



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE PLANTAS DE HORMIGÓN PREMEZCLADO A PARTIR DE LA VARIABILIDAD DE SUS RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ELIZABETH ALEJANDRA SILVA ASTORGA

PROFESOR GUÍA:

JACQUES BORNAND ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DAVID CAMPUSANO BROWN

FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

SANTIAGO DE CHILE

2019

ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE PLANTAS DE HORMIGÓN PREMEZCLADO A PARTIR DE LA VARIABILIDAD DE SUS RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

En Chile, la industria del hormigón premezclado ha crecido de manera importante en las últimas décadas, representando un amplio y competitivo mercado, por lo que las empresas para subsistir deben asegurar la calidad de sus hormigones. Los hormigones de buena calidad, tienen una menor probabilidad de presentar incumplimiento de resistencia, y, además, requieren una menor cantidad de cemento, lo que implica que sean menos costosos y más sustentables. Por este motivo, el presente trabajo de título tiene como objetivo realizar un análisis de comportamiento de plantas de hormigón premezclado a lo largo del país, basado en el análisis de variabilidad de la resistencia a compresión de sus hormigones. El análisis de variabilidad de los distintos hormigones elaborados en una planta es la herramienta de gestión más eficiente para asegurar la calidad de sus productos. Las plantas seleccionadas para el presente estudio son representativas de las que operan en el país, por lo que permiten ser un buen indicador del comportamiento de la industria del hormigón premezclado a nivel nacional.

La metodología contempla el estudio de las variables y materias primas que influyen en la resistencia a compresión, propiedad clave para calificar la calidad del hormigón, y además, la elaboración de gráficos de resistencia a compresión, para tres hormigones por cada una de las 14 plantas estudiadas, a partir de los resultados de ensayos disponibles durante un periodo aproximado de 3 años. Luego, se determina la desviación estándar de los resultados de resistencia de estos hormigones, y basado en estos valores, se realiza una estimación de la variabilidad general que presenta la planta. Posteriormente, en estos gráficos se identifican subperiodos, cuyas muestras presentan una resistencia media constante, lo que permite estimar la variabilidad básica del proceso de confección. Asimismo, se determina la variabilidad asociada a los cambios en la resistencia media entre estos subperiodos, lo que podría atribuirse a un cambio de dosificación en respuesta a una variación de alguna materia prima. Con este análisis se busca determinar el comportamiento de estas plantas, identificar las que presentan mayor variabilidad, y determinar las posibles causas de ésta. Finalmente, se determina que, en general, las plantas presentan un buen control de sus procesos, lo que representa hormigones de buena calidad. No obstante, ciertas plantas presentan una mayor variabilidad, debido a constantes cambios en la resistencia media, lo que se podría atribuir a un control deficiente, por ejemplo, de sus materias primas, y a que los ajustes de dosificación no se realizan a tiempo y de forma adecuada. Por último, se concluye que las plantas deberían poner mayor énfasis en la optimización de sus dosificaciones, y así reducir la huella de carbono que genera esta industria a nivel nacional, para ello, se recomienda la implementación de mejoras en su sistema de control.

A mis pequeñitos, Ita, Lila y Benito...

A mis padres, que esperaron con ansias que finalizará este proceso...

Agradecimientos

A mi profesor guía Jacques Bornand, por la oportunidad, su excelente disposición y por confiar en mí.

A los profesores Federico Delfín y David Campusano, por querer formar parte de este trabajo.

A las personas que conocí en las distintas etapas a lo largo de la universidad.

A aquellas personas que me alentaron a terminar este proceso, y con ello, a cerrar una etapa importante de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	8
1.1	Objetivo general	9
1.2	Objetivos específicos	9
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1	Introducción.....	10
2.2	Hormigón.....	10
2.2.1	Materias primas del hormigón	10
2.2.2	Propiedades del hormigón	12
2.2.3	Tipos de hormigón	13
2.2.4	Designación del hormigón	13
2.3	Diseño de la mezcla	15
2.3.1	Propiedades importantes en el diseño de la mezcla.....	15
2.3.2	Optimización de dosificación	16
2.4	Confección de hormigón premezclado	17
2.5	Factores que causan variabilidad en hormigones	18
2.5.1	Materiales componentes del hormigón	18
2.5.2	Confección del hormigón	22
2.5.3	Ensayos de laboratorio	27
2.6	Desviación estándar y calidad del hormigón	28
3	METODOLOGÍA	30
3.1	Resultados de resistencia a compresión.....	32
3.1.1	Casos de análisis.....	32
3.1.2	Resultados de resistencia a compresión del total de muestras	32

3.1.3	Resultados de resistencia a compresión de subperiodos de resistencia media constante.....	33
3.2	Análisis de resultados de resistencia a compresión	33
3.2.1	Análisis de variabilidad	33
3.2.2	Porcentaje no cumplimiento según normativa	36
3.2.3	Tipos de dosificación a partir de resultados de resistencia a compresión de subperiodos.....	37
4	RESULTADOS.....	39
4.1	Hormigonera A.....	40
4.1.1	Planta A-Norte	40
4.1.2	Comentarios Planta A-Norte.....	53
4.1.3	Planta A-RM	54
4.1.4	Comentarios Planta A-RM	70
4.1.5	Planta A-Sur	72
4.1.6	Comentarios Planta A-Sur	84
4.2	Hormigonera B.....	85
4.2.1	Planta B-Norte	85
4.2.2	Comentarios Planta B-Norte.....	98
4.2.3	Planta B-RM	99
4.2.4	Comentarios Planta B-RM	113
4.2.5	Planta B-Sur	115
4.2.6	Comentarios Planta B-Sur	124
4.3	Hormigonera C.....	125
4.3.1	Planta C-Norte	125
4.3.2	Comentarios Planta C-Norte.....	139
4.3.3	Planta C-RM	140

4.3.4	Comentarios Planta C-RM.....	155
4.3.5	Planta C-Sur.....	156
4.3.6	Comentarios Planta C-Sur.....	165
4.4	Hormigonera D.....	166
4.4.1	Planta D-Norte.....	166
4.4.2	Comentarios Planta D-Norte.....	180
4.4.3	Planta D-RM.....	181
4.4.4	Comentarios Planta D-RM.....	195
4.4.5	Planta D-Sur.....	196
4.4.6	Comentarios Planta D-Sur.....	206
4.5	Hormigonera E.....	208
4.5.1	Planta E-RM.....	208
4.5.2	Comentarios Planta E-RM.....	222
4.6	Hormigonera F.....	224
4.6.1	Planta F-RM.....	224
4.6.2	Comentarios Planta F-RM.....	238
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	240
5.1	Casos de análisis.....	241
5.2	Análisis de Variabilidad.....	242
5.2.1	Análisis de variabilidad general a partir del total de muestras.....	242
5.2.2	Análisis de variabilidad de subperiodos.....	244
5.2.3	Variabilidad de hormigones.....	248
5.3	Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa.....	250
5.4	Tipos de dosificación a partir de la resistencia a compresión.....	252
5.4.1	Comentarios y conclusiones.....	252

5.5	Comportamiento de plantas	254
5.5.1	Planta A-Norte	255
5.5.2	Planta A-RM	256
5.5.3	Planta A-Sur	257
5.5.4	Planta B-Norte	258
5.5.5	Planta B-RM	259
5.5.6	Planta B-Sur	260
5.5.7	Planta C-Norte	261
5.5.8	Planta C-RM	262
5.5.9	Planta C-Sur	263
5.5.10	Planta D-Norte.....	264
5.5.11	Planta D-RM.....	265
5.5.12	Planta D-Sur.....	266
5.5.13	Planta E-RM.....	267
5.5.14	Planta F-RM	268
5.6	Variabilidad de plantas a partir de la variabilidad de sus hormigones	269
5.7	Comentarios y conclusiones	269
6	CONCLUSIONES	270
7	BIBLIOGRAFÍA	272

1 INTRODUCCIÓN

En Chile la industria del hormigón premezclado ha crecido de manera importante, es difícil en estos días encontrar obras en donde se confeccione el hormigón in situ. Las plantas de hormigón premezclado elaboran y suministran hormigón a distintas obras dentro de un área geográfica delimitada. Las plantas, conforme a prácticas y normativa, deben tomar muestras de hormigón fresco, para verificar y corroborar el cumplimiento de la resistencia especificada. No obstante, el hormigón al ser un producto manufacturado, es susceptible de presentar variabilidad, la que está asociada, principalmente, a sus materias primas, a su proceso de confección, e incluso, al proceso de ensayo en laboratorio.

Además, la variabilidad del hormigón, que puede ser determinada a partir de la desviación estándar de sus resultados de resistencia a compresión, es un buen indicador de la calidad del hormigón. Por lo tanto, una planta que presenta una baja variabilidad en sus hormigones, además de presentar una mayor calidad, tendrá menores costos de producción y será más sustentable, debido a que sus dosificaciones requerirán una menor cantidad de cemento. Asimismo, la probabilidad de tener hormigones con resultados de resistencia a compresión defectuosos es menor, lo que implica que se reducirán los costos asociados a reparación, reemplazo o mitigación en caso de incumplimiento de los requisitos especificados, a la vez que, se reducirá el volumen rechazado por incumplimiento de especificaciones de proyecto como el asentamiento de cono, contenido de aire, densidad, entre otras, según corresponda.

Una planta, para lograr disminuir su variabilidad, debe contar con un control de calidad eficiente que permita detectar eventuales cambios en la resistencia a compresión a tiempo, y reaccionar adecuadamente ante éstos. Para ello, la planta debe llevar un registro de la resistencia a compresión de sus distintos hormigones a lo largo del tiempo, y de las variables que influyen en ésta (asentamiento de cono, control de materias primas, densidad, temperatura ambiente, tiempos de traslado, entre otros). De esta forma, podrán detectar un eventual cambio en la resistencia, atribuirlo a una posible causa, y con ello tomar la medida correspondiente, como, por ejemplo, ajustar la dosis de cemento para compensar esta variación.

El presente trabajo de título corresponde a un estudio de la variabilidad de los resultados de resistencia a compresión de hormigones elaborados en diversas plantas representativas de la industria del premezclado de los sectores norte, centro y sur de Chile, con el objetivo de analizar el comportamiento de estas plantas. A modo general, esto permite evaluar la industria del hormigón en Chile, en términos de calidad del hormigón, su proceso de confección y su sistema de control. Además, se realiza una comparación entre las distintas plantas, identificando las plantas que presentan mayor y menor variabilidad, y, por ende, hormigones de menor y mayor calidad, respectivamente.

A partir de este estudio, las plantas podrán evaluar y mejorar sus prácticas, según sus propios resultados y, además, de forma comparativa con sus competidoras

(benchmarking interno y benchmarking competitivo¹). Esto permitirá que las plantas, cuyo comportamiento sea deficiente, puedan identificar oportunidades de mejora en su sistema de control o en sus procesos, imitando, y adaptando, las acciones de las plantas que presentan un comportamiento más eficiente, y de esta forma la industria del hormigón será más competitiva, con hormigones de mejor calidad, menor costo y más sustentables.

1.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento y variabilidad de la resistencia de hormigones confeccionados en planta que suministran hormigón premezclado, a través del análisis de los registros obtenidos durante el control de calidad.

1.2 Objetivos específicos

- Describir la variabilidad de procesos y materias primas que influyen en la variabilidad de la resistencia a compresión del hormigón.
- Realizar análisis de variabilidad de la resistencia a compresión para un hormigón determinado por planta, identificando subperiodos donde no se observa cambio en la resistencia media, y puntos, entre subperiodos, en los que si se originan cambios significativos de la resistencia media del hormigón.
- Determinar la desviación estándar de la planta, considerando el total de muestras ensayadas en el periodo de estudio.
- Determinar la desviación estándar de la planta, considerando solamente las muestras correspondientes a los subperiodos de resistencia media constante.
- Determinar el porcentaje de no cumplimiento de los resultados de resistencia de cada planta según evaluación estadística de norma NCh1998.Of89.

¹ Benchmarking: proceso continuo mediante el cual, una empresa recopila información y nuevas ideas, mediante la comparación con las empresas competidoras líderes o más fuertes del mercado, identificando oportunidades de mejora y adaptándolas a la realidad propia de la empresa. Es interno, cuando se realiza a partir de información de un área o departamento de la misma empresa que presenta buenos resultados. El benchmarking es competitivo cuando se realiza una comparación con los principales competidores.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introducción

El hormigón premezclado es aquel preparado en una planta dosificadora, y luego amasado y transportado a obra mediante un camión mixer. Se comenzó a utilizar en Chile a inicios de la década del 60. Actualmente la industria abarca prácticamente todo el país.

El hormigón debe cumplir diversas propiedades importantes conforme a las especificaciones de obra. Aun así, se considera que la resistencia a compresión es un buen indicador de su calidad. Las prácticas de las plantas productoras de hormigón deben preocuparse de monitorear sus procesos y así, asegurar la calidad de sus productos. Sin embargo, múltiples factores influyen en la resistencia, entre los que destacan el proceso de confección, con variaciones en los pesajes de sus componentes, y las variaciones de las materias primas propias del hormigón.

En el presente capítulo, se realiza una descripción general del hormigón, sus componentes y propiedades. Principalmente, se enfoca en los distintos factores responsables de su variabilidad, destacando recomendaciones sobre como las plantas deben abordar los requerimientos de calidad de los hormigones que producen.

2.2 Hormigón

El Hormigón es un material que se forma a partir de la mezcla de cemento, agua y agregados pétreos, a los que se les añade eventualmente aditivos y adiciones; los cuales en dosis adecuadamente proporcionadas logran fraguar y endurecer, dando origen al hormigón.

El hormigón se caracteriza por tener resistencia a la compresión, presentar buen comportamiento a fatiga, tener resistencia al fuego, presentar durabilidad bajo condiciones de exposición normales y prácticamente no requerir mantenimiento, características que lo hacen idóneo para utilizarse en obras de construcción (Mehta & Monteiro, 2017).

2.2.1 Materias primas del hormigón

2.2.1.1 Cemento

El cemento cumple la función de conglomerante hidráulico del hormigón, es decir al mezclarse con agua proporciona una pasta que bajo condiciones de temperatura normales endurece y alcanza resistencia en pocas horas.

En su fabricación se utilizan principalmente dos materias primas: caliza y un componente rico en sílice, como la arcilla. Estos componentes son mezclados en proporciones adecuadas y sometidos a un proceso de clinquerización en un horno rotatorio a una temperatura aproximada de 1400 °C, de lo cual se obtiene un producto denominado

clínquer, al que posteriormente, en el proceso de molienda se le agrega yeso, obteniéndose el cemento Portland, usado en todo el mundo (Neville & Brooks, 1987).

En Chile, al Cemento Portland se le incorporan diversas adiciones minerales como, por ejemplo, escoria básica granulada de alto horno o puzolanas naturales, las que modifican ciertas propiedades.

2.2.1.2 Agua

Este elemento cumple dos funciones al incorporarse en el hormigón. Al reaccionar químicamente con el cemento, permite la formación de una pasta aglomerante, esencial para que el hormigón endurezca y desarrolle sus propiedades resistentes. Además, otorga trabajabilidad o docilidad al hormigón fresco, propiedad primordial para su manipulación en obra.

2.2.1.3 Áridos

Son materiales pétreos que se constituyen como un tipo de esqueleto que confiere al hormigón estabilidad volumétrica y resistencia mecánica. Constituyen la mayor parte del volumen y masa del hormigón, formando un 75% aproximadamente de su volumen total. Para su dosificación se debe tener en cuenta las características de los áridos disponibles, de modo de que se obtenga un hormigón de máxima resistencia y una docilidad adecuada para las condiciones de la obra. Debido a esto, los áridos para hormigones deben cumplir ciertos requisitos planteados en la NCh163:2013, tales como:

- Granulometría definida que asegure variedad en los tamaños de los granos.
- Mínimo contenido de material fino.
- Cubicidad de partículas, considerando que la forma de las partículas sea lo más esféricas o cúbicas posibles.
- Baja porosidad, para reducir la absorción del agua.
- Alta resistencia propia de las partículas.
- Libres de compuestos químicos.
- Resistentes a los cambios de temperatura y humedad.

2.2.1.4 Aditivos

Hoy en día, todos los hormigones producidos en plantas premezcladoras tienen incorporados aditivos. Se usan para mejorar alguna propiedad del hormigón mediante acción física, química o físico-química. Existe una gran variedad de aditivos, los que se distinguen principalmente por la propiedad del hormigón que regulan o cambian (NCh2182.Of95).

Dentro de los tipos de aditivos se encuentran los plastificantes, acelerantes, retardantes, incorporadores de aire, impermeabilizantes, reductores de agua, entre otros. Por ejemplo, un aditivo tipo D (plastificante retardante) permite que el hormigón sea transportado, sin perder o variar significativamente sus propiedades, además de disminuir el agua necesaria para el amasado.

2.2.1.5 Adiciones

Corresponden a minerales finamente molidos, cuyo fin es mejorar ciertas propiedades del hormigón u otorgarle propiedades especiales. Se pueden considerar activas o inertes.

Las adiciones activas más utilizadas son las puzolanas naturales, escorias de alto horno, nanosílice, microsílice y cenizas volantes. Usadas de forma adecuada pueden incrementar la resistencia y durabilidad del hormigón, y mejorar su permeabilidad.

Entre las adiciones inertes más utilizadas están el carbonato de calcio finamente molido y pigmentos inorgánicos, que puede permitir un aumento de la densidad del hormigón y características del tipo arquitectónico al hormigón (NCh170:2016).

2.2.2 Propiedades del hormigón

2.2.2.1 Propiedades del hormigón fresco

2.2.2.1.1 Docilidad

Es una medida de la trabajabilidad del hormigón y expresa la facilidad del hormigón fresco para ser transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación.

La docilidad del hormigón se mide en el momento de su colocación, a partir del asentamiento de cono de Abrams, tal como se indica en la NCh1019.Of2009. El asentamiento corresponde a una medida del descenso que experimenta el hormigón fresco. Un mayor asentamiento de cono implica una mayor docilidad, y por lo tanto el hormigón se encuentra en un estado más fluido.

2.2.2.2 Propiedades del hormigón endurecido

2.2.2.2.1 Resistencia a compresión

El hormigón se caracteriza principalmente, para fines prácticos de especificación, por su resistencia a los esfuerzos de compresión, la cual está muy por sobre a su resistencia a esfuerzos de tracción, flexión o de corte. Los hormigones normales pueden alcanzar resistencias a compresión en un rango entre 10 a 50 MPa. En cuanto a la resistencia a la tracción y a la flexión, estas puede alcanzar cerca de un 10 y 15%, respectivamente, de su resistencia a compresión (Mehta & Monteiro, 2017).

2.2.2.2.2 Durabilidad

La durabilidad del hormigón se define como su capacidad para resistir la acción de agentes internos y externos. Un hormigón duradero, conservará su forma, calidad y servicialidad cuando se exponga a las condiciones del entorno para el cual fue diseñado.

Algunos ejemplos de procesos que causan deterioro en el hormigón son el ataque químico y la acción de ciclos de congelamiento y deshielo.

La durabilidad se relaciona inversamente con la permeabilidad, ya que un hormigón posee mayor durabilidad, cuando su permeabilidad es baja, puesto que la mayoría de los agentes agresivos ingresan en solución al hormigón.

2.2.2.2.3 Permeabilidad

Se refiere a la capacidad del hormigón de resistir la penetración de agua u otras sustancias. Un hormigón, cuanto más poroso sea, será más permeable, y, por lo tanto, menos durable.

La permeabilidad del hormigón está dada en función de la permeabilidad de la pasta de cemento, de la permeabilidad y granulometría de los agregados, de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado y del proceso de curado.

2.2.3 Tipos de hormigón

En la industria de la construcción se utilizan múltiples tipos de hormigón con distintas características, las que satisfacen los distintos requerimientos de las obras, tales como, hormigones livianos, hormigones de alta resistencia, hormigones de pavimentos, hormigones normales, hormigones bombeables, entre otros.

2.2.3.1 Hormigón Normal (HN)

Normalmente, se les denomina de esta forma a los hormigones sin características especiales. Se clasifican por su resistencia a la compresión, conforme a NCh170.Of85, las que varían entre un H5 a H50, es decir, desde 5 MPa a 50 MPa, en probeta cúbica. El tamaño máximo de los áridos es de 40 mm, 20 mm, o incluso 13 mm, y su asentamiento de cono puede variar entre 6 cm y 18 cm. Estos hormigones se usan tradicionalmente en construcciones de viviendas y edificios.

2.2.3.2 Hormigón Bombeable (HB)

Se les denomina de esta forma a los hormigones que son conducidos por medio de tuberías o mangueras mediante presión, permitiendo transportar grandes volúmenes al punto de colocación requerido. Se caracterizan por poseer un mayor contenido de finos, para permitir el transporte a través de las instalaciones de bombeo.

Se aplica en construcciones de edificación en altura y poseen ventajas comparativas cuando se requiere hormigonar en condiciones difíciles o transportar grandes volúmenes, debido a su rapidez de colocación.

2.2.4 Designación del hormigón

La designación del hormigón utilizada en el presente trabajo de título está dada según la norma NCh1934.Of92 y NCh170.Of85, y se presenta a modo de ejemplo como sigue:

H30 (10) 20/10

Donde:

H: Clasificación de hormigón (H: Hormigón se clasifica por resistencia a compresión, HF: Hormigón se clasifica por resistencia a flexotracción)

30: Resistencia mecánica especificada [MPa]

10: Fracción defectuosa (Nivel de confianza = 100 – fracción defectuosa) [%]

20: Tamaño máximo nominal del árido [mm]

10: Docilidad medida mediante Asentamiento de cono [cm]

A continuación, se definirán los parámetros de la designación del hormigón:

2.2.4.1 Clasificación del Hormigón

Se clasifican de la siguiente forma:

H: resistencia a compresión, en probeta cúbica [MPa].

HF: resistencia a flexotracción, probeta vigueta [MPa].

En la norma NCh170:2016, el hormigón se clasifica de acuerdo a la resistencia a compresión para probeta cilíndrica mediante la letra G, en lugar de la H de la versión anterior de esta norma.

Adicionalmente y de acuerdo a las características de un proyecto específico, la designación se puede complementar con otras características del hormigón. Por ejemplo, un hormigón bombeable clasificado de acuerdo a su resistencia a compresión, comúnmente se denomina HB, y un hormigón normal, clasificado de acuerdo a su resistencia a compresión, se suele denominar como HN.

2.2.4.2 Resistencia mecánica especificada

La resistencia especificada corresponde a la establecida en el proyecto, f_c . Por ejemplo, un hormigón de grado H30, posee una resistencia a compresión especificada de 30 MPa en probeta cúbica, equivalente a 25 MPa en probeta cilíndrica. Para obtener esta equivalencia se aplicaron los factores de conversión para probetas en formas cúbicas y cilíndricas de la Tabla 19 de la norma NCh170.Of85.

2.2.4.3 Fracción defectuosa

Se expresa mediante el porcentaje de resultados de resistencia menores que el valor especificado que se acepta en el proyecto. En algunos casos, se emplea el nivel de confianza en la designación del hormigón, que corresponde al porcentaje de resultados que presentan resistencias mayores o iguales a la especificada.

Fracción defectuosa de 10: Significa que una fracción del 10% del total del lote de resultados esperados presentan resistencias menores que un valor especificado (NCh170:2016).

2.2.4.4 Tamaño máximo nominal del árido

El tamaño máximo nominal debe ser compatible con el método de colocación que se adopte y debe ser acorde a lo establecido en NCh170:2016. Se clasifican en:

- 40: Tamaño máximo de 40 mm, correspondiente a grava.
- 20: Tamaño máximo de 20 mm, correspondiente a gravilla.
- 13: Tamaño máximo de 13 mm, correspondiente a gravilla fina.
- 10: Tamaño máximo de 10 mm, correspondiente a arena.

Se considera como hormigones de producción corriente a aquellos confeccionados con tamaños máximos nominales de 40 mm y 20 mm. Cualquier otro tamaño máximo nominal se considera hormigón especial de acuerdo a lo indicado en NCh1934.Of92.

2.2.4.5 Asentamiento de cono

El asentamiento de cono de Abrams es una medida de la docilidad del hormigón y se determina en el momento de su colocación. El método para determinar el asentamiento consiste en colocar y compactar una muestra de hormigón fresco en un molde con forma de tronco cónico (cono de Abrams). Luego, se levanta el molde y se mide el asentamiento del hormigón, dado por la distancia vertical entre la altura original y la posición final del centro de la superficie superior del hormigón, según se indica en NCh1019.Of2009.

Un mayor asentamiento de cono implica una mayor docilidad, y por lo tanto el hormigón se encuentra en un estado más fluido.

2.3 Diseño de la mezcla

El hormigón se obtiene de la mezcla, en determinadas proporciones, de pasta de cemento y agregados pétreos (áridos finos y gruesos). En la dosificación es importante considerar las propiedades que debe poseer el hormigón, dadas por las condiciones de la obra. Asimismo, se debe hacer una optimización de la dosificación de la mezcla, de forma de cumplir con las propiedades requeridas al menor costo posible.

2.3.1 Propiedades importantes en el diseño de la mezcla

La dosificación de los materiales constituyentes del hormigón debe establecerse de forma de cumplir con la resistencia especificada, la docilidad, los requisitos de durabilidad del proyecto y cualquier otro requisito complementario especificado (NCh170:2016).

Un aspecto importante que se debe considerar al momento de dosificar una mezcla es la razón agua/cemento que influye principalmente en la resistencia, y durabilidad del hormigón.

2.3.1.1 Razón agua/cemento

La razón agua/cemento, permite relacionar las cantidades de agua y de cemento, en peso, existentes en el hormigón fresco y constituye un parámetro importante de la composición del hormigón. Tiene influencia sobre la resistencia, la durabilidad, y la retracción del hormigón, constituyendo el valor característico más importante para el diseño del hormigón. Se determina a partir del cociente entre la masa del agua y la del cemento contenido en un volumen dado de hormigón. Cuanto más baja es la razón agua/cemento, tanto más favorables son las propiedades de la pasta de cemento endurecida (Neville, 1995).

Por lo tanto, la resistencia del hormigón es inversamente proporcional a la razón agua/cemento, y no está relacionada directamente al contenido de agua o de cemento como comúnmente se asume (Obla, 2015).

2.3.2 Optimización de dosificación

Al diseñar una mezcla, se debe cumplir con las propiedades requeridas al menor costo posible, sin perjudicar la calidad del hormigón. Los áridos son el componente de menor costo del hormigón, a excepción del agua. Por el contrario, el cemento es el componente de mayor costo, representando cerca del 60% del costo total de los materiales para un hormigón convencional. La pasta que forman el cemento más agua, rellena los vacíos dejados por los áridos y además los une actuando como un pegamento, dando mayor docilidad a la mezcla en estado fresco y posteriormente adquiriendo resistencia, en su estado endurecido. Sin embargo, un exceso de pasta también es la causante de resultados perjudiciales para el hormigón como la retracción, la generación de calor y los problemas de durabilidad.

Por lo tanto, una dosificación óptima producirá un hormigón de buena calidad con una mínima cantidad de cemento. Esto se logra minimizando el contenido de vacíos entre agregados, mediante una granulometría óptima, y una pasta de cemento de consistencia adecuada que rellene estos vacíos, manteniendo la docilidad y resistencia del hormigón. Dentro de ciertos límites, una menor cantidad de pasta, a una razón agua/cemento constante, hará que el hormigón sea más durable. Por lo tanto, una optimización de la dosificación del hormigón, implica una optimización tanto de la pasta de cemento como de las proporciones de las distintas fracciones de árido.

Es importante destacar, que el cemento, además de ser el componente más costoso del hormigón, es también el mayor responsable de las emisiones de gases de efecto invernadero atribuibles al hormigón. Estos gases tóxicos, principalmente CO₂, se liberan a la atmosfera durante la fabricación del clínquer, representando cerca del 7% de las emisiones que produce el hombre a nivel mundial. La elevada huella de carbono que presenta el cemento, es por lo tanto una razón más, para producir hormigones, con una mínima cantidad de cemento (Van Oss & Padovani, 2003).

2.3.2.1 Variaciones en dosis de cemento

Así como se pueden producir cambios en las materias primas del cemento, los que se traducen en variaciones en su resistencia, u otras propiedades, también se pueden realizar ajustes en las dosis de cemento, por ejemplo, para optimizar una mezcla. Estos ajustes de dosificación producen cambios en la resistencia del hormigón. Para entender la magnitud de la influencia de la cantidad de cemento en la resistencia a compresión del hormigón, se tiene que, para razones agua/cemento cercanas a 0.5, y un rango de resistencias de 27 a 33 MPa, un cambio de un 5% en el contenido de cemento resultará en un cambio de un 5% en la resistencia del hormigón (ACI211.1-91). Las mezclas con razones agua/cemento mayores resultan ser más sensibles a variaciones en el contenido de cemento (y de agua) en comparación con mezclas de menor razón agua/cemento. Por ejemplo, para una razón agua/cemento de 0.7, un cambio del 5% del contenido de cemento (o contenido de agua) en la mezcla, produce un cambio de un 11% en la resistencia del hormigón. Por lo tanto, es importante destacar, que un porcentaje de ajuste dado en los contenidos de cemento, o agua, no producen el mismo porcentaje de cambio en la resistencia a compresión del hormigón, debido a que ésta última no está relacionada directamente a los contenidos de cemento o de agua, sino que está relacionada inversamente a la razón agua/cemento (Obla, 2015).

2.4 Confección de hormigón premezclado

El hormigón premezclado se fabrica en una central hormigonera, la que puede ser dosificadora o amasadora. En la planta dosificadora se miden y pesan los componentes del hormigón y se cargan en el camión mixer, encargado de amasar y transportar el hormigón a obra. En una planta amasadora, se miden, pesan y amasan los componentes del hormigón, y se cargan en el camión agitador, encargado de transportar el hormigón a obra. En Chile, el hormigón es principalmente confeccionado en plantas dosificadoras, y mezclado y transportado a obra, mediante un camión mixer.

El proceso de confección del hormigón comienza con la medición de las materias primas, luego cada dosis cae a la cinta transportadora, mediante la cual la mezcla es llevada a la betonera del camión mixer, que se encarga de mezclar y amasar los componentes de la mezcla, y luego transportarlo a obra.

Una vez lista el carguío de los componentes, el operador mixer, como se denomina al encargado de la conducción y control del camión mixer, realiza los pasos para la preparación del cono. Además de lavar el camión mixer, el operador por inspección visual estima la docilidad de la mezcla, y le agrega agua, en caso de ser necesario.

Dentro de las principales ventajas que presenta este tipo de hormigón en cuanto al rubro de la construcción se tiene:

- Fabricación de grandes volúmenes de hormigón en poco tiempo.
- Ahorro de mano de obra, durante la manipulación de éste.
- Planta dosificadora puede ser controlada electrónicamente.
- Competitividad de costo total, respecto de otros materiales de construcción.

- La producción está a cargo de una empresa especializada que cuenta con personal calificado.

Se entrega un material de mejor calidad a menor precio, dado el mejoramiento continuo al interior de las empresas proveedoras. Además, debido a la necesidad de contar con hormigones de calidad certificada, su uso ha ido en aumento en los últimos años.

2.5 Factores que causan variabilidad en hormigones

La calidad de un hormigón se puede determinar a través de un riguroso sistema de control que permita conocer la variabilidad de su resistencia a la compresión a lo largo del proceso. Es importante mencionar que los factores que causan variabilidad en el hormigón cumplen con el principio de Pareto, el cual establece que de todos los factores que causan variabilidad en el producto final, el 20% de éstos son los responsables del 80% de la variabilidad total, por lo tanto, es probable que un solo factor sea el responsable de más de la mitad de la variabilidad del producto. Sin embargo, no serán siempre, necesariamente, los mismos factores los que produzcan la mayor variabilidad (Day, 2006).

Las fuentes que producen variabilidad de la resistencia a compresión de un hormigón se pueden clasificar en las siguientes tres categorías: materiales componentes, confección y ensayos de resistencia en laboratorio.

2.5.1 Materiales componentes del hormigón

2.5.1.1 Variaciones del cemento

El cemento es el principal responsable de la resistencia del hormigón. Por lo tanto, una variación en la resistencia del cemento implicará una variación en la resistencia del hormigón.

La fabricación de cemento es un proceso intensivo de uso de recursos disponibles naturalmente. Las materias primas claves responsables de su resistencia son una mezcla de caliza y arcilla, las que forman el clínquer, producto al que posteriormente, en el proceso de molienda, se le adiciona yeso. La mayor variabilidad de resistencia alcanzada en una planta de cemento se debe principalmente a una mayor variabilidad en sus materias primas en sí. Según un estudio realizado por Walker y Bloem, el cemento producido en una planta presenta variaciones de resistencia en los distintos despachos o lotes, aun cuando sus materias primas se extraen de una misma fuente (Walker & Bloem, 1958; Walker & Bloem, 1961).

Dada la variabilidad que presenta el cemento en cuanto a su resistencia y como ésta influye directamente en la resistencia del hormigón, es importante llevar un control de calidad del cemento suministrado a la planta, tal como se lleva en el hormigón. Por ejemplo, si una empresa productora de cemento lleva un control de calidad de su producto, y existe una comunicación efectiva con el productor de hormigón podría indicarle a tiempo el caso en que se produzca una baja en la resistencia del cemento, de

forma que se cambien las proporciones de la mezcla, evitando una baja en la resistencia del hormigón. Por el contrario si la resistencia del cemento ha mejorado, el productor de hormigón podría optimizar la mezcla de hormigón (Obla, 2015). Los resultados de ensayos de resistencia del cemento a los 7 días resultan ser de gran utilidad, ya que, en caso de observarse una baja de resistencia del cemento, permitirían actuar con mayor rapidez y realizar los ajustes necesarios en la dosificación del hormigón. En todo caso, no debe ser motivo de alarma la obtención de un solo valor alto o bajo en los resultados de resistencia del cemento, ya que podría deberse a un problema de ensayo, por ejemplo. Sin embargo, si se observa un patrón de resultados con baja resistencia, significa que ha ocurrido un punto de cambio o de inflexión y la resistencia media del cemento se ha reducido; y esta reducción debe ser manejada por medio de un ajuste en la dosificación del hormigón, para evitar bajas resistencias de este último. La mayoría de los cambios producidos en la resistencia del cemento son debido a un cambio en la composición propia del cemento.

Una buena comprensión de la variación de la resistencia del hormigón debido a la variación de la resistencia del cemento es un primer paso para entender las causas de la variación general de la resistencia del hormigón. Esto puede ayudar a encontrar maneras de disminuir la variabilidad del hormigón, reducir los factores del cemento que afectan al hormigón y lograr una mejor calidad (Obla, 2015).

El Gráfico 2.1 presenta los resultados de resistencia a compresión a 28 días de un cemento, utilizado en la confección de ciertos hormigones, de la zona central de Chile. En éste, se observa las variaciones que presenta el cemento durante un periodo mayor a un año, alcanzando incluso una variación en la resistencia a la compresión de 6 MPa aproximadamente.

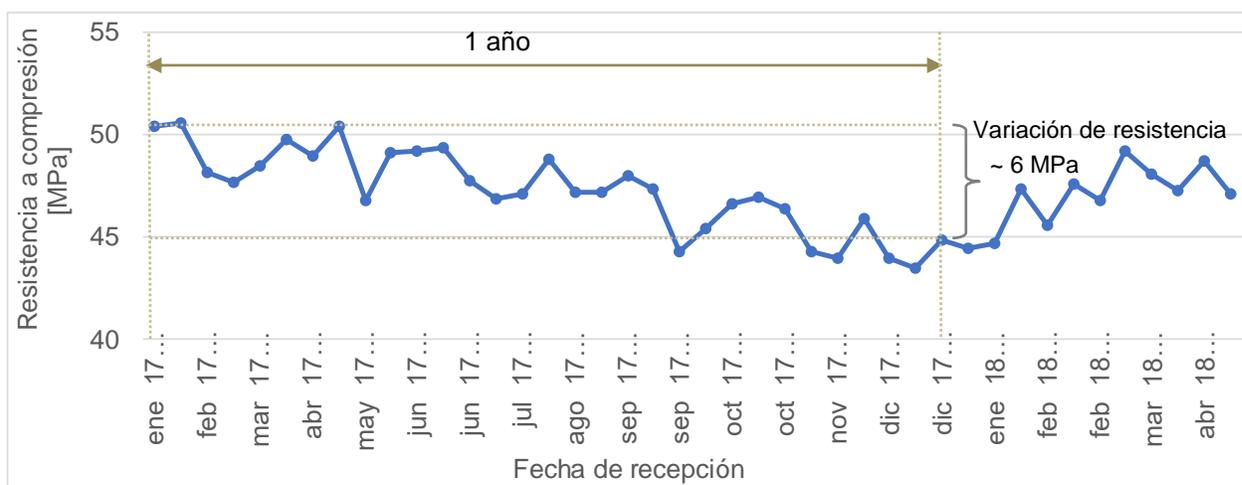


Gráfico 2.1 Resultados de resistencia a compresión a 28 días de un cemento.

2.5.1.2 Variaciones en la calidad del agua

El agua utilizada en el amasado del hormigón, debe cumplir con las condiciones indicadas en la Norma NCh1498:2012. En esta norma se plantea que las condiciones de calidad

del agua a utilizar no deben comprometer el proceso de endurecimiento de la pasta de cemento. Se puede utilizar el agua potable siempre que no esté contaminada, o también aguas de otro origen, siempre y cuando cumplan con los requisitos químicos básicos indicados en esta norma. Por lo tanto, mientras el agua cumpla con los requisitos normativos, no debería influir en la calidad del hormigón. No obstante, se recomienda recurrir a ensayos comparativos de resistencia a compresión de hormigones confeccionados con el agua a utilizar y con agua potable (muestra patrón), si el agua disponible afecta a la resistencia a 7 días en menos de un 10% con respecto a la resistencia de la muestra patrón, se considera que no existen riesgos para su uso.

2.5.1.3 Variaciones en los Agregados Pétreos

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, además la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Sin embargo, uno de los problemas que generalmente encuentran los ingenieros al emplear el hormigón, es la poca verificación de las características de los agregados pétreos que utilizan, lo que propicia con cierta frecuencia resultados diferentes a los esperados (Cerón, Duarte, & Castillo, 1996).

Tal como se mencionó en el capítulo 2.3.2, reducir el contenido de vacíos que se produce entre los agregados mediante un empaquetamiento óptimo de éstos, es primordial para obtener hormigones con buena docilidad, durabilidad, resistencia mecánica y de menor costo económico. Investigaciones muestran que existe una clara relación entre la forma, textura y granulometría de los agregados, tanto finos como gruesos, y el contenido de vacíos (De Larrard, 1999). Las partículas desmenuzables, alargadas, angulares y rugosas producen un mayor contenido de vacíos en su ordenamiento, y por lo tanto requieren más cemento para llenarlos, incrementando así la demanda de agua (Legg, 1998). Esta mayor demanda de agua se traduce en resistencias menores. El empaquetamiento es más eficiente cuando se utilizan partículas de formas cubicas, redondeadas y bien graduadas (Hudson, 1999; Legg, 1998; Popovics, 1998; Shilstone, 1999). Además, la forma y la textura de los agregados finos tienen una mayor influencia en el contenido del agua de amasado y en la resistencia a compresión que la forma y textura del agregado grueso (Bloem and Gaynor, 1963; Wills, 1967). Sin embargo, la evaluación de la forma y textura de los agregados es difícil de realizar.

En cuanto a su influencia en la resistencia mecánica, la forma y la textura de los agregados tienen un efecto directo en ésta, influenciando las concentraciones de esfuerzo en el material compuesto: el grado de ramificación de micro fisuras y fisuras antes y durante la falla; y el efecto de las rugosidades en la interface (Alexander, 1996). Además, la forma y la textura de los agregados afectan la forma de la curva esfuerzo - deformación del hormigón, dada su influencia en la generación de micro fisuras en la zona de transición (Mehta & Monteiro, 1986) . Sin embargo, la influencia de la forma de los agregados en la resistencia del hormigón es controversial. A pesar de que se ha observado que hormigones fabricados con agregados de diferentes formas y un contenido de cemento dado pueden alcanzar niveles de resistencia similares, algunos autores aseguran que los hormigones producidos con agregados de forma redondeada

y cúbica tienden a producir mayores resistencias que agregados alargados y aplanados (Shilstone, 1999).

Según lo planteado por León y Ramírez , la resistencia a la compresión de mezclas con igual dosificación pero con agregados con diferentes contenidos de partículas alargadas no presentan diferencias significativas, por lo tanto, la forma no representa un factor que influya en las propiedades mecánicas del hormigón (León & Ramírez, 2011).

La textura superficial tiene un efecto en la trabajabilidad, pero no es tan importante como la granulometría y la forma (Galloway, 1994). La textura de las partículas afecta en su empaquetamiento eficiente, dado que las partículas rugosas generan un contenido más alto de vacíos; tienden a incrementar la demanda de agua para una docilidad dada. La textura de la partícula también está relacionada con su adherencia con el cemento. Las partículas rugosas tienden a proveer una unión más fuerte al cemento que las partículas suaves. Por lo tanto, las partículas rugosas tienden a producir resistencias más altas (Kaplan, 1959), especialmente la resistencia a la flexión (Galloway, 1994).

La graduación (granulometría) o distribución de tamaños de los agregados afecta la densidad de empaquetamiento por ende el contenido de vacíos, y consecuentemente, influye significativamente en algunas características del hormigón como la docilidad y segregación. Según muchos autores, las mezclas con agregados uniformemente distribuidos producen mayor empaquetamiento que las mezclas mal graduadas o con graduación discontinua, resultando en hormigones con densidades más altas, mejor docilidad y menos permeabilidad (Glavind, Olsen, & Munch-Petersen, 1993; Goltermann, Johansen, & Palbøl, 1997; Johansen & Andersen, 1995; Johansson, 1979).

El efecto de la granulometría o graduación de los agregados finos sobre la docilidad del hormigón es mucho más grande, que el de la graduación de los agregados gruesos.

El efecto de la graduación sobre la resistencia es controversial. A pesar de que algunos autores plantean que una resistencia dada se puede lograr con mezclas bien graduadas y pobremente graduadas (Shilstone, 1999), algunos estudios indican que el incremento de la resistencia del hormigón puede lograrse con mezclas bien graduadas (Cramer, Hall, & Parry, 1995).

El tamaño máximo del árido grueso también influye en el empaquetamiento, por lo que mezclas con mayores tamaños máximos, tienden a reducir el contenido de vacíos, influyendo positivamente en ciertas características del hormigón ya mencionadas. En cuanto a su influencia en la resistencia, hay un tamaño máximo óptimo del agregado grueso que produce resistencias más altas para una consistencia y contenido de cemento dado (Popovics, 1998; Washa, 1998).

En cuanto a la absorción de agua del árido, está en directa relación con su porosidad. Una mayor porosidad implica que el agregado absorberá mayor cantidad de agua de la mezcla, disminuyendo el contenido de agua disponible para las reacciones de hidratación. Para reducir esto se recomienda dosificar considerando los áridos en estado

saturado con superficie seca, o considerando los áridos en estado seco y estimar la proporción de agua de la mezcla de acuerdo a la absorción de los áridos (NCh170:2016).

Por último, se tiene que un exceso de agregados finos está relacionado con un aumento en la demanda de agua de amasado, para mantener una docilidad dada, lo que implica una reducción en la resistencia a la compresión. Para identificar este escenario, no solo basta con monitorear las variaciones del asentamiento de cono, también se debe determinar la densidad, por lo tanto, si se observa consistentemente, una baja en la densidad, es posible que sea atribuible al mayor contenido de agua originado por un exceso de finos (Obla, 2015).

2.5.1.4 Aditivos

Los aditivos permiten mejorar alguna propiedad del hormigón. Se usan aditivos, por ejemplo, para reducir la cantidad de cemento para una resistencia dada, para mejorar la trabajabilidad, o la durabilidad. Los aditivos, en general, presentan una baja variabilidad, ya que están elaborados químicamente. Sin embargo, la combinación aditivo-cemento si puede producir variabilidad en el hormigón, debido a la interacción que se produce entre el aditivo, el tipo y cantidad de ceniza volante y las propiedades particulares del tipo de cemento (Day, 2006).

Asimismo, la dosis de aditivo afecta en la resistencia del hormigón, ya que ésta se ajusta dependiendo de la época del año y de las temperaturas.

2.5.2 Confección del hormigón

El proceso de confección del hormigón debe garantizar que los materiales constituyentes sean medidos, mezclados y amasados de modo de lograr un hormigón homogéneo (NCh170:2016).

2.5.2.1 Variación en medición de materiales constituyentes

La medición de los materiales se debe realizar en masa, salvo el agua y aditivos líquidos, los que pueden ser medidos en volumen, cumpliendo las tolerancias indicadas en la norma NCh170:2016. En general, durante la confección del hormigón es posible que alguno de sus componentes pueda estar fuera de la tolerancia.

Cuando las tolerancias no se cumplen se producen dos problemas:

- Mezclas con exceso de materiales constituyentes o sobredosificadas, lo que significa regalar material, y por lo tanto aumentar el costo del metro cubico producido. Mezclas con deficiencia de materiales constituyentes, implica que el volumen real producido es menor, lo que podría ocasionar problemas con el cliente.
- Mezclas con alta variabilidad en el pesaje de sus materiales constituyentes pueden causar una significativa variabilidad en las propiedades del hormigón, como la

resistencia mecánica, así como también alta variabilidad en el volumen de hormigón producido.

El cemento suele ser el foco principal cuando se realiza un análisis de la planta, dado que una deficiente medición de cemento implica, ya sea, pérdidas económicas para el fabricante de hormigón en caso de un exceso de cemento, o en el caso contrario, se obtendrán bajas resistencias. Sin embargo, todos los materiales están sujetos a variaciones en su medición y todos tienen un efecto en la calidad del hormigón. Incluso, la inexactitud de la medición de componentes puede ser acumulativa. Una reducción del 2% en el peso de cemento, además de un aumento del 2% en los pesos de los agregados, puede llevar a una reducción del 4% en el peso de cemento cuando el hormigón se ajusta por rendimiento (volumen de hormigón fresco), lo que resulta en una variación significativa en la resistencia del hormigón (Obla, 2015).

2.5.2.1.1 Variaciones en el contenido de agua

Uno de los aspectos más difíciles en el diseño de la mezcla de hormigón es determinar la dosis de agua. Si bien el contenido de agua se relaciona directamente con el contenido de cemento, es más perjudicial una mayor cantidad de agua, que una menor cantidad de cemento, en cuanto a calidad de hormigón se refiere.

El agua, a diferencia de otros componentes, tiene varias fuentes que la incorporan a la mezcla de hormigón, y no está definido un nivel de tolerancia que considere cada una de ellas. Según lo comprobado por Obla, las plantas que operan bajo un buen estándar de control tienen una variación en el contenido de agua de la mezcla de un $\pm 5\%$ de la cantidad requerida el 95% del tiempo (Obla, 2015).

Para dimensionar la influencia del contenido de agua en la resistencia del hormigón se tiene que; para una mezcla de hormigón con una razón agua/cemento dada, una variación de la cantidad de agua de un 5%, tendrá el mismo efecto sobre la razón agua/cemento que una variación del 5% en la cantidad de cemento. Por lo tanto, según lo indicado en el ítem 2.3.2.1, para razones agua/cemento cercanas a 0.5, si el contenido de agua de la mezcla varía en un $\pm 5\%$ del valor objetivo, el 95% del tiempo, resulta en una variación de la resistencia del hormigón que debería estar dentro de un $\pm 5\%$ de la resistencia promedio, el 95% del tiempo (Obla, 2015).

Para determinar la dosis de agua se debe tener en cuenta todos los factores que afectan su demanda, tanto en la etapa de diseño inicial como en los resultados obtenidos a partir del control de calidad del hormigón, dado, por ejemplo, a partir de los resultados de ensayos de resistencia a compresión y de la densidad del hormigón.

Básicamente, una demanda mayor de agua para obtener una docilidad dada, lleva asociada una reducción de resistencia y un aumento en la exudación del hormigón.

A modo de ejemplo, algunos de los factores que pueden modificar el requerimiento o demanda de agua son:

- Las temperaturas altas, disminuyen la docilidad del hormigón, para mantener un asentamiento de cono dado, se requiere una mayor cantidad de agua.
- Una mayor cantidad de limo en la mezcla, aumenta el requerimiento de agua.
- Los materiales puzolánicos, como cenizas volantes tienden a reducir el requerimiento de agua.
- Una cantidad de materiales cementicios inadecuada, sea déficit o exceso, requerirá mayor cantidad de agua.
- Las cenizas, en especial las variedades más gruesas, pueden aumentar el requerimiento de agua.
- La morfología y la textura de los agregados influyen en la demanda de agua. Los agregados angulares, aplanados y alargados, y los agregados de textura rugosa incrementan la demanda de agua.
- El tiempo de transporte del hormigón disminuye su docilidad. Por lo tanto, para mantener un asentamiento de cono dado, se requiere una mayor cantidad de agua.

Así como, se puede producir un aumento en la demanda de agua, hay factores que pueden aumentar el contenido de agua presente en la mezcla.

- En caso de que el operador del camión mixer realice un lavado del tambor del camión previo a una nueva carga, y el agua de lavado no sea descargada completamente, la nueva carga de hormigón resultará con un mayor contenido de agua.
- El contenido de humedad que poseen los agregados finos y gruesos. Un error de un 1% en la estimación del contenido de humedad de los agregados puede causar una variación en el contenido de agua de la mezcla de alrededor de 7.1–10.7 kg/m³, lo cual podría reducir la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días en aproximadamente 2.1 MPa (Obla, 2015).
- Variaciones en el agua de amasado, la que corresponde al agua agregada en el carguío inicial del camión mixer. Según la norma NCh170:2016, esta tiene una tolerancia de un 1% del volumen total de agua de la mezcla.
- Agua agregada por el operador mixer. Luego de cargar todos los materiales el operador mixer inspecciona visualmente la docilidad del hormigón y agrega agua para lograr la docilidad deseada. Posteriormente, una vez que el camión llega a la obra, y dado que el hormigón ha perdido docilidad en su transporte, el operador mixer nuevamente adiciona agua en el momento previo a la descarga. No se debería exceder el contenido de agua especificado por diseño. Sin embargo, la cantidad de agua que agrega el operador mixer para obtener la docilidad requerida en la obra está dada por su experiencia, y puede llegar a sobrepasar la cantidad especificada en la dosificación de la mezcla.

Cualquier cambio en el contenido de agua, será reflejado en la resistencia y densidad del hormigón resultante (Day, 2006).

Por último, es importante mencionar la relación existente entre docilidad, y la combinación de los efectos demanda de agua y contenido de agua. Se sabe que un incremento en el

contenido de agua de la mezcla conduciría a un asentamiento de cono mayor, sin embargo, es interesante notar que el asentamiento podría permanecer constante o incluso disminuir, dependiendo de la demanda de agua de la mezcla. Similarmente, si el contenido de agua disminuye, el asentamiento de cono podría mantenerse igual o incluso aumentar, en el caso que la demanda de agua disminuya (Obla, 2015).

2.5.2.2 Mezclado de componentes en camión mixer

El hormigón es mezclado en un camión mixer, y luego trasladado a obra. Se debe asegurar su homogeneidad y con ello, evitar que se produzcan segregaciones.

Los principales factores que influyen en la homogeneidad del hormigón son:

Secuencia de carguío de los componentes, velocidad de rotación y tiempo de mezclado (Bloem & Gaynor, 1970; R. D. Gaynor & Mullarky, 1975).

2.5.2.2.1 Carguío de componentes:

El método de secuencia de carguío propuesto por Gaynor permite mejorar la homogeneidad del hormigón, así como evitar que se formen bolas de cemento y agregados, o que se adhieran restos de cemento y agregado fino al tambor, que generalmente se sueltan cuando ya se ha descargado la mitad del material, provocando una variación de la homogeneidad del hormigón (R. D. Gaynor, 1996). Gaynor propone agregar primero el agregado grueso, luego agregar el 75% del agua y el cemento y resto de los agregados. Finalmente, agregar el último cuarto (25%) del agua para lavar todos los materiales en la tolva de carga y el extremo de descarga en el mezclador. Estas proporciones de adición de agua se pueden usar como punto de partida, y si no se cumplen los requisitos de homogeneidad o asentamiento del hormigón, se pueden ajustar las proporciones de agua. Sin embargo, si se agrega demasiada agua al final, el hormigón no alcanzará la docilidad adecuada y el patrón de flujo necesario no se desarrollará para la descarga. Además de que se afectaran las propiedades del hormigón, como por ejemplo, su resistencia a la compresión, aumentando su variabilidad (ver ítem 2.5.2.1.1).

2.5.2.2.2 Velocidad de rotación

En un camión mixer, las cuchillas de estructura helicoidal en la pared interior de la betonera mueven el hormigón, primero hacia abajo, hacia el fondo, y luego retrocede hacia el eje central donde está el extremo de descarga (R. D. Gaynor, 1996). Esto provoca una acción de plegado que combina los ingredientes. Si la velocidad de mezcla no es óptima, entonces este patrón de flujo no se crea dentro del camión. Este patrón de flujo deseable se produce solo en niveles razonablemente altos de velocidades de mezcla (típicamente de 18 rpm a 22 rpm pero tan bajas como de 12 rpm a 15 rpm con algunos mezcladores).

Una alta velocidad de mezcla puede ayudar a lograr la homogeneidad del hormigón de manera más eficiente y en un período de tiempo mucho más corto. Sin embargo, si la velocidad de mezcla continúa aumentando más allá de las 22 rpm, debido al aumento de

las fuerzas centrífugas, es posible que no se logre el patrón de flujo óptimo y que la mezcla y la uniformidad del concreto empiece a deteriorarse (Bloem & Gaynor, 1970).

Además, en caso que el camión se encuentre cargado parcialmente, una velocidad de rotación alta provoca que el hormigón quede el borde de la betonera.

2.5.2.2.3 *Tiempo de mezclado*

El tiempo de mezclado está relacionado con el número de revoluciones de la betonera o tambor del camión mixer. Incrementar las revoluciones no siempre significa una mejora en la homogeneidad del hormigón. Las revoluciones adicionales, o dicho de otra forma un tiempo de mezclado adicional, pueden causar una acumulación de calor en el hormigón, causando una reducción en el contenido de aire y en la docilidad, como también puede moler los agregados. Unos cuantos giros a la velocidad de mezclado antes de la descarga pueden mejorar la homogeneidad después de un viaje largo o lleno de baches desde la planta hormigonera hasta la descarga (Daniel & Lobo, 2005). Los requisitos de homogeneidad del hormigón premezclado en un camión mixer se cumplen con 70 a 100 revoluciones (ASTM C94).

2.5.2.3 Transporte y tiempo de transporte

Un mayor tiempo de transporte de la mezcla produce una pérdida de asentamiento del hormigón, y por lo tanto un aumento en la demanda de agua.

Investigaciones (R. D. Gaynor, Meininger, & Khan, 1985) mostraron que cuando el tiempo de transporte aumenta de 20 minutos a 90 minutos, la demanda promedio de agua aumentaba en 8.3 kg/m^3 y 12.5 kg/m^3 cuando la temperatura de la mezcla se mantuvo a 18°C y 35°C , respectivamente. El aumento del contenido de agua de la mezcla fue necesario para mantener un nivel asentamiento constante en la descarga de $10 \pm 2.5 \text{ cm}$. Una diferencia de 12.5 kg/m^3 en el contenido de agua de mezcla puede llevar a una variación en la resistencia a la compresión de más de 2.8 MPa, para una mezcla típica de razón agua/cemento de 0.50. Los productores pueden abordar esto a través de una o una combinación de las siguientes formas:

- Diseñando mezclas que presenten poca pérdida de asentamiento, lo que reducirá la variación de la demanda de agua. Esto se logra mediante aditivos retardantes o adiciones.
- Establecer un valor objetivo de asentamiento en la planta que sea mayor al especificado en obra, que considere la pérdida de asentamiento debido al tiempo de transporte a la obra (generalmente se considera una pérdida de 2 cm de asentamiento durante el traslado a obra).
- Agregar un aditivo en obra (plastificante) para compensar la pérdida de asentamiento, siempre que lo haga personal calificado, y se cuente con la autorización del responsable de la obra.

2.5.2.4 Temperatura

La temperatura es otra variable clave que puede producir variaciones en las propiedades del hormigón. El hormigón al momento de su colocación debe cumplir con un rango de temperatura de 5°C a 35°C (NCh170:2016). A medida que aumenta la temperatura del hormigón, aumenta la demanda de agua de la mezcla, aumenta la pérdida de asentamiento, disminuye el contenido de aire, disminuye el tiempo de fraguado, aumenta la resistencia en la edad temprana y disminuye la resistencia a edades posteriores.

Investigaciones mostraron que, por cada aumento de aproximadamente 5 ° C en la temperatura del hormigón, la demanda promedio de agua de la mezcla aumentó aproximadamente 1.8 kg/m³, para un nivel de asentamiento constante en la descarga de 10 ± 2.5 cm, y un tiempo de entrega de 60 minutos. Esto equivale a aproximadamente el 2% de la cantidad de agua utilizada normalmente (Gaynor et al. 1985). Si este cambio en la demanda de agua de mezcla no se considera, puede llevar a variaciones en la resistencia.

Las temperaturas ambientales más altas pueden aumentar aún más las temperaturas del hormigón, lo que lleva a una demanda de agua aún mayor, lo que explica menores resistencias durante el verano y mayores resistencias durante el invierno para la misma mezcla de hormigón. Esto se puede regular mediante aditivos reductores de agua, o variando el contenido de agua (o incluso de cemento) para mantener constante la razón agua/cemento.

2.5.3 Ensayos de laboratorio

El ensayo de laboratorio más común, entre los que normalmente se realizan al hormigón, es el de resistencia a compresión. Los ensayos de resistencia a compresión permiten:

- Llevar un control de calidad del hormigón, por medio de los resultados de la resistencia del hormigón colocado en obra, y verificar que ésta, por lo menos, cumpla con la resistencia especificada.
- Determinar la variabilidad del hormigón suministrado a obra.

Cuando se muestrea hormigón de un camión mixer, se preparan al menos 3 probetas, una, para determinar la resistencia a los 7 días y dos, para la resistencia a los 28 días (NCh170:2016).

En el procedimiento de muestreo también se debe incluir las mediciones del asentamiento de cono, temperatura del hormigón, y su densidad.

Si bien el ensayo de resistencia a compresión es una medida para controlar y determinar variabilidad del hormigón, los resultados de resistencia corresponden a un proceso de ensayo que también presenta variabilidad, y por lo tanto, se debe considerar al momento de realizar un análisis de variabilidad del hormigón.

En los siguientes casos se puede atribuir la variabilidad en los resultados al proceso mismo de ensayo:

- Si no se observa variación en la densidad de la probeta, es poco probable que haya ocurrido una modificación en el contenido de agua y de aire de la mezcla.
- Cuando la ganancia de resistencia de 7 a 28 días varía en más del 40% del promedio y no hay cambios similares en las resistencias del cemento ($0.6 * \text{ganancia promedio} < \text{ganancia} < 1.4 * \text{ganancia promedio}$).
- Cuando dos probetas que componen una misma muestra presentan una variación muy alta entre ellas (determinada por ejemplo mediante un coeficiente de variación de ensayo según indicado en punto 5.3 de NCh1998.Of89)

Algunos factores relacionados al proceso de ensayo de laboratorio que pueden producir variación en los resultados de resistencia son (Richardson, 1991):

- Moldes defectuosos, falta de tapa o bolsa de plástico en curado inicial.
- Muestreo mal efectuado, obteniendo una muestra no representativa, o no remezclada antes de la fabricación del cilindro, presencia de vacíos y segregación de áridos, extremos irregulares que provocan falta de soporte de la probeta.
- Curado inicial o curado en laboratorio realizados a una temperatura y humedad inadecuada, probetas en exposición directa a la luz solar.
- Refrentado no realizado correctamente.
- Ensayos de compresión mal efectuados, prensa de ensayo en mal estado o no calibrada. Probeta no centrada entre las placas de carga de la prensa. Durante proceso de ensayo una velocidad de carga mayor que 0.35 N/mm²/s; indicará resistencias mayores.

2.6 Desviación estándar y calidad del hormigón

La desviación estándar es una medida de la variabilidad de la resistencia a la compresión, y es un excelente indicador de la calidad de la empresa productora de hormigón (Obla, 2015). Una mayor desviación estándar en los resultados de resistencia a compresión, implica que existe una mayor variabilidad general del hormigón, y por lo tanto presenta una baja calidad.

Asimismo, como existe una relación entre la desviación estándar y la calidad del hormigón, ésta también se relaciona directamente con los costos asociados a la producción de hormigón. Esto se explica porque la resistencia media requerida, f'_{cr} , se obtiene considerando a la desviación estándar característica de la planta en su cálculo. La resistencia media requerida, que la mezcla de hormigón debe alcanzar, es por definición más alta que la resistencia especificada, f'_c , y aumenta si la desviación estándar es mayor. Esto asegura que las pruebas de resistencia tengan una baja probabilidad de caer por debajo de la resistencia especificada. Por lo tanto, una desviación estándar baja es deseable porque dará como resultado una resistencia media requerida más baja (f'_{cr}), lo que reducirá los costos del hormigón, al permitir dosificaciones menores de cemento.

Los estándares de control de hormigón basados en los resultados de ensayos de resistencia a compresión pueden variar, conforme a criterios del código ACI 214R-11, de excelente, para una desviación estándar menor a 2.8 MPa, a pobre, cuando la desviación estándar es mayor a 4.8 MPa. Esto se aplica cuando la resistencia a la compresión especificada es menor o igual a 35 MPa.

Hay dos objetivos importantes para controlar la calidad del hormigón. Uno es evitar que los hormigones presenten resultados de resistencia defectuosos y el otro es lograr una baja variabilidad. Es claro que ambos aspectos se relacionan, puesto que una baja variabilidad implica que no se producirán resultados defectuosos y viceversa, pero es útil considerarlos por separado.

