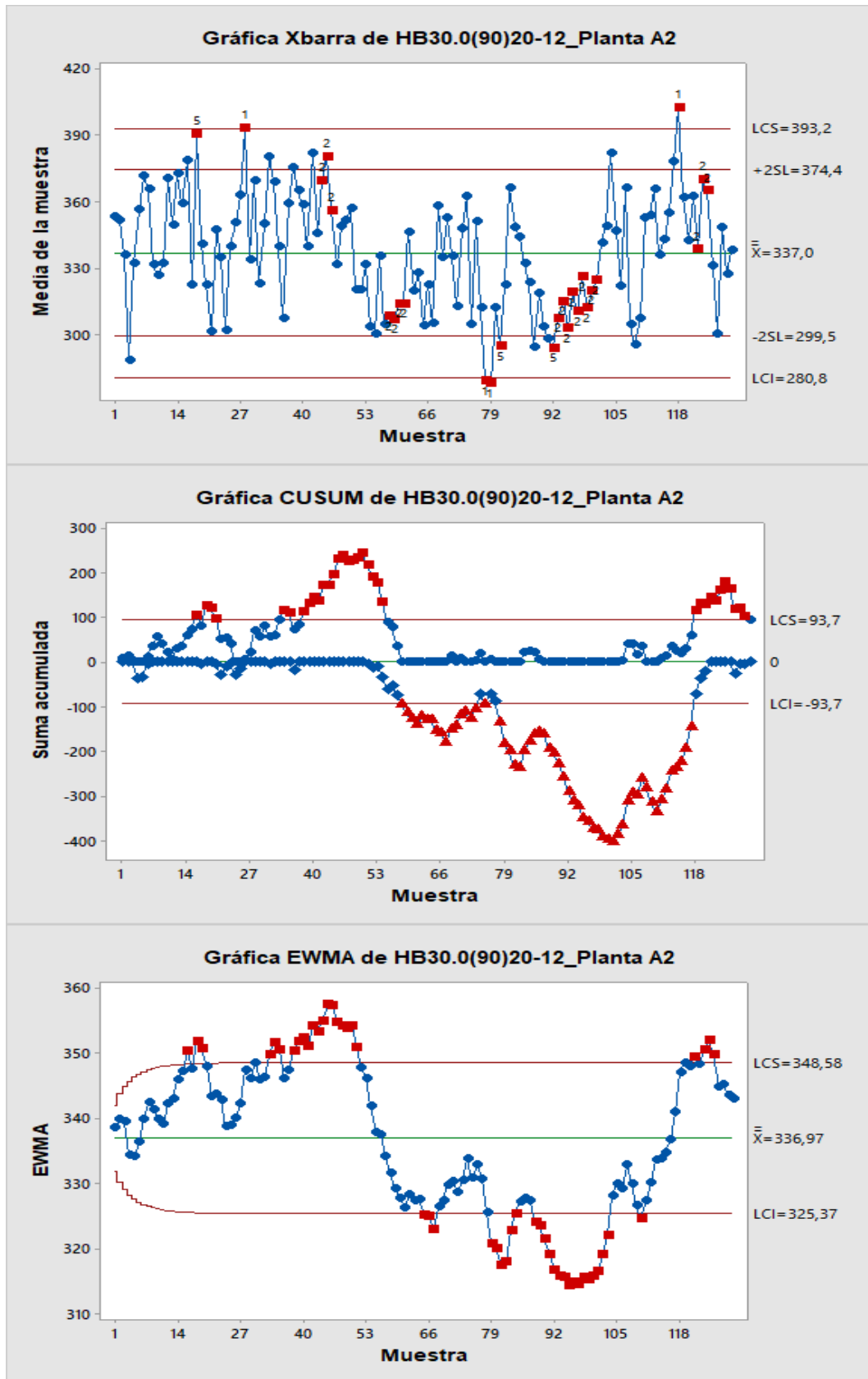


Gráfico 11: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-12, Planta A2.

### 3.2.2.3.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 11, se observa:

- Los puntos 28 y 118 más allá de 3 desviaciones estándar sobre la media del período. Los puntos 78 y 79 están más allá de 3 desviaciones estándar bajo la media del proceso. En estos 4 puntos el proceso se encuentra fuera de control estadístico para la resistencia promedio.
- Entre los puntos 44 y 46 se da la tendencia de 8 puntos consecutivos sobre la media del período analizado. Esta tendencia también se da entre los puntos 58 y 61 (bajo la media); entre los puntos 93 y 101 (bajo la media); y entre los puntos 122 y 124 (sobre la media).
- A partir del punto anterior, se observa un comportamiento variable de la planta para este grado de hormigón. A grandes rasgos, la resistencia promedio desde el inicio hasta la muestra 46, es superior a la resistencia media del período total. Luego, la resistencia media desde la muestra 47 hasta la muestra 101, es inferior a la resistencia media del período total. A partir de la muestra 102 y hasta el final del período, la resistencia es superior a la resistencia promedio.
- En los puntos 18, 79, 81, 92 y 118, existen 2 de 3 puntos consecutivos a más de dos desviaciones estándar, lo que puede implicar que el proceso esté fuera de control estadístico debido a la no aleatoriedad del comportamiento de estas resistencias.

### 3.2.2.3.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 11, se observa:

- En los puntos 16, 18, 19 y 20, el proceso se encuentra fuera de control estadístico con desviaciones positivas respecto a la resistencia promedio del proceso.
- En los puntos 34-35 y desde el punto 38 hasta el 54 el proceso se encuentra fuera de control estadístico con desviaciones positivas respecto a la resistencia media.
- Desde el punto 58 hasta el punto 117, el proceso se encuentra fuera de control estadístico con desviaciones negativas en torno a la resistencia promedio. En todo este período, el proceso fluctúa en torno a desviaciones negativas respecto a la resistencia promedio.
- Desde el punto 118 hasta el punto 128, el proceso está fuera de control estadístico con desviaciones positivas más allá del límite de control  $H^+$ .

### 3.2.2.3.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 11, se observa:

- Entre los puntos 16 y 19 el proceso está fuera de control estadístico.
- Entre los puntos 33 y 35; y entre los puntos 38 y 51, el proceso está fuera de control estadístico, sobre la resistencia media del proceso.
- Los puntos 65, 66 y 67 están fuera de control estadístico, bajo la media del proceso.

- Entre los puntos 79 y 84 las resistencias ponderadas están bajo la línea de control inferior, por lo que el proceso está fuera de control estadístico.
- Entre los puntos 88 y 103, y en el punto 110, las resistencias ponderadas están bajo la media del proceso. El proceso no está bajo control y existen causas asignables actuando. Las resistencias ponderadas fluctúan bajo la media del proceso, lo que podría traducirse en el no cumplimiento de los requerimientos del hormigón.
- Entre los puntos 104 y 109 se genera un aumento en las resistencias ponderadas.
- Desde el punto 110 hasta el 125 el proceso se encuentra fuera de control estadístico con resistencias ponderadas sobre la media del proceso.

#### 3.2.2.3.4. Síntesis

CUSUM y EWMA presentan alertas más tempranamente que Shewhart.

En las 3 cartas se puede observar el funcionamiento de la planta, si está bajo la media o sobre ésta. Si bien Shewhart alerta estas tendencias, gráficamente es más fácil de interpretar estas tendencias en las cartas de CUSUM y EWMA, siendo CUSUM la que presenta más alertas.

Debido a las numerosas alertas que entregan los métodos, se deduce que la planta tiene adoptado un sistema de control deficiente, sobre todo en los períodos de desvíos negativos o de resistencias inferiores a la media del proceso. Esto puede implicar un no cumplimiento y rechazo de hormigones en obra.

Por otra parte, los períodos en que se tienen desvíos positivos o resistencias muy altas, se incurren en costos innecesarios para la empresa.

De acuerdo a CUSUM, entre los puntos 58 y 117 las resistencias están dando resultados con desviaciones negativas en torno a la resistencia promedio y en especial a partir de la carta de Shewhart se ve que en los puntos 72 hasta el 92, existen una serie de puntos bajo la resistencia especificada para este grado de hormigón, 300 kgf/cm<sup>2</sup>. Esto podría generar el rechazo del hormigón por parte de los clientes.

La clasificación de este hormigón es “Excelente”, lo que no es coherente con los resultados mostrados en el gráfico 10 debido a las numerosas alertas de desviaciones en el proceso.

3.2.2.4. Resultados HB35.0(90)20-10

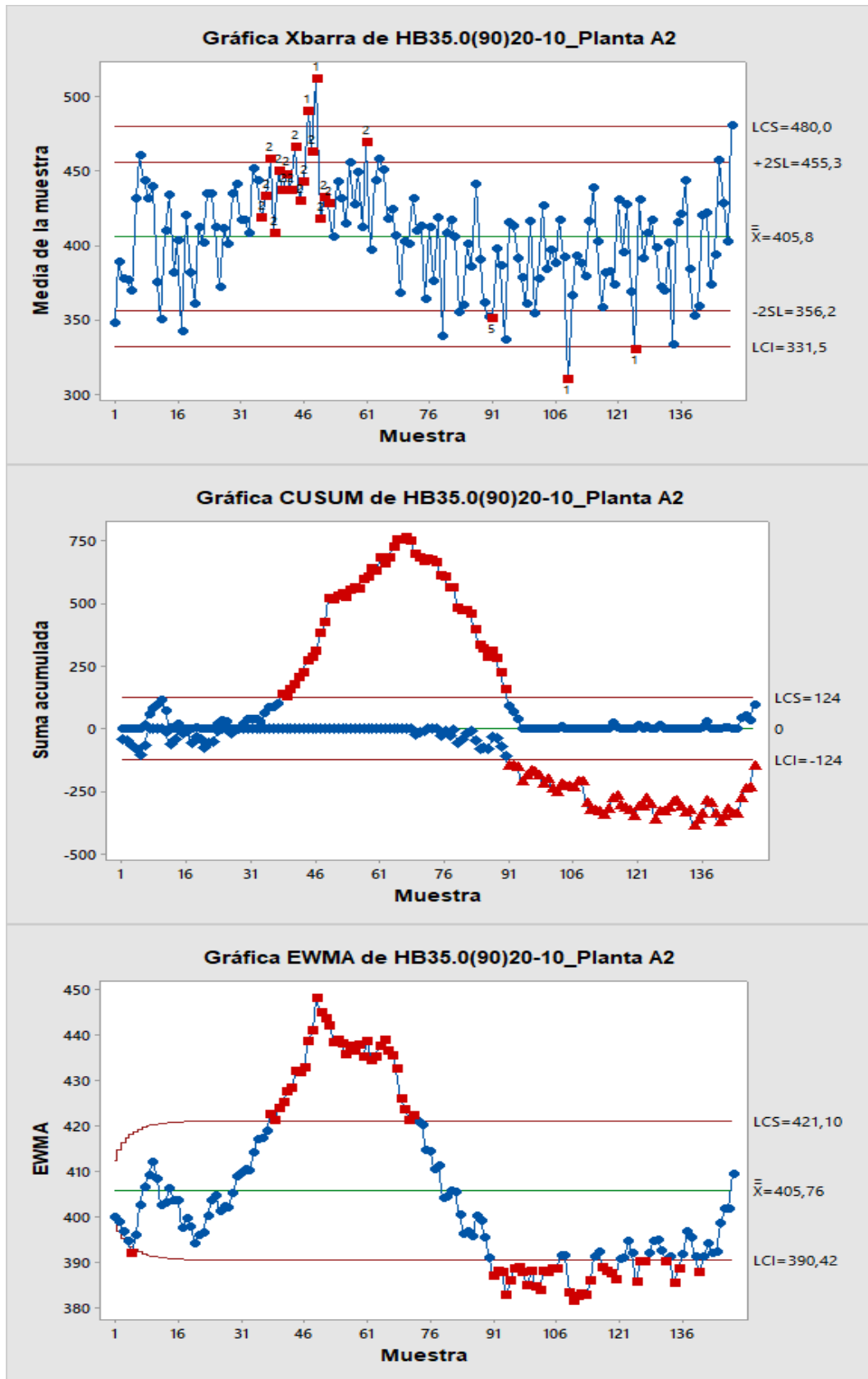


Gráfico 12: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta A2.

#### 3.2.2.4.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 12, se observa:

- Las muestras 48 y 49 están más allá de 3 desviaciones estándar sobre la media del período, por lo tanto el proceso está fuera de control estadístico.
- Las muestras 109 y 125 están más allá de 3 desviaciones estándar bajo la media del período, por lo tanto el proceso está fuera de control estadístico.
- Entre las muestras 36 y 52 se presentan acumulaciones consecutivas de resistencias sobre la media del proceso. Al ser un comportamiento no aleatorio de los resultados, se tiene el proceso fuera de control estadístico. En la muestra 61 también se acumulan 8 resultados consecutivos sobre la media del proceso.
- En los puntos 48 y 49, se observan 2 de 3 resistencias más allá de 2 desviaciones estándar sobre la media. Por otra parte, en la muestra 91 hay 2 de 3 resistencias bajo la media del período.
- Desde la muestra 1 a la 49 se observa un aumento sostenido de la resistencia de las muestras. A partir de este punto, las resistencias del proceso decaen y en la muestra 79 aproximadamente, se estabilizan las resistencias pero se observa gráficamente que esta estabilización es en torno a una resistencia menor que la media del período.

#### 3.2.2.4.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 12, se observa:

- Proceso bajo control estadístico desde el inicio hasta la muestra 37. Las desviaciones fluctúan en torno a cero, pero a partir de la muestra 34 comienzan las desviaciones.
- El proceso se encuentra fuera de control estadístico a partir de la muestra 38. Hasta la muestra 66 se acumulan desviaciones positivas.
- A partir de la muestra 67, se observan desviaciones negativas y consecutivas en el proceso que sigue encontrándose fuera de control estadístico sobre el límite de control superior  $H^+$  hasta la muestra 89.
- A partir de la muestra 90 se encuentra el proceso bajo el límite de control inferior  $H^-$ .
- Entre las muestras 91 y 108 el proceso tiene leves desvíos negativos, pero fluctúa en torno a un desvío de -125 respecto a la media del período.
- En la muestra 109 se observa un desvío considerable. A partir de este punto, el proceso se “estabiliza” en torno a un desvío aproximado de -325 respecto a la media del período.
- Finalmente, desde la muestra 144 hasta la muestra 148 el proceso tiene un desvío positivo, pero sigue estando fuera de control estadístico.

#### 3.2.2.4.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 12, se observa:

- Medias fluctuando en torno a  $400 \text{ kgf/cm}^2$  desde la muestra 1 hasta la muestra 29, inferior al promedio del proceso,  $405,8 \text{ kgf/cm}^2$ . En el punto 5 el proceso está fuera de control, más allá de 2,7 desvíos por debajo de la media.
- Desde la muestra 30 se generan incrementos sostenidos en las resistencias, lo que se observa gráficamente en la pendiente positiva hasta la muestra 49. Desde el punto 38 el proceso se encuentra fuera de control estadístico.
- Desde la muestra 50 hasta la 72, la pendiente en el gráfico es negativa, lo que implica que las resistencias están disminuyendo y acercándose a la media objetivo del período. En este tramo se observa un período “estable” desde la muestra 53 hasta la 67 en donde las medias ponderadas fluctúan en torno a  $438 \text{ kgf/cm}^2$  aproximadamente.
- Desde la muestra 73 hasta la muestra 90, el proceso se encuentra bajo control estadístico, pero con una tendencia decreciente de las resistencias.
- Desde la muestra 91 hasta la muestra 145 el proceso se encuentra mayoritariamente fuera de control estadístico, pero gráficamente con tendencia creciente de resistencias.
- Desde la muestra 146 hasta el final del proceso las resistencias y el proceso se encuentra bajo control estadístico.

#### 3.2.2.4.4. Síntesis

EWMA presenta una alerta en punto 5 que no se observa en las otras dos cartas.

Las 3 cartas presentan un comportamiento estable desde la muestra 1 a la 31 aproximadamente, donde se dan las alertas de desvíos grandes en las medias.

Nuevamente la carta que presenta más alertas es CUSUM.

Las 3 cartas muestran un proceso inestable en el tiempo para el período analizado.

Existen varios puntos de incumplimiento de las resistencias especificada del hormigón H35. De acuerdo a las cartas de control, si se tomaran medidas o ajustes en cuanto el proceso comienza a desviarse, se podría mejorar la calidad del producto y con ello evitar posibles rechazos por parte del cliente. No obstante lo anterior, el hormigón cumple la resistencia en prácticamente todo el período analizado, excepto 6 muestras (carta de Shewhart).

Las resistencias para esta planta y hormigón presentan muchas alertas a lo largo del proceso. Esto se debe a la variación de la desviación estándar que se evidencia en las alertas mostradas, lo que no es coherente con la preclasificación del hormigón que tiene un estándar de control “Bueno”.

### 3.2.3. Resultados Hormigones Planta A3

A continuación se presentan los resultados obtenidos al aplicar los métodos de control a los hormigones HB20, HB25, HB30 y HB35 de la Planta hormigonera A3.

3.2.3.1. Resultados HB20.0(90)20-10

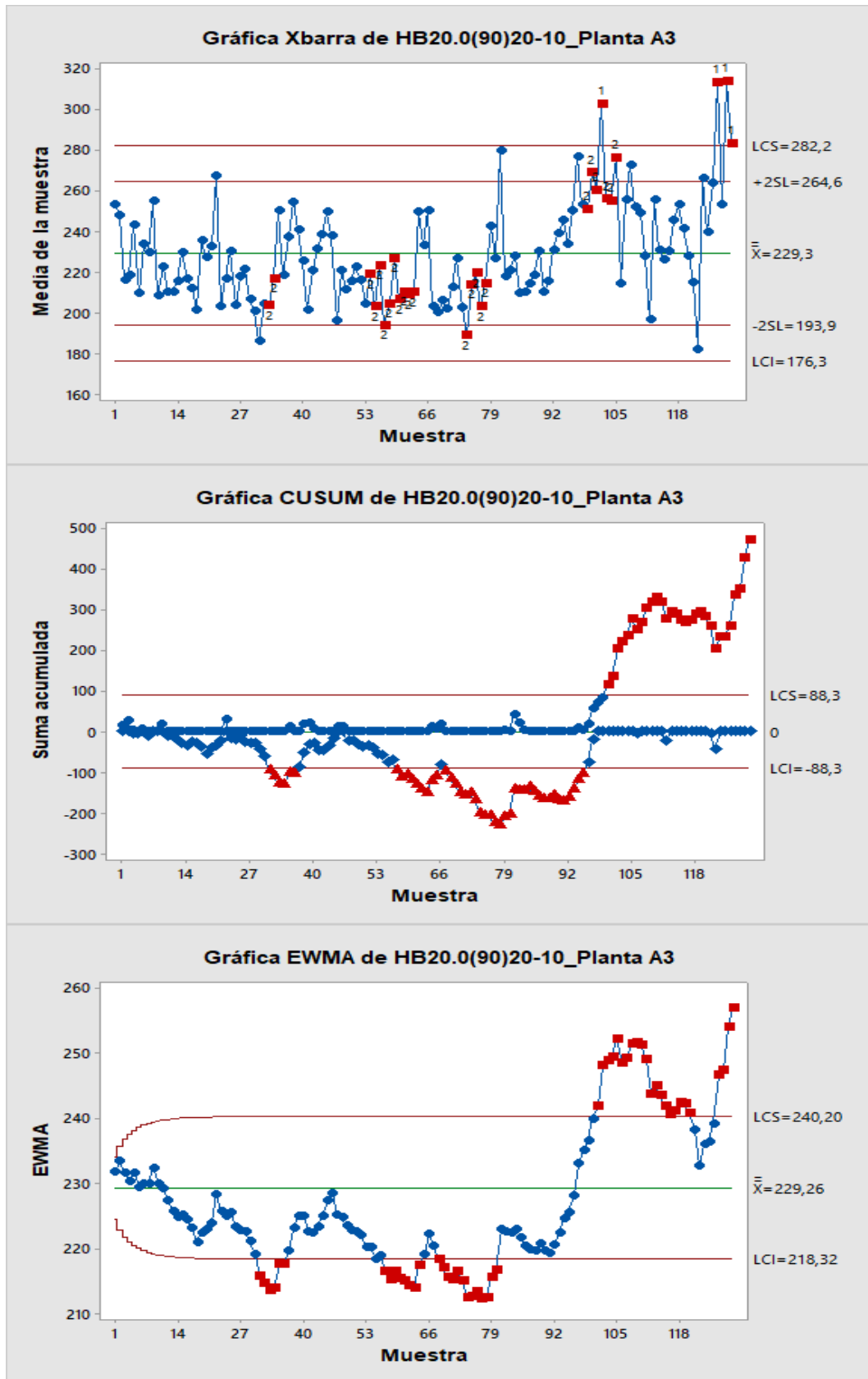


Gráfico 13: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta A3.

### 3.2.3.1.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 13, se observa:

- Existen 4 puntos más allá de 3 desviaciones estándar: muestras 102, 126, 128 y 129. El proceso se encuentra fuera de control estadístico en estas muestras.
- Los puntos 33 y 34; desde la muestra 54 a la muestra 63 y desde la muestra 74 a la 78, se tienen alertas de 8 muestras consecutivas con resistencias medias inferiores a la media del período. Desde la muestra 99 hasta la 105, se tienen alertas de 8 muestras consecutivas con resistencias sobre la media del período.
- En los puntos 102, 128 y 129, existen 2 de 3 puntos a más de 2 desviaciones estándar sobre la media.
- En general las resistencias tienen un comportamiento estable desde la muestra 1 a la 92 aproximadamente. Las alertas se presentan debido al crecimiento de resistencia que se genera a partir de la muestra 92 y luego a partir de la muestra 123, lo que eleva el promedio de las resistencias del período.

### 3.2.3.1.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 13, se observa:

- Proceso controlado desde la muestra 1 a la muestra 28 aproximadamente donde se comienzan a tener desvíos negativos que terminan por dejar el proceso fuera de control estadístico en los puntos 31 al 36.
- No obstante lo anterior, el proceso está bajo control desde la muestra 37.
- A partir de la muestra 53, se comienzan a ver desvíos negativos consecutivos que terminan con el proceso fuera de control desde el punto 7 al 95, fluctuando en torno a un desvío de -160 aproximadamente respecto a la resistencia objetivo.
- En el punto 92 se comienzan a generar desviaciones positivas que se generan por aumentos en las resistencias del hormigón. Ya en la muestra 100 el proceso está fuera de control estadístico, más allá del límite  $H^+$ .
- Entre el punto 111 y 118 el proceso se estabiliza en una desviación de +250. Luego de esto se observa una desviación negativa entre la muestra 120 y 122. A partir de acá el proceso nuevamente presenta desviaciones positivas hasta el final del período.

### 3.2.3.1.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 13, se observa:

- De la muestra 1 a la 33, las resistencias decrecen hasta la muestra 33. En las muestras 31, 32 y 33 el proceso excede el límite de control inferior, y está fuera de control estadístico.
- A partir de la muestra 34, las resistencias crecen y EWMA presenta una pendiente positiva. El proceso hasta la muestra 36 está fuera de control estadístico.
- Entre las muestras 37 y 56, las resistencias medias están dentro de los parámetros de control, pero trabajan bajo el promedio del proceso.



- Desde el punto 46 hasta la muestra 63, las resistencias del hormigón decrecen. El proceso está fuera de control estadístico desde la muestra 57 a la 63.
- Un crecimiento en las medias de resistencias se observa desde la muestra 64 a la 66 (64 está fuera de control estadístico), pero decrecen nuevamente a partir de este punto quedando desde el punto 68 al 80 por debajo de 2,7 desviaciones estándar.
- A partir del punto 81 el proceso fluctúa en torno a  $222 \text{ kgf/cm}^2$  y en la muestra 92 se generan aumentos en las medias ponderadas quedando las resistencias por sobre 2,7 desviaciones estándar desde el punto 101 hasta el 120.
- El proceso vuelve a estar bajo control desde el punto 121 hasta el 125, pero nuevamente se desvía y las resistencias medias ponderadas desde la muestra 126 y 129 están sobre 2,7 desviaciones estándar de la media.

#### 3.2.3.1.4. Síntesis

Los 3 métodos son coherentes en cuanto a las alertas que entregan.

CUSUM es la carta que muestra más alertas en el proceso

Las desviaciones que muestra Shewhart no son tan evidentes como las de las cartas CUSUM y EWMA.

EWMA da la primera alerta de que el proceso está fuera de control estadístico.

El hormigón mayoritariamente cumple con la resistencia especificada según lo que se observa en la carta de Shewhart.

Entre los puntos 27 y 41 se observan alertas de decaimiento de la resistencia del hormigón, pero se ve en las 3 cartas que a partir de la muestra 42 se retorna a la media del proceso lo que implica que se tomaron medidas correctivas a las desviaciones observadas.

Finalmente, la planta presenta muchas alertas y variaciones en la desviación estándar, a pesar de que según ACI es una planta con estándar de control "Excelente".

3.2.3.2. Resultados HB25.0(90)20-10

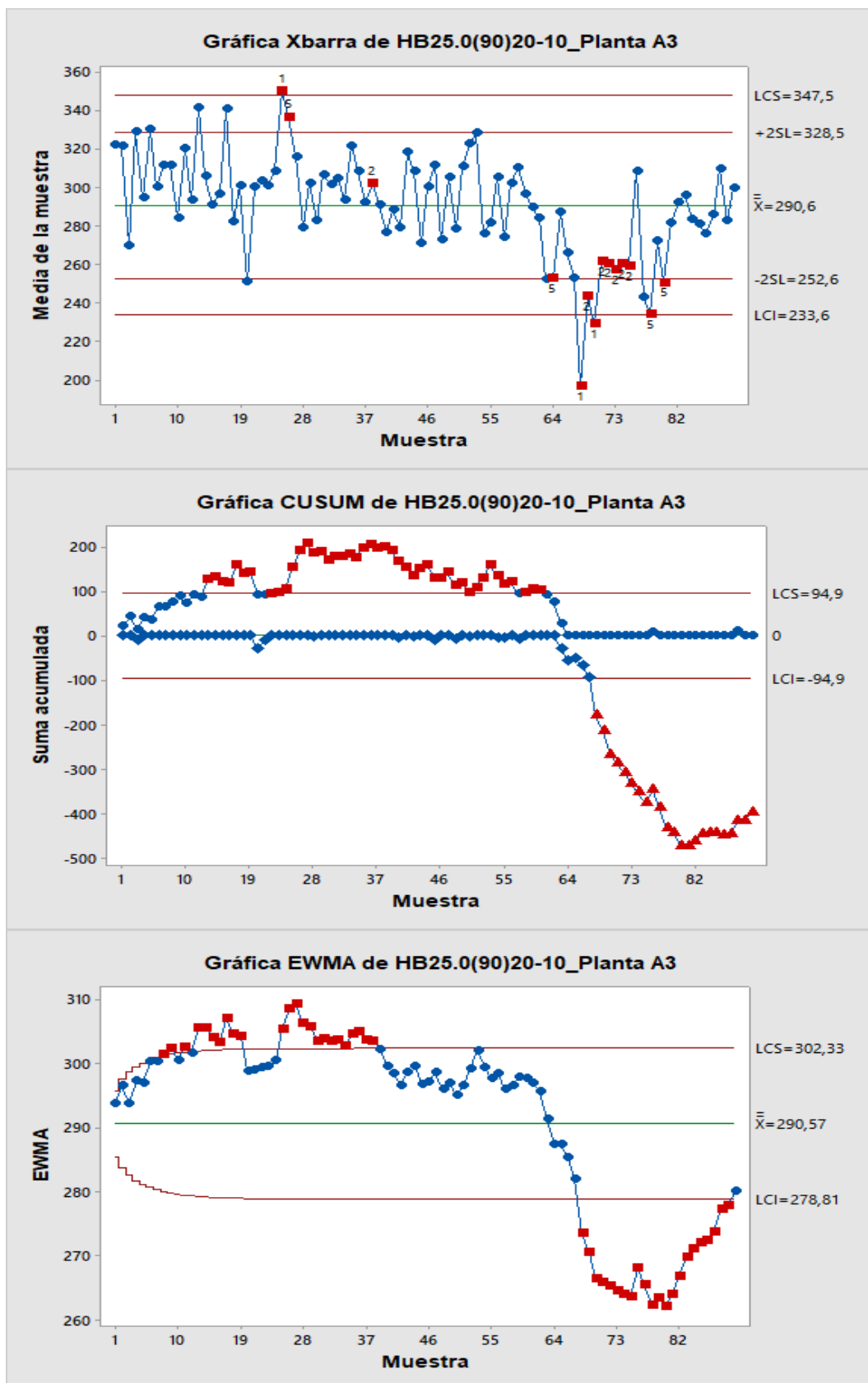


Gráfico 14: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta A3.

### 3.2.3.2.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 14, se observa:

- La muestra 25 se encuentra a más de 3 desviaciones estándar sobre la media del período.
- Los puntos 68 y 70 se encuentran a más de 3 desviaciones estándar bajo la media del período.
- En el punto 38 se acumulan 8 resistencias consecutivas sobre la media del proceso, lo que genera una alerta en el proceso.
- Desde la muestra 68 hasta la 75 se generan alertas de 8 puntos consecutivos, pero esta vez bajo la media del período.
- En el punto 26 hay 2 de 3 resistencias sobre 2 desviaciones estándar de la media. La misma situación se presenta en los puntos 64, 69, 70, 78 y 80, pero en este caso es bajo 2 desviaciones estándar.
- En general, el proceso está controlado con resistencias fluctuando en torno a la media del período de 290,6 kgf/cm<sup>2</sup> hasta la muestra 62.
- A partir de la muestra 63 el proceso se desvía de la media y las resistencias decrecen hasta el punto 68. De aquí en adelante se ve una tendencia creciente de resistencia hasta el final del proceso.

### 3.2.3.2.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 14, se observa:

- Desviaciones positivas desde la muestra 1 a la 12 que culminan con el proceso fuera de control estadístico desde la muestra 13 hasta la muestra 60. Dentro de este período existen muestras puntuales bajo control estadístico: muestra 20, 21 y 57.
- De la muestra 61 a la 67, el proceso se encuentra bajo control estadístico, pero con desviaciones negativas consecutivas que se traducen en una pendiente negativa en los puntos.
- Desde la muestra 68 hasta la muestra 90, el proceso está fuera de control estadístico. Dentro de este período, desde la muestra 80 se observan desviaciones positivas respecto a la resistencia promedio.

### 3.2.3.2.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 14, se observa:

- Crecimiento en las resistencias medias de la muestra 1 a la 7. A partir de la muestra 8 y hasta la muestra 19, las medias están sobre 2,7 desviaciones estándar, lo que indica que el proceso está fuera de control.
- Entre las muestras 20 y 24 las medias están dentro de los límites de control, pero a partir del punto 25 nuevamente se excede el límite superior y hasta la muestra 38 el proceso está fuera de control estadístico.

- Desde el punto 39 hasta el 62, el proceso es estable. Las medias ponderadas están dentro de los límites de control, pero fluctuando en torno a  $296 \text{ kgf/cm}^2$  que es superior a la resistencia media del período,  $290,57 \text{ kgf/cm}^2$ .
- A partir de la muestra 63, se observa un decrecimiento en las resistencias. Desde la muestra 68 a la 89, el proceso se encuentra fuera del límite de control inferior, fuera de control estadístico.
- Se observa un crecimiento en la resistencia a partir de la muestra 81. En la última muestra el proceso está nuevamente bajo control estadístico.

#### 3.2.3.2.4. Síntesis

Existe mayor dificultad de interpretación de los datos en la carta de Shewhart.

CUSUM da la mayor cantidad de alertas.

EWMA genera alertas más tempranas de desviaciones en el proceso.

Se ven comportamientos distintos en el proceso muy marcados en la carta CUSUM, con punto de inflexión en la muestra 61 aproximadamente.

El hormigón cumple mayoritariamente la resistencia especificada a 28 días y a partir de la muestra 64 se observa en la carta de Shewhart que existen muestras que no cumplen.