La calidad del hormigón, está sujeta a variaciones aleatorias inevitables, pero que se pueden reducir, y a cambios no deseados en la calidad media de vez en cuando. Por eso es importante distinguir entre los dos y detectar cualquier cambio real, y su causa, tan pronto como sea posible para restaurar la calidad al nivel especificado. Es más fácil y más rápido, detectar cambios cuando la variabilidad general es baja (Day, 2006).

La variabilidad básica, dada por variaciones aleatorias, es una característica propia del proceso de confección del hormigón, y se relaciona con problemas en el pesaje de los componentes, el contenido de agua, fluctuaciones de humedad en la arena o variaciones de temperatura. La variabilidad adicional, está dada por cambios en la calidad media, y se relaciona directamente con las variaciones en las propiedades de las materias primas y la efectividad del sistema de control utilizado por la planta productora de hormigón.

Un sistema de control permite detectar los cambios a tiempo, y determinar su efecto cuantitativo sobre la resistencia del hormigón. Incluso, cuando la causa del cambio en la resistencia media es desconocida, su ocurrencia puede ser detectada y compensada mediante un cambio en el contenido de cemento. El tiempo es esencial para hacer tales ajustes, debido a que cuanto más tiempo permanezca la resistencia media lejos del valor de la resistencia especificada, mayor será el efecto sobre la variabilidad general (Day, 2006).

Además, el sistema de control debe monitorear no solo la calidad del producto resultante, sino que también las materias primas, el proceso de producción, las condiciones ambientales y la precisión del procedimiento de ensayo.

Obla, plantea que la desviación estándar de la resistencia a la compresión debería ser cuidadosamente monitoreada por las hormigoneras para al menos cinco de sus principales volúmenes de producción de mezcla de hormigón o las dos mezclas más demandadas de cada una de sus plantas (Obla, 2015).

Por último, implementar mejoras en la calidad del hormigón también tiene un rol importante en la reducción de su impacto ambiental, contribuyendo al desarrollo sostenible, el que ha alcanzado una enorme importancia en la actualidad. A raíz del fenómeno del calentamiento global, existe una creciente preocupación a nivel mundial de

los diversos sectores productivos de medir su huella de carbono e implementar medidas para reducirla.

A partir de estimaciones de Obla, se tiene que si un productor de hormigón presenta una desviación estándar $S = 8.6$ MPa, el contenido de cemento será un 43% más alto que la del productor cuya desviación estándar es $S = 2.4$ MPa, y por lo tanto, su huella de carbono será un 41% más alta (Obla, 2015).

3 METODOLOGÍA

El presente estudio busca realizar un análisis del comportamiento de algunas plantas premezcladoras en Chile, a partir de la variabilidad de los resultados de resistencia a compresión de los hormigones elaborados en ellas.

Para ello, se debió recopilar los antecedentes del control de calidad de los hormigones elaborados en 14 plantas que operan en la zona norte, centro y sur de Chile.

Las plantas se escogen a partir de la cantidad de resultados de ensayos disponibles del laboratorio de hormigones, que presta servicios de control en las regiones donde éstas operan, de tal forma de contar con la mayor cantidad de muestras en el período de análisis, correspondiente a 3 años aproximadamente (noviembre de 2014 a marzo de 2018). Por lo general, un mayor número de muestras está asociado a mayores volúmenes de producción, por lo tanto, las plantas escogidas en cada sector corresponden a las plantas más grandes de cada hormigonera.

Se analizan 3 tipos de hormigones distintos por cada planta, seleccionados entre los hormigones que presentan mayor cantidad de resultados de ensayos según cada planta, y por ende, podrían corresponder a los hormigones que representan el mayor volumen de producción de cada planta. Esta información se presenta en la Tabla 3.1, donde las hormigoneras se denominan mediante letras, y se ordenan de acuerdo a su volumen de producción (asociado al número de muestras ensayadas), siendo la primera de ellas, la hormigonera A, la que presenta el mayor volumen de producción.

Tabla 3.1 Plantas y Hormigones premezclados a analizar.

Hormigonera	Zona	Planta	Tipo de hormigón	Hormigonera	Zona	Planta	Tipo de hormigón		
A	Norte	A-Norte	HB25 (10) 20/10	C	RM	C-RM	HB30 (10) 20/10		
			HB20 (10) 20/10				HB25 (10) 20/10		
			HN30 (10) 20/10				HB35 (10) 20/10		
	HB30 (10) 20/10	HB35 (5) 20/14							
	RM	A-RM	HB25 (10) 20/10				Sur	C-Sur	HB25 (10) 20/10
			HN30 (10) 20/10						HB30 (10) 20/10
			HB30 (10) 20/10		HB25 (10) 20/10				
	Sur	A-Sur	HB25 (10) 20/10		Norte	D-Norte	HB30 (10) 20/10		
			HN25 (10) 20/06				HB20 (10) 20/10		
			HB25 (10) 20/10				HB30 (10) 20/10		
B	Norte	B-Norte	HB30 (10) 20/10	D	RM	D-RM	HB25 (10) 20/10		
			HN30 (10) 20/10				HB35 (10) 20/10		
			HB30 (10) 20/10				HB25 (10) 20/10		
	RM	B-RM	HB25 (10) 20/10				Sur	D-Sur	HB35 (10) 20/10
			HN25 (10) 20/10						HB40 (10) 20/10
			HN25 (10) 20/06						HB30 (10) 20/10
	Sur	B-Sur	HN25 (10) 20/08		E	RM	E-RM	HB25 (10) 20/10	
			HB30 (10) 20/10					HN30 (10) 20/10	
			HB30 (10) 20/10					HB30 (10) 20/10	
	C	Norte	C-Norte		HB40 (10) 20/10	F	RM	F-RM	HB25 (10) 20/10
HB35 (10) 20/10				HN30 (10) 20/10					
HB30 (10) 20/10				HN30 (10) 20/10					

Las hormigoneras A, B, C y D corresponden a grandes hormigoneras presentes a lo largo del país, y las E y F son hormigoneras presentes solo en la Región Metropolitana. Por lo tanto, para el caso de las hormigoneras A, B, C y D se consideran 3 plantas (Norte, Centro y Sur de Chile), y para el caso de las hormigoneras E y F, se considera las plantas en el sector centro (Región Metropolitana). Todas las muestras analizadas están compuestas de 3 probetas cilíndricas, de las cuales una se ensaya a compresión a los 7 días y las otras dos, denominadas probetas hermanas se ensayan a 28 días (NCh170:2016).

De los resultados de ensayo a compresión, se elaboran gráficos con los valores de resistencia a compresión en función de la fecha de muestreo, considerando el conjunto completo de resultados. En estos gráficos se identifican subperiodos donde se observa cierta invariabilidad de la resistencia media de las muestras, los cuales están precedidos y seguidos por periodos en donde se observa un cambio constante de la resistencia media.

A partir de estos gráficos, se analiza el comportamiento de cada planta, en cuanto a variabilidad, cumplimiento de resistencia de acuerdo a normativa chilena, y al tipo de dosificación, según lo definido en los siguientes ítems de este capítulo.

3.1 Resultados de resistencia a compresión

3.1.1 Casos de análisis

El análisis se realiza considerando los siguientes tres casos.

3.1.1.1 Caso 1

Este caso considera el total de muestras ensayadas en laboratorio, en el periodo comprendido en el estudio, incluyendo las muestras que presentan resultados anómalos de resistencia, que invalidarían la estimación de la variabilidad del hormigón que caracteriza a la planta.

3.1.1.2 Caso 2

En el caso 2 se deja fuera de análisis a las muestras que poseen resistencias muy altas o muy bajas, ya que se consideran resultados anómalos y no son atribuibles a la variabilidad aleatoria del proceso mismo de confección del hormigón. Por ejemplo, un mayor tiempo de traslado del hormigón, por lo que el operador mixer podría aumentar el contenido de agua para compensar la pérdida de asentamiento ocurrida durante el trayecto, resultando en una reducción en la resistencia.

3.1.1.3 Caso 3

En el caso 3 se deja fuera de análisis las muestras que presentan una ganancia de resistencia de 7 a 28 días, que varía en más de un 40% de la ganancia promedio del total de muestras (Obla, 2015). Así como también las muestras cuyas probetas hermanas presentan una diferencia mayor a 2 MPa (Day, 2006).

Las muestras que presentan alguno de estas dos anomalías, se consideran asociadas a posibles errores de ensayo, y si sus resultados alcanzan valores de resistencia que escapan a lo esperado, no se consideran dentro del análisis del caso 3. Las muestras que no son consideradas en el caso 2 tampoco se consideran en el caso 3.

3.1.2 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se gráfica la resistencia a compresión para el total de muestras de cada hormigón respecto a su fecha de muestreo, según los 3 casos de análisis que se presentan en el ítem 3.1.1.

Además, en el gráfico se identifican los subperiodos, cuyas muestras presentan una resistencia media constante, éstos se ubican entre puntos de cambio de la resistencia media. Los puntos de cambio de la resistencia media generalmente están asociados a

un continuo crecimiento o decrecimiento de la resistencia y corresponden a un periodo de ajuste.

Los resultados de ensayo a compresión a 28 días se expresan en probeta cilíndrica. De acuerdo a la conversión de resistencia de probeta cúbica a cilíndrica (NCh170.Of85), un hormigón H25 tiene una resistencia especificada $f_c = 20$ MPa en probeta cilíndrica.

3.1.3 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos de resistencia media constante

Se gráfica la resistencia a compresión para las muestras pertenecientes a los distintos subperiodos, según los 3 casos de análisis que se presentan en el ítem 3.1.1.

Los subperiodos indican que la resistencia media se mantiene constante en ese rango, y por ende la dosificación también se mantiene constante.

3.2 Análisis de resultados de resistencia a compresión

3.2.1 Análisis de variabilidad

La variabilidad de cualquier producto elaborado, incluyendo el hormigón, es inevitable. Tal como se mencionó en el capítulo 2, la resistencia a la compresión es considerada como el mejor indicador de la calidad del hormigón.

Se pueden distinguir distintos tipos de variaciones de acuerdo a sus causas:

- Variaciones aleatorias que no tienen una causa asignable, y son atribuidas a la variabilidad normal o básica del proceso de confección.
- Cambios aislados o no sostenidos que tienen una causa asignable, por ejemplo, un asentamiento de cono alto aislado produciendo una resistencia reducida.
- Cambios sostenidos en la resistencia media, atribuidos, por ejemplo, a variaciones en materias primas o a cambios en las condiciones climáticas.
- Cambios debido a los procedimientos de ensayos de laboratorio, es decir falsos cambios, los cuales nuevamente pueden ser sostenidos o aislados.

Estrictamente, las estadísticas solo se aplican a variaciones aleatorias.

En general, los registros de resultados a lo largo de un período se pueden dividir en subperiodos de resistencia media constante y de menor variabilidad que el registro global. La variabilidad en el subperíodo es la variabilidad aleatoria básica causada por el proceso mismo de confección, como, por ejemplo, la deficiencia en la precisión de medición de los materiales componentes del hormigón (incluyendo agua) y la inexactitud de los ensayos. La variabilidad general es la combinación de esta variabilidad básica con la variación en la resistencia media entre los subperiodos (Day, 2006).

Los puntos entre subperiodos, en los que la resistencia media muestra un cambio repentino o de cambio de paso, se conocen como "puntos de cambio" (ver Figura 3.1). El

rango típico de un cambio es del orden de 2 a 5 MPa (probablemente significa que los cambios mucho menores que 2 MPa generalmente no son detectables) (Day, 2006).

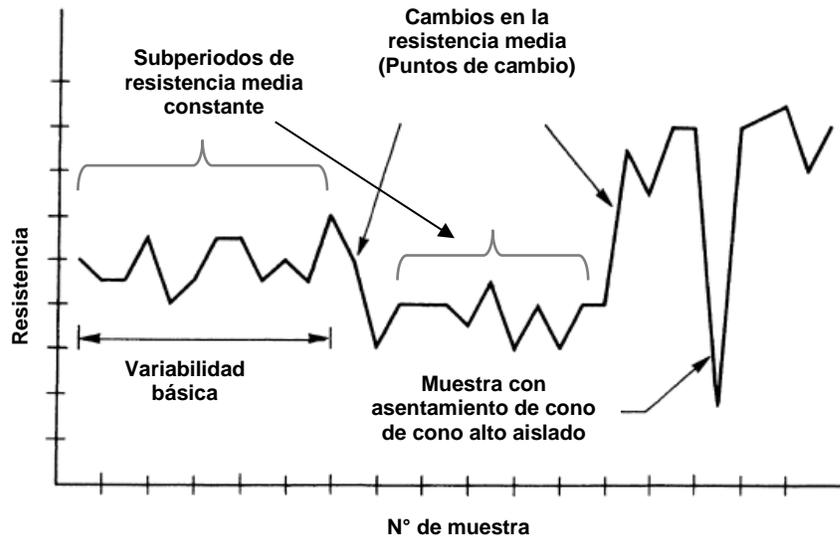


Figura 3.1 Puntos de cambio y variabilidad básica del hormigón.

3.2.1.1 Periodo de ajuste

Los puntos de cambio, generalmente están asociados a cambios en la dosificación, cuando la resistencia media aumenta o disminuye de forma constante. Sin embargo, los puntos de cambio también se pueden presentar en periodos donde la dosificación es constante, y estar asociados a otros factores, como por ejemplo un cambio en las materias primas, u otros factores, que afectan la resistencia media. Por lo tanto, se utilizará el término periodo de ajuste, para referirse de manera más general a los puntos de cambio, y a los periodos en que la resistencia media no es constante y que no están asociados necesariamente a un cambio de dosificación. El periodo de ajuste considera el resto de las muestras que no pertenecen a los subperiodos.

3.2.1.2 Análisis de variabilidad general a partir del total de muestras

Se determina la resistencia media y la desviación estándar de la resistencia individual del lote completo de muestras, S . El valor de S indica la variabilidad general que presenta el hormigón. Se clasifica el estándar de control del hormigón de acuerdo a su desviación según código ACI 214R-11. Además, se presenta el valor de la resistencia requerida, para la cual se debe diseñar el hormigón, y que está asociada a su desviación estándar.

3.2.1.3 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

3.2.1.3.1 Variabilidad básica a partir de la desviación estándar de la resistencia individual de cada subperíodo

En cada subperíodo, se determina la resistencia media y la desviación estándar de la resistencia individual de cada muestra perteneciente al subperíodo. Para determinar la desviación estándar promedio de la resistencia de los distintos subperiodos, S_{promedio} , se tiene en consideración el número de muestras que lo componen. Esta desviación estándar ponderada representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

No se considerarán subperiodos con menos de 10 muestras, ya que la variabilidad para un número aún más reducido de muestras no se puede determinar con una confiabilidad razonable (Day, 2006).

3.2.1.3.2 Variabilidad asociada a la dosificación a partir de la desviación estándar de la resistencia media de cada subperíodo

Se determinará la desviación estándar de la resistencia media de los distintos subperiodos, S_{fm} , lo que indica la variabilidad asociada a la dosificación.

Cabe destacar que hay una diferencia entre la variabilidad sobre la misma resistencia media y un cambio en la resistencia media. Si un cambio en la resistencia media no se detecta, causa un aumento aparente en la variabilidad básica. Además la variabilidad básica continua se puede considerar como una característica de la producción (Day, 2006).

Es importante mencionar, que en la confección de hormigón, son más comunes los puntos de cambio en la resistencia media que las desviaciones de la resistencia media (Gibb & Harrison, 2010).

3.2.1.4 Variabilidad del hormigón a partir de la desviación estándar

La variabilidad que presenta el hormigón, se estima a partir del valor de la desviación estándar de acuerdo a lo indicado en la Tabla 3.2. Los valores se definen a partir del estándar de control del hormigón establecido en código ACI 214R-11.

Tabla 3.2 Variabilidad del hormigón a partir de la desviación estándar

Variabilidad	S [MPa]
Baja	< 2.8
Media	2.8 a 4
Alta	4 a 5
Muy alta	> 5

A partir de esta relación entre los valores de desviación estándar, se determina la variabilidad general, la variabilidad básica asociada al proceso de confección y la variabilidad asociada a la dosificación de cada hormigón.

3.2.1.5 Variabilidad de plantas a partir de la variabilidad de sus hormigones

A partir de los resultados de desviación estándar obtenidos para cada hormigón, se determinará la desviación estándar que presenta cada planta. Para esto se utiliza la desviación normal ponderada de la planta, según norma NCh1934.Of92.

Una vez determinados los valores de la desviación estándar, se determina la variabilidad de las plantas, según lo indicado en Tabla 3.2.

3.2.2 Porcentaje no cumplimiento según normativa

Para evaluar el cumplimiento de resistencia de los hormigones, se considera la evaluación de resistencia mediante grupos de muestras consecutivas de acuerdo a la norma NCh1998.Of89.

El hormigón no cumple con la resistencia especificada si del análisis de resultados de resistencia se verifica alguna de las siguientes condiciones:

$$f_3 < f_c + k_1$$

$$f_i < f_c - k_2$$

Donde:

f_3 : resistencia media de tres muestras consecutivas [MPa].

f_i : resistencia individual de cada muestra [MPa].

f_c : resistencia especificada a la rotura por compresión [MPa].

k_1 y k_2 : constantes de evaluación.

Dado que se estudian hormigones de grado H20 o superior y 10% de fracción defectuosa, los valores utilizados son $k_1 = 0$ y $k_2 = 3.5$. Dentro de los hormigones analizados, se incluye un único caso cuya fracción defectuosa es 5%, para el cual, los valores utilizados son $k_1 = 1$ y $k_2 = 2.5$.

Se determina el porcentaje de no cumplimiento de ambas condiciones, para cada hormigón, considerando la totalidad de muestras.

3.2.3 Tipos de dosificación a partir de resultados de resistencia a compresión de subperiodos

Para determinar cómo funciona la dosificación en cada planta en base a los resultados de resistencia a compresión, se considera la diferencia entre la resistencia media, f_m , y la resistencia media requerida o de diseño, $f_r = f_c + tS$.

La resistencia media requerida corresponde a la resistencia a considerar para el cálculo de la dosificación del hormigón. Ésta se determina a partir de la resistencia especificada, f_c , más la desviación estándar S que presenta el hormigón, amplificada por un factor estadístico t . El factor estadístico t , tiene relación con la fracción defectuosa del hormigón y el número de muestras que se consideran en el análisis. Con esto se garantiza que las muestras de hormigón cumplan con la resistencia especificada para un nivel de confianza dado, o, dicho de otra manera, que la probabilidad de que las muestras presenten una resistencia menor a la resistencia especificada este dentro de su fracción defectuosa. Para entender de manera gráfica los valores antes descritos, en la Figura 3.2 se tiene la curva de distribución normal que siguen los resultados de resistencia a compresión del hormigón.

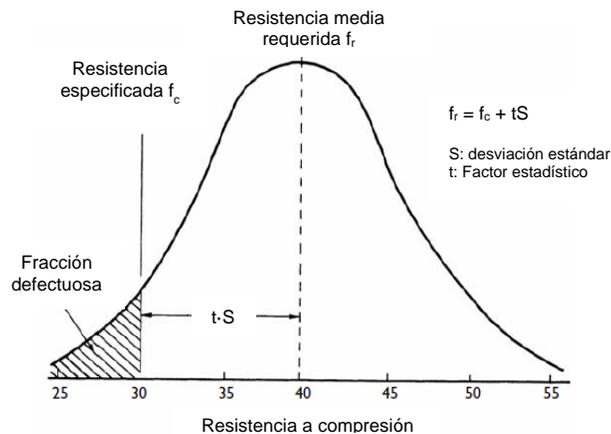


Figura 3.2 Curva de distribución normal de resultados de resistencia a compresión del hormigón.

Según lo indicado en el capítulo 2.3, la resistencia del hormigón está relacionada directamente con su dosificación, y principalmente con la cantidad de cemento (y con su calidad). Por lo tanto, para un asentamiento de cono dado, una dosificación mayor representa, principalmente, una cantidad mayor de cemento, y tiene como resultado una resistencia más alta. En base a esto, si un hormigón presenta resistencias medias muy altas respecto a la resistencia requerida, implica que tiene una dosificación mayor a la necesaria.

Para determinar los tipos de dosificaciones que presenta una planta, se definieron rangos dados por la diferencia de la resistencia media que presentan las muestras y la resistencia requerida. Los tipos de dosificaciones según los resultados de resistencia se definen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Tipos de dosificaciones en base a resultados de resistencia a compresión

Tipo de dosificación	$f_m - f_r$ [MPa]
Holgada	> 4
Ajustada	1 a 4
Óptima	0 a 1
Límite	< 0

Según Tabla 3.3, una planta presenta una dosificación holgada, cuando diseña sus hormigones en base a una dosificación más alta a la requerida, resultando hormigones con resistencias medias mayores a la requerida en más de 4 MPa. Asimismo, una planta presenta una dosificación límite, cuando diseña sus hormigones en base a una resistencia media inferior a la requerida, aumentando la probabilidad de obtener resistencias menores a la especificada con una mayor fracción defectuosa.

De acuerdo a lo anterior, para cada hormigón se determina los tipos de dosificación, a partir de los resultados de resistencia a compresión de los subperiodos y las fracciones de tiempo que representa cada uno respecto al periodo estudiado. Además, se estima las fracciones de tiempo correspondientes a los periodos de ajuste que experimenta la planta, ya sea, debido a cambios en su dosificación, variaciones en sus materias primas u otros factores.

4 RESULTADOS

A continuación, se presenta los resultados de cada planta de acuerdo a los 3 casos de análisis. En primer lugar, se presenta los gráficos de resistencia a compresión considerando las muestras correspondientes a todo el rango de estudio, dados los tres casos de análisis explicados en ítem 3.1.1. El gráfico representa la resistencia individual de cada muestra (f_i), la resistencia media móvil de tres muestras consecutivas (f_3) y la resistencia media del total de muestras (f_m), con su desviación estándar correspondiente (S). Además, se muestran las condiciones límites que debe cumplir la resistencia individual y la resistencia media móvil, dadas por las rectas horizontales f_c+k_1 y f_c-k_2 , respectivamente.

En los gráficos se identifican los subperiodos cuya resistencia media es constante. Luego, se tiene los valores tabulados de f_m , S , $f_c + tS$ y N . El valor $f_c + tS$, corresponde a la resistencia media requerida o de dosificación y N representa el número de muestras que se consideran en el análisis.

La segunda tabla resume el porcentaje de no cumplimiento de la resistencia del hormigón de acuerdo a la normativa chilena (dados por los límites f_c+k_1 y f_c-k_2).

En segundo lugar, se tiene los gráficos de resistencia a compresión de los subperiodos cuya resistencia media es constante, con los parámetros antes mencionados (f_m , S y N). Posteriormente, se presenta los valores promedios de la desviación estándar de las resistencias individuales de todos los subperiodos ($S_{promedio}$) y la desviación estándar de la resistencia media de cada subperíodo (S_{fm}).

Por último, se tienen los distintos tipos de dosificación que presenta el hormigón, a partir de los resultados de resistencia de los subperiodos, junto con la fracción de tiempo que representa cada una.

Los resultados de resistencia a compresión están expresados en probeta cilíndrica, por lo tanto, un hormigón H25, representa una resistencia especificada, $f_c = 20$ MPa.

Las fechas de muestreo están indicadas como una abreviación de mes y año, por ejemplo, feb 15, representa febrero del año 2015.

4.1 Hormigonera A

4.1.1 Planta A-Norte

4.1.1.1 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta A-Norte, Hormigonera A

4.1.1.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

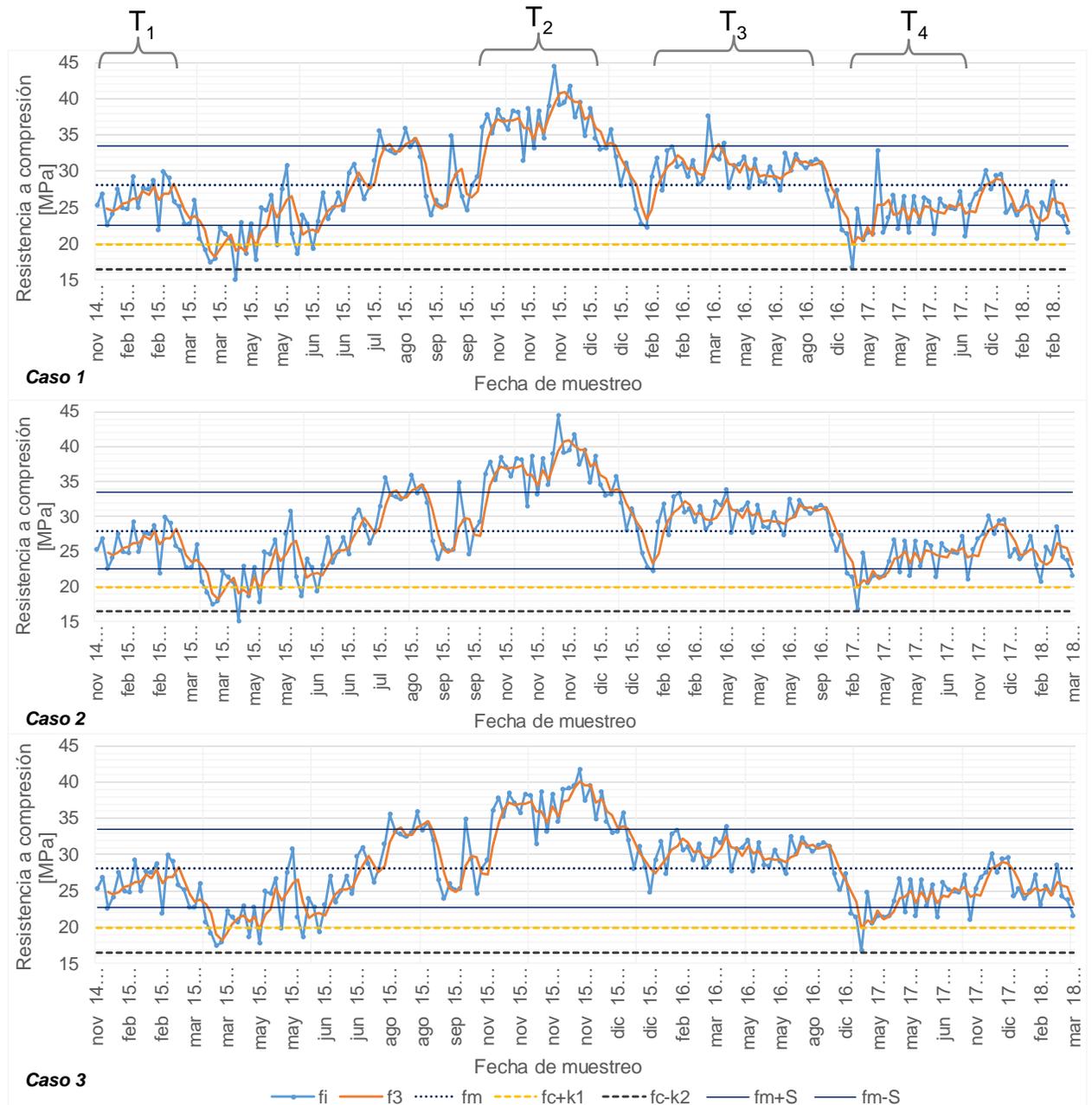


Gráfico 4.1 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Norte.

4.1.1.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 28.1 MPa y una desviación estándar de 5.3 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general muy alta. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad pobre según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida mayor ($f_c + tS = 26.8$ MPa). Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	5.5	190	28.0	27.0
caso 2	5.5	187	28.0	27.0
caso 3	5.3	181	28.1	26.8

Del Gráfico 4.1 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 30 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 4 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio de dosificación, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.2 se presenta los 4 subperiodos con mayor detalle.

4.1.1.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 1.3 MPa ($f_m = 28.1$ MPa y $f_c + tS = 26.8$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.1 se observa un periodo de ajuste durante marzo de 2015, cuya resistencia media es cercana al límite normativo. En este periodo, para el caso 3, se tiene que cinco muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Sin embargo, este porcentaje de no cumplimiento del 3% está dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. En cuanto a la resistencia individual se tiene que, para el caso 3, todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° muestras	Muestras [%]	N° muestras	Muestras [%]
caso 1	8	4	1	1
caso 2	8	4	1	1
caso 3	5	3	0	0

4.1.1.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

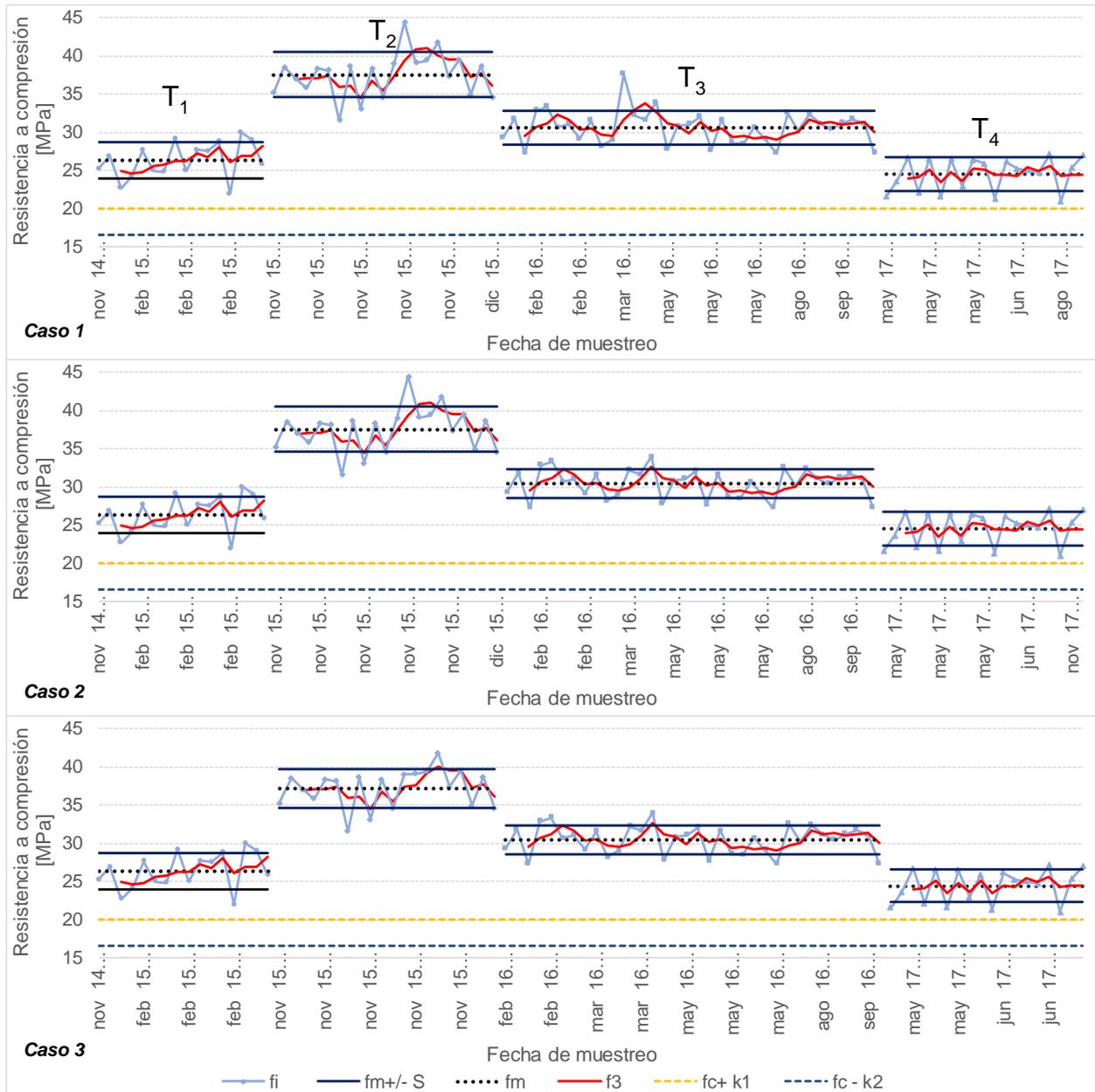


Gráfico 4.2 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Norte.

4.1.1.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.9 y 2.5 MPa, con un promedio de 2.2 MPa según Tabla 4.4. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.3 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Norte.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T₁	caso 1	2.4	16	26.3	23.2
	caso 2	2.4	16	26.3	23.2
	caso 3	2.4	16	26.3	23.2
T₂	caso 1	2.9	21	37.5	23.9
	caso 2	2.9	21	37.5	23.9
	caso 3	2.5	20	37.2	23.4
T₃	caso 1	2.2	35	30.6	22.8
	caso 2	1.9	34	30.4	22.4
	caso 3	1.9	34	30.4	22.4
T₄	caso 1	2.2	19	24.5	22.9
	caso 2	2.2	19	24.5	22.9
	caso 3	2.2	18	24.4	22.9

Tabla 4.4. Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	2.4
caso 2	2.3
caso 3	2.2

En la Tabla 4.5, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los 4 subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 5.6 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 12.8 MPa.

Tabla 4.5. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	29.7	5.8
caso 2	29.7	5.7
caso 3	29.6	5.6

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad muy alta en cuanto a su dosificación ($S_{f_m} = 5.6$ MPa), y una variabilidad baja asociada al proceso mismo de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.2$ MPa). Por lo tanto, la gran variabilidad de sus resultados de resistencia a compresión está causada principalmente por su dosificación.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor muy cercano a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 5.3$ MPa y $S_{fm} = 5.6$ MPa), así como también, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (28.1 MPa y 29.6 MPa, respectivamente). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad de la dosificación, pasando inadvertida la variabilidad básica del proceso, debido a que esta última es menor ($S_{promedio} = 2.2$ MPa).

4.1.1.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.3 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_2 y T_3 presentan resistencias medias por sobre a la resistencia requerida en 13.8 y 8.0 MPa, respectivamente, lo que representa una dosificación holgada. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 y T_4 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 3.1 y 1.5 MPa, respectivamente, lo que implica una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada durante un 28% del tiempo y una dosificación holgada durante el 21% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 51% del tiempo. Ver Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	21
Ajustada	28
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	51

4.1.1.2 Hormigón HB20 (10) 20/10 de Planta A-Norte, Hormigonera A

4.1.1.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

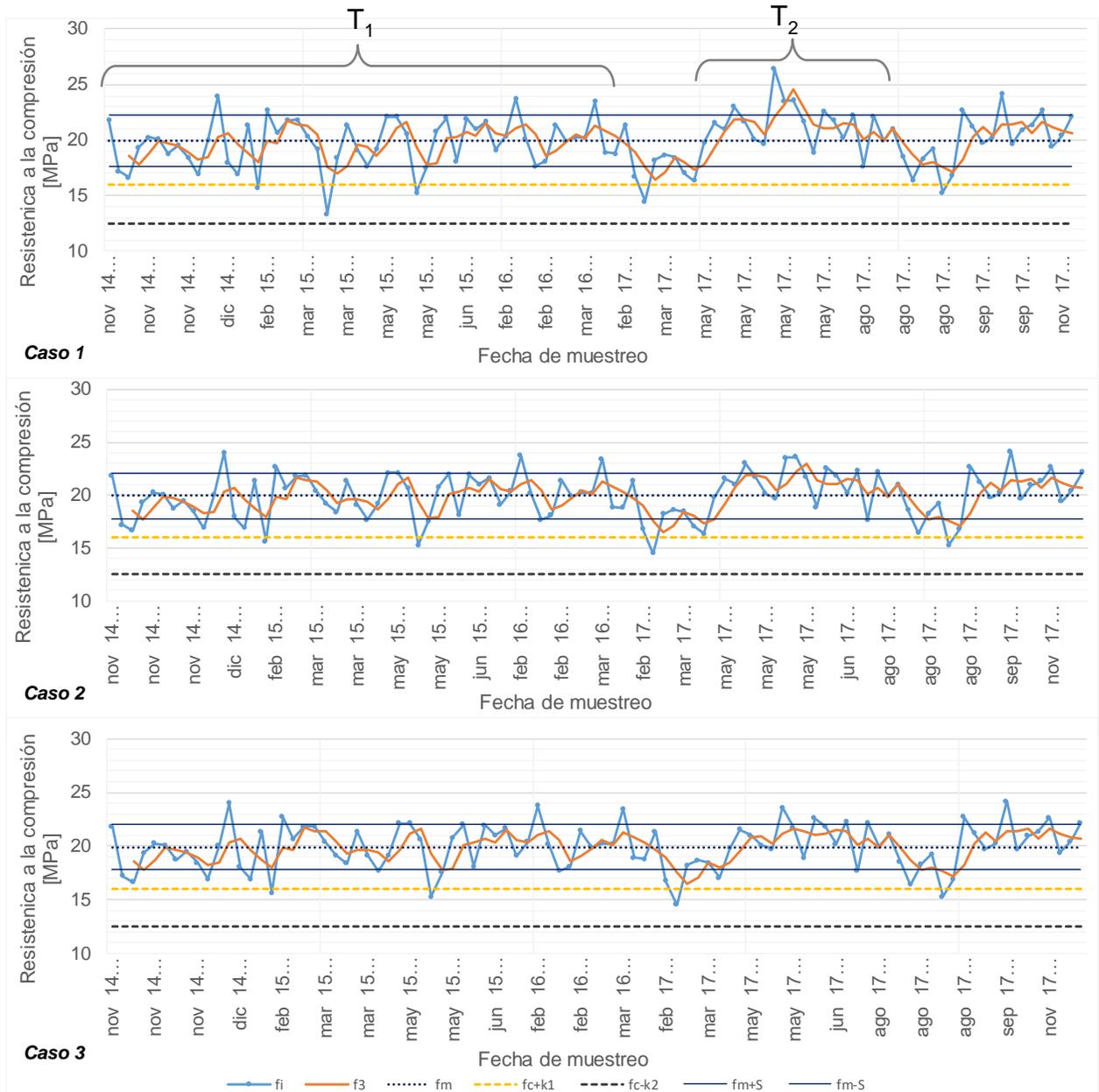


Gráfico 4.3 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta A-Norte.

4.1.1.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 19.9 MPa y una desviación estándar de 2.1 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación se asocia a un control de calidad

excelente según código ACI 214R-11 y el hormigón se debe diseñar para una resistencia $f_c + tS = 18.7$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	2.3	98	19.9	19.0
caso 2	2.2	96	19.9	18.8
caso 3	2.1	92	19.9	18.7

Del Gráfico 4.3 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 10 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.4 se presenta los 2 subperiodos con mayor detalle.

4.1.1.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 1.2 MPa ($f_m = 19.9$ MPa y $f_c + tS = 18.7$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.3 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta A-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° muestras	Muestras [%]	N° muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.1.1.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

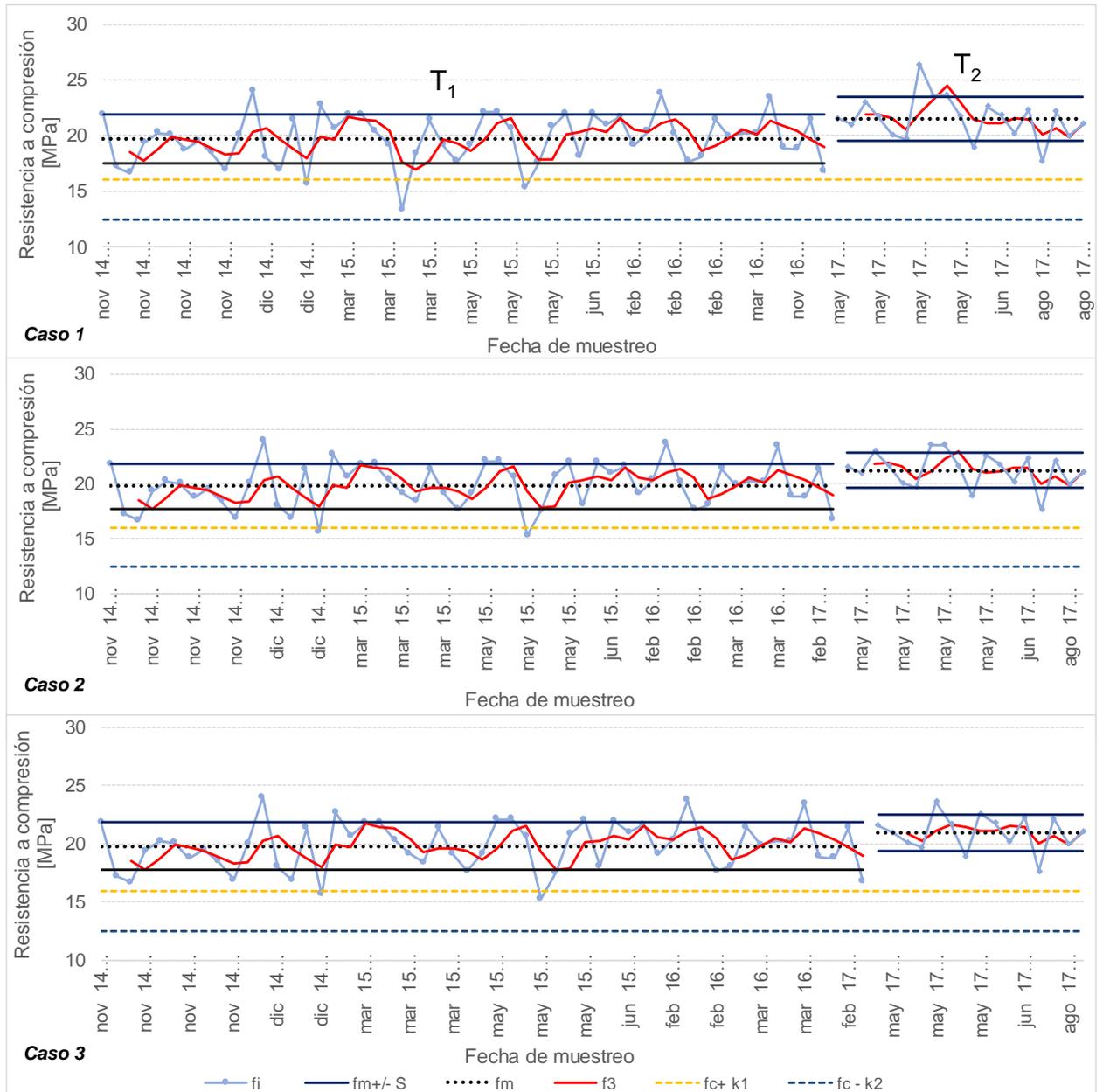


Gráfico 4.4 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta A-Norte.

4.1.1.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.9 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos T_1 y T_2 es 2.0 y 1.5 MPa, respectivamente, con un promedio de 2.0 MPa según Tabla 4.10. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.9 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta A-Norte.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T_1	caso 1	2.2	54	19.7	18.8
	caso 2	2.0	53	19.8	18.6
	caso 3	2.0	53	19.8	18.6
T_2	caso 1	2.0	19	21.5	18.6
	caso 2	1.6	18	21.3	18.1
	caso 3	1.5	15	21.0	18.1

Tabla 4.10 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	2.1
caso 2	1.9
caso 3	2.0

En la Tabla 4.11 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que esta desviación es 0.8 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T_1 y T_2 , las muestras difieren en sus resistencias medias en 1.2 MPa.

Tabla 4.11 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	20.6	1.3
caso 2	20.5	1.0
caso 3	20.4	0.8

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.0$ MPa) y que su dosificación es prácticamente constante ($S_{f_m} = 0.8$ MPa).

Además, se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor muy cercano a la desviación estándar de los subperiodos ($S = 2.1$ MPa y $S_{\text{promedio}} = 2.0$

MPa), así como también la resistencia media del total de muestras es similar a la resistencia media de los subperiodos (según caso 3, 19.9 MPa y 20.4 MPa, respectivamente). Debido a que en este hormigón la dosificación es prácticamente constante, cuando se analiza el total de las muestras se refleja la variabilidad básica del proceso de confección.

4.1.1.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.9 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T₁ y T₂ presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 1.2 y 2.9 MPa, respectivamente, lo que representa una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada durante un 78% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 22% del tiempo. Ver Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	78
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	22

4.1.1.3 Hormigón HN30 (10) 20/10 de Planta A-Norte, Hormigonera A

4.1.1.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se presenta solo el caso 1, dado que los casos 2 y 3 no consideran muestras que requieran ser eliminadas.

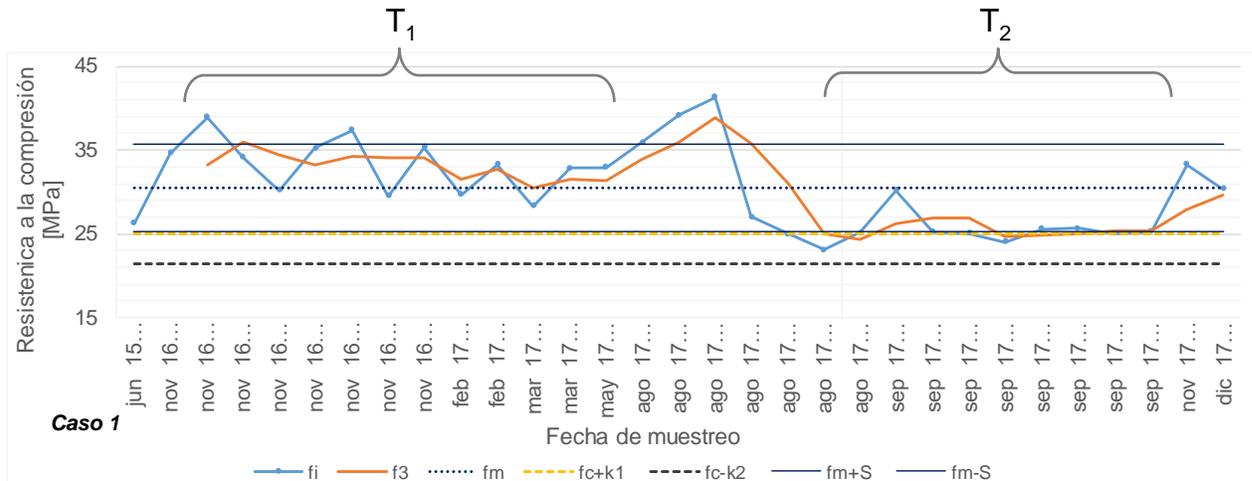


Gráfico 4.5 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-Norte.

4.1.1.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, se tiene una resistencia media de 31.6 MPa y una desviación estándar de 5.2 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general muy alta. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy malo según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida mayor ($f_c + tS = 31.6$ MPa). Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	5.2	31	30.5	31.6

Del Gráfico 4.5 se observa que hay una diferencia de aproximadamente 18 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre un punto de cambio, donde la resistencia media aumenta durante el mes de agosto de 2017, y luego disminuye durante este mismo mes. En el Gráfico 4.6 se presenta el subperiodo con mayor detalle.

4.1.1.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por debajo de la resistencia requerida en 1.1 MPa ($f_m = 30.5$ MPa y $f_c + tS = 31.6$ MPa). Por lo tanto, existe riesgo de que las muestras no cumplan con la calidad del hormigón según la normativa, resultando una fracción defectuosa mayor. Del Gráfico 4.5, se tiene que tres muestras no cumplen con la condición límite de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento del 10% está dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición dada para la resistencia individual, se observa que todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° muestras	Muestras [%]	N° muestras	Muestras [%]
caso 1	3	10	0	0

4.1.1.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

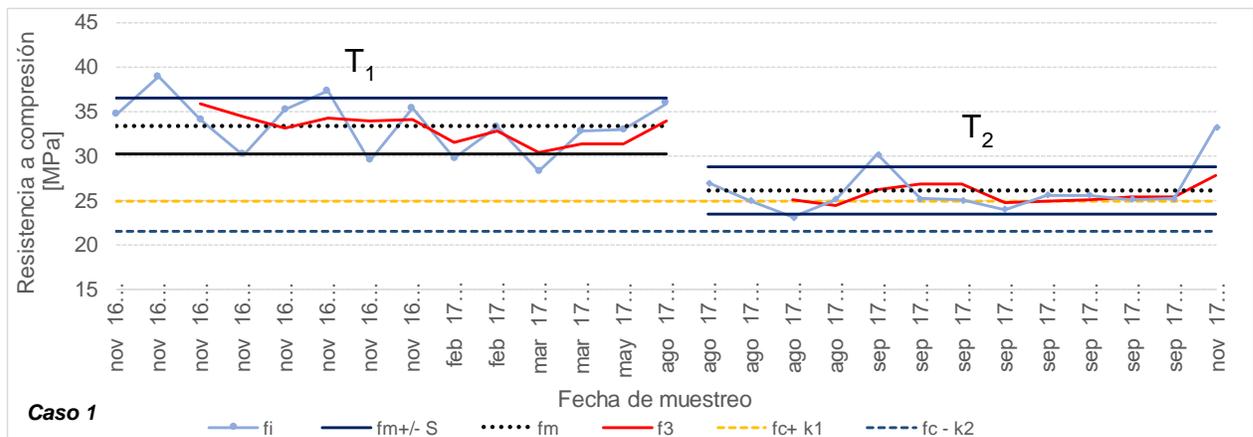


Gráfico 4.6 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-Norte.

4.1.1.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.15 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos T_1 y T_2 es 3.1 y 2.7 MPa, respectivamente, con un promedio de 2.9 MPa según Tabla 4.16. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.15 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-Norte.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	3.1	14	33.4	29.2
T ₂	caso 1	2.7	13	26.1	28.7

Tabla 4.16 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Caso	$S_{promedio}$ [MPa]
caso 1	2.9

En la Tabla 4.17 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Se tiene que esta desviación es 5.2 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T₁ y T₂, las muestras difieren en sus resistencias medias en 7.3 MPa.

Tabla 4.17 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Caso	$f_{m\ promedio}$ [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	29.8	5.2

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad muy alta en cuanto a su dosificación ($S_{f_m} = 5.2$ MPa), y una variabilidad media asociada al proceso mismo de confección ($S_{promedio} = 2.9$ MPa). Por lo tanto, la gran variabilidad de sus resultados de resistencia a compresión está causada principalmente por su dosificación.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene el mismo valor que la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 5.2$ MPa y $S_{f_m} = 5.2$ MPa), así como también la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (30.5 MPa y 29.8 MPa, respectivamente). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad de la dosificación, pasando inadvertida la variabilidad básica del proceso, debido a que esta última es menor ($S_{promedio} = 2.9$ MPa).

4.1.1.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.15 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T₁ presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 4.2 MPa, lo que representa una dosificación holgada. Las muestras pertenecientes al subperiodo T₂ presentan una resistencia media por debajo a la requerida en 2.6 MPa, por lo que tienen una dosificación límite.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación holgada durante el 40% del tiempo, y una dosificación límite que representa el 30% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 30% del tiempo. Ver Tabla 4.18.

Tabla 4.18 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	40
Ajustada	-
Óptima	-
Límite	30
Periodo de ajuste	30

4.1.2 Comentarios Planta A-Norte

El hormigón HB20 presenta una variabilidad general baja que está asociada principalmente a su proceso de confección, y su dosificación es prácticamente constante. Los hormigones HB25 y HN30, presentan una variabilidad general muy alta que está asociada a su dosificación. El hormigón HB20 presenta distinto comportamiento a los otros dos. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias entre 10 a 30 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad que presentan los hormigones.

Estos hormigones no presentan periodos continuos de muestreo, sobre todo los hormigones HB20 y HN30, por lo que no es posible identificar si todos los periodos de cambio de resistencia coinciden en los tres hormigones. Sin embargo, se observa que, en marzo de 2015 y marzo de 2017, los hormigones HB25 y HB20 presentan una baja de resistencia, y en agosto de 2017, se presenta una baja de resistencia en los 3 hormigones. Esta baja de resistencia se atribuye a variaciones en la calidad del cemento, o alguna otra materia prima, que utiliza esta planta. Estas variaciones son más notorias en el hormigón HB25, ya que cuenta con mayor continuidad de resultados en el tiempo estudiado. Se observa que los periodos de baja o alta resistencia presentan una duración cercana a un mes, lo que implicaría que la planta realiza constantemente ajustes de dosificación, para compensarlas.

Además, la planta trabaja principalmente con una dosificación ajustada y holgada. Se observa que el hormigón HB25 presenta periodos de ajuste durante aproximadamente la mitad del tiempo, y además posterior a los periodos de baja resistencia presenta una dosificación holgada o ajustada. El hormigón HN30 presenta una dosificación holgada, y el periodo de dosificación límite corresponde a un periodo de baja resistencia, que además se presenta en los 3 hormigones, por lo que es atribuible a un cambio en la calidad del cemento, por ejemplo. Este periodo de dosificación límite presenta una duración cercana a un mes, ya que al ser detectado es compensado mediante un ajuste de dosificación. El hormigón HB20 presenta una dosificación ajustada, y no presenta cambios de dosificación evidentes, lo que implicaría que la planta diseña este hormigón con dosis mínimas de cemento, para que sea bombeable.

Por lo tanto, la planta presenta una variabilidad de baja a media asociada su proceso de confección y trabaja principalmente con una dosificación ajustada y holgada. La mayor variabilidad que presenta está asociada a los cambios de dosificación, debido a

variaciones en sus materias primas, lo que se observa especialmente en los hormigones H25 o superiores.

4.1.3 Planta A-RM

4.1.3.1 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta A-RM, Hormigonera A

4.1.3.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

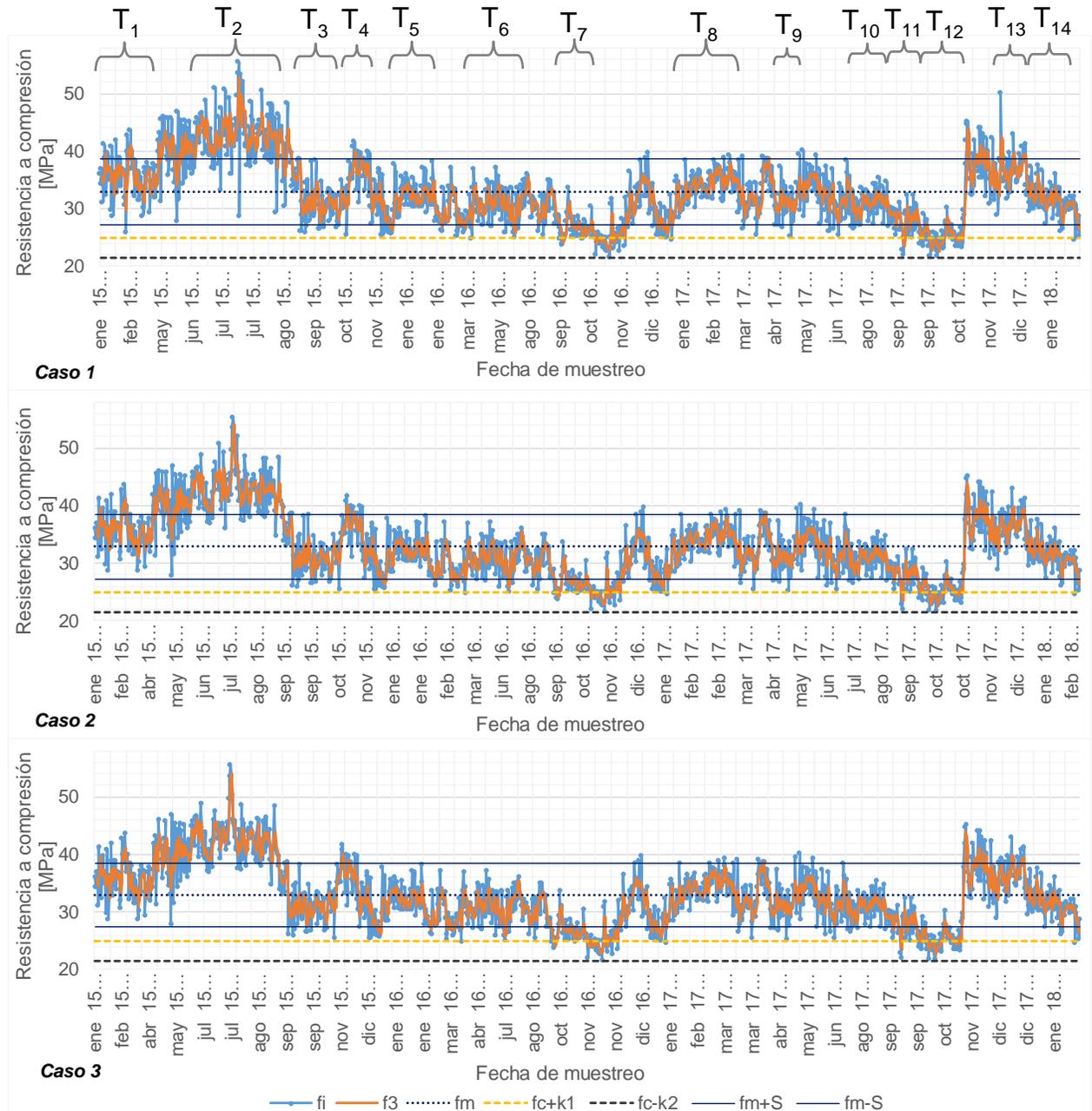


Gráfico 4.7 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-RM.

4.1.3.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 32.1 MPa y una desviación estándar de 5.5 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general muy alta. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad pobre según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida mayor ($f_c + tS = 32.1$ MPa). Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	5.7	1280	33.0	32.3
caso 2	5.6	1272	32.9	32.2
caso 3	5.5	1259	32.8	32.1

Del Gráfico 4.7 se observa que hay una diferencia de aproximadamente 35 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 14 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.8 se presenta los subperiodos con mayor detalle.

4.1.3.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.7 MPa ($f_m = 32.8$ MPa y $f_c + tS = 32.1$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.7 se observa que en los meses de noviembre de 2016 y octubre de 2017 se produce una baja de resistencia, por lo que 58 muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento de un 5% está dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. La condición de resistencia individual se cumple para todas las muestras. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	59	5	0	0
caso 2	59	5	0	0
caso 3	58	5	0	0

4.1.3.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

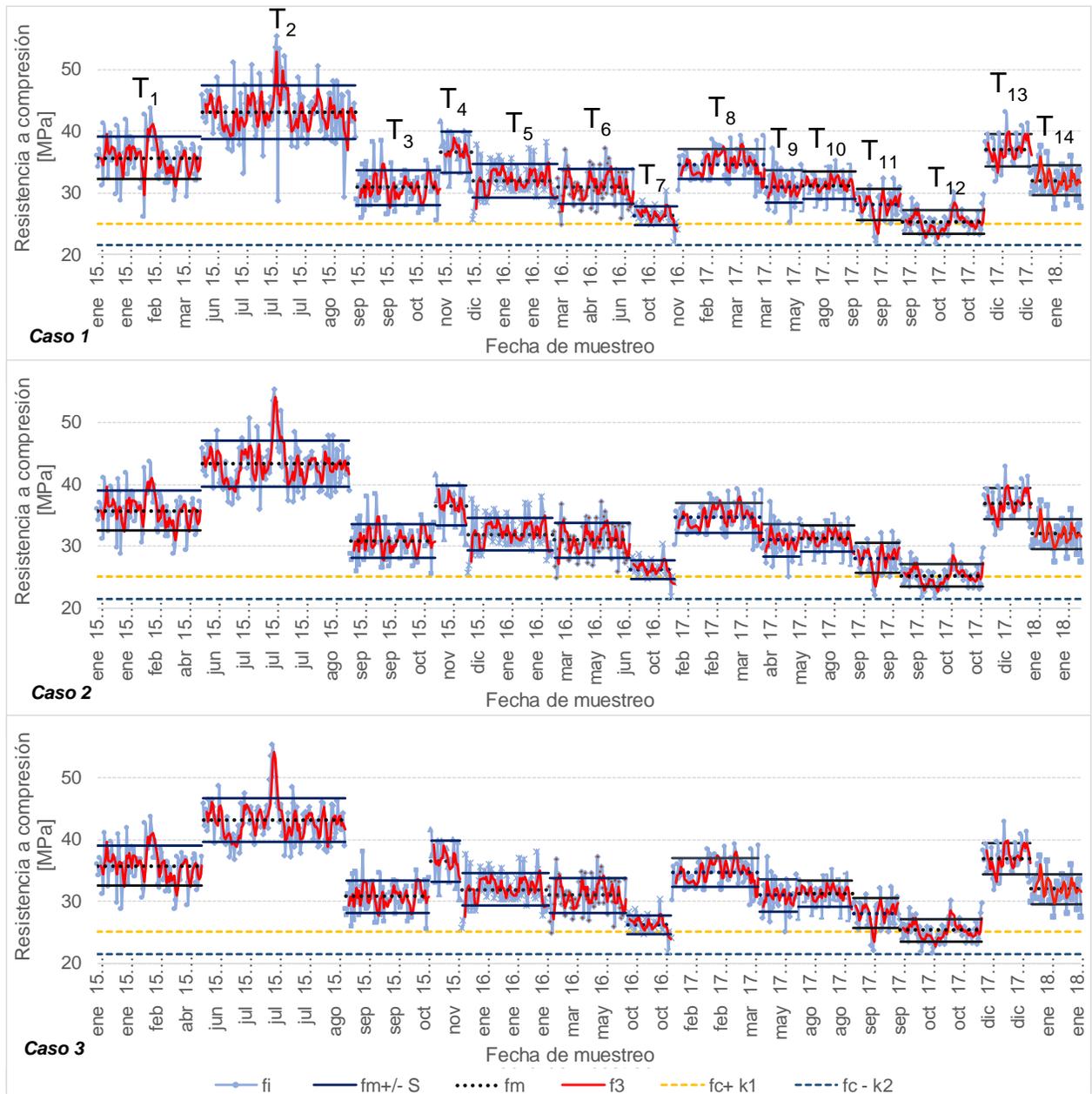


Gráfico 4.8 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-RM.

4.1.3.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.21 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.5 y 3.5 MPa, con un promedio de 2.8 MPa según Tabla 4.22. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.21 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-RM.

N°subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	3.5	76	35.6	29.5
	caso 2	3.3	75	35.8	29.2
	caso 3	3.3	75	35.8	29.2
T ₂	caso 1	4.4	112	43.1	30.6
	caso 2	3.8	107	43.3	29.9
	caso 3	3.5	101	43.1	29.5
T ₃	caso 1	2.8	61	30.9	28.6
	caso 2	2.8	61	30.9	28.6
	caso 3	2.6	60	30.7	28.4
T ₄	caso 1	3.3	23	36.6	29.4
	caso 2	3.3	23	36.6	29.4
	caso 3	3.4	22	36.5	29.4
T ₅	caso 1	2.7	62	31.9	28.5
	caso 2	2.7	62	31.9	28.5
	caso 3	2.7	62	31.9	28.5
T ₆	caso 1	2.8	55	31.0	28.6
	caso 2	2.8	55	31.0	28.6
	caso 3	2.8	55	31.0	28.6
T ₇	caso 1	1.5	32	26.2	26.9
	caso 2	1.5	32	26.2	26.9
	caso 3	1.5	32	26.2	26.9
T ₈	caso 1	2.4	63	34.6	28.1
	caso 2	2.4	63	34.6	28.1
	caso 3	2.4	62	34.7	28.1
T ₉	caso 1	2.7	27	31.0	28.5
	caso 2	2.7	27	31.0	28.5
	caso 3	2.7	27	31.0	28.5
T ₁₀	caso 1	2.2	39	31.2	27.8
	caso 2	2.2	39	31.2	27.8
	caso 3	2.2	39	31.2	27.8
T ₁₁	caso 1	2.5	33	28.1	28.2
	caso 2	2.5	33	28.1	28.2
	caso 3	2.5	33	28.1	28.2
T ₁₂	caso 1	1.8	60	25.3	27.4
	caso 2	1.8	60	25.3	27.4
	caso 3	1.8	59	25.3	27.3
T ₁₃	caso 1	2.6	34	36.9	28.3
	caso 2	2.6	34	36.9	28.3
	caso 3	2.6	34	36.9	28.3
T ₁₄	caso 1	2.4	36	32.0	28.1
	caso 2	2.4	36	32.0	28.1
	caso 3	2.4	36	32.0	28.1

Tabla 4.22 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-RM.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	3.0
caso 2	2.8
caso 3	2.8

En la Tabla 4.23 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 4.7 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 17.8 MPa.

Tabla 4.23 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	32.5	4.7
caso 2	32.5	4.7
caso 3	32.5	4.7

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad alta en cuanto a su dosificación ($S_{f_m} = 4.7$ MPa), y una variabilidad media asociada al proceso mismo de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.8$ MPa). Por lo tanto, la mayor variabilidad de sus resultados de resistencia a compresión está causada principalmente por su dosificación.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras es similar a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 5.5$ MPa y $S_{f_m} = 4.7$ MPa). Así como también la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (32.8 MPa y 32.5 MPa, respectivamente). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad de la dosificación, pasando inadvertida la variabilidad básica del proceso, debido a que esta última es menor ($S_{\text{promedio}} = 2.8$ MPa). Esta pequeña diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos.

4.1.3.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.21 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 , T_2 , T_4 , T_8 y T_{13} presentan resistencias medias por sobre a la resistencia requerida en 6.6 a 13.6 MPa, lo que implica una dosificación holgada. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_3 , T_5 , T_6 , T_9 , T_{10} y T_{14} presentan resistencias medias por sobre a la resistencia requerida en 2.3 a 3.9 MPa, por lo que su dosificación es ajustada. Los subperiodos T_7 y T_{11} , presentan resistencias medias menores a la requerida en 0.1 a 0.7 MPa, por lo que tienen una dosificación límite, que se considera como óptima. Por último,

el subperiodo T_{12} presenta una resistencia media por debajo a la requerida en 2.0 MPa, lo que implica una dosificación límite.

Se concluye que, para este hormigón, la planta funciona principalmente, en base a una dosificación ajustada durante un 22 % del tiempo y con una dosificación holgada durante un 20% del tiempo estudiado de aproximadamente 3 años. El periodo de ajuste representa un 51% del tiempo. Ver Tabla 4.24.

Tabla 4.24 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	20
Ajustada	22
Óptima	4
Límite	3
Periodo de ajuste	51

4.1.3.2 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta A-RM, Hormigonera A

4.1.3.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

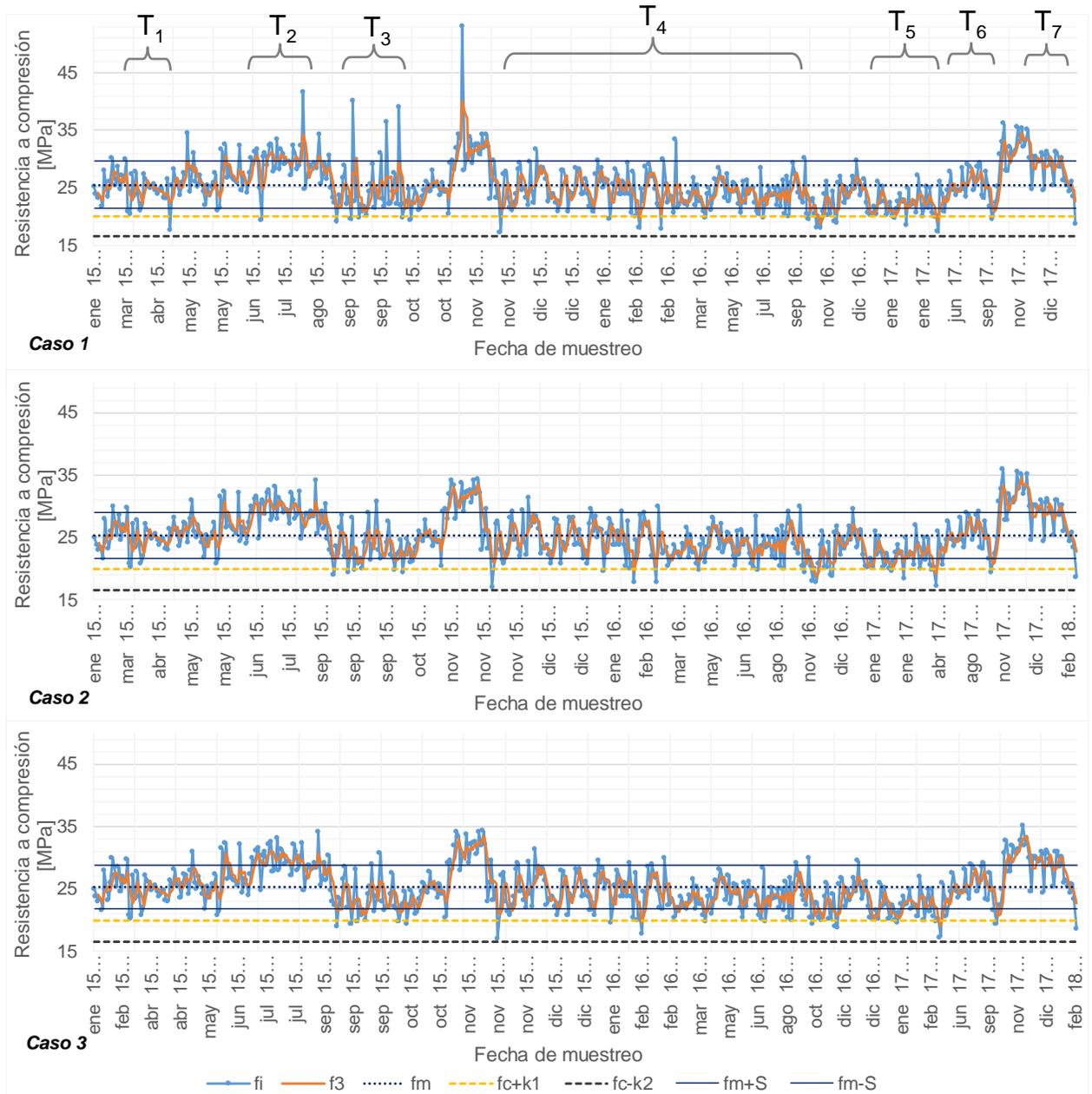


Gráfico 4.9 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-RM.

4.1.3.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 25.3 MPa y una desviación estándar de 3.5 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 24.5$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	4.1	494	25.5	25.3
caso 2	3.7	485	25.3	24.7
caso 3	3.5	478	25.3	24.5

Del Gráfico 4.9 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 18 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 7 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 8 puntos de cambio durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.10 se presenta los 7 subperiodos con mayor detalle.

4.1.3.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.8 MPa ($f_m = 25.3$ MPa y $f_c + tS = 24.5$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.9 se observa que, para el caso 3, dos muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento (cercano a 0) está dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. La condición de resistencia individual se cumple para todas las muestras. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	5	1	0	0
caso 2	5	1	0	0
caso 3	2	0	0	0

4.1.3.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

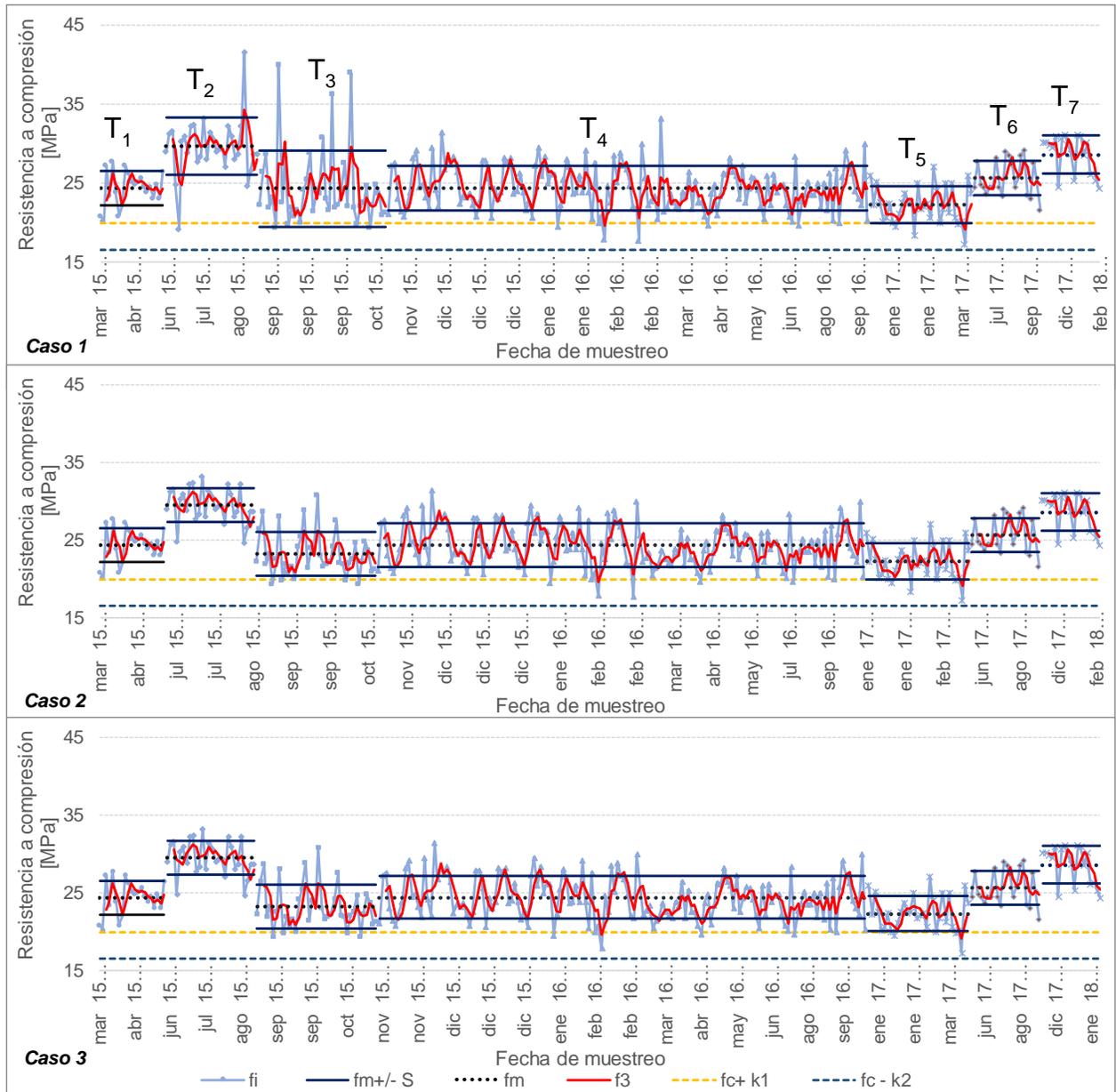


Gráfico 4.10 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-RM.

4.1.3.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.27 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 2.1 a 2.8 MPa, con un promedio de 2.6 MPa según Tabla 4.28. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.27 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.1	21	24.3	22.8
	caso 2	2.1	21	24.3	22.8
	caso 3	2.1	21	24.3	22.8
T ₂	caso 1	3.6	30	29.6	24.7
	caso 2	2.2	28	29.6	22.9
	caso 3	2.2	28	29.6	22.9
T ₃	caso 1	4.8	41	24.3	26.2
	caso 2	2.8	38	23.2	23.6
	caso 3	2.8	38	23.2	23.6
T ₄	caso 1	2.9	154	24.4	23.7
	caso 2	2.8	153	24.3	23.6
	caso 3	2.7	152	24.4	23.5
T ₅	caso 1	2.3	33	22.2	23.0
	caso 2	2.3	33	22.2	23.0
	caso 3	2.2	32	22.4	22.9
T ₆	caso 1	2.2	22	25.7	22.9
	caso 2	2.2	22	25.7	22.9
	caso 3	2.2	22	25.7	23.2
T ₇	caso 1	2.4	19	28.6	23.2
	caso 2	2.4	19	28.6	23.2
	caso 3	2.4	19	28.6	23.2

Tabla 4.28 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-RM.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	3.1
caso 2	2.6
caso 3	2.6

En la Tabla 4.29 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 2.7 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 7.2 MPa.

Tabla 4.29 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{fm} [MPa]
caso 1	25.6	2.6
caso 2	25.4	2.7
caso 3	25.5	2.7

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso mismo de confección ($S_{promedio} = 2.6$ MPa), así como también una baja variabilidad en cuanto a su dosificación ($S_{fm} = 2.7$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual y a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 3.5$ MPa, $S_{promedio} = 2.6$ MPa y $S_{fm} = 2.7$ MPa), aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (25.3 MPa y 25.5 MPa, respectivamente). La desviación estándar mayor se explica por qué al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajustes que no se consideran en el análisis de los subperiodos, como, por ejemplo, el periodo de noviembre de 2015 y noviembre de 2017 (ver Gráfico 4.9).

4.1.3.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.27 se observa que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_2 y T_7 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 6.7 y 5.4 MPa, respectivamente, lo que implica que se tiene una dosificación holgada. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 , T_4 y T_6 presentan resistencias medias entre 0.9 a 2.5 MPa por sobre a la requerida, lo que representa una dosificación ajustada. Por último, las muestras pertenecientes a los subperiodos T_3 y T_5 , presentan resistencias medias por debajo a la requerida en 0.4 y 0.5 MPa, respectivamente, por lo tanto, tienen una dosificación límite, que se considera como óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada que representa el 41% del tiempo, una dosificación óptima durante un 13% y una dosificación holgada durante un 11 % del tiempo estudiado de aproximadamente 3 años. El periodo de ajuste representa un 35%. Ver Tabla 4.30.

Tabla 4.30 Porcentajes de tiempo que presentan las distintas dosificaciones de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	11
Ajustada	41
Óptima	13
Límite	-
Periodo de ajuste	35

4.1.3.3 Hormigón HN30 (10) 20/10 de Planta A-RM, Hormigonera A

4.1.3.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

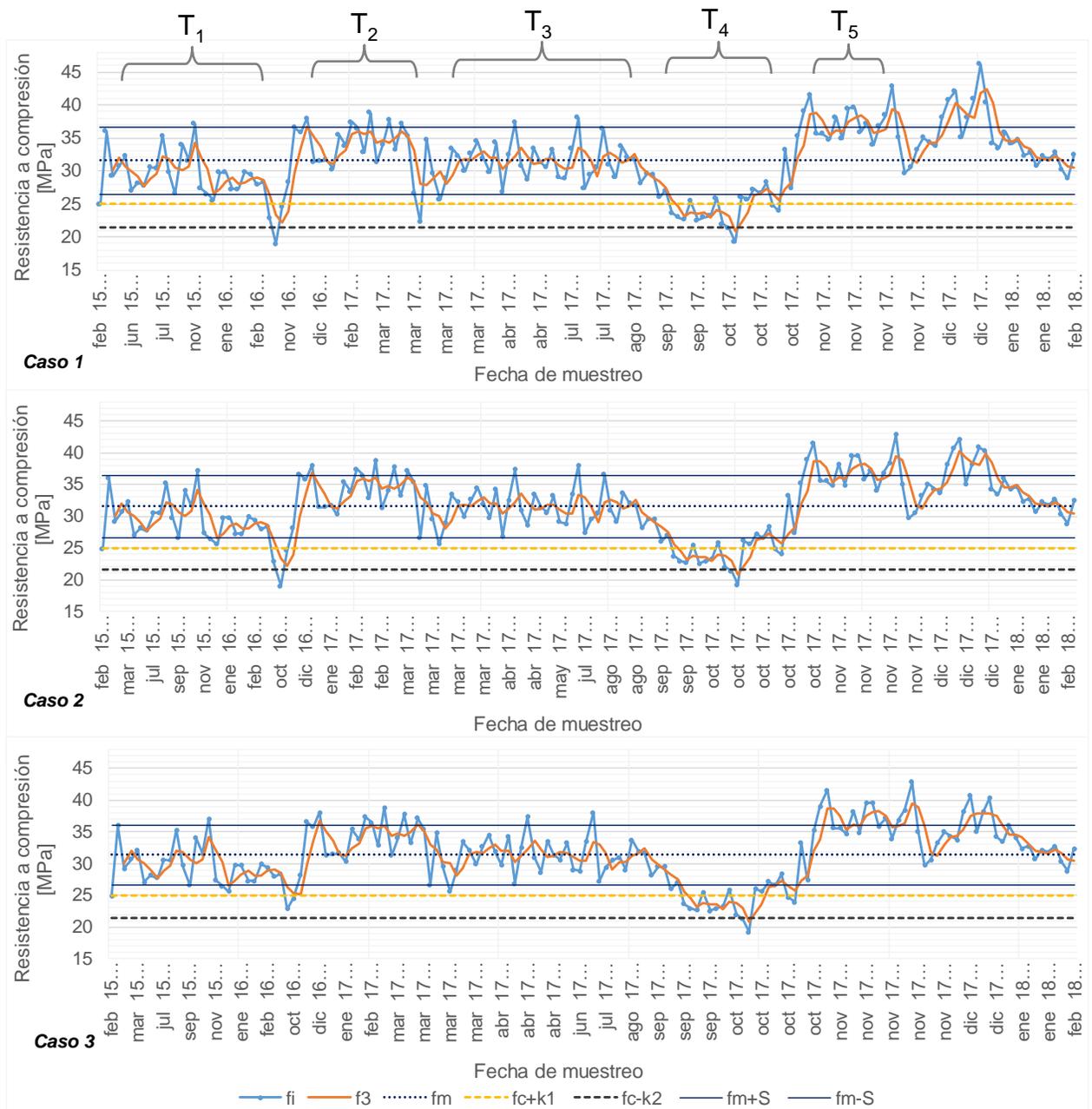


Gráfico 4.11 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-RM.

4.1.3.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 31.4 MPa y una desviación estándar de 4.7 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general alta. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad justo según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida de $f_c + tS = 31$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en Tabla 4.31.

Tabla 4.31 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	5.1	156	31.5	31.5
caso 2	4.9	154	31.5	31.3
caso 3	4.7	149	31.4	31.0

Del Gráfico 4.11 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 25 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 5 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 6 puntos de cambio en el periodo analizado de tres años. En el Gráfico 4.12 se presenta los 5 subperiodos con mayor detalle.

4.1.3.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.4 MPa ($f_m = 31.4$ MPa y $f_c + tS = 31.0$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.11 se observa que, para el caso 3, 12 muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento de un 8% está dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición de resistencia individual, se tiene que, para el caso 3, dos muestras no la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.32.

Tabla 4.32 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	15	10	3	2
caso 2	15	10	3	2
caso 3	12	8	2	1

4.1.3.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

Se presenta solo los resultados de los casos 1 y 3, debido a que el caso 2 no considera muestras a descartar en los subperiodos.

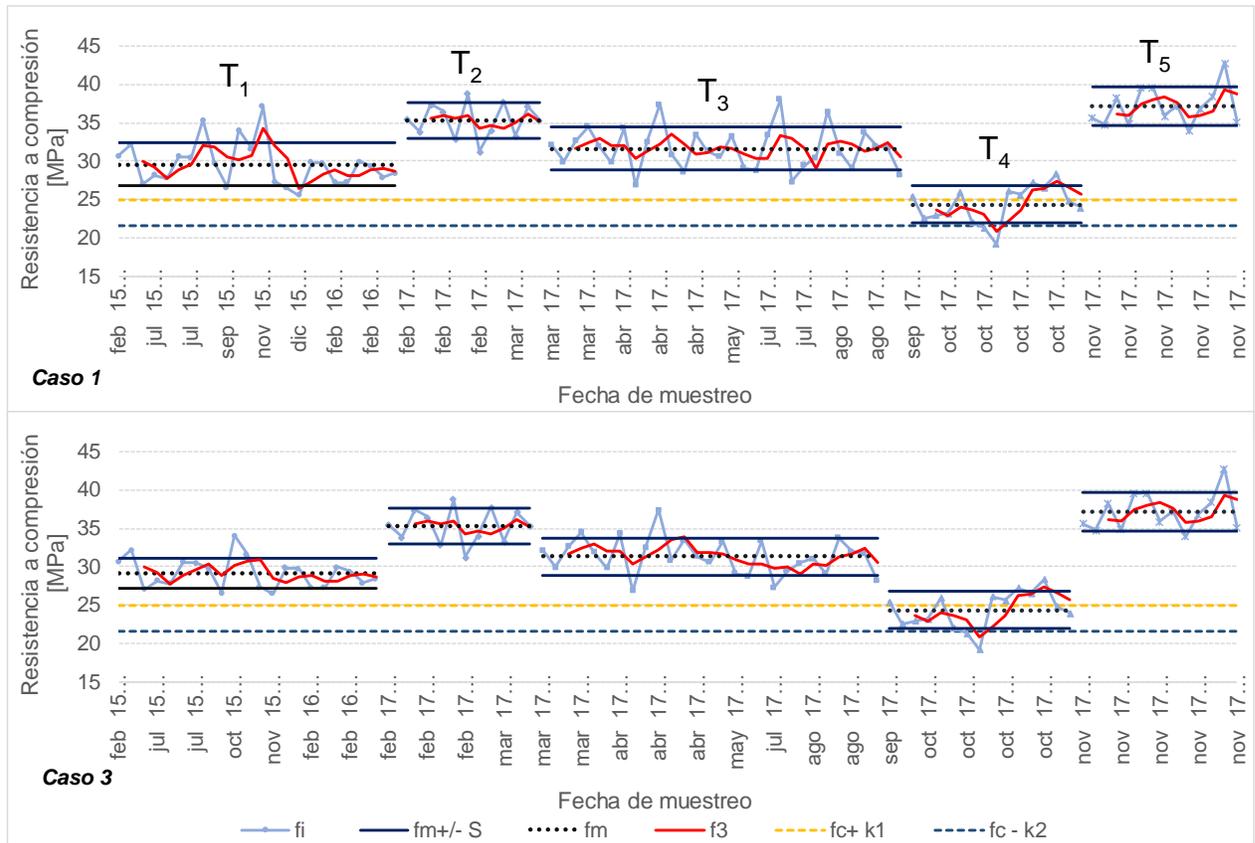


Gráfico 4.12 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-RM.

4.1.3.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.33 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 2.0 a 2.5 MPa, con un promedio de 2.3 MPa según Tabla 4.34. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.33 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T_1	caso 1	2.9	24	29.6	28.8
	caso 3	2.0	21	29.2	27.7
T_2	caso 1	2.3	12	35.3	28.1
	caso 3	2.3	12	35.3	28.1
T_3	caso 1	2.8	30	31.6	28.6
	caso 3	2.4	27	31.3	28.2
T_4	caso 1	2.5	15	24.3	28.3
	caso 3	2.5	15	24.3	28.3
T_5	caso 1	2.5	13	37.1	28.4
	caso 3	2.5	13	37.1	28.4

Tabla 4.34 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-RM.

Caso	S_{promedio}
caso 1	2.7
caso 3	2.3

En la Tabla 4.35 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 5.1 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 12.8 MPa.

Tabla 4.35 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	31.6	5.0
caso 3	31.4	5.1

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad muy alta en cuanto a su dosificación ($S_{f_m} = 5.1$ MPa), y una variabilidad baja asociada al proceso mismo de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.3$ MPa). Por lo tanto, la mayor variabilidad de sus resultados de resistencia a compresión está causada principalmente por su dosificación.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor similar a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 4.7$ MPa y $S_{f_m} = 5.1$ MPa), asimismo, la resistencia media del total de muestras es igual al promedio de la resistencia media de los subperiodos (31.4 MPa). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad de la dosificación,

pasando inadvertida la variabilidad básica del proceso de confección, debido a que esta última es menor ($S_{\text{promedio}} = 2.3 \text{ MPa}$).

4.1.3.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.33 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 y T_3 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 1.5 y 3.1 MPa, respectivamente, lo que representa una dosificación ajustada. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_2 y T_5 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 7.2 y 8.7 MPa, respectivamente, lo que representa una dosificación holgada. Por último, las muestras pertenecientes al subperiodo T_4 , presentan una resistencia media por debajo a la requerida en 4.0 MPa, lo que representa una dosificación límite.

Por lo tanto, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada que representa el 53% del tiempo, y una dosificación holgada durante el 6% del tiempo estudiado de aproximadamente dos años. El periodo de ajuste representa un 39% del tiempo. Ver Tabla 4.36.

Tabla 4.36 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta A-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	6
Ajustada	53
Óptima	-
Límite	2
Periodo de ajuste	39

4.1.4 Comentarios Planta A-RM

El hormigón HB25 presenta una variabilidad general media que está asociada tanto a su proceso de confección, como a su dosificación. Los hormigones HB30 y HN30, presentan una variabilidad general alta a muy alta que está asociada a su dosificación. Además, estos hormigones presentan periodos de ajuste que contribuyen a aumentar la variabilidad. El hormigón HB25 presenta distinto comportamiento a los otros dos. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias entre 18 a 35 MPa aproximadamente, lo que se relaciona con la variabilidad que presentan.

Se observa que las fechas en que se presenta cambios en la resistencia media coinciden en los 3 hormigones, por lo tanto, podría atribuirse, por ejemplo, a una variación del cemento que utiliza la planta para confeccionar sus hormigones. En el periodo de junio a julio de 2015, se observa una resistencia media alta en los hormigones HB30 y HB25, y en el periodo octubre a noviembre de 2016 se observa una baja de resistencia en ambos hormigones. Cabe mencionar, que las resistencias altas mencionadas coinciden con la temporada en que las temperaturas son más bajas, y las resistencias bajas coinciden con la temporada en que las temperaturas son más altas, por lo que estas variaciones podrían

también estar influenciadas por las condiciones climáticas. Además, en el periodo de octubre a noviembre de 2017, se observa resistencias medias altas en los 3 hormigones. En general, estas variaciones son más notorias en los hormigones HB30 y HN30. Se observa que, los periodos con resistencias muy altas o muy bajas tienden a durar cerca de un mes, por lo que la planta ajusta sus dosificaciones para compensar estas variaciones, ya sea originadas por las variaciones de alguna materia prima, como el cemento, o por las condiciones climáticas, o algún otro factor.

La planta trabaja principalmente con una dosificación ajustada, presentando periodos de dosificación holgada atribuidos a variaciones en la calidad del cemento o a las condiciones climáticas. Asimismo, los periodos de dosificación límite y óptima, presentan una duración menor a un mes, los que, al ser detectados, a partir de los resultados de resistencia a 28 días, son compensadas mediante ajustes de dosificación.

Por lo tanto, la planta presenta una variabilidad baja asociada su proceso de confección y trabaja principalmente con una dosificación ajustada. La mayor variabilidad que presenta está asociada a los cambios de dosificación, debido a variaciones en sus materias primas, cambios en las condiciones climáticas o a una combinación de éstos.

4.1.5 Planta A-Sur

4.1.5.1 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta A-Sur, Hormigonera A

4.1.5.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

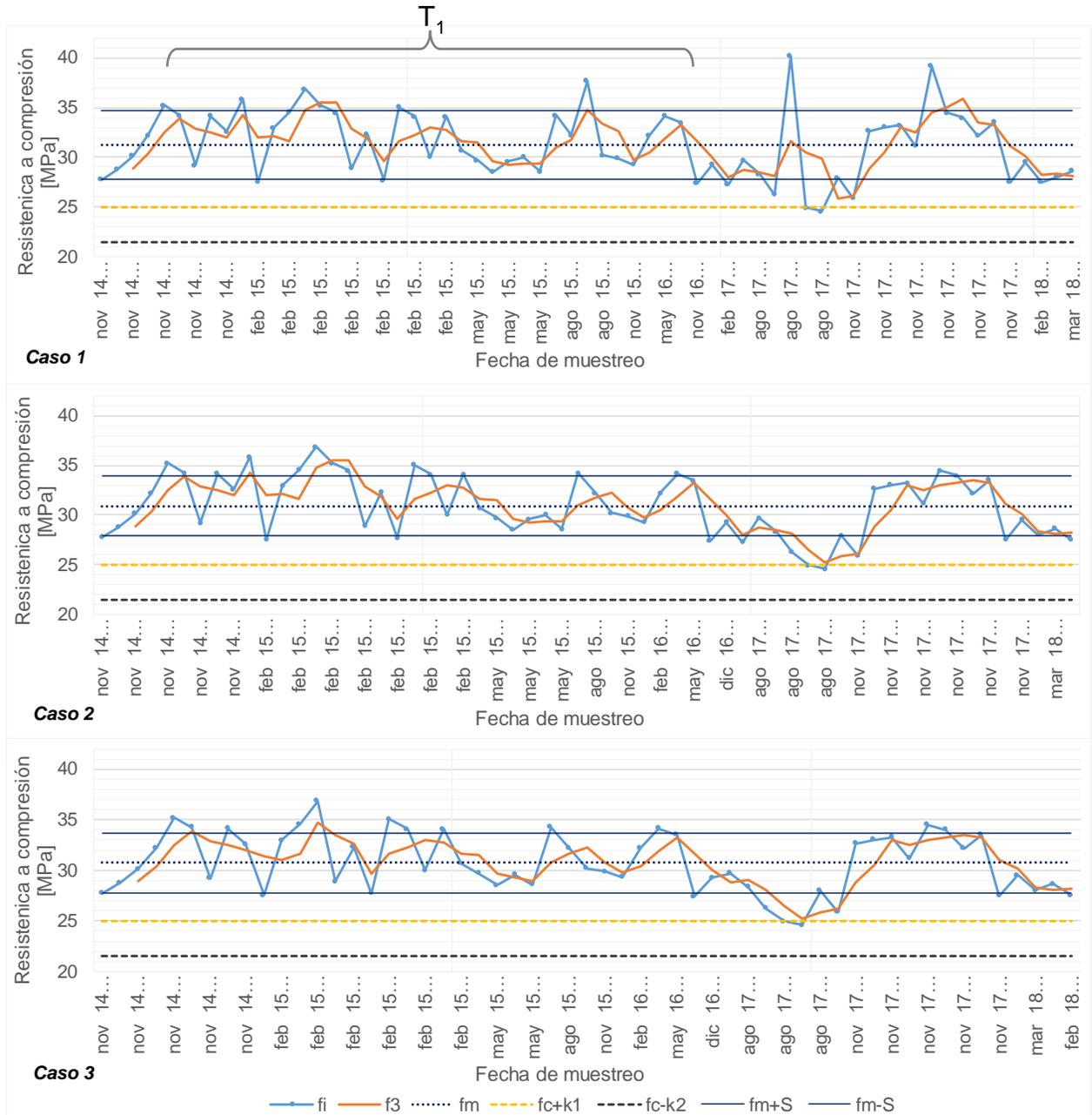


Gráfico 4.13 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-Sur.

4.1.5.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 30.7 MPa y una desviación estándar de 2.9 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 28.8$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.37.

Tabla 4.37 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.4	63	31.3	29.4
caso 2	3.0	60	30.9	28.9
caso 3	2.9	55	30.7	28.8

Del Gráfico 4.13 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 12 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene un subperíodo en el que la resistencia media se mantiene constante. Este subperíodo se ubica entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta y luego disminuye. En el Gráfico 4.14 se presenta el subperíodo con mayor detalle.

4.1.5.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 1.9 MPa ($f_m = 30.7$ MPa y $f_c + tS = 28.8$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.13 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.38.

Tabla 4.38 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.1.5.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

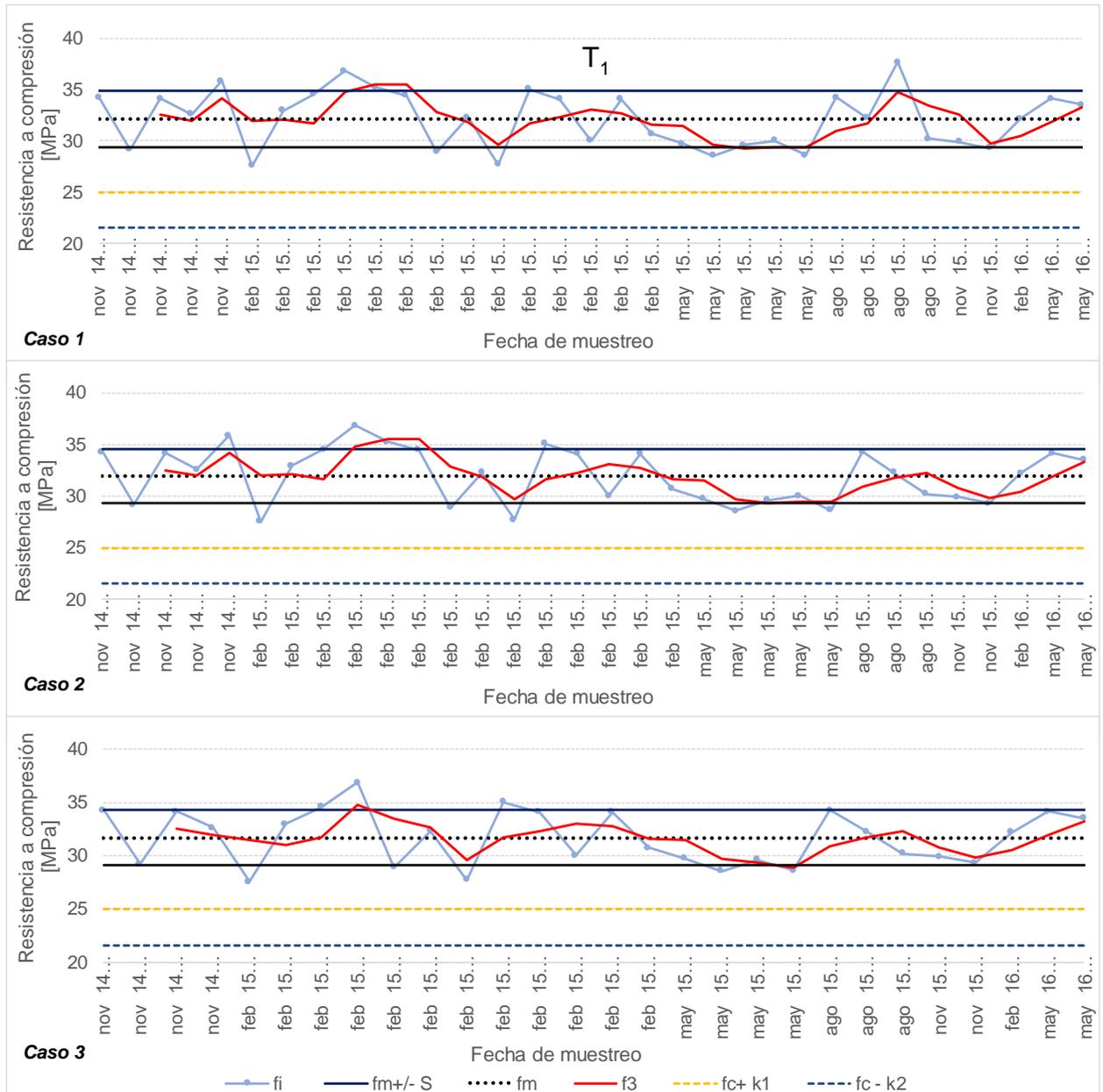


Gráfico 4.14 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-Sur.

4.1.5.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.39 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar del subperiodo T_1 es 2.6 MPa. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.39 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-Sur.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.8	33	32.1	28.6
	caso 2	2.7	32	32.0	28.4
	caso 3	2.6	28	31.7	28.4

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso mismo de confección ($S_{T_1} = 2.6$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor similar a la desviación del subperiodo T₁ ($S = 2.9$ MPa y $S_{T_1} = 2.6$ MPa). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad básica del subperiodo T₁. Sin embargo, se tienen periodos de ajuste posteriores a T₁ que contribuyen a que la desviación estándar de la totalidad de muestras sea mayor a la del subperiodo.

4.1.5.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.39 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T₁ presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 3.3 MPa, lo que representa una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada durante un 57% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 43% del tiempo. Ver Tabla 4.40.

Tabla 4.40 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta A-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	57
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	43

4.1.5.2 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta A-Sur, Hormigonera A

4.1.5.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

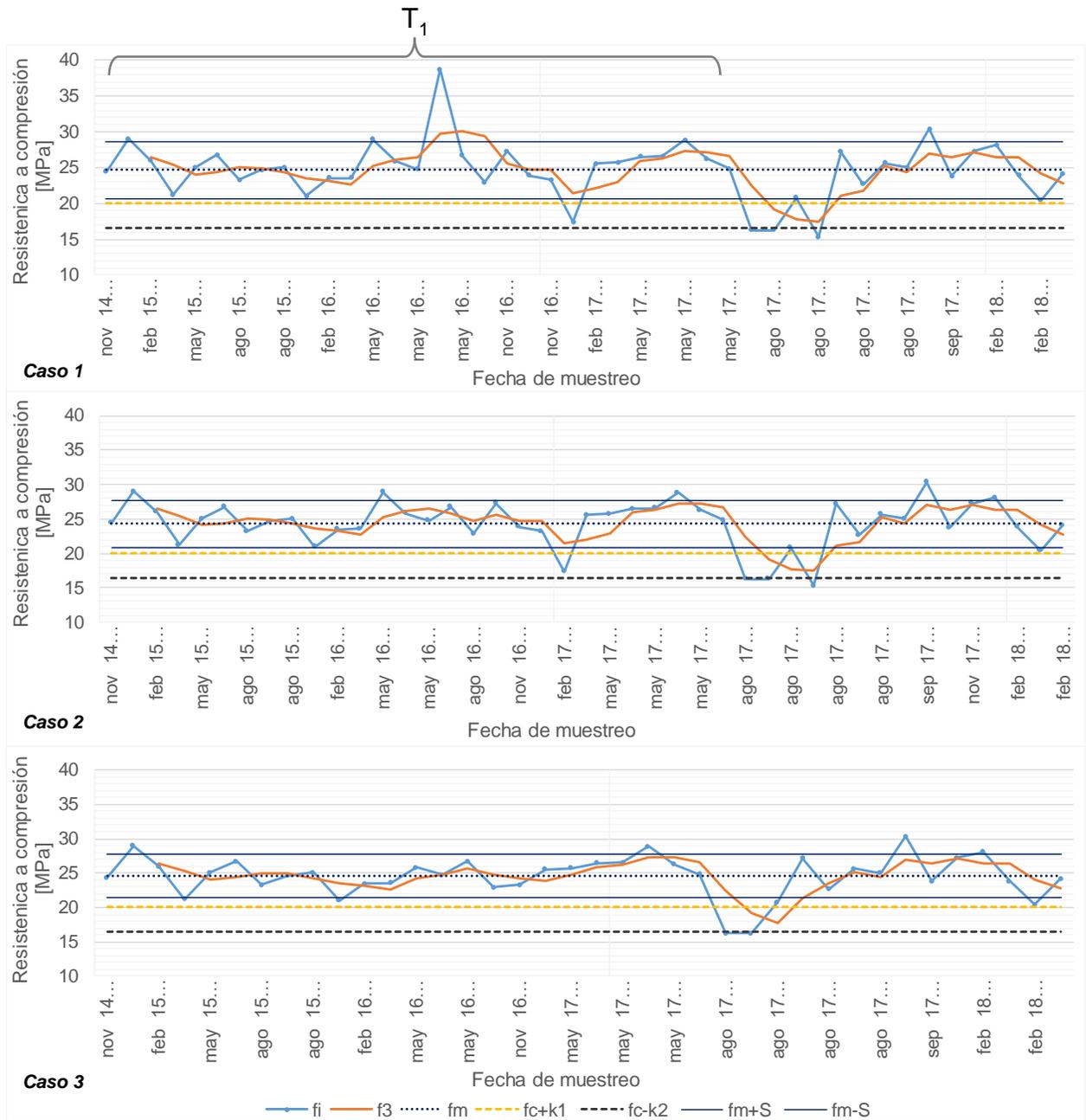


Gráfico 4.15 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Sur.

4.1.5.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 24.5 MPa y una desviación estándar de 3.1 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una

variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 24$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.41.

Tabla 4.41 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	4.0	44	24.6	25.2
caso 2	3.4	43	24.3	24.4
caso 3	3.1	38	24.5	24.0

Del Gráfico 4.15 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 14 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene un subperiodo en el que la resistencia media se mantiene constante. Este subperíodo se ubica previo a un punto de cambio, donde la resistencia media disminuye hasta llegar al límite normativo, y luego aumenta. En el Gráfico 4.16 se presenta el subperiodo con mayor detalle.

4.1.5.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.5 MPa ($f_m = 24.5$ MPa y $f_c + tS = 24.0$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.15 se observa que, para el caso 3, dos muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento de un 5% están dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición de resistencia individual, se tiene que, para el caso 3, dos muestras no la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.42.

Tabla 4.42 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	3	7	3	7
caso 2	3	7	3	7
caso 3	2	5	2	5

4.1.5.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

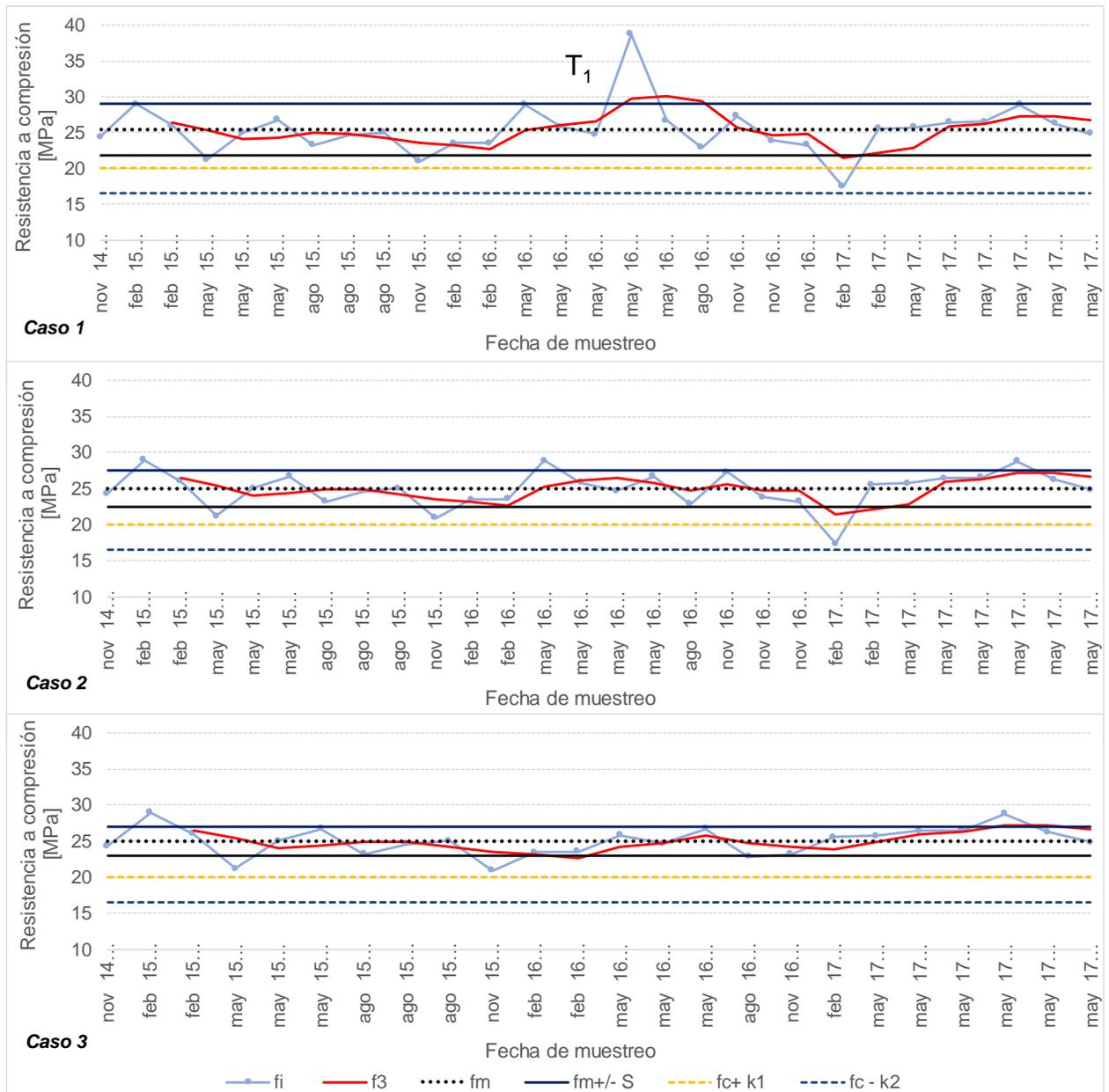


Gráfico 4.16 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Sur.

4.1.5.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.43, se presentan los resultados de análisis del subperiodo, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar del subperiodo T_1 es 2.0 MPa. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.43 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Sur.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	3.6	29	25.4	24.7
	caso 2	2.5	28	24.9	23.3
	caso 3	2.0	24	25.0	22.6

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso mismo de confección ($S_{T_1} = 2.0$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación del subperiodo T₁ ($S = 3.1$ MPa y $S_{T_1} = 2.0$ MPa), aun así, la resistencia media del total de muestras es similar a la resistencia media del subperiodo (24.5 MPa y 25.0 MPa, respectivamente). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados los efectos de la variabilidad básica y además la variabilidad del periodo de ajuste, posterior a T₁, que contribuye a que la desviación estándar de la totalidad de muestras sea mayor.

4.1.5.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.43 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T₁ presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 2.4 MPa, lo que representa una dosificación ajustada el 73% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 27% del tiempo. Ver Tabla 4.44.

Tabla 4.44 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta A-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	73
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	27

4.1.5.3 Hormigón HN25 (10) 20/06 de Planta A-Sur, Hormigonera A

4.1.5.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

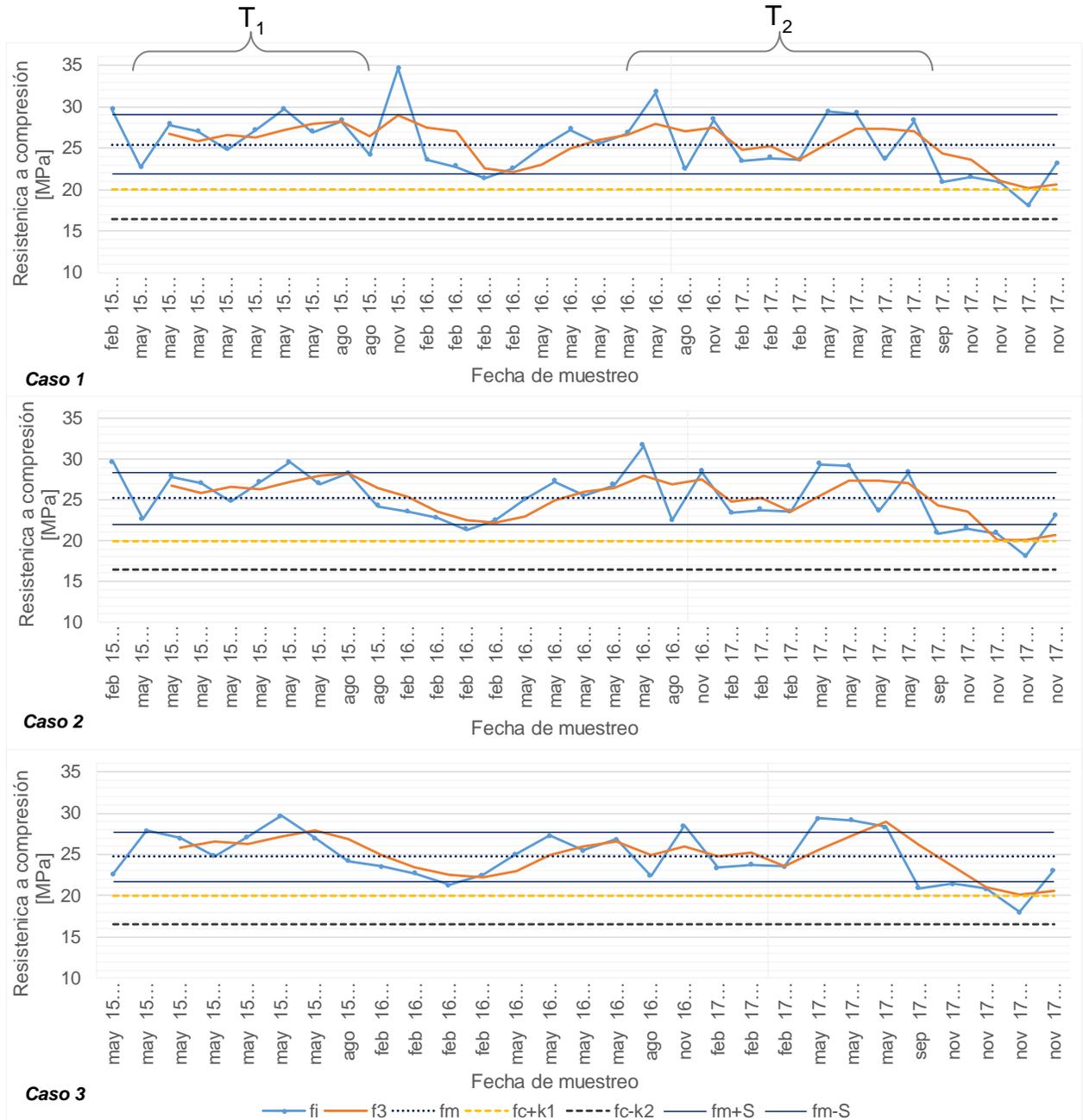


Gráfico 4.17 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta A-Sur.

4.1.5.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 24.8 MPa y una desviación estándar de 3.0 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 23.9$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.45.

Tabla 4.45 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta A-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.6	34	25.5	24.6
caso 2	3.2	33	25.2	24.1
caso 3	3.0	29	24.8	23.9

Del Gráfico 4.17 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 12 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre un punto de cambio, donde la resistencia media disminuye. En el Gráfico 4.18 se presenta los 2 subperiodos con mayor detalle.

4.1.5.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.9 MPa ($f_m = 24.8$ MPa y $f_c + tS = 23.9$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.17 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.46.

Tabla 4.46 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta A-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.1.5.3.4 Resultados de resistencia a compresión subperíodo

Se presenta solo los casos 1 y 3, dado que el caso 2 no considera muestras que requieran ser descartadas en los subperiodos.

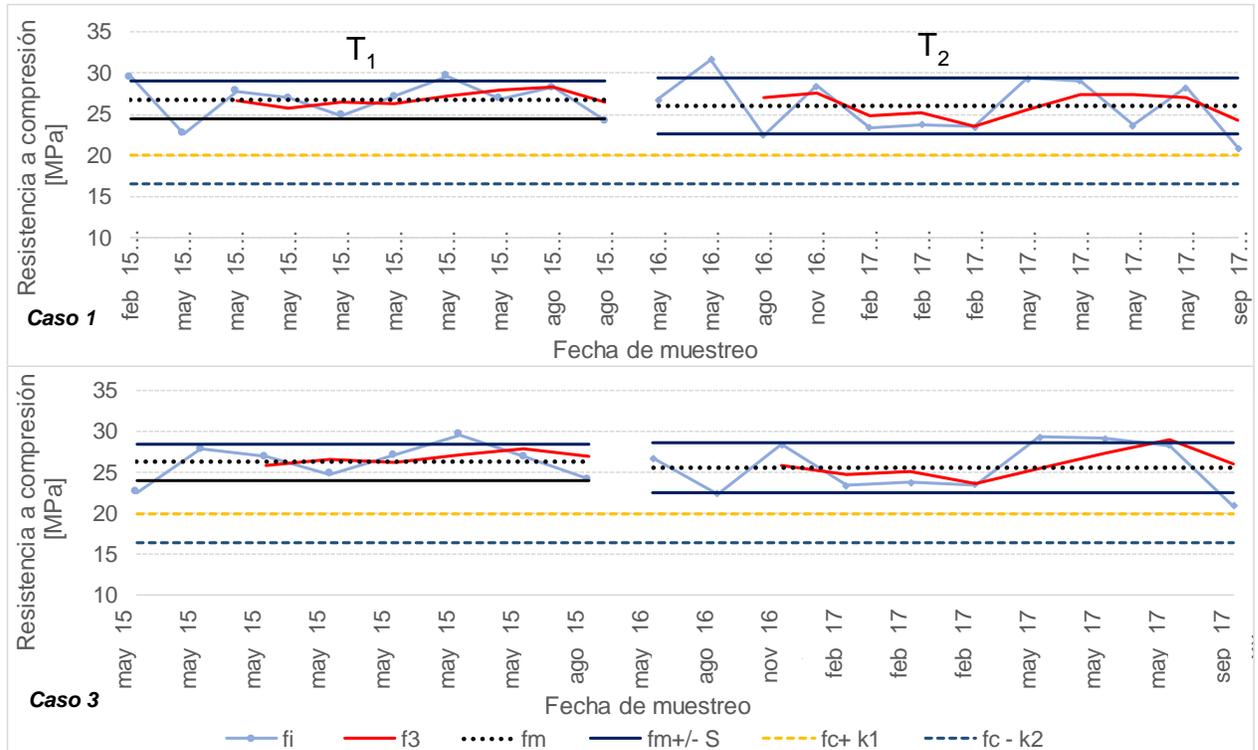


Gráfico 4.18 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta A-Sur.

4.1.5.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.47 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos T₁ y T₂ es 2.2 y 3.1 MPa, respectivamente, con un promedio de 2.8 MPa según Tabla 4.48. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.47 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta A-Sur.

Nº subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.3	10	26.8	23.2
	caso 3	2.2	8	26.3	23.2
T ₂	caso 1	3.4	12	26.0	24.6
	caso 3	3.1	10	25.6	24.3

Tabla 4.48 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta A-Sur.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	3.0
caso 3	2.8

En la Tabla 4.49 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 0.5 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T_1 y T_2 , las muestras difieren en sus resistencias medias en 0.7 MPa.

Tabla 4.49 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta A-Sur.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	26.4	0.6
caso 3	26.0	0.5

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad media asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.8$ MPa) y que su dosificación es constante ($S_{f_m} = 0.5$ MPa).

Además, se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor similar a la desviación estándar de los subperiodos ($S = 3.0$ MPa y $S_{\text{promedio}} = 2.8$ MPa), así como también, la resistencia media del total de muestras es similar a la resistencia media de los subperiodos (según caso 3, 24.8 MPa y 26.0 MPa, respectivamente). Debido a que en este hormigón la dosificación es prácticamente constante, cuando se analiza el total de las muestras se refleja la variabilidad básica del proceso de confección. Esta pequeña diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos.

4.1.5.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.47 se observa que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 y T_2 , presentan una resistencia media por sobre la resistencia requerida en 3.1 y 1.3 MPa, respectivamente, lo que representa una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada durante un 53% del tiempo. El periodo de ajuste representa un 47% del periodo analizado. Ver Tabla 4.50.

Tabla 4.50 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta A-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	53
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	47

4.1.6 Comentarios Planta A-Sur

Los hormigones de esta planta presentan una variabilidad general media asociada a su proceso de confección y su dosificación es prácticamente constante, además presentan periodos de ajuste que contribuyen en aumentar la variabilidad. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 14 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad media que presentan.

Estos hormigones no presentan periodos continuos de muestreo y además cuentan con un número reducido de resultados de ensayos, por lo que no es posible identificar coincidencia entre periodos con resistencias bajas o altas. Sin embargo, se observa que en agosto de 2017 se presenta una baja en la resistencia media en los hormigones HB30 y HB25, por lo tanto, podría atribuirse a una variación del cemento que utiliza la planta como materia prima. Posterior a esta baja de resistencia, cuya duración es cercana a un mes, se alcanzan resistencias medias similares, por lo tanto, la planta ajustó su dosificación para compensar esta variación. Esto no se observa en el hormigón HN30, debido a que no presenta resultados de ensayos durante ese periodo.

Además, la planta funciona en base a una dosificación ajustada, presentando además periodos de ajuste, con resistencias altas o bajas por periodos menores a un mes, que podrían estar asociados a una variación de alguna materia prima, o a variaciones de tipo aleatorias, como, por ejemplo, el tiempo de traslado de sus hormigones a obra. Esto es acorde a la variabilidad general media que presenta, y a una dosificación prácticamente constante.

4.2 Hormigonera B

4.2.1 Planta B-Norte

4.2.1.1 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta B-Norte, Hormigonera B

4.2.1.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

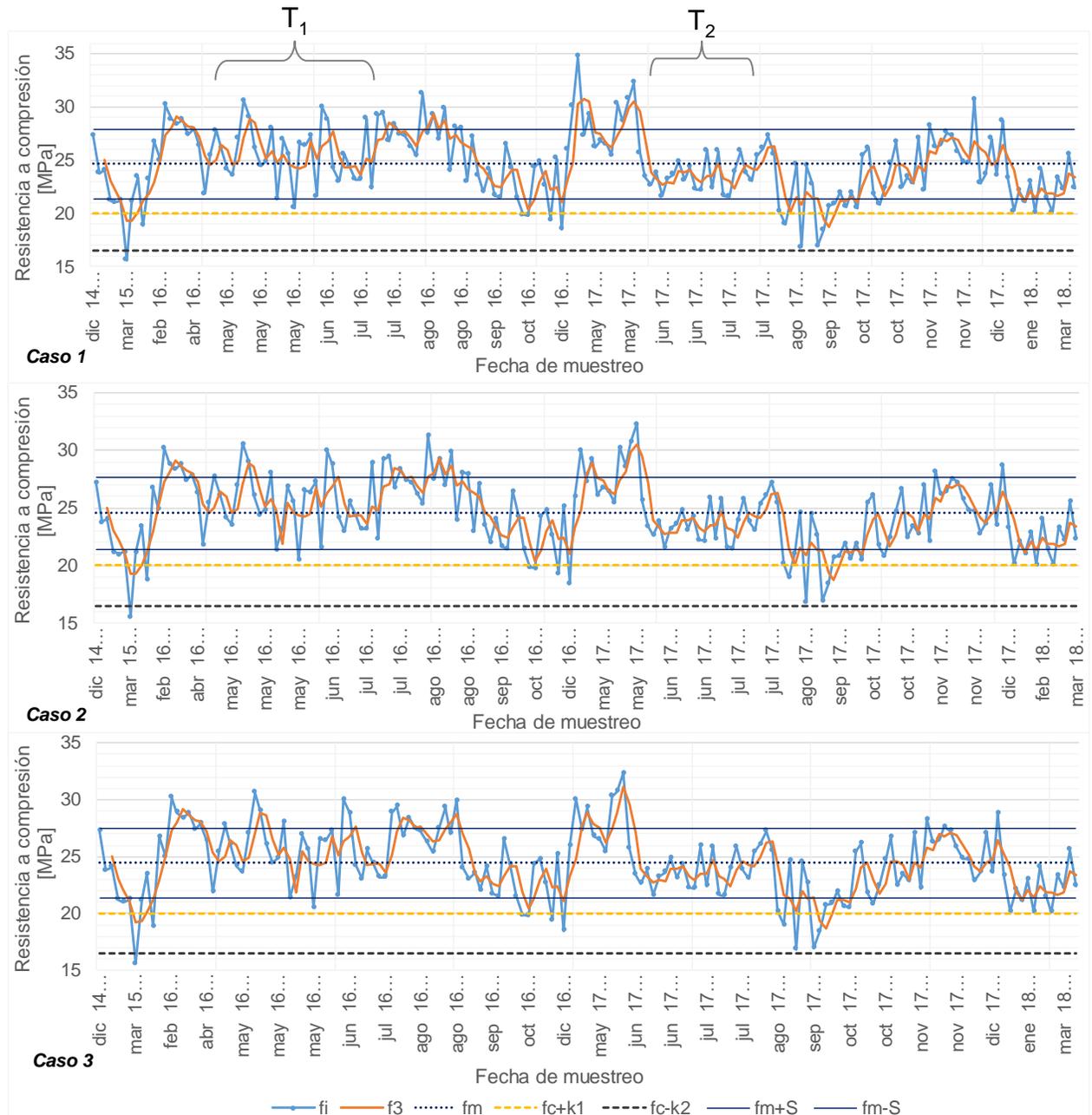


Gráfico 4.19 Resistencia a compresión del total de muestras para Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-Norte.

4.2.1.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 24.4 MPa y una desviación estándar de 3.1 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 24.0$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.51.