Al ver las cartas de CUSUM y EWMA, se observa que el proceso tiene dos períodos marcados con resistencia promedio distinta. El punto de inflexión, como se mencionó anteriormente, está en la muestra 61. Esto indica que el período analizado es probablemente un período en que se cambiaron dosificaciones y se trabajó en torno a valores objetivo distintos en la planta.

Debido a la cantidad de alertas que presenta el período evaluado, se concluye que existe mucha variación de la desviación estándar durante el período evaluado. A pesar de que la planta tiene una clasificación según la ACI de "Excelente", esto no se ve reflejado según los métodos de control.

3.2.3.3. Resultados HB30.0(90)20-12

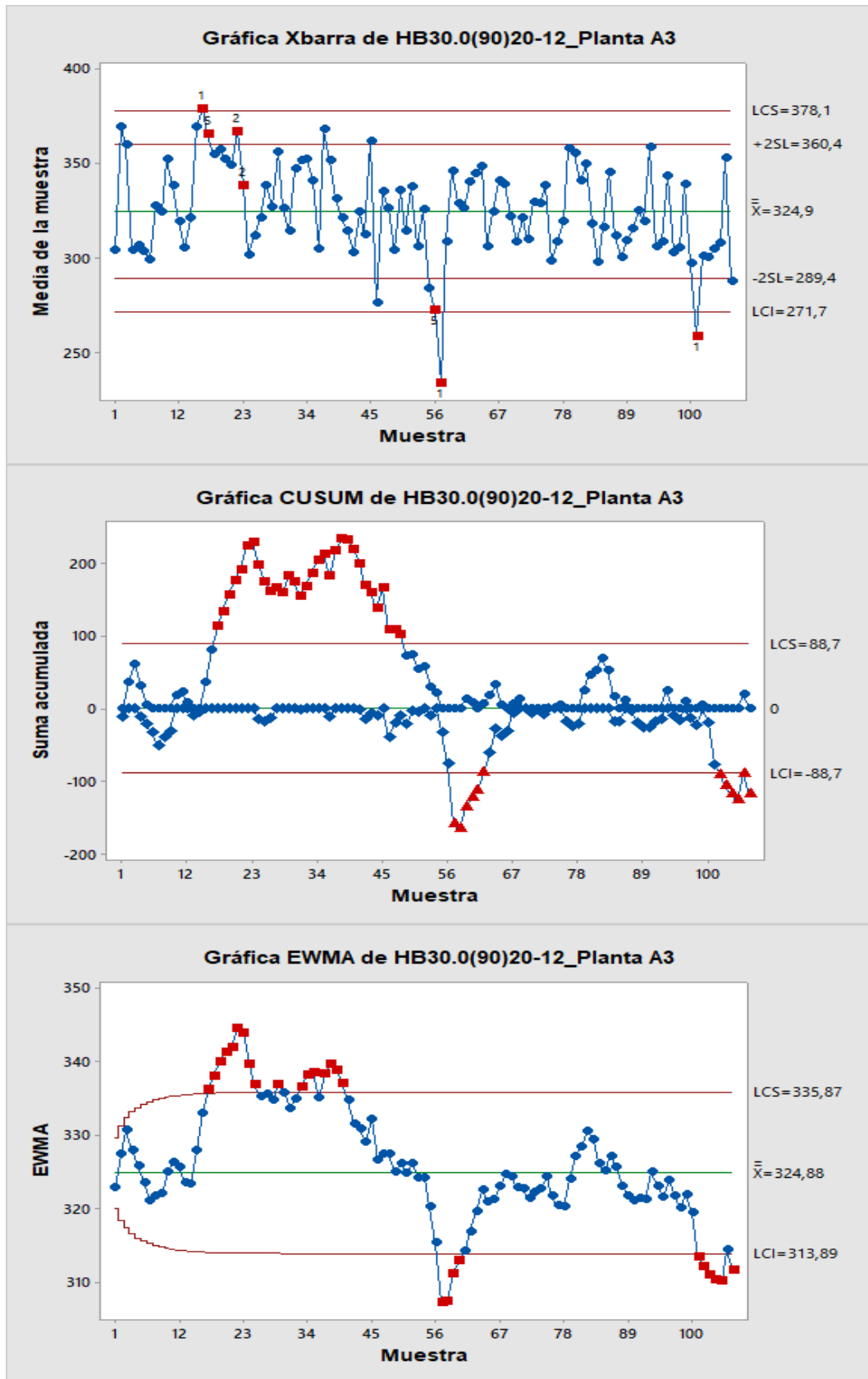


Gráfico 15: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-12, Planta A3.

### 3.2.3.3.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 15, se observa:

- Tres puntos a más de 3 desviaciones estándar de la media del período. El punto 16, sobre la resistencia media; el punto 57, bajo la resistencia media; y el punto 101 bajo la resistencia media. El proceso está fuera de control estadístico en estos puntos.
- En los puntos 22 y 23 se acumulan 8 muestra consecutivas de resistencias sobre la resistencia media del período. Debido a que no es un comportamiento aleatorio de las resistencias, el proceso está fuera de control estadístico.
- En los puntos 16 y 17 se alertan 2 de 3 resistencias sobre 2 desviaciones estándar.
- En los puntos 56 y 57, se alertan 2 de 3 resistencias bajo 2 desviaciones estándar.

### 3.2.3.3.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 15, se observa:

- Las resistencias oscilan en torno a cero hasta el punto 14, a partir del cual se comienza a desviar positivamente la media del proceso. Desde el punto 17 hasta el punto 48 el proceso está ya fuera de control estadístico.
- Entre los puntos 26 y 33 el proceso fluctúa en torno a una desviación de +170 kgf/cm<sup>2</sup>.
- A partir del punto 34 se acumulan desviaciones positivas en el proceso, llegando a aproximadamente 220 kgf/cm<sup>2</sup> en la muestra 39
- Desde la muestra 40 se acumulan principalmente desviaciones negativas respecto a la media del período, llegan a un peak mínimo en la muestra 58, donde ya los desvíos están por debajo de la línea de control inferior y por lo tanto el proceso está fuera de control estadístico.
- A partir de la muestra 59, se acumulan desviaciones positivas principalmente y el proceso vuelve a estar bajo control estadístico desde la muestra 63 hasta la muestra 100 donde las desviaciones fluctúan aleatoriamente en torno a cero.
- En la muestra 101 se genera un gran desvío negativo que indica que la media del proceso se está desviando y desde la muestra 102 hasta la 107 el proceso está fuera de control estadístico.

### 3.2.3.3.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 15, se observa:

- Las resistencias hasta la muestra 12 se encuentran bajo control. A partir de la muestra 14 se empieza a desviar la media y desde el punto 17 al 25 el proceso está fuera de control estadístico.
- Posteriormente, las resistencias medias fluctúan aproximadamente en torno al límite superior de control, con resistencias dentro bajo del límite de control y otras sobre el límite de control.

- A partir de la muestra 39, las resistencias decrecen y el proceso vuelve a un estado de control estadístico entre las muestras 46 y 54.
- En las muestras 55, 56 y 57 se produce un gran decrecimiento de las resistencias generando un gran cambio en la media del proceso. Las resistencias están fuera de control estadístico entre las muestras 57 y 60, aunque a partir de la muestra 58, se genera un crecimiento de las resistencias.
- Entre las muestras 61 y 100 el proceso está bajo control.
- Finalmente en la muestra 101 se genera una disminución en la media ponderada y el proceso queda fuera de control estadístico hasta la muestra 107, excepto la 106 que si se encuentra dentro de los límites.

#### 3.2.3.3.4. Síntesis

Los desvíos que alerta Shewhart, al ser puntuales, no permiten anticipar medidas para evitar que ocurran. Si bien están las alertas de patrones extraños en el proceso, estos no son fácilmente interpretables.

Los gráficos CUSUM y EWMA al ser “con memoria”, arrastran las alertas más allá de la resistencia puntual desviada. Por ejemplo, el desvío que se genera en la muestra 57 de Shewhart, que es una muestra puntual fuera de los límites, para CUSUM genera 5 alertas más posteriores a este desvío. Para el caso de EWMA, genera 4 alertas más.

CUSUM y EWMA dan alertas casi al mismo tiempo de las desviaciones del proceso pero las grandes desviaciones del proceso generan mucho más impacto en la carta CUSUM que en EWMA.

En las 3 cartas se observan grandes caídas de resistencias en pocas muestras sucesivas. La más pronunciada es la del período entre las muestras 54 y 57. En estos puntos existen causas asignables actuando en el proceso. Las 3 cartas muestran claramente estas desviaciones.

Para este grado de hormigón, se observa que la planta trabaja mucho más “ajustada”. Esto se refleja en el la media del proceso,  $324,88 \text{ kgf/cm}^2$  que es un poco más alta que la resistencia especificada para un HB30 que es  $300 \text{ kgf/cm}^2$  aproximadamente.

El proceso tiende a tener un comportamiento estable a partir de la muestra 67, pero de todas formas se observa que existen muchas variaciones en las resistencias a pesar de que el estándar de control en esta planta es “Excelente” según ACI.

3.2.3.4. Resultados HB35.0(90)20-10

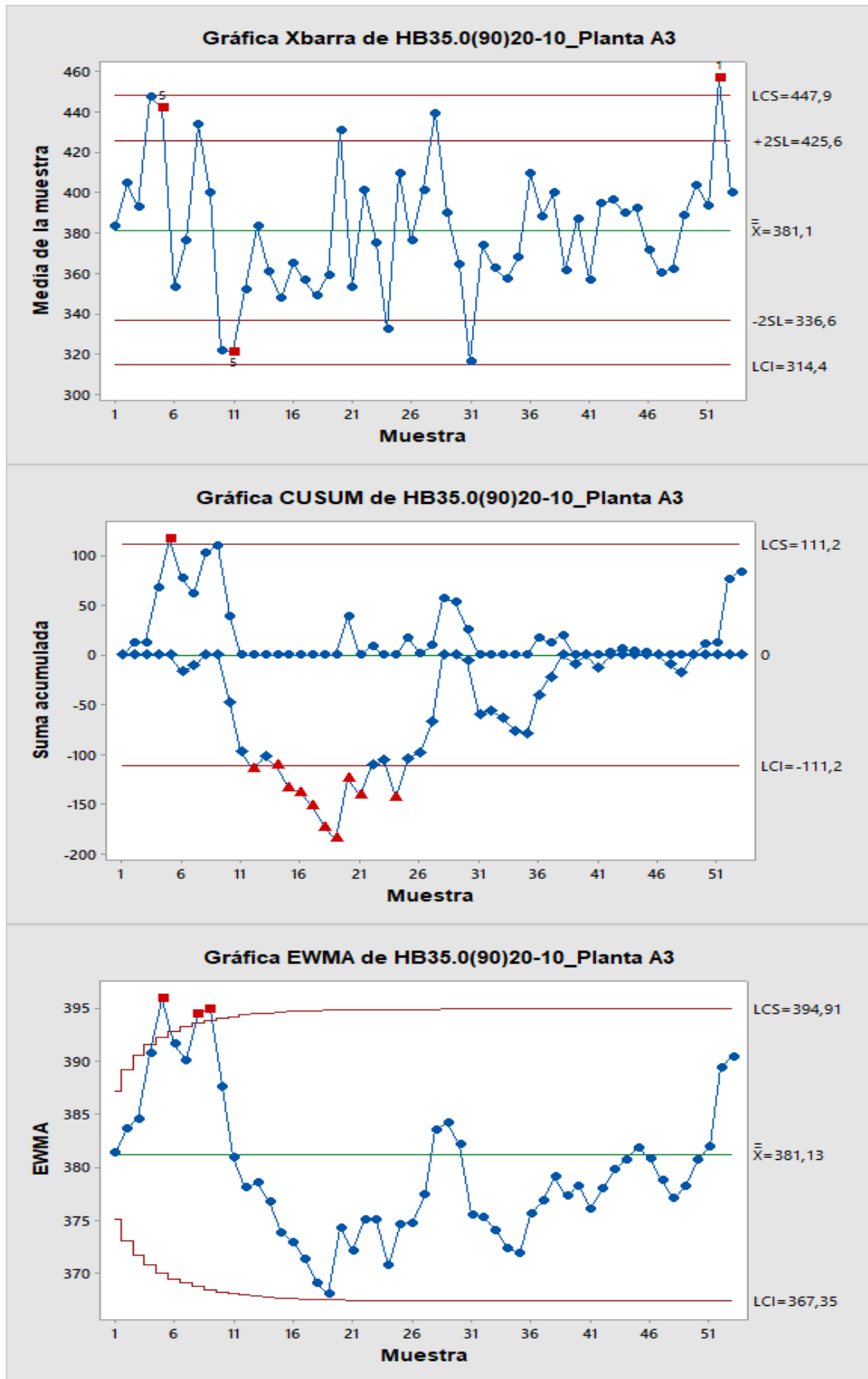


Gráfico 16: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta A3.



#### 3.2.3.4.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 16, se observa:

- Muestra 52 excede las 3 desviaciones estándar sobre la media del período. El proceso se encuentra fuera de control estadístico en este punto.
- En el punto 5 hay dos de tres resistencias sobre dos desviaciones estándar desde la Línea Central y en el punto 11, hay dos de 3 resistencias bajo dos desviaciones estándar desde la Línea Central. Debido a que no es un patrón de comportamiento aleatorio de las muestras, es posible que una causa asignable actúe en el proceso y esté fuera de control estadístico.

#### 3.2.3.4.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 16, se observa:

- Desvíos positivos sobre la línea de control  $H^+$  en el punto 5 y desvíos negativos bajo la línea de control  $H^-$  desde la muestra 12 hasta la muestra 24, excepto las muestras 13, 22 y 23 que están dentro de los límites de control.
- Desde la muestra 25 hasta la muestra 53 se observa una tendencia de crecimiento de la media del proceso, teniendo un comportamiento muy controlado entre los puntos 39 y 51.

#### 3.2.3.4.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 16, se observa:

- Puntos 5, 8 y 9 más allá de 2,7 desviaciones estándar de la línea central. Proceso fuera de control estadístico en estos puntos.
- A partir del punto 10 la media disminuye hasta la muestra 19 y a partir de la muestra 20 la resistencia promedio se incrementa hasta el final del período. El proceso se mantiene bajo control estadístico en este período.

#### 3.2.3.4.4. Síntesis

Las 3 cartas presentan pocas alertas. Esto implica que el proceso tiene un buen sistema de control, lo que se suma a una baja desviación estándar de las resistencias.

CUSUM es la carta que presenta un mayor número de alertas.

Las 3 cartas alertan en la muestra 5 que el proceso está fuera de control, aunque gráficamente en Shewhart no se aprecia de forma tan clara.

Entre la muestra 11 y la 26 se observa en las 3 cartas que la media es más baja que la media del período y en particular la carta de Shewhart muestra resistencias bajo la resistencia especificada para un HB35. El hormigón podría ser rechazado por el cliente en este período.

Las resistencias presentan variabilidad en el principio del período, pero luego se observa un proceso estable. Esto es coherente con el estándar de control ACI de esta planta que es "Muy Bueno".

#### 3.2.4. Resultados Hormigones Planta B1

A continuación se presentan los resultados obtenidos al aplicar los métodos de control a los hormigones HB20, HB25, HB30 y HB35 de la Planta hormigonera B1.

3.2.4.1. Resultados HB20.0(90)20-10

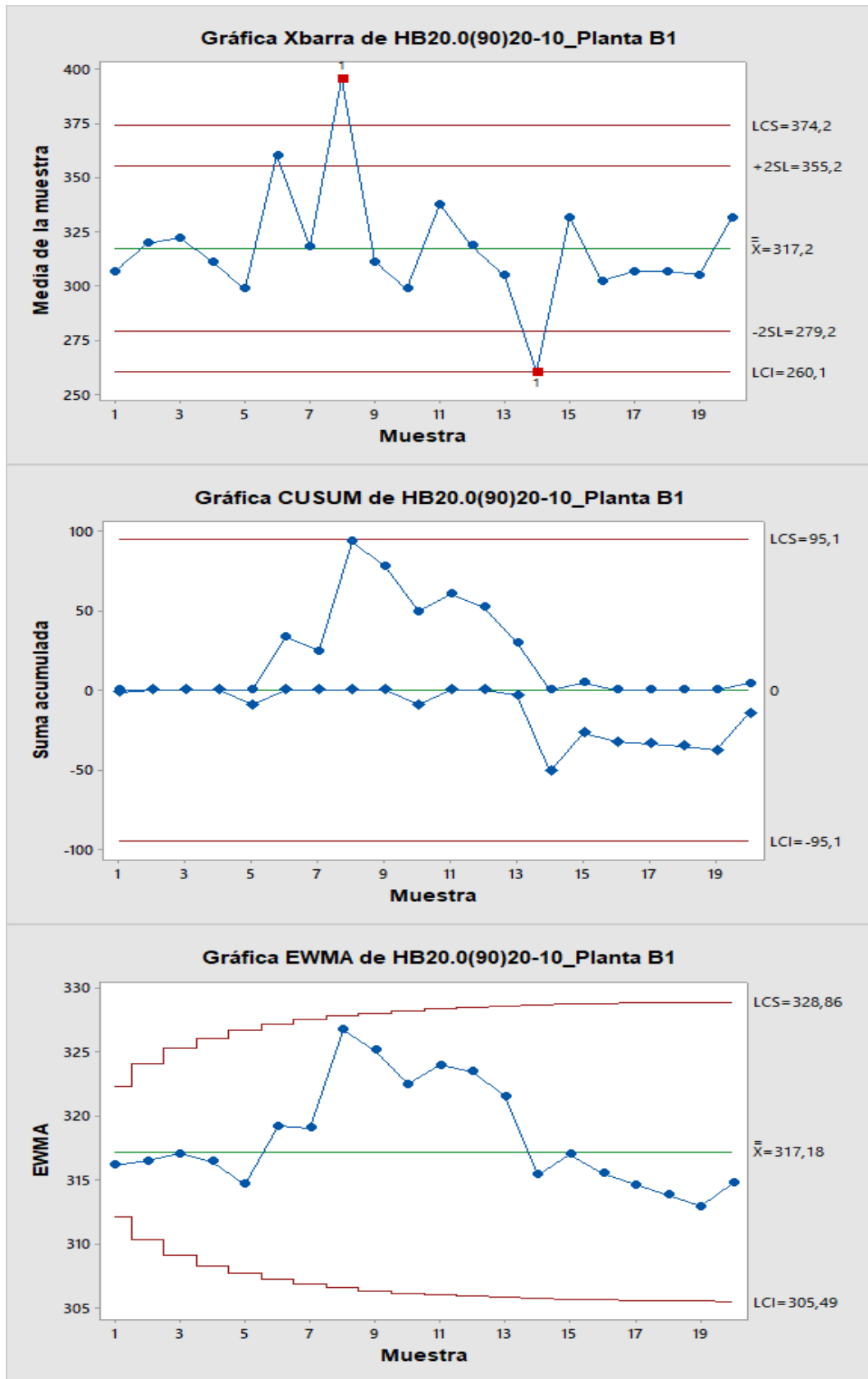


Gráfico 17: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta B1.

#### 3.2.4.1.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 17, se observa:

- El punto 8 se encuentra a más de 3 desviaciones estándar sobre la media del proceso. El punto 14 se encuentra a 3 desviaciones estándar bajo la media del proceso. En estos puntos, el proceso se encuentra fuera de control estadístico.

#### 3.2.4.1.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 17, se observa:

- Una gran desviación desde el punto 7 al punto 8, y un desvío negativo desde la muestra 13 a la 14, pero sin que esto genere una alerta en la carta.

#### 3.2.4.1.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 17, se observa:

- Un aumento de la resistencia ponderada desde la muestra 7 a la 8, pero sin que esto implique una alerta en la carta.

#### 3.2.4.1.4. Síntesis

Shewhart detecta los grandes desvíos puntuales, pues tiene un buen desempeño detectando cambios de 2,5 desviaciones estándar o más. Sin embargo ni CUSUM ni EWMA logran alertar estos cambios, puesto que necesitan más muestras para alertar grandes desvíos en el proceso y en este caso son pocas las muestras disponibles para el hormigón analizado.

El hormigón cumple la resistencia especificada en todas las muestras consideradas pues se trabaja en una media muy superior a la resistencia requerida según la desviación estándar de las resistencias.

El estándar de control según la ACI es “Excelente” para las resistencias de este hormigón en esta planta, lo que en este caso es coherente con las pocas alertas que arrojan los métodos.

3.2.4.2. Resultados HB25.0(90)20-10

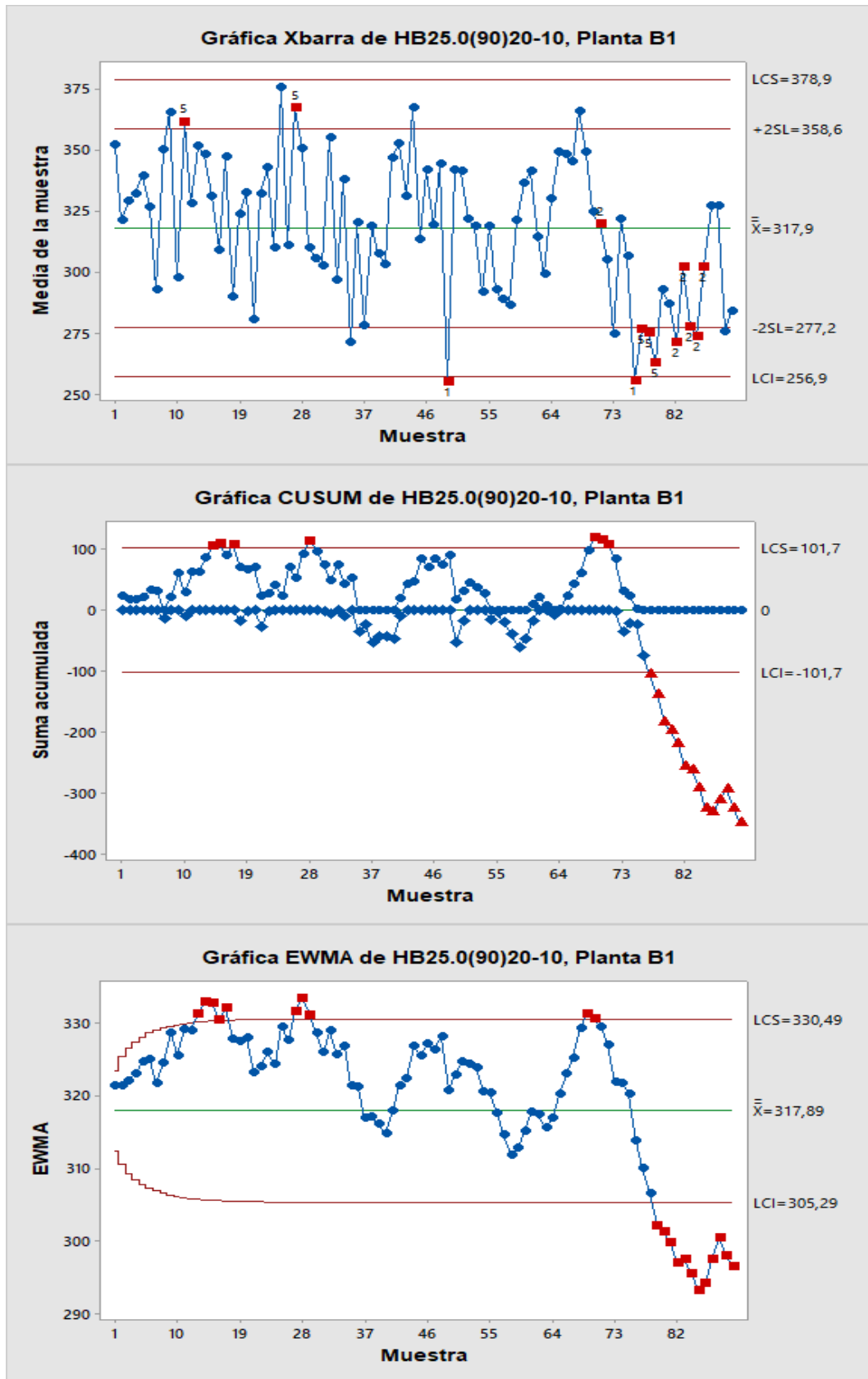


Gráfico 18: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta B1.

#### 3.2.4.2.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 18, se observa:

- Los puntos 49 y 76 están más allá de 3 desviaciones estándar bajo la media el período.
- En el punto 71 se tienen 8 muestras consecutivas con resistencias sobre la media del período.
- En los puntos 82 al 86 se tienen 8 muestras consecutivas con resistencias bajo la media del período.
- En las muestras 11 y 27 se tienen 2 de 3 resistencias más allá de 2 desviaciones estándar sobre la media de período.
- En las muestras 77, 78 y 70 se tienen 2 de 3 muestras más allá de 2 desviaciones estándar bajo la media del período.
- En general las resistencias están dentro de los límites de control. Sólo al final se ven más alertas en el proceso, donde éste opera bajo la media del período. La media de las 13 últimas muestras es aproximadamente  $282 \text{ kgf/cm}^2$  por debajo de la media del período que es  $317,9 \text{ kgf/cm}^2$ .

#### 3.2.4.2.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 18, se observa:

- El proceso para este grado de hormigón se encuentra bajo control estadístico durante la mayoría del período. Desde la muestra 77 hasta la muestra 90 el proceso presenta grandes cambios negativos en torno a la resistencia media. En estos puntos el proceso está fuera de control estadístico y por lo tanto la media se ha desviado en más de 1 desviación estándar.
- Existen peaks de desviaciones positivas en donde el proceso está fuera de control estadístico pero durante períodos cortos: Desde la muestra 14 a la 17, muestra 28 y desde la muestra 69 a la 71.

#### 3.2.4.2.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 18, se observa:

- Al igual que en CUSUM, las resistencias del proceso están funcionando dentro de los límites de control establecidas durante casi todo el período considerado. Es a partir de la muestra 79 hasta la 90 que se genera el cambio en la media del período y el proceso se encuentra fuera de control estadístico para la resistencia promedio considerada.
- Existen peaks de resistencias altas para el promedio del período en los puntos 13 al 17, 27 al 29 y 69, 70. En estas muestras el proceso está fuera de control estadístico.

#### 3.2.4.2.4. Síntesis

CUSUM da la mayor cantidad de alertas y además es el método de control que más temprano avisa de que el proceso se va a descontrolar.

El hormigón cumple en su totalidad con la resistencia especificada para un H25. La planta trabaja en promedio muy por sobre  $250 \text{ kgf/cm}^2$ , lo que genera que el hormigón cumpla, pero se esté incurriendo en costos innecesario. Hacia el final del período se ve la disminución de la resistencia y se trabaja en torno a una resistencia media inferior a la del período completo. De ahí las alertas del proceso.

El estándar de control para esta planta es “Muy Bueno”, lo que es coherente con lo mostrado en el gráfico 18 donde se ve un proceso en su mayoría estable y con pocas alertas.

3.2.4.3. Resultados HB30.0(90)20-10

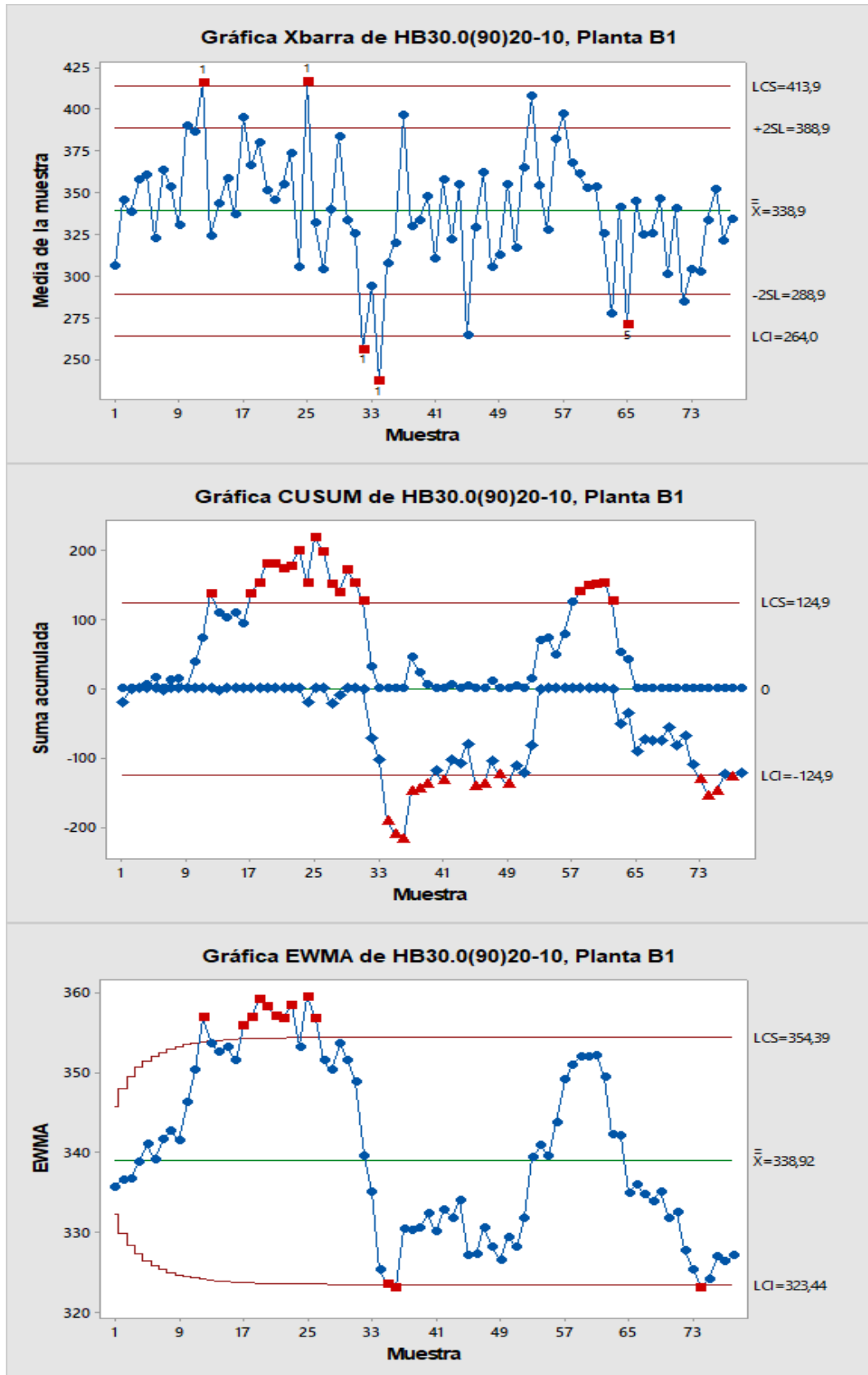


Gráfico 19: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-10, Planta B1.



#### 3.2.4.3.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 19, se observa:

- Los puntos 12 y 25 se encuentran más allá de 3 desviaciones estándar sobre la media del período. El proceso está fuera de control en estos puntos.
- Los puntos 32 y 34 se encuentran más allá de 3 desviaciones estándar bajo la media del período. El proceso está fuera de control en estos puntos.
- El punto 12 es el segundo punto de 3 que se encuentran sobre dos desviaciones de la media del período. Los puntos 34 y 65 siguen el mismo patrón, pero están bajo la media del período.
- En general, durante casi todo el período se ve un comportamiento estable, excepto al final, desde la muestra 62 donde se aprecia que la media del período disminuye.

#### 3.2.4.3.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 19, se observa:

- En la muestra 12 el proceso está fuera de control.
- Desde la muestra 13 a la 16, el proceso tiene desviaciones positivas, pero está dentro de los límites de control.
- Desde la muestra 17 hasta la muestra 31 el proceso está fuera de control estadístico, pero con desviaciones positivas respecto al valor promedio objetivo.
- Las muestras 32 y 33 están bajo control estadístico, pero siguen una tendencia de desviaciones negativas.
- De la muestra 35 hasta la 49, los desvíos acumulados fluctúan en torno a la línea de control inferior, con muestras que quedan bajo control estadístico y otras fuera de control estadístico según CUSUM.
- Desde la muestra 58 a la 61 el proceso está fuera de control estadístico pero con desviaciones positivas respecto a la media objetivo.
- Desde la muestra 73 a la 77 se encuentra el proceso fuera de control estadístico, pero con desvíos negativos bajo el límite de control inferior.

#### 3.2.4.3.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 19, se observa:

- Muestra 12 y desde la 18 hasta la 26, más allá de 2,7 desviaciones estándar sobre la media. Proceso fuera de control estadístico.
- Muestras 35, 36 y 74 fuera de control estadístico.

#### 3.2.4.3.4. Síntesis

La carta Shewhart no muestra qué tan descontrolado está el proceso. Al no detectar desvíos pequeños, no se ven las tendencias que presentan EWMA y sobre todo CUSUM, en que se advierte un proceso cíclico (sobre y bajo la resistencia media) pero fuera de control estadístico en casi todo el período.

Si bien la mayoría de las resistencias cumplen la especificada, existen varios puntos bajo esa resistencia. El estándar de control es bueno, pero al ser el proceso cíclico, con aumentos y disminuciones en la desviación estándar, se levantan muchas alertas en casi todo el período.

3.2.4.4. Resultados HB35.0(90)20-10

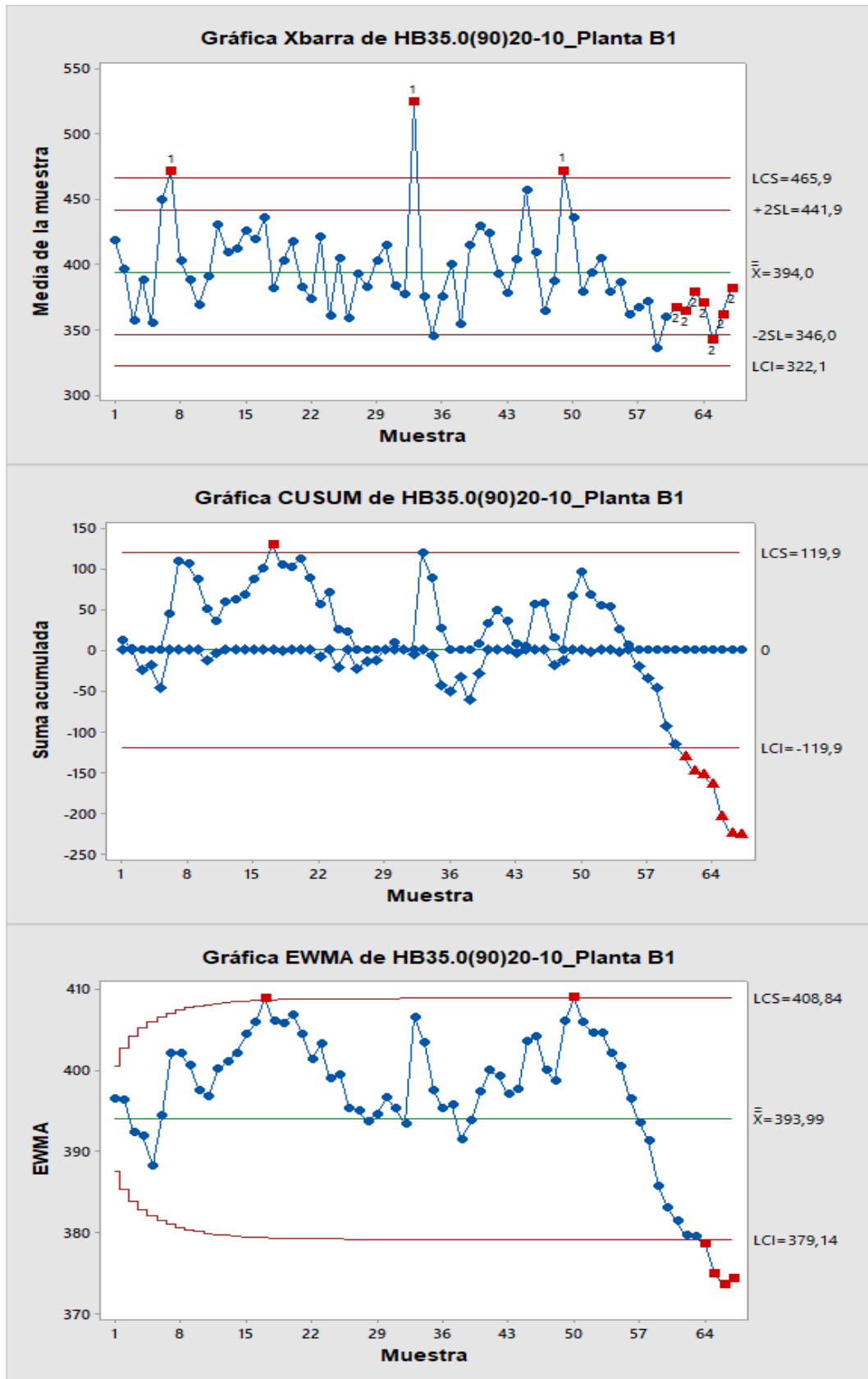


Gráfico 20: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta B1.

#### 3.2.4.4.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 20, se observa:

- Los puntos 7, 33 y 49 están más allá de 3 desviaciones estándar sobre la media del proceso. El proceso está fuera de control estadístico en estos puntos.
- En la muestra 7 se acumulan 2 de 3 resistencias más allá de dos desviaciones estándar sobre la media del proceso.
- El proceso tiene un decaimiento en la media. a partir de la muestra 54.
- Desde la muestra 61 hasta la muestra 67 se tiene un comportamiento no aleatorio de las resistencias, acumulándose 8 resistencias consecutivas bajo la media del período. En este período se tiene una resistencia promedio de 275 [kgf/cm<sup>2</sup>], inferior a la media global que es de 394,0 [kgf/cm<sup>2</sup>].

#### 3.2.4.4.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 20, se observa:

- El proceso se encuentra bajo control durante gran parte del período considerado.
- En el punto 17, las resistencias acumuladas exceden el límite superior  $H^+$ , por lo que el proceso está fuera de control estadístico en este punto.
- Hasta la muestra 58 el proceso se mantiene bajo control estadístico, pero a partir de la muestra 59 se observa una tendencia de desviaciones negativas sucesivas que indican que el proceso se va a descontrolar.
- Desde la muestra 61 hasta la muestra 67 el proceso está fuera de control estadístico y se acumulan sólo desviaciones negativas bajo el límite  $H^-$  hasta el final del período.

#### 3.2.4.4.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 20, se observa:

- Las medias ponderadas de resistencias del proceso están durante casi todo el período bajo control estadístico, pero fluctuando sobre la resistencia objetivo de 393,99 kgf/cm<sup>2</sup>.
- En los puntos 17 y 50 las resistencias exceden el límite de control superior, a más de 2,7 desviaciones estándar. El proceso está fuera de control estadístico en estos puntos.
- A partir de la muestra 59 se observa un decrecimiento en las resistencias del hormigón.
- Finalmente a partir de la muestra 64 y hasta el final del período, el proceso se encuentra fuera de control estadístico, bajo la resistencia promedio.

El punto 33 es un punto discordante, por lo tanto debe ser eliminado del análisis puesto que puede generar errores en las alertas para las cartas de control.

Eliminando el punto 33, las cartas de control gráficas quedan como se muestra en el gráfico 21. Cambia la media del proceso a  $392,02 \text{ kgf/cm}^2$ , la desviación estándar a  $30,02 \text{ kgf/cm}^2$  y la resistencia requerida a  $388,49 \text{ kgf/cm}^2$ . Con la nueva desviación estándar y de acuerdo a la tabla 5, el estándar de control ahora es “Muy Bueno” para este hormigón y planta.

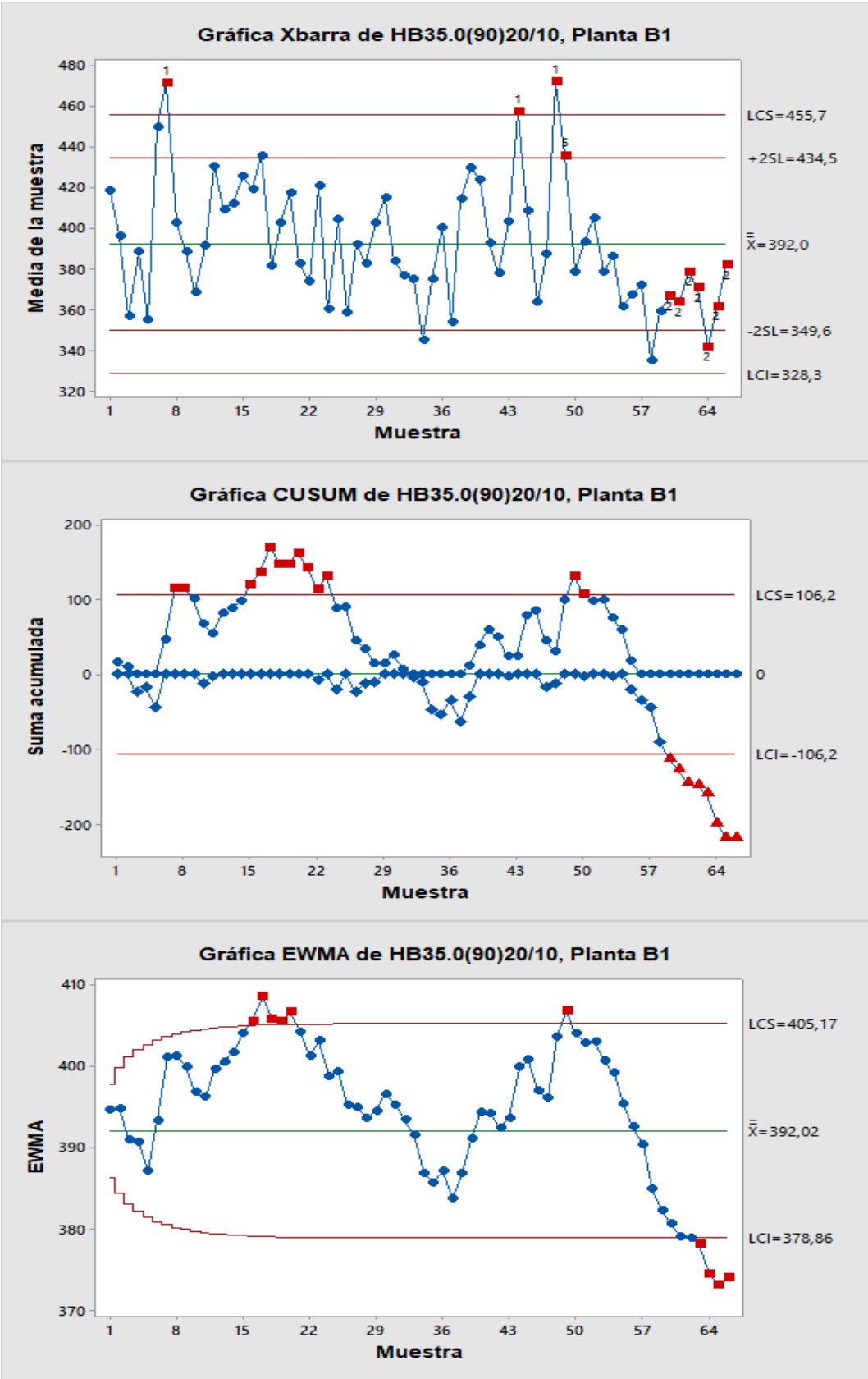


Gráfico 21: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta B1, datos depurados.

#### 3.2.4.4.4. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 21, se observa:

- 3 muestras más allá de 3 desviaciones estándar sobre la media del proceso; muestra 7, 45 y 48.
- Desde la muestra 60 hasta la muestra 66 se tienen más de 8 resistencias bajas 2 desviaciones estándar de la media, lo que indica que el proceso está fuera de control estadístico.

#### 3.2.4.4.5. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 21, se observa:

- El proceso trabaja en resistencias sobre la resistencia promedio del período en general, excepto en la parte central del período y hacia el final donde se ven desviaciones acumuladas bajo la media que dejan el proceso fuera de control estadístico (desde la muestra 59 hasta el final del proceso).
- En las muestras 7 y 8; desde la muestra 15 hasta la muestra 23; y en las muestras 49 y 50, el proceso está fuera de control estadístico sobre el límite de control superior.

#### 3.2.4.4.6. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 21, se observa:

- Desde la muestra 16 hasta la muestra 20, las sumas ponderadas están sobre el límite de control superior.
- Desde la muestra 20 hasta la muestra 37, el proceso presenta una baja en la resistencia lo que se visualiza en una disminución constante de EWMA, sin embargo no se excede el límite de control inferior.
- A partir de la muestra 38 aumenta EWMA y en la muestra 50 el proceso excede el límite de control superior, por lo tanto está fuera de control estadístico.
- Finalmente se genera una baja en las resistencias lo que implica que desde la muestra 63 hasta la muestra 66 el proceso esté fuera de control estadístico, bajo el límite de control inferior.

#### 3.2.4.4.7. Síntesis

EWMA y CUSUM tienen un comportamiento similar, indicando alertas o tendencias de desvíos del proceso en las mismas muestras mientras Shewhart tiene un comportamiento levemente distinto.

La diferencia en las alertas de Shewhart respecto de CUSUM y EWMA, pueden explicarse también por el punto 33, que es un punto discordante y escapa a la tendencia de las resistencias de forma abrupta.

En la situación de datos depurados, las 3 cartas e control indican alertas de que el proceso está fuera de control estadístico en períodos similares.

CUSUM es la carta que presenta más alertas en el proceso. Esto se debe a la disminución de la media y la desviación, que modifican los límites de control y ahora puntos que en la situación inicial estaban dentro de los límites de control, quedan fuera. Inicialmente presentaba sólo un período de alertas de desviaciones que excedían el límite de control  $H^+$ . En este nuevo escenario, son 3 los períodos de desviaciones sobre  $H^+$ : muestras 7 y 8, desde la muestra 15 hasta la muestra 23 y en las muestras 49 y 50.

A pesar de que el estándar de control mejoró respecto de la situación inicial, el proceso en general presenta más alertas. Esto se explica porque los parámetros de control son más estrictos en este nuevo escenario, al no existir la resistencia discordante que aumentaba el promedio y la desviación del proceso.

El proceso a priori tiene coherencia en cuanto al estándar de control “Muy Bueno” y las desviaciones de resistencias mostradas en el gráfico 21.

### 3.2.5. Resultados Hormigones Planta B2

A continuación se presentan los resultados obtenidos al aplicar los métodos de control a los hormigones HB20, HB25, HB30 y HB35 de la Planta hormigonera B2.



3.2.5.1. Resultados HB20.0(90)20-10

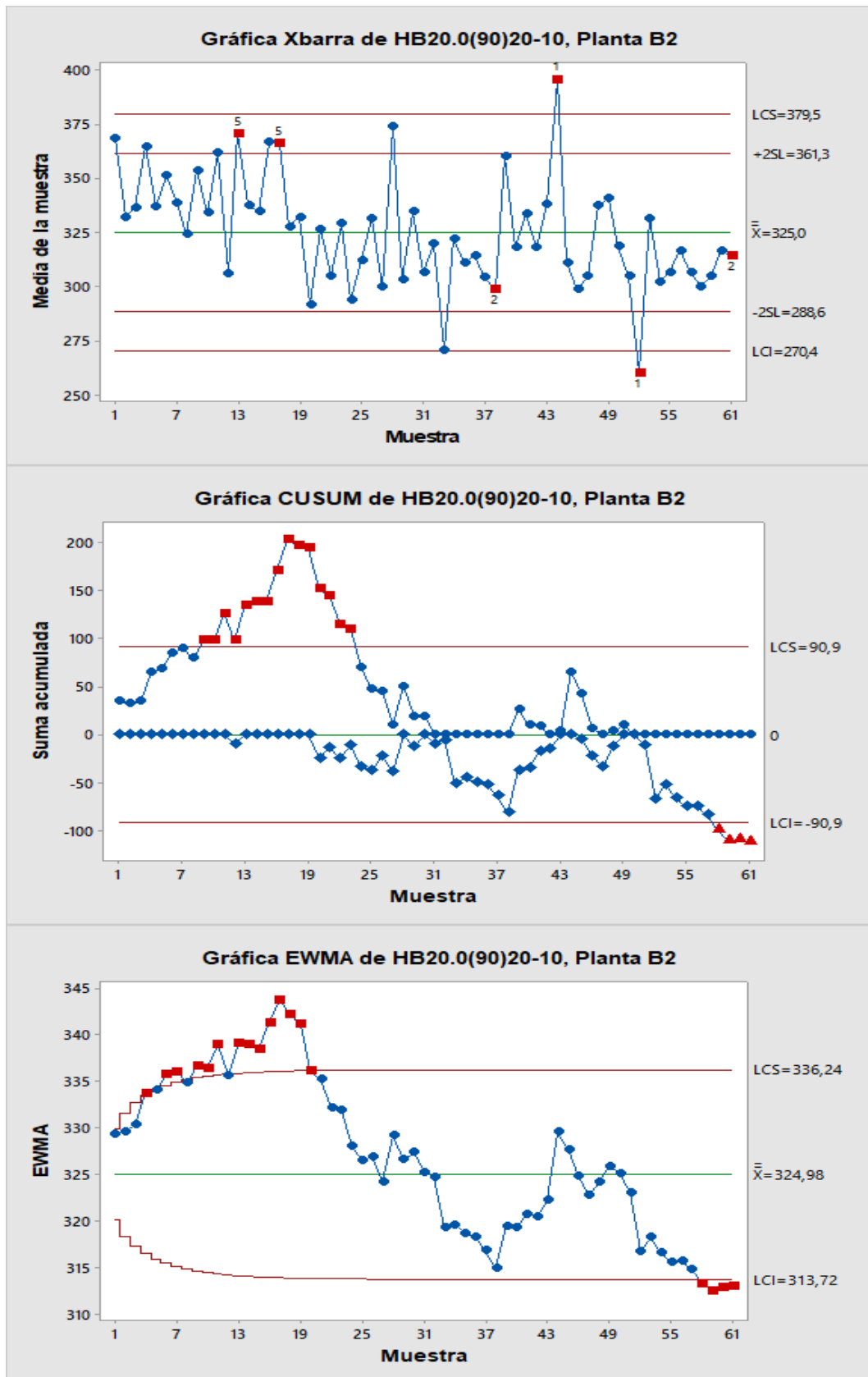


Gráfico 22: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta B2.

### 3.2.5.1.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 22, se observa:

- Desde el inicio hasta la muestra 19 el proceso tiene una media aproximada de 340 kgf/cm<sup>2</sup>, superior a la media del período total considerado.
- A partir de la muestra 19, el promedio del proceso es aproximadamente 315 kgf/cm<sup>2</sup>, inferior a la media del período total.
- El punto 44 está a más de 3 desviaciones estándar sobre la media del proceso, por lo tanto en este punto el proceso está fuera de control estadístico y existe una causa asignable actuando que debe ser corregida.
- El punto 52 está a más de 3 desviaciones estándar bajo la media del proceso. En este punto está fuera de control estadístico.
- En el punto 38 y 61 se acumulan 8 resistencias bajo la línea central. La resistencia media en estos períodos es inferior a la media del proceso total.
- En las muestras 13 y 17 se tienen 2 de 3 resistencias sobre dos desviaciones estándar respecto a la media, lo que indica que el proceso está fuera de control.

### 3.2.5.1.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 22, se observa:

- El proceso comienza a desviarse positivamente en la muestra 4.
- Desde la muestra 9 a la 17 el proceso está fuera de control estadístico sobre la línea de control H<sup>+</sup>. En este período se observan desvíos positivos respecto a la línea cero.
- Desde la muestra 18 hasta la muestra 23 se producen desvíos negativos respecto a la resistencia objetivo del proceso.
- Desde la muestra 24 hasta la muestra 57 el proceso se encuentra bajo control estadístico. Si bien existen desvíos en torno a cero, todos están dentro de los límites de control y fluctúan aleatoriamente.
- Desde la muestra 58 hasta la muestra 61 el proceso se desvía por debajo del límite de control H<sup>-</sup>. Se debe notar que estas desviaciones se anuncian previamente con el desvío desde la muestra 51 a la 52.

### 3.2.5.1.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 22, se observa:

- Hasta la muestra 19 el proceso fluctúa en torno a la línea de control superior, con muestras que exceden el límite y otras que quedan bajo control estadístico.
- Desde la muestra 20 se vuelve a un estado de control estadístico hasta la muestra 57. En este período, desde la muestra 21 a la 38 se observa un decrecimiento en las resistencias del proceso. A partir de la muestra 39 a la 44, las resistencias aumentan, pero desde la muestra 45 hasta el final del proceso las resistencias nuevamente disminuyen.

#### 3.2.5.1.4. Síntesis

Existe coherencia entre las alertas y desviaciones mostradas en el gráfico.

CUSUM es el método que indica mayor cantidad de alertas en el período analizado.

EWMA señala la primera alerta al inicio del proceso, en la muestra 4.

Entre las muestras 31 y 51 se observa que el proceso es estable de acuerdo a la media considerada.

El gran desvío que se observa en la carta Shewhart para la muestra 52, condiciona los estados fuera de control que se observan hacia el final del período para las cartas EWMA y CUSUM. Esta resistencia, si bien está fuera de la tendencia del proceso en general, viene precedida por aumentos consecutivos de las resistencias antecesoras.

Respecto a la resistencia del hormigón, la planta sobredimensiona la dosificación trabajando en una resistencia promedio de  $324,98 \text{ kgf/cm}^2$  muy superior a la resistencia requerida dada por la estadística del producto de  $232,96 \text{ kgf/cm}^2$  y muy superior también a la resistencia especificada para el grado que es aproximadamente  $200 \text{ kgf/cm}^2$ .

La planta hormigonera cumple con el desempeño que requiere el producto, pero sin optimizar los costos de producción.

El estándar de control de este hormigón es "Excelente" lo que guarda relación en lo mostrado en el gráfico 22 que muestra en general un proceso estable y con pocas desviaciones.

3.2.5.2. Resultados HB25.0(90)20-10

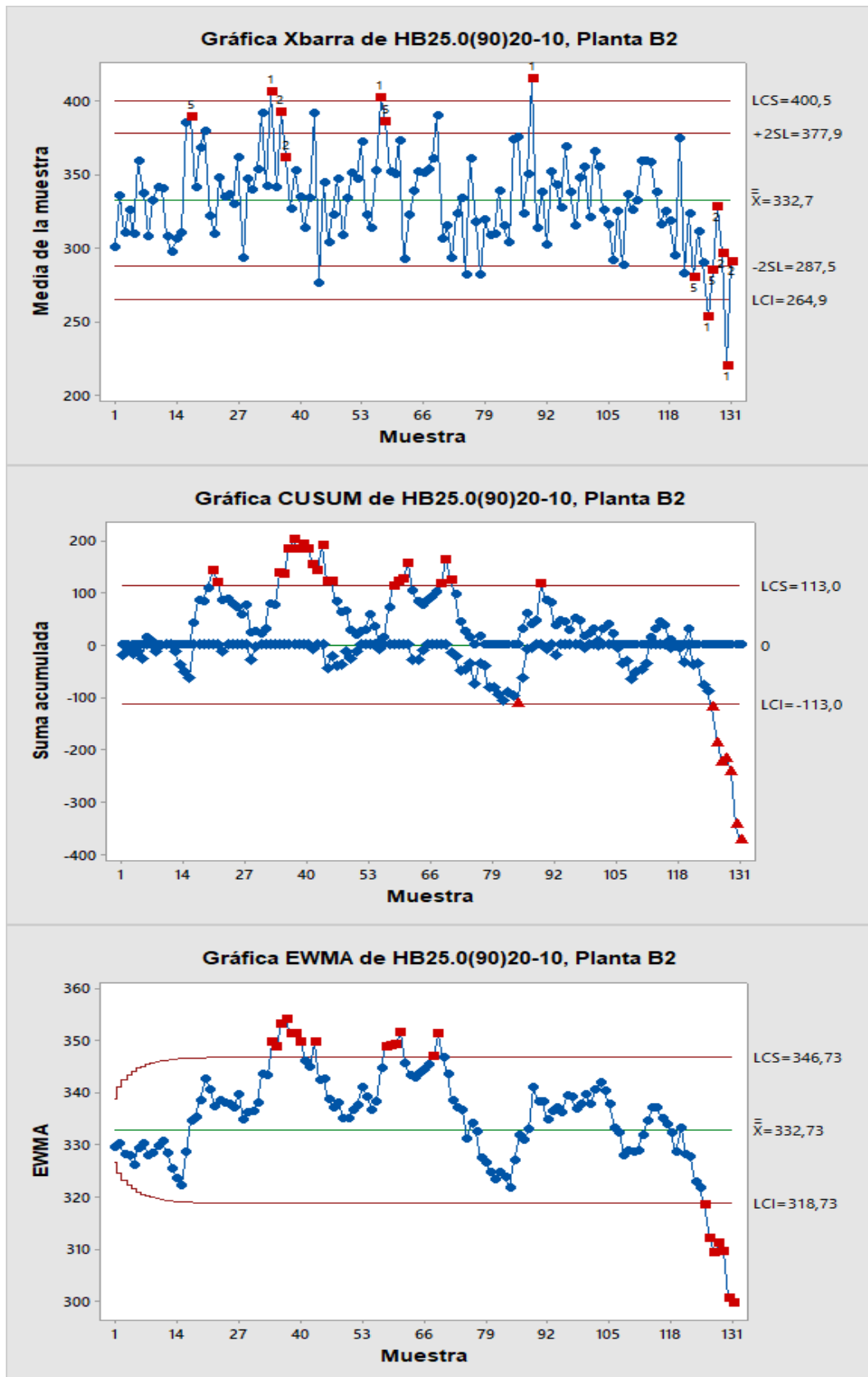


Gráfico 23: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta B2.

### 3.2.5.2.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 23, se observa:

- El proceso en general se mantiene dentro de control durante casi todo el período analizado. Sólo al final, a partir de la muestra 118, se observa una baja en las resistencias promedio.
- En los puntos 34, 57 y 89, las resistencias medias están sobre la línea de control superior, más allá de 3 desviaciones estándar. El proceso en este punto se encuentra fuera de control estadístico.
- En las muestras 126 y 130, las resistencias medias están bajo la línea de control inferior, más allá de 3 desviaciones estándar, por lo tanto el proceso se encuentra fuera de control estadístico.
- En las resistencias de las muestras 36 y 37, se tienen 8 resistencias consecutivas sobre la línea central del proceso. Este patrón no aleatorio alerta que el proceso está trabajando en una resistencia superior a la promedio y por lo tanto se encuentra fuera de control estadístico respecto al promedio del período.
- Entre los puntos 128 y 131, se genera el mismo patrón descrito anteriormente, pero las resistencias en este caso están trabajando bajo la resistencia media del proceso. En este período hay resistencias bajo la especificada para el hormigón HB25 (muestra 130).
- En el punto 17 hay dos de 3 resistencias sobre 2 desviaciones estándar respecto a la línea central. Este mismo patrón se repite en las muestras 34, 36 y 58, lo que reafirma que el proceso está fuera de control estadístico en estas muestras.
- En las muestras 123 y 127 hay dos de 3 resistencias bajo 2 desviaciones estándar respecto a la línea central. Esto también reafirma que en este período decae la resistencia media de las muestras.

### 3.2.5.2.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 23, se observa:

- Proceso bajo control estadístico durante casi todo el período evaluado. Existen diversas alertas, pero sólo al final, en la muestra 123 se genera una desviación que anticipa que el proceso estará fuera de control estadístico en las muestras siguientes.
- El proceso presenta mayoritariamente desviaciones positivas respecto a cero.
- Desde la muestra 15 la media del proceso comienza a tener desvíos positivos y en los puntos 20 y 21 las desviaciones exceden la línea de control superior  $H^+$  y por lo tanto el proceso está fuera de control estadístico en este punto.
- Posteriormente, se desvía negativamente la media del proceso y se vuelve al estado bajo control estadístico hasta la muestra 33.
- A partir de la muestra 32 la media del proceso se comienza a desviar y desde la muestra 34 hasta la muestra 45, las desviaciones de la media exceden el límite  $H^+$ , por lo tanto el proceso está fuera de control estadístico.
- A partir de la muestra 46, la media del proceso disminuye y el proceso está bajo control hasta la muestra 57.

- A partir de la muestra 57 se generan grandes desviaciones positivas en la media del proceso, y a partir de la muestra 58 a la 61, las desviaciones están sobre el límite de control superior.
- Las desviaciones vuelven a estar en control hasta la muestra 67 y a partir de la 68 hasta la muestra 70, vuelven a exceder el límite superior.
- A partir de la muestra 71 se observan una serie de desviaciones negativas en la media del proceso, que lo hacen decaer bajo la línea de control inferior en la muestra 84.
- Rápidamente se genera un aumento sostenido de la media y en el punto 89 el proceso se encuentra fuera de control estadístico, pero sobre la línea de control superior.
- A partir del punto 90 el proceso se mantiene bajo control estadístico, con resistencias dentro de los parámetros de control establecidos y sin desviaciones muy grandes en la media. Esto se mantiene hasta la muestra 122, puesto que como se indicó en el primer punto, a partir de la muestra 123 se evidencia un desvío que finalmente hace disminuir la media del proceso y desde la muestra 125 hasta la 131, el proceso está fuera de control estadístico.

#### 3.2.5.2.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 23, se observa:

- En general el proceso está bajo control estadístico y durante gran parte del período analizado los valores de EWMA están sobre la media del proceso.
- Una desviación positiva en el punto 32.
- Desde la muestra 34 hasta la muestra 40, el proceso está fuera de control estadístico. Se excede el límite superior más allá de 2,7 desviaciones estándar de la línea central.
- Desvíos que hacen decrecer la media en los puntos 41 y 42.
- Desvío en el punto 43 que excede el límite de control superior. Proceso fuera de control estadístico.
- Desde la muestra 44 hasta la muestra 57, el proceso está bajo control, pero sobre la línea central.
- Desde la muestra 58 hasta muestra 61, el proceso se encuentra fuera de control estadístico.
- Entre las muestras 62 y 67 el proceso tiene desvíos que lo acercan a la línea central, pero luego nuevamente se desvían hacia la línea de control superior.
- En las muestras 68 y 69 el proceso está fuera de control estadístico más allá de 2,7 desviaciones estándar sobre la línea central.
- Desde la muestra 70 hasta la muestra 84, la media del proceso decrece y luego crece desde la muestra 85 a la 89.
- Desde la muestra 90 hasta la 105, el proceso fluctúa en torno a una resistencia media de 338 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Desde el punto 106 al 123 el proceso fluctúa en torno a la línea central y finalmente desde el punto 125 hasta el 131 se encuentra fuera de control estadístico bajo la línea de control inferior.

#### 3.2.5.2.4. Síntesis

CUSUM indica mayor cantidad de alertas en el proceso.

Las 3 cartas son coherente en indicar las alertas en períodos similares, pero CUSUM y EWMA son de más fácil y rápida interpretación.

Respecto a la calidad del hormigón, se observan variadas alertas, pero la mayoría son para resistencias que exceden los límites superiores, es decir, el hormigón cumple la resistencia especificada, excepto en la muestra 131 que se observa en Shewhart.

De acuerdo a la clasificación ACI, esta planta tiene un estándar de control “Muy Bueno”. Si bien el proceso se encuentra en muchos puntos fuera de control estadístico, se observa que estos períodos tienden a corregirse en las resistencias sucesivas, acercando los puntos graficados a la línea central de las cartas. Lo anterior se cumple durante casi todo el período considerado, excepto al final en que el proceso se desvía por debajo de las líneas de control inferior y no se observa una mejora en las tendencias de las resistencias.

La planta puede mejorar la calidad del proceso y sobre todo trabajar para resistencias menores y así optimizar los costos de producción.