Tabla 4.51 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.2	177	24.6	24.2
caso 2	3.1	175	24.6	24.0
caso 3	3.1	165	24.4	24.0

Del Gráfico 4.19 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 16 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre al menos 6 puntos de cambio, donde la resistencia media disminuye o aumenta. En el Gráfico 4.20 se presenta los subperiodos con mayor detalle.

4.2.1.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.4 MPa ($f_m = 24.4$ MPa y $f_c + tS = 24.0$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.19 se observa que, para el caso 3, cuatro muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento del 2% se considera dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición de resistencia individual, se tiene que una muestra no la cumple. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.52.

Tabla 4.52 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° muestras	Muestras [%]	N° muestras	Muestras [%]
caso 1	4	2	1	1
caso 2	4	2	1	1
caso 3	4	2	1	1

4.2.1.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

Se presenta solo el caso 1, ya que los casos 2 y 3 no aplican en estos subperiodos.

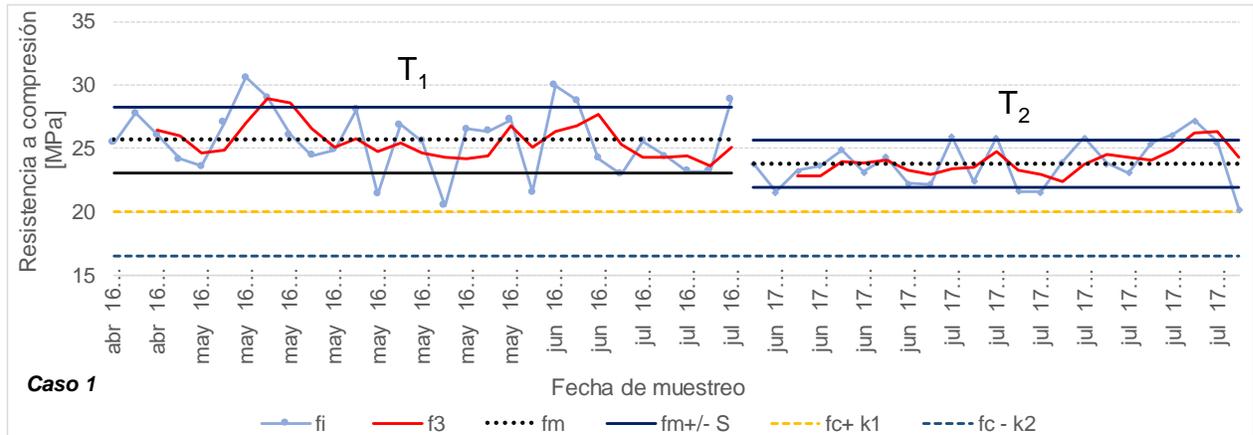


Gráfico 4.20 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-Norte.

4.2.1.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.53 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 1, la desviación estándar de los subperiodos T_1 y T_2 es de 2.6 y 1.8 MPa, respectivamente, con un promedio de 2.3 MPa según Tabla 4.54. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.53 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Nº subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T_1	caso 1	2.6	29	25.7	23.4
T_2	caso 1	1.8	23	23.8	22.4

Tabla 4.54 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	2.3

En la Tabla 4.55 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 1.3 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T_1 y T_2 las muestras difieren en sus resistencias medias en 1.9 MPa.

Tabla 4.55 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	Sf_m [MPa]
caso 1	24.8	1.3

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.3$ MPa) y que su dosificación es prácticamente constante ($S_{f_m} = 1.3$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 3.1$ MPa y $S_{\text{promedio}} = 2.3$ MPa), aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (24.4 MPa y 24.8 MPa, respectivamente). La desviación estándar mayor se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen al menos 6 puntos de cambio o periodos de ajuste, llegando incluso a variaciones en la resistencia de más de 10 MPa, esto se observa en el Gráfico 4.19, durante febrero de 2016, mayo de 2017, y septiembre a diciembre de 2017. Estas variaciones tan altas de la resistencia no se consideran al analizar los subperiodos, y contribuyen a aumentar la desviación estándar de la totalidad de las muestras.

4.2.1.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.53 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 y T_2 , presentan una resistencia media por sobre la resistencia requerida en 2.3 y 1.4 MPa, respectivamente, lo que representa una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada durante un 15% del tiempo. El periodo de ajuste representa un 85% del tiempo analizado. Ver Tabla 4.56.

Tabla 4.56 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	15
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	85

4.2.1.2 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta B-Norte, Hormigonera B

4.2.1.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

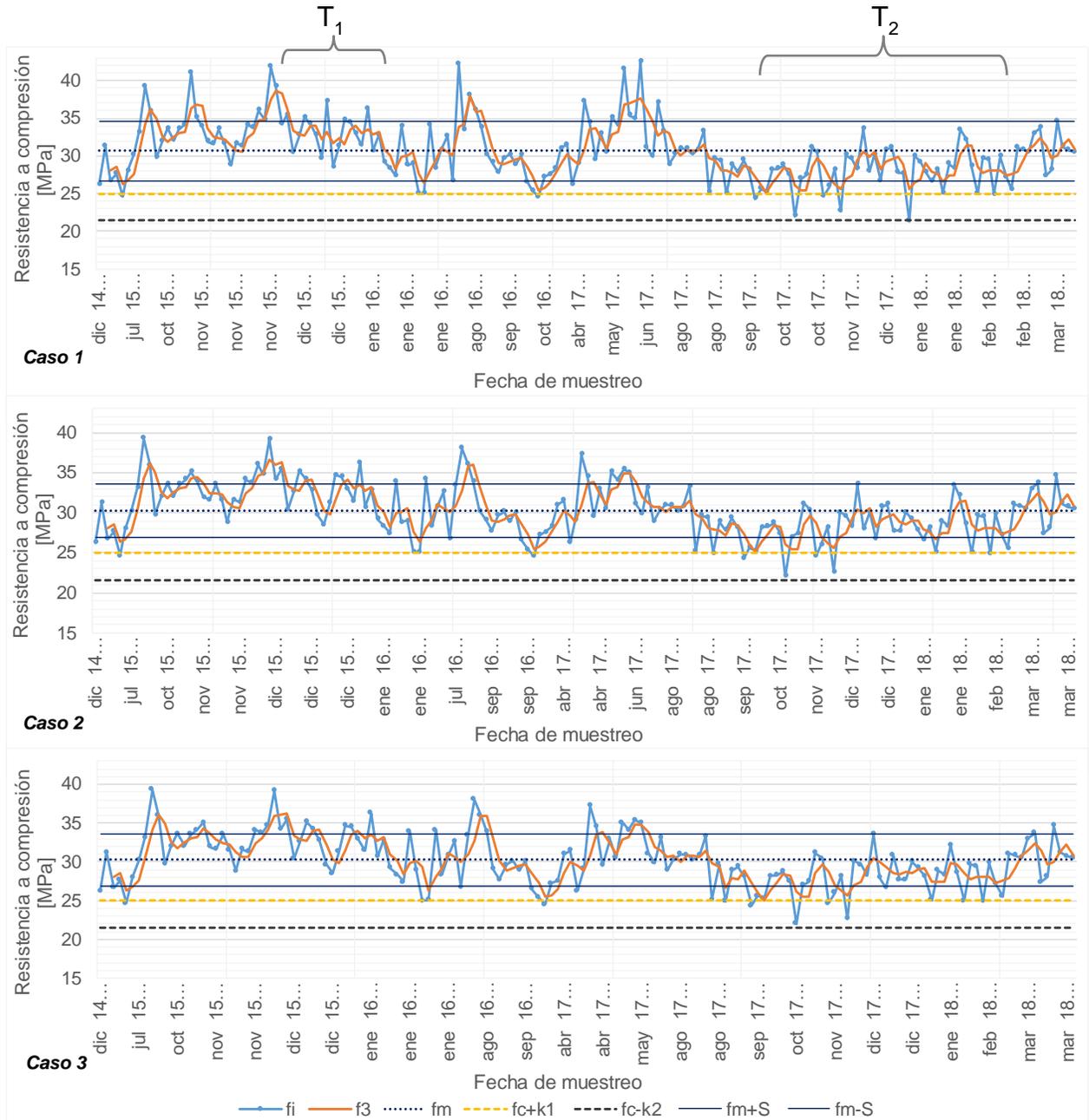


Gráfico 4.21 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

4.2.1.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 30.3 MPa y una desviación estándar de 3.4 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 29.3$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.57.

Tabla 4.57 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media	Resistencia requerida
			f_m [MPa]	$f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.9	172	30.7	30.0
caso 2	3.3	164	30.3	29.3
caso 3	3.4	152	30.3	29.3

Del Gráfico 4.21 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 18 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre al menos 5 puntos de cambio, donde la resistencia media disminuye o aumenta. En el Gráfico 4.22 se presenta los subperiodos con mayor detalle.

4.2.1.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 1.0 MPa ($f_m = 30.3$ MPa y $f_c + tS = 29.3$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.21 se observa que, para el caso 3, todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.58.

Tabla 4.58 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	1	1
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.2.1.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

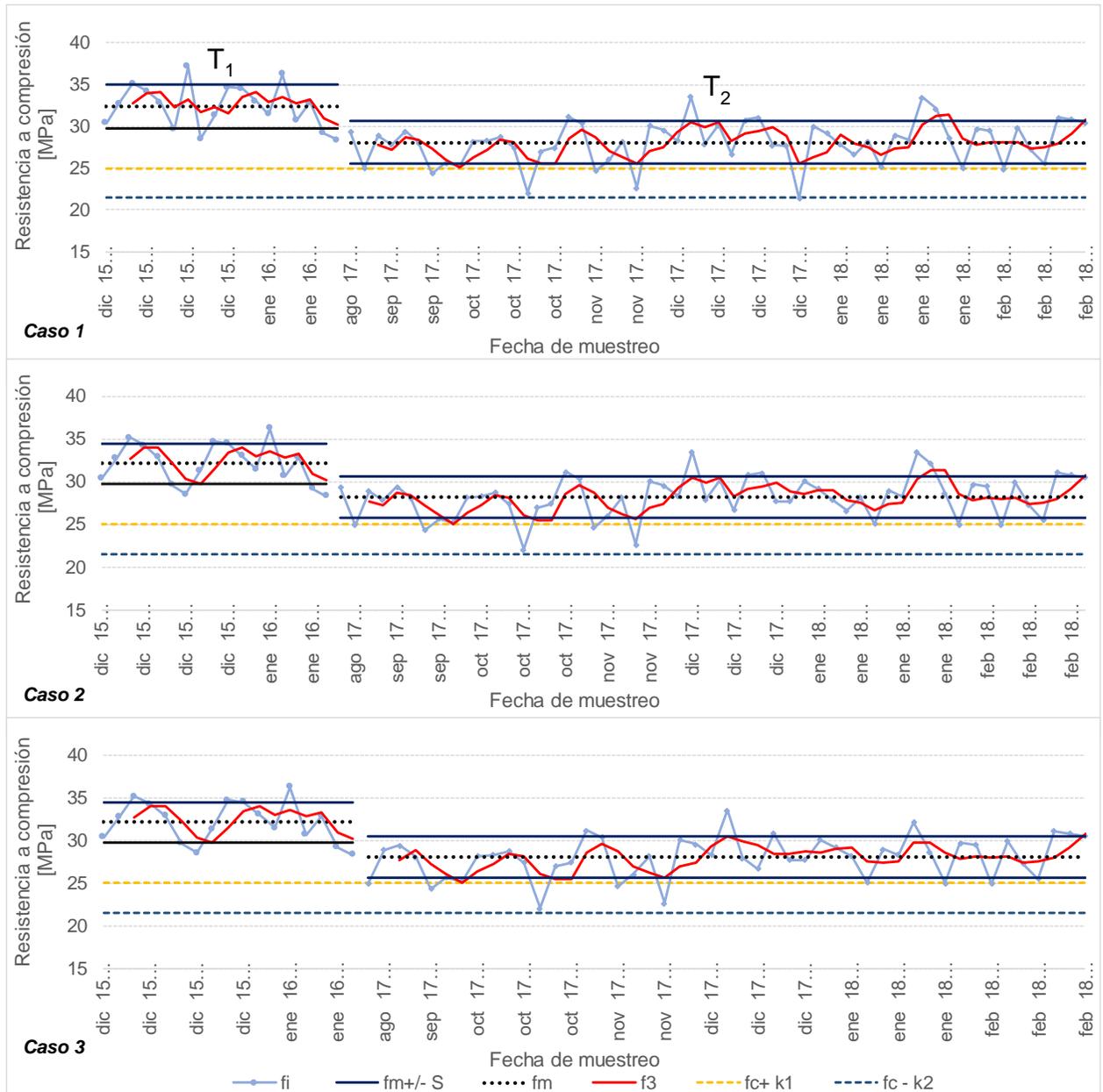


Gráfico 4.22 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

4.2.1.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.59 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de ambos subperiodos es de 2.4 MPa, con un promedio de 2.4 MPa según Tabla 4.60. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.59 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.6	18	32.4	28.5
	caso 2	2.4	17	32.1	28.2
	caso 3	2.4	17	32.1	28.2
T ₂	caso 1	2.6	55	28.1	28.3
	caso 2	2.5	54	28.2	28.1
	caso 3	2.4	47	28.0	28.1

Tabla 4.60 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	2.6
caso 2	2.4
caso 3	2.4

En la Tabla 4.61 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 2.9 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T₁ y T₂, las muestras difieren en sus resistencias medias en 4.1 MPa.

Tabla 4.61 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	S f_m [MPa]
caso 1	30.2	3.1
caso 2	30.2	2.8
caso 3	30.1	2.9

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{promedio} = 2.4$ MPa) y una variabilidad media debido a su dosificación ($S_{fm} = 2.9$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia media de los subperiodos (según caso 3, $S = 3.4$ MPa y $S_{fm} = 2.9$ MPa), aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (30.3 MPa y 30.1 MPa, respectivamente). La desviación estándar mayor se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen al menos 5 puntos de cambio o periodos de ajuste, llegando incluso a variaciones en la resistencia de más de 10 MPa. Estas variaciones no se consideran al analizar los subperiodos (ver Gráfico 4.21).

4.2.1.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.59 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T₁ presentan una resistencia media por sobre la resistencia requerida en 3.9 MPa, lo que implica una dosificación ajustada. Las muestras pertenecientes al subperiodo T₂ presentan una resistencia media por debajo a la resistencia requerida en 0.1 MPa, lo que implica una dosificación límite, que se considera óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación óptima durante el 24% del tiempo y una dosificación ajustada durante un 4% del tiempo. El periodo de ajuste representa un 72% del tiempo analizado de aproximadamente dos años. Ver Tabla 4.62.

Tabla 4.62 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	4
Óptima	24
Límite	-
Periodo de ajuste	72

4.2.1.3 Hormigón HN30 (10) 20/10 de Planta B-Norte, Hormigonera B

4.2.1.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

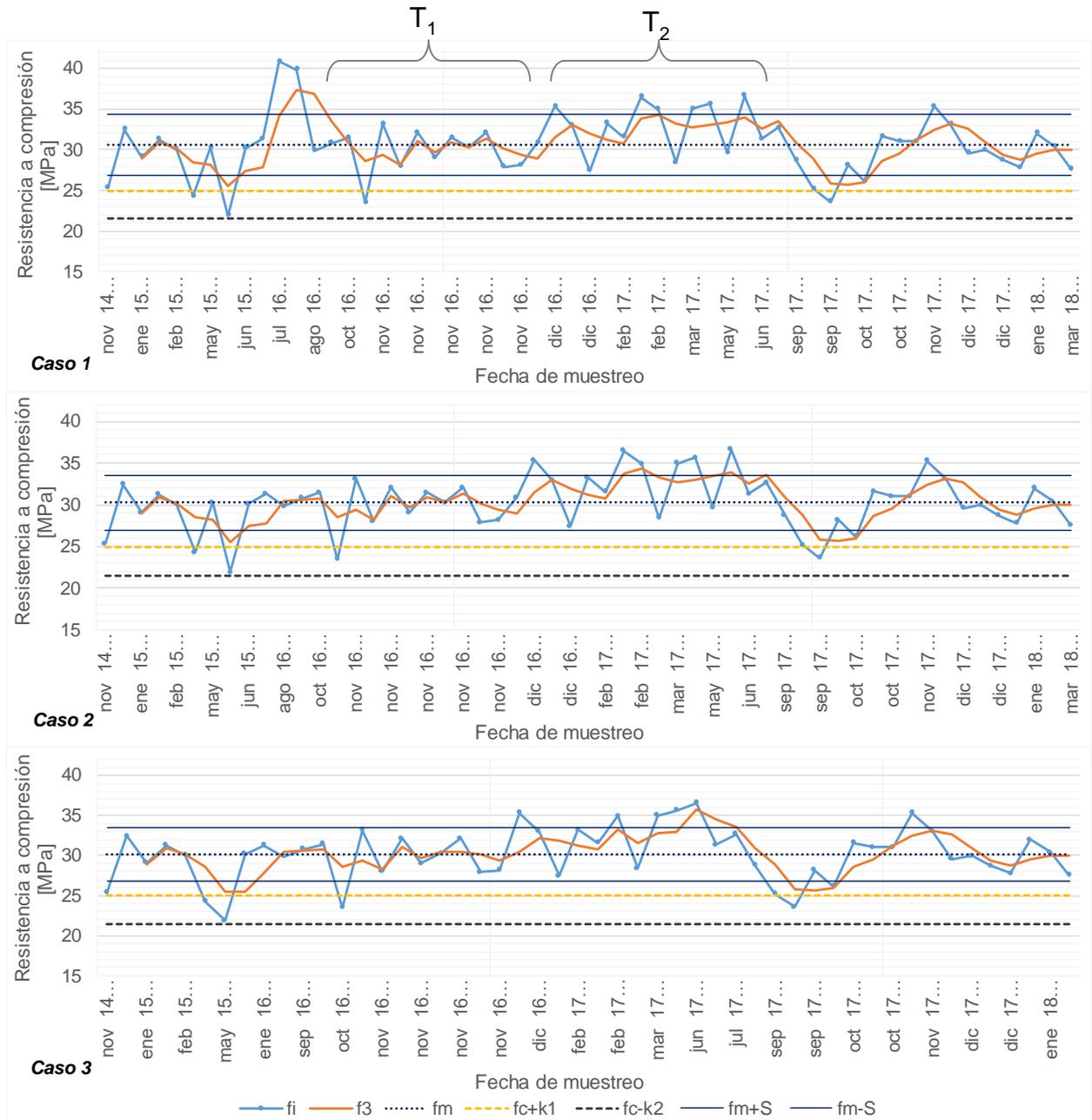


Gráfico 4.23 Resistencia a compresión del total de muestras para Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

4.2.1.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 30.1 MPa y una desviación estándar de 3.3 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 29.3$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.63.

Tabla 4.63 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.7	57	30.6	29.8
caso 2	3.3	55	30.3	29.2
caso 3	3.3	50	30.1	29.3

Del Gráfico 4.23 se observa, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 14 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre al menos 3 puntos de cambio, donde la resistencia media disminuye o aumenta. En el Gráfico 4.24 se presenta los subperiodos con mayor detalle.

4.2.1.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.8 MPa ($f_m = 30.1$ MPa y $f_c + tS = 29.3$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.23 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.64.

Tabla 4.64 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta B-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.2.1.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

Se presenta solo los casos 1 y 3, debido a que el caso 2 no aplica en las muestras pertenecientes a los subperiodos T₁ y T₂.

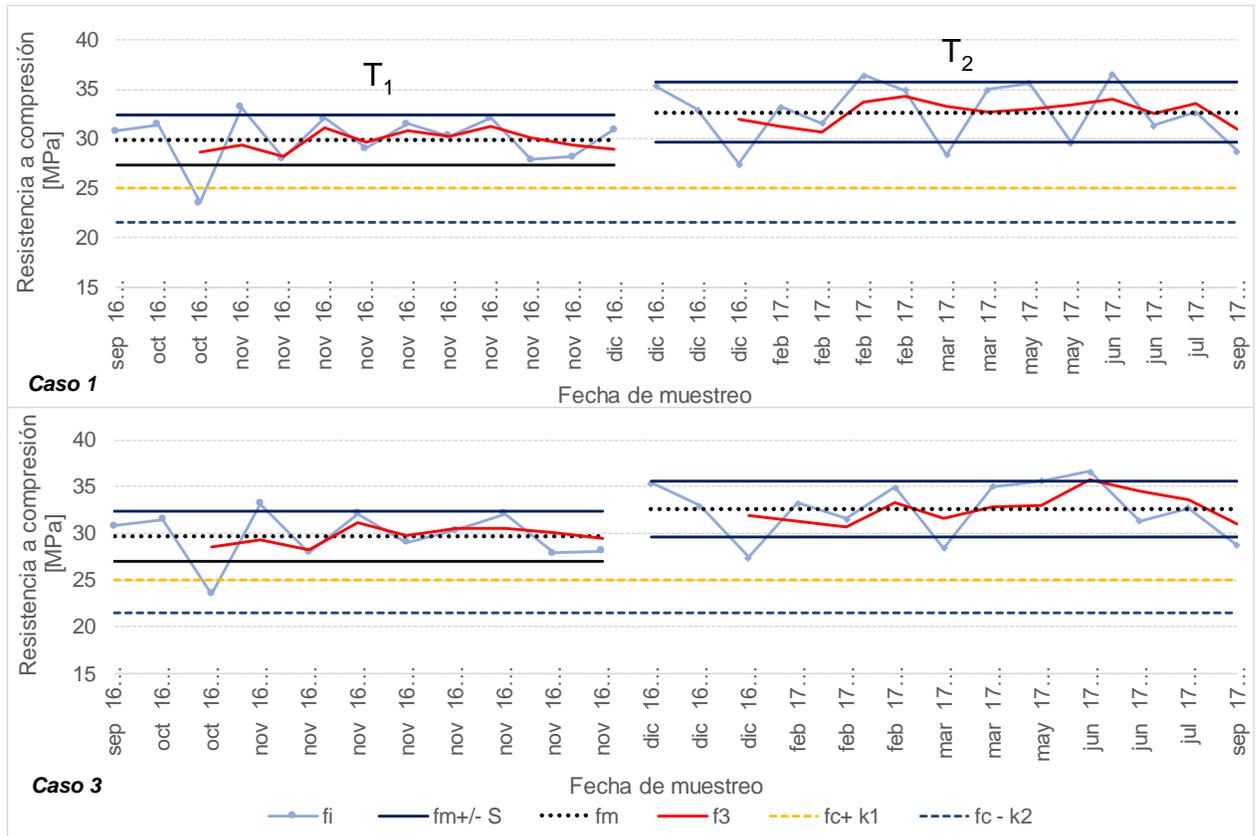


Gráfico 4.24 Resistencia a compresión del total de muestras para Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

4.2.1.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.65 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos T₁ y T₂ es de 2.7 y 3.0 MPa, respectivamente, con un promedio de 2.9 MPa según Tabla 4.66. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.65 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.6	13	29.9	28.5
	caso 3	2.7	11	29.7	28.8
T ₂	caso 1	3.0	15	32.7	29.1
	caso 3	3.0	13	32.6	29.0

Tabla 4.66 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Caso	$S_{promedio}$ [MPa]
caso 1	2.8
caso 3	2.9

En la Tabla 4.67 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media de ambos subperiodos es 2.1 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón originada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T₁ y T₂, las muestras difieren en sus resistencias medias en 2.9 MPa.

Tabla 4.67. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	31.3	1.9
caso 3	31.1	2.1

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad media asociada al proceso de confección ($S_{promedio} = 2.9$ MPa) y una variabilidad baja asociada a su dosificación ($S_{f_m} = 2.1$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor levemente mayor a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos (según caso 3, $S = 3.3$ MPa y $S_{promedio} = 2.9$ MPa), y la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (30.1 MPa y 31.1 MPa, respectivamente). La desviación estándar mayor se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tiene periodos de ajuste, que no se consideran en el análisis de subperiodos (ver Gráfico 4.21).

4.2.1.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.53 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T₁ presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 0.9 MPa, lo que representa una dosificación óptima, y las muestras pertenecientes al subperiodo T₂ presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 3.6 MPa, lo que implica una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada el 26% del tiempo estudiado y una dosificación óptima durante un 12% del tiempo. El periodo de ajuste representa el 62% del tiempo. Ver Tabla 4.68.

Tabla 4.68 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	26
Óptima	12
Límite	-
Periodo de ajuste	62

4.2.2 Comentarios Planta B-Norte

Los hormigones de esta planta presentan una variabilidad general media. En los hormigones HB25 y HN30 esta variabilidad está asociada a su proceso de confección y su dosificación varía muy poco. En el hormigón HB30 la variabilidad está principalmente asociada a su dosificación. Además, presentan periodos de ajuste que contribuyen en aumentar la variabilidad. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 18 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad media que presentan.

Se observa que las fechas en que se presenta cambios en la resistencia media coinciden en los 3 hormigones, por lo tanto, podría atribuirse a una variación de alguna materia prima que utiliza la planta para confeccionar sus hormigones. Por ejemplo, en el periodo de julio a agosto de 2016, se observa una resistencia media alta en los 3 hormigones, y en el periodo mayo a junio de 2017 se observa un alza de resistencia en los hormigones HB30 y HB25. En octubre de 2016 y septiembre a octubre de 2017 se observa una baja en la resistencia en los 3 hormigones. Se observa que estos periodos de alza de resistencia coinciden con los meses en que comienza a disminuir la temperatura, y las bajas en la resistencia coinciden con los meses en que comienza a aumentar la temperatura, por lo que estas variaciones podrían atribuirse a las condiciones climáticas. Estas alzas y bajas en la resistencia tienen una duración cercana a un mes, lo que indica que una vez detectadas la planta reacciona frente a estas variaciones mediante ajustes en su dosificación, cuando se produce un alza en la resistencia luego se produce una baja continua, y cuando se produce una baja en la resistencia, ésta es seguida por un alza continua en la resistencia.

Los hormigones de esta planta presentan mayoritariamente periodos de ajuste, en respuesta a las variaciones del cemento, alguna otra materia prima o a las condiciones climáticas, pero siempre con el objetivo de alcanzar dosificaciones ajustadas. Los hormigones HB30 y HN30 presentan un periodo de dosificación óptima, asociado a una baja en la resistencia, por ejemplo, originada por un aumento de la temperatura ambiente (temperaturas más altas en octubre a noviembre de 2016 y 2017).

4.2.3 Planta B-RM

4.2.3.1 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta B-RM, Hormigonera B

4.2.3.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

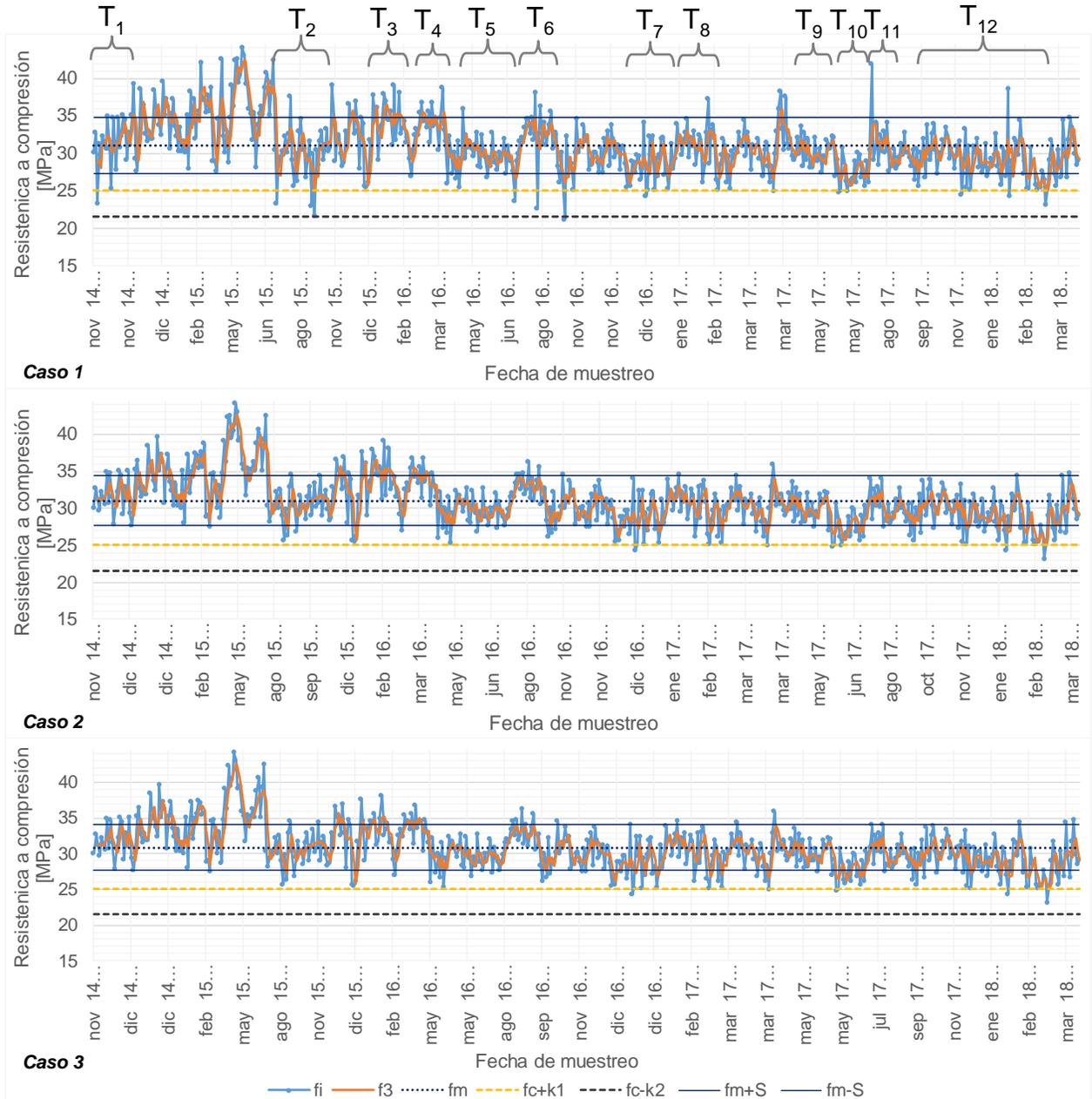


Gráfico 4.25 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-RM.

4.2.3.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 30.9 MPa y una desviación estándar de 3.2 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 29.2$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.69.

Tabla 4.69 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-RM.

Caso	S[MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.7	572	31.1	29.7
caso 2	3.4	545	31.0	29.3
caso 3	3.2	528	30.9	29.2

Del Gráfico 4.25 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 22 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 12 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 13 puntos de cambio en el periodo aproximado de tres años. En el Gráfico 4.26 se presenta los 12 subperiodos con mayor detalle.

4.2.3.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 1.7 MPa ($f_m = 30.9$ MPa y $f_c + tS = 29.2$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.25 se observa que, para el caso 3, todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.70.

Tabla 4.70 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	1	0	1	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.2.3.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

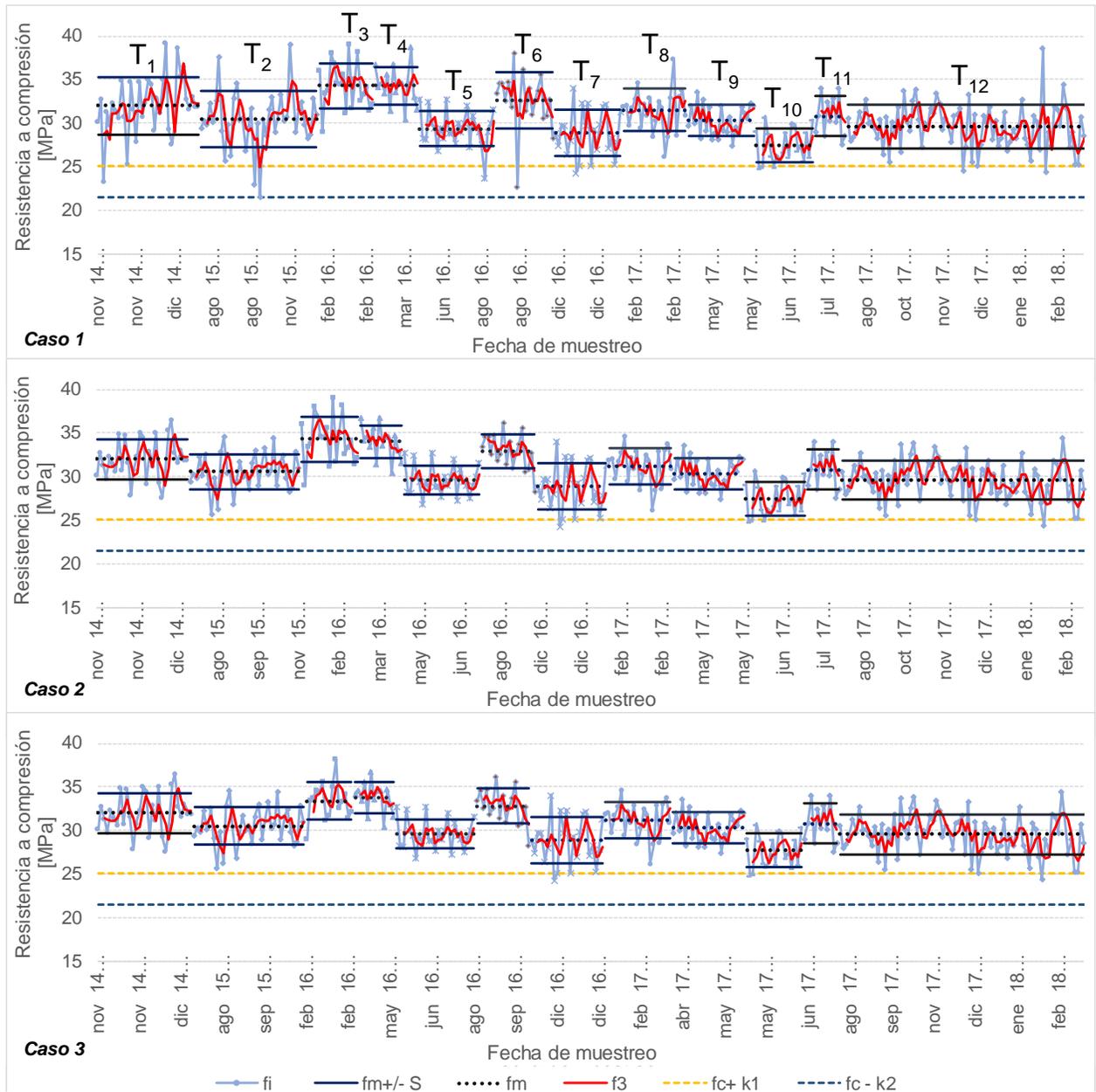


Gráfico 4.26 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-RM.

4.2.3.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.71 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.7 y 2.7 MPa, con un promedio de 2.1 MPa según Tabla 4.72. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.71 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	3.3	35	32.0	29.2
	caso 2	2.2	30	32.0	27.9
	caso 3	2.2	30	32.0	27.9
T ₂	caso 1	3.2	40	30.5	29.2
	caso 2	2.1	36	30.5	27.7
	caso 3	2.1	35	30.5	27.7
T ₃	caso 1	2.6	19	34.3	28.5
	caso 2	2.6	19	34.3	28.5
	caso 3	2.2	15	33.4	27.9
T ₄	caso 1	2.2	15	34.3	27.9
	caso 2	1.9	14	34.0	27.5
	caso 3	1.8	13	33.8	27.4
T ₅	caso 1	2.0	26	29.4	27.7
	caso 2	1.7	25	29.6	27.2
	caso 3	1.7	25	29.6	27.2
T ₆	caso 1	3.2	20	32.6	29.3
	caso 2	2.0	18	32.9	27.7
	caso 3	2.0	17	32.8	27.7
T ₇	caso 1	2.7	23	28.8	28.6
	caso 2	2.7	23	28.8	28.6
	caso 3	2.7	23	28.8	28.6
T ₈	caso 1	2.4	22	31.5	28.2
	caso 2	2.1	21	31.2	27.8
	caso 3	2.1	21	31.2	27.8
T ₉	caso 1	1.8	23	30.3	55.4
	caso 2	1.8	23	30.3	27.3
	caso 3	1.8	23	30.3	27.3
T ₁₀	caso 1	2.0	20	27.5	27.6
	caso 2	2.0	20	27.5	27.6
	caso 3	2.0	18	27.7	27.6
T ₁₁	caso 1	2.3	11	30.8	28.1
	caso 2	2.3	11	30.8	28.1
	caso 3	2.3	11	30.8	28.1
T ₁₂	caso 1	2.5	81	29.6	28.2
	caso 2	2.3	79	29.6	27.9
	caso 3	2.3	77	29.6	27.9

Tabla 4.72 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-RM.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	2.6
caso 2	2.2
caso 3	2.1

Tabla 4.73 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-RM.

Caso	$f_{\text{m promedio}}$ [MPa]	S_{fm} [MPa]
caso 1	31.0	2.1
caso 2	30.9	2.0
caso 3	30.9	1.9

En la Tabla 4.73 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos es 1.9 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón originada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 5.7 MPa.

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.1$ MPa) y una baja variabilidad asociada a su dosificación ($S_{\text{fm}} = 1.9$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual y a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 3.2$ MPa, $S_{\text{promedio}} = 2.1$ MPa y $S_{\text{fm}} = 1.9$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es igual al promedio de la resistencia media de los subperiodos (30.9 MPa). Esta diferencia en las desviaciones estándar se explica porque al considerar el total de muestras se tienen periodos de ajuste, llegando incluso a alzas en la resistencia de más de 10 MPa, durante mayo de 2015. Estas variaciones en los periodos de ajuste no se consideran al analizar los subperiodos.

4.2.3.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.71 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 , T_3 , T_4 y T_6 presentan resistencias medias por sobre a la resistencia requerida entre 4.1 a 6.4 MPa, lo que implica una dosificación holgada. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_2 , T_5 , T_8 , T_9 , T_{11} y T_{12} presentan resistencias medias por sobre a la resistencia requerida entre 1.6 a 3.4 MPa, lo que implica una dosificación ajustada. Los subperiodos T_7 y T_{10} , presentan resistencias medias mayores a la resistencia requerida en 0.2 y 0.1 MPa, respectivamente, por lo que presentan una dosificación óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta funciona principalmente, en base a una dosificación ajustada que representa un 26% del tiempo y con una dosificación holgada

durante el 14% del tiempo. El periodo de ajuste representa un 54% del tiempo. Ver Tabla 4.74.

Tabla 4.74 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	14
Ajustada	26
Óptima	6
Límite	-
Periodo de ajuste	54

4.2.3.2 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta B-RM, Hormigonera B

4.2.3.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

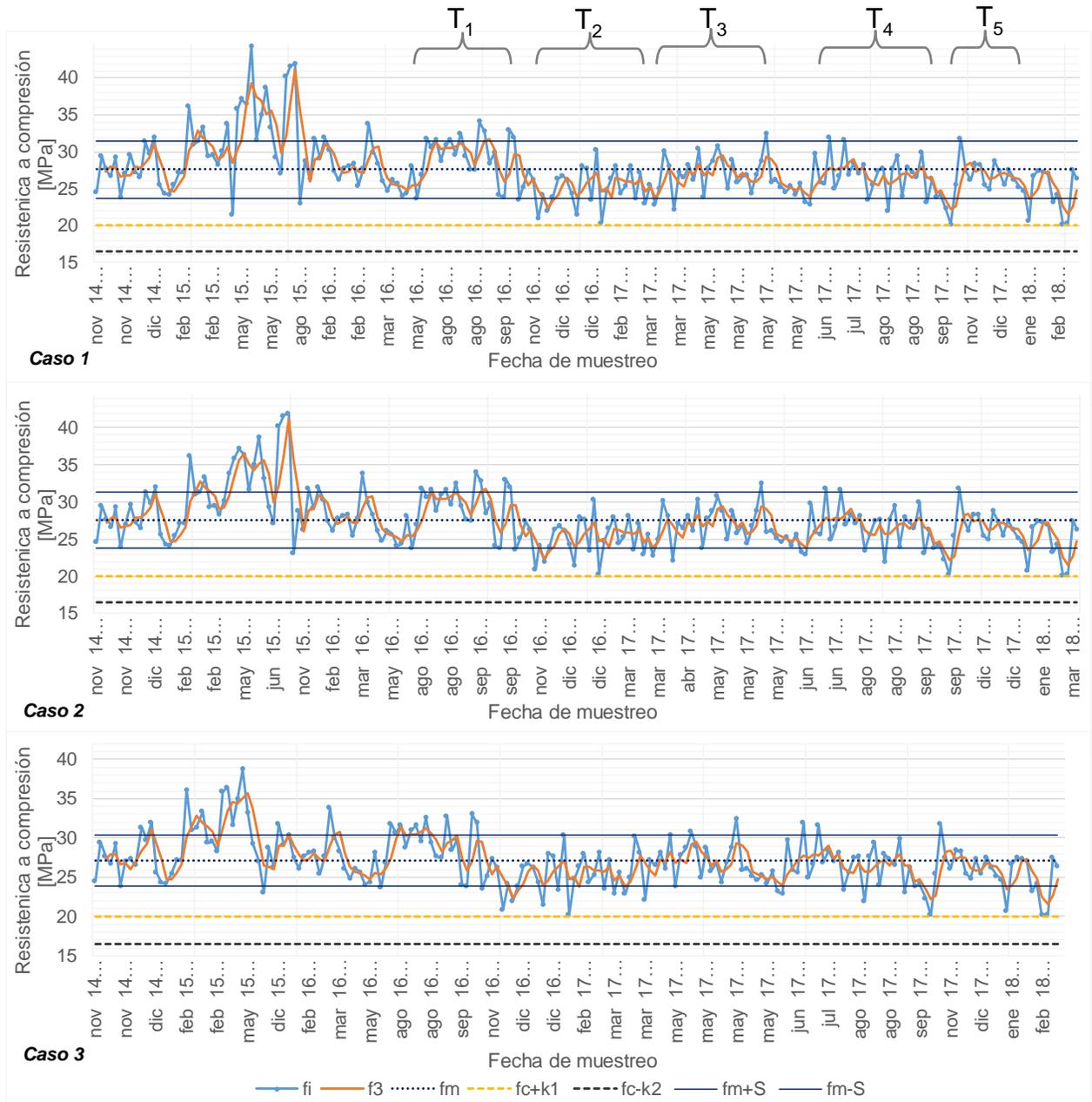


Gráfico 4.27 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-RM.

4.2.3.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 27.2 MPa y una desviación estándar de 3.3 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 24.2$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.75.

Tabla 4.75 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.9	203	27.6	25.1
caso 2	3.8	200	27.5	24.8
caso 3	3.3	190	27.2	24.2

Del Gráfico 4.27 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 19 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 5 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.28 se presenta los 5 subperiodos con mayor detalle.

4.2.3.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 3.0 MPa ($f_m = 27.2$ MPa y $f_c + tS = 24.2$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.27 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.76.

Tabla 4.76 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.2.3.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

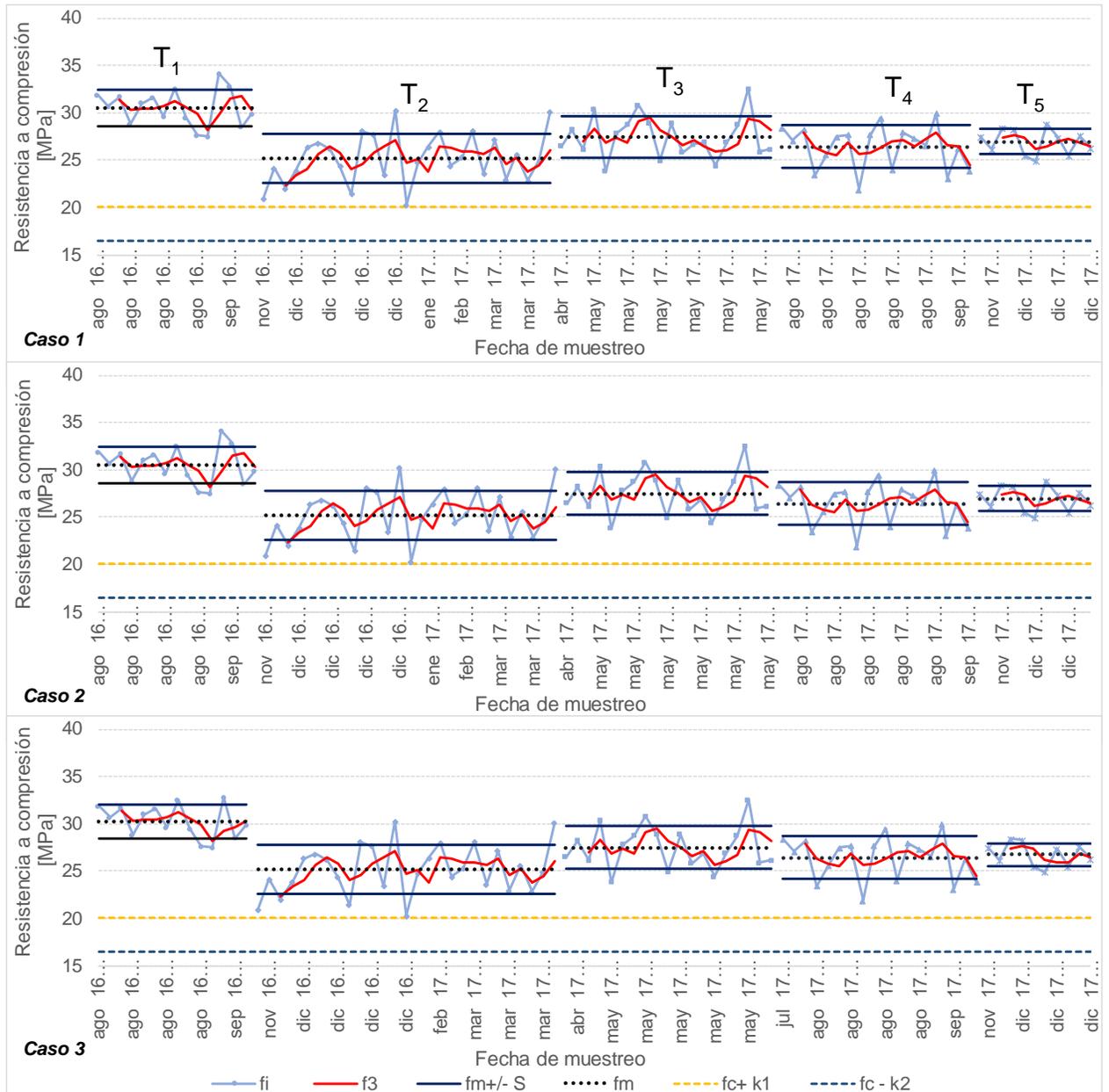


Gráfico 4.28 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Norte.

4.2.3.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.77 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.2 y 2.6 MPa, con un promedio de 2.2 MPa según Tabla 4.78. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.77 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.0	15	30.5	22.6
	caso 2	2.0	15	30.5	22.6
	caso 3	1.8	14	30.2	22.4
T ₂	caso 1	2.6	27	25.2	23.4
	caso 2	2.6	27	25.2	23.4
	caso 3	2.6	27	25.2	23.4
T ₃	caso 1	2.2	20	27.4	22.9
	caso 2	2.3	19	27.5	23.0
	caso 3	2.3	19	27.5	23.0
T ₄	caso 1	2.3	18	26.4	23.1
	caso 2	2.3	18	26.4	23.1
	caso 3	2.3	18	26.4	23.1
T ₅	caso 1	1.3	11	26.9	21.8
	caso 2	1.3	11	26.9	21.8
	caso 3	1.2	10	26.7	21.7

Tabla 4.78. Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-RM.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	2.2
caso 2	2.3
caso 3	2.2

En la Tabla 4.79 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos es 1.9 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 5 MPa.

Tabla 4.79. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	27.3	2.0
caso 2	27.3	2.0
caso 3	27.2	1.9

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.2$ MPa) y una baja variabilidad asociada a su dosificación ($S_{f_m} = 1.9$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual y a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 3.3$ MPa, $S_{\text{promedio}} = 2.2$ MPa y $S_{\text{fm}} = 1.9$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es igual al promedio de la resistencia media de los subperiodos (27.2 MPa). Esta diferencia en las desviaciones estándar se explica porque al considerar el total de muestras se tienen periodos de ajuste que no se consideran al analizar los subperiodos, como ejemplo de esto, se tiene el periodo de febrero a mayo de 2015, que presenta alzas en la resistencia de más de 10 MPa respecto a la resistencia media.

4.2.3.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.77 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 , T_3 y T_5 presentan resistencias medias por sobre a la resistencia requerida entre 4.5 a 7.9 MPa, lo que implica una dosificación holgada. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_2 y T_4 presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 1.8 y 3.3 MPa, respectivamente, por lo que tienen una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada, que representa un 20% del tiempo y una dosificación holgada, durante el 12% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 68% del tiempo. Ver Tabla 4.80.

Tabla 4.80 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta B-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	12
Ajustada	20
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	68

4.2.3.3 Hormigón HN25 (10) 20/10 de Planta B-RM, Hormigonera B

4.2.3.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se presenta solo los casos 1 y 3, debido a que no hay muestras que requieran ser descartadas según caso 2.

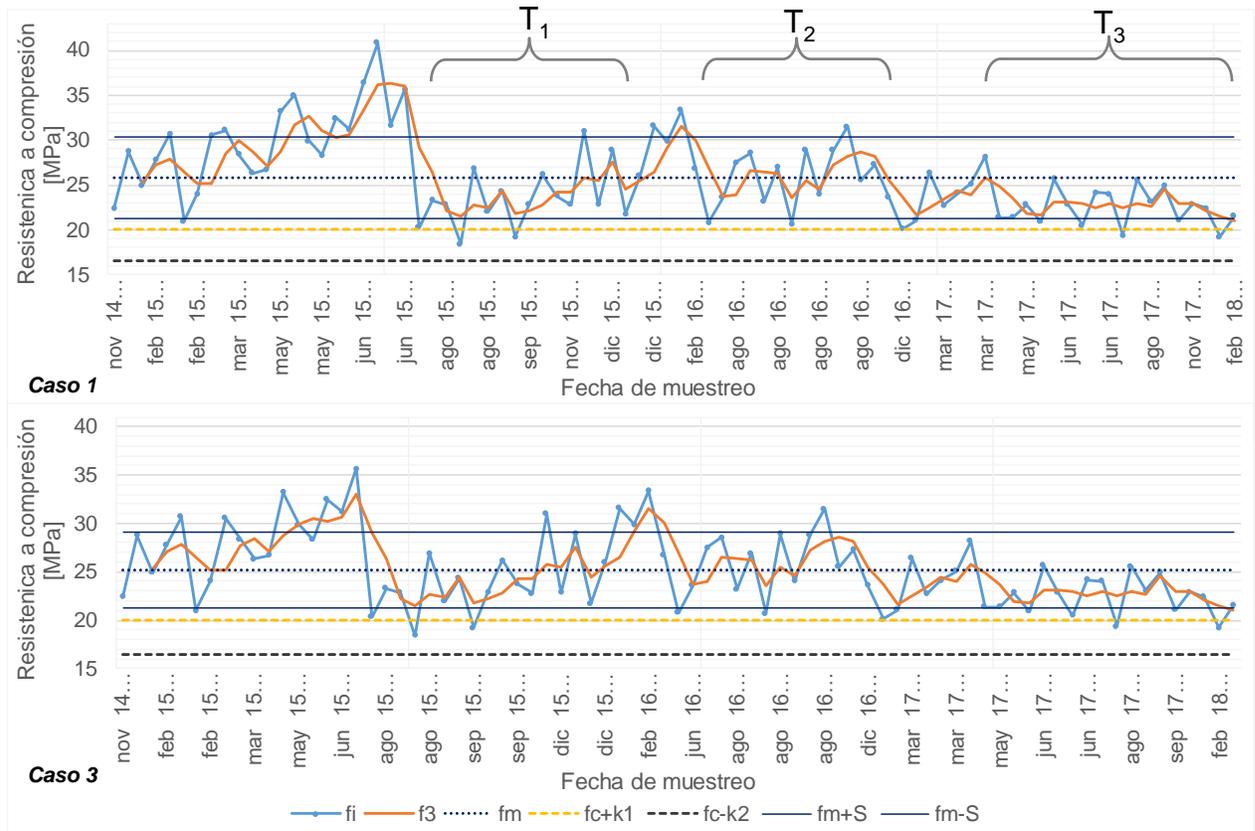


Gráfico 4.29 Resistencia a compresión del total de muestras para Hormigón HN25 (10) 20/10, Planta B-RM.

4.2.3.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 25.2 MPa y una desviación estándar de 3.9 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 25$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.81.

Tabla 4.81 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HN25 (10) 20/10, Planta B-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	4.5	82	25.8	25.8
caso 3	3.9	77	25.2	25.0

Del Gráfico 4.29 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 18 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 3 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.30 se presenta los 3 subperiodos con mayor detalle.

4.2.3.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.2 MPa ($f_m = 25.2$ MPa y $f_c + tS = 25$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.29 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.82.

Tabla 4.82 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HN25 (10) 20/10, Planta B-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº muestras	Muestras [%]	Nº muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.2.3.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

Se presenta solo el caso 1, debido a que los casos 2 y 3 no aplican a las muestras pertenecientes a los subperiodos.

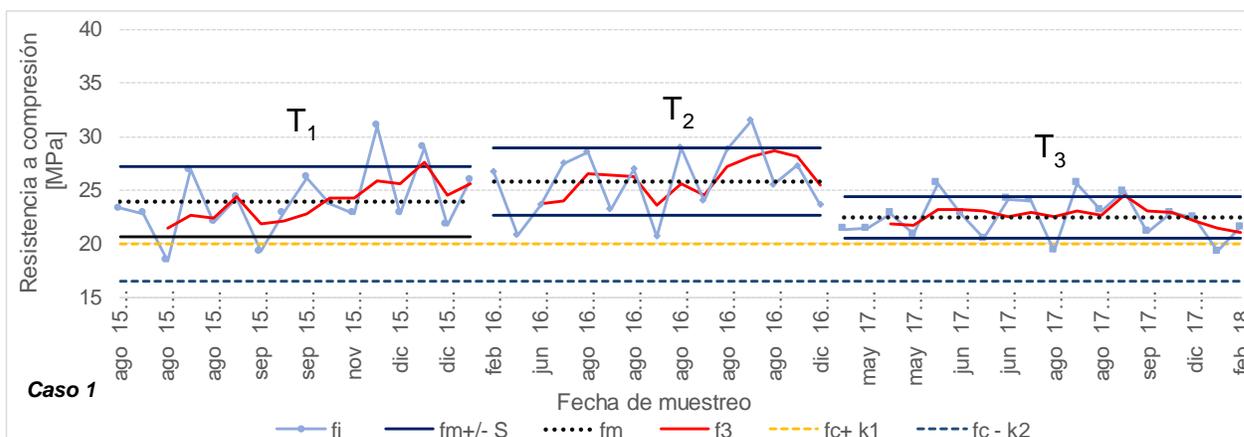


Gráfico 4.30 Resistencia a compresión del total de muestras para Hormigón HN25 (10) 20/10, Planta B-RM.

4.2.3.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.83 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.9 y 3.3 MPa, con un promedio de 2.8 MPa según Tabla 4.84. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.83 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HN25 (10) 20/10, Planta B-RM.

Nº subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	3.3	16	24.0	24.4
T ₂	caso 1	3.1	15	25.9	24.2
T ₃	caso 1	1.9	18	22.4	22.6

Tabla 4.84 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HN25 (10) 20/10, Planta B-RM.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	2.8

En la Tabla 4.85, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Se tiene que la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos es 1.7 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 3.5 MPa.

Tabla 4.85. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HN25 (10) 20/10, Planta B-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	24.1	1.7

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.8$ MPa) y una baja variabilidad asociada a su dosificación ($S_{f_m} = 1.7$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual y a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 3.9$ MPa, $S_{\text{promedio}} = 2.8$ MPa y $S_{f_m} = 1.7$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (25.2 MPa y 24.1 MPa, respectivamente). Esta diferencia en las desviaciones estándar se explica porque al considerar el total de muestras se tienen periodos de ajuste que no se consideran al analizar los subperiodos, como ejemplo de esto, se tiene el periodo de noviembre de 2014 a junio de 2015 que presenta resistencias mayores a la de los subperiodos.

4.2.3.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.83 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_2 presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 1.7 MPa, lo que implica una dosificación ajustada. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 y T_3 presentan una resistencia media por debajo a la resistencia requerida en 0.4 y 0.2 MPa, respectivamente, por lo que tienen una dosificación límite, pero se considera óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta, funciona principalmente con una dosificación óptima, durante un 44% del tiempo y con una dosificación ajustada durante el 15% del tiempo. El periodo de ajuste representa un 41% del tiempo. Ver Tabla 4.86.

Tabla 4.86 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HN25 (10) 20/10, Planta B-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	15
Óptima	44
Límite	-
Periodo de ajuste	41

4.2.4 Comentarios Planta B-RM

Los hormigones de esta planta presentan una variabilidad general media, asociada a su proceso de confección y a sus periodos de ajuste, y su dosificación varía muy poco. Se

observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 22 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad media que presentan.

Se observa que las fechas en que se presenta cambios en la resistencia media coinciden en los 3 hormigones, por lo tanto, podría atribuirse a una variación de alguna materia prima, como por ejemplo el cemento que utiliza la planta para confeccionar sus hormigones. En el periodo de mayo a junio de 2015, en febrero y agosto de 2016 se observa un alza en la resistencia en los 3 hormigones. Además, en agosto de 2015, marzo y noviembre de 2016 y mayo de 2017 se observa una baja en la resistencia en los 3 hormigones. Las resistencias bajas alcanzadas en noviembre de 2016 podrían atribuirse a un aumento de la temperatura ambiente y las resistencias altas alcanzadas en mayo a junio de 2015 y agosto de 2016, a una disminución en la temperatura ambiente. Se observa que los periodos con resistencia altas o bajas tienden a durar cerca de un mes, por lo que una vez detectadas, la planta ajusta sus dosificaciones para compensar estas variaciones.

La planta trabaja principalmente con una dosificación ajustada, además presenta periodos de ajuste originados, por ejemplo, por variaciones de sus materias primas o cambios en las condiciones climáticas. Los periodos de dosificación holgada y óptima se presentan por cerca de un mes, por lo que una vez detectados son compensados mediante ajustes de dosificación. Se observa que el hormigón HN25 presenta periodos con dosificación óptima de mayor duración, los que también están dados por variaciones en alguna materia prima o a un cambio en las temperaturas ambientales.

4.2.5 Planta B-Sur

4.2.5.1 Hormigón HN25 (10) 20/06 de Planta B-Sur, Hormigonera B

4.2.5.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se presenta solo los casos 1 y 3, debido a que no hay muestras que requieran ser descartadas según caso 2.

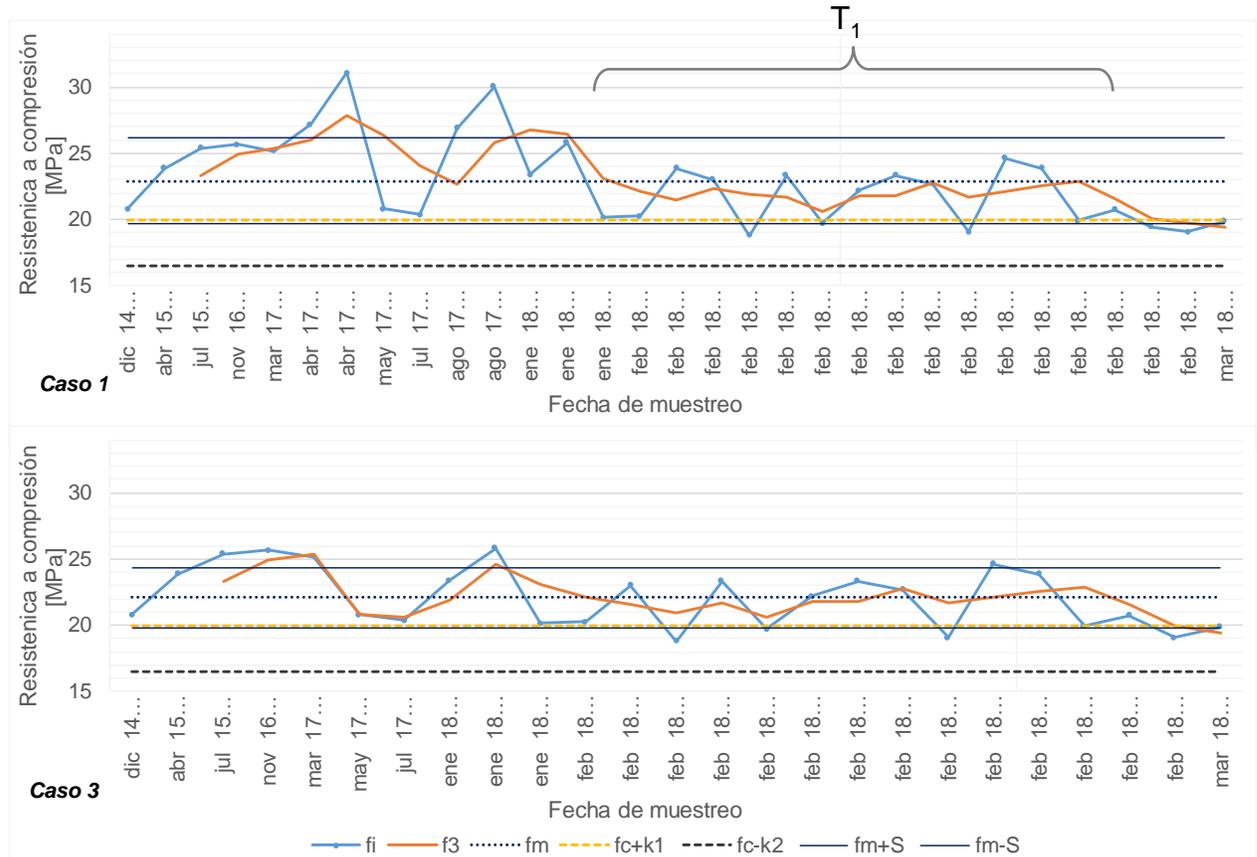


Gráfico 4.31 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta B-Sur.