3.2.5.3. Resultados HB30.0(90)20-10

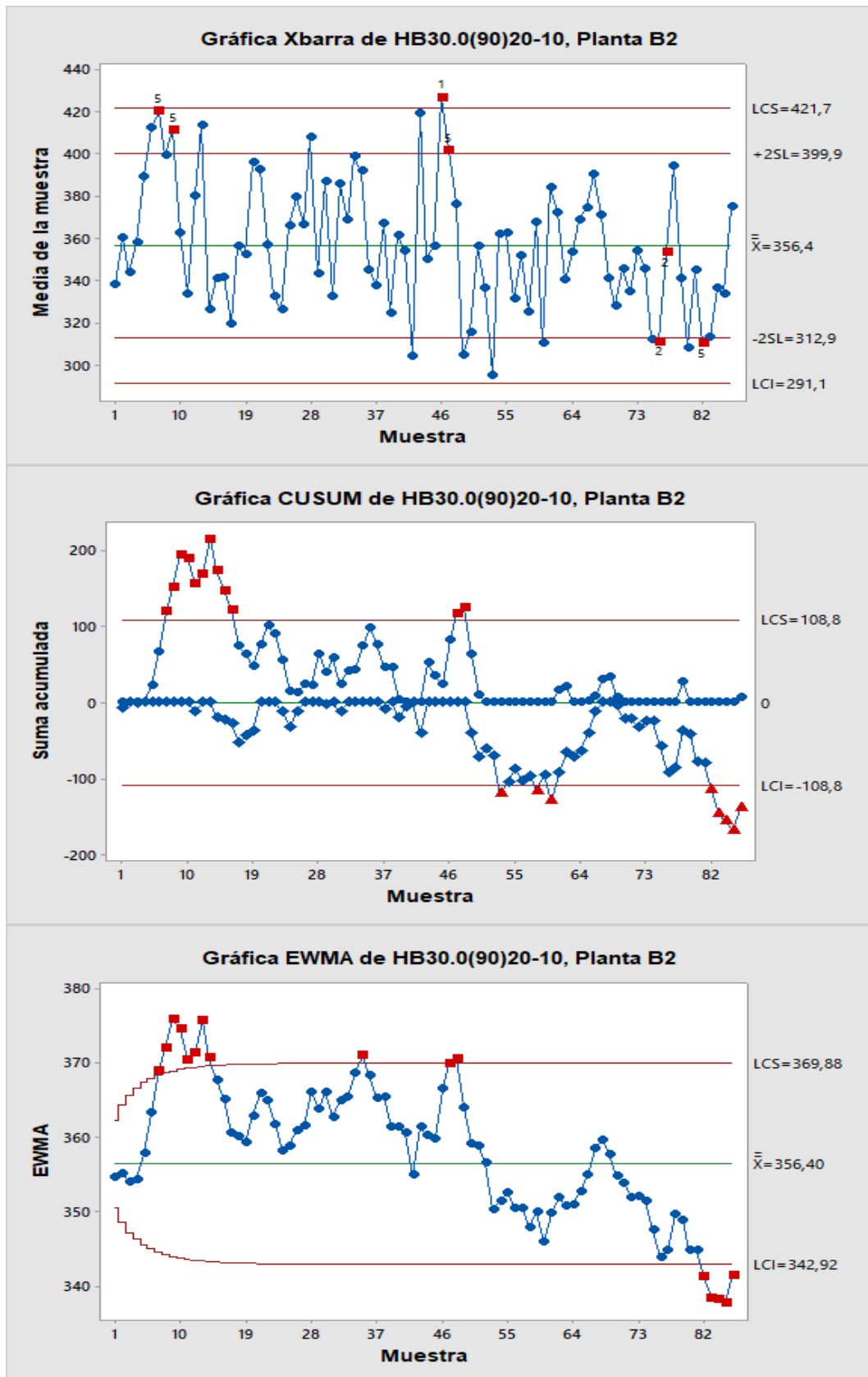


Gráfico 24: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-10, Planta B2.



### 3.2.5.3.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 24, se observa:

- El proceso se encuentra mayoritariamente bajo control estadístico, con pocas alertas y con resistencias fluctuando en torno a la resistencia promedio.
- Sólo la muestra 46 excede el límite superior más allá de 3 desviaciones estándar, estando el proceso fuera de control estadístico en ese punto.
- En los puntos 76 y 77 hay una tendencia de 8 puntos consecutivos de muestras con resistencias bajo la línea central. El proceso por alguna causa está dando resistencias bajo la media, por tanto está fuera de control estadístico.
- En los puntos 7, 9 y 47 se da la tendencia de 2 de 3 puntos sobre dos desviaciones estándar de la línea central.
- En los puntos 76 y 82, se da la tendencia de 2 de 3 puntos bajo dos desviaciones de la línea central.

### 3.2.5.3.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 24, se observa:

- En general el proceso está dentro de los límites de control, exceptuando algunos períodos con alertas.
- El proceso comienza a desviarse respecto a la media en la muestra 5 y desde la muestra 7 hasta la 11, las resistencias están sobre la media del proceso. Desde la muestra 13 la media del proceso comienza a disminuir y las resistencias están bajo la media del período de 356,4 kgf/cm<sup>2</sup>
- Desde la muestra 17 hasta la muestra 46, el proceso está bajo control, con resistencias fluctuando sobre y bajo la media del proceso. Sin embargo en la muestra 46 se produce un aumento de resistencia y desvío positivo respecto a la media y genera que en los puntos 47 y 48 el proceso esté fuera de control estadístico.
- Entre las muestras 49 y 52 hay un decaimiento en las resistencias del proceso bajo la media.
- En la muestra 53 el proceso está fuera de control estadístico.
- Desde la muestra 54 a la muestra 57 el proceso está controlado, pero operando en desviaciones negativas respecto a la media, al límite de estar por debajo del límite de control H<sup>-</sup>.
- En las muestras 58 y 60 el proceso está nuevamente fuera de control estadístico.
- A partir de la muestra 61 hasta la 69 la media del proceso aumenta y se representa por desviaciones positivas respecto la media del período de 356,4 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Posterior a eso, aumentan las desviaciones negativas, la media disminuye y desde la muestra 82 hasta la muestra 86 el proceso se encuentra desviado y fuera de control estadístico.

### 3.2.5.3.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 24, se observa:

- Al igual que en CUSUM, el proceso comienza a desviarse en la muestra 5, en que las resistencias están sobre la media del período.
- Desde la muestra 7 a la muestra 14, el proceso está fuera de control estadístico sobre 2,7 desviaciones estándar de la línea central y fluctuando en torno a una resistencia aproximada de 372 kgf/cm<sup>2</sup>, sobre la media del proceso.
- Desde la muestra 15 a la muestra 19 hay una disminución en las resistencias respecto al promedio.
- Hasta la muestra 33 el proceso está bajo control estadístico pero fluctúa en torno a una resistencia de 362 kgf/cm<sup>2</sup>, superior a la media del período de 356,4 kgf/cm<sup>2</sup>.
- En la muestra 34 la media del proceso se desvía y ya en la muestra 35 el proceso está fuera de control estadístico.
- Desde la muestra 36 a la muestra 42 la media del proceso disminuye y tiene a la línea central.
- Desde la muestra 43 a la 46, aumenta la media y en las muestras 47 y 48 el proceso excede la línea de control superior.
- Entre las muestras 49 y 53 disminuye la resistencia bajo la media el proceso y se observa ese desvío negativo en la carta.
- Entre los puntos 53 y 64 el proceso fluctúa en torno a una resistencia aproximada de 350 kgf/cm<sup>2</sup>, inferior a la media de 356,4 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Desviaciones positivas desde la muestra 65 a la 68, sobre la resistencia media del proceso, lo que hace que la media ponderada aumente próxima a la resistencia promedio de 356,4 kgf/cm<sup>2</sup>.
- De la muestra 69 a la 72 disminuyen nuevamente las resistencias bajo la media.
- En las muestras 75 y 76 se observa una clara disminución de las resistencias, bajo la media del proceso. Luego un leve aumento, pero finalmente la resistencia decae en la muestra 80 y desde la muestra 82 a la 86 el proceso está fuera de control estadístico.
- Existe un repunte de la resistencia en la última muestra del período, sobre la resistencia media que hace que la tendencia sea positiva.

### 3.2.5.3.4. Síntesis

Las alertas entregadas son de mejor interpretación para EWMA y CUSUM respecto a Shewhart en donde se ve el proceso mucho más estable.

CUSUM y EWMA tienen un comportamiento similar, pero CUSUM arroja alertas donde EWMA no da aviso.

Con CUSUM y EWMA se pueden ver avisos de desviaciones del proceso. Con Shewhart no existe esa tendencia previa a puntos desviados de la media.

A lo largo de todo el proceso no se observan muchas desviaciones en las resistencias. Tampoco se observa que la desviación varíe mucho a lo largo del proceso, lo que reafirma el hecho de que no hay tantas alertas en el proceso.

El hormigón es un H30 que cumple durante prácticamente todo el período con la resistencia especificada y el promedio del período es mayor a la resistencia requerida de 339,46 kgf/cm<sup>2</sup>.

La clasificación según ACI para el estándar de control de este hormigón es "Muy Bueno". Las alertas que el proceso presenta, si bien existen, no son muchas y en general se ve que las resistencias tienden a fluctuar aleatoriamente en torno a las líneas centrales de los métodos. En este caso los desvíos si son coherentes con la clasificación ACI.

3.2.5.4. Resultados HB35.0(90)20-10

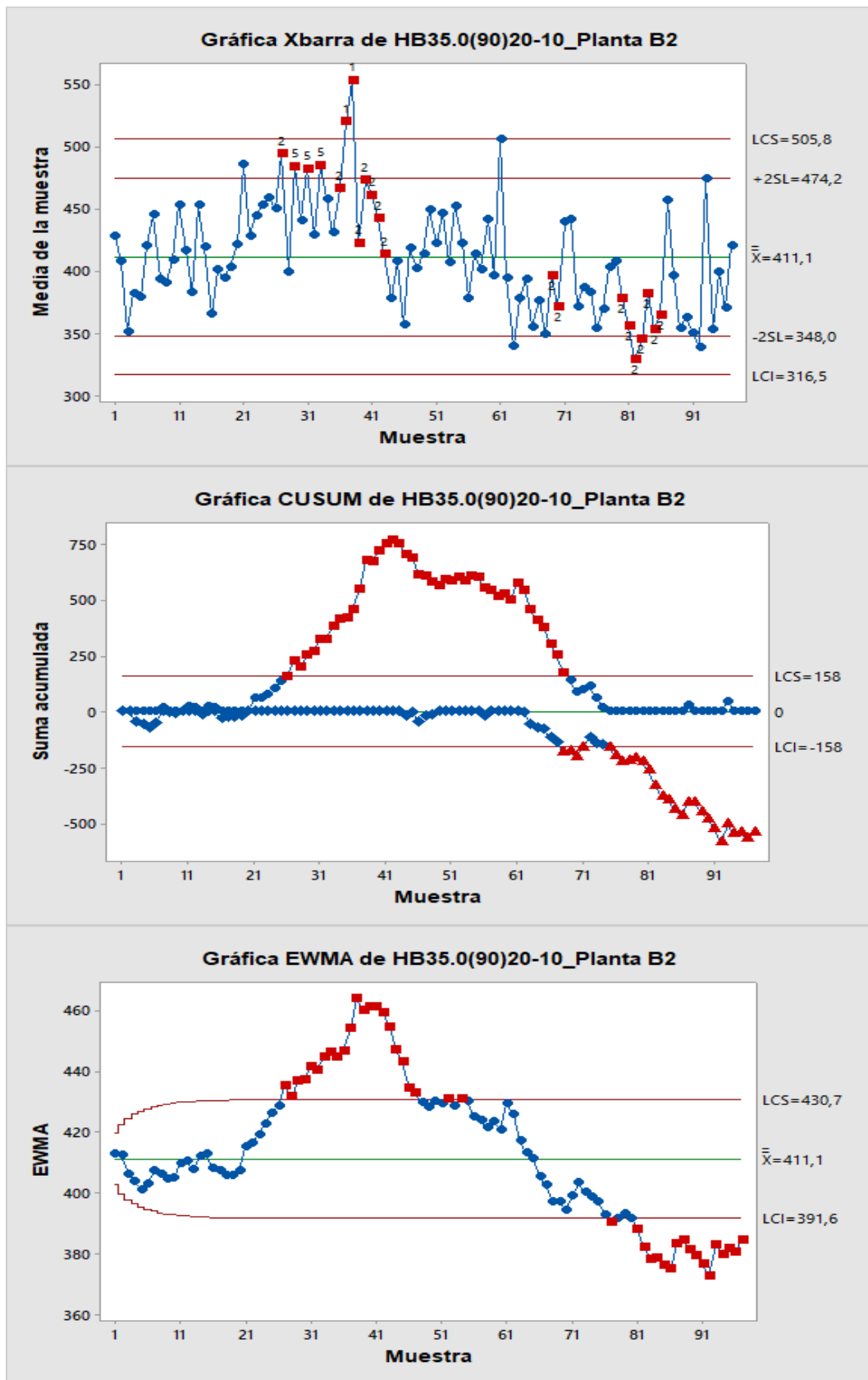


Gráfico 25: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta B2.

#### 3.2.5.4.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 25, se observa:

- Proceso con mucha variación sobre y bajo la resistencia media del período. En especial se observa una inflexión en la muestra 61 donde pasa de una media sobre la resistencia promedio una que fluctúa bajo la resistencia promedio de 411,1 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Puntos 37 y 38 más allá de 3 desviaciones estándar sobre la resistencia media del proceso.
- De la muestra 17 a la 26, existe un alza de resistencias en el proceso.
- En el punto 27 se acumulan 8 resistencias consecutivas sobre la línea central, por tanto está fuera de control estadístico.
- Desde la muestra 29 hasta la muestra 43, hay muchas alertas del proceso con resistencias sobre la resistencia promedio.
- Desde la muestra 36 a la 43, hay alertas de que 8 muestras consecutivas están sobre la línea central. El proceso está fuera de control estadístico según este patrón de comportamiento.
- En las muestras 29, 31, 33 y 38 hay 2 de 3 muestras sobre 2 desviaciones estándar desde la resistencia promedio. Esto también es una alerta de que el proceso está fuera de control estadístico.
- Desde la muestra 44 hasta la 62 no se muestran alertas en el proceso. Las resistencias fluctúan en torno a la línea central. En la muestra 61 existe una resistencia alta, pero que no sale del límite de control superior.
- A partir de la muestra 63 las resistencias decaen y el proceso hasta el final fluctúa en torno a resistencias inferiores a la resistencia promedio.
- En las muestras 69, 70 y desde la muestra 80 hasta la 86, hay 8 muestras consecutivas bajo la línea central. El proceso está fuera de control y sus resistencias fluctúan bajo la resistencia promedio de 411,1 kgf/cm<sup>2</sup>.
- En la muestra 83 hay 2 de 3 resistencias bajo 2 desviaciones estándar de la línea central.

#### 3.2.5.4.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 25, se observa:

- Entre las muestras 3 y 6, desvíos negativos respecto a la resistencia promedio. Las resistencias están bajo 411,1 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Desde la muestra 7 a la muestra 20, las resistencias fluctúan en torno a cero. Las desviaciones son pequeñas en este período.
- A partir de la muestra 21 se observan aumentos constantes en las resistencias, sobre la resistencia media de 411,1 kgf/cm<sup>2</sup>.
- En la muestra 44 se ve un desvío negativo, bajo la media de 411,1 kgf/cm<sup>2</sup>, pero en general el proceso en su media está sobre la resistencia promedio y fuera de control estadístico.

- A partir de la muestra 61 hasta la muestra 70, se observan desviaciones negativas acumuladas y por tanto las resistencias son inferiores a  $411,1 \text{ kgf/cm}^2$  en este tramo.
- En los puntos 68, 69 y 70 el proceso está fuera de control estadístico con desviaciones negativas más allá del límite de control inferior.
- Se observa un aumento de resistencias en las muestras 72, 73 y 74, pero el proceso vuelve a desviarse negativamente desde la muestra 75 hasta el final del período.
- Las resistencias de las muestras 87 y 93 están sobre la resistencia promedio.

#### 3.2.5.4.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 25, se observa:

- Resistencias bajo la media hasta la muestra 20.
- A partir de la muestra 21 se observan aumentos de la resistencia hasta la muestra 38.
- Desde la muestra 27 hasta la muestra 47 el proceso está fuera de control estadístico más allá de  $2,7$  desviaciones estándar desde la línea central.
- Las resistencias del proceso fluctúan en torno a una media superior a  $411,1 \text{ kgf/cm}^2$ .
- A partir de la muestra 43, las resistencias comienzan a disminuir y hay grandes desvíos que indican que la resistencia es inferior a  $411,1 \text{ kgf/cm}^2$  en esos puntos.
- Desde la muestra 48 a la 51 el proceso fluctúa en torno al límite de control superior, es una resistencia media de  $425 \text{ kgf/cm}^2$ , sobre la media del período.
- En el punto 61 existe un alza en la resistencia. Entre el 70 y el 72 también se ve un aumento al igual que en el punto 87 y 93. Sin embargo en el global, la resistencia media decrece a partir de la muestra 52 y desde el punto 81 hasta el final se encuentran fuera de control estadístico. La media en este período es inferior a la resistencia promedio del período.

#### 3.2.5.4.4. Síntesis

CUSUM entrega mayor cantidad de alertas en el proceso.

En la carta Shewhart se puede ver mejor forma algunas tendencias de las resistencias a pesar de que estén sobre la media del proceso. En especial se ve claramente el decaimiento de resistencias desde la muestra 40 a la 43.

Los desvíos de las resistencias se observan de mejor forma en CUSUM y EWMA que en Shewhart. En especial CUSUM refleja de mejor forma que el estándar de control de la planta es "Pobre".

La resistencia promedio del proceso es superior a la resistencia requerida, y a pesar del estándar "Pobre" de control de la planta, la gran mayoría de las resistencias cumplen la resistencia especificada para el hormigón de  $350 \text{ kgf/cm}^2$ .

Las desviaciones durante el proceso son repetitivas respecto a la media del proceso. Por lo tanto la desviación estándar tiene muchas variaciones durante el período y genera muchas alertas en las 3 cartas de control.

El estándar de control para este hormigón es “Pobre”, lo que tiene coherencia con la gran cantidad de alertas mostradas en el gráfico 25.

### 3.2.6. Resultados Hormigones Planta C1

A continuación se presentan los resultados obtenidos al aplicar los métodos de control a los hormigones HB20, HB25, HB30 y HB35 de la Planta hormigonera C1.

3.2.6.1. Resultados HB20.0(90)20-10

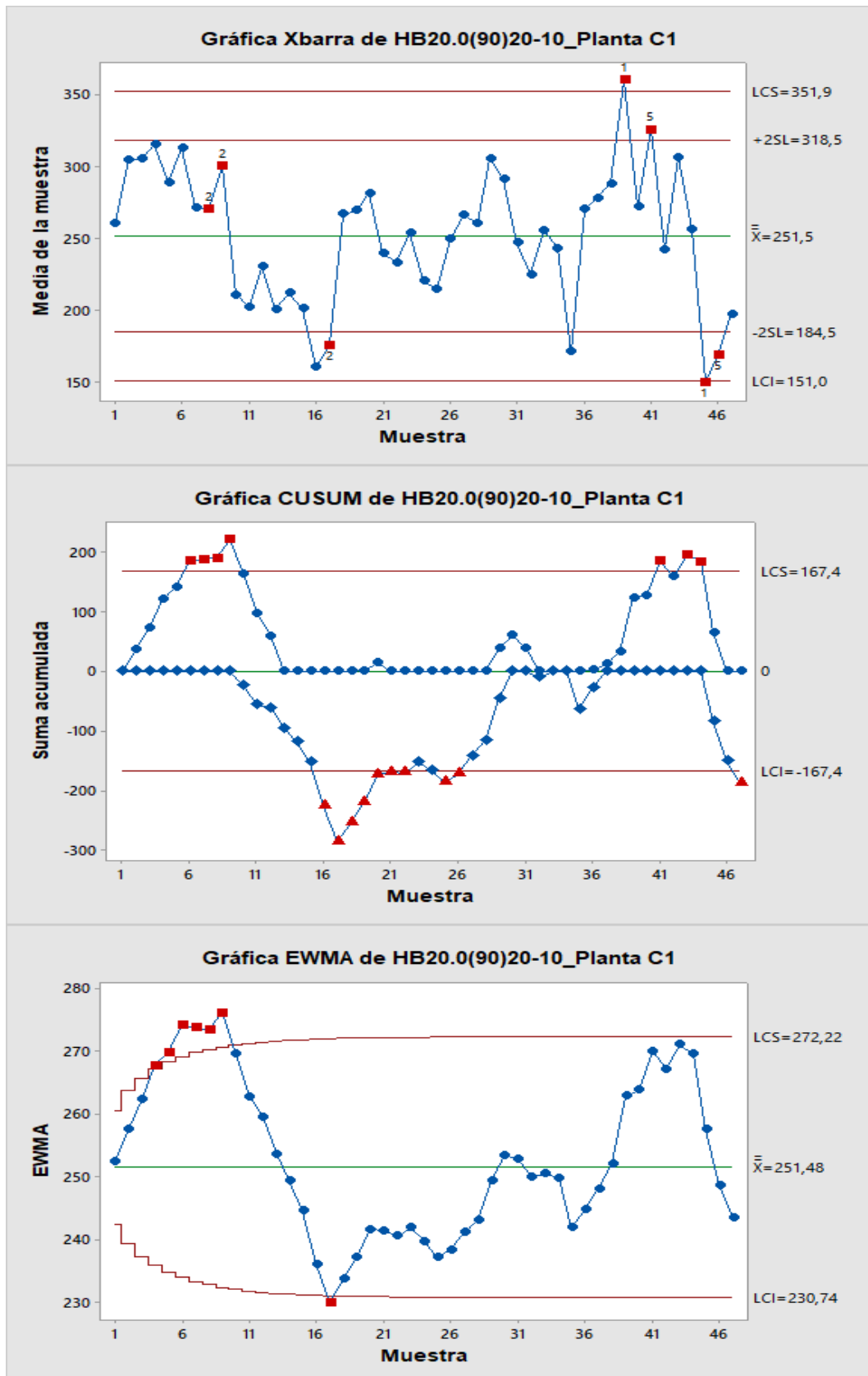


Gráfico 26: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB20.0(90)20-10, Planta C1.



### 3.2.6.1.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 26, se observa:

- Proceso con pocas alertas que en general fluctúa en torno a la resistencia media.
- Sólo una muestra, la 39, está más allá de 3 desviaciones estándar sobre la resistencia promedio de 251,48 kgf/cm<sup>2</sup>. Así también sólo la muestra 45 está bajo 3 desviaciones estándar de resistencia promedio.
- En las muestras 8 y 9 hay 8 muestras consecutivas sobre la línea central. El proceso está fuera de control estadístico. En la muestra 17 también se acumulan 8 resistencias pero bajo la línea central.
- En la muestra 17 hay 2 de 3 muestras sobre 2 desviaciones estándar de la línea central. Este patrón se repite en la muestra 41.
- En la muestra 46 hay 2 de 3 muestras bajo 2 desviaciones estándar de la línea central.

### 3.2.6.1.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 26, se observa:

- Desviaciones positivas y negativas en torno a cero que es la resistencia promedio del proceso.
- El proceso comienza a tener desviaciones positivas respecto a la resistencia promedio desde el inicio y desde la muestra 6 hasta la muestra 9, se encuentra fuera de control estadístico.
- A partir de la muestra 10, las resistencias del proceso son menores a la resistencia promedio de 251,5 kgf/cm<sup>2</sup> y desde la muestra 17 hasta la muestra 22, las desviaciones del proceso están por debajo del límite de control inferior, por lo tanto está fuera de control estadístico.
- En el punto 20 se observa un aumento de resistencia sobre la media del proceso.
- Entre las muestras 20 y 26, el proceso fluctúan en torno a la línea de control inferior, con las muestras 25 y 26 bajo el límite.
- Las muestras 19, 30 y 31 tienen resistencias mayores a la resistencia promedio y hasta la muestra 38 las resistencias fluctúan en torno a cero.
- Una gran desviación se observa en la muestra 39. El proceso está sobre el límite de control superior en los puntos 41, 43 y 44.
- Finalmente en las muestras 45, 46 y 47 las resistencias están bajo la resistencia promedio y el proceso fuera de control estadístico en la muestra 47.

### 3.2.6.1.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 26, se observa:

- Resistencias sobre la resistencia promedio y desde la muestra 4 hasta la muestra 9, el proceso fuera de control estadístico fluctuando en torno a resistencias de 275 kgf/cm<sup>2</sup>.

- Descenso en las resistencias medias ponderadas desde la muestra 10 a la 17. En la muestra 17 se excede el límite de control inferior.
- Proceso con desviaciones sobre o bajo la media desde el punto 18, pero sin presentar alertas más allá de 2,7 desviaciones.

#### 3.2.6.1.4. Síntesis

CUSUM entrega la mayor cantidad de alertas en el proceso, con 17 alertas.

EWMA y Shewhart entregan la misma cantidad de alertas, 7 cada una.

Las 3 cartas presentan alertas en períodos similares del proceso, siendo CUSUM la más estricta en cuanto al control de las variaciones.

Las resistencias en su mayoría cumplen con la resistencia especificada a 28 días para un H20. Sin embargo la resistencia promedio del período es inferior a la resistencia requerida según la desviación estándar de la planta.

A pesar de que la desviación estándar de este hormigón en esta planta es alta y el control de calidad es pobre, se observan pocas alertas en el proceso.

3.2.6.2. Resultados HB25.0(90)20-12

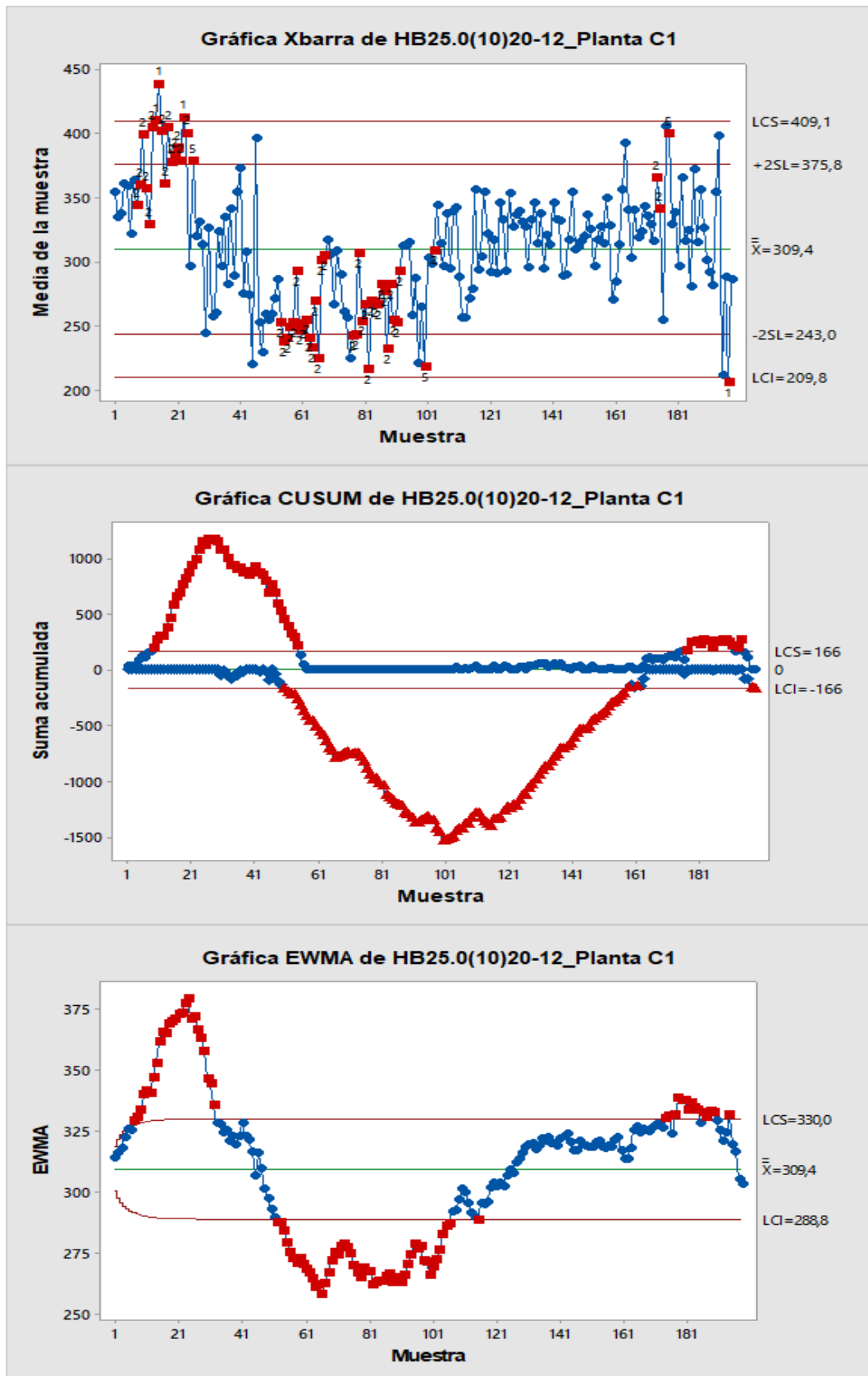


Gráfico 27: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-12, Planta C1.

### 3.2.6.2.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 27, se observa:

- Muchas alertas en el proceso y también alta variabilidad de las resistencias en todo el período graficado.
- En los puntos 14, 15 y 23, las resistencias están sobre 3 desviaciones estándar desde la resistencia promedio o línea central.
- En el punto 197 la resistencia está bajo 3 desviaciones estándar desde la línea central, por lo tanto el proceso se encuentra fuera de control estadístico.
- Desde la muestra 8 a la muestra 24, existen acumulaciones de 8 resistencias sobre la media del proceso.
- Por otra parte, desde la muestra 54 hasta la 68 y desde la muestra 77 hasta la 92, se tienen 8 resistencias consecutivas bajo la línea central del proceso. Este mismo patrón se repite en la muestra 103.
- En las muestras 174 y 175 hay 8 resistencias consecutivas pero sobre la resistencia promedio.
- Desde la muestra 14 a la muestra 16, desde la muestra 18 a la muestra 24 y en la muestra 26, existen 2 de 3 resistencias que están sobre 2 desviaciones estándar desde la media del proceso. Esto reafirma las alertas dadas de 8 puntos consecutivos indicadas anteriormente. El proceso está fuera de control estadístico en estas muestras.
- Posterior a esto, desde la muestra 27 hasta la 41 aproximadamente, el proceso está fluctuando en torno a la resistencia promedio, pero a partir de la muestra 42 aproximadamente, comienza a decaer.
- En los puntos 56, 64, 66, 77 y 100 hay 2 de 3 resistencias bajo dos desviaciones estándar desde la línea central.
- En las muestras 178 hay 2 e 3 resistencias sobre 2 desviaciones estándar de la línea central y en la muestra 197 se repite el mismo patrón pero bajo 2 desviaciones estándar.

### 3.2.6.2.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 27, se observa:

- Prácticamente todo el proceso está desviado de los límites de control superior e inferior.
- Se observa una etapa inicial hasta la muestra 55 aproximadamente en que las desviaciones acumuladas están sobre el límite superior.
- De todas formas, existen resistencias en el período desde la muestra 21 a la 41 que están bajo la resistencia promedio de  $309,4 \text{ kgf/cm}^2$ .
- Luego de esto, se observa que las desviaciones son negativas y bajo el límite de control inferior. Esto se extiende hasta la muestra 161 aproximadamente.
- De igual forma que en el período inicial, desde la muestra 121 a la 141, existen resistencias sobre la resistencia media de  $309,4 \text{ kgf/cm}^2$ .
- A partir de la muestra 162 y hasta la muestra 176 aproximadamente, las desviaciones del proceso se encuentran dentro de los parámetros de control, pero

son casi todas las resistencias de este período superiores a la resistencia promedio.

- Desde la muestra 177 hasta la muestra 194, el proceso está fuera de control con desviaciones sobre la línea de control superior. Las resistencias en este período están sobre la resistencia promedio general.
- Hacia el final, decaen las resistencias y se ven desvíos negativos respecto a la resistencia promedio. Los puntos 197 y 198 están fuera de control estadístico bajo la línea de control inferior.

#### 3.2.6.2.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 27, se observa:

- Aumento de las resistencias en el inicio del período hasta a muestra 23, por sobre la media de 309,4 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Desde la muestra 24 hasta la muestra 32, decrecen las resistencias y se refleja en la disminución de la media ponderada que a partir de la muestra 33 está dentro de los límites de control.
- Hasta la muestra 43, las resistencias fluctúan en torno a una media ponderada de 320 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Desde la muestra 44 nuevamente se observa una baja en las resistencias, y desde la muestra 52 hasta la muestra 106 las resistencias ponderadas de EWMA están bajo el límite de control inferior. Durante todo este período hay muchas muestras inferiores a la resistencia promedio de 309,4 kgf/cm<sup>2</sup>, y la media e EWMA fluctúa en torno a 275 kgf/cm<sup>2</sup>.
- A partir de la muestra 101, se observa un aumento de resistencias hasta la muestra 111 donde ya el proceso nuevamente está dentro de los parámetros de control.
- Desde la muestra 112 a la 115 nuevamente disminuyen las resistencias por debajo de la media del proceso. El punto 115 está bajo el límite de control inferior, por lo tanto fuera de control estadístico.
- Desde la muestra 116 hasta la muestra 132 aproximadamente, las resistencias aumentan lo que se refleja en un aumento del valor de las resistencias ponderadas. Desde la muestra 133 hasta la 159 el proceso está bajo control, fluctuando sus resistencias en torno a 320 kgf/cm<sup>2</sup>.
- En la muestra 161 la resistencia decae y luego aumenta hasta que, desde la muestra 174 hasta la muestra 194 el proceso nuevamente está fuera de control sobre el límite superior y fluctuando en torno a una resistencia mayor a 330 kgf/cm<sup>2</sup>, que es superior a la resistencia promedio de 309,4 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Finalmente a partir de la muestra 195 el proceso decae y las resistencias de las muestras son inferiores a la media del proceso.

#### 3.2.6.2.4. Síntesis

CUSUM da la mayor cantidad de alertas y el proceso tarda más en estar “bajo control estadístico cuando existen muchas desviaciones en torno a la media, es decir, las desviaciones de las resistencias impactan más el comportamiento de la carta si se compara con Shewhart y EWMA.

Shewhart y EWMA se correlacionan mucho más en las alertas que entregan y en los períodos de sus alertas, si bien en cantidad son menores.

En las 3 cartas se aprecia el comportamiento irregular de la planta, siendo CUSUM y EWMA las que a simple vista muestran desvíos más evidentes.

A diferencia de los otros hormigones, para esta planta existen muchas muestras que no cumplen la resistencia especificada a 28 días. Esto se da principalmente en el período comprendido entre las muestras 41 y 101. La resistencia promedio de las muestras es inferior a la resistencia requerida de acuerdo a la desviación de la planta, que es 310,2 kgf/cm<sup>2</sup>. La desviación de las resistencias es alta, por lo que el estándar de control es “Justo”, pero la variación de la desviación estándar a lo largo del período es alta, lo que genera demasiadas alertas en el proceso.

3.2.6.3. Resultados HB30.0(90)20-10

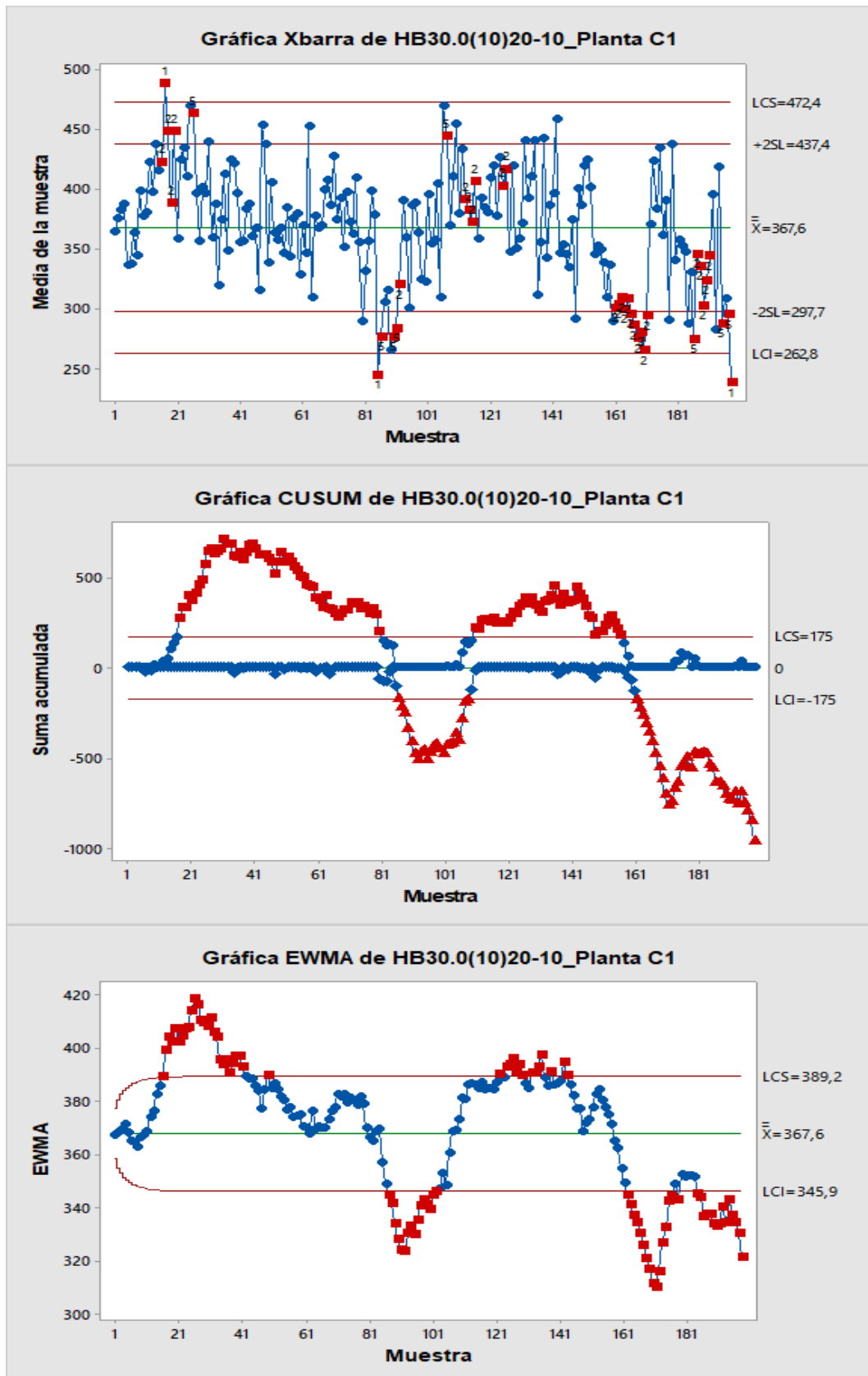


Gráfico 28: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-10, Planta C1.

### 3.2.6.3.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 28, se observa:

- Proceso son aumento de resistencias respecto a la media del proceso hasta la muestra 21. Posteriormente, se mantiene con aumentos y descensos de resistencias hasta la muestra 83. A partir de ahí y hasta la muestra 112 se observan aumentos de resistencias y el proceso fluctúa en torno a una resistencia mayor a la resistencia promedio hasta la muestra 151 aproximadamente. Descensos de resistencias hasta la muestra 171 aproximadamente donde se aumenta considerablemente la resistencia hasta la muestra 174. De aquí en adelante las resistencias de las muestras decrecen, con algunos peaks altos, pero con tendencia bajo la resistencia promedio hasta el final del período.
- El punto 17 está sobre 3 desviaciones estándar de la línea central. Proceso fuera de control estadístico.
- Los puntos 85 y 198 están bajo 3 desviaciones estándar desde la media. Proceso fuera de control estadístico.
- Desde la muestra 16 hasta la muestra 18; muestras 19 y 29; desde la muestra 113 hasta la muestra 116; y en las muestras 125 y 126, existen patrones de 8 muestras consecutivas sobre la línea central, por lo tanto el proceso se encuentra fuera de control estadístico.
- La muestra 92; desde la muestra 161 hasta la muestra 171; y desde la muestra 187 hasta la muestra 191, hay patrones de 8 muestras consecutivas bajo la línea central, por lo tanto el proceso se encuentra fuera de control estadístico.
- En las muestras 18, 20, 26 y 107, hay 2 de 3 muestras con resistencias sobre 2 desviaciones estándar de la línea central.
- En las muestras 86, 90 y 91; desde la muestra 167 hasta la muestra 171; y en las muestras 186, 195, 197 y 198 hay 2 de 3 muestras con resistencias bajo 2 desviaciones estándar de la línea central.

### 3.2.6.3.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 28, se observa:

- Prácticamente todo el período tiene alertas de que el proceso está fuera de control estadístico. A grandes rasgos se observan 4 períodos.
- Desde el inicio hasta la muestra 81 en que las resistencias son en su mayoría superiores a la resistencia promedio del proceso.
- De la muestra 81 hasta aproximadamente la muestra 110 en que las resistencias están bajo la resistencia promedio del proceso.
- Luego de la muestra 110 hasta la muestra 158 aproximadamente en que las resistencias están sobre la media el proceso en casi todo el tramo.
- Y Finalmente un período desde la muestra 161 hasta el final del período en que las resistencias están bajo la resistencia promedio, exceptuando las resistencias entre la muestra 171 y 181 que están sobre la media del proceso.



### 3.2.6.3.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 28, se observa:

- Fluctuación de resistencias en torno a la resistencia media desde el inicio hasta la muestra 11 aproximadamente.
- Desde la muestra 12 hasta la muestra 28 aproximadamente se observa un aumento de las resistencias por sobre la resistencia media del proceso.
- Posteriormente hasta la muestra 41 el proceso decae en las resistencias de las muestras.
- El proceso está fuera de control estadístico entre las muestras 16 y 41.
- Desde la muestra 42 y hasta la muestra 79 las resistencias están dentro de los límites de control y se encuentran fluctuando en torno a una resistencia ponderada de  $380 \text{ kgf/cm}^2$ , superior a la media del proceso.
- Desde la muestra 81 hasta la muestra 91 las resistencias de las muestras disminuyen considerablemente bajo la resistencia promedio y bajo el límite de control inferior.
- A partir de la muestra 92, las resistencias aumentan y en la muestra 111 las resistencias están dentro de los parámetros de control.
- Desde la muestra 112 hasta la muestra 143, el proceso tiene muestras bajo control y fuera de control estadístico. La media ponderada de este período fluctúa en torno al límite de control superior de  $389,2 \text{ kgf/cm}^2$ .
- Desde la muestra 144 hasta 157 las resistencias presentan muestras consecutivas de aumentos de resistencias y muestras consecutivas de disminución de resistencias. Se mantienen fluctuando en torno a un valor de EWMA de  $378 \text{ kgf/cm}^2$ .
- A partir de la muestra 158 se generan disminuciones consecutivas en las resistencias de las muestras hasta la muestra 173 donde se encuentra en valor de EWMA más bajo y fuera de control estadístico.
- A partir de la muestra 174 se observa un aumento en las resistencias y desde la muestra 179 hasta la muestra 183, el proceso está dentro de los parámetros de control de la carta.
- Finalmente desde la muestra 184 hasta la muestra 198 el proceso está bajo el límite de control inferior y fluctúa en torno a una resistencia ponderada de  $335 \text{ kgf/cm}^2$  bajo la resistencia promedio de  $367,6 \text{ kgf/cm}^2$ .

### 3.2.6.3.4. Síntesis

CUSUM entrega alertas en casi todo el proceso. Es la carta que entrega más alertas.

Shewhart permite observar el comportamiento de las resistencias, pero su interpretación es más compleja debido a los patrones de alertas adicionales con que se configuró el método.

EWMA alerta más tempranamente que CUSUM y Shewhart, pero uno de sus inconvenientes es que no permite ver si el proceso está desviado sobre o bajo la

resistencia media en algunos puntos, debido a que pondera más las resistencias pasadas.

Respecto a las resistencias del hormigón, entre las muestras 81 y 101; y entre las muestras 161 y hasta el final del proceso, existen muchas resistencias que no cumplen la resistencia especificada para el hormigón, a pesar de que la planta tiene una resistencia promedio superior a la resistencia requerida que es  $363,3 \text{ kgf/cm}^2$  de acuerdo a la desviación estándar de las resistencias.

Existe mucha variación en la desviación estándar, lo que entrega demasiadas alertas en el proceso. Además, según la clasificación ACI corresponde a una planta con estándar de control "Pobre".

3.2.6.4. Resultados HB35.0(90)20-10

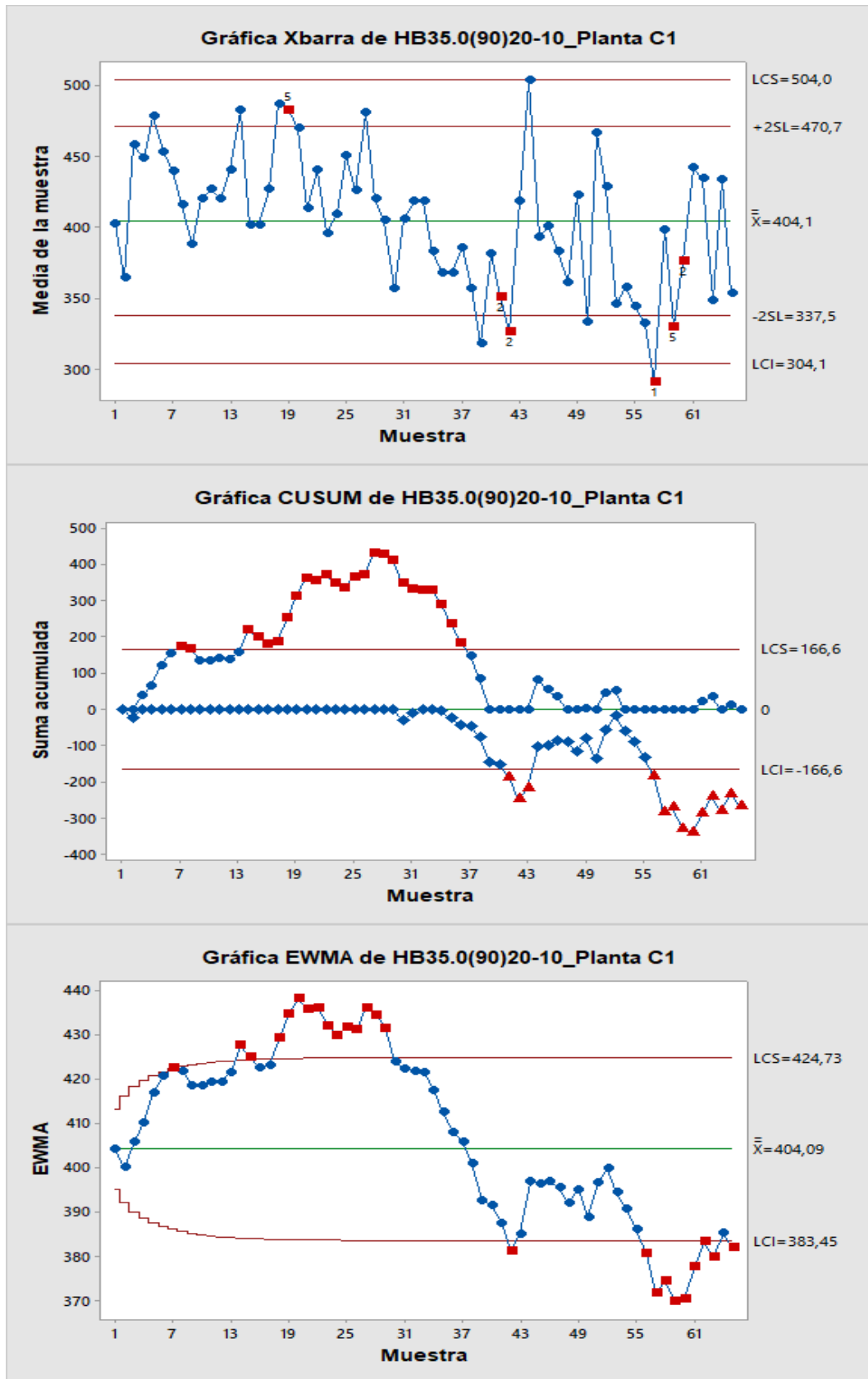


Gráfico 29: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta C1.

#### 3.2.6.4.1. *Análisis Carta Shewhart*

En el gráfico 29, se observa:

- En general se presentan aumentos y disminuciones de resistencias a lo largo del período. Desde el inicio hasta la muestra 33 el proceso fluctúa en torno a una resistencia media superior a la resistencia promedio de 404,1 kgf/cm<sup>2</sup>. Luego existe un decaimiento de la resistencia media hasta la muestra 42. Luego aumenta al resistencia pero vuelve a disminuir hasta la muestra 57.
- La resistencia de la muestra 57 está bajo la línea de control inferior, por tanto el proceso está fuera de control estadístico en este punto.
- En los puntos 41, 42 y 60, se observan 8 muestras consecutivas bajo la media del proceso, por tanto el proceso está fuera de control estadístico en este período.
- En el punto 19 hay 2 de 3 resistencias sobre dos desviaciones estándar respecto a la resistencia media del proceso.
- En el punto 59 hay 2 de 3 resistencias bajo 2 desviaciones estándar de la media del proceso.

#### 3.2.6.4.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 29, se observa:

- Grandes desviaciones positivas respecto a la media desde el inicio hasta la muestra 29.
- En este período, las muestras 2 y 30 están bajo la resistencia promedio de 404,1 kgf/cm<sup>2</sup>.
- A partir de la muestra 36, las resistencias están bajo la resistencia promedio del proceso y en particular las muestras 41, 42 y 43 están bajo el límite de control inferior, por lo tanto fuera de control estadístico.
- Desde las muestra 44 hasta la muestra 54, los desvíos fluctúan en torno a cero, el proceso es estable y está bajo control estadístico.
- Desde la muestra 55 el proceso está bajo el límite de control inferior, fuera de control estadístico. Sin embargo, las muestras 61, 62 y 64 están sobre la resistencia media del proceso.

#### 3.2.6.4.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 29, se observa:

- Aumento de las resistencias hasta la muestra 6.
- En la muestra 7 el proceso está fuera de control estadístico pues se excede el límite de control superior.
- En la muestra 9 se observa una disminución de la resistencia y hasta la muestra 13 el proceso fluctúa en torno a una resistencia ponderada de 420 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Nuevamente un aumento de resistencia en la muestra 14. La muestra excede el límite de control superior. Proceso fuera de control estadístico.

- El punto 15 también está sobre el límite de control superior, pero presenta una baja de resistencia y disminución del valor de EWMA.
- Los puntos 16 y 17 están dentro de los límites de control, cercano al límite superior.
- En las muestras 18, 19 y 20 se observa un aumento en la resistencia de las muestras y el proceso a partir de la muestra 21 hasta la muestra 29 fluctúa en torno a una media ponderada de 434 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Desde la muestra 30 hasta la muestra 42 hay disminuciones en las resistencias del proceso bajo la resistencia promedio de 404,1 kgf/cm<sup>2</sup>. En la muestra 42 se desvía la resistencia ponderada bajo el límite de control inferior.
- En las muestras 42 y 43 se ve un incremento de la resistencia sobre la resistencia promedio y el proceso comienza a fluctuar en torno a una resistencia ponderada de 395 kgf/cm<sup>2</sup> aproximadamente, bajo la resistencia promedio del proceso.
- Desde la muestra 56 hasta la muestra 65 todas las muestras, excepto la 64, se encuentran bajo el límite de control inferior y fluctúan en torno a una media ponderada de 379 kgf/cm<sup>2</sup>, inferior a la resistencia promedio del proceso.

#### 3.2.6.4.4. Síntesis

CUSUM da mayor cantidad de alertas en el proceso.

EWMA entrega las alertas más temprano que CUSUM y Shewhart para esta planta.

Shewhart recién entrega una alerta del proceso en la muestra 19, lo que reafirma que requiere mayor cantidad de muestras para identificar desvíos pequeños. No así CUSUM y EWMA.

A partir de la muestra 37 existen muchas muestras que no cumplen la resistencia especificada. La media del proceso es inferior a la resistencia requerida según la desviación estándar de la planta. El proceso no se ve tan desviado a pesar de que la planta tiene un estándar de control "Pobre" según la ACI.

#### 3.2.7. Resultados Hormigones Planta D1

A continuación se presentan los resultados obtenidos al aplicar los métodos de control a los hormigones HB20, HB25, HB30 y HB35 de la Planta hormigonera D1.

3.2.7.1. Resultados HN20.0(90)20-08

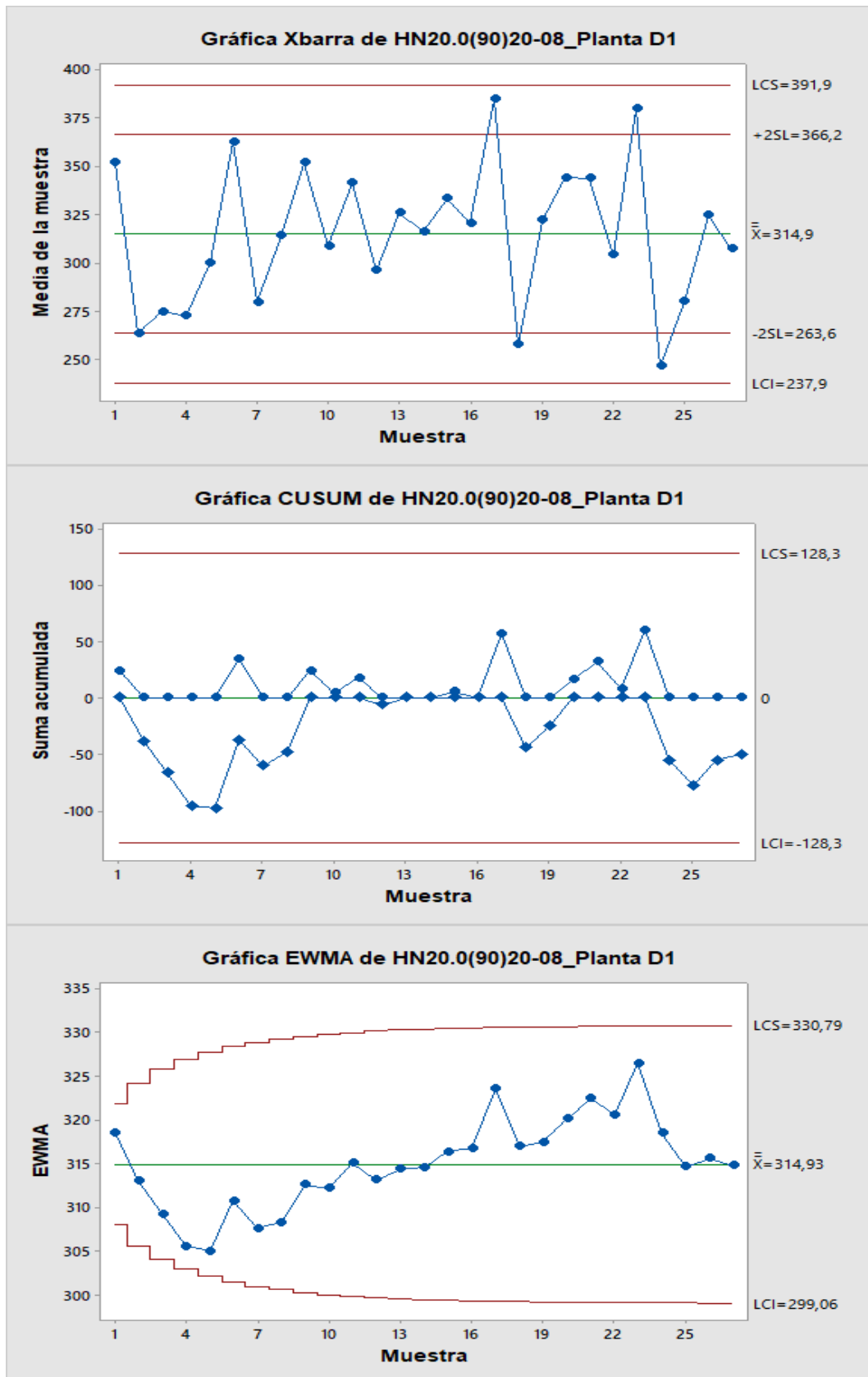


Gráfico 30: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HN20.0(90)20-08, Planta D1.

#### 3.2.7.1.1. Análisis Carta Shewhart

No se presentan alertas o desvíos significativos en el gráfico 30.

#### 3.2.7.1.2. Análisis Carta CUSUM

No se presentan alertas o desvíos significativos en el gráfico 30.

#### 3.2.7.1.3. Análisis Carta EWMA

No se presentan alertas o desvíos significativos en el gráfico 30.

#### 3.2.7.1.4. Síntesis

Para las tres cartas de control del gráfico 28, no se presentan alertas de desvíos o descontroles estadísticos del proceso.

De acuerdo a la tabla 7, el estándar de control es “Bueno” de acuerdo a la desviación estándar considerada para este hormigón y planta. La cantidad de muestras son sólo 27, pero hasta los resultados que se conocen, no se presentan patrones no aleatorios de comportamiento de las resistencias de hormigón en las cartas Shewhart y CUSUM. Para el caso de EWMA, se tienen un crecimiento constante de la media ponderada entre la muestra 7 y 23, pero desde la 24 hasta la 27 decrece volviendo a la resistencia media objetivo.

Por otra parte, la media del proceso es  $314,3 \text{ kgf/cm}^2$ , mucho más alta que la resistencia especificada para el grado del hormigón (aproximadamente  $200 \text{ kgf/cm}^2$ ). Esto es positivo desde el punto de vista del cumplimiento al cliente que no rechazará el hormigón, pero es un punto negativo por el costo adicional que implica dosificar para una resistencia mucho mayor a la especificada.

Se deduce de los gráficos que las variaciones y desvíos en este hormigón son normales y el proceso es estable. Además, esto tiene coherencia con la pre clasificación de este hormigón para la planta analizada, cuyo estándar de control es “Bueno”. Sin embargo es posible disminuir costos trabajando en torno a una resistencia media más cercana a la resistencia especificada o a la resistencia requerida que es  $247,7 \text{ kgf/cm}^2$ .

3.2.7.2. Resultados HB25.0(90)20-10

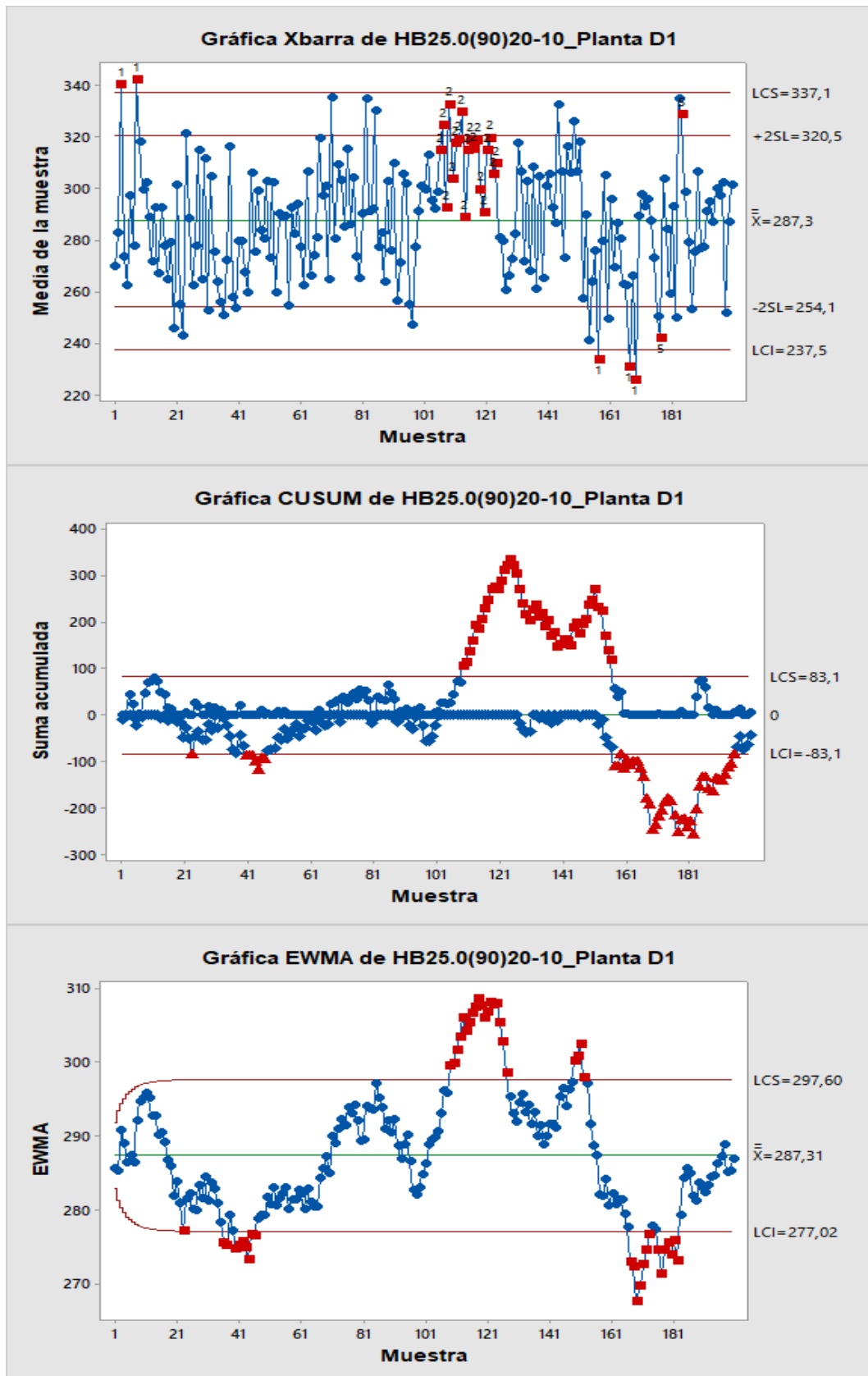


Gráfico 31: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB25.0(90)20-10, Planta D1.



### 3.2.7.2.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 31, se observa:

- Dos alertas de puntos más allá de 3 desviaciones estándar sobre la línea de control superior en las muestras 3 y 8. Tres alertas de puntos más allá de 3 desviaciones estándar bajo la línea de control inferior en las muestras 157, 167 y 169. En los 5 puntos el proceso está fuera de control estadístico.
- Entre las muestras 106 y 124, se presentan 8 resistencias consecutivas sobre la resistencia promedio del período. Este patrón no aleatorio de comportamiento de los datos indica que el proceso está fuera de control estadístico de acuerdo a la resistencia promedio del período analizado. En el punto 169, también se acumulan 8 puntos consecutivos bajo la resistencia promedio del proceso.
- En los puntos 109, 169, 177 y 184 se presentan dos puntos consecutivos más allá e dos desviaciones estándar de la media. En el punto 109 las desviaciones están sobre la media, en los puntos 177 y 184 están bajo la media y finalmente en el punto 184 nuevamente la desviación es sobre la media.

### 3.2.7.2.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 31, se observa:

- En el punto 23 y desde el punto 40 hasta el 46 el proceso presenta alertas de que el proceso no está bajo control estadístico y los desvíos son positivos, por lo que la media del proceso en estos puntos ha cambiado.
- Exceptuando las muestras descritas anteriormente, desde el inicio hasta la muestra 108, el proceso está bajo control estadístico. Las resistencias fluctúan en torno a cero, lo que en CUSUM implica que el proceso está controlado.
- Desde la muestra 109 hasta la muestra 195 el proceso se encuentra fuera de control estadístico. En un primer períodos desde la muestra 109 hasta aproximadamente la muestra 156, el proceso tiene desviaciones positivas sobre el límite superior  $H^+$ . Desde la muestra 157 a la 195, el proceso tiene desviaciones negativas bajo el límite de control  $H^-$ .

### 3.2.7.2.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 31, se observa:

- Fluctuaciones en torno a la media del proceso y un decaimiento de la media ponderada desde la muestra 11 hasta el muestra 23 que está bajo el límite de control inferior, por tanto el proceso está fuera de control estadístico.
- Desde la muestra 24 se ve un leve incremento en la media, pero decae y queda fuera del límite de control inferior desde la muestra 41 hasta la 46.
- Un período que fluctúa en torno a una media aproximada de  $281 \text{ kgf/cm}^2$ , desde la muestra 47, hasta la muestra 66. Proceso dentro de los límites de control.
- Un aumento de la resistencia media ponderada desde la muestra 67 hasta la muestra 85. Proceso dentro de los límites de control.