4.2.5.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 22.1 MPa y una desviación estándar de 2.3 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad excelente según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 22.9$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.87.

Tabla 4.87 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta B-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.2	31	22.9	24.1
caso 3	2.3	25	22.1	22.9

Del Gráfico 4.31 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 7 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 1 subperiodo en el que la resistencia media se mantiene constante. Este subperíodo se ubica entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta y luego disminuye. En el Gráfico 4.32 se presenta el subperiodo con mayor detalle.

4.2.5.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por debajo a la resistencia requerida en 0.8 MPa ($f_m = 22.1$ MPa y $f_c + tS = 22.9$ MPa). Por lo tanto, existe riesgo de que las muestras no cumplan con la calidad del hormigón según normativa, resultando una fracción defectuosa mayor. Debido a esto, se observa del Gráfico 4.31 que dos muestras no cumplen con la condición límite de resistencia media móvil. Sin embargo, este porcentaje de no cumplimiento del 8% se considera dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición dada para la resistencia individual, se observa que todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.88.

Tabla 4.88 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta B-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° muestras	Muestras [%]	N° muestras	Muestras [%]
caso 1	2	6	0	0
caso 3	2	8	0	0

4.2.5.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

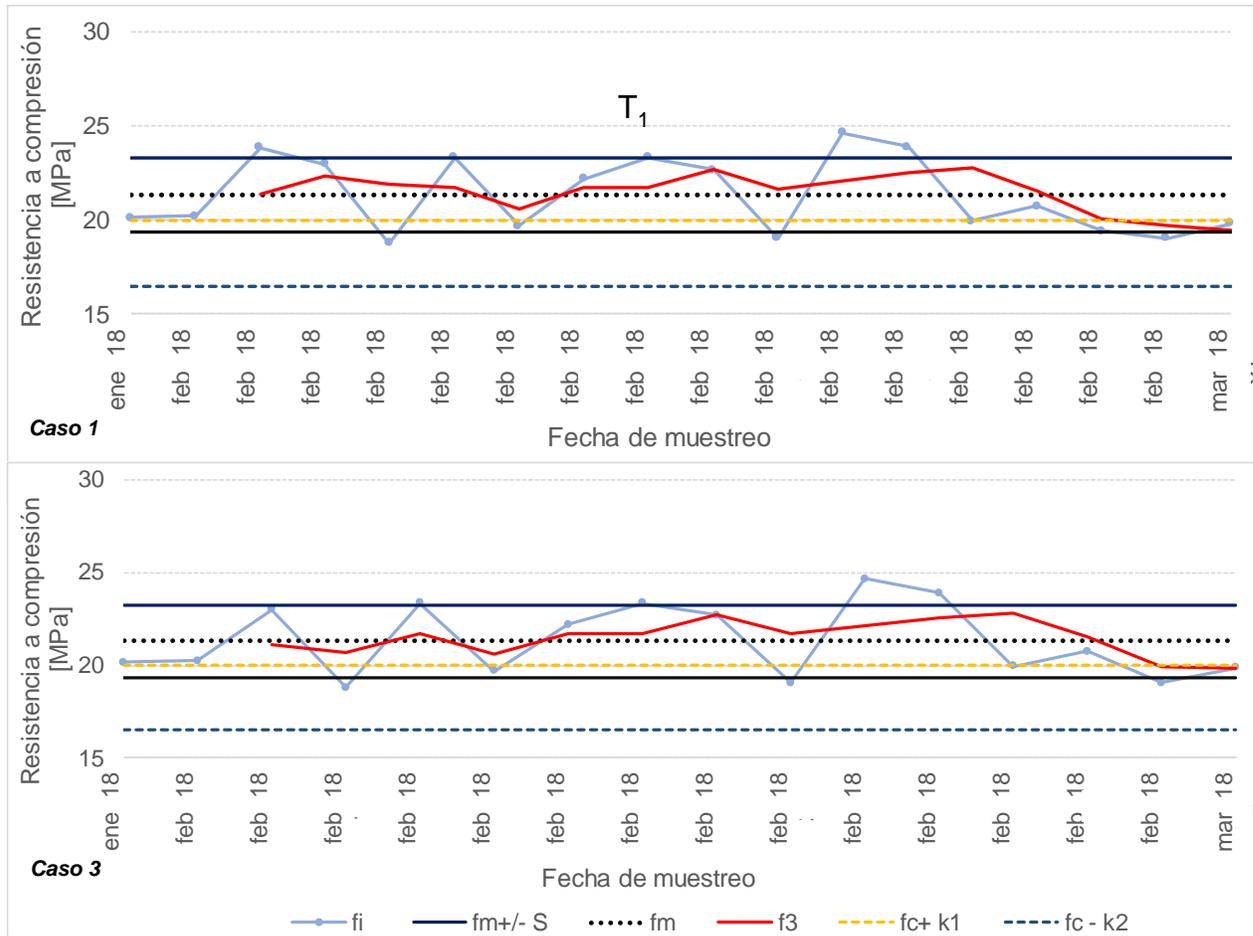


Gráfico 4.32 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta B-Sur.

4.2.5.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.89 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, la desviación estándar del subperiodo T_1 es 2.0 MPa. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.89 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta B-Sur.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T_1	caso 1	2.0	18	21.3	22.7
	caso 3	2.0	16	21.3	22.6

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad baja asociada al proceso mismo de confección ($S_{T_1} = 2.0$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor muy cercano a la desviación del subperiodo T_1 ($S = 2.3$ MPa y $S_{T_1} = 2.0$ MPa), así como también la resistencia media del total de muestras es similar a la resistencia media del subperiodo (22.1 MPa y 21.3 MPa, respectivamente). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad básica, y además la variabilidad dada por los periodos de ajuste, presentes antes y después del subperiodo T_1 .

4.2.5.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.89 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 presentan una resistencia media por debajo a la resistencia requerida en 1.3 MPa, lo que implica una dosificación límite.

Se concluye que, para este hormigón, la planta funciona con una dosificación límite el 13% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 87% del tiempo. Ver Tabla 4.90

Tabla 4.90 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HN25 (10) 20/06, Planta B-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	-
Óptima	-
Límite	13
Periodo de ajuste	87

4.2.5.2 Hormigón HN25 (10) 20/08 de Planta B-Sur, Hormigonera B

4.2.5.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se presenta solo el caso 1, debido a que no hay muestras que requieran ser descartadas según casos 2 y 3.

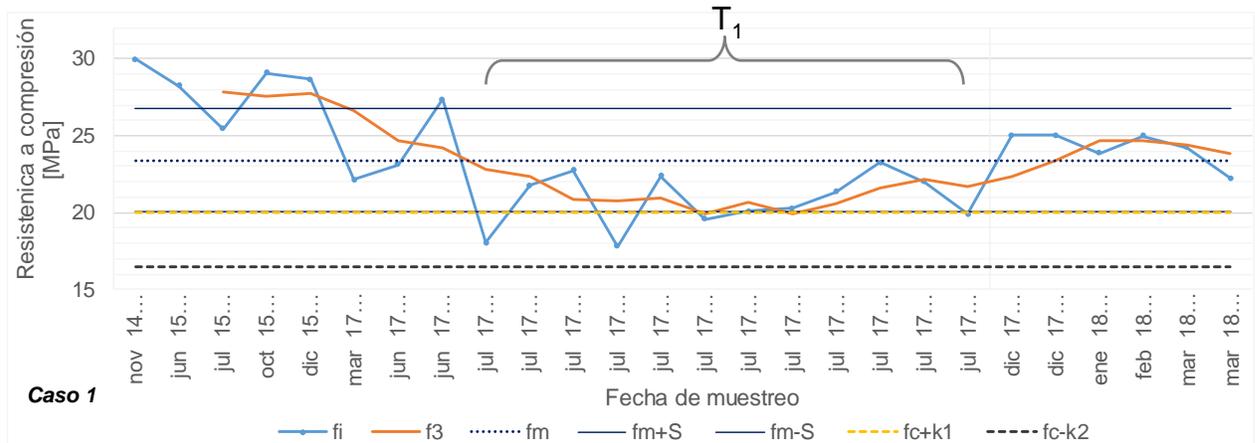


Gráfico 4.33 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HN25 (10) 20/08, Planta B-Sur.

4.2.5.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, se tiene una resistencia media de 23.4 MPa y una desviación estándar de 3.3 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 24.3$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.91.

Tabla 4.91 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HN25 (10) 20/08, Planta B-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.3	26	23.4	24.3

Del Gráfico 4.33 se observa que hay una diferencia de aproximadamente 12 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 1 subperíodo en el que la resistencia media se mantiene constante. Este subperíodo se ubica entre puntos de cambio, donde la resistencia media disminuye y luego aumenta. En el Gráfico 4.32 se presenta el subperíodo con mayor detalle.

4.2.5.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por debajo a la resistencia requerida en 0.9 MPa ($f_m = 23.4$ MPa y $f_c + tS = 24.3$ MPa). Por lo tanto, existe riesgo de que las muestras no cumplan con la calidad del hormigón según normativa, resultando una fracción defectuosa mayor. Debido a esto, del Gráfico 4.33 se tiene que dos muestras no cumplen

con la condición límite de resistencia media móvil. Sin embargo, este porcentaje de no cumplimiento del 8% se considera dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición dada para la resistencia individual, se observa que todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.92.

Tabla 4.92 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HN25 (10) 20/08, Planta B-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° muestras	Muestras [%]	N° muestras	Muestras [%]
caso 1	2	8	0	0

4.2.5.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

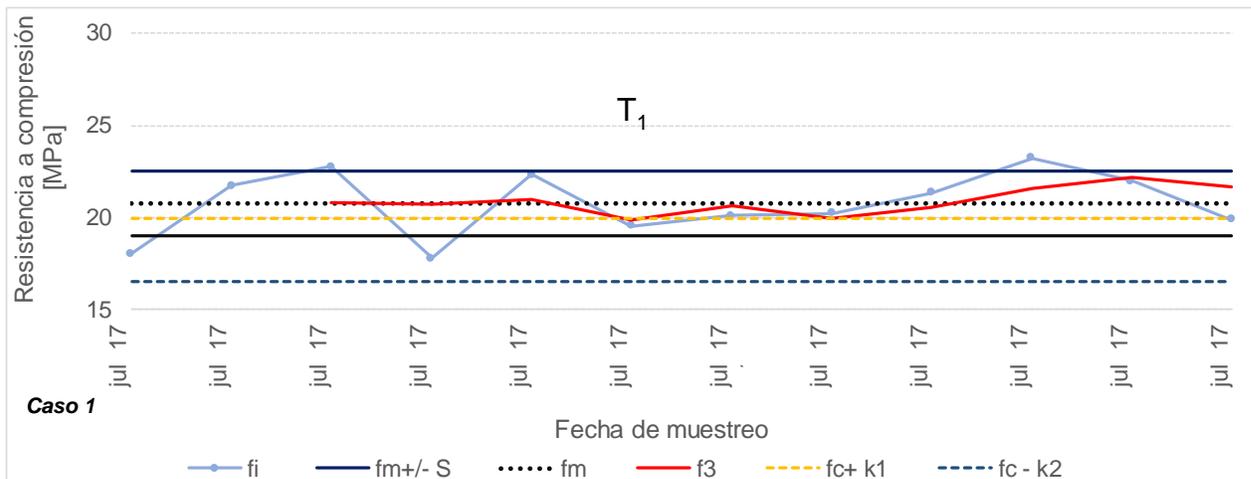


Gráfico 4.34 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HN25 (10) 20/08, Planta B-Sur.

4.2.5.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.93 se presentan los resultados de análisis del subperiodo, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que la desviación estándar del subperiodo T_1 es 1.8 MPa. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.93 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HN25 (10) 20/08, Planta B-Sur.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T_1	caso 1	1.8	12	20.8	22.4

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad baja asociada al proceso mismo de confección ($S_{T_1} = 1.8$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación del subperiodo T_1 ($S = 3.3$ MPa y $S_{T_1} = 1.8$ MPa), así como también la resistencia media del total de muestras tiene un valor mayor a la resistencia media del

subperiodo (23.4 MPa y 20.8 MPa, respectivamente). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad básica, y además los periodos de ajuste presentes antes y después del subperiodo T₁. Estas variaciones de resistencia contribuyen en que la desviación estándar de la totalidad de muestras sea mayor a la del subperiodo.

4.2.5.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.93 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T₁ presentan una resistencia media por debajo a la resistencia requerida en 1.6 MPa, lo que implica una dosificación límite.

Se concluye que, para este hormigón, la planta funciona con una dosificación límite durante el 8% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 92% del tiempo. Ver Tabla 4.94.

Tabla 4.94 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HN25 (10) 20/08, Planta B-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	-
Óptima	-
Límite	8
Periodo de ajuste	92

4.2.5.3 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta B-Sur, Hormigonera B

4.2.5.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se presenta solo el caso 1, debido a que no hay muestras que requieran ser descartadas según casos 2 y 3.

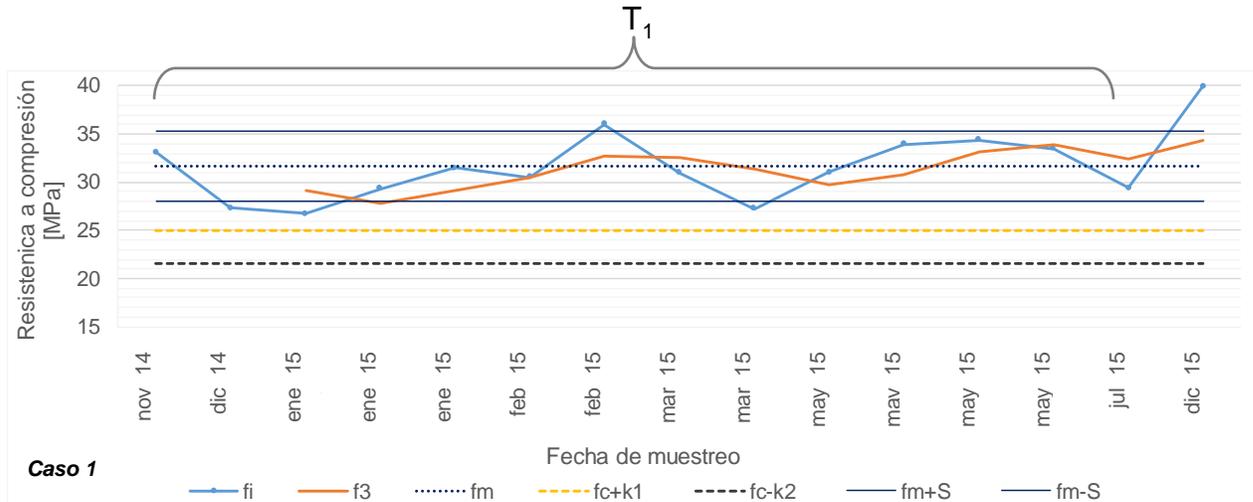


Gráfico 4.35 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Sur.

4.2.5.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, se tiene una resistencia media de 31.7 MPa y una desviación estándar de 3.6 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 29.6$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.95.

Tabla 4.95 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.6	15	31.7	29.6

Del Gráfico 4.35 se observa que hay una diferencia de aproximadamente 9 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 1 subperiodo en el que la resistencia media se mantiene constante. En el Gráfico 4.36 se presenta el subperiodo con mayor detalle.

4.2.5.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 2.1 MPa ($f_m = 31.7$ MPa y $f_c + tS = 29.6$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.35 se observa que todas las muestras

cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.96.

Tabla 4.96 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° muestras	Muestras [%]	N° muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0

4.2.5.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

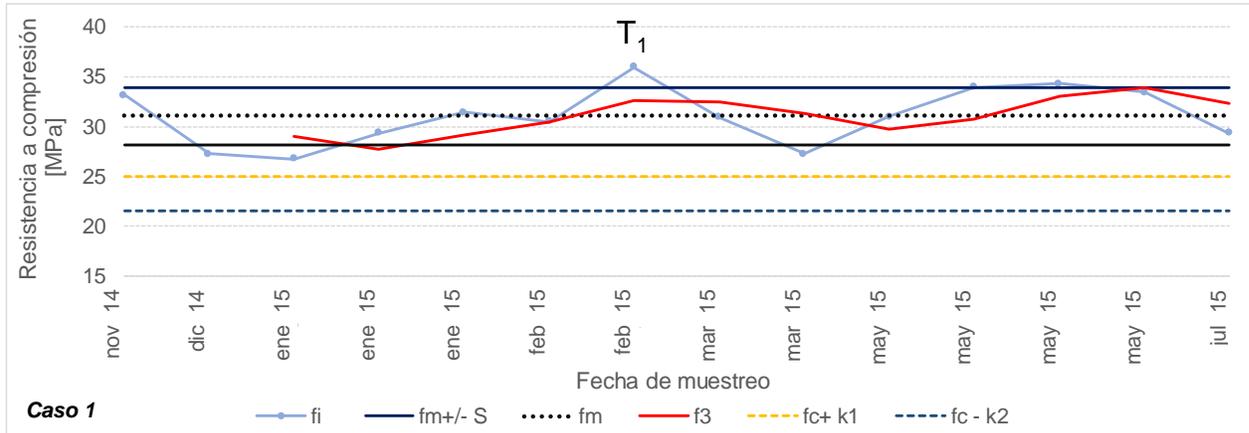


Gráfico 4.36 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Sur.

4.2.5.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.97 se presentan los resultados de análisis del subperiodo, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que la desviación estándar del subperiodo T_1 es 2.9 MPa. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.97 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Sur.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T_1	caso 1	2.9	14	31.1	28.9

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad media asociada al proceso mismo de confección ($S_{T_1} = 2.9$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación del subperiodo T_1 ($S = 3.6$ MPa y $S_{T_1} = 2.9$ MPa), aun así, la resistencia media del total de muestras tiene un valor similar a la resistencia media del subperiodo (31.7 MPa y 31.1 MPa, respectivamente). Esta diferencia en las desviaciones estándar se explica porque al considerar el total de muestras se tiene una muestra que presenta

una alta resistencia, la que puede pertenecer a un periodo de ajuste posterior a T_1 , y que no se considera al analizar el subperiodo (ver Gráfico 4.35).

4.2.5.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.97 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 2.2 MPa, lo que representa una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón la planta presenta una dosificación ajustada que representa el 64% del tiempo. El periodo de ajuste representa un 36%. Ver Tabla 4.98

Tabla 4.98 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta B-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	64
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	36

4.2.6 Comentarios Planta B-Sur

Los hormigones de esta planta presentan principalmente una variabilidad general media que está asociada a su proceso de confección y a los periodos de ajuste, y su dosificación es constante. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 12 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad media que presentan.

Estos hormigones presentan un número reducido de resultados de ensayos, por lo que no es posible identificar coincidencia entre periodos con resistencias bajas o altas. Sin embargo, se observa que en julio de 2017 el hormigón HN25 (10)20/08 presenta bajas resistencias, la que también se observa en la única muestra de esa fecha que presenta el hormigón HN25 (10)20/06. Además, se observa que los periodos de baja y alta resistencia presentan una duración de un mes aproximadamente, por lo tanto, podrían atribuirse a variaciones de alguna materia prima, como, por ejemplo, el cemento, las que una vez detectadas son compensadas mediante ajustes de dosificación.

Esta planta funciona principalmente en base a una dosificación ajustada. Los periodos de dosificación límite están asociados a una variación de alguna materia prima, como, por ejemplo, una disminución en la calidad del cemento, ya que presentan una duración inferior a un mes.

4.3 Hormigonera C

4.3.1 Planta C-Norte

4.3.1.1 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta C-Norte, Hormigonera C

4.3.1.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

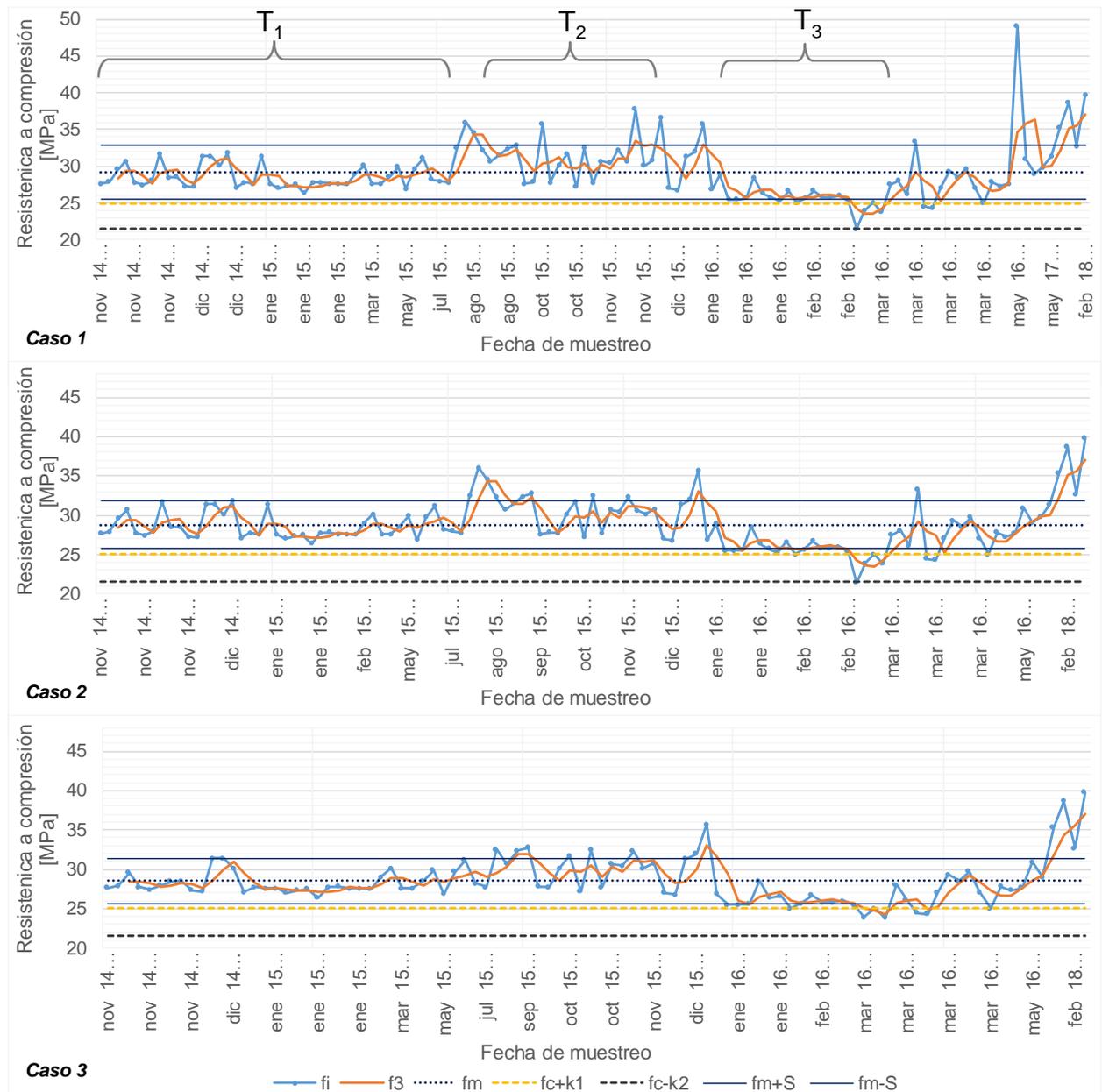


Gráfico 4.37 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Norte.

4.3.1.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 28.5 MPa y una desviación estándar de 2.9 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11 y, el hormigón debe diseñarse para una resistencia $f_c + tS = 28.7$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.99.

Tabla 4.99 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media	Resistencia requerida
			f_m [MPa]	$f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.7	117	29.2	29.8
caso 2	3.0	113	28.8	28.9
caso 3	2.9	94	28.5	28.7

Del Gráfico 4.37 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 16 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 3 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 3 puntos de cambio en el periodo aproximado de tres años. En el Gráfico 4.38 se presenta los 3 subperiodos con mayor detalle.

4.3.1.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por debajo a la resistencia requerida en 0.2 MPa ($f_m = 28.5$ MPa y $f_c + tS = 28.7$ MPa), por lo tanto, existe el riesgo de que el hormigón no cumpla con la normativa en cuanto a resistencia resultando una fracción defectuosa mayor. Debido a esto, del Gráfico 4.37 se tiene que tres muestras no cumplen con la condición límite de resistencia media móvil. Sin embargo, este porcentaje de no cumplimiento del 3% se considera dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición dada para la resistencia individual, se observa que, para el caso 3, todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.100.

Tabla 4.100 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° muestras	Muestras [%]	N° muestras	Muestras [%]
caso 1	4	3	1	1
caso 2	4	4	1	1
caso 3	3	3	0	0

4.3.1.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

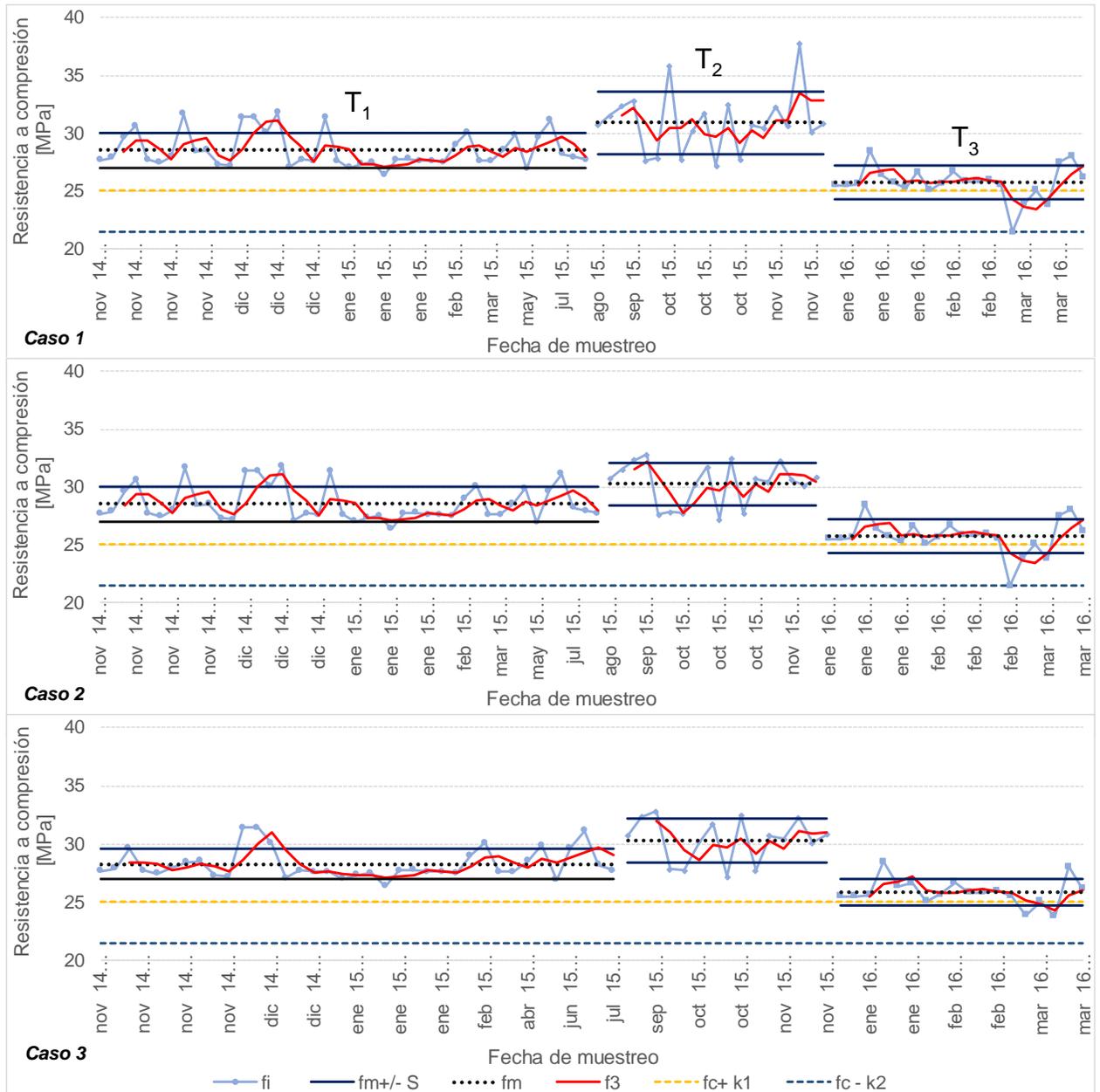


Gráfico 4.38 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Norte.

4.3.1.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.101 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.2 y 1.9 MPa, con un promedio de 1.4 MPa, según Tabla 4.102. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.101 Resultados del análisis de subperiodos HB30 (10) 20/10, Planta C-Norte.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T₁	caso 1	1.5	42	28.6	27.0
	caso 2	1.5	42	28.6	27.0
	caso 3	1.3	37	28.3	26.6
T₂	caso 1	2.7	20	30.9	28.6
	caso 2	1.9	18	30.3	27.5
	caso 3	1.9	15	30.3	27.6
T₃	caso 1	1.5	22	25.7	26.9
	caso 2	1.5	22	25.7	26.9
	caso 3	1.2	18	25.9	26.6

Tabla 4.102 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	1.9
caso 2	1.6
caso 3	1.4

En la Tabla 4.103 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los 3 subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos es 2.2 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón originada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 4.4 MPa.

Tabla 4.103. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	28.4	2.6
caso 2	28.2	2.3
caso 3	28.2	2.2

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad en cuanto a su dosificación ($S_{fm} = 2.2$ MPa), y una baja variabilidad asociada al proceso mismo de confección ($S_{promedio} = 1.4$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor levemente mayor a la desviación de la resistencia media de los subperiodos (según caso 3, $S = 2.9$ MPa y $S_{fm} = 2.2$ MPa), aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (28.5 MPa y 28.2 MPa, respectivamente). Esta similitud en ambas desviaciones se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad de la dosificación, pasando inadvertida la variabilidad básica del proceso, debido a que esta última es menor ($S_{promedio} = 1.4$ MPa). Sin embargo, la diferencia en ambos valores de desviación estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen al menos 3 puntos de cambio o periodos de ajuste, llegando incluso a variaciones en la resistencia cercanas a 7 MPa, en el periodo posterior a T_3 . Estas variaciones en los periodos de ajuste no se consideran al analizar los subperiodos (ver Gráfico 4.37).

4.3.1.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.101 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 y T_2 presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 1.7 y 2.7 MPa, respectivamente, lo que implica una dosificación ajustada. Las muestras pertenecientes al subperiodo T_3 , presentan resistencias medias por debajo a la resistencia requerida en 0.7 MPa, por lo tanto, tienen una dosificación límite que se considera como óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada el 35% del tiempo estudiado y una dosificación óptima durante un 7% del tiempo. El periodo de ajuste representa el 58% del tiempo. Ver Tabla 4.104.

Tabla 4.104 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	35
Óptima	7
Límite	-
Periodo de ajuste	58

4.3.1.2 Hormigón HB40 (10) 20/10 de Planta C-Norte, Hormigonera C

4.3.1.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

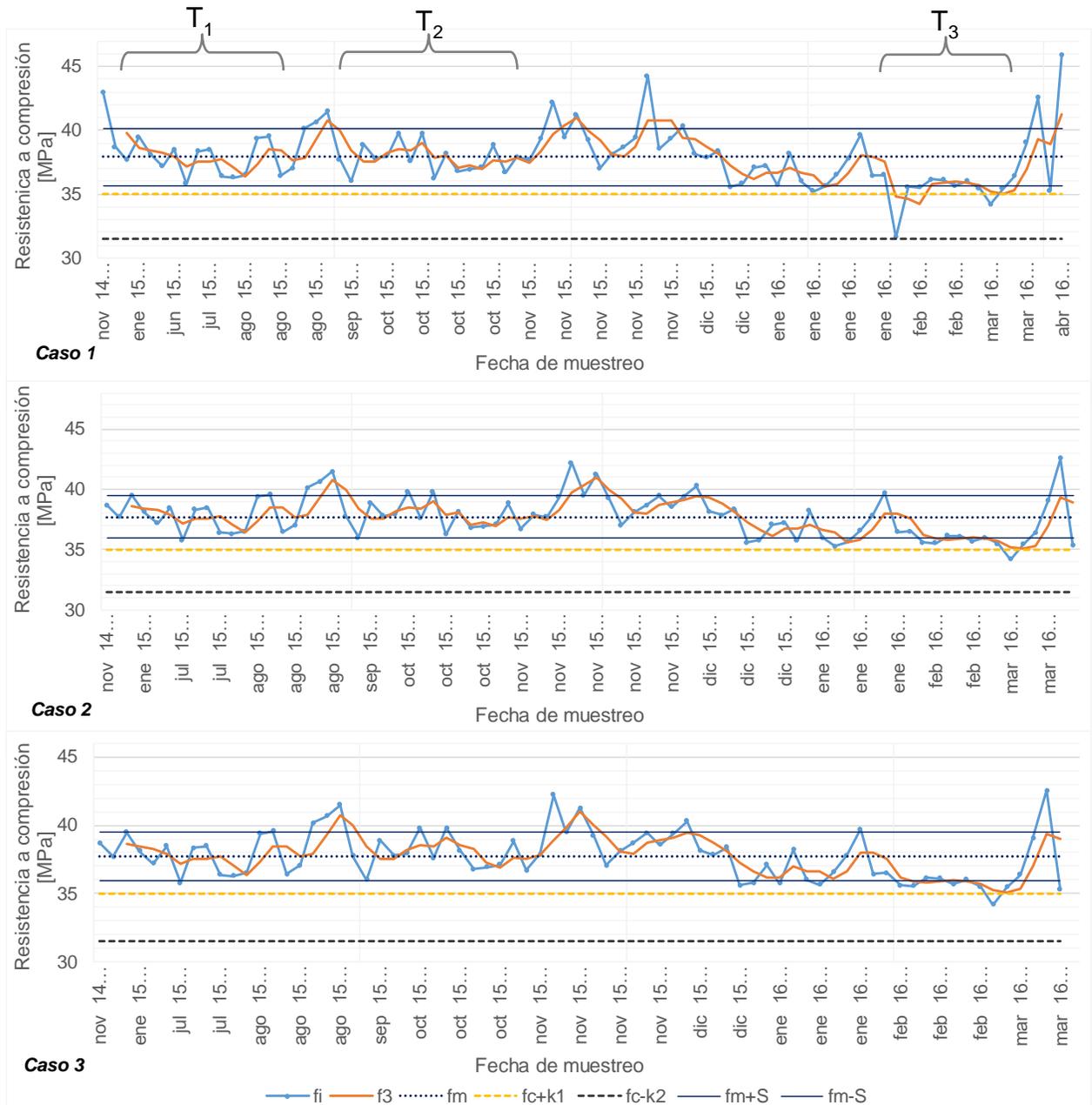


Gráfico 4.39 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta C-Norte.

4.3.1.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 37.8 MPa y una desviación estándar de 1.8 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad excelente según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 37.3$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.105.

Tabla 4.105 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	2.2	82	37.9	37.9
caso 2	1.8	78	37.7	37.3
caso 3	1.8	73	37.8	37.3

Del Gráfico 4.39 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 9 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 3 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre al menos 4 puntos de cambio, donde la resistencia media disminuye o aumenta. En el Gráfico 4.40 se presenta los 3 subperiodos con mayor detalle.

4.3.1.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.5 MPa ($f_m = 37.8$ MPa y $f_c + tS = 37.3$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.39 se observa que, para el caso 3, todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.106.

Tabla 4.106 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta C-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	3	4	0	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.3.1.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

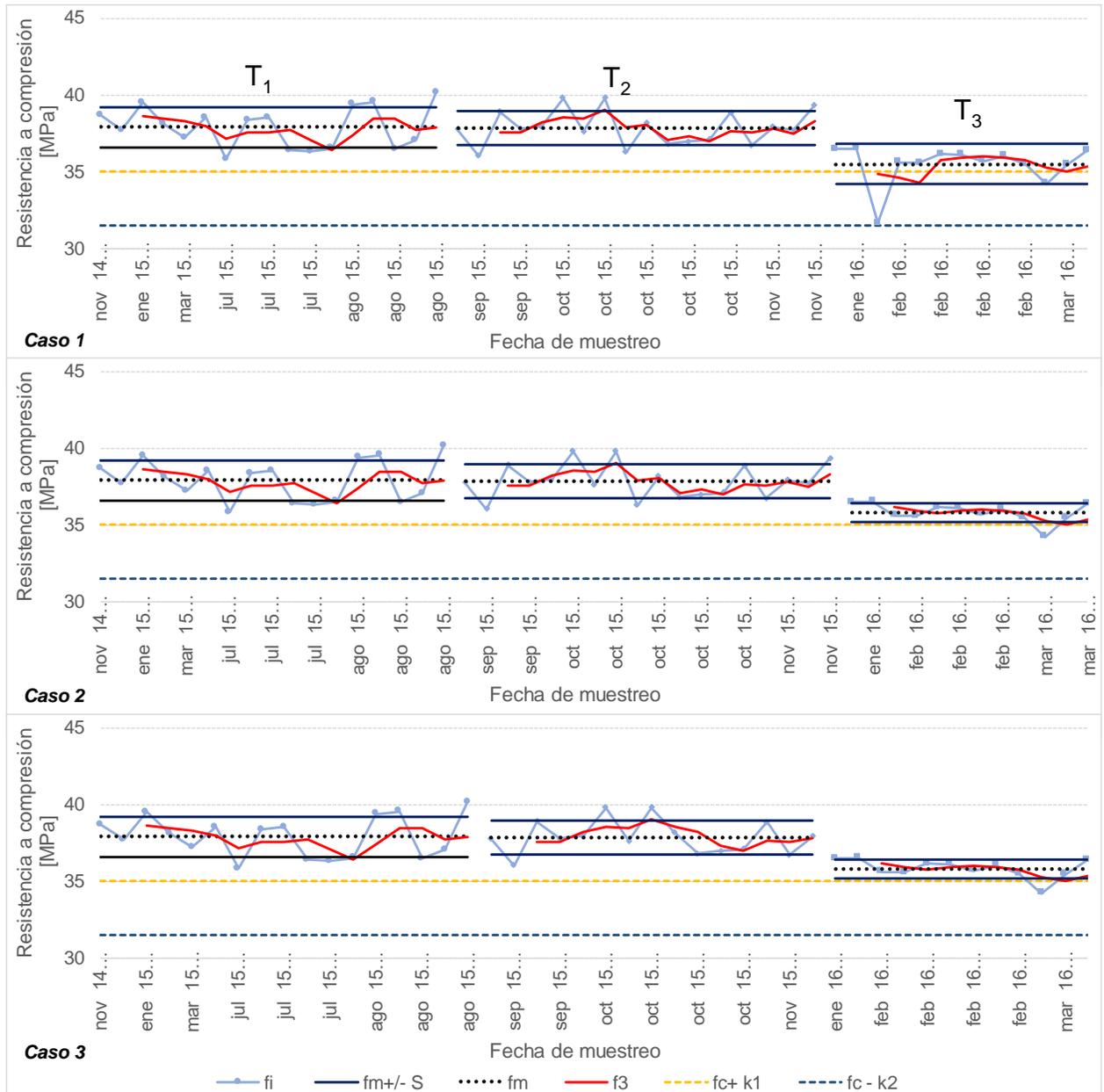


Gráfico 4.40 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta C-Norte.

4.3.1.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.107 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 0.6 y 1.3 MPa, con un promedio de 1.1 MPa según Tabla 4.108. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.107 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta C-Norte.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T₁	caso 1	1.3	17	37.9	36.8
	caso 2	1.3	17	37.9	36.8
	caso 3	1.3	17	37.9	36.8
T₂	caso 1	1.1	18	37.9	36.5
	caso 2	1.1	18	37.9	36.5
	caso 3	1.1	15	37.9	36.5
T₃	caso 1	1.3	13	35.5	36.8
	caso 2	0.6	12	35.8	35.9
	caso 3	0.6	12	35.8	35.9

Tabla 4.108 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	1.3
caso 2	1.1
caso 3	1.1

En la Tabla 4.109 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos es 1.2 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 2.1 MPa.

Tabla 4.109. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	S f_m [MPa]
caso 1	37.1	1.4
caso 2	37.2	1.2
caso 3	37.2	1.2

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad, tanto asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 1.1 \text{ MPa}$) como a su dosificación ($S_{\text{fm}} = 1.2 \text{ MPa}$). Por lo tanto, su dosificación es prácticamente constante.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia media de los subperiodos y al promedio de desviación de resistencia individual de los subperiodos (según caso 3, $S = 1.8 \text{ MPa}$, $S_{\text{fm}} = 1.2 \text{ MPa}$ y $S_{\text{promedio}} = 1.1 \text{ MPa}$), aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (37.3 MPa y 37.2 MPa, respectivamente). La desviación estándar levemente mayor se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no se consideran al analizar los subperiodos.

4.3.1.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.107 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 y T_2 presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 1.1 y 1.4 MPa, respectivamente, por lo tanto, tienen una dosificación ajustada, que se podría considerar óptima. Las muestras pertenecientes al subperiodo T_3 presenta una resistencia media menor a la requerida en 0.1 MPa, por lo que su dosificación es límite, pero también se considera óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación óptima el 80% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 20% del tiempo. Ver Tabla 4.110.

Tabla 4.110 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificación de Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	-
Óptima	80
Límite	-
Periodo de ajuste	20

4.3.1.3 Hormigón HB35 (10) 20/10 de Planta C-Norte, Hormigonera C

4.3.1.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

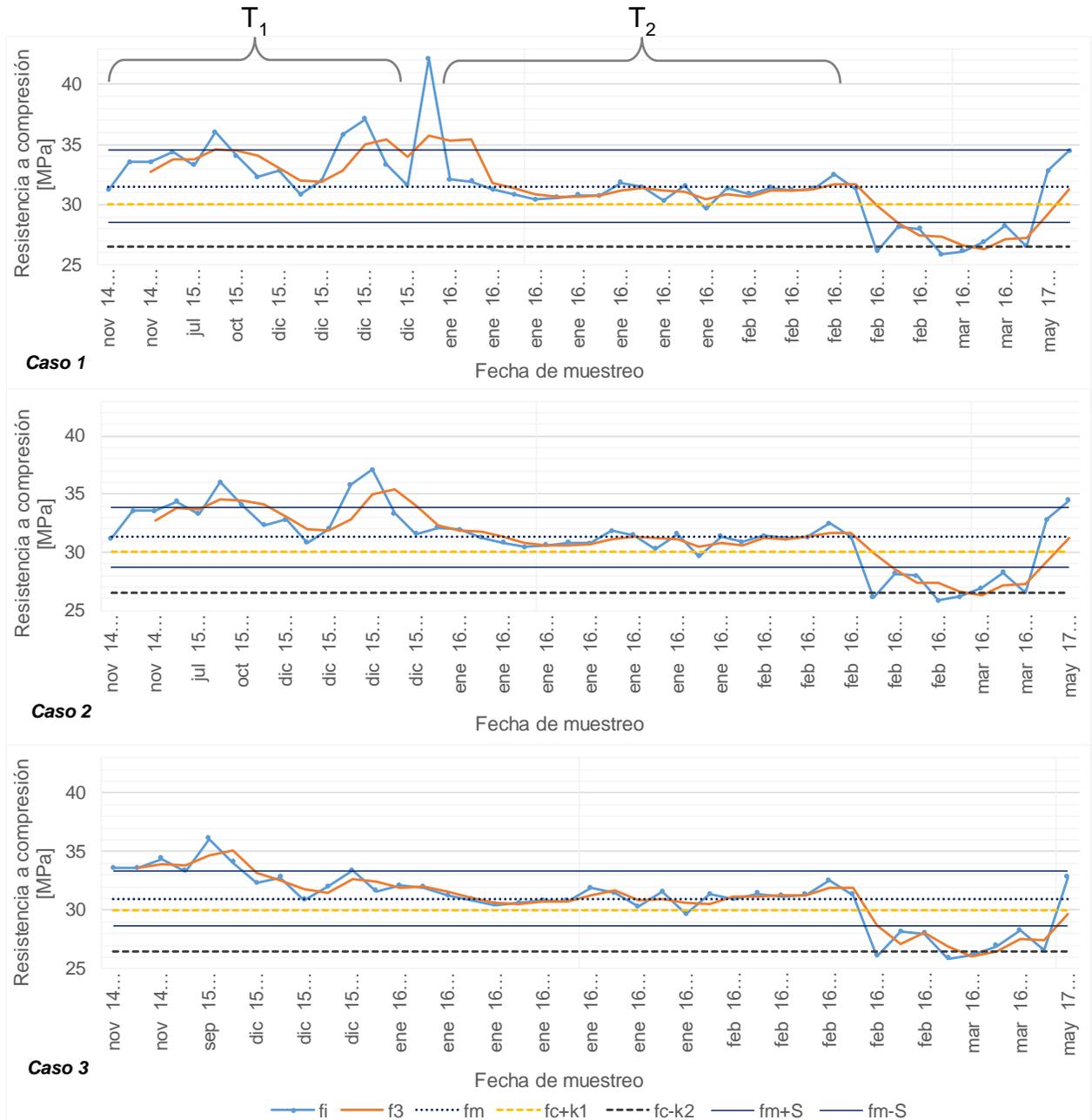


Gráfico 4.41 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-Norte.

4.3.1.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 31 MPa y una desviación estándar de 2.4 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de

calidad excelente según código ACI 214R-11 y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 33$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.111.

Tabla 4.111 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.0	46	31.5	33.9
caso 2	2.6	45	31.3	33.3
caso 3	2.4	41	31.0	33.0

Del Gráfico 4.41 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 10 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre al menos 2 puntos de cambio, donde la resistencia media disminuye o aumenta. En el Gráfico 4.42 se presenta los 2 subperiodos con mayor detalle.

4.3.1.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por debajo a la resistencia requerida en 2 MPa ($f_m = 31$ MPa y $f_c + tS = 33$ MPa), por lo tanto, existe riesgo de que el hormigón no cumpla con la resistencia según normativa, resultando una fracción defectuosa mayor. Del Gráfico 4.41 se observa que, durante febrero a marzo de 2016, se produce una baja en la resistencia media, resultando que 9 muestras no cumplan con la condición límite de resistencia media móvil. Por lo tanto, para el caso 3, el 22% de las muestras no cumplen con la resistencia, lo que supera la fracción defectuosa que puede presentar este hormigón. Respecto a la condición dada para la resistencia individual, se observa que, en este mismo periodo, 3 muestras no la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.112.

Tabla 4.112 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	9	20	3	7
caso 2	9	20	3	7
caso 3	9	22	3	7

4.3.1.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

Se presentan solo los casos 1 y 3, debido a que el caso 2 no considera muestras a descartar en los subperiodos.

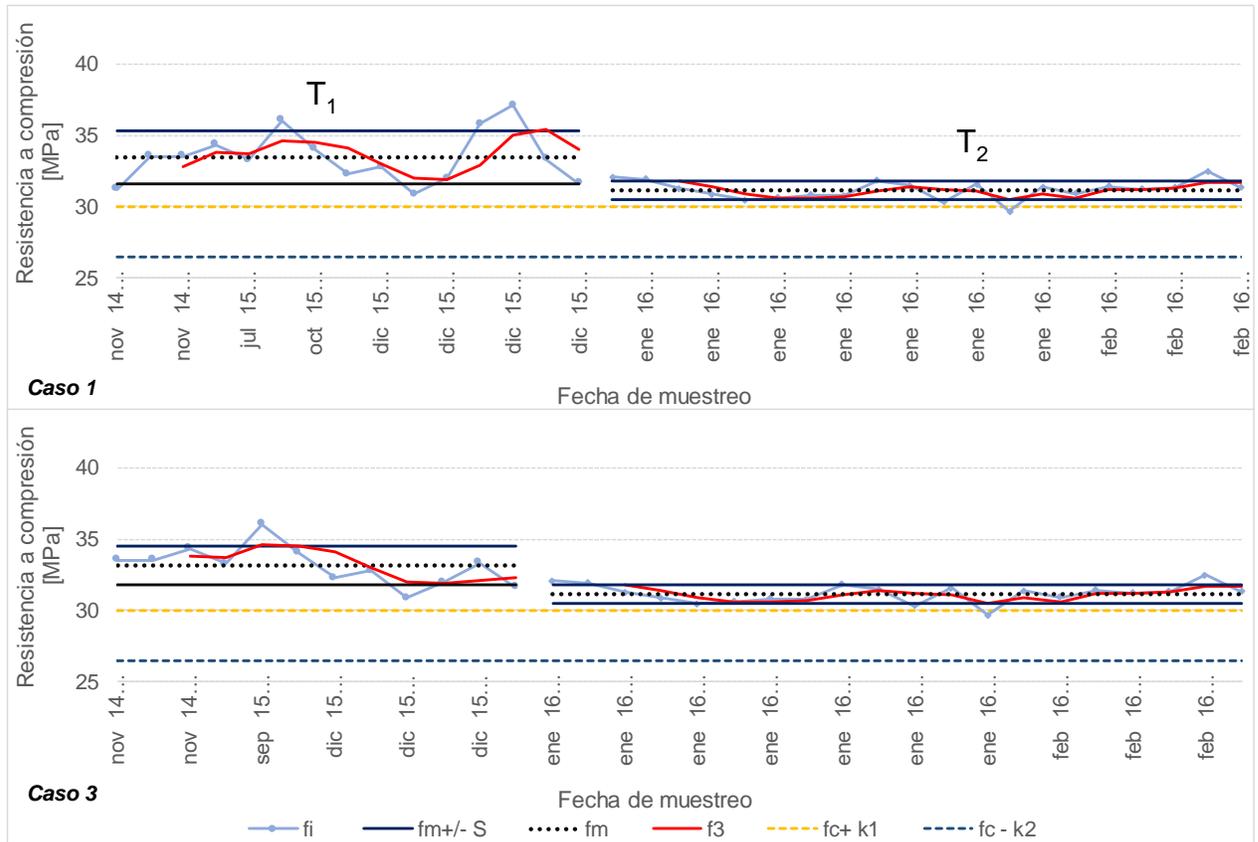


Gráfico 4.42 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-Norte.

4.3.1.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.113 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos T_1 y T_2 es 1.4 y 0.7 MPa, respectivamente, con un promedio de 1.0 MPa según Tabla 4.114. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.113 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Nº subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T_1	caso 1	1.8	15	33.5	32.4
	caso 3	1.4	12	33.1	31.9
T_2	caso 1	0.7	20	31.2	30.9
	caso 3	0.7	20	31.2	30.9

Tabla 4.114 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	1.3
caso 3	1.0

En la Tabla 4.115 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 1.4 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón originada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T_1 y T_2 , las muestras difieren en sus resistencias medias en 1.9 MPa.

Tabla 4.115. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	32.3	1.6
caso 3	32.2	1.4

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad, tanto asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 1.0$ MPa) como a su dosificación ($S_{f_m} = 1.4$ MPa). Por lo tanto, su dosificación es prácticamente constante.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia media de los subperiodos y al promedio de desviación de resistencia individual de los subperiodos (según caso 3, $S = 2.4$ MPa, $S_{f_m} = 1.4$ MPa y $S_{\text{promedio}} = 1.4$ MPa), y además la resistencia media del total de muestras es menor al promedio de la resistencia media de los subperiodos (31.0 MPa y 32.2 MPa, respectivamente). Esta diferencia en ambos valores se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no se consideran al analizar los subperiodos. Un ejemplo de esto, es el periodo de febrero a marzo de 2016, que presenta una baja en la resistencia media, por debajo del límite normativo (ver Gráfico 4.41).

4.3.1.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.113 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 1.2 MPa, presentando una dosificación ajustada, que se considera como óptima, y las muestras pertenecientes al subperiodo T_2 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 0.3 MPa, lo que implica una dosificación también óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación óptima el 73% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 27% del tiempo. Ver Tabla 4.116.

Tabla 4.116 Fracción de tiempo que presentan los distintos tipos de dosificación Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	-
Óptima	73
Límite	-
Periodo de ajuste	27

4.3.2 Comentarios Planta C-Norte

Sus hormigones presentan una variabilidad general baja a media, asociada a su proceso de confección y a sus periodos de ajuste, además, presentan una dosificación prácticamente constante. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 16 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad que presentan.

Se observa que las fechas en que se presenta cambios en la resistencia media coinciden en los 3 hormigones, por lo tanto, podría atribuirse a una variación de alguna materia prima que utiliza la planta para confeccionar sus hormigones. Por ejemplo, en agosto de 2015 y noviembre de 2015, se observan muestras con resistencias altas en los hormigones HB30 y HB40, los que no se identifican claramente en el hormigón HB35 porque presenta una baja frecuencia de ensayos en esa fecha. En el periodo de enero a marzo de 2016 se observa un baja en la resistencia en los 3 hormigones, seguido de un aumento constante de la resistencia a partir de marzo de 2016, seguramente debido a un ajuste de dosificación para compensar esta variación. Estas alzas y bajas en la resistencia tienen una duración cercana a un mes, lo que indica que una vez detectadas la planta reacciona frente a estas variaciones mediante ajustes en su dosificación, cuando se produce un alza en la resistencia luego se produce una baja, y cuando se produce una baja en la resistencia, ésta es seguida por un alza continua en la resistencia.

Los hormigones de esta planta presentan mayoritariamente dosificaciones óptimas y ajustadas. Además, presentan periodos con dosificación cercana al límite, causados principalmente por variaciones en sus materias primas, por ejemplo, en una disminución de la calidad del cemento.

4.3.3 Planta C-RM

4.3.3.1 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta C-RM, Hormigonera C

4.3.3.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

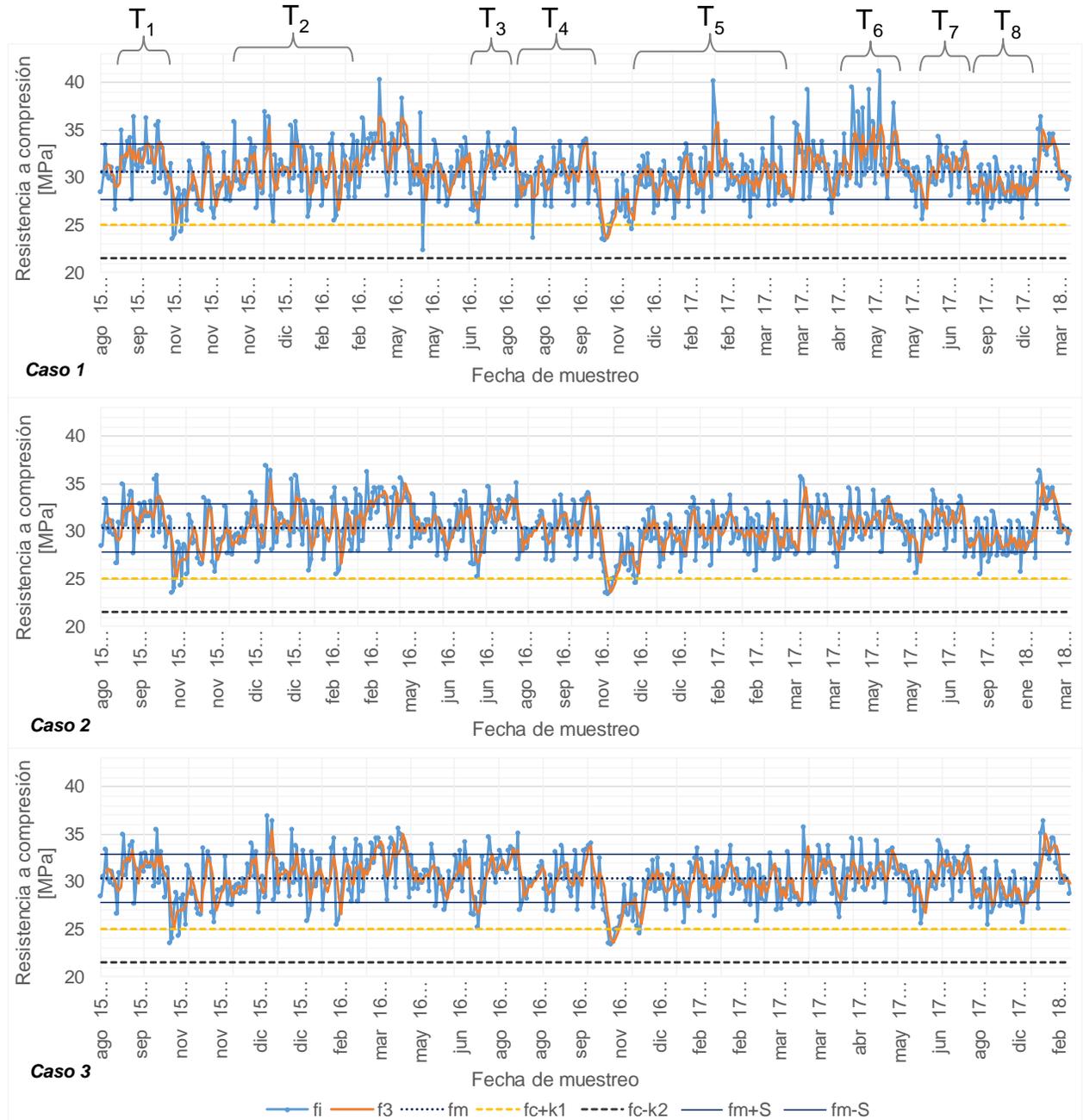


Gráfico 4.43 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-RM.

4.3.3.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 30.3 MPa y una desviación estándar de 2.5 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad excelente según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 28.2$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.117.

Tabla 4.117 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media	Resistencia requerida
			f_m [MPa]	$f_c + tS$ [MPa]
caso 1	2.9	474	30.6	28.8
caso 2	2.6	454	30.4	28.3
caso 3	2.5	438	30.3	28.2

Del Gráfico 4.43 se observa, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 13 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 8 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 9 puntos de cambio o periodos de ajuste durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.44 se presenta los 8 subperiodos con mayor detalle.

4.3.3.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 2.1 MPa ($f_m = 30.3$ MPa y $f_c + tS = 28.2$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.43 se observa un periodo de ajuste durante noviembre de 2016, cuya resistencia media es cercana al límite normativo. En este periodo cuatro muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento del 1% está dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición de resistencia individual, todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.118.

Tabla 4.118 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB30 (10) 20/10, Planta C-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	4	1	0	0
caso 2	4	1	0	0
caso 3	4	1	0	0

4.3.3.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

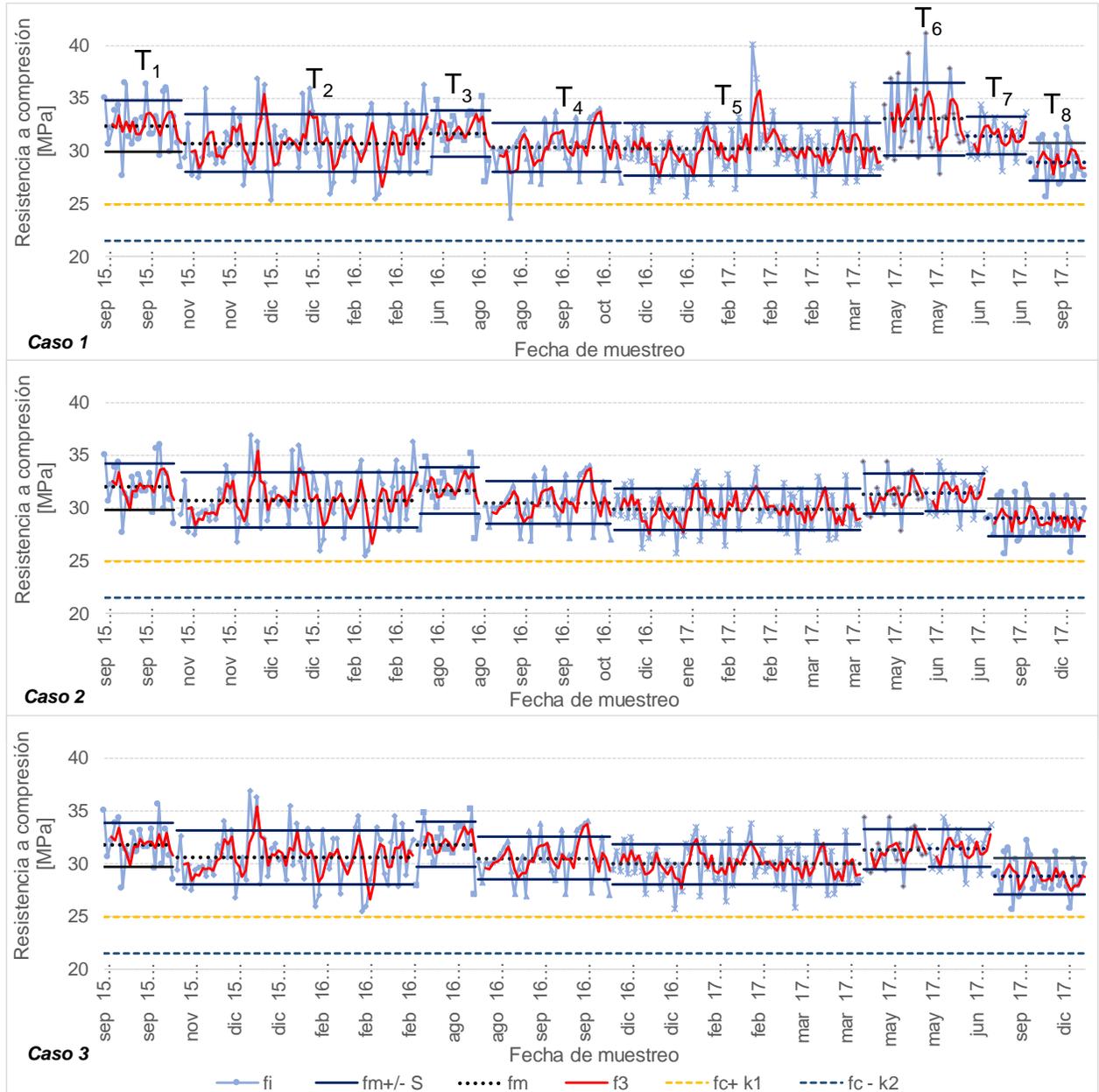


Gráfico 4.44 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-RM.