- Un decaimiento de la resistencia desde la muestra 68 a la 98 aproximadamente, pero el proceso se mantiene dentro de los límites de control.
- Un aumento considerable de la resistencia desde la muestra 99 hasta la 120. Las resistencias promedio ponderadas exceden el límite de control superior desde la muestra 109 y partir de la muestra 122 aproximadamente se observa un decaimiento en las medias ponderadas hasta la muestra 127.
- Entre las muestras 128 y 148, el proceso está bajo control y oscila en torno a una resistencia media de  $292 \text{ kgf/cm}^2$  aproximadamente.
- Desde la muestra 149 hasta la 152, el proceso está fuera de control estadístico. A partir de este punto se genera una gran desviación negativa en la resistencia media, pasando de estar sobre el límite superior (aproximadamente  $300 \text{ kgf/cm}^2$ , a estar bajo el límite inferior desde las muestras 167 a 182 con fluctuaciones de la media en torno a  $274 \text{ kgf/cm}^2$ .
- Desde la muestra 183 a la muestra hasta el final del período, se ve un incremento de la resistencia media tendiendo a la resistencia media del proceso.

#### 3.2.7.2.4. Síntesis

Sólo la carta Shewhart alerta los dos primeros desvíos superiores a 3 desviaciones estándar en las muestras 3 y 8. En EWMA y CUSUM se observan desvíos positivos respecto a la media, pero que no alcanzan a generar una alerta pues luego decae la resistencia.

Las 3 cartas coinciden en mostrar que el proceso para este hormigón y planta tiene un control de calidad más alto desde la muestra 1 a la 101 aproximadamente en comparación al período desde la muestra 102 hasta el final, donde se generan grandes desvíos que exceden los límites de control superior e inferior.

Estos desvíos desde la muestra 102 hasta el final, se aprecian de mejor forma en las cartas de CUSUM y EWMA.

CUSUM es el método que muestra más alertas el proceso y que por lo tanto es más estricto en el monitoreo de la calidad del hormigón para esta planta.

Respecto a la calidad del hormigón, éste podría ser rechazado en el período comprendido desde la muestra 157 a la 195, ya que de acuerdo a la carta de Shewhart existen muchas muestras cuya resistencia no cumple lo especificado para el grado del hormigón ( $250 \text{ kgf/cm}^2$  aproximadamente), de acuerdo a la carta CUSUM se trabaja con desvíos bajo el límite de control  $H^-$  y de acuerdo a EWMA en medias ponderadas bajo el límite de control inferior.

Desde la muestra 102 hasta el final del proceso existe mucha variación de la desviación estándar del proceso, lo que se refleja en las alertas que se generan a partir de esa muestra. Esto no es coherente con la pre clasificación ACI que sitúa a este proceso en un estándar de control "Excelente".

3.2.7.3. Resultados HB30.0(90)20-10

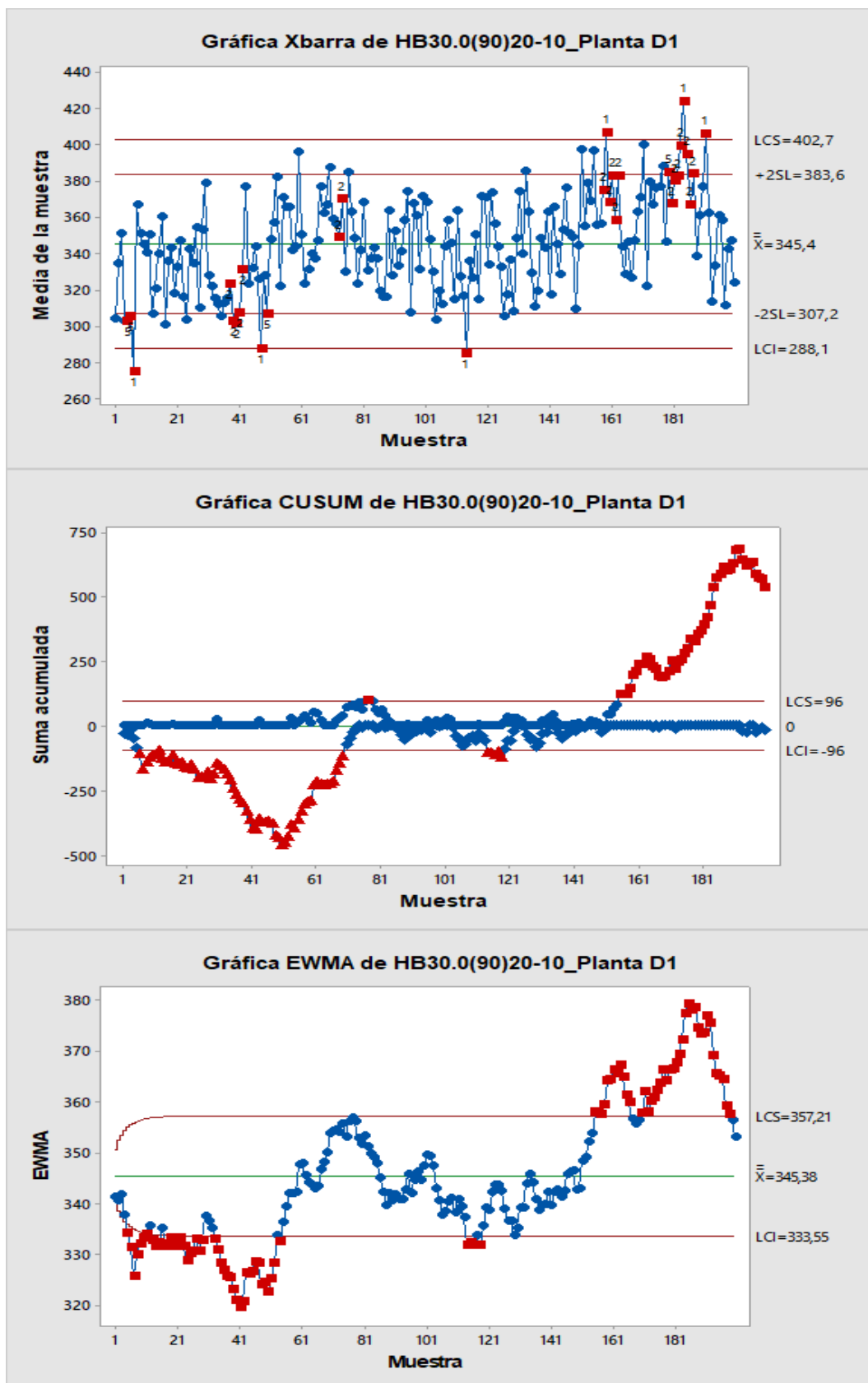


Gráfico 32: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB30.0(90)20-10, Planta D1.

### 3.2.7.3.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 32, se observa:

- Las resistencias de las muestras 7, 48 y 114, se desvían en más de 3 desviaciones estándar bajo la media del proceso.
- Las resistencias de las muestras 159, 184 y 191, están más allá de 3 desviaciones estándar sobre la media del período.
- Existen 4 períodos en que se presentan patrones no aleatorios de 8 resistencias consecutivas sobre o bajo la línea central: entre las muestras 38 y 42, donde las resistencias están bajo la resistencia promedio; en las muestras 73 y 74, donde las resistencias están sobre la resistencia promedio o Línea Central; entre las muestras 158 y 163, donde las resistencias están sobre la media del proceso y entre las muestras 180 y 187, donde las resistencias están sobre la Línea Central.
- Existen 6 períodos donde hay 2 de 3 puntos más allá de dos desviaciones estándar desde la línea central. Entre las muestras 5 y 7; entre las muestras 40 y 41; y la muestra 50, las desviaciones son sobre 2 desviaciones estándar de la media. En la muestra 179; muestras 184 y 185; y muestra 187, las muestras están por encima de dos desviaciones estándar de la media del proceso.
- En todos los puntos mencionados anteriormente, el proceso se encuentra fuera de control estadístico.
- Se aprecia un período con poca variabilidad desde el punto 41 hasta el punto 151 aproximadamente.

### 3.2.7.3.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 32, se observa:

- Un período de grandes desviaciones negativas desde la muestra 6 hasta la muestra 69. Si bien existen desviaciones positivas durante este período que disminuyen el desvío negativo, el proceso está fuera de control estadístico y los desvíos están por debajo del límite de control  $H^-$ .
- Hay un período en que las resistencias oscilan en torno a cero, desde la muestra 70 hasta la 154. Durante este período, excepto en las muestras 77 y desde la 114 hasta la 118, el proceso se encuentra bajo control estadístico.
- Finalmente, a partir del punto 155 y hasta el final del período, el proceso tiene una acumulación de desvíos positivos que van más allá de la línea de control superior  $H^+$ , dejando el proceso fuera de control estadístico en estos puntos.

### 3.2.7.3.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 32, se observa:

- Proceso fuera de control estadístico desde la muestra 5 hasta la muestra 54, excepto las muestras 12, 16, 30, 31, 32 y 53 que están dentro de los límites de control. Dentro de este período, de la muestra 7 a la 29, el proceso opera con una media ponderada estable en aproximadamente 332 kgf/cm<sup>2</sup>. Desde el punto 34

hasta el 41 se genera un decrecimiento en la resistencia media que fluctúa en torno a los 328 kgf/cm<sup>2</sup> hasta la muestra 51.

- A partir de la muestra 52, se incrementa progresivamente la resistencia promedio ponderada y el proceso está bajo control estadístico desde la muestra 55 hasta la 154, excepto los puntos 115, 115, 116 y 118.
- Finalmente el proceso se desvía sobre la línea de control superior hasta la muestra 198, en donde EWMA fluctúa en torno a los 370 kgf/cm<sup>2</sup>.

#### 3.2.7.3.4. Síntesis

La carta EWMA es la que entrega la primera alerta de que el proceso está fuera de control.

La carta CUSUM es la que entrega más alertas sobre desvíos del proceso, por lo tanto, si se quiere hacer un control más sensible de la calidad del proceso, CUSUM sería la opción para esta planta y hormigón.

Las alertas de CUSUM y EWMA son mucho más evidentes y fáciles de interpretar respecto a las alertas de Shewhart.

Por lo anterior, los períodos de buen control estadístico de la planta, se ven mejor reflejados también en CUSUM y EWMA respecto a Shewhart.

El proceso tiene muchas variaciones y desvíos en el período considerado. A pesar de que según la ACI el estándar de control para estas resistencias es “Excelente”, esto no se ve reflejado en las cartas de control.

En los períodos de desvíos negativos o medias inferiores a la media del proceso, o en resistencias bajo la resistencia especificada, los hormigones podrían ser rechazados por el cliente.

3.2.7.4. Resultados HB35.0(90)20-10

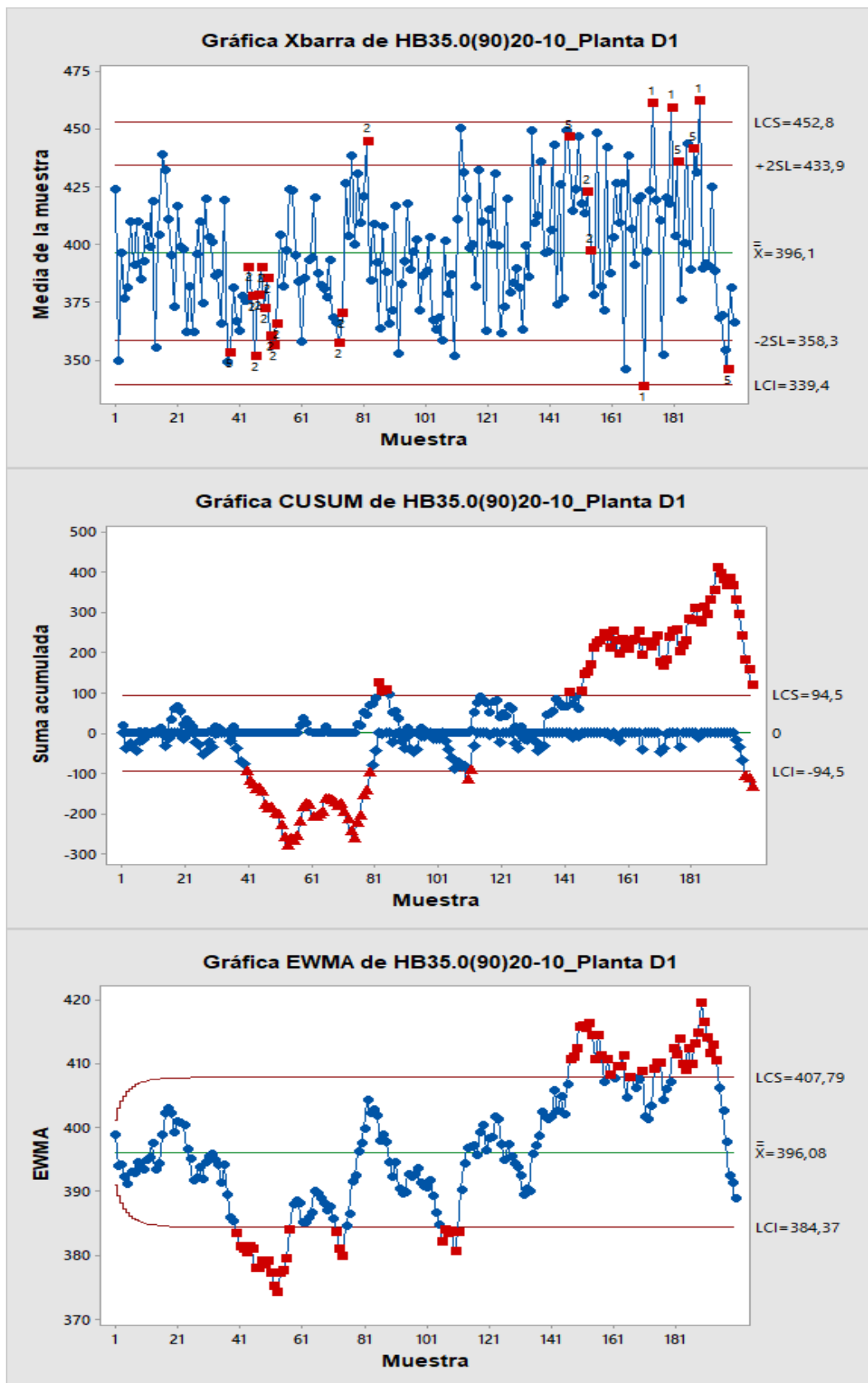


Gráfico 33: Shewhart  $\bar{X}$ , CUSUM y EWMA para HB35.0(90)20-10, Planta D1.

#### 3.2.7.4.1. Análisis Carta Shewhart

En el gráfico 33, se observa:

- Proceso con mucha dispersión de las resistencias, dispersión que aumenta hacia el final del período.
- La muestra 171 tiene una resistencia bajo 3 desviaciones estándar de la resistencia promedio.
- Las muestras 174, 180 y 189 tienen resistencias sobre 3 desviaciones estándar de la línea central o resistencia promedio.
- Desde la muestra 44 hasta la muestra 53 hay 8 puntos consecutivos bajo la resistencia promedio. Este patrón se repite en las muestras 73 y 74.
- Desde la muestra 74 a la 75 hay un crecimiento abrupto de resistencia y en la muestra 82 se tienen 8 muestras consecutivas sobre la línea central. Existe un cambio en la media del proceso desde la muestra 74, donde el promedio de las resistencias es inferior al promedio de las resistencias proceso, y la muestra 75, donde el promedio de las resistencias es superior al promedio de resistencias del proceso.
- Desde la muestra 83 a la muestra 146 el proceso es estable y las resistencias tienen aumentos y disminuciones aleatorias.
- En las muestras 153 y 154 se tienen 8 resistencias consecutivas sobre la media del proceso.
- En los puntos 38 y 198, se tiene la tendencia de 2 de 3 puntos bajo 2 desviaciones estándar de la resistencia promedio del proceso de  $396,1 \text{ kgf/cm}^2$ .
- En los puntos 147, 182, 187 y 189, se tienen 2 de 3 puntos sobre 3 desviaciones estándar desde la resistencia promedio, lo que es un patrón anormal en un proceso productivo.

#### 3.2.7.4.2. Análisis Carta CUSUM

En el gráfico 33, se observa:

- Desde el inicio hasta la muestra 37 aproximadamente, el proceso tiene un comportamiento normal, con resistencias fluctuando en torno a la resistencia promedio de forma aleatoria.
- A partir de la muestra 38 las resistencias comienzan a desviarse por debajo de la resistencia promedio hasta la muestra 56 en que se da la desviación negativa más grande.
- Entre las muestras 40 y 56 el proceso ya está bajo el límite de control inferior y por lo tanto fuera de control estadístico.
- A partir de la muestra 57 el proceso se acerca a la línea cero de CUSUM y las resistencias de las muestras 57, 58 y 59 están sobre la resistencia promedio del proceso observándose desvíos positivos en esas muestras.
- La resistencia decae en la muestra 61, pero vuelve a mostrar un desvío positivo en la muestra 69.
- Desde la muestra 70 a la 74 se observan desviaciones negativas respecto a la resistencia promedio, pero a partir de la muestra 75 las resistencias aumentan,

generando un aumento en la resistencia media y el proceso se mantiene medianamente estable hasta la muestra 141.

- A partir de la muestra 142 y hasta el final del período evaluado, las resistencias tienen en su gran mayoría desvíos positivos respecto al promedio, lo que sitúa el proceso fuera de control estadístico excediendo el límite de control superior. Durante este período de igual forma existen resistencias bajo la resistencia promedio y en especial hacia el final del período, en las últimas 6 muestras las resistencias están debajo de la resistencia promedio y fuera de control estadístico.

#### 3.2.7.4.3. Análisis Carta EWMA

En el gráfico 33, se observa:

- Proceso normal desde el comienzo hasta la muestra 36.
- A partir de la muestra 37, se observa que la media ponderada disminuye lo que es una alerta de que la media del proceso está disminuyendo.
- Desde la muestra 40 hasta la muestra 57, el proceso está fuera de control estadístico. Las resistencias están bajo el límite de control inferior, alcanzando su mínimo valor en la muestra 53.
- A partir de la muestra 54 los valores de EWMA comienzan a aumentar y el proceso se mantiene fluctuando en torno a una resistencia promedio de  $388 \text{ kgf/cm}^2$ , bajo control estadístico entre las muestras 58 y 71.
- Entre las muestras 72 y 74 las resistencias disminuyen y el proceso se encuentra fuera de control en este período.
- A partir de la muestra 75 se ve en la carta un aumento abrupto de la resistencia hasta la muestra 82, pero luego de este aumento, se ve una disminución de las resistencias hasta que exceden el límite de control inferior quedando fuera de control estadístico desde la muestra 106 hasta la muestra 111.
- Entre las muestras 112 y 113 se observa un aumento de resistencia y hasta la muestra 129 el proceso está bajo control estadístico fluctuando en torno al valor promedio de  $391,1 \text{ kgf/cm}^2$ .
- Desde la muestra 130 a la 135, las resistencias disminuyen pero a partir de la muestra 137 se observa un aumento y las resistencias comienzan a fluctuar en torno al límite de control superior de  $407,8 \text{ kgf/cm}^2$ , con la mayoría de las muestras sobre el límite de control (fuera de control estadístico) y otras dentro de los parámetros de control.
- Hacia el final del proceso se observa un decaimiento significativo de la resistencia de las muestras

#### 3.2.7.4.4. Síntesis

CUSUM entrega más alertas que las otras dos cartas, pero EWMA alerta más tempranamente sobre las desviaciones.

En el gráfico Shewhart no se logra apreciar claramente las tendencias de las resistencias del hormigón. Al contrario, en CUSUM y EWMA, se ve claramente la tendencia del hormigón, que aproximadamente desde la muestra 52 hasta la 194, presenta una clara tendencia al crecimiento de la resistencia promedio de las muestras, si bien existen



períodos en que las desviaciones fluctúan positiva y negativamente en torno a cero. Además, desde la muestra 1 hasta aproximadamente la muestra 37-38, se ve un comportamiento estable de las resistencias, que en el caso de CUSUM fluctúan en torno a cero y para EWMA, en torno a la resistencia promedio.

Entre las muestras 81 y 141, para las cartas CUSUM y EWMA, también se observa un período de buena calidad del proceso, con pocas desviaciones. Este período no se ve con claridad en Shewhart.

Si bien EWMA tiene un comportamiento similar a CUSUM, en la primera no se logra apreciar de buena forma si las resistencias están sobre o bajo la resistencia promedio del proceso. Hacia el final del proceso las resistencias están bajo la resistencia promedio, pero en EWMA está sobre la línea central (muestra 197).

El estándar de control para esta planta y hormigón es “Excelente” de acuerdo a la clasificación ACI. Si bien se da esta situación, de todas formas se observan muchas desviaciones del proceso, aunque este tiende a volver al estado de control estadístico.

## 4. Análisis general de resultados

Con la finalidad de conocer cómo trabajan las plantas y decidir cuál es el método que mejor desempeño tiene en la evaluación de los procesos productivos de hormigón y obtener una evaluación final de la calidad de las plantas y hormigones considerados, se realiza un análisis general de los resultados obtenidos, de acuerdo a los siguientes puntos:

- Resistencias promedio y requerida de los hormigones
- Observaciones generales de los métodos
- Rapidez de alertas de desviaciones
- Cantidad de alertas
- Evaluación de la calidad de los procesos
- Comentarios y Conclusiones

### 4.1. Resistencias promedio y requerida de los hormigones

A partir de la tabla 5, se obtiene el gráfico de resistencias promedio v/s resistencia requerida mostrado a continuación:

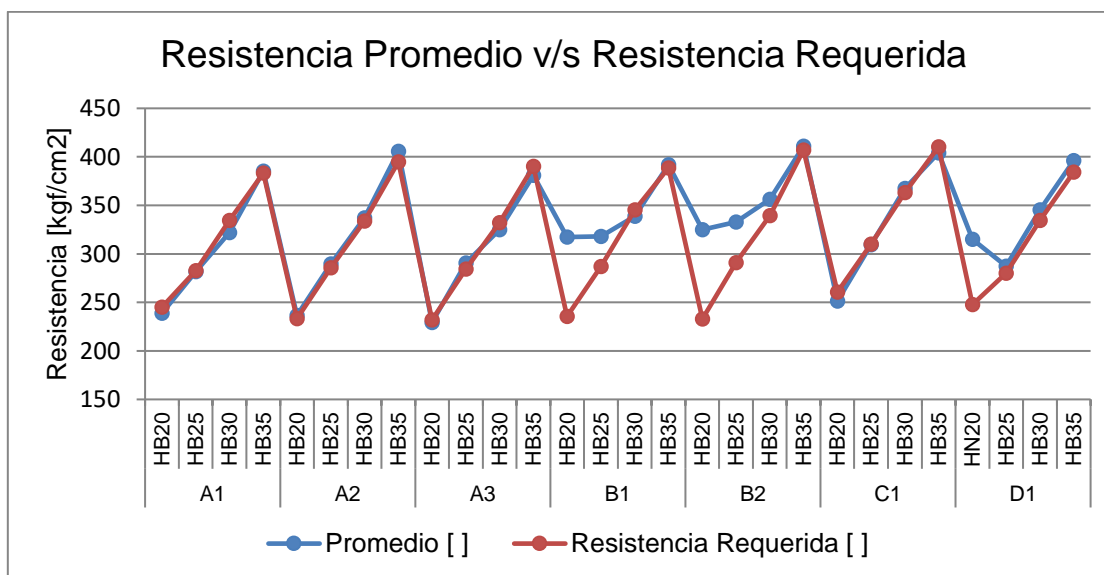


Gráfico 34: Resistencias promedio v/s resistencia requerida.

En este gráfico se observa que todas las plantas consideradas en el análisis trabajan en valores cercanos a la resistencia requerida según la desviación estándar de las plantas.

Los hormigones H20 y H30 de la planta A1; H30 de la planta A3; H30 de la planta B1 y H20 de la planta C1, son los que tienen una resistencia promedio con mayor diferencia por debajo de la resistencia requerida.

Por otra parte los hormigones H20 de la planta B1; H20 y H25 de la planta B2; y H20 de la planta D1 son los que tienen una resistencia promedio con mayor diferencia sobre la resistencia requerida.

Se observa en el gráfico 34 que las plantas hormigoneras B1 y B2 tienen resistencias promedio similares para sus hormigones HB20, HB25 y HB30. Es probable que estos hormigones se dosifiquen por dosis mínimas de cemento, lo que genera que no tengan mucha variación en sus resistencias a pesar de que son distintos grados de hormigón.

## 4.2. Observaciones generales de los métodos de control

Los métodos de control utilizados son aptos para detectar distintas desviaciones. En el caso de Shewhart, tiene un mejor desempeño y logra detectar grandes desviaciones respecto a la media disponiendo de menos muestras que CUSUM y EWMA. Estos últimos tienen mejor desempeño en la detección de pequeñas desviaciones.

En general, se aprecian alertas de desviaciones en los procesos productivos de los distintos hormigones y distintas plantas. CUSUM y EWMA son las cartas de control que más alertas tienen, siendo CUSUM la que alerta en mayor cantidad.

CUSUM es un método de control mucho más sensible a datos que estén fuera de tendencia o sean datos discordantes. Los desvíos de CUSUM en general generan un mayor impacto en la carta de control, teniendo una “vuelta más lenta” al estado “bajo control estadístico” luego de que indica una alerta en el proceso.

Las cartas de Shewhart y CUSUM tienen la ventaja de que es fácil de observar las desviaciones bajo el promedio del proceso o del valor objetivo al que se esté apuntando. EWMA no siempre es coherente en indicar claramente si una resistencia en un punto de una muestra está sobre o bajo la media, puesto que considera sólo sumas ponderadas en una sola línea del gráfico. CUSUM algorítmico en cambio, registra los desvíos positivos y negativos en torno al valor objetivo en dos curvas distintas lo que lo hace más sencillo de interpretar.

Al partir de los resultados presentados, se observa en todas las cartas de Shewhart que sin los criterios agregados de patrones de comportamiento de los datos, las alertas que arrojan para la prueba 1 (resistencias más allá de 3 desviaciones estándar) son pocas y no se dan en los mismos tiempos que las alertas de CUSUM y EWMA. Este exceso de criterios le quita simplicidad de análisis a esta carta de control.

## 4.3. Rapidez de alertas de desviaciones

Para concluir qué método de control alerta de forma más temprana las desviaciones del proceso, se registró el número de muestra en que cada método alertó la primera desviación en cada hormigón y cada planta analizada. El resultado se muestra en la tabla siguiente, en donde los datos en paréntesis son las alertas luego de la depuración de datos en algunas plantas.

Planta	Hormigón	Número de Muestra			
		Shewhart 1 (Todas las pruebas)	Shewhart 2 (Prueba 1)	EWMA	CUSUM
A1	HB20.0(90)20-10	8	39	6	9
	HB25.0(90)20-10	8 (9)	8 (9)	7 (6)	8 (6)
	HB30.0(90)20-12	8	8	13	15
	HB35.0(90)20-10	1	1	1	2
A2	HB20.0(90)20-10	10 (48)	-	1(48)	49(47)
	HB25.0(90)20-10	16 (22)	56(56)	29 (28)	29 (27)
	HB30.0(90)20-12	18	28	16	16
	HB35.0(90)20-10	36	48	<u>5 - 39*</u>	38
A3	HB20.0(90)20-10	33	102	31	31
	HB25.0(90)20-10	25	25	8	13
	HB30.0(90)20-12	16	16	17	17
	HB35.0(90)20-10	5	52	5	5
B1	HB20.0(90)20-10	8	8	-	-
	HB25.0(90)20-10	11	49	12	14
	HB30.0(90)20-10	12	12	12	12
	HB35.0(90)20-10	7 (7)	7	17 (16)	17 (7)
B2	HB20.0(90)20-10	13	44	4	9
	HB25.0(90)20-10	17	34	33	20
	HB30.0(90)20-10	7	46	7	7
	HB35.0(90)20-10	27	37	26	27
C1	HB20.0(90)20-10	8	39	4	6
	HB25.0(90)20-12	8	14	7	10
	HB30.0(90)20-10	16	17	17	17
	HB35.0(90)20-10	19	57	7	7
D1	HN20.0(90)20-08	-	-	-	-
	HB25.0(90)20-10	3	3	23	23
	HB30.0(90)20-10	5	7	5	6
	HB35.0(90)20-10	38	171	40	40
<b>Promedio</b>		<b>14,18 (15,85)</b>	<b>35,69 (35,73)</b>	<b>14,88 (16,57)</b>	<b>17,19 (16,57)</b>

Tabla 8: Tiempos de alertas.

A partir de los tiempos de alerta mostrados en la tabla 7, se tiene lo siguiente:

- La variación de los tiempos al depurar los datos, favorece las cartas CUSUM y reafirma el hecho de que para CUSUM existe mayor sensibilidad a datos fuera de tendencia.
- Se considera el dato 39 en lo señalado con asterisco en la tabla. Para EWMA se genera una alerta en la planta A2 para el HB35 en la muestra N° 5, pero no se considera esa alerta pues es puntual, y puede conducir a evaluaciones erróneas del desempeño de los métodos.

Para comparar los tiempos, se consideran los promedios de los datos depurados y la prueba 1 de la carta Shewhart. Sólo se considera la prueba 1, pues no se pusieron pruebas de patrones ni de tendencias para CUSUM y EWMA (se pueden observar patrones y desvíos previos a las alertas, pero no se consideran como alertas a diferencia de la carta Shewhart).

La rapidez de alerta de CUSUM y EWMA es la misma, mientras que Shewhart para la prueba 1 es una carta demasiado lenta en alertar tempranamente las desviaciones del proceso.

En las pruebas en que la carta de control gráfico Shewhart tiene ventajas, es en las que se disponían de pocas muestras y cuyas desviaciones eran muy grandes respecto a la resistencia promedio. Esto ocurrió en el hormigón HB20 de la planta B2, donde sólo Shewhart alerta el desvío de la media del proceso, no así CUSUM ni EWMA.

#### 4.4. Cantidad de alertas

A partir de los resultados obtenidos, se determinan la cantidad de alertas entregadas por los métodos de control para cada hormigón y planta analizada.

En general los métodos dieron muchas alertas en casi todos los hormigones considerados. Esto indica que la variación de los procesos de producción de hormigón es muy alta, sobre todo cuando se tienen mayor cantidad de muestras en el análisis. Esto sugiere que las cartas de control estudiadas tienden a detectar desviaciones mucho más pequeñas que las desviaciones que se generan en un proceso variable como es la producción de hormigón.

Sin embargo, el control de los procesos en las plantas hormigoneras es deficiente en general, no existen parámetros de control definidos y se trabaja principalmente en base a la “experiencia” y no con herramientas estadísticas más avanzadas como las cartas de control.

Planta	Grado	Alertas CUSUM		ALERTAS EWMA		ALERTAS SHEWHART	
		Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
A1	HB20.0(90)20-10	74	74%	53	53%	30	30%
	HB25.0(90)20-10	55 <b>(33)</b>	45% <b>(27%)</b>	36 <b>(35)</b>	30% <b>(29%)</b>	16 <b>(16)</b>	13% <b>(13%)</b>
	HB30.0(90)20-12	70	39%	51	28%	23	13%
	HB35.0(90)20-10	17	29%	10	17%	3	5%
A2	HB20.0(90)20-10	4 <b>(2)</b>	8% <b>(4%)</b>	2 <b>(1)</b>	4% <b>(2%)</b>	2 <b>(1)</b>	4% <b>(2%)</b>
	HB25.0(90)20-10	57 <b>(92)</b>	38% <b>(63%)</b>	42 <b>(46)</b>	28% <b>(31%)</b>	24 <b>(22)</b>	16% <b>(15%)</b>
	HB30.0(90)20-12	88	68%	49	38%	26	20%
	HB35.0(90)20-10	117	79%	69	47%	19	13%
A3	HB20.0(90)20-10	73	57%	49	38%	26	20%
	HB25.0(90)20-10	68	76%	46	51%	14	16%
	HB30.0(90)20-12	45	42%	27	25%	7	7%
	HB35.0(90)20-10	11	21%	3	6%	3	6%
B1	HB20.0(90)20-10	0	0%	0	0%	2	10%
	HB25.0(90)20-10	21	23%	22	24%	13	14%
	HB30.0(90)20-10	36	46%	13	17%	5	6%
	HB35.0(90)20-10	8 <b>(21)</b>	12% <b>(32%)</b>	6 <b>(10)</b>	9% <b>(15%)</b>	10 <b>(11)</b>	15% <b>(17%)</b>
B2	HB20.0(90)20-10	19	31%	18	30%	6	10%
	HB25.0(90)20-10	30	23%	20	15%	14	11%
	HB30.0(90)20-10	20	23%	16	19%	7	8%
	HB35.0(90)20-10	70	72%	41	42%	21	22%
C1	HB20.0(90)20-10	17	36%	7	15%	7	15%
	HB25.0(90)20-12	170	86%	86	43%	55	28%
	HB30.0(90)20-10	172	87%	88	44%	39	20%
	HB35.0(90)20-10	38	58%	25	38%	6	9%
D1	HN20.0(90)20-08	0	0%	0	0%	0	0%
	HB25.0(90)20-10	89	45%	43	22%	26	13%
	HB30.0(90)20-10	107	54%	97	49%	29	15%
	HB35.0(90)20-10	97	49%	58	29%	24	12%

Tabla 9: Cantidad de alertas.

De acuerdo a lo analizado, CUSUM es el método que es mejor en cuanto a tener un control de los procesos de las plantas, puesto que:

- Es de fácil interpretación permitiendo ver tendencias, desvíos y resistencias bajo el valor objetivo
- Alerta tempranamente los desvíos del sistema
- Presenta una gran cantidad de alertas lo que permitiría tener un control más riguroso de los procesos y así disminuir costos o modificar la dosificación de los productos a fin de corregir eventuales resistencias bajo la especificada para el grado de hormigón.

## 4.5. Evaluación de la calidad de los procesos

A partir de los datos de la tabla 8, se realiza el histograma mostrado en el gráfico 34, con el fin de determinar una clasificación relativa de los hormigones analizados de acuerdo a la cantidad de alertas que entrega el método CUSUM. Las alertas del método siguen una distribución normal como se muestra en el gráfico 8, con un promedio de 44% de alertas del método.

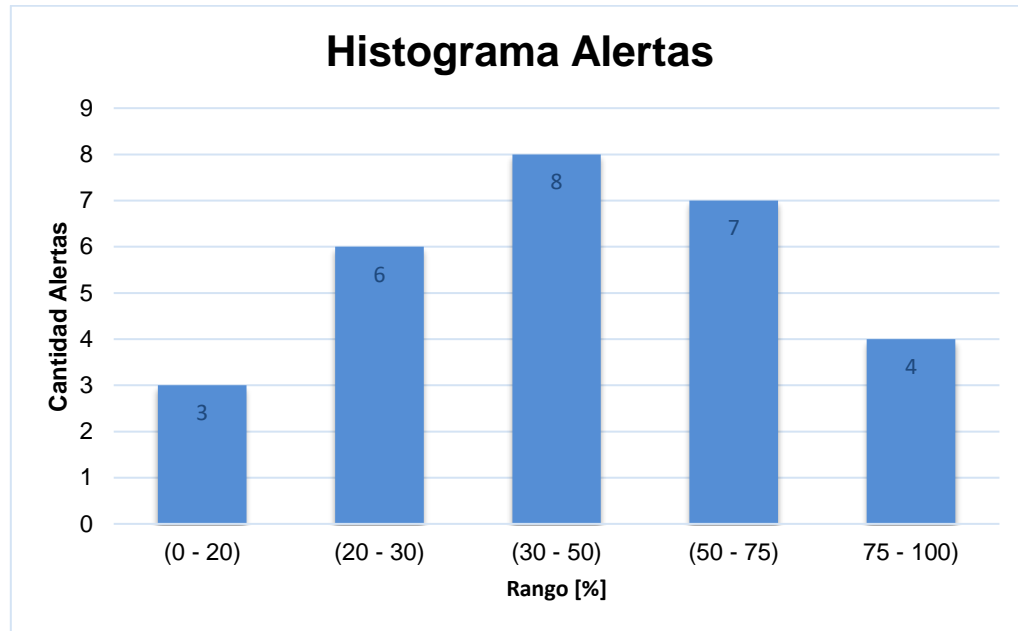


Gráfico 35: Distribución porcentaje de alertas CUSUM

Con la información de las alertas se propone una clasificación CUSUM que se determina a partir de la cantidad de alertas que entrega el método expresadas como porcentaje del total de muestras del período del proceso considerado.

Las resistencias de un hormigón se clasificarán en “Muy Bueno”, “Bueno”, “Normal”, “Malo” y “Muy Malo” cuyo correspondiente rango de porcentajes de alertas se presenta en la tabla 9 a continuación.

Rango [%]	Cantidad	Clasificación CUSUM
<b>(0 - 20)</b>	3	Muy Bueno
<b>(20 - 30)</b>	6	Bueno
<b>(30 - 50)</b>	8	Normal
<b>(50 - 75)</b>	7	Malo
<b>(75 - 100)</b>	4	Muy Malo

Tabla 10: Clasificación CUSUM según porcentaje de alertas entregadas.

Con esta clasificación propuesta es posible obtener una clasificación para cada hormigón analizado. La tabla 10 muestra la pre clasificación dada por la tabla ACI y la clasificación entregada de acuerdo al porcentaje de alertas según CUSUM. En esta tabla se consideran sólo las clasificaciones luego de depurar los datos.

Planta	Grado	Estándar de Control ACI	Clasificación CUSUM
A1	<b>HB20.0(90)20-10</b>	<b>Bueno</b>	<b>Malo</b>
	HB25.0(90)20-10	Excelente	Muy Bueno
	HB30.0(90)20-12	Excelente	Bueno
	HB35.0(90)20-10	Excelente	Muy Bueno
A2	HB20.0(90)20-10	Excelente	Excelente
	<b>HB25.0(90)20-10</b>	<b>Muy Bueno</b>	<b>Malo</b>
	<b>HB30.0(90)20-12</b>	<b>Excelente</b>	<b>Malo</b>
	<b>HB35.0(90)20-10</b>	<b>Bueno</b>	<b>Muy Malo</b>
A3	<b>HB20.0(90)20-10</b>	<b>Excelente</b>	<b>Malo</b>
	<b>HB25.0(90)20-10</b>	<b>Excelente</b>	<b>Muy Malo</b>
	HB30.0(90)20-12	Excelente	Bueno
	HB35.0(90)20-10	Muy Bueno	Muy Bueno
B1	HB20.0(90)20-10	Excelente	Excelente
	HB25.0(90)20-10	Muy Bueno	Muy Bueno
	HB30.0(90)20-10	Bueno	Bueno
	HB35.0(90)20-10	Muy Bueno	Bueno
B2	HB20.0(90)20-10	Excelente	Bueno
	HB25.0(90)20-10	Muy Bueno	Muy Bueno
	HB30.0(90)20-10	Muy Bueno	Muy Bueno
	HB35.0(90)20-10	Pobre	Malo
C1	<b>HB20.0(90)20-10</b>	<b>Pobre</b>	<b>Bueno</b>
	HB25.0(90)20-12	Justo	Muy Malo
	HB30.0(90)20-10	Pobre	Muy Malo
	HB35.0(90)20-10	Pobre	Malo
D1	HN20.0(90)20-08	Bueno	Excelente
	HB25.0(90)20-10	Excelente	Bueno
	<b>HB30.0(90)20-10</b>	<b>Excelente</b>	<b>Malo</b>
	HB35.0(90)20-10	Excelente	Bueno

Tabla 11: Clasificación ACI versus clasificación CUSUM.

Se observa en la tabla 10 que para algunos hormigones no es coherente la clasificación de estándar de control ACI214R-11 con la clasificación CUSUM. Lo esperable sería que un hormigón con alta desviación estándar en sus resistencias, tuviera también una alta cantidad de alertas y por ende una mala clasificación CUSUM y viceversa, que las resistencias de un hormigón con baja desviación estándar tuvieran una buena clasificación CUSUM. Esta premisa no se cumple en 8 de los 28 hormigones analizados.



Los hormigones HB20 de la planta A1; HB25, HB30 y HB35 de la planta A2; HB20 y HB25 de la planta A3; y HB30 de la planta D1, tienen una excelente, buena o muy buena preclasificación pero una mala o muy mala clasificación CUSUM. Este fenómeno se produce porque, si bien la desviación estándar global del período es baja, los procesos no trabajan en torno a un valor objetivo constante. En general las resistencias de estos hormigones no están fluctuando en torno a la resistencia promedio del período sino que durante un tiempo se tienen resistencias consecutivas sobre (o bajo) la resistencia promedio y que luego cambia teniendo resistencias consecutivas bajo (o sobre) la resistencia promedio del período (ver gráficos 2, 9, 11, 12, 13, 14 y 32 que corresponden a los hormigones señalados). En síntesis se tiene una baja desviación estándar, pero un proceso que tiene cambios en la resistencia objetivo a la que apunta lo que genera acumulación de desviaciones en el método CUSUM.

Para una mejor explicación, se considera el ejemplo explicativo 1 de la tabla 12. Se tienen dos series de 14 resistencias para dos hormigones H20 con igual promedio (200 kgf/cm<sup>2</sup>) e igual desviación estándar (26,4 kgf/cm<sup>2</sup>, “Excelente” para el estándar ACI).

H20 caso A		H20 Caso B	
Muestra N°	R28 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Muestra N°	R28 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
1	175	1	175
2	225	2	175
3	175	3	175
4	225	4	175
5	175	5	175
6	225	6	175
7	175	7	175
8	225	8	225
9	175	9	225
10	225	10	225
11	175	11	225
12	225	12	225
13	175	13	225
14	225	14	225
<b>Promedio</b>	<b>200</b>	<b>Promedio</b>	<b>200</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>25,9</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>25,9</b>

Tabla 12: Ejemplo explicativo 1.

Las resistencias del hormigón H20 caso A, fluctúan en torno a 200, pero las resistencias del hormigón H20 caso B no (ver figura 9).

Al aplicar el método CUSUM a ambas series de resistencias, considerando  $h=5$  y  $k=0,5$ , se obtiene lo mostrado en la figura 10. El proceso está dentro de los parámetros de control para el hormigón H20 caso A, cuyas resistencias fluctúan en torno a el valor promedio, pero presenta alertas en el hormigón H20 caso B, debido a que en este caso la resistencia en ningún período apunta al promedio.

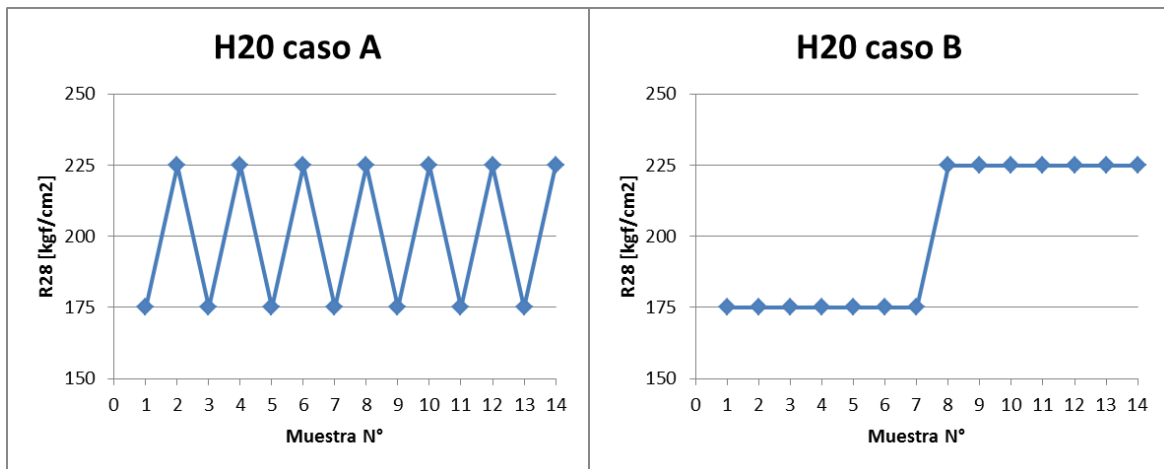


Figura 9: Ejemplo Explicativo 1

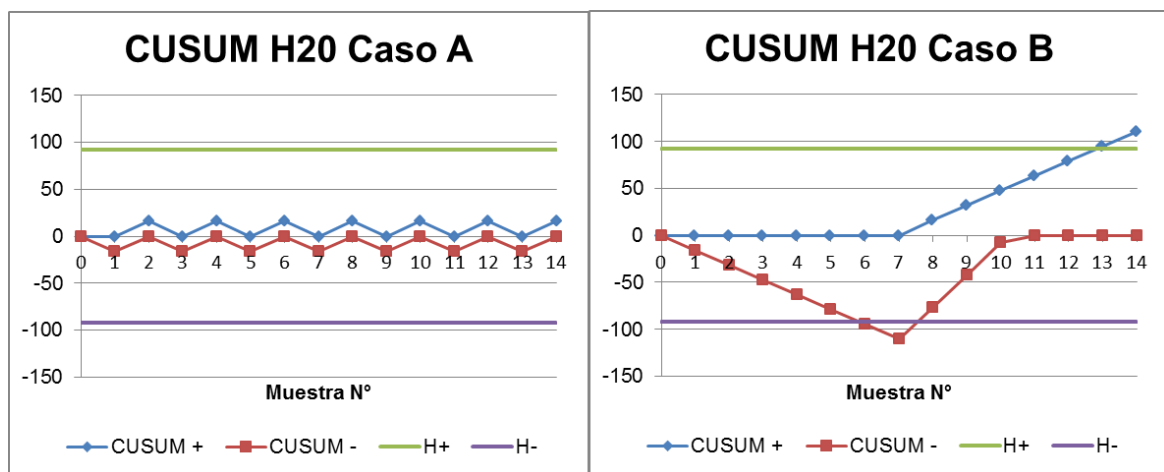


Figura 10: CUSUM Ejemplo explicativo 1.

De continuar extendiéndose el comportamiento del hormigón H2O caso B, las alertas serían muchas más y el proceso tendría una clasificación CUSUM “Mala” o “Muy Mala”. En el caso A, si se continúa con el mismo comportamiento en el tiempo, la planta siempre tendrá una clasificación CUSUM “Excelente” pues no tendrá alertas en ninguna muestra del proceso.

El otro fenómeno que se genera, tiene que ver con el hormigón H2O de la planta C1 (ver gráfico 26). Tiene una preclasificación ACI “Pobre”, pero una clasificación CUSUM “Buena”. Esta situación se explica debido a que la carta CUSUM está parametrizada de acuerdo a los datos de las plantas, es decir, los límites de control se establecen de acuerdo a la desviación estándar de las resistencias del hormigón de la planta en análisis, en este caso, el H2O de la planta C1.

Para analizar de mejor forma esta situación se considera el ejemplo explicativo 2 de la tabla 13. En este caso se va a suponer un comportamiento de resistencias que fluctúan en torno al promedio del proceso, pero con una desviación estándar mucho mayor (51,4 kgf/cm<sup>2</sup>, “Pobre” para el estándar ACI). La media del proceso es la misma que en los casos A y B, 200 kgf/cm<sup>2</sup>.

H2O Caso C	
Muestra N°	R28 días [kgf/cm2]
1	130
2	270
3	130
4	270
5	130
6	270
7	130
8	270
9	130
10	270
11	130
12	270
13	130
14	270
<b>Promedio</b>	<b>200</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>51,4</b>

Tabla 13: Ejemplo explicativo 2.

En la figura 11 se presenta el comportamiento de las resistencias para el caso C. Se ve claramente que la dispersión ha aumentado, pero existe una fluctuación en torno a la resistencia promedio del hormigón.

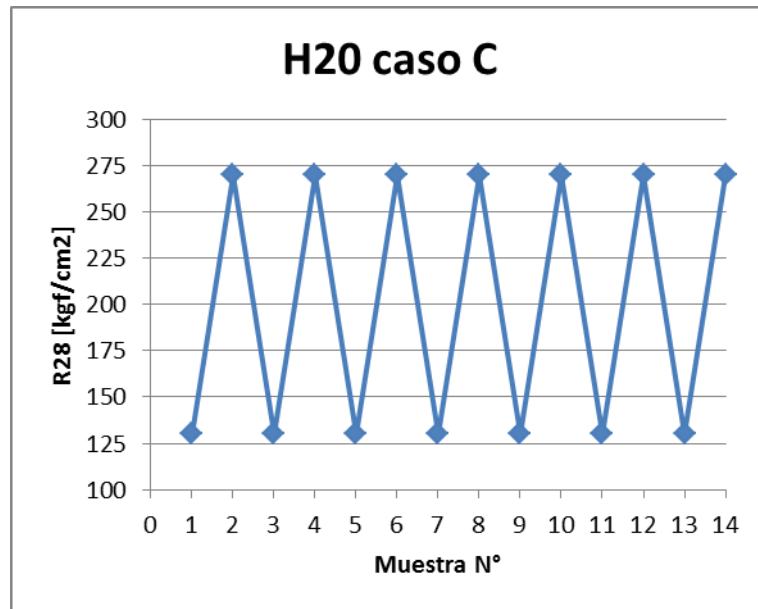


Figura 11: Ejemplo explicativo 2

Considerando  $h=5$  y  $k=0,5$ , se obtiene la carta CUSUM mostrada en la figura 12. Como se aprecia en la figura, CUSUM no entrega ninguna alerta a pesar de que el proceso tiene una desviación estándar elevada.

Esto se debe principalmente a que los límites de control de las cartas de control y en particular de CUSUM, se calculan a partir de la desviación estándar de la planta. En este caso la desviación es muy alta, por lo tanto los límites de control son más “holgados” y están más alejados de la línea central en comparación al ejemplo explicativo 1, caso A.

El control del proceso se realiza, y se parametriza en base a datos obtenidos del mismo proceso, por lo tanto, si el comportamiento de las resistencias es estable y fluctúan sobre y bajo la media del proceso, CUSUM no entregará alertas pues para la desviación estándar de las resistencias no hay desvíos anormales. Esto es lo que ocurre en el caso de la planta C1 hormigón H20, donde se tienen pocas resistencias y tienen un comportamiento relativamente estable para la alta desviación estándar de sus resistencias.

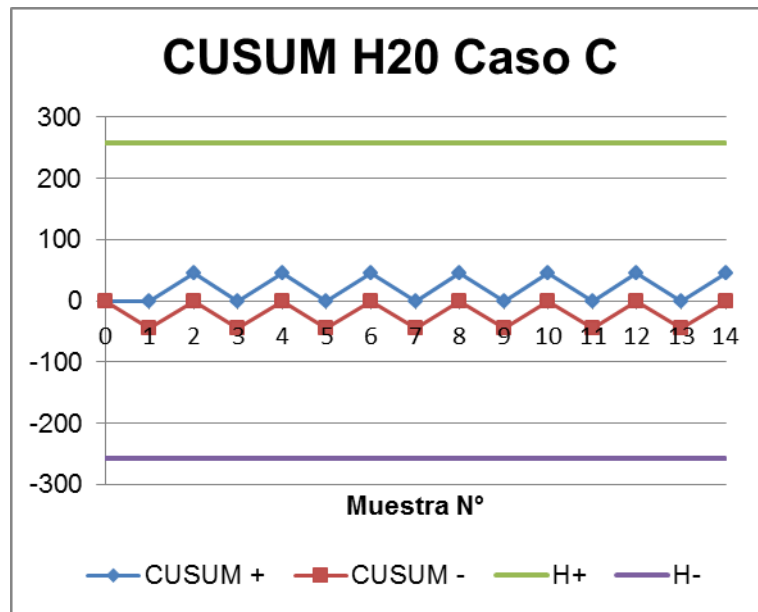


Figura 12: CUSUM ejemplo explicativo 2.

Para obtener una evaluación final de los hormigones “no coherentes” (señalados en negrita fondo gris en la tabla 10), se aplican las cartas de control gráfico CUSUM para desviaciones que tengan todas las clasificaciones ACI. Las desviaciones utilizadas serán 25 kgf/cm<sup>2</sup> (Excelente), 30 kgf/cm<sup>2</sup> (Muy Bueno), 25 kgf/cm<sup>2</sup> (Bueno), 25 kgf/cm<sup>2</sup> (Justo) y 25 kgf/cm<sup>2</sup> (Pobre).

A continuación se presentan los gráficos para las distintas desviaciones estándar.

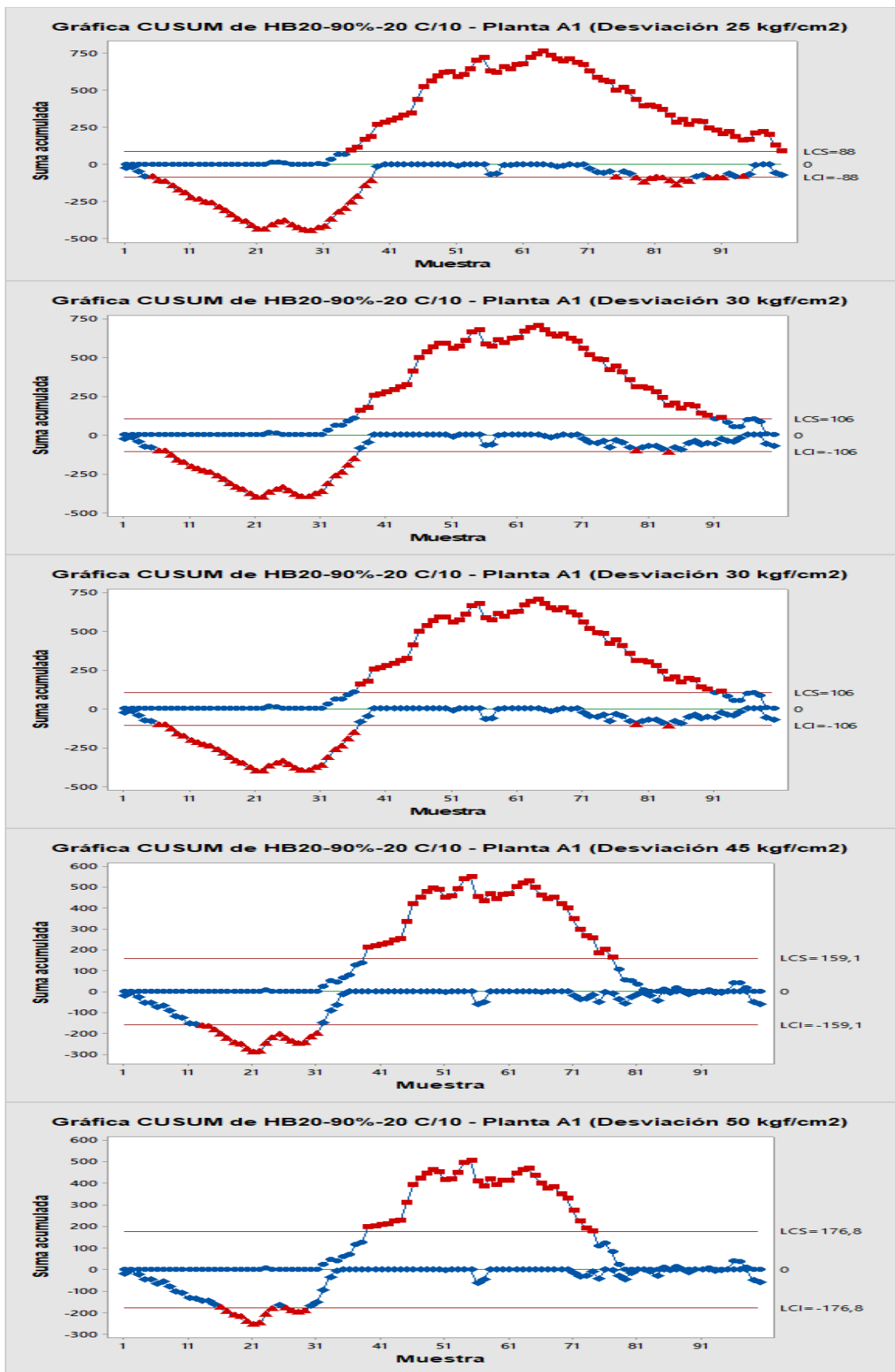


Gráfico 36: CUSUM HB20-90%-20 C/10, Planta A1, distintas desviaciones estándar.

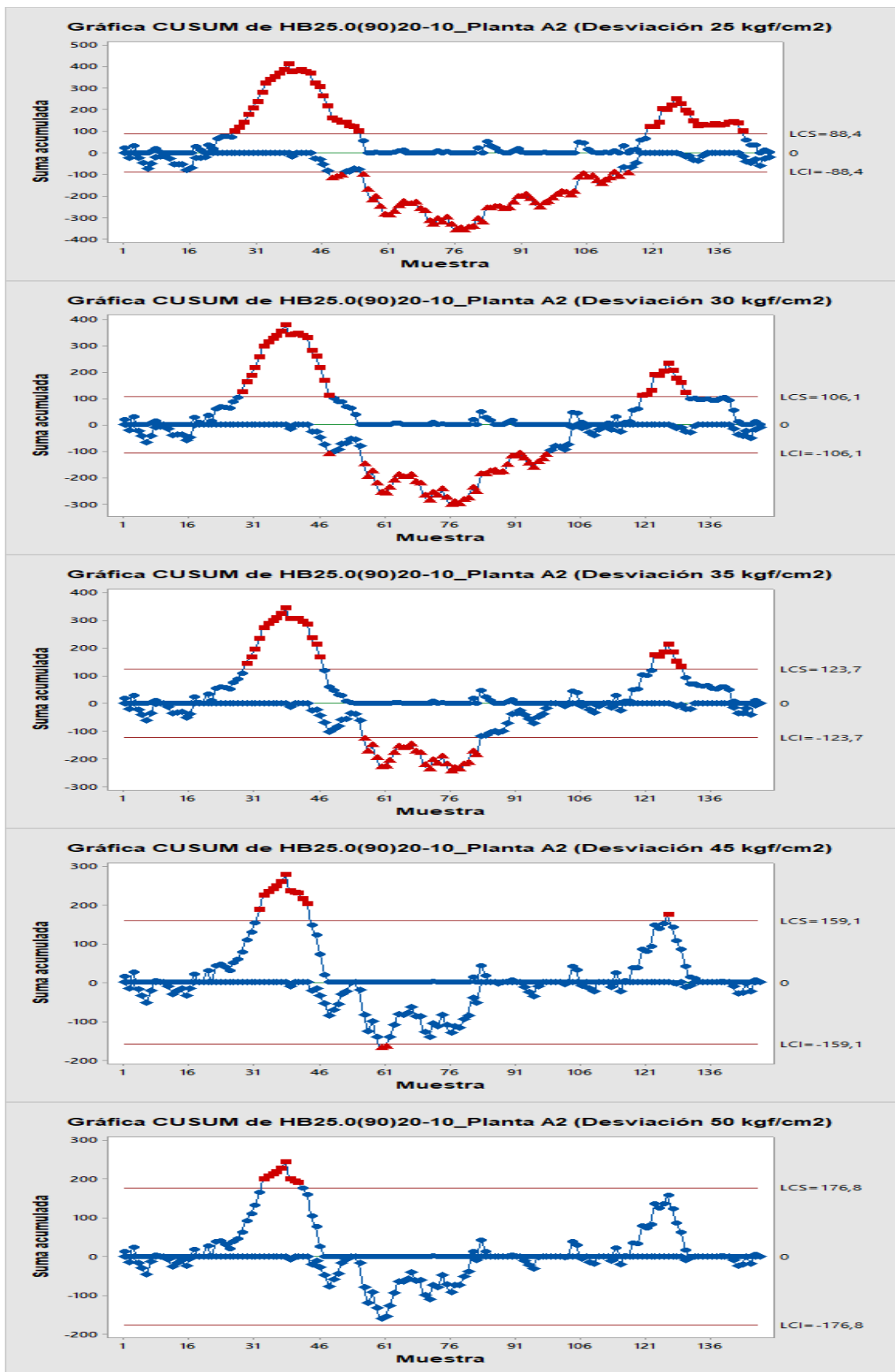


Gráfico 37: CUSUM HB25(90)20-10, Planta A2, distintas desviaciones estándar.

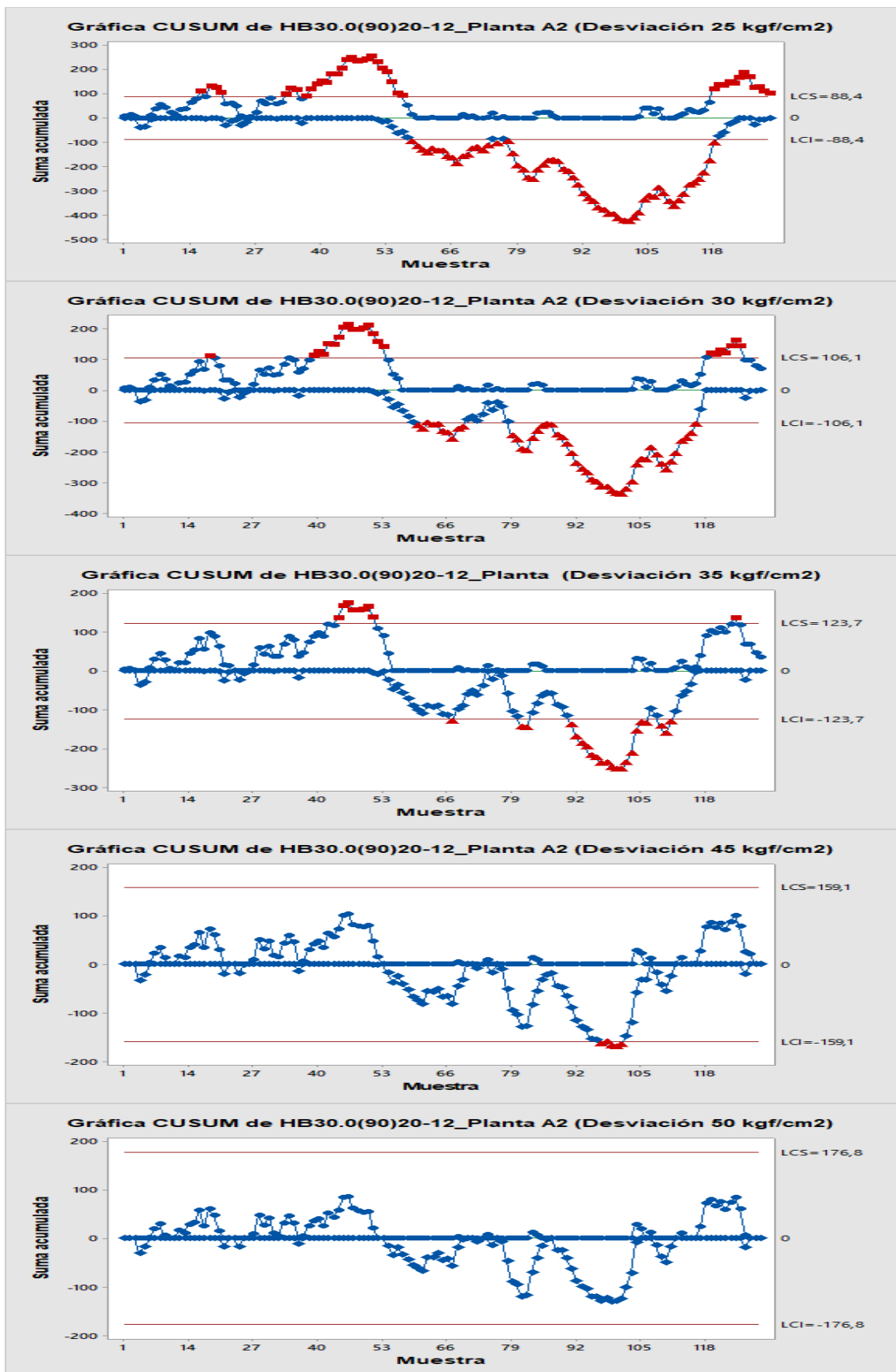


Gráfico 38: CUSUM HB30(90)20-12, Planta A2, distintas desviaciones estándar.