4.3.3.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.119 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.7 a 2.5 MPa, con un promedio de

2.1 MPa según Tabla 4.120. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.119 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T₁	caso 1	2.5	23	32.4	28.3
	caso 2	2.2	21	32.0	28.0
	caso 3	2.1	20	31.8	27.8
T₂	caso 1	2.8	71	30.8	28.5
	caso 2	2.7	69	30.8	28.4
	caso 3	2.5	66	30.6	28.3
T₃	caso 1	2.2	18	31.7	27.9
	caso 2	2.2	18	31.7	27.9
	caso 3	2.2	17	31.8	27.9
T₄	caso 1	2.3	38	30.3	28.0
	caso 2	2.0	37	30.5	27.6
	caso 3	2.0	37	30.5	27.6
T₅	caso 1	2.5	75	30.2	28.2
	caso 2	2.0	72	29.9	27.5
	caso 3	1.9	69	29.9	27.5
T₆	caso 1	3.5	24	33.0	29.6
	caso 2	1.9	18	31.4	27.5
	caso 3	1.9	18	31.4	27.4
T₇	caso 1	1.8	18	31.5	27.4
	caso 2	1.8	18	31.5	27.4
	caso 3	1.8	18	31.5	27.4
T₈	caso 1	1.8	29	28.9	27.3
	caso 2	1.8	29	29.1	27.4
	caso 3	1.7	26	28.8	27.3

Tabla 4.120 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-RM.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	2.5
caso 2	2.2
caso 3	2.1

En la Tabla 4.121, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la

resistencia media es 1.0 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 3 MPa.

Tabla 4.121 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{fm} [MPa]
caso 1	31.1	1.3
caso 2	30.8	1.0
caso 3	30.8	1.0

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{promedio} = 2.1$ MPa) y una baja variabilidad asociada a su dosificación ($S_{fm} = 1.0$ MPa). Por lo tanto, su dosificación es prácticamente constante.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor levemente mayor a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 2.5$ MPa y $S_{promedio} = 2.1$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (30.3 MPa y 30.8 MPa, respectivamente). Esta pequeña diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, entre noviembre y diciembre de 2016, donde se presenta una baja de resistencia por debajo del límite normativo. También se tienen los periodos de noviembre de 2015, y enero a marzo de 2018, que presentan resistencias medias bajas y altas, respectivamente (ver Gráfico 4.43).

4.3.3.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.119 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_7 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 4.1 MPa, lo que implica que se tiene una dosificación holgada, pero que se considera ajustada. Las muestras pertenecientes al resto de los subperiodos, presentan resistencias medias entre 1.5 a 4.1 MPa por sobre a la requerida, lo que representa una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada que representa el 61% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 39% del tiempo. Ver Tabla 4.122.

Tabla 4.122 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	61
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	39

4.3.3.2 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta C-RM, Hormigonera C

4.3.3.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

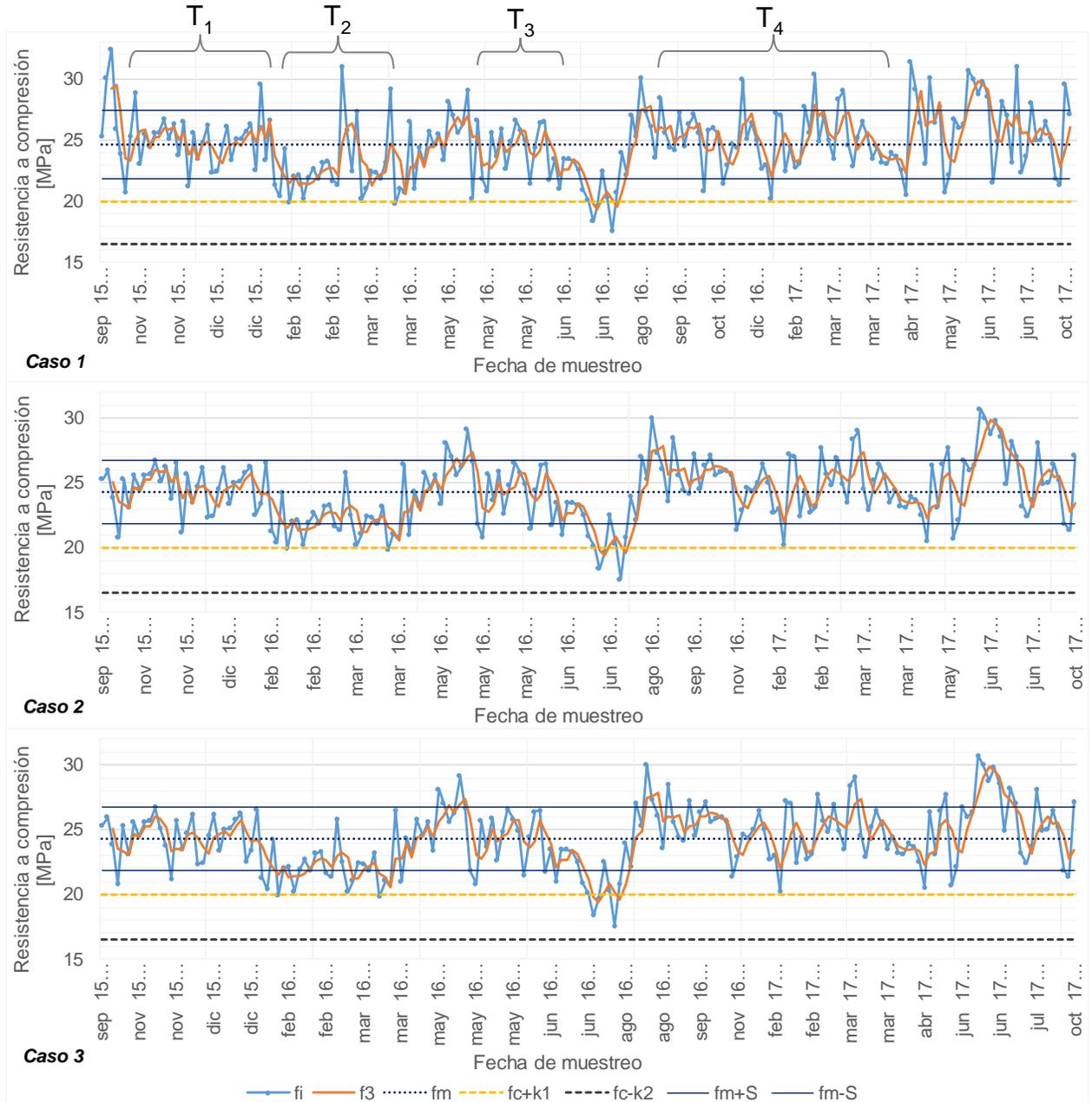


Gráfico 4.45 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-RM.

4.3.3.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 24.3 MPa y una desviación estándar de 2.5 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad excelente según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia $f_c + tS = 23.2$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.123.

Tabla 4.123 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media	Resistencia requerida
			f_m [MPa]	$f_c + tS$ [MPa]
caso 1	2.8	202	24.6	23.6
caso 2	2.5	185	24.3	23.2
caso 3	2.5	183	24.3	23.2

Del Gráfico 4.45 se observa, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 13 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 4 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 7 puntos de cambio o periodos de ajuste. En el Gráfico 4.46 se presenta los 4 subperiodos con mayor detalle.

4.3.3.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 1.1 MPa ($f_m = 24.3$ MPa y $f_c + tS = 23.2$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, en el Gráfico 4.45 se observa que, durante junio de 2016, se produce un periodo de ajuste cuya resistencia media es cercana al límite normativo. En este periodo tres muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento del 2% está dentro del 10% de fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición de resistencia individual, se tiene que todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.124.

Tabla 4.124 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	3	1	0	0
caso 2	3	2	0	0
caso 3	3	2	0	0

4.3.3.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

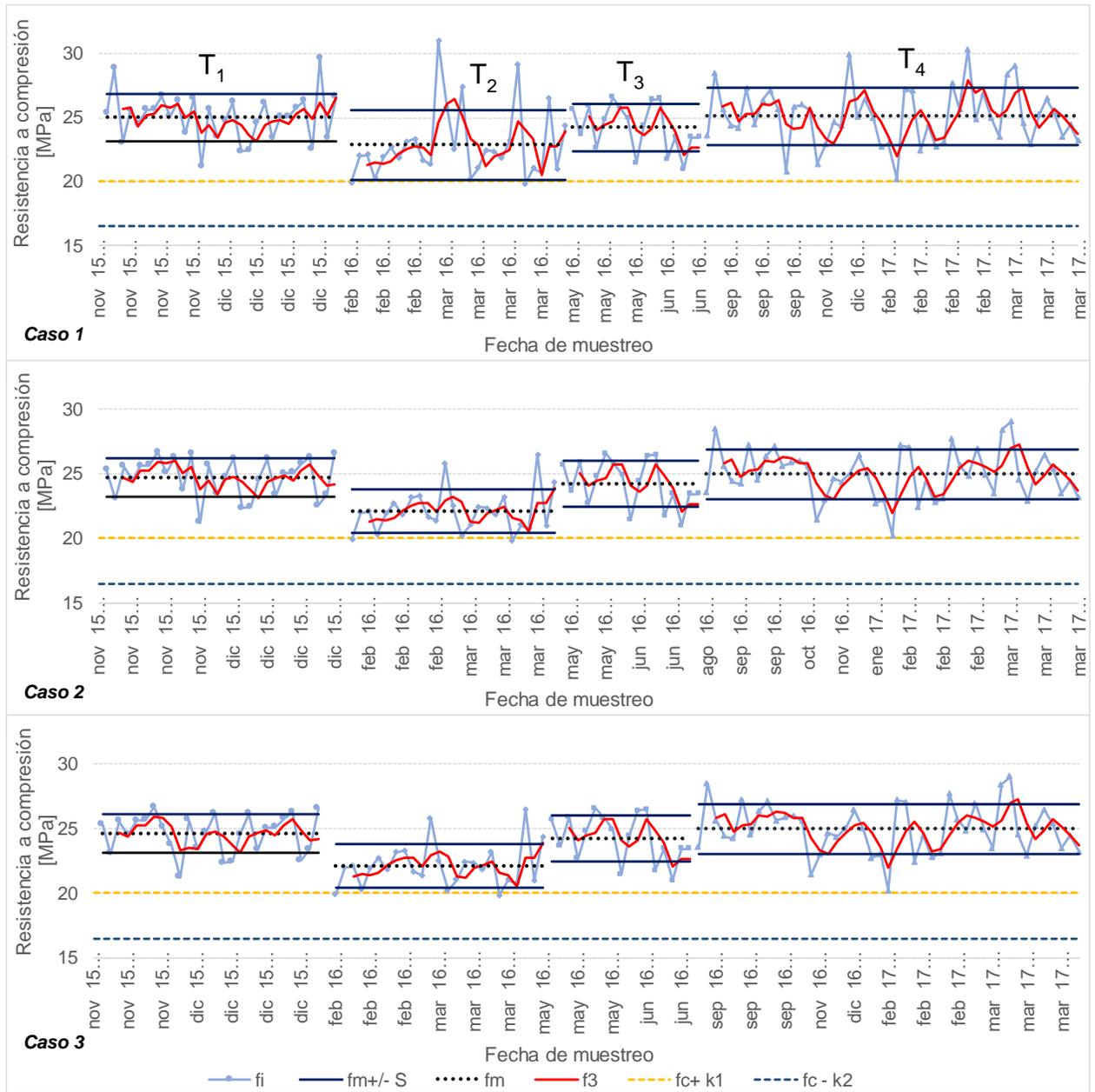


Gráfico 4.46 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-RM.

4.3.3.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.125 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.5 a 1.9 MPa, con un promedio de 1.8 MPa, según Tabla 4.126. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.125 Resultados del análisis de subperiodos HB25 (10) 20/10, Planta C-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T₁	caso 1	1.9	30	25.0	22.4
	caso 2	1.5	28	24.7	22.0
	caso 3	1.5	26	24.6	22.0
T₂	caso 1	2.8	28	22.9	23.6
	caso 2	1.7	25	22.1	22.2
	caso 3	1.7	25	22.1	22.2
T₃	caso 1	1.8	17	24.2	22.4
	caso 2	1.8	17	24.2	22.4
	caso 3	1.8	17	24.2	22.4
T₄	caso 1	2.2	48	25.1	22.8
	caso 2	1.9	45	25.0	22.5
	caso 3	1.9	45	25.0	22.5

Tabla 4.126 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-RM.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	2.2
caso 2	1.8
caso 3	1.8

En la Tabla 4.127, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media de estos subperiodos es 1.3 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 2.9 MPa.

Tabla 4.127 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	24.3	1.0
caso 2	24.0	1.3
caso 3	24.0	1.3

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 1.8$ MPa) y una baja variabilidad debido a su dosificación ($S_{f_m} = 1.3$ MPa). Por lo tanto, su dosificación es prácticamente constante.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor levemente mayor a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 2.5$ MPa y $S_{\text{promedio}} = 1.8$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (24.3 MPa y 24.0 MPa, respectivamente). Esta pequeña diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste o puntos de cambio que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, en junio de 2016, y junio de 2017, donde se presentan las resistencias medias más bajas, y más altas, respectivamente (ver Gráfico 4.45).

4.3.3.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.125 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 , T_3 y T_4 presentan resistencias medias por sobre a la requerida entre 1.8 a 2.6 MPa, lo que implica una dosificación ajustada. Las muestras pertenecientes al subperiodo T_2 , presentan una resistencia media por debajo a la requerida en 0.1 MPa, lo que representa una dosificación límite, pero que se considera como óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada que representa un 35% y una dosificación óptima durante un 10% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 55% del tiempo. Ver Tabla 4.128.

Tabla 4.128 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	35
Óptima	10
Límite	-
Periodo de ajuste	55

4.3.3.3 Hormigón HB35 (10) 20/10 de Planta C-RM, Hormigonera C

4.3.3.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

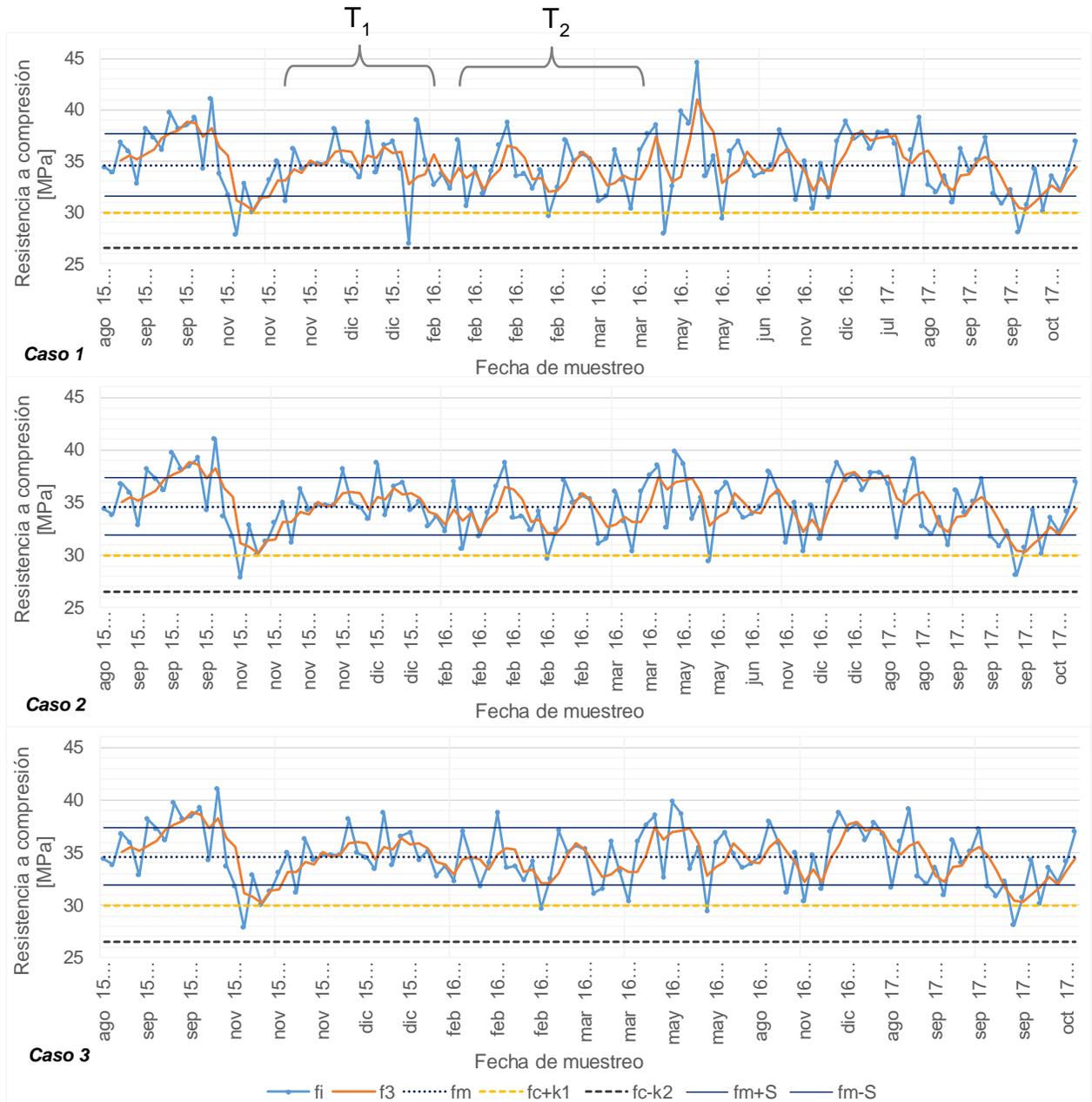


Gráfico 4.47 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-RM.

4.3.3.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 34.6 MPa y una desviación estándar de 2.7 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad excelente según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 33.5$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.129.

Tabla 4.129 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.0	119	34.6	33.9
caso 2	2.8	115	34.6	33.5
caso 3	2.7	112	34.6	33.5

Del Gráfico 4.47 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 13 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.48 se presenta los 2 subperiodos con mayor detalle.

4.3.3.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 1.1 MPa ($f_m = 34.6$ MPa y $f_c + tS = 33.5$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.47 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.130.

Tabla 4.130 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.3.3.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

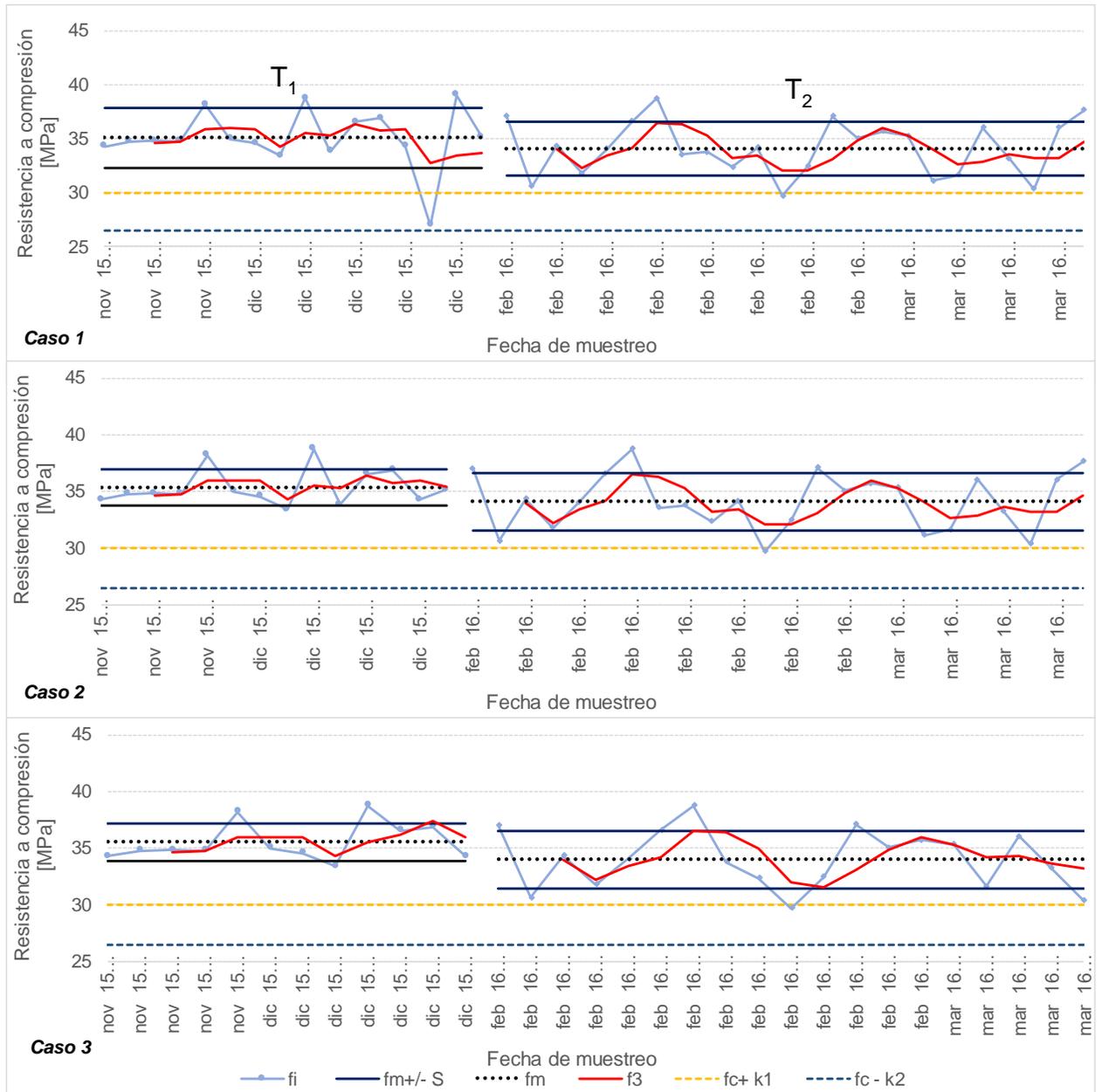


Gráfico 4.48 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-RM.

4.3.3.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.131 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.7 y 2.6 MPa, con un promedio de 2.3 MPa según Tabla 4.132. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.131 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.8	16	35.1	33.7
	caso 2	1.6	14	35.4	32.2
	caso 3	1.7	12	35.5	32.3
T ₂	caso 1	2.5	24	34.1	33.3
	caso 2	2.5	24	34.1	33.3
	caso 3	2.6	19	34.0	33.4

Tabla 4.132 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-RM.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	2.6
caso 2	2.2
caso 3	2.3

En la Tabla 4.133, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 1.1 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T₁ y T₂, las muestras difieren en sus resistencias medias en 1.5 MPa.

Tabla 4.133 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S _{fm} [MPa]
caso 1	34.6	0.7
caso 2	34.7	0.7
caso 3	34.8	1.1

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{promedio} = 2.3$ MPa) y una baja variabilidad debido a su dosificación ($S_{fm} = 1.1$ MPa). Por lo tanto, su dosificación permanece prácticamente constante.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor muy cercano a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 2.7$ MPa y $S_{promedio} = 2.3$ MPa), así como también, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (34.6 MPa y 34.8 MPa, respectivamente). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad básica dada por la confección del hormigón, debido a la que la dosificación permanece invariable. Sin embargo, esta pequeña diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, en los periodos de agosto a septiembre de 2015, y

septiembre de 2017, donde se presentan las resistencias medias más bajas, y más altas, respectivamente (ver Gráfico 4.47).

4.3.3.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.131 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T₁ presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 3.2 MPa, lo que representa una dosificación ajustada. Las muestras pertenecientes al subperiodo T₂, presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 0.6 MPa, lo que implica que su dosificación es óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada que representa un 14% y una dosificación óptima durante un 4% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 82% del tiempo. Ver Tabla 4.134.

Tabla 4.134 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta C-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	14
Óptima	4
Límite	-
Periodo de ajuste	82

4.3.4 Comentarios Planta C-RM

Sus hormigones presentan una variabilidad general baja, asociada a su proceso de confección, y su dosificación es prácticamente constante, además presentan periodos de ajuste, los que contribuyen muy poco en aumentar la variabilidad. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 13 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad que presentan.

Se observa que las fechas en que se presenta cambios en la resistencia media coinciden en los 3 hormigones, por lo tanto, podría atribuirse a una variación del cemento que utiliza la planta para confeccionar sus hormigones. Por ejemplo, en septiembre de 2015 y mayo de 2016, se observan muestras con resistencias altas y en noviembre a diciembre de 2016 una baja en la resistencia en los 3 hormigones. Los hormigones HB30 y HB25 presentan una baja en la resistencia en junio de 2016, y en mayo de 2017, un alza en las resistencias. Esto último no se observa en el hormigón HB35 debido a que no presenta resultados de ensayo en estas fechas. Estas alzas y bajas en la resistencia tienen una duración cercana a un mes, lo que indica que una vez detectadas la planta reacciona frente a estas variaciones mediante ajustes en su dosificación, por lo tanto, cuando se produce un alza en la resistencia luego se tiene una baja, y cuando se produce una baja en la resistencia, ésta es seguida por un alza continua en la resistencia.

Los hormigones de esta planta presentan mayoritariamente dosificaciones ajustadas. Los hormigones además presentan periodos de dosificación óptima con duraciones cercanas a un mes, por lo que están originados por la variación de alguna materia prima. Además, presentan periodos de ajuste entre un 20% a un 80% del tiempo.

4.3.5 Planta C-Sur

4.3.5.1 Hormigón HB35 (5) 20/14 de Planta C-Sur, Hormigonera C

4.3.5.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se presenta solo el caso 1, debido a que no hay muestras que requieran ser descartadas según los casos 2 y 3.

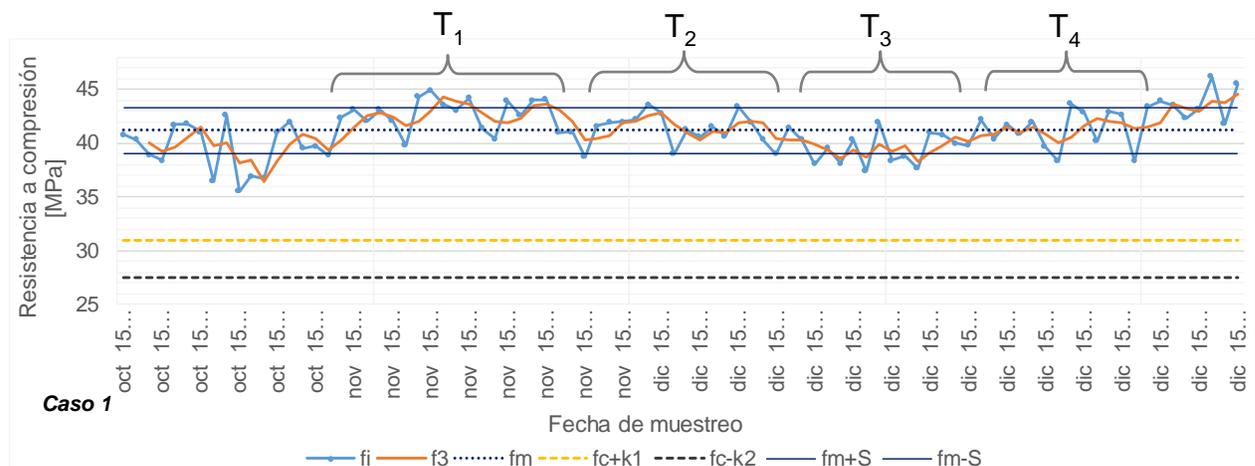


Gráfico 4.49 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB35 (5) 20/14, Planta C-Sur.

4.3.5.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, se tiene una resistencia media de 41.2 MPa y una desviación estándar de 2.2 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad excelente según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 33.5$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.135.

Tabla 4.135 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB35 (5) 20/14, Planta C-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	2.2	88	41.2	33.5

Del Gráfico 4.49 se observa que hay una diferencia de aproximadamente 10 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 4 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos

se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.50 se presenta los 4 subperiodos con mayor detalle.

4.3.5.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 7.6 MPa ($f_m = 41.2$ MPa y $f_c + tS = 33.5$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.49 se observa que todas las muestras cumplen sobradamente con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.136.

Tabla 4.136 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB35 (5) 20/14, Planta C-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° Muestras	Muestras [%]	N° Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0

4.3.5.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

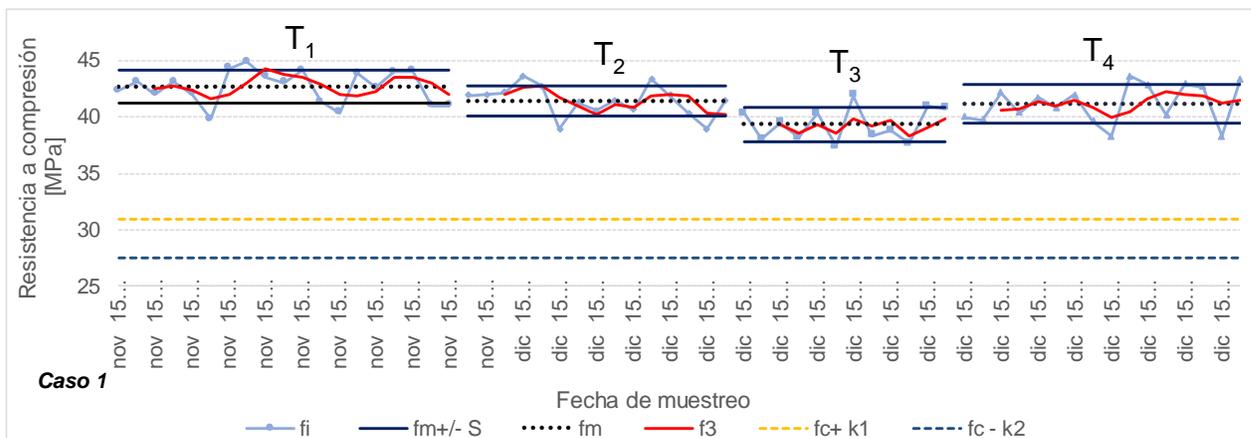


Gráfico 4.50 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB35 (5) 20/14, Planta C-Sur.

4.3.5.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.137 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.4 y 1.7 MPa, con un promedio de 1.4 MPa según Tabla 4.138. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.137 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB35 (5) 20/14, Planta C-Sur.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	1.4	19	42.7	32.5
T ₂	caso 1	1.4	15	41.4	32.4
T ₃	caso 1	1.5	12	39.3	32.7
T ₄	caso 1	1.7	16	41.2	33.0

Tabla 4.138. Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB35 (5) 20/14, Planta C-Sur.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	1.4

En la Tabla 4.139 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 1.4 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 3.4 MPa.

Tabla 4.139. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB35 (5) 20/14, Planta C-Sur.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	41.2	1.4

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso mismo de confección ($S = 1.4$ MPa) y a su dosificación ($S_{f_m} = 1.4$ MPa). Por lo tanto, su dosificación es prácticamente constante.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor levemente mayor a la desviación de la resistencia individual y de la resistencia media de los subperiodos ($S = 2.2$ MPa, $S_{\text{promedio}} = 1.4$ MPa y $S_{f_m} = 1.4$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es igual al promedio de la resistencia media de los subperiodos (41.2 MPa). Esta pequeña diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, previo al subperiodo T₁ y posterior al subperiodo T₄ (ver Gráfico 4.49).

4.3.5.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.137 se tiene que las muestras pertenecientes a los 4 subperiodos presentan resistencias medias por sobre a la resistencia requerida entre 6.6 y 10.2 MPa, lo que implica una dosificación holgada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta dosificaciones holgadas durante un 43% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 57% del tiempo. Ver Tabla 4.140.

Tabla 4.140 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB35 (5) 20/14, Planta C-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	43
Ajustada	-
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	57

4.3.5.2 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta C-Sur, Hormigonera C

4.3.5.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se presentan solamente los casos 1 y 2, debido a que no hay muestras que requieran ser descartadas según caso 3.

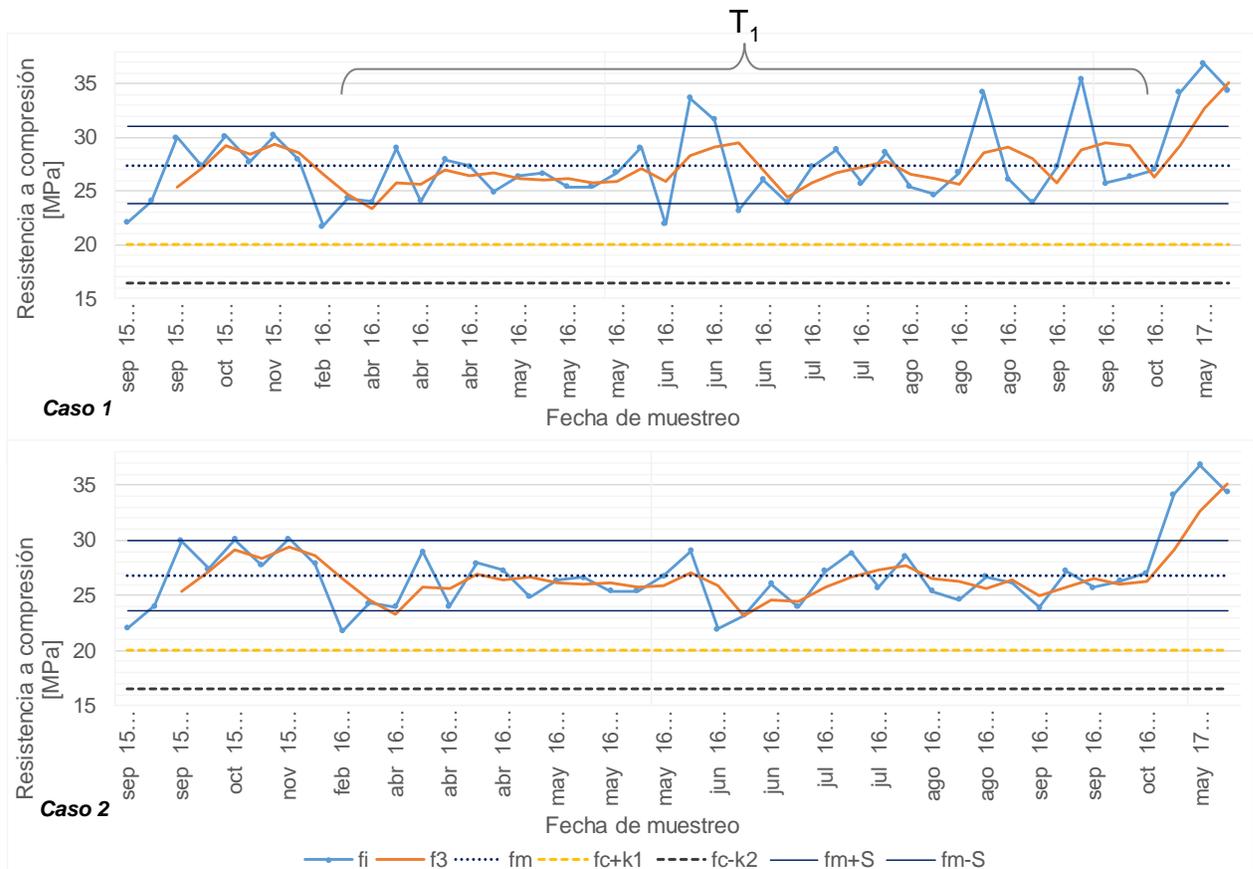


Gráfico 4.51 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-Sur.

4.3.5.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 2, se tiene una resistencia media de 26.8 MPa y una desviación estándar de 3.2 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 24.1$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.141.

Tabla 4.141 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.6	46	27.4	24.7
caso 2	3.2	42	26.8	24.1

Del Gráfico 4.51 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 15 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 1 subperíodo en el que la resistencia media se mantiene constante. Este subperíodo se ubica entre puntos de cambio, donde la resistencia media disminuye y luego aumenta. En el Gráfico 4.52 se presenta el subperíodo con mayor detalle.

4.3.5.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 2.7 MPa ($f_m = 26.8$ MPa y $f_c + tS = 24.7$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.51 se observa que todas las muestras cumplen sobradamente con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.142.

Tabla 4.142 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_1 < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0

4.3.5.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

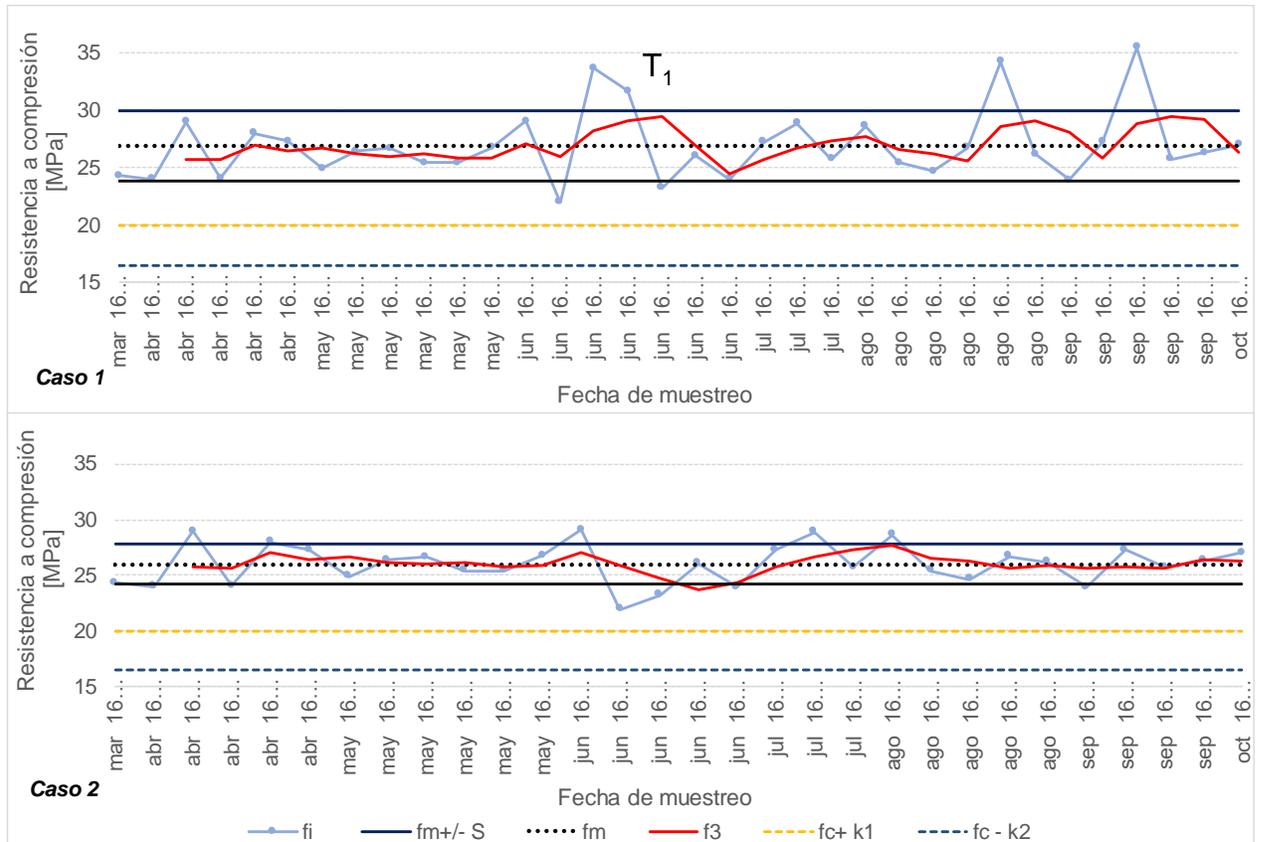


Gráfico 4.52 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-Sur.

4.3.5.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.143 se presentan los resultados de análisis del subperiodo, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 2, la desviación estándar del subperiodo es de 1.8 MPa. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.143 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-Sur.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media	Resistencia requerida
				f_m [MPa]	$f_c + tS$ [MPa]
T_1	caso 1	3.1	34	26.9	23.9
	caso 2	1.8	30	26.0	22.3

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{T_1} = 1.8$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual del subperiodo ($S = 3.2$ MPa y $S_{T_1} = 1.8$ MPa). Esta diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la

totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis del subperiodo. Como por ejemplo en el periodo previo y posterior a T₁ (ver Gráfico 4.51).

4.3.5.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.143 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T₁ presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 3.7 MPa, lo que implica una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada que representa el 54% del tiempo. El periodo de ajuste representa un 46% del tiempo estudiado. Ver Tabla 4.144.

Tabla 4.144 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta C-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	54
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	46

4.3.5.3 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta C-Sur, Hormigonera C

4.3.5.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se presenta solamente el caso 1, debido a que no hay muestras que requieran ser descartadas según casos 2 y 3.

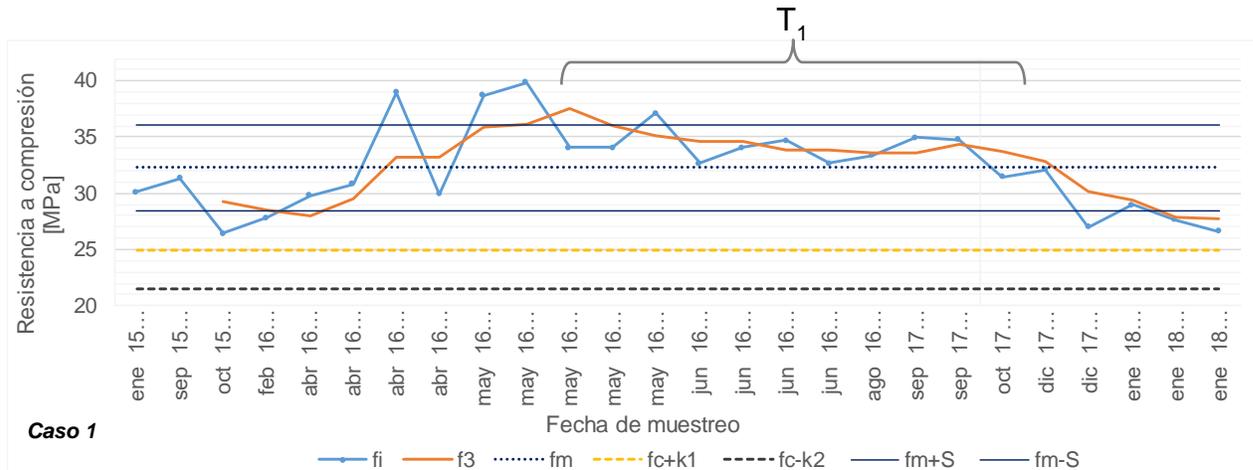


Gráfico 4.53 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Sur.

4.3.5.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, se tiene una resistencia media de 32.3 MPa y una desviación estándar de 3.8 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 30$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.145.

Tabla 4.145 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.8	26	32.3	30.0

Del Gráfico 4.53 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 14 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 1 subperíodo en el que la resistencia media se mantiene constante. Este subperíodo se ubica entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta y luego disminuye. En el Gráfico 4.54 se presenta el subperíodo con mayor detalle.

4.3.5.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 2.3 MPa ($f_m = 32.3$ MPa y $f_c + tS = 30.0$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.53 se observa que todas las muestras

cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.146.

Tabla 4.146 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° Muestras	Muestras [%]	N° Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0

4.3.5.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

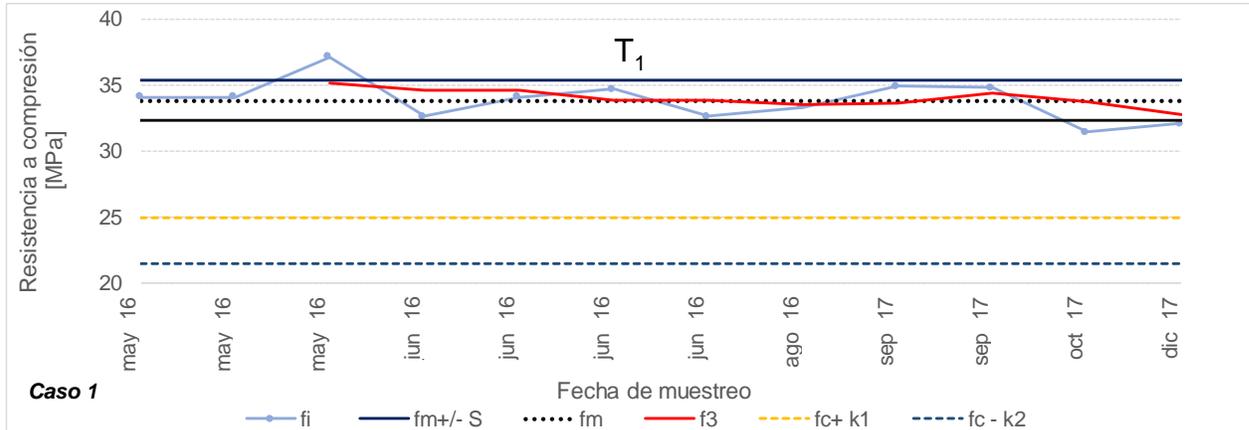


Gráfico 4.54 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Sur.

4.3.5.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.147 se presentan los resultados de análisis del subperiodo, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que la desviación estándar del subperiodo es de 1.5 MPa. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.147 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Sur.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	1.5	12	33.8	27.1

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{T_1} = 1.5$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual del subperiodo ($S = 3.8$ MPa y $S_{T_1} = 1.5$ MPa). Esta diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis del subperiodo. Estos periodos de ajuste, previo y posterior a T₁, presentan resistencias medias inferiores a la que presenta T₁, en aproximadamente 5 MPa (ver Gráfico 4.53).

4.3.5.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.147 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T₁ presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 6.7 MPa, lo que implica una dosificación holgada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación holgada que representa un 77% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 23% del tiempo. Ver Tabla 4.148.

Tabla 4.148 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta C-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	77
Ajustada	-
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	23

4.3.6 Comentarios Planta C-Sur

Los hormigones de esta planta presentan una variabilidad general de baja a media, asociada a su proceso de confección y a sus periodos de ajuste, y presentan una dosificación prácticamente constante. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 15 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad que presentan.

Se cuenta con un número reducido de resultados de ensayos de estos hormigones, por lo que no es posible identificar coincidencia entre periodos con resistencias bajas o altas. Sin embargo, en los hormigones HB25 y HB30 se observa una baja en la resistencia en febrero de 2016, cuya duración es cercana a un mes, y es seguida por un aumento en la resistencia, que podría asociarse a un ajuste de dosificación para compensar esta variación. El hormigón HB35 no presenta resultados de ensayo en esta fecha.

Esta planta funciona principalmente en base a una dosificación holgada. Además, presenta periodos de ajuste entre un 20% a un 60% del tiempo.

4.4 Hormigonera D

4.4.1 Planta D-Norte

4.4.1.1 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta D-Norte, Hormigonera D

4.4.1.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

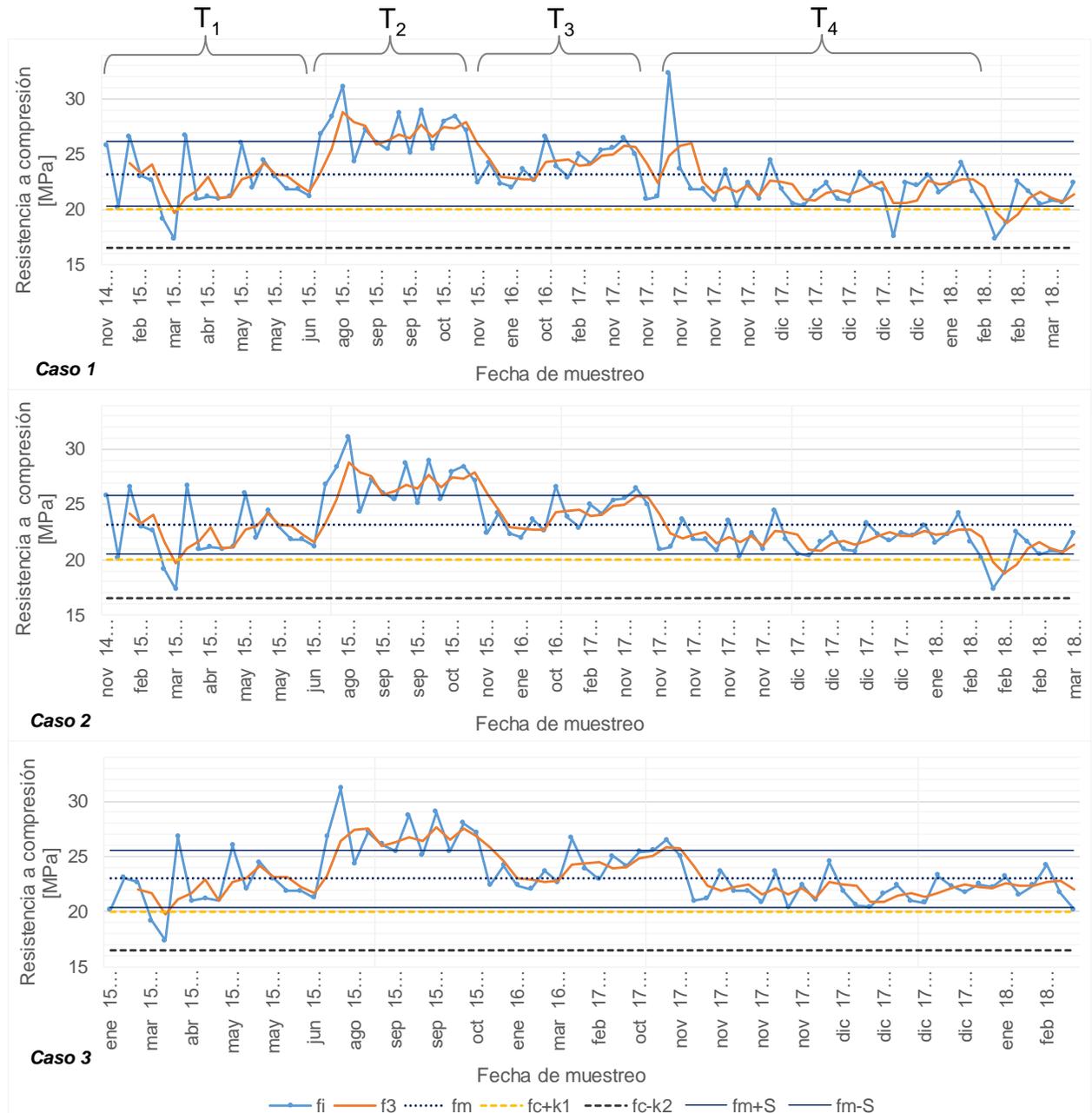


Gráfico 4.55 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Norte.

4.4.1.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 23 MPa y una desviación estándar de 2.6 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad excelente según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 23.3$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.149.

Tabla 4.149 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	2.9	87	23.2	23.7
caso 2	2.7	85	23.2	23.4
caso 3	2.6	80	23.0	23.3

Del Gráfico 4.55 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 14 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 4 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.56 se presenta los 4 subperiodos con mayor detalle.

4.4.1.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por debajo a la resistencia requerida en 0.3 MPa ($f_m = 23.0$ MPa y $f_c + tS = 23.3$ MPa), por lo tanto, existe el riesgo de que el hormigón no cumpla con la normativa en cuanto a resistencia, resultando una fracción defectuosa mayor. Del Gráfico 4.55, se tiene que 4 muestras no cumplen con la condición límite de resistencia media móvil. Sin embargo, este porcentaje de no cumplimiento del 5% se considera dentro de la fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición dada para la resistencia individual, se observa que todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.150.

Tabla 4.150 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	4	5	0	0
caso 2	4	5	0	0
caso 3	4	5	0	0

4.4.1.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

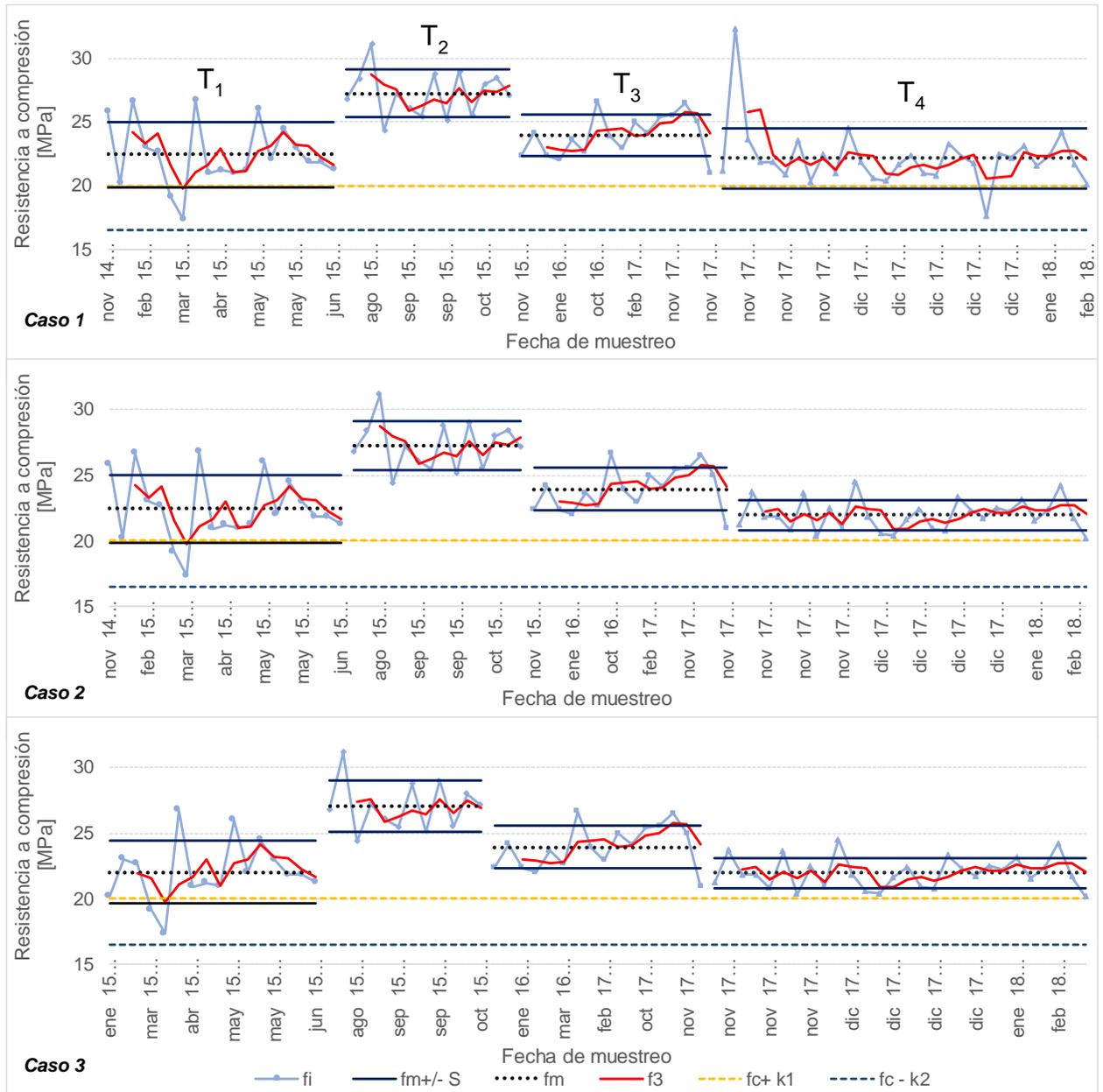


Gráfico 4.56 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Norte.

4.4.1.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.151 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.2 y 2.4 MPa, con un promedio de 1.7 MPa según Tabla 4.152. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.151 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Norte.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T₁	caso 1	2.5	19	22.4	23.4
	caso 2	2.5	19	22.4	23.4
	caso 3	2.4	16	22.0	23.2
T₂	caso 1	1.9	14	27.3	22.5
	caso 2	1.9	14	27.3	22.5
	caso 3	1.9	12	27.1	22.6
T₃	caso 1	1.7	16	24.0	22.2
	caso 2	1.7	16	24.0	22.2
	caso 3	1.7	16	24.0	22.2
T₄	caso 1	2.4	30	22.2	23.0
	caso 2	1.2	28	22.0	21.5
	caso 3	1.2	28	22.0	21.5

Tabla 4.152 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	2.2
caso 2	1.8
caso 3	1.7

En la Tabla 4.153, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 2.4 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón asociada a su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 5.1 MPa.

Tabla 4.153. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos HB25 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	24.0	2.3
caso 2	23.9	2.4
caso 3	23.8	2.4

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad en cuanto a su dosificación ($S_{f_m} = 2.4$ MPa), y una menor variabilidad asociada al proceso mismo de confección ($S_{\text{promedio}} = 1.7$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor similar a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 2.6$ MPa y $S_{f_m} = 2.4$ MPa),

así como también la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (23.0 MPa y 23.8 MPa, respectivamente). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad de la dosificación, pasando inadvertida la variabilidad básica del proceso de confección, debido a que esta última es menor ($S_{\text{promedio}} = 1.7 \text{ MPa}$).

4.4.1.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.151 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 presentan una resistencia media por debajo a la resistencia requerida en 1.2 MPa, lo que representa una dosificación límite. Las muestras pertenecientes al subperiodo T_2 presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 4.5 MPa, lo que representa una dosificación holgada, las muestras pertenecientes al subperiodo T_3 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 1.8 MPa, lo que implica que su dosificación es ajustada, y por último, las muestras pertenecientes al subperiodo T_4 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 0.5 MPa, lo que implica que su dosificación es óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta principalmente una dosificación ajustada durante el 38% del tiempo, y una dosificación límite el 27% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 8% del tiempo. Ver Tabla 4.154.

Tabla 4.154 Fracción de tiempo que presentan los distintos tipos de dosificación de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	15
Ajustada	38
Óptima	12
Límite	27
Periodo de ajuste	8

4.4.1.2 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta D-Norte, Hormigonera D

4.4.1.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

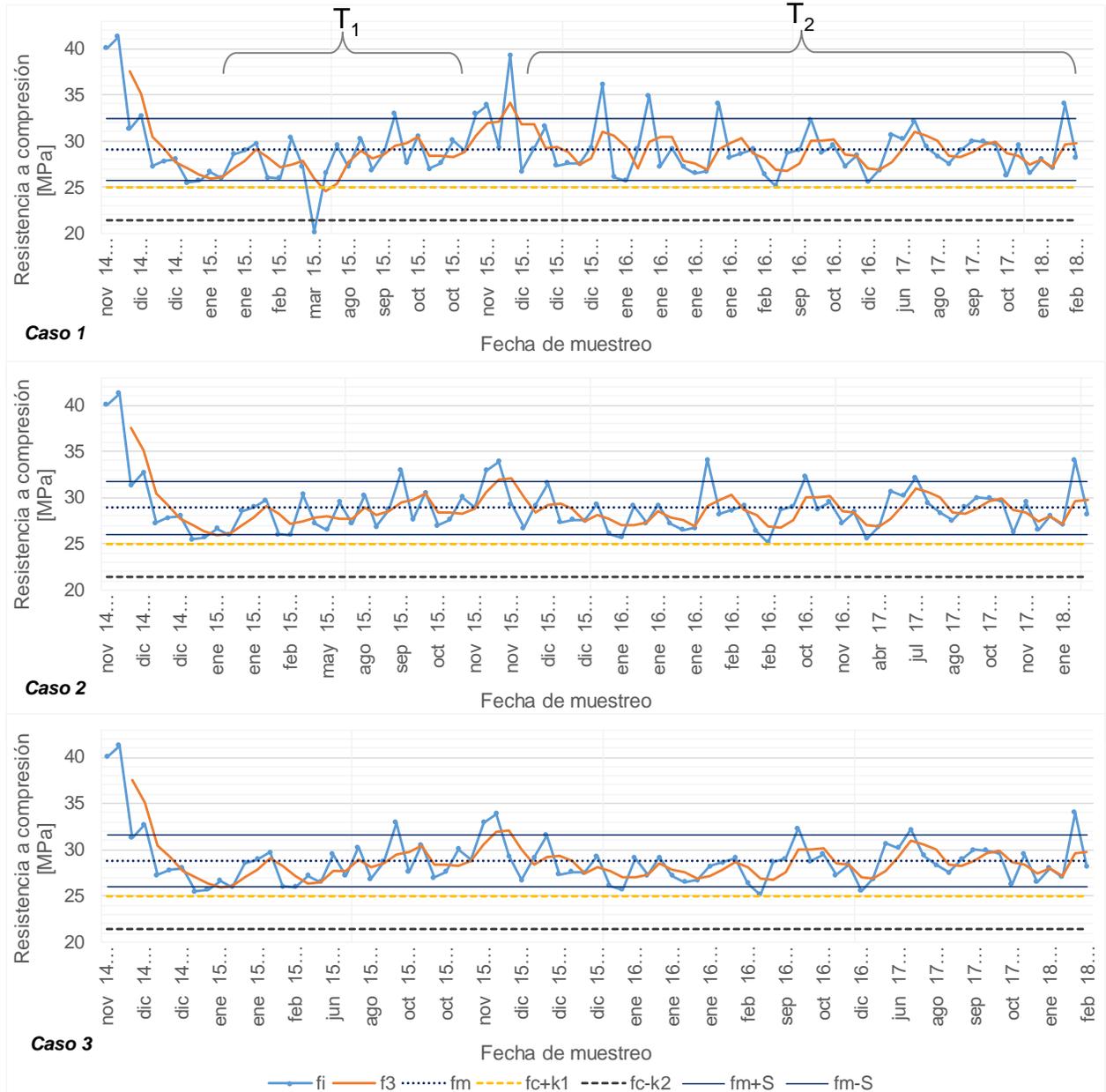


Gráfico 4.57 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-Norte.