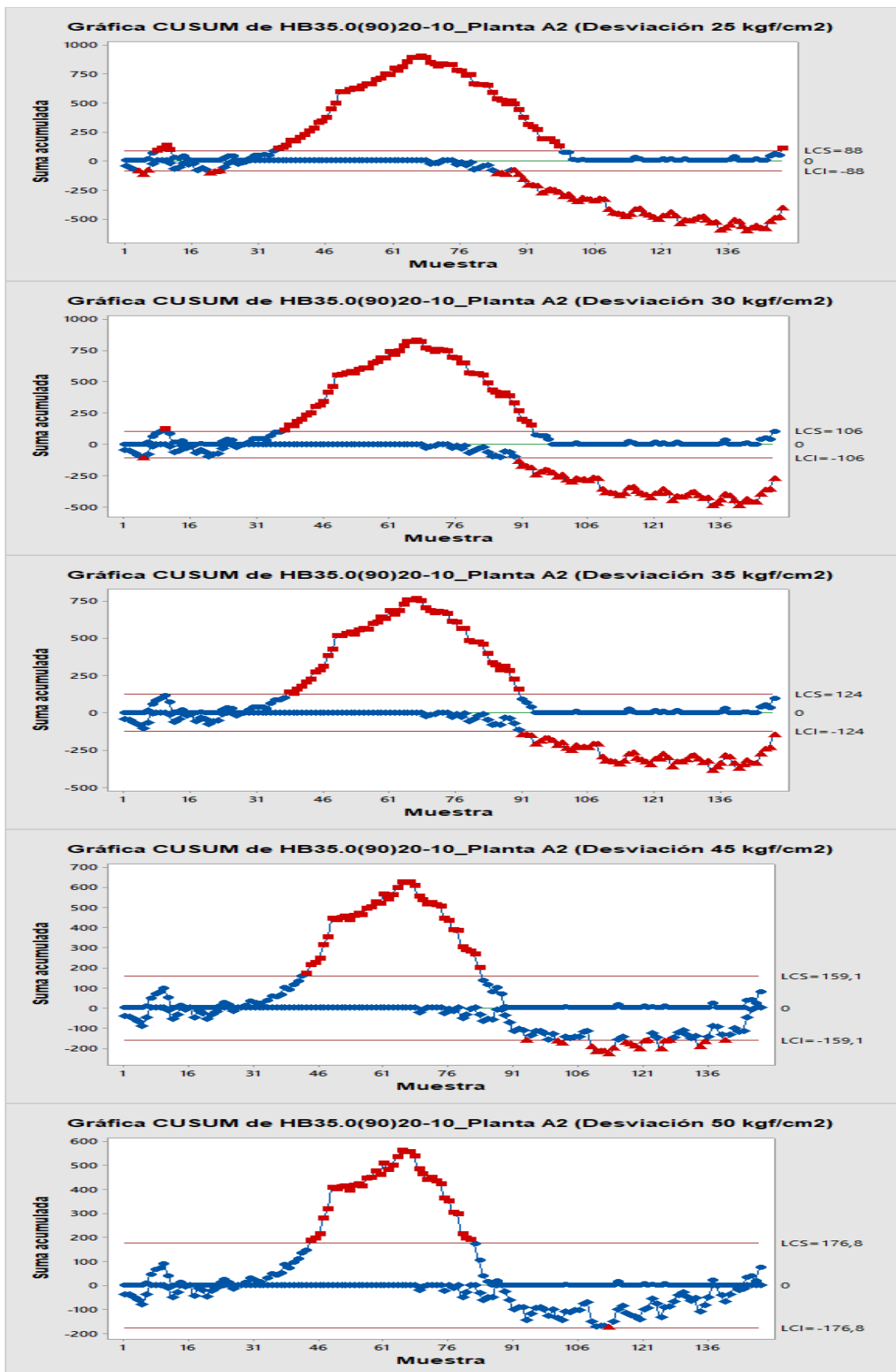


Gráfico 39: CUSUM HB35(90)20-10, Planta A2, distintas desviaciones estándar.



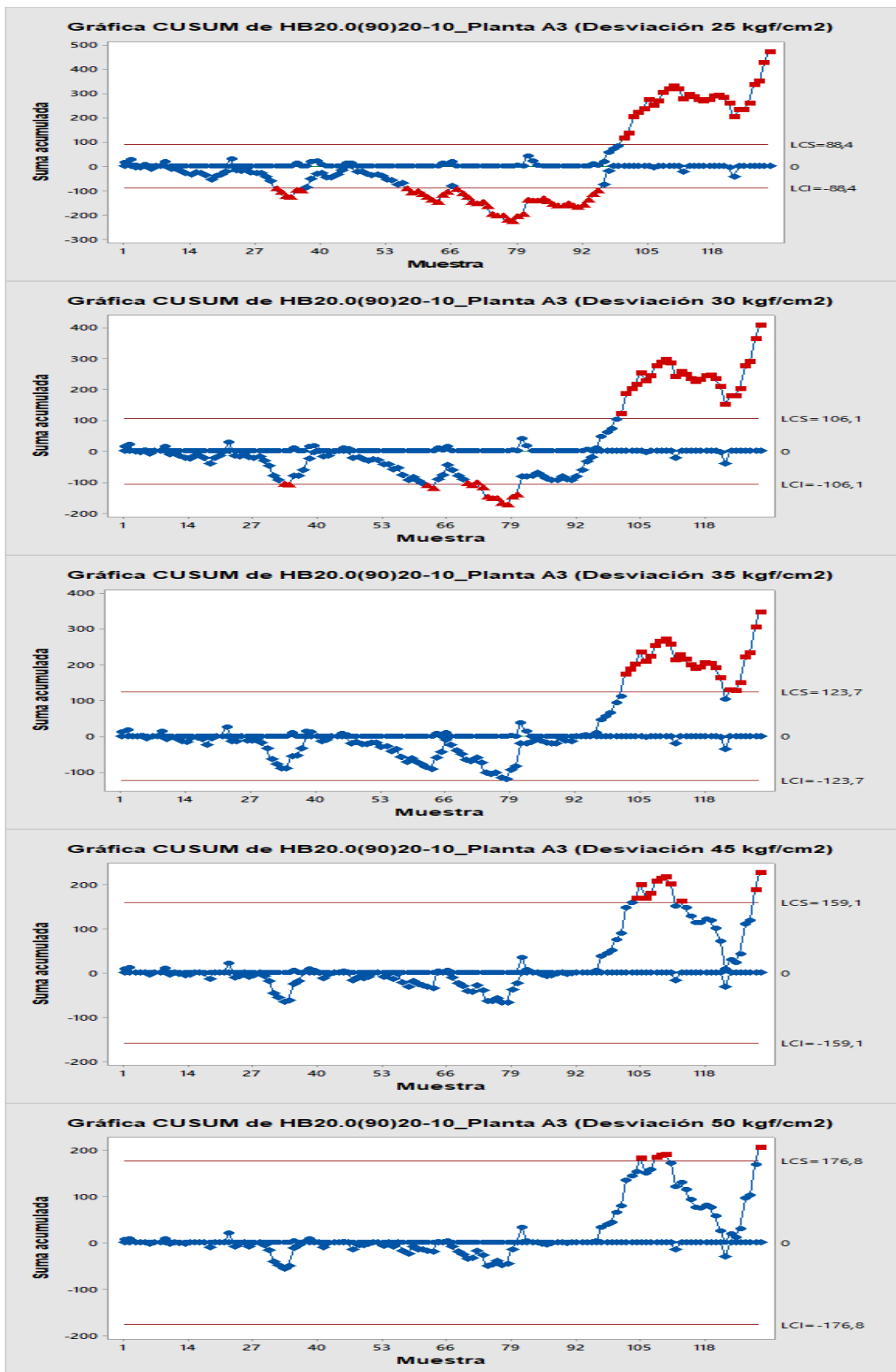


Gráfico 40: CUSUM HB20(90)20-10, Planta A2, distintas desviaciones estándar.

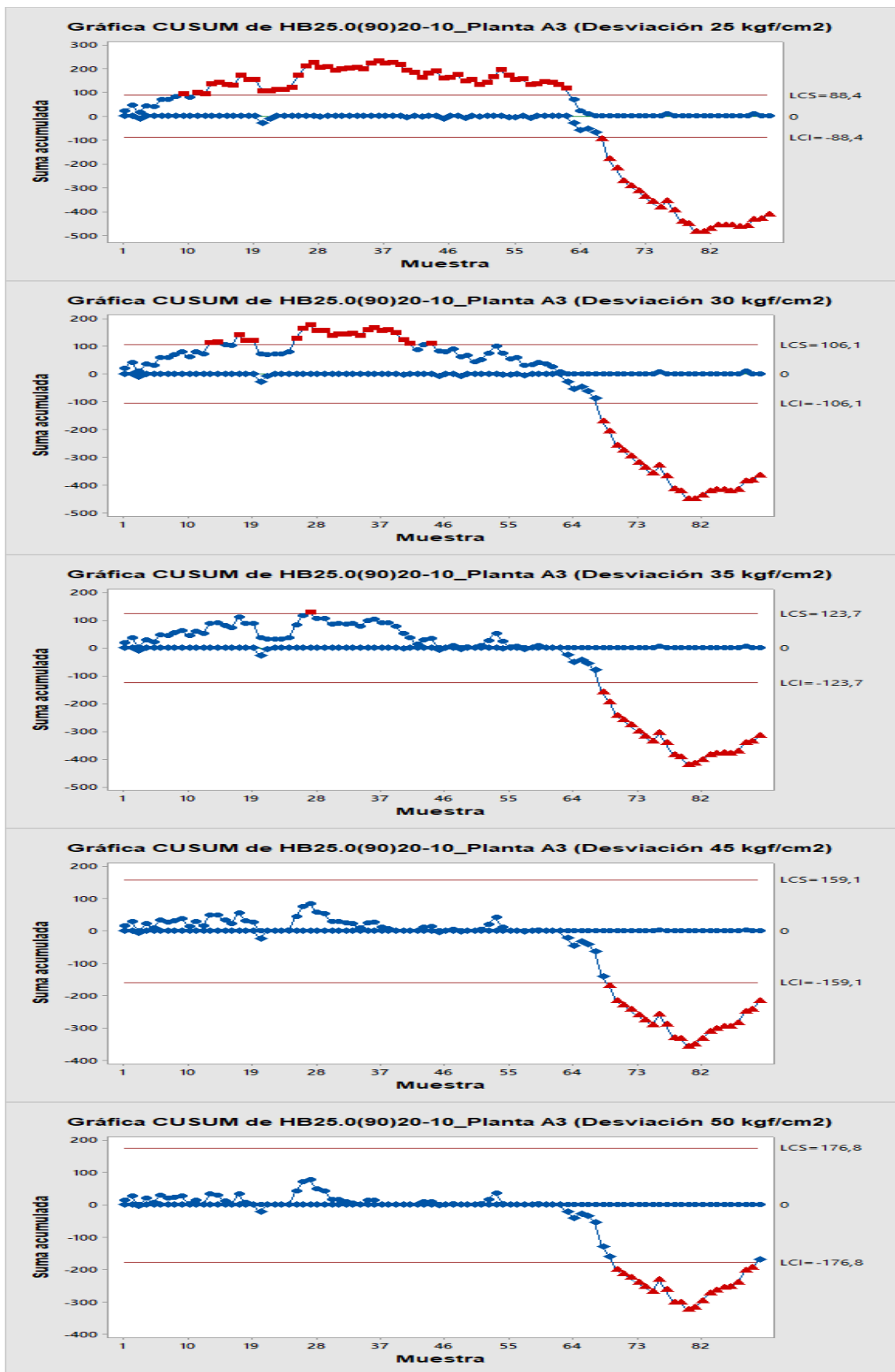


Gráfico 41: CUSUM HB25(90)20-10, Planta A3, distintas desviaciones estándar.

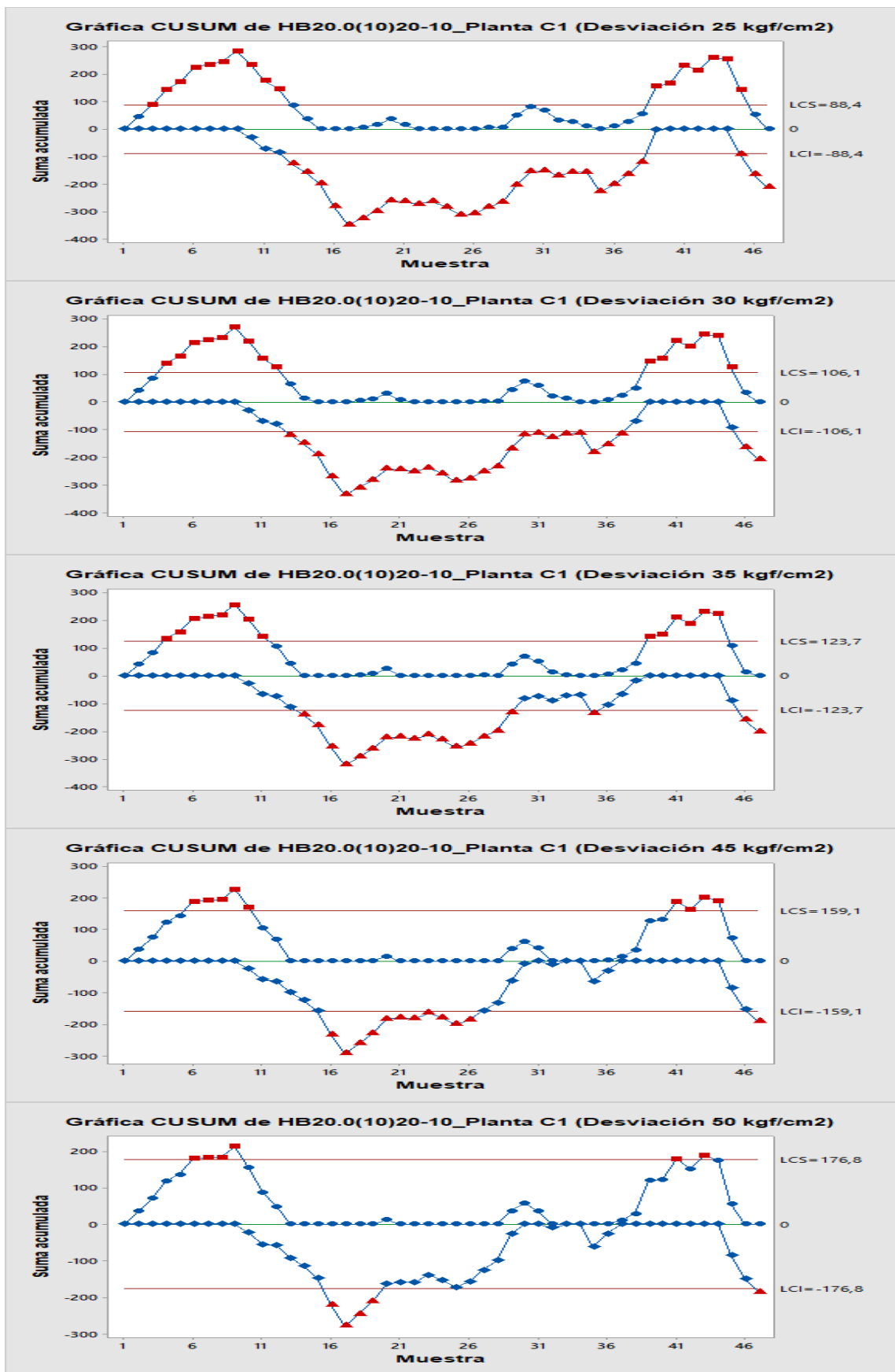


Gráfico 42: CUSUM HB20.0(90)20-10, Planta C1, distintas desviaciones estándar.

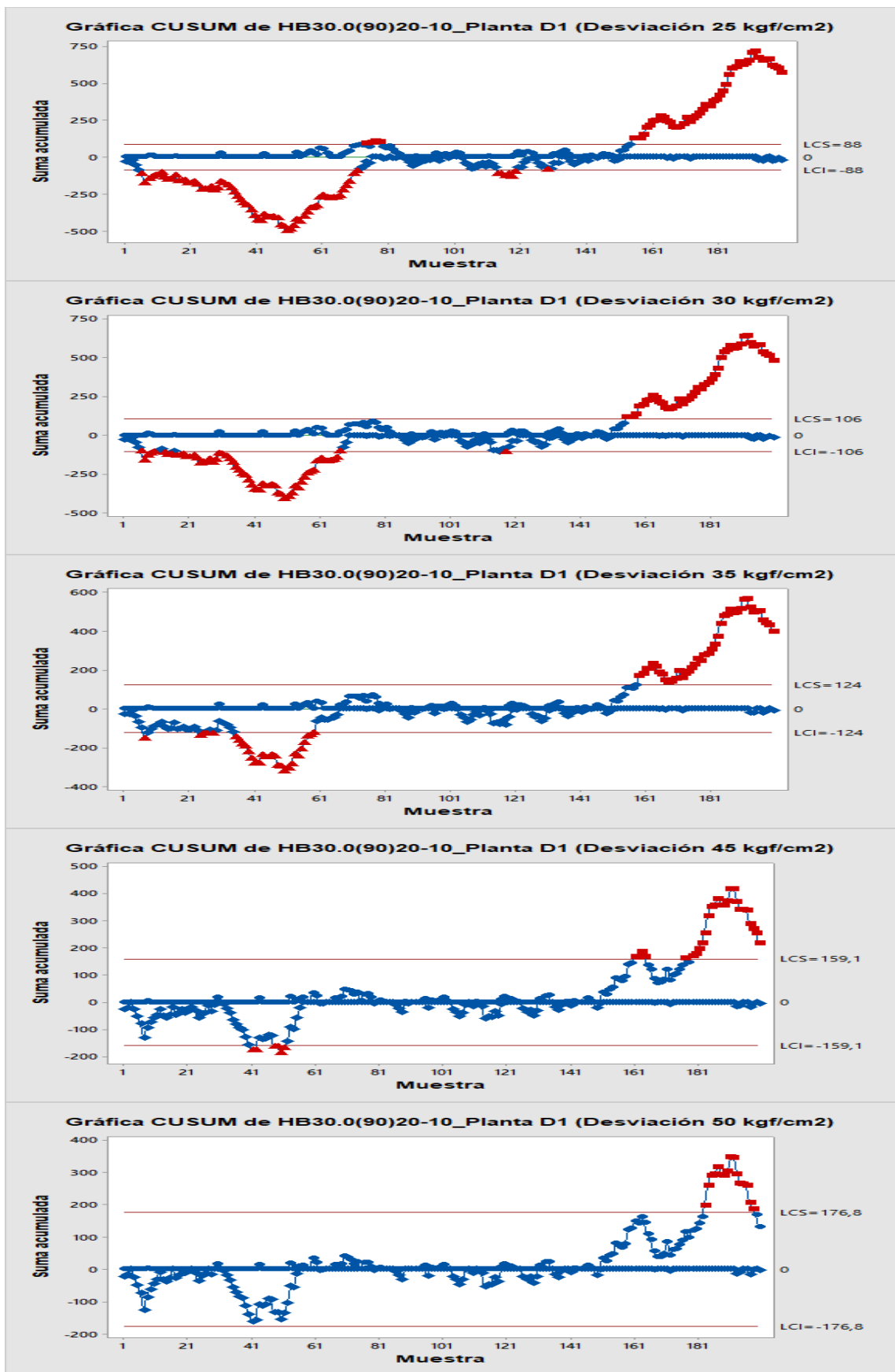


Gráfico 43: CUSUM HB30.0(90)20-10, Planta D1, distintas desviaciones estándar.

Como se observa en los gráficos anteriores, CUSUM se hace menos sensible a detectar desviaciones pequeñas en las resistencias al aumentar la desviación estándar de la planta. Las resistencias de hormigones que presentan muchas alertas por sus bajas desviaciones estándar (hormigones de las plantas A1, A2 y A3), tienen una disminución de alertas de CUSUM al aumentar la desviación estándar.

Al ir variando las desviaciones estándar para los hormigones que no presentaban coherencia entre la cantidad de alertas entregadas por CUSUM y el estándar de control dado por la ACI214R-11, se logra generar una coincidencia en la preclasificación ACI y la clasificación CUSUM. Este punto de coincidencia es lo que determina la calidad del proceso productivo de estos hormigones

La mayoría de los hormigones coinciden en una buena clasificación ACI y también una buena clasificación CUSUM, como se muestra en la tabla 14.

Grado	Planta	Total Muestras	Desviación [kgf/cm <sup>2</sup> ]	% Alertas	Clasificación ACI 214R-11	Clasificación CUSUM
HB20.0(90)20-10	A1	100	25	96%	Excelente	Muy Malo
			30	76%	Muy Bueno	Muy Malo
			35	74%	Bueno	Malo
			45	58%	Justo	Malo
			50	49%	Pobre	Bueno
HB25.0(90)20-10	A2	147	25	76%	Excelente	Muy Malo
			30	51%	Muy Bueno	Malo
			35	35%	Bueno	Bueno
			45	10%	Justo	Excelente
			50	6%	Pobre	Excelente
HB30.0(90)20-12	A2	129	25	75%	Excelente	Muy Malo
			30	55%	Muy Bueno	Malo
			35	34%	Bueno	Bueno
			45	4%	Justo	Excelente
			50	0%	Pobre	Excelente
HB35.0(90)20-10	A2	148	25	84%	Excelente	Muy Malo
			30	77%	Muy Bueno	Muy Malo
			35	75%	Bueno	Malo
			45	42%	Justo	Bueno
			50	26%	Pobre	Muy Bueno
HB20.0(90)20-10	A3	129	25	57%	Excelente	Malo
			30	34%	Muy Bueno	Bueno
			35	21%	Bueno	Muy Bueno
			45	9%	Justo	Excelente
			50	4%	Pobre	Excelente
HB25.0(90)20-10	A3	90	25	86%	Excelente	Muy Malo
			30	51%	Muy Bueno	Malo
			35	27%	Bueno	Muy Bueno

			45	24%	Justo	Muy Bueno
			50	22%	Pobre	Muy Bueno
<b>HB20.0(90)20-10</b>	C1	47	25	96%	Excelente	Muy Malo
			30	91%	Muy Bueno	Muy Malo
			35	70%	Bueno	Malo
			45	45%	Justo	Bueno
			50	23%	Pobre	Muy Bueno
<b>HB30.0(90)20-10</b>	D1	200	25	62%	Excelente	Malo
			30	53%	Muy Bueno	Malo
			35	36%	Bueno	Bueno
			45	17%	Justo	Excelente
			50	8%	Pobre	Excelente

Tabla 14: Clasificación CUSUM y ACI para distintas desviaciones estándar.

En general se observa, en la tabla 10 y la tabla 13 que la calidad de los procesos productivos de hormigón es buena. De los 28 hormigones analizados, sólo 4 tienen una deficiente calidad en el proceso de producción según lo mostrado en la tabla 10: hormigón HB35, Planta B2; hormigón HB25, Planta C1; hormigón HB30, Planta C1; y hormigón HB35, Planta C1. Estas resistencias tienen bajo estándar de control y un elevado porcentaje de alertas de desviaciones según método CUSUM.

Esto sumado al HB35 de la planta A2 y el HB20 de la planta C1 que trabajan al límite; más el HB20 de la planta A1 que al considerar un estándar de control “Justo”, tiene muchas alertas CUSUM que lo clasifican como “Malo”, resulta en que 21 de los 28 hormigones analizados tiene una buena calidad en sus procesos productivos a partir de sus resistencias a la compresión a 28 días. Esto representa un porcentaje del 75% de hormigones con buen control de calidad en sus procesos.

## 4.6. Comentarios y Conclusiones

Los métodos de control son válidos en el proceso de confección de hormigón premezclado, pero no deben usarse en períodos en que se apunten a resistencias objetivos muy diferentes, pues indicarán alertas que probablemente no sean por problemas en el proceso, sino a cambios premeditados de las dosificaciones del hormigón. El método se debe aplicar para un período primero y posteriormente para el otro de dosificación distinta.

Para los hormigones con posible dosificación por dosis mínima de cemento, como por ejemplo los HB20, HB25 y HB30 de las plantas B1 y B2, al ser no tan variable la dosificación, los métodos de control funcionan de buena forma y se correlaciona con la buena clasificación de estas plantas para los grados mencionados ya que no tienen tanta variabilidad en su dosificación.

La planta B1 es la que tiene la mejor calidad en su proceso productivo, pues su estándar de control es “Bueno” o “Excelente” y las desviaciones del proceso respecto a la media son pocas, teniendo una evaluación CUSUM que varía entre “Excelente” y “Bueno”.

La planta B2 tiene buenos resultados en general, excepto en el hormigón HB35 que tiene un deficiente estándar de control y también una mala clasificación CUSUM (muchas desviaciones en torno a la media del proceso).

La planta C1 es la que tiene la peor calidad en su proceso, pues presenta estándares de control "Pobre" o "Justo" de acuerdo a la ACI214 y también muy mala evaluación respecto a las desviaciones entregadas por el método CUSUM.

En general, la mayoría de los hormigones analizados tienen una buena calidad en su proceso de producción.

Por otra parte, respecto a la influencia de los períodos de tiempo considerados para cada hormigón (tabla 6), no existe una tendencia que indique que los procesos sean de mejor o peor calidad dependiendo de la cantidad de muestras consideradas en el análisis o de la extensión del período de tiempo considerado. Para el caso de las plantas de Viña Del Mar, coincide que son las que tienen menor tasa de muestras por día, pero sólo la planta C1 tiene mala calidad en su proceso productivo. Por el contrario, la planta D1 tiene una buena calidad en sus procesos. Esto reafirma el hecho de que el factor fundamental para que una planta no presente variabilidad en su proceso es apuntar a una resistencia objetivo relativamente constante.

## 5. Conclusiones

La mayoría de los hormigones analizados tienen buena calidad en sus procesos de confección a partir de las resistencias a la compresión de acuerdo a lo desarrollado en el informe. Un 75% de los hormigones analizados tiene una buena, muy buena o excelente evaluación de la calidad de sus procesos, mientras que un 25% tiene una calidad deficiente en sus procesos productivos. De acuerdo al estándar de control y las alertas CUSUM, la planta B1 es la que tiene mejor calidad y la planta C1 la de peor calidad.

La clasificación dada por la ACI214R-11 para el estándar de control de los hormigones es coherente mayoritariamente con la clasificación dada posteriormente por las cartas de control CUSUM, existiendo discrepancias en 8 de 28 casos. Estas discrepancias se dan porque los métodos de control gráfico van midiendo los desvíos “punto a punto” respecto a la media general del período y por consiguiente realizan una medición indirecta de la variación de la desviación estándar durante el proceso. Al existir mucha variación en la desviación, se generan muchas alertas a pesar de que la desviación total del período no sea alta (como se en el segundo párrafo, no se apunta a la resistencia objetivo del proceso).

Los hormigones en general trabajan con resistencias promedios superiores a las resistencias requeridas según sus desviaciones estándar. Esto garantiza en cierta medida el cumplimiento de la resistencia especificada para cada grado a 28 días y de esta forma se evitan posibles reclamos de clientes. Por contraparte, en estos hormigones se sobredimensiona la dosificación lo que genera que se incurra en costos innecesarios para las plantas. En estos casos las herramientas de control gráfico son especialmente útiles para no tener excesivos costos de producción. En este punto CUSUM tiene ventaja respecto a las otras dos cartas de control, ya que las alertas que arroja son más drásticas y una desviación puntual en el proceso genera más alertas que EWMA y Shewhart, por lo tanto es una carta más rigurosa y sensible a las desviaciones.

Las cartas de control gráfico son herramientas muy útiles en el control de procesos y en particular, pueden funcionar de muy buena forma en el control del proceso productivo de hormigón premezclado, siempre y cuando se planifique su uso en períodos del proceso con una dosificación estable.

Si se aplican las cartas de control en períodos en donde claramente existen sub períodos con dos o más dosificaciones muy distintas y consecutivas, ésta mostrará alertas durante todo o gran parte del proceso, debido a que nunca se estará apuntando a la resistencia objetivo y en consecuencia siempre se estará “desviado” respecto a este valor.

CUSUM y EWMA son métodos que detectan desviaciones pequeñas y tempranamente. Esto permite actuar con anticipación a realizar modificaciones pertinentes en el proceso para que las desviaciones no sean catastróficas después. Si bien los procesos de confección de hormigón están sujetos a muchas fuentes de variabilidad y CUSUM y EWMA son mayoritariamente utilizados en procesos más controlados, ambos pueden ser parametrizados de forma tal adecuar sus alertas al estándar de calidad de la planta o a rigidizar los controles imponiendo límites más estrictos de control. Debido al elevado



costo del hormigón en la construcción, es recomendable tener límites de control más estrictos.

CUSUM respecto a EWMA y Shewhart, tiene la ventaja de que genera gráficos más simples de interpretar y son más completos pues permiten ver las tendencias de sumas acumuladas y también ver si una muestra en particular se desvió sobre o bajo la resistencia objetivo del proceso de acuerdo a los parámetros establecidos. En las cartas EWMA se hace más complejo ver si una muestra está sobre o bajo la media al trabajar con resistencias ponderadas y en el caso de Shewhart, sólo se puede ver la resistencia actual de la muestra y no el efecto de las resistencias antecesoras.

Un factor relevante y que se debe tener en consideración al utilizar las cartas de control, son los puntos que se escapan de la tendencia de las resistencias del hormigón (puntos discordantes). Estos puntos afectan el comportamiento de las cartas y pueden conducir a tomar decisiones erróneas respecto a acciones correctivas en el proceso. Las cartas CUSUM y EWMA al tener “memoria”, arrastran las desviaciones considerando los valores anteriores a la muestra en análisis, por lo que un punto “discordante”, genera un mayor impacto en estas cartas que en las cartas Shewhart. Estos puntos deben ser analizados aparte y eliminados del análisis mediante control gráfico por los motivos ya mencionados.

Cabe destacar que la utilización conjunta de los métodos de control gráfico expuestos, permiten un control aún mejor de los procesos productivos, al tener detección tanto de desviaciones pequeñas (EWMA y CUSUM), como se desviaciones grandes en el proceso (Shewhart). Si no hay puntos discordantes presentes, los métodos tienen un comportamiento generalmente coherente entre sí.

## 6. Bibliografía

- ACI Comitte 214. (2011). *Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete*.
- Besterfield, D. H. (2009). *Control de Calidad* (Octava ed.). (V. G. Pozo, Trad.) Prentice Hall.
- Garvin, D. A. (Noviembre-Diciembre de 1987). Competing on the Eight Dimensions of Quality. *Harvard Business Review*.
- Gibb, I., & Harrison, T. (2010). Use of control charts in the production of concrete. *European ready mixed concrete organization*.
- Hanif, M., Hussain, A., Jamal, N., & Amir, M. (2012). New Approximation of ARL in CUSUM Control Chart. *Far East Journal of Marketing and Management*, II(2), 73-81.
- Hawkins, D. M., & Zamba, K. D. (2003). On Small Shifts in Quality Control. *Quality Engineering*, 143-149.
- Instituto del Cemento Portland Argentino. (2015). *Control estadístico del hormigón mediante cartas de control y Sistema CUSUM*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1998). *NCh1998: Hormigón - Evaluación estadística de la resistencia mecánica*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2016). *NCh170: Hormigón - Requisitos Generales*.
- Lucas, J. M., & Saccucci, M. S. (1990). Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements. *Technometrics*, 1-29.
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control* (Sexta ed.). (J. W. Sons, Ed.) New York.
- Obla, K. H. (2014). *Improving Concrete Quality*. CRC Press.
- Reyes Aguilar, P. (2008). *Control avanzado de procesos*.
- Roberts, S. W. (1959). Control Chart Tests Based on Geometric Moving Averages. *Technometrics*, I.
- Sharma, R. C. (Enero de 1972). Evaluación de los resultados de los ensayos a compresión del hormigón en obra. *Indian Concrete Journal*, 116.
- Shewhart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*.
- Testik, M. C. (2007). Conditional and Marginal Performanc of the Poisson CUSUM Control Chart with Parameter Estimation. *International Journal of Production Research*.

Western Electric Corporation. (1956). *Statistical Quality Control Handbook*. Indianapolis.