4.4.1.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 28.8 MPa y una desviación estándar de 2.8 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 28.6$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.155.

Tabla 4.155 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.3	85	29.1	29.2
caso 2	2.8	81	28.9	28.6
caso 3	2.8	79	28.8	28.6

Del Gráfico 4.57 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 16 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre un punto de cambio, donde la resistencia media aumenta y luego disminuye. En el Gráfico 4.58 se presenta los 2 subperiodos con mayor detalle.

4.4.1.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.2 MPa ($f_m = 28.8$ MPa y $f_c + tS = 28.6$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.57 se observa que, para el caso 3, todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.156.

Tabla 4.156 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	1	1	1	1
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.4.1.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

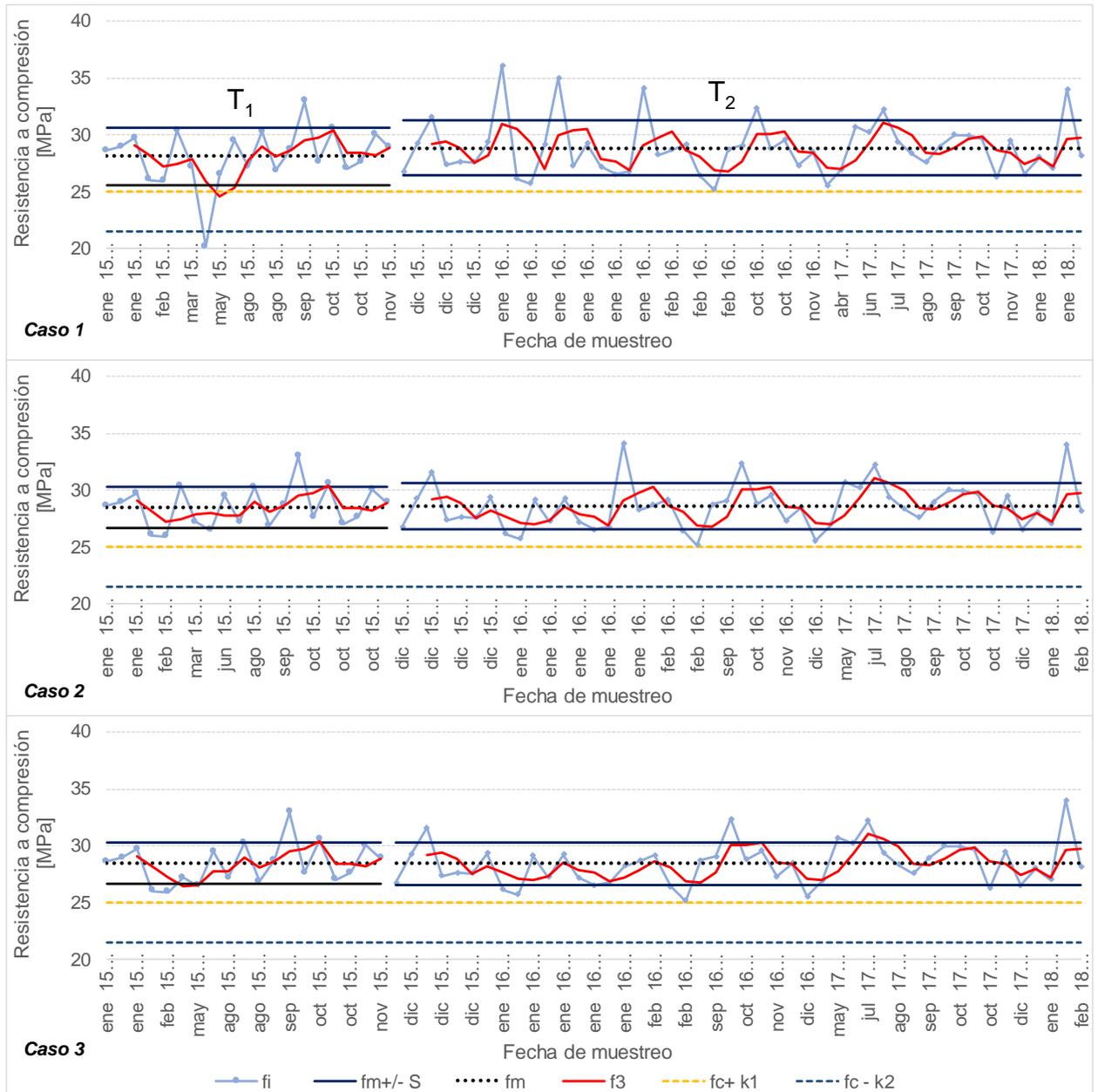


Gráfico 4.58 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-Norte.

4.4.1.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.157 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.8 y 1.9 MPa, con un promedio de 1.9 MPa según Tabla 4.158. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.157 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-Norte.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.5	21	28.1	28.4
	caso 2	1.8	20	28.5	27.4
	caso 3	1.8	19	28.4	27.4
T ₂	caso 1	2.4	49	28.8	28.1
	caso 2	2.0	47	28.6	27.6
	caso 3	1.9	46	28.4	27.4

Tabla 4.158 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	2.5
caso 2	2.0
caso 3	1.9

En la Tabla 4.159, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 0 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T₁ y T₂, las muestras tienen resistencias medias iguales.

Tabla 4.159. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos HB30 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	S f_m [MPa]
caso 1	28.5	0.5
caso 2	28.5	0.0
caso 3	28.4	0.0

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad en cuanto al proceso mismo de confección ($S_{promedio} = 1.9$ MPa) y que su dosificación permanece constante ($S_{f_m} = 0$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 2.8$ MPa y $S_{promedio} = 1.9$ MPa), aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (28.8 MPa y 28.4 MPa, respectivamente). Esto se explica porque previo al subperiodo T₁ se tiene un periodo de ajuste en donde la resistencia alcanza un valor de 40 MPa, y luego la resistencia media disminuye de manera constante. Esto contribuye a aumentar la desviación estándar del total de muestras y no se considera al analizar los subperiodos (ver Gráfico 4.57).

4.4.1.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.157 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T₁ y T₂ presentan resistencias medias por sobre a la resistencia requerida en 1 MPa, lo que implica una dosificación óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta principalmente una dosificación óptima durante el 89% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 11% del tiempo. Ver Tabla 4.160.

Tabla 4.160 Fracción de tiempo que presentan los distintos tipos de dosificación de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	-
Óptima	89
Límite	-
Periodo de ajuste	11

4.4.1.3 Hormigón HB20 (10) 20/10 de Planta D-Norte, Hormigonera D

4.4.1.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se presentan solo los casos 1 y 2, debido a que el caso 3 no considera muestras que requieran ser descartadas.

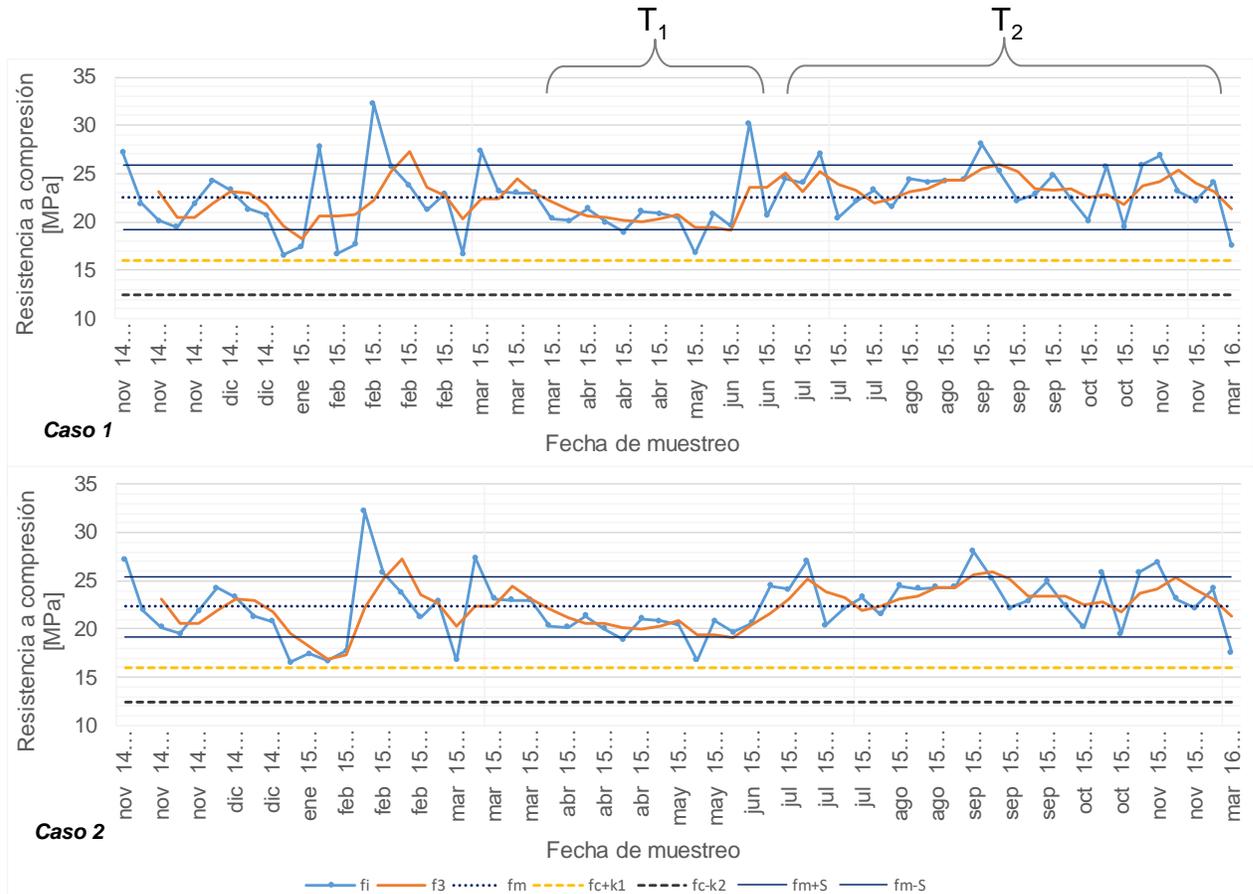


Gráfico 4.59 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta D-Norte.

4.4.1.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 2, se tiene una resistencia media de 22.3 MPa y una desviación estándar de 3.1 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 20.1$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.161.

Tabla 4.161 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.3	63	22.5	20.2
caso 2	3.1	61	22.3	20.1

Del Gráfico 4.59 se observa que, hay una diferencia de aproximadamente 15 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.60 se presenta los 2 subperiodos con mayor detalle.

4.4.1.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 2.2 MPa ($f_m = 22.3$ MPa y $f_c + tS = 20.1$ MPa), por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.59 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.162.

Tabla 4.162 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta D-Norte (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0

4.4.1.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

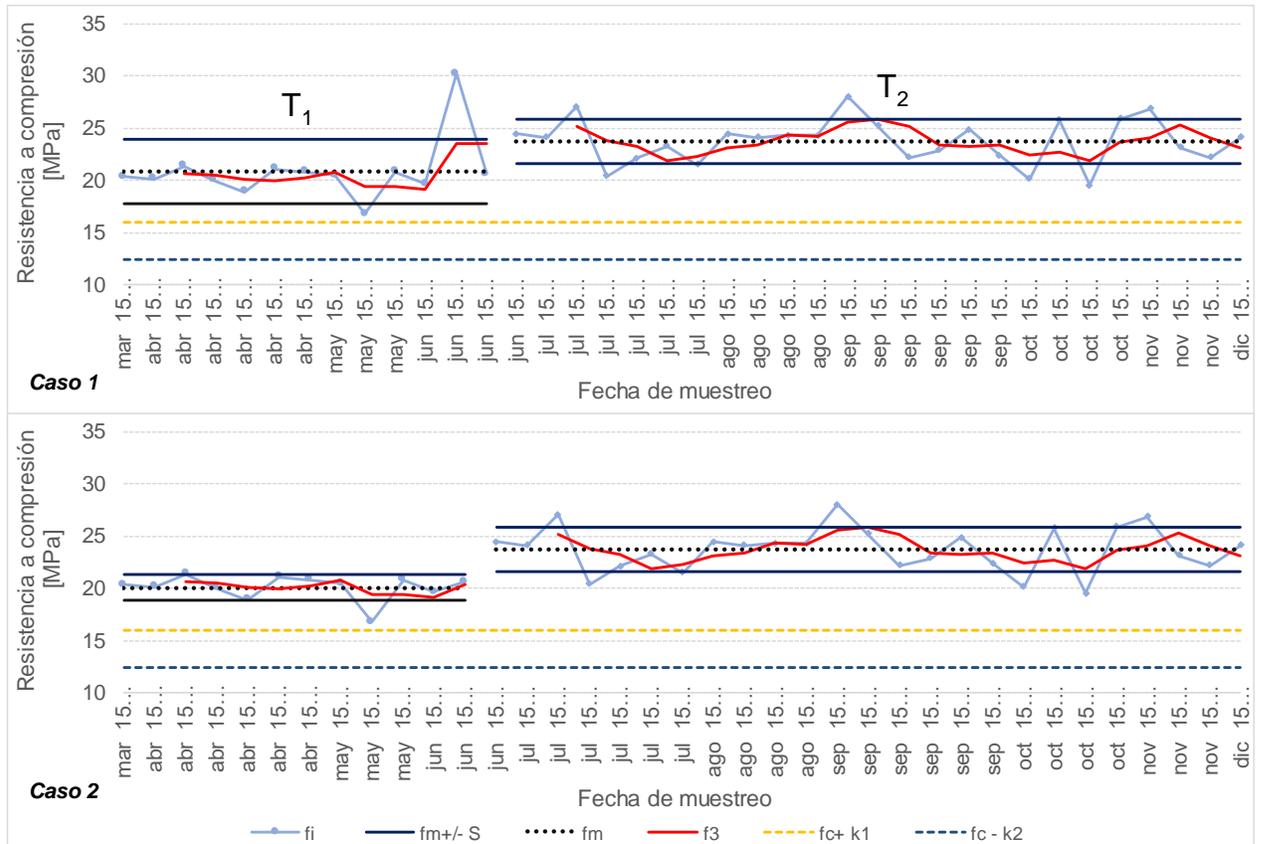


Gráfico 4.60 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta D-Norte.

4.4.1.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.163 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 2, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.2 y 2.2 MPa, con un promedio de 1.9 MPa, según Tabla 4.164. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.163 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Nº subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	3.1	13	20.9	20.1
	caso 2	1.2	12	20.1	17.7
T ₂	caso 1	2.2	25	23.8	18.8
	caso 2	2.2	25	23.8	18.8

Tabla 4.164 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	2.5
caso 2	1.9

En la Tabla 4.165, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 2, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 2.6 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T_1 y T_2 , las muestras difieren en sus resistencias medias en 3.7 MPa.

Tabla 4.165. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos HB20 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	22.3	2.0
caso 2	21.9	2.6

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad en cuanto al proceso mismo de confección ($S_{\text{promedio}} = 1.9$ MPa) y una baja variabilidad debido a sus cambios de dosificación ($S_{f_m} = 2.6$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor levemente mayor a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 3.1$ MPa y $S_{f_m} = 2.6$ MPa), aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (22.3 MPa y 21.9 MPa, respectivamente). La similitud de ambas desviaciones se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad asociada a la dosificación pasando inadvertida la variabilidad básica del proceso de confección, debido a que esta última es menor ($S_{\text{promedio}} = 1.9$ MPa). Sin embargo, esta pequeña diferencia en los valores de las desviaciones estándar es debido a que al considerar la totalidad de muestras se tienen un periodo de ajuste, que no es considerado en el análisis de subperiodos. Este periodo es previo a T_1 , desde noviembre de 2014 a marzo de 2015, y se observa que presenta una alta variabilidad en la resistencia (ver Gráfico 4.59).

4.4.1.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.163 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 presentan una resistencia media por sobre a la resistencia requerida en 2.4 MPa, lo que representa una dosificación ajustada. Las muestras pertenecientes al subperiodo T_2 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 5 MPa, lo que implica una dosificación holgada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta principalmente una dosificación holgada durante el 41% del tiempo y una dosificación ajustada durante el 21% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 38% del tiempo. Ver Tabla 4.166.

Tabla 4.166 Fracción de tiempo que presentan los distintos tipos de dosificación de Hormigón HB20 (10) 20/10, Planta D-Norte.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	41
Ajustada	21
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	38

4.4.2 Comentarios Planta D-Norte

Sus hormigones presentan una variabilidad general baja a media, asociada a su proceso de confección y a periodos de ajuste, y además su dosificación varía muy poco. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 16 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad que presentan.

Es importante mencionar que no se tiene continuidad en el tiempo de los resultados de ensayos de estos hormigones, por lo que no es posible identificar coincidencias tan evidentes entre periodos con resistencias bajas o altas. Sin embargo, se observa que en marzo de 2015 los tres hormigones presentaron al menos una muestra con resistencia baja, y que, en junio a noviembre de 2015, los hormigones HB25 y HB20 presentan altas resistencias. Además, se observa que, a excepción de este último, los periodos de baja y alta resistencia presentan una duración inferior a un mes, y una vez detectadas a partir de los resultados de ensayo a 28 días, son compensadas mediante ajustes de dosificación. Estas variaciones en la resistencia podrían atribuirse a sus materias primas, por ejemplo, al cemento utilizado por la planta.

La planta trabaja principalmente con dosificación óptima. El hormigón HB25 presenta un periodo de dosificación límite, durante marzo de 2015, originado por una baja de resistencia que se presenta en los tres hormigones, como ya se mencionó. Posterior a este periodo, en junio a noviembre de 2015, se tiene una dosificación holgada en los hormigones HB25 y HB20, que podría atribuirse a variaciones en alguna materia prima. Los hormigones HB20 y HB25 presentan distintos tipos de dosificaciones, lo que podría atribuirse a las variaciones de materias primas, como por ejemplo, un cambio en la calidad del cemento y a que se diseñan con dosis mínimas de éste, por lo que no presenta mayores ajustes en su dosificación, lo que explicaría el periodo de dosificación holgada (y ajustada). El hormigón HB30 presenta una dosificación óptima.

4.4.3 Planta D-RM

4.4.3.1 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta D-RM, Hormigonera D

4.4.3.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

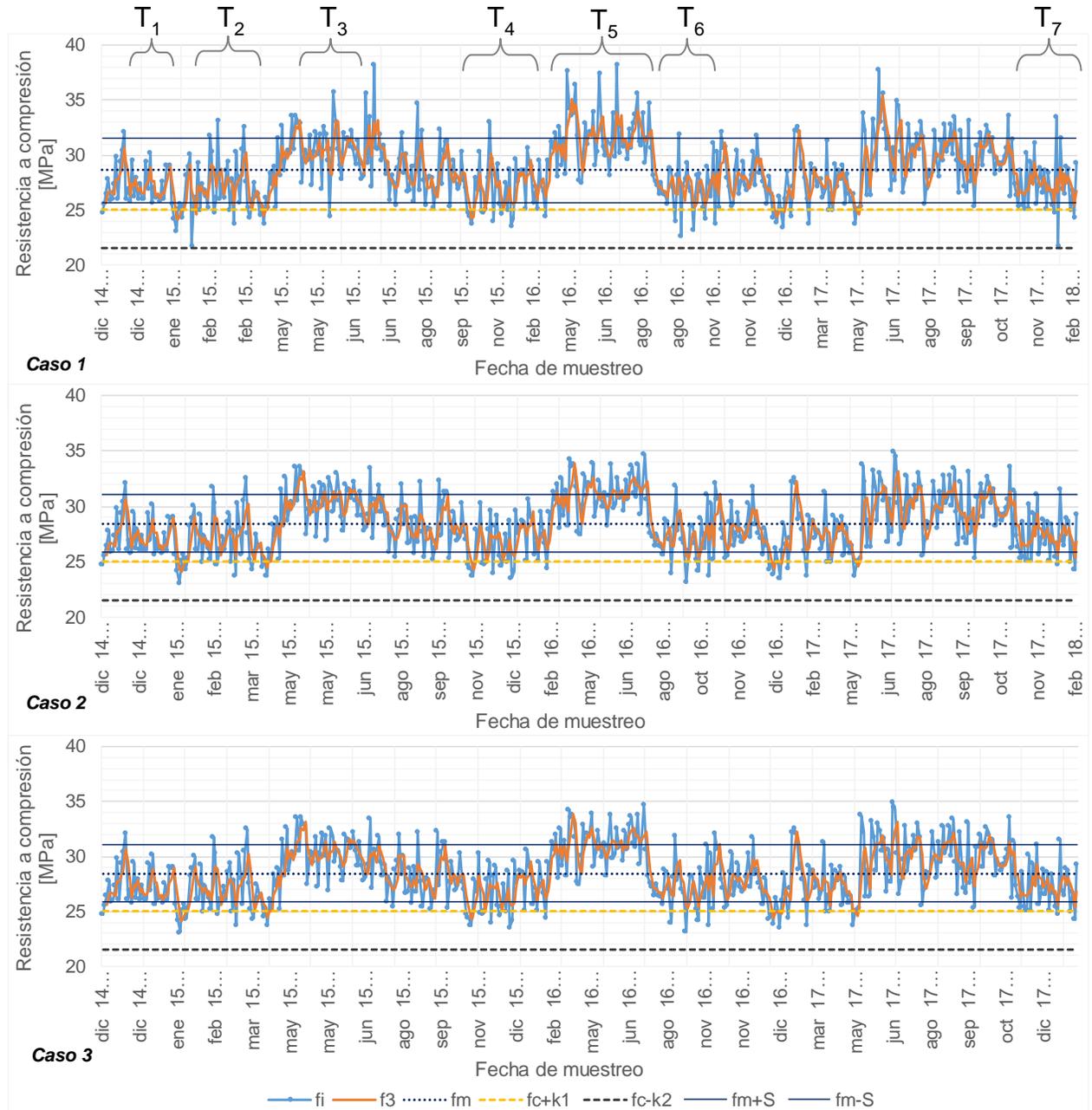


Gráfico 4.61 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-RM.

4.4.3.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 28.4 MPa y una desviación estándar de 2.6 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad excelente según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 28.3$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.167.

Tabla 4.167 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	2.9	489	28.6	28.7
caso 2	2.6	470	28.4	28.3
caso 3	2.6	467	28.4	28.3

Del Gráfico 4.61 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 12 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 7 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 9 puntos de cambio o periodos de ajuste durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.62 se presenta los 7 subperiodos con mayor detalle.

4.4.3.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.1 MPa ($f_m = 28.4$ MPa y $f_c + tS = 28.3$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.61 se observa que, para el caso 3, trece muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento del 3% está dentro del 10% de fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición de resistencia individual, se tiene que todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.168.

Tabla 4.168 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB30 (10) 20/10, Planta D-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	14	3	0	0
caso 2	13	3	0	0
caso 3	13	3	0	0

4.4.3.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

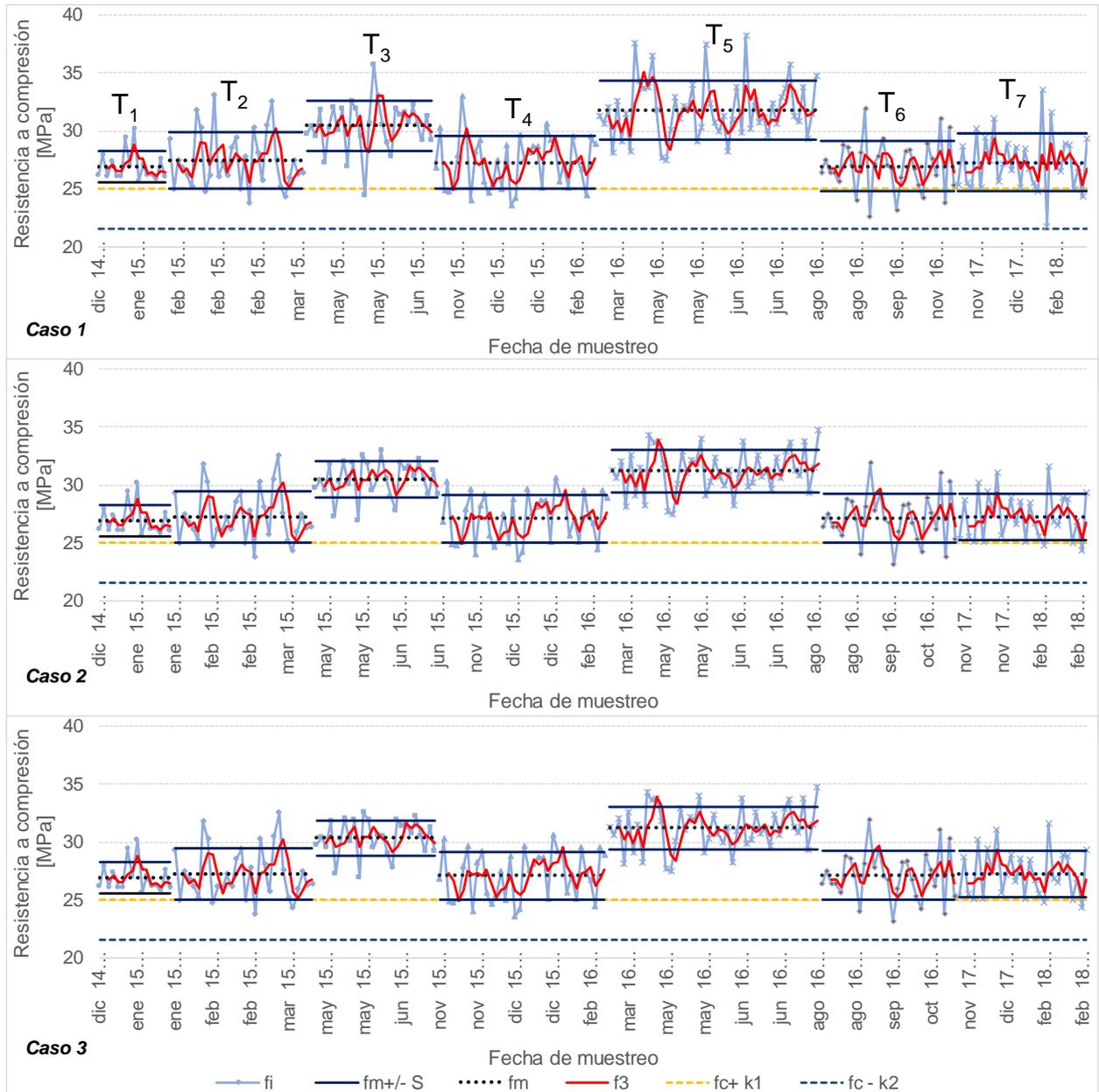


Gráfico 4.62 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-RM

4.4.3.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.169 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.3 a 2.2 MPa, con un promedio de 2.0 MPa, según Tabla 4.170. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.169 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T₁	caso 1	1.3	16	26.9	26.8
	caso 2	1.3	16	26.9	26.8
	caso 3	1.3	16	26.9	26.8
T₂	caso 1	2.4	31	27.4	28.1
	caso 2	2.2	30	27.2	27.9
	caso 3	2.2	30	27.2	27.9
T₃	caso 1	2.2	29	30.4	27.8
	caso 2	1.6	27	30.5	27.1
	caso 3	1.5	26	30.4	27.0
T₄	caso 1	2.3	37	27.3	27.9
	caso 2	2.1	36	27.1	27.7
	caso 3	2.1	36	27.1	27.7
T₅	caso 1	2.5	50	31.8	28.2
	caso 2	1.9	45	31.2	27.4
	caso 3	1.9	45	31.2	27.4
T₆	caso 1	2.2	31	27.0	27.8
	caso 2	2.1	29	27.1	27.8
	caso 3	2.1	29	27.1	27.7
T₇	caso 1	2.5	30	27.3	28.2
	caso 2	2.0	28	27.2	27.7
	caso 3	2.0	28	27.2	27.7

Tabla 4.170 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-RM.

Caso	$S_{promedio}$ [MPa]
caso 1	2.3
caso 2	2.0
caso 3	2.0

En la Tabla 4.171 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 1.8 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 4.3 MPa.

Tabla 4.171 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{fm} [MPa]
caso 1	28.3	2.0
caso 2	28.2	1.8
caso 3	28.2	1.8

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.0$ MPa) y una baja variabilidad debido a su dosificación ($S_{\text{fm}} = 1.8$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 2.6$ MPa y $S_{\text{promedio}} = 2.0$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (28.4 MPa y 28.2 MPa, respectivamente). Esta diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, entre noviembre de 2016 a octubre de 2017 (ver Gráfico 4.61).

4.4.3.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.169 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 0.1 MPa, lo que implica una dosificación óptima. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_2 , T_4 , T_6 y T_7 , presentan resistencias medias por debajo a la requerida entre 0.5 y 0.7 MPa, lo que representa una dosificación límite, que se considera como óptima. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_3 y T_5 , presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 3.4 y 3.8 MPa, respectivamente, lo que implica una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación óptima que representa un 32% del tiempo estudiado y una dosificación ajustada durante un 17% del tiempo. El periodo de ajuste representa el 51% del tiempo. Ver Tabla 4.172.

Tabla 4.172 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta D-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	17
Óptima	32
Límite	-
Periodo de ajuste	51

4.4.3.2 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta D-RM, Hormigonera D

4.4.3.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

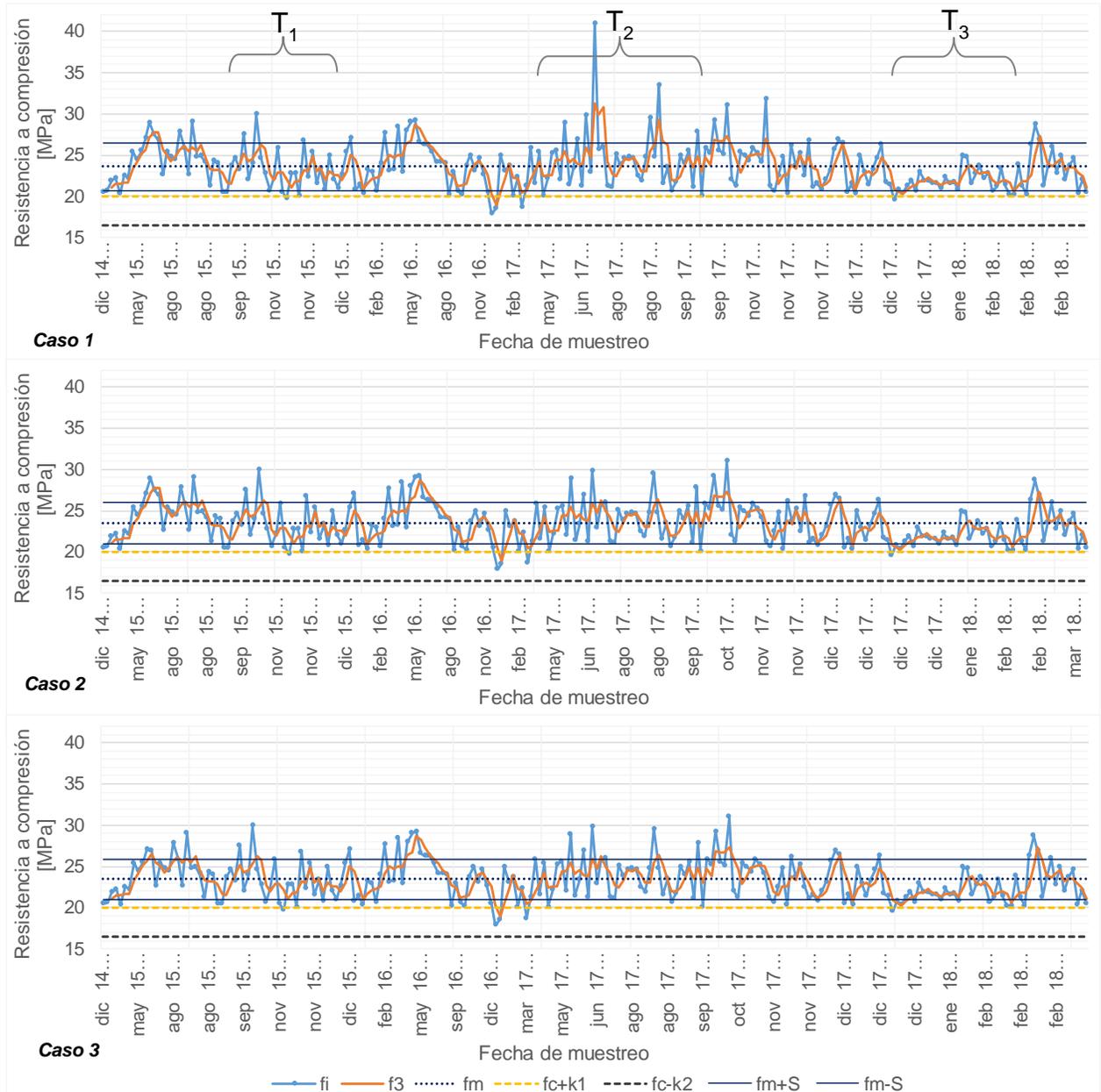


Gráfico 4.63 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-RM.

4.4.3.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 23.4 MPa y una desviación estándar de 2.5 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general baja. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad excelente según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una

resistencia requerida $f_c + tS = 23.2$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.173.

Tabla 4.173 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media	Resistencia requerida
			f_m [MPa]	$f_c + tS$ [MPa]
caso 1	2.9	231	23.6	23.7
caso 2	2.5	228	23.5	23.2
caso 3	2.5	224	23.4	23.2

Del Gráfico 4.63 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 13 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 3 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 5 puntos de cambio o periodos de ajuste durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.64 se presenta los 3 subperiodos con mayor detalle.

4.4.3.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.2 MPa ($f_m = 23.4$ MPa y $f_c + tS = 23.2$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.63 se observa que una muestra no cumple con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento (que es prácticamente 0) está dentro del 10% de fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición de resistencia individual, todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.174.

Tabla 4.174 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB25 (10) 20/10, Planta D-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° Muestras	Muestras [%]	N° Muestras	Muestras [%]
caso 1	1	0	0	0
caso 2	1	0	0	0
caso 3	1	0	0	0

4.4.3.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

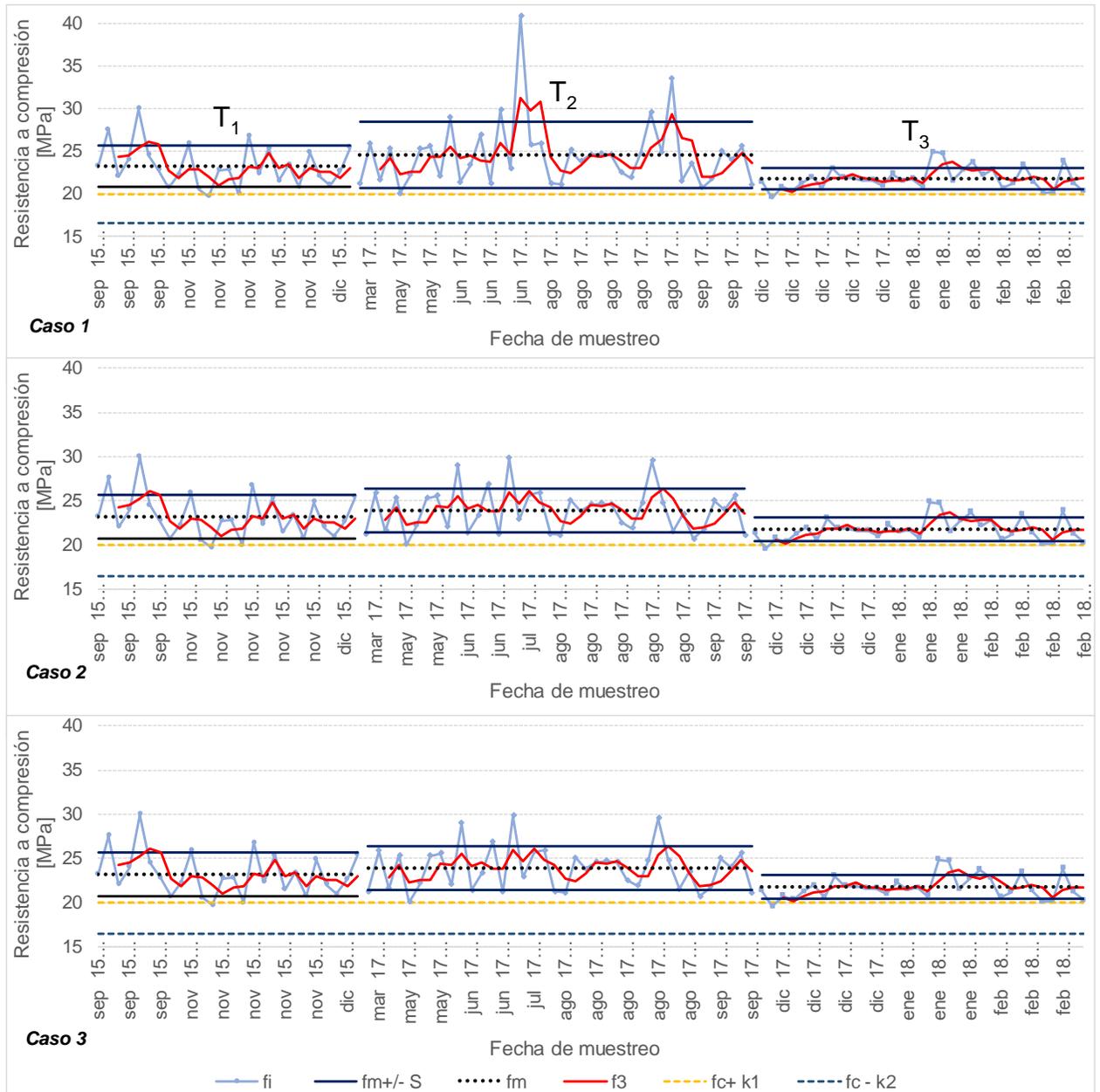


Gráfico 4.64 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-RM.

4.4.3.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.175 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.3 a 2.5 MPa, con un promedio de 2.2 MPa según Tabla 4.176. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.175 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.5	26	23.3	23.3
	caso 2	2.5	26	23.3	23.3
	caso 3	2.5	26	23.3	23.3
T ₂	caso 1	3.9	40	24.5	25.0
	caso 2	2.5	38	23.9	23.2
	caso 3	2.5	38	23.9	23.2
T ₃	caso 1	1.3	33	21.8	21.7
	caso 2	1.3	33	21.8	21.7
	caso 3	1.3	32	21.7	21.7

Tabla 4.176 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-RM.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	2.9
caso 2	2.2
caso 3	2.2

En la Tabla 4.177 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 1.1 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón originada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 2.2 MPa.

Tabla 4.177 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{f_m} [MPa]
caso 1	23.2	1.4
caso 2	23.0	1.1
caso 3	23.0	1.1

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.2$ MPa) y una menor variabilidad debido a su dosificación ($S_{f_m} = 1.1$ MPa). Por lo tanto, su dosificación permanece prácticamente constante.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor similar a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 2.5$ MPa y $S_{\text{promedio}} = 2.2$ MPa), así como también, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (23.4 MPa y 23.0 MPa, respectivamente). Esto se explica porque, al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad básica dada por la confección del

hormigón, debido a la que la dosificación permanece prácticamente invariable. Sin embargo, esta pequeña diferencia entre las desviaciones estándar es debido a que, al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, en los periodos de diciembre de 2014 a mayo de 2015, mayo de 2016 y febrero de 2018 (ver Gráfico 4.63).

4.4.3.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.175 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T₁ y T₃, presentan resistencias medias igual a la requerida, y las muestras pertenecientes al subperiodo T₂ presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 0.7 MPa lo que implica una dosificación óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación óptima que representa un 34% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 66% del tiempo. Ver Tabla 4.178.

Tabla 4.178 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	-
Óptima	34
Límite	-
Periodo de ajuste	66

4.4.3.3 Hormigón HB35 (10) 20/10 de Planta D-RM, Hormigonera D

4.4.3.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

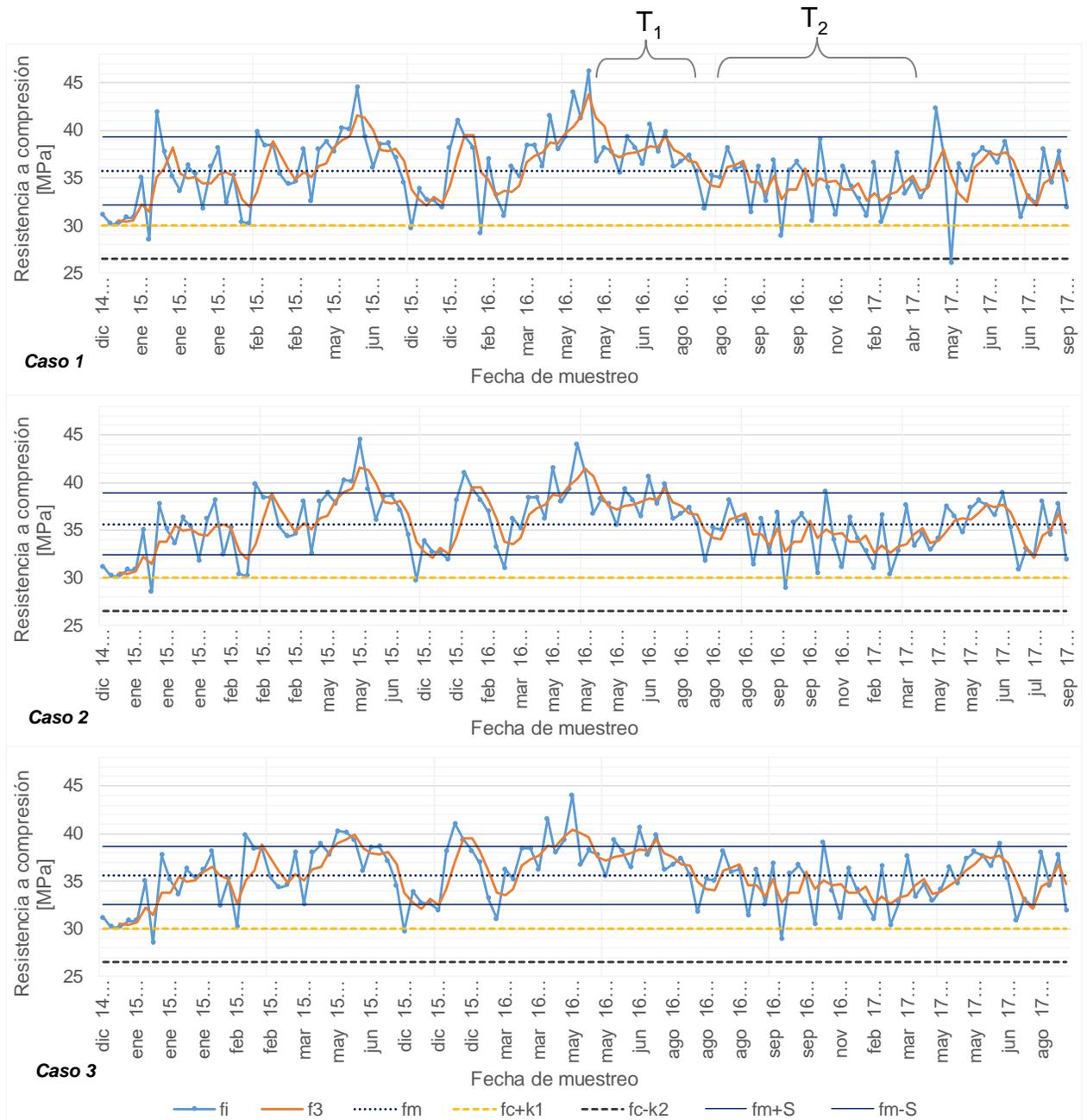


Gráfico 4.65 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-RM.

4.4.3.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 35.6 MPa y una desviación estándar de 3.1 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 34$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.179.

Tabla 4.179 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.6	126	35.7	34.6
caso 2	3.2	121	35.7	34.1
caso 3	3.1	116	35.6	34.0

Del Gráfico 4.65 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 17 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 5 puntos de cambio o periodos de ajuste durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.66 se presenta los 2 subperiodos con mayor detalle.

4.4.3.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 1.6 MPa ($f_m = 35.6$ MPa y $f_c + tS = 34.0$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.65 se observa que, para el caso 3, todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.180.

Tabla 4.180 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB35 (10) 20/10, Planta D-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	1	1
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.4.3.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

Se presenta solo el caso 1, debido a que los casos 2 y 3 no aplican en ambos subperiodos.

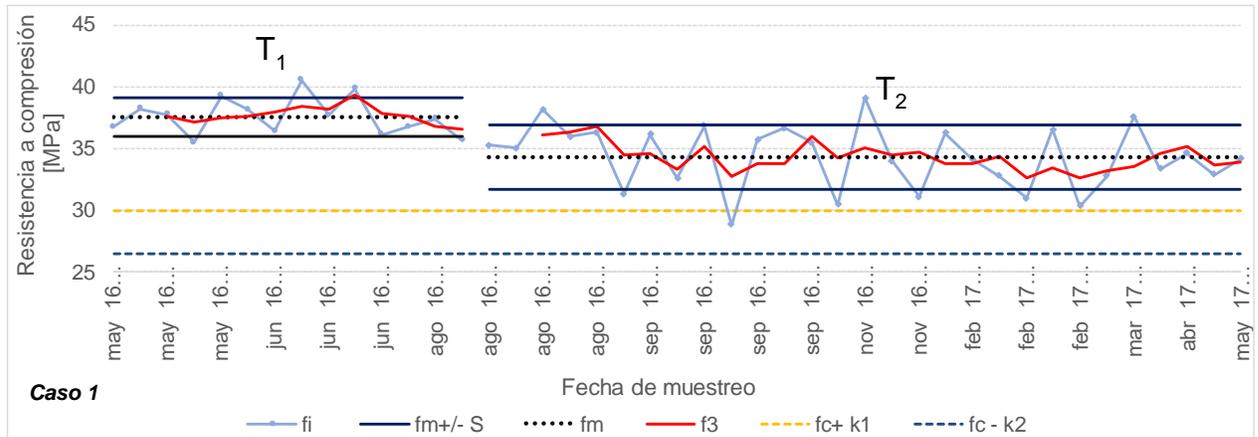


Gráfico 4.66 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-RM.

4.4.3.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.181 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.5 a 2.6 MPa, con un promedio de 2.3 MPa según Tabla 4.182. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.181 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-RM.

Nº subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	1.5	14	37.6	32.1
T ₂	caso 1	2.6	29	34.3	33.4

Tabla 4.182 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-RM.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	2.3

En la Tabla 4.183 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 2.3 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón originada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T₁ y T₂, las muestras difieren en sus resistencias medias en 3.3 MPa.

Tabla 4.183 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{fm} [MPa]
caso 1	36.0	2.3

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{promedio} = 2.3$ MPa) y una baja variabilidad debido a su dosificación ($S_{fm} = 2.3$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual y a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 3.1$ MPa, $S_{promedio} = 2.3$ MPa y $S_{fm} = 2.3$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (35.6 MPa y 36.0 MPa, respectivamente). Esta diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, previo a T_1 , entre diciembre de 2014 a mayo de 2016 (ver Gráfico 4.65).

4.4.3.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.181 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 , presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 5.5 MPa, lo que representa una dosificación holgada, y las muestras pertenecientes al subperiodo T_2 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 0.9 MPa, lo que implica una dosificación óptima.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación óptima que representa el 34% del tiempo, y una dosificación holgada durante el 11% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 55% del tiempo. Ver Tabla 4.184.

Tabla 4.184 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	11
Ajustada	-
Óptima	34
Límite	-
Periodo de ajuste	55

4.4.4 Comentarios Planta D-RM

Sus hormigones presentan una variabilidad general media a baja, asociada a su proceso de confección y a sus periodos de ajuste, además su dosificación varía muy poco. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 17 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad que presentan.

Se observa que las fechas en que se presenta cambios en la resistencia media coinciden en los 3 hormigones, por lo tanto, podría atribuirse a una variación del cemento que utiliza la planta para confeccionar sus hormigones (o de alguna otra materia prima). Por ejemplo, en el periodo de mayo a junio de 2015, mayo a junio de 2016, mayo a junio de 2017, se observa un alza en la resistencia de los 3 hormigones, esto podría atribuirse a una variación en la calidad del cemento, o a la disminución de la temperatura ambiente que comienza durante estos meses. Además, en el periodo de noviembre de 2015 y noviembre de 2016 se observa una baja en la resistencia en los 3 hormigones, lo que también coincide con la temporada en que comienzan a aumentar las temperaturas. Se observa que los periodos con resistencias altas o bajas tienden a durar cerca de un mes, por lo que la planta ajusta sus dosificaciones para compensar estas variaciones, ya sea originadas por las variaciones del cemento, por las condiciones climáticas, o algún otro factor.

La planta trabaja principalmente con una dosificación óptima. Los periodos de dosificación ajustada y holgada están asociados a cambios en las condiciones climáticas, donde se presentan resistencias más altas y por lo general no duran más de uno a tres meses. Los periodos de resistencias bajas presentan una duración inferior a un mes, y no tienden a alcanzar dosificaciones límites, que podrían causar incumplimiento en la resistencia.

4.4.5 Planta D-Sur

4.4.5.1 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta D-Sur, Hormigonera D

4.4.5.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

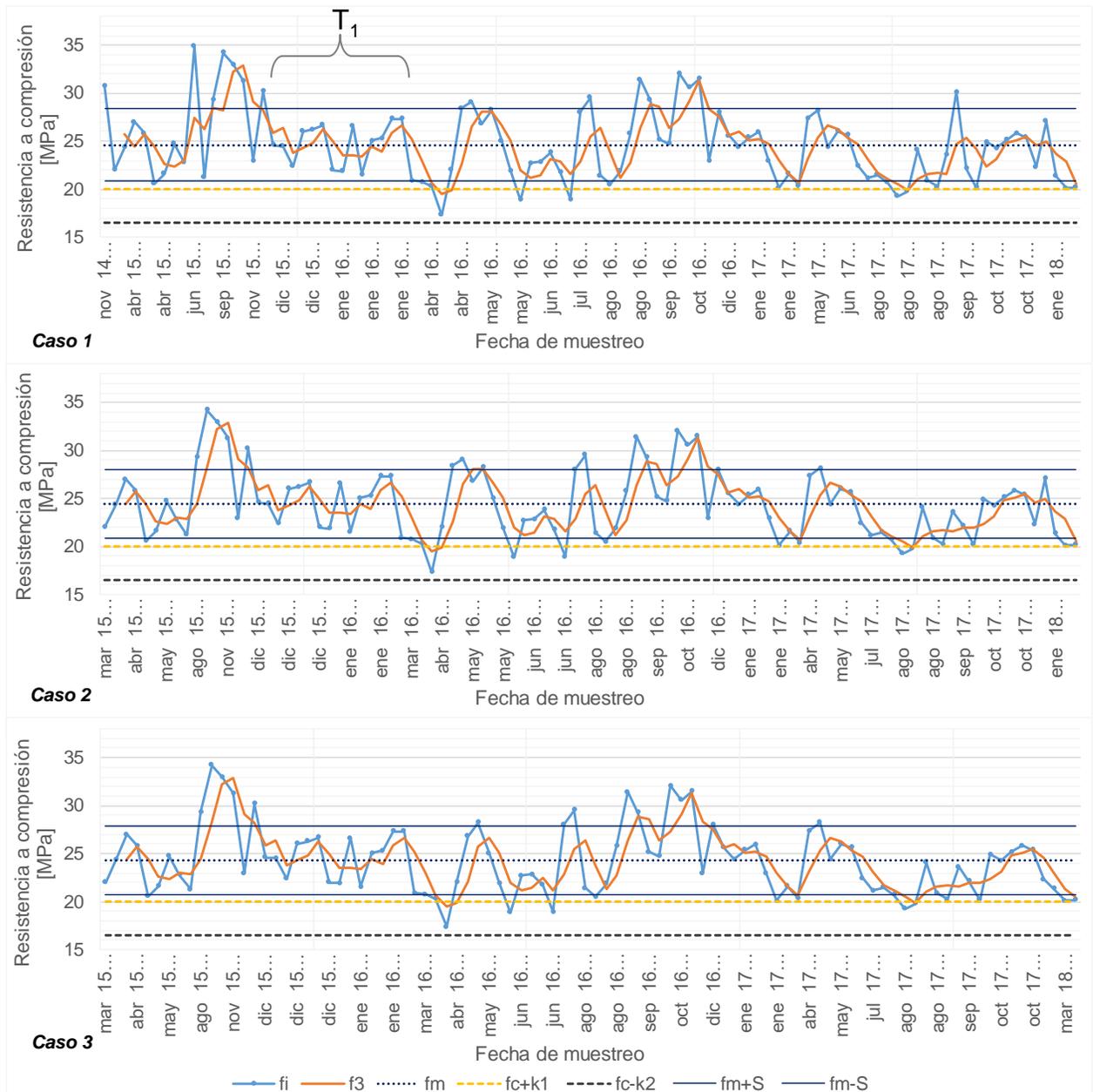


Gráfico 4.67 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Sur.

4.4.5.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 24.3 MPa y una desviación estándar de 3.6 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 24.6$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.185.

Tabla 4.185 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.8	99	24.6	24.8
caso 2	3.6	96	24.4	24.6
caso 3	3.6	92	24.3	24.6

Del Gráfico 4.67 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 17 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 1 subperíodo en el que la resistencia media se mantiene constante. Este subperíodo se ubica entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.68 se presenta el subperíodo con mayor detalle.

4.4.5.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media es mayor a la resistencia requerida en 0.3 MPa ($f_m = 24.3$ MPa y $f_c + tS = 24.6$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.67 se observa que tres muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento del 3% está dentro del 10% de fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición de resistencia individual, todas las muestras la cumplen. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.186.

Tabla 4.186 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB25 (10) 20/10, Planta D-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	3	3	0	0
caso 2	3	3	0	0
caso 3	3	3	0	0

4.4.5.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

Se presenta solo el caso 1, debido a que los casos 2 y 3 no consideran muestras a descartar en los subperiodos.

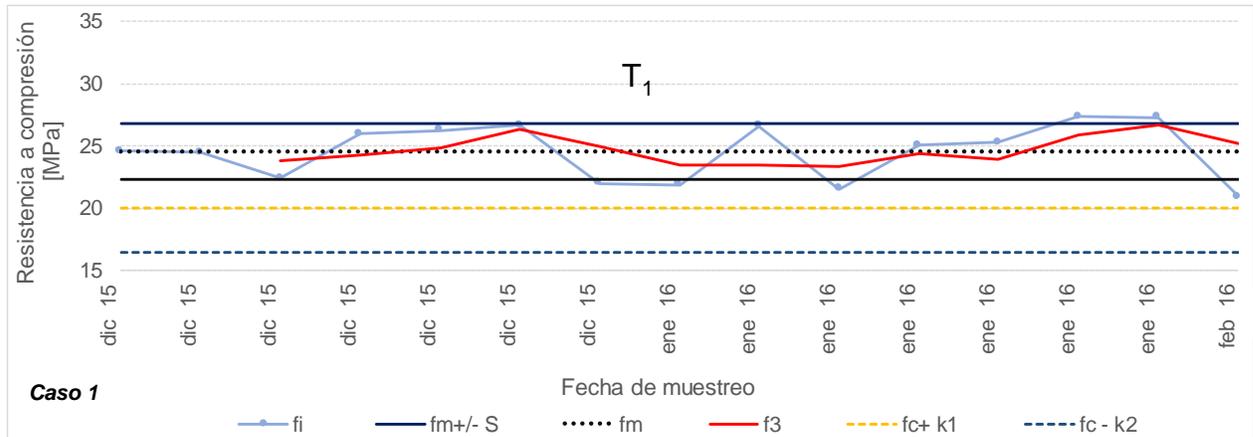


Gráfico 4.68 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Sur.

4.4.5.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.187 se presentan los resultados de análisis del subperiodo, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que la desviación estándar del subperiodo T_1 es de 2.2 MPa. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.187 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Sur.

Nº subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T_1	caso 1	2.2	15	24.6	23.0

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{T_1} = 2.2$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual del subperiodo ($S = 3.6$ MPa y $S_{T_1} = 2.2$ MPa). Esta diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis del subperiodo, y que además corresponden a la mayor parte del tiempo, como, por ejemplo, previo a T_1 , desde noviembre 2014 a noviembre 2015, y posterior a T_1 , desde enero de 2016 a enero de 2018 (ver Gráfico 4.67).

4.4.5.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.187 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 , presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 1.6 MPa, lo que representa una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada que representa un 8% del tiempo. El periodo de ajuste representa el 92% del tiempo. Ver Tabla 4.188.

Tabla 4.188 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta D-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	8
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	92

Tabla 4.189 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta D-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.7	25	43.2	39.9
caso 2	3.4	24	42.8	39.4

Del Gráfico 4.69 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 13 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. En el Gráfico 4.70 se presenta los 2 subperiodos con mayor detalle.

4.4.5.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media es mayor a la resistencia requerida en 3.4 MPa ($f_m = 42.8$ MPa y $f_c + tS = 39.4$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.69 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.190.

Tabla 4.190 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB40 (10) 20/10, Planta D-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0

4.4.5.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

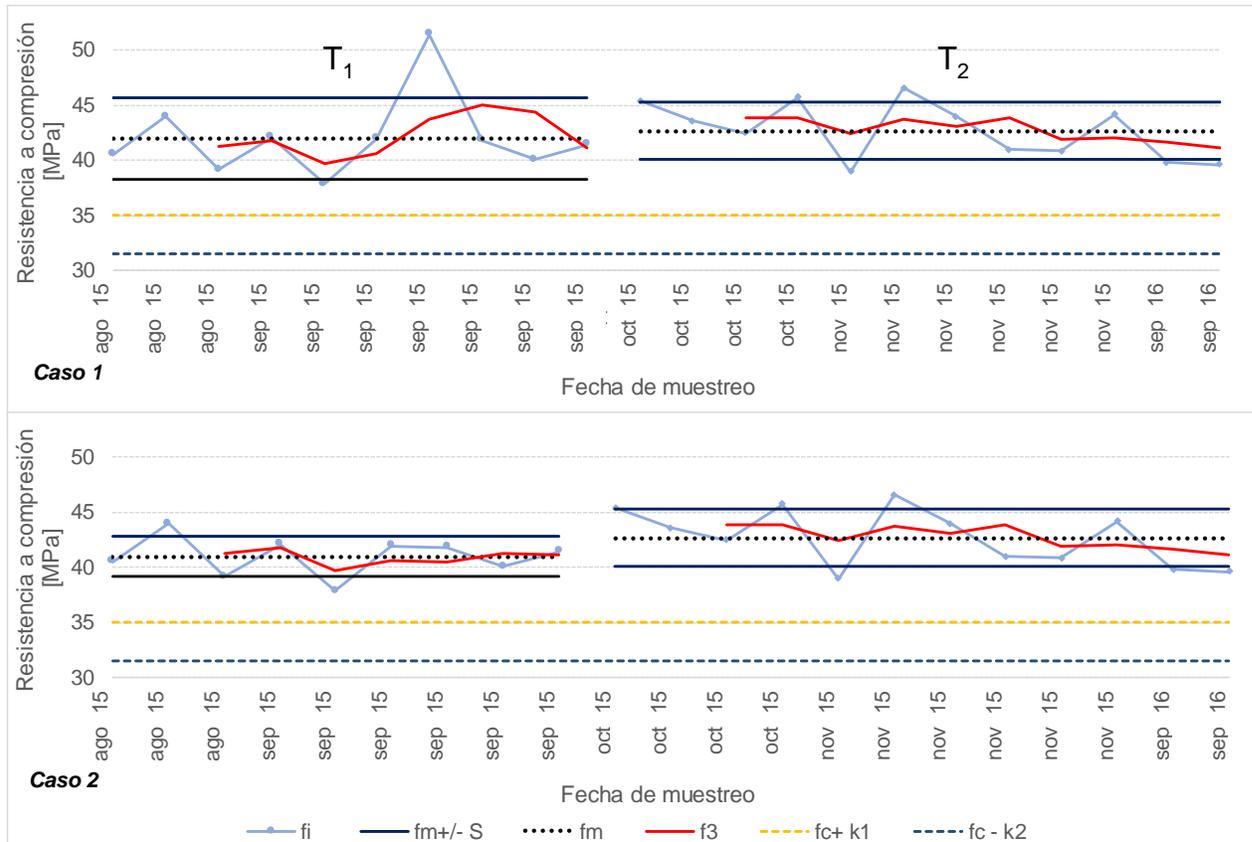


Gráfico 4.70 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta D-Sur.

4.4.5.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.191 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 2, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.8 y 2.6 MPa, con un promedio de 2.3 MPa según Tabla 4.192. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.191 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta D-Sur.

Nº subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	3.7	10	42.0	40.2
	caso 2	1.8	9	41.0	37.5
T ₂	caso 1	2.6	12	42.7	38.5
	caso 2	2.6	12	42.7	38.5

Tabla 4.192 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta D-Sur.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	3.2
caso 2	2.3

En la Tabla 4.193, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 2, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 1.2 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T_1 y T_2 , las muestras difieren en sus resistencias medias en 1.7 MPa.

Tabla 4.193. Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos HB40 (10) 20/10, Planta D-Sur.

Caso	f_m promedio [MPa]	Sf_m [MPa]
caso 1	42.4	0.5
caso 2	41.8	1.2

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad en cuanto al proceso mismo de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.3$ MPa) y una menor variabilidad debido a su dosificación ($Sf_m = 1.2$ MPa). Por lo tanto, su dosificación es prácticamente constante.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 3.4$ MPa y $S_{\text{promedio}} = 2.3$ MPa), aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (42.8 MPa y 41.8 MPa, respectivamente). Sin embargo, esta diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, por ejemplo, previo a T_1 , y entre T_1 y T_2 (Ver Gráfico 4.69).

4.4.5.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.191 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 3.5 MPa, lo que representa una dosificación ajustada y las muestras pertenecientes al subperiodo T_2 , presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 4.2 MPa, lo que representa una dosificación holgada, que se considera ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada que representa el 90% del tiempo. El tiempo estudiado es de aproximadamente 5 meses. El periodo de ajuste representa el 10% del tiempo. Ver Tabla 4.194.

Tabla 4.194 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB40 (10) 20/10, Planta D-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	90
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	10

4.4.5.3 Hormigón HB35 (10) 20/10 de Planta D-Sur, Hormigonera D

4.4.5.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

Se presenta solo el caso 1, debido a que los casos 2 y 3 no consideran muestras que se deban descartar.

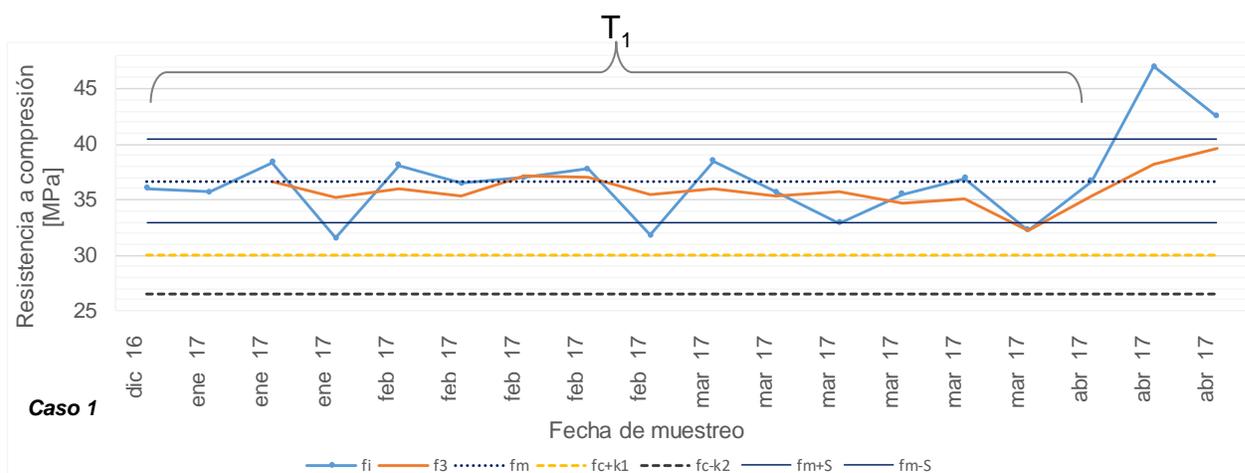


Gráfico 4.71 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-Sur.

4.4.5.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, se tiene una resistencia media de 36.7 MPa y una desviación estándar de 3.7 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 35$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.195.

Tabla 4.195 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-Sur.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.7	18	36.7	35.0

Del Gráfico 4.71 se observa que hay una diferencia de aproximadamente 15 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, dado el número reducido de muestras que presenta el hormigón, se identifica un único subperiodo que abarca casi el total de muestras. En el Gráfico 4.72 se presenta el subperiodo con mayor detalle.

4.4.5.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media es mayor a la resistencia requerida en 1.7 MPa ($f_m = 36.7$ MPa y $f_c + tS = 35.0$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.71 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.196.

Tabla 4.196 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB35 (10) 20/10, Planta D-Sur (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	N° Muestras	Muestras [%]	N° Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0

4.4.5.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

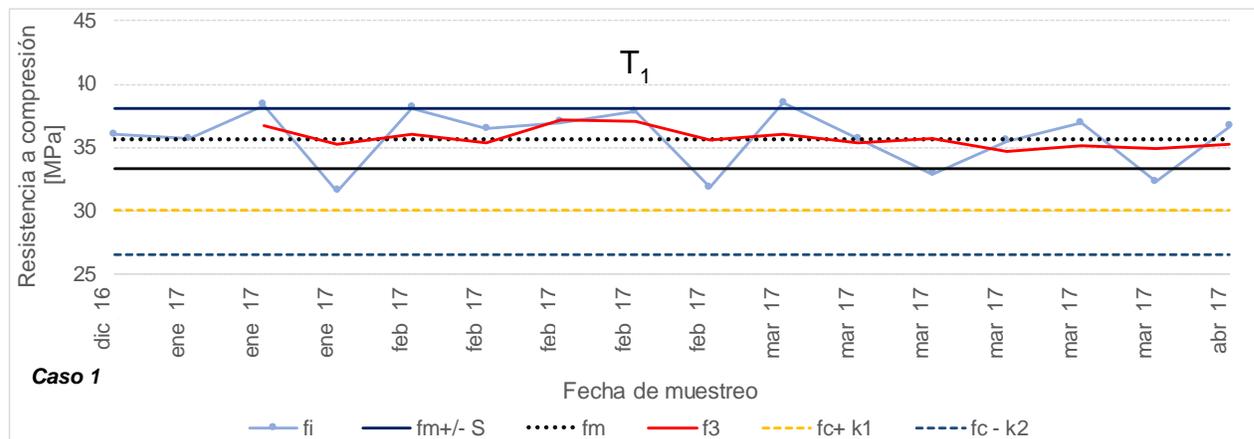


Gráfico 4.72 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-Sur.

4.4.5.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.197 se presentan los resultados de análisis del subperiodo, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que la desviación estándar del subperiodo T_1 es de 2.3 MPa. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.197 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-Sur.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.3	16	35.7	33.1

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{T_1} = 2.3$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual del subperiodo ($S = 3.7$ MPa y $S_{T_1} = 2.3$ MPa). Esto es debido a que posterior al subperiodo T₁, se presenta un periodo de ajuste que presenta resistencias mayores y contribuyen a aumentar la desviación estándar del total de muestras (ver Gráfico 4.71).

4.4.5.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.197 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T₁ presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 2.6 MPa, lo que representa una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada durante el 83% del tiempo estudiado de aproximadamente 4 meses. El periodo de ajuste representa el 17% del tiempo. Ver Tabla 4.198.

Tabla 4.198 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB35 (10) 20/10, Planta D-Sur.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	83
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	17

4.4.6 Comentarios Planta D-Sur

Sus hormigones presentan una variabilidad general media, asociada a su proceso de confección y a los periodos de ajuste, y su dosificación es constante. Se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 17 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad que presentan.

Se cuenta con un número reducido de resultados de ensayos de estos hormigones, por lo que no es posible identificar coincidencia entre periodos con resistencias bajas o altas. No obstante, se observa que en septiembre de 2015, los hormigones HB25 y HB40 presentan altas resistencias. Además, se observa que los periodos de baja y alta resistencia presentan una duración de inferior a un mes, por lo tanto, podrían atribuirse a

variaciones en la calidad del cemento, o alguna otra materia prima, las que una vez detectadas, a partir de los resultados de resistencia a compresión a 28 días, son compensadas mediante ajustes de dosificación.

La planta funciona en base a una dosificación ajustada. Además, presenta periodos de ajuste una gran parte del tiempo, los que se evidencian en el hormigón HB25, debido a que presenta un mayor número de resultados y por un periodo mayor de tiempo que los otros dos hormigones. Los periodos de ajuste se atribuyen a ajustes de dosificación en respuesta a variaciones en materias primas, como el cemento, por ejemplo.

4.5 Hormigonera E

4.5.1 Planta E-RM

4.5.1.1 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta E-RM, Hormigonera E

4.5.1.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

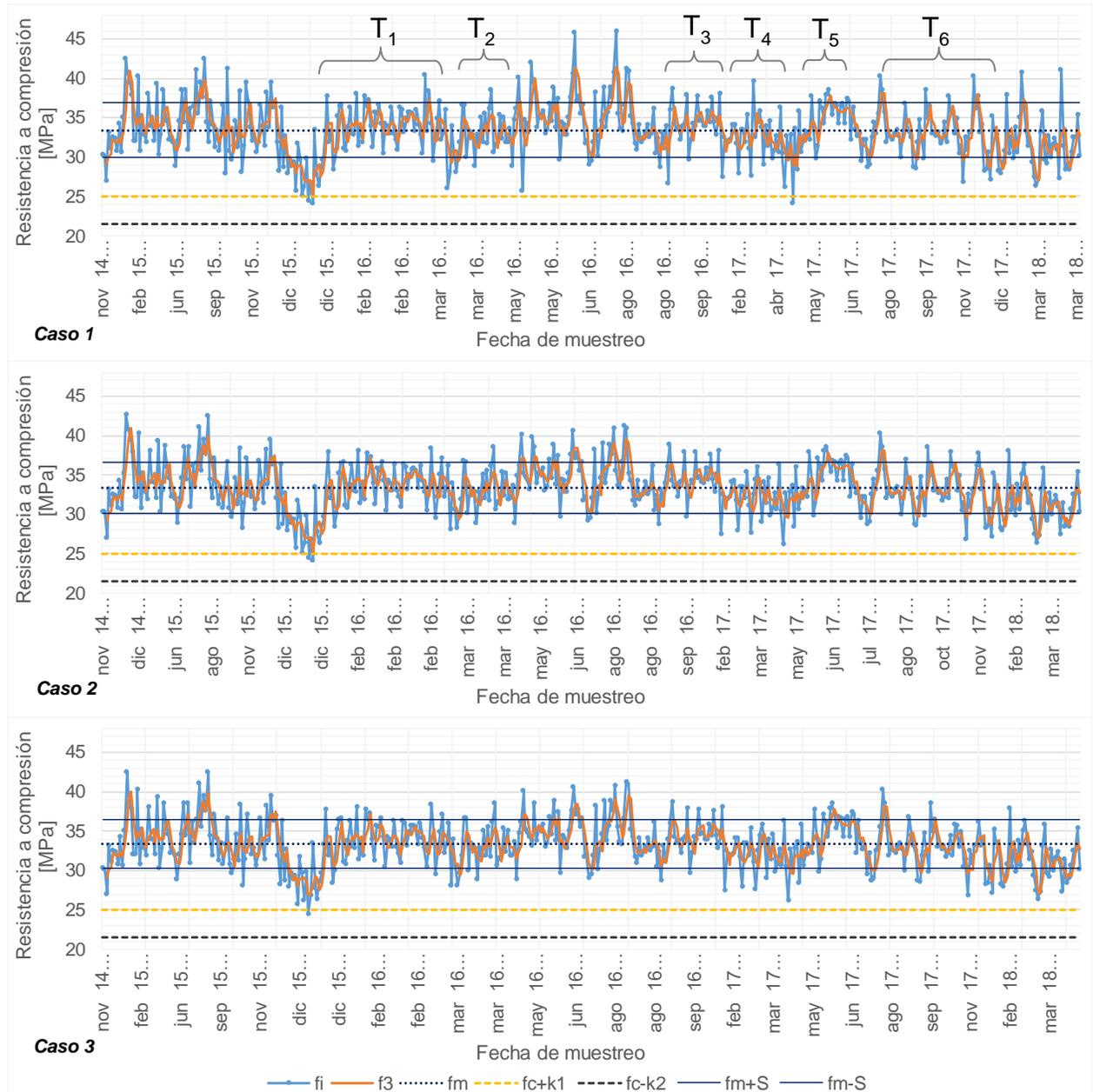


Gráfico 4.73 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta E-RM.

4.5.1.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 33.3 MPa y una desviación estándar de 3.1 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 29$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.199.

Tabla 4.199 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta E-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media	Resistencia requerida
			f_m [MPa]	$f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.5	471	33.4	29.4
caso 2	3.2	456	33.3	29.1
caso 3	3.1	447	33.3	29.0

Del Gráfico 4.73 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 19 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 6 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 7 puntos de cambio durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.74 se presenta los 6 subperiodos con mayor detalle.

4.5.1.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 4.3 MPa ($f_m = 33.3$ MPa y $f_c + tS = 29.0$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.73 se observa que todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.200.

Tabla 4.200 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB30 (10) 20/10, Planta E-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_1 < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.5.1.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

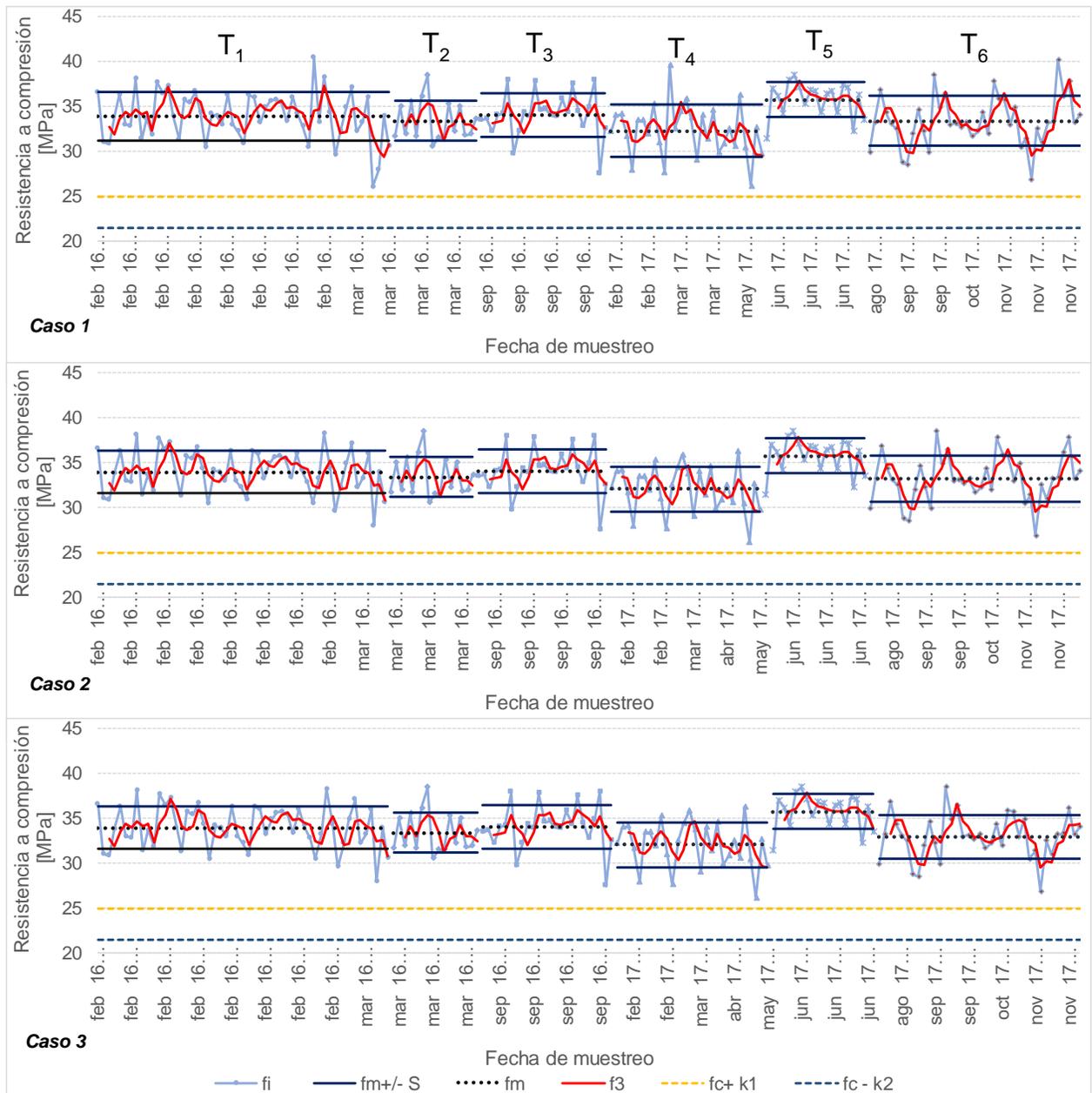


Gráfico 4.74 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta E-RM.

4.5.1.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.201 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 1.9 a 2.5 MPa, con un promedio de 2.4 MPa según Tabla 4.202. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.201 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta E-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.7	55	33.9	28.5
	caso 2	2.4	53	34.0	28.0
	caso 3	2.4	53	34.0	28.0
T ₂	caso 1	2.2	16	33.4	28.0
	caso 2	2.2	16	33.4	28.0
	caso 3	2.2	16	33.4	28.0
T ₃	caso 1	2.4	24	34.1	28.2
	caso 2	2.4	24	34.1	28.2
	caso 3	2.4	24	34.1	28.2
T ₄	caso 1	2.9	29	32.3	28.8
	caso 2	2.5	28	32.1	28.3
	caso 3	2.5	28	32.1	28.3
T ₅	caso 1	1.9	19	35.8	27.6
	caso 2	1.9	19	35.8	27.6
	caso 3	1.9	19	35.8	27.6
T ₆	caso 1	2.8	40	33.4	28.6
	caso 2	2.6	39	33.2	28.3
	caso 3	2.4	37	33.0	28.1

Tabla 4.202 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta E-RM.

Caso	$S_{promedio}$ [MPa]
caso 1	2.6
caso 2	2.4
caso 3	2.4

En la Tabla 4.203, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 1.2 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 3.7 MPa.

Tabla 4.203 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos HB30 (10) 20/10, Planta E-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{fm} [MPa]
caso 1	33.8	1.1
caso 2	33.7	1.2
caso 3	33.7	1.2

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{promedio} = 2.4$ MPa) y una baja variabilidad debido a su dosificación ($S_{fm} = 1.2$ MPa). Por lo tanto, su dosificación es prácticamente constante.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor mayor a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 3.1$ MPa y $S_{promedio} = 2.4$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (33.3 MPa y 33.7 MPa, respectivamente). Esta pequeña diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, en diciembre de 2015, donde se presenta una baja de resistencia y en agosto de 2016, donde se tienen resistencias más altas (ver Gráfico 4.73).

4.5.1.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.201 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 , T_2 , T_3 , T_5 y T_6 presentan resistencias medias por sobre a la requerida entre 4.9 a 8.2 MPa, lo que implica una dosificación holgada. Las muestras pertenecientes al subperiodo T_4 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 3.8 MPa, lo que representa una dosificación ajustada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación holgada que representa el 27% del tiempo y una dosificación ajustada durante el 10% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 63% del tiempo. Ver Tabla 4.204.

Tabla 4.204 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta E-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	27
Ajustada	10
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	63

4.5.1.2 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta E-RM, Hormigonera E

4.5.1.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

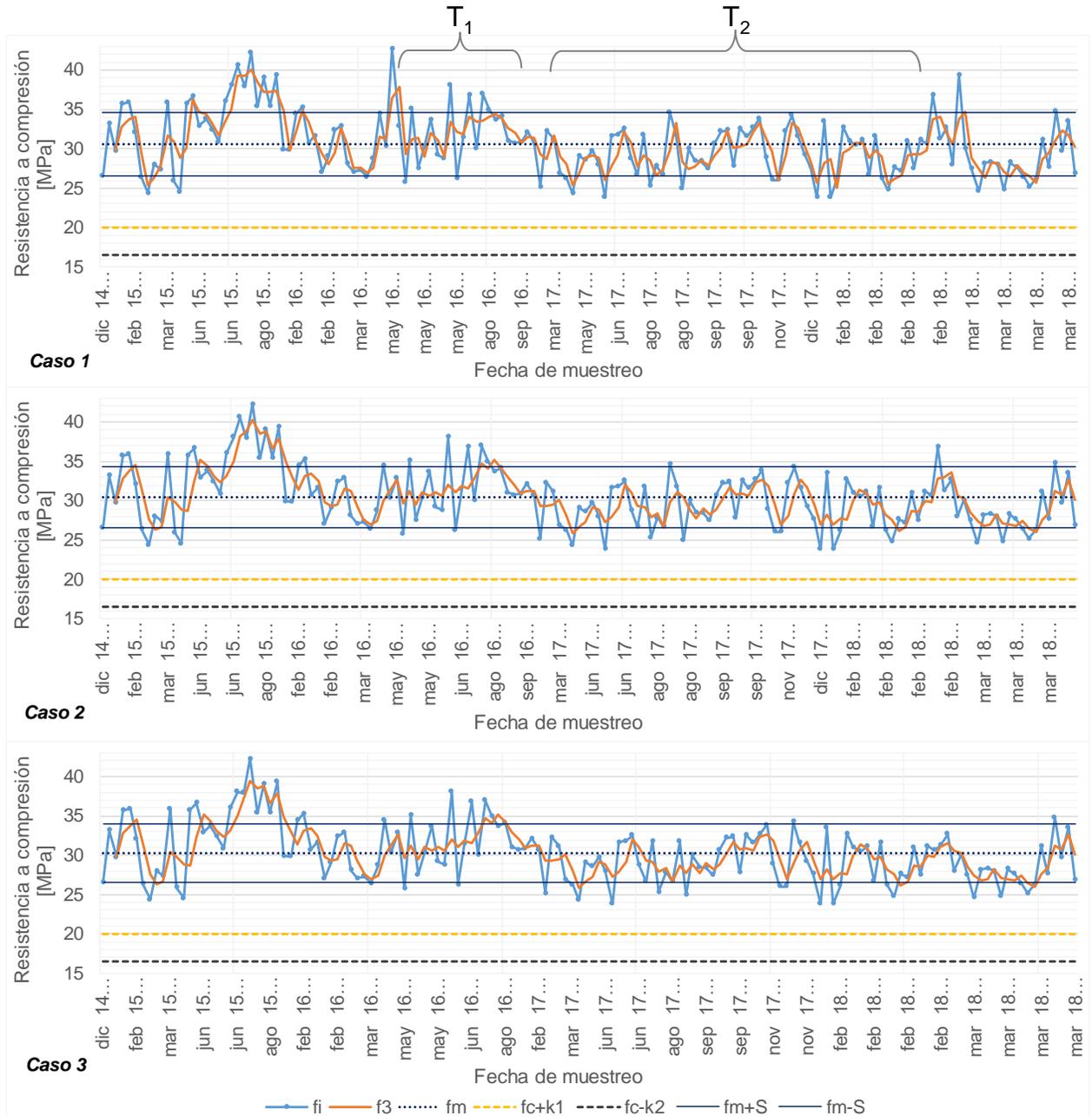


Gráfico 4.75 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta E-RM.

4.5.1.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 30.3 MPa y una desviación estándar de 3.7 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 24.8$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.205.

Tabla 4.205 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta E-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	4.0	152	30.6	25.1
caso 2	3.8	150	30.5	24.9
caso 3	3.7	146	30.3	24.8

Del Gráfico 4.75 se observa que hay una diferencia de aproximadamente 19 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 2 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 4 puntos de cambio durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.76 se presenta los 2 subperiodos con mayor detalle.

4.5.1.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 5.5 MPa ($f_m = 30.3$ MPa y $f_c + tS = 24.8$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.75 se observa que todas las muestras cumplen sobradamente con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.206.

Tabla 4.206 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB25 (10) 20/10, Planta E-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_1 < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.5.1.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

Se presenta solo los casos 1 y 3, dado que el caso 2 no considera muestras que se deban descartar en los subperiodos.

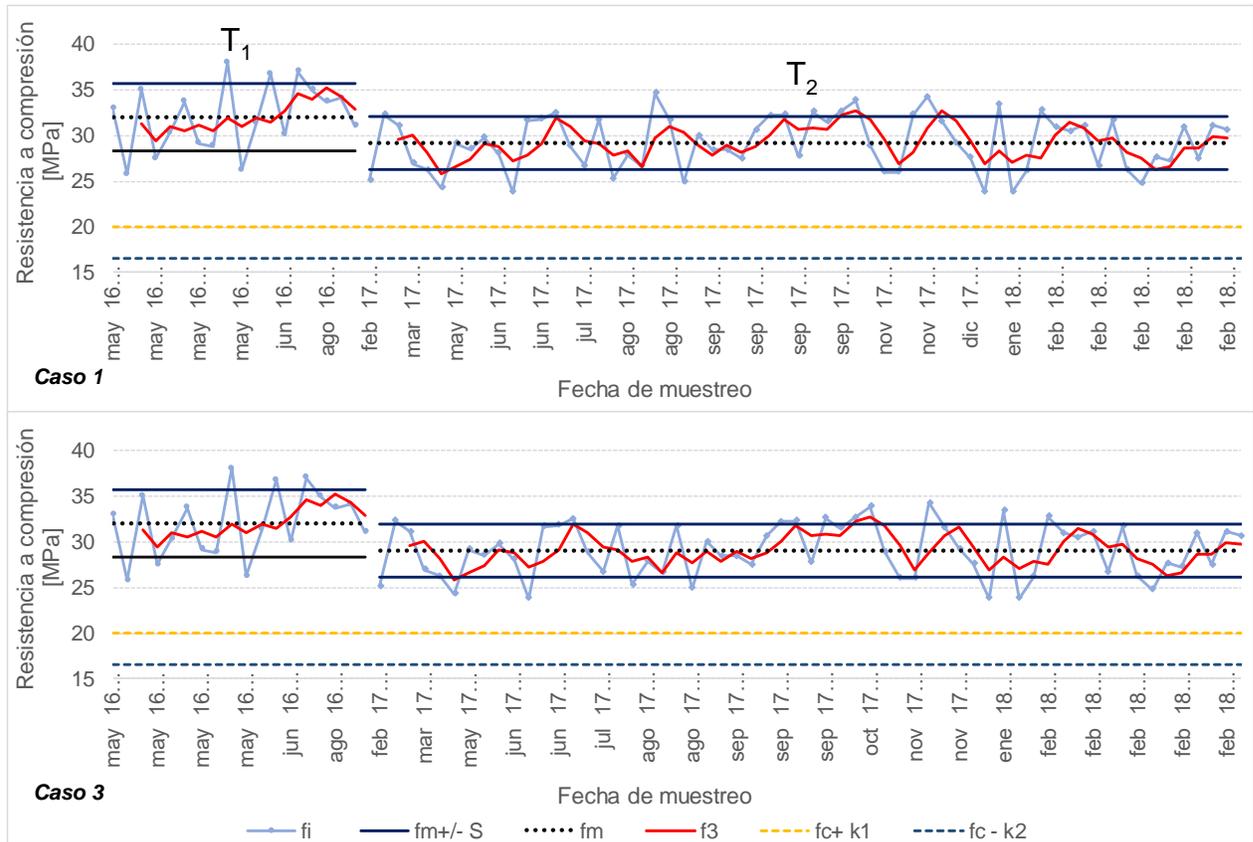


Gráfico 4.76 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta E-RM.

4.5.1.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.207 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos T_1 y T_2 , es 3.7 y 2.9 MPa, respectivamente, con un promedio de 3.1 MPa según Tabla 4.208. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.207 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta E-RM.

Nº subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T_1	caso 1	3.7	18	32.1	24.9
	caso 3	3.7	18	32.1	24.9
T_2	caso 1	2.9	61	29.2	23.8
	caso 3	2.9	59	29.1	23.7

Tabla 4.208 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta E-RM.

Caso	S_{promedio} [MPa]
caso 1	3.1
caso 3	3.1

En la Tabla 4.209 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 2.1 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos T_1 y T_2 , las muestras difieren en sus resistencias medias en 3 MPa.

Tabla 4.209 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos HB25 (10) 20/10, Planta E-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S_{fm} [MPa]
caso 1	30.6	2.0
caso 3	30.6	2.1

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad media asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 3.1$ MPa) y una variabilidad baja debido a su dosificación ($S_{fm} = 2.1$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor levemente mayor a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 3.7$ MPa y $S_{\text{promedio}} = 3.1$ MPa). Así como también, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (30.3 MPa y 30.6 MPa, respectivamente). Esta pequeña diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, el periodo previo a T_1 , de junio a agosto de 2015, presenta un alza de resistencia. Este periodo de ajuste contribuye a aumentar la desviación estándar de la totalidad de muestras (ver Gráfico 4.75).

4.5.1.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.207 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 y T_2 , presentan resistencias medias por sobre a la requerida en 7.2 y 5.4 MPa, respectivamente, lo que implica una dosificación holgada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación holgada durante el 60% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 40% del tiempo. Ver Tabla 4.210.

**Tabla 4.210 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB25 (10)
20/10, Planta E-RM.**

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	60
Ajustada	-
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	40

4.5.1.3 Hormigón HN30 (10) 20/10 de Planta E-RM, Hormigonera E

4.5.1.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

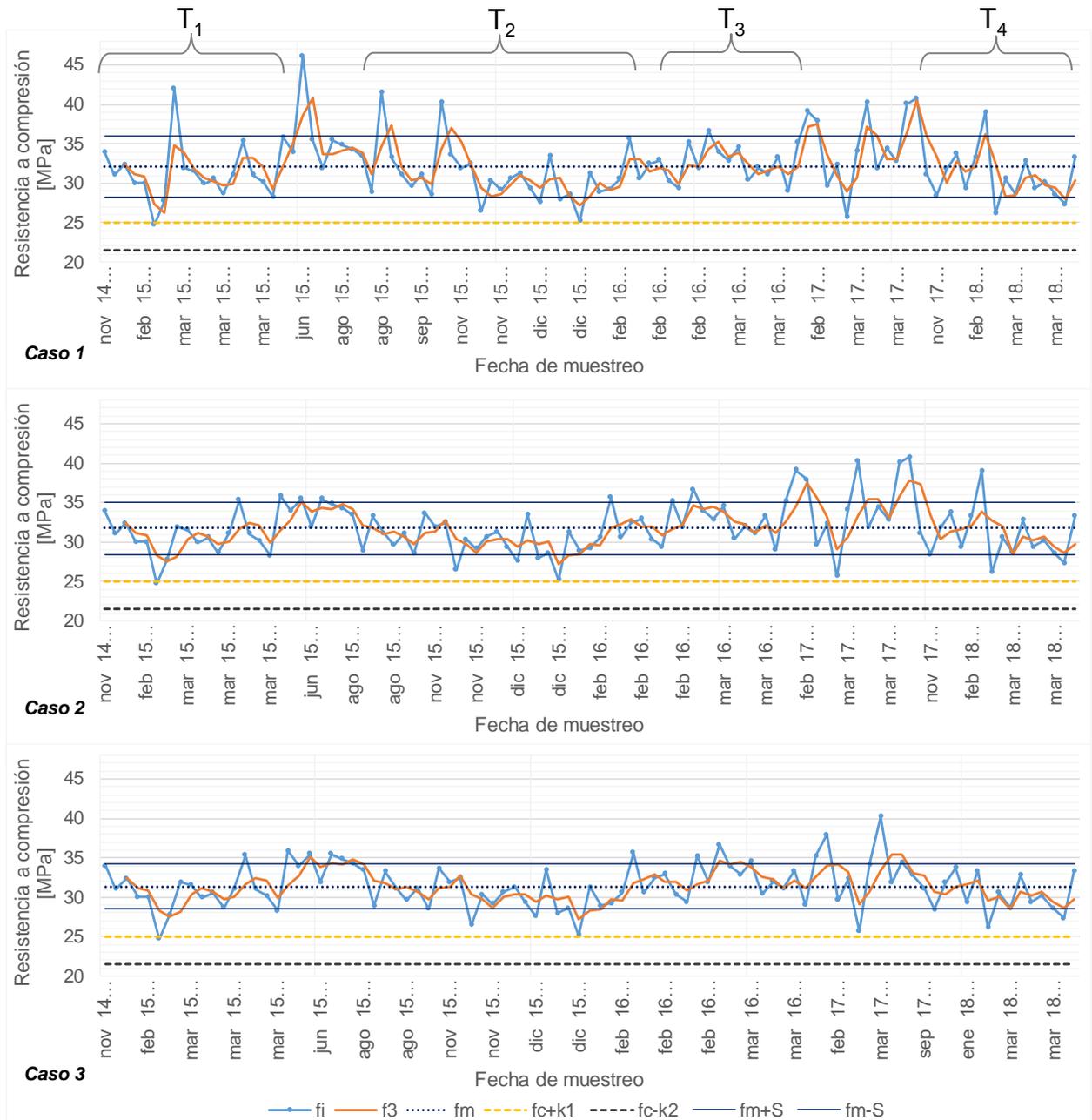


Gráfico 4.77 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta E-RM.

4.5.1.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 31.4 MPa y una desviación estándar de 2.8 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general media. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad muy bueno según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 28.6$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.211.

Tabla 4.211 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta E-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	3.9	99	32.2	30.0
caso 2	3.3	95	31.7	29.2
caso 3	2.8	91	31.4	28.6

Del Gráfico 4.77 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 16 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 4 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 3 puntos de cambio durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.78 se presenta los 4 subperiodos con mayor detalle.

4.5.1.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 2.8 MPa ($f_m = 31.4$ MPa y $f_c + tS = 28.6$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.77 se observa que todas las muestras cumplen sobradamente con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.212.

Tabla 4.212 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HN30 (10) 20/10, Planta E-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	0	0
caso 2	0	0	0	0
caso 3	0	0	0	0

4.5.1.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

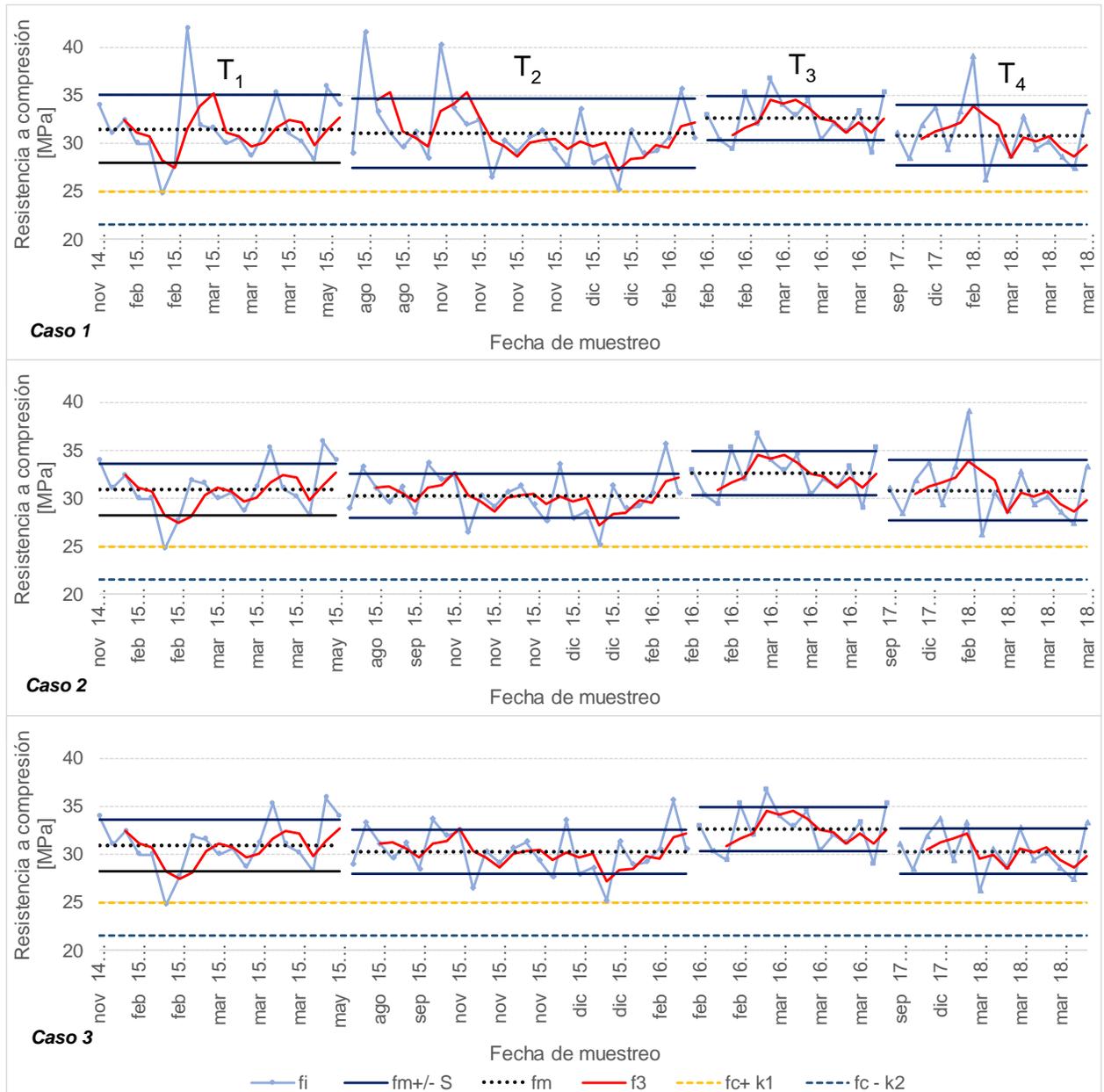


Gráfico 4.78 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta E-RM.

4.5.1.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.213 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 2.3 a 2.7 MPa, con un promedio de 2.4 MPa según Tabla 4.214. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.213 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta E-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	3.6	20	31.5	29.8
	caso 2	2.7	19	31.0	28.6
	caso 3	2.7	19	31.0	28.6
T ₂	caso 1	3.6	28	31.0	29.7
	caso 2	2.3	26	30.3	28.1
	caso 3	2.3	26	30.3	28.1
T ₃	caso 1	2.3	15	32.6	28.1
	caso 2	2.3	15	32.6	28.1
	caso 3	2.3	15	32.6	28.1
T ₄	caso 1	3.1	16	30.9	29.2
	caso 2	3.1	16	30.9	29.2
	caso 3	2.3	15	30.3	28.1

Tabla 4.214 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta E-RM.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	3.3
caso 2	2.6
caso 3	2.4

En la Tabla 4.215, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 1.1 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 2.3 MPa.

Tabla 4.215 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos HN30 (10) 20/10, Planta E-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S _{fm} [MPa]
caso 1	31.5	0.8
caso 2	31.2	1.0
caso 3	31.0	1.1

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{promedio} = 2.4$ MPa) y una baja variabilidad debido a su dosificación ($S_{fm} = 1.1$ MPa). Por lo tanto, su dosificación permanece prácticamente constante.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor levemente mayor a la desviación de la resistencia individual de los subperiodos ($S = 2.8$

MPa y $S_{\text{promedio}} = 2.4 \text{ MPa}$). Aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (31.4 MPa y 31.0 MPa, respectivamente). Esta pequeña diferencia entre las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, entre junio a agosto de 2015, y en marzo de 2017, donde se presentan resistencias más altas, las que contribuyen a aumentar la desviación estándar de la totalidad de muestras (ver Gráfico 4.77).

4.5.1.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.213 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T_1 , T_2 y T_4 , presentan resistencias medias por sobre a la requerida entre 2.2 a 2.4 MPa, lo que implica una dosificación ajustada. Las muestras pertenecientes al subperiodo T_3 , presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 4.5 MPa, lo que representa una dosificación holgada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada durante el 61% del tiempo y una dosificación holgada durante el 9% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 30% del tiempo. Ver Tabla 4.216.

Tabla 4.216 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta E-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	9
Ajustada	61
Óptima	-
Límite	-
Periodo de ajuste	30

4.5.2 Comentarios Planta E-RM

Sus hormigones presentan una variabilidad general media asociada a su proceso de confección, y a sus periodos de ajuste, su dosificación varía muy poco. Además, se observa que las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de hasta 19 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad que presentan.

Se observa que las fechas en que se presenta cambios en la resistencia media coinciden en los 3 hormigones, por lo tanto, podría atribuirse a una variación de alguna materia prima, como, por ejemplo, el cemento, que utiliza la planta para confeccionar sus hormigones. En junio de 2015, se tiene resistencias altas y en marzo de 2018 una baja en la resistencia en los 3 hormigones. Además, en el periodo de noviembre a diciembre de 2015 se observa una baja de resistencia en los hormigones HB30 y HN30, lo que podría atribuirse, por ejemplo, a las condiciones climáticas, debido a que en estos meses comienza a aumentar la temperatura ambiente. El hormigón HB25 no cuenta con

resultados de ensayos en este periodo. Estas alzas y bajas en la resistencia tienen una duración cercana a un mes, lo que indica que, una vez detectadas, la planta reacciona frente a estas variaciones mediante ajustes en su dosificación. Cuando se produce un alza en la resistencia luego se produce una baja, y cuando se produce una baja en la resistencia, ésta es seguida por un alza continua en la resistencia.

La planta funciona principalmente en base a una dosificación holgada. Sin embargo, el hormigón HN30 presenta una dosificación ajustada.

4.6 Hormigonera F

4.6.1 Planta F-RM

4.6.1.1 Hormigón HB30 (10) 20/10 de Planta F-RM, Hormigonera F

4.6.1.1.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

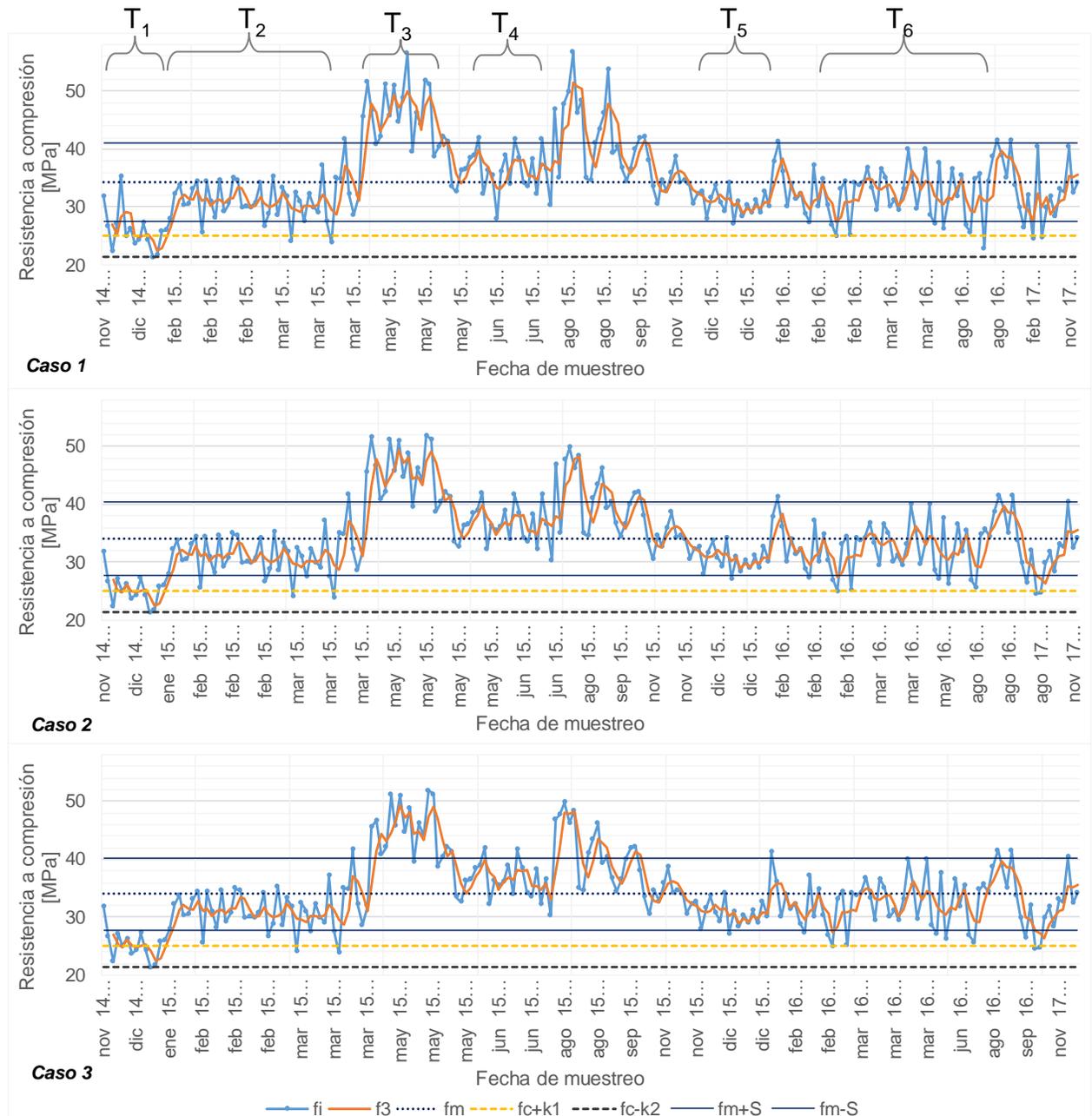


Gráfico 4.79 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta F-RM.

4.6.1.1.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 34.1 MPa y una desviación estándar de 6.3 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general muy alta. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad pobre según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida mayor $f_c + tS = 33.1$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.217.

Tabla 4.217 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta F-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	6.8	219	34.4	33.7
caso 2	6.3	212	34.1	33.1
caso 3	6.3	209	34.1	33.1

Del Gráfico 4.79 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 30 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 6 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 7 puntos de cambio durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.80 se presenta los 6 subperiodos con mayor detalle.

4.6.1.1.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 1 MPa ($f_m = 34.1$ MPa y $f_c + tS = 33.1$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.79 se observa que, para el caso 3, seis muestras no cumplen con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento del 3% está dentro del 10% de fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición de resistencia individual, una muestra no la cumple. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.218.

Tabla 4.218 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB30 (10) 20/10, Planta F-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	5	2	1	0
caso 2	6	3	1	0
caso 3	6	3	1	0

4.6.1.1.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

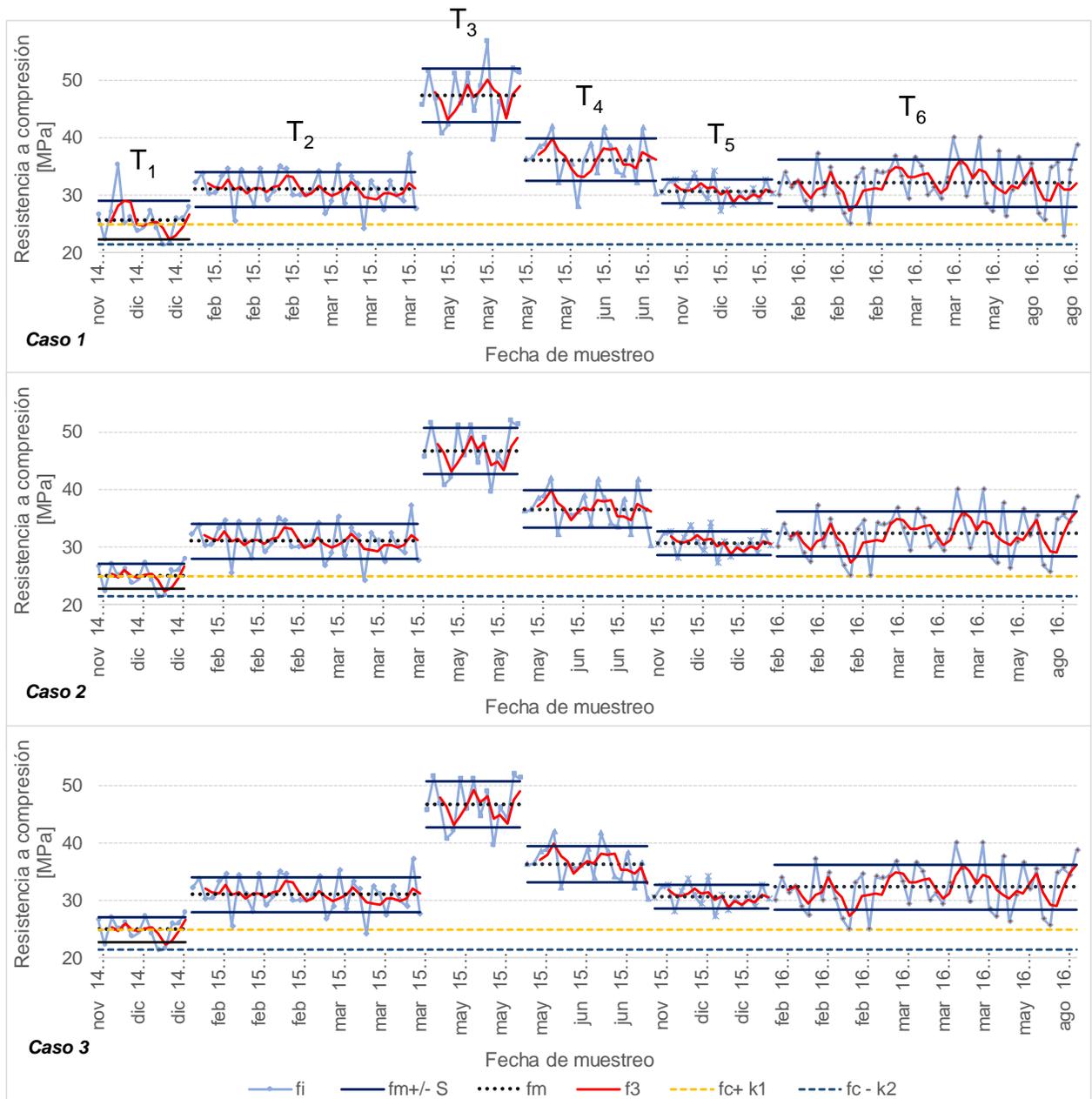


Gráfico 4.80 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta F-RM.

4.6.1.1.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.219 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 2.0 a 4.1 MPa, con un promedio de 3.3 MPa según Tabla 4.220. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.219 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta F-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	3.3	15	25.7	29.5
	caso 2	2.1	14	25.0	27.9
	caso 3	2.1	14	25.0	27.9
T ₂	caso 1	3.0	35	31.1	28.9
	caso 2	3.0	35	31.1	28.9
	caso 3	3.0	35	31.1	28.9
T ₃	caso 1	4.7	16	47.3	31.2
	caso 2	4.1	15	46.7	30.5
	caso 3	4.1	15	46.7	30.5
T ₄	caso 1	3.7	21	36.2	29.9
	caso 2	3.3	20	36.6	29.4
	caso 3	3.1	19	36.3	29.2
T ₅	caso 1	2.0	18	30.7	27.6
	caso 2	2.0	18	30.7	27.6
	caso 3	2.0	18	30.7	27.6
T ₆	caso 1	4.2	47	32.1	30.3
	caso 2	4.0	46	32.3	30.1
	caso 3	4.0	46	32.3	30.1

Tabla 4.220 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB30 (10) 20/10, Planta F-RM.

Caso	$S_{promedio}$ [MPa]
caso 1	3.6
caso 2	3.3
caso 3	3.3

En la Tabla 4.221 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 7.4 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 21.7 MPa.

Tabla 4.221 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos HB30 (10) 20/10, Planta F-RM.

Caso	$f_{m \text{ promedio}}$ [MPa]	S_{fm} [MPa]
caso 1	33.9	7.4
caso 2	33.7	7.4
caso 3	33.7	7.4

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad media asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 3.3$ MPa) y una variabilidad muy alta asociada a su dosificación ($S_{fm} = 7.4$ MPa). Por lo tanto, la mayor variabilidad de sus resultados de resistencia a compresión está causada principalmente por su dosificación.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor similar a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 6.3$ MPa y $S_{fm} = 7.4$ MPa MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (34.1 MPa y 33.7 MPa, respectivamente). Esto se explica porque al considerar el total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad de la dosificación, pasando inadvertida la variabilidad básica del proceso de confección, debido a que esta última es menor ($S_{\text{promedio}} = 3.3$ MPa).

4.6.1.1.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.219 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 presentan una resistencia media por debajo a la requerida en 2.9 MPa, lo que implica una dosificación límite. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_2 , T_5 y T_6 , presentan resistencias medias por sobre a la requerida entre 2.2 y 3.1 MPa, lo que representa una dosificación ajustada. Las muestras pertenecientes a los subperiodos T_3 y T_4 , presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 16.2 y 7.1 MPa, respectivamente, lo que representa una dosificación holgada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada durante el 31% del tiempo, una dosificación límite que representa el 8% y una dosificación holgada durante el 5% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa el 56% del tiempo. Ver Tabla 4.222.

Tabla 4.222 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de HB30 (10) 20/10, Planta F-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	5
Ajustada	31
Óptima	-
Límite	8
Periodo de ajuste	56

4.6.1.2 Hormigón HB25 (10) 20/10 de Planta F-RM, Hormigonera F

4.6.1.2.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

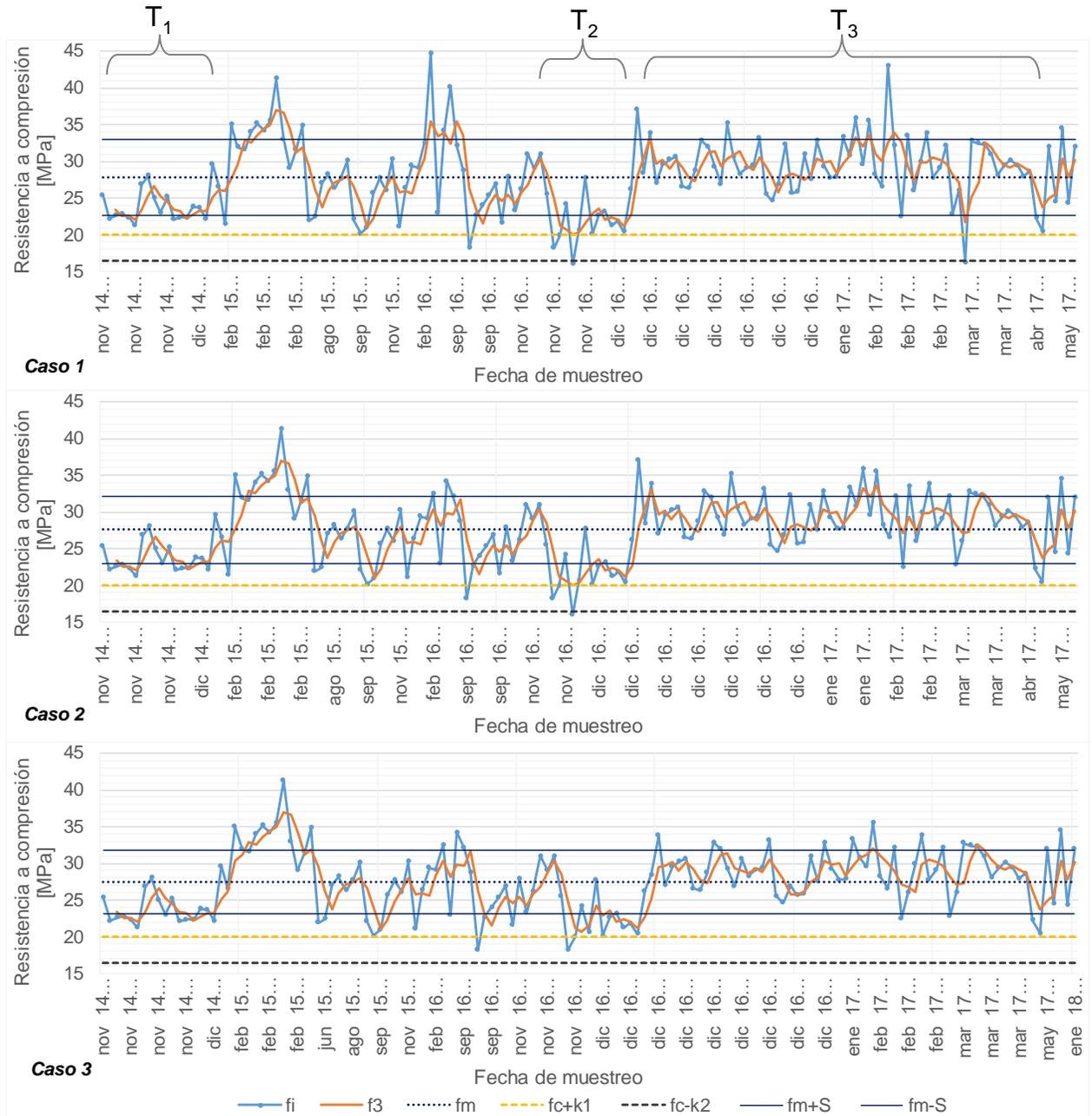


Gráfico 4.81 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta F-RM.

4.6.1.2.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 27.5 MPa y una desviación estándar de 4.4 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general alta. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de

calidad justo según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 25.6$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.223.

Tabla 4.223 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta F-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	5.1	152	27.8	26.6
caso 2	4.6	148	27.6	25.9
caso 3	4.4	141	27.5	25.6

Del Gráfico 4.81 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 24 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 3 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 5 puntos de cambio durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.82 se presenta los 3 subperiodos con mayor detalle.

4.6.1.2.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 1.9 MPa ($f_m = 27.5$ MPa y $f_c + tS = 25.6$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Del Gráfico 4.81 se observa que, para el caso 3, todas las muestras cumplen con ambas condiciones de resistencia. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.224.

Tabla 4.224 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HB25 (10) 20/10, Planta F-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_1 < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	0	0	2	1
caso 2	0	0	1	1
caso 3	0	0	0	0

4.6.1.2.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

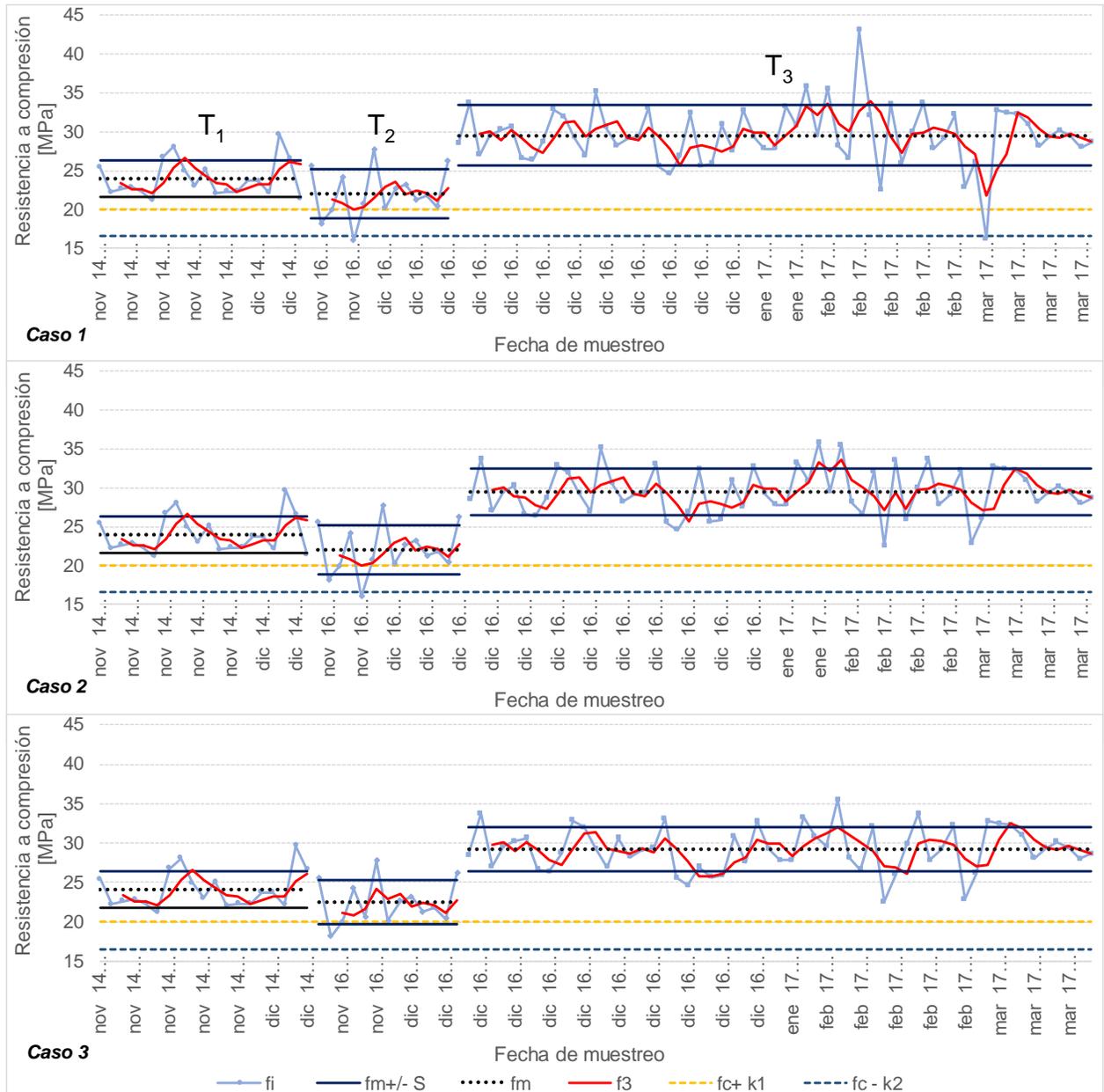


Gráfico 4.82 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta F-RM.

4.6.1.2.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.225 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 2.3 a 2.8 MPa, con un promedio de 2.7 MPa según Tabla 4.226. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.225 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta F-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	2.4	20	23.9	23.1
	caso 2	2.4	20	23.9	23.1
	caso 3	2.3	19	24.1	23.1
T ₂	caso 1	3.2	14	22.0	24.3
	caso 2	3.2	14	22.0	24.3
	caso 3	2.8	13	22.5	23.8
T ₃	caso 1	3.8	61	29.5	24.9
	caso 2	3.0	58	29.5	23.9
	caso 3	2.8	55	29.2	23.6

Tabla 4.226 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta F-RM.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	3.5
caso 2	2.9
caso 3	2.7

En la Tabla 4.227, se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 3.5 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 6.7 MPa.

Tabla 4.227 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos HB25 (10) 20/10, Planta F-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S _{fm} [MPa]
caso 1	25.1	3.9
caso 2	25.1	3.9
caso 3	25.2	3.5

Se concluye que este hormigón presenta una baja variabilidad asociada al proceso de confección ($S_{\text{promedio}} = 2.7$ MPa) y una variabilidad media asociada a la dosificación ($S_{\text{fm}} = 3.5$ MPa). Por lo tanto, la mayor variabilidad de sus resultados de resistencia a compresión está causada principalmente por su dosificación.

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor levemente mayor a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 4.4$ MPa y $S_{\text{fm}} = 3.5$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es mayor al promedio de la resistencia media de los subperiodos (27.5 MPa y 25.2 MPa, respectivamente). La similitud entre ambos valores de desviación estándar se explica porque al considerar el

total de muestras se ven reflejados principalmente los efectos de la variabilidad de la dosificación, pasando inadvertida la variabilidad básica del proceso de confección, debido a que esta última es menor ($S_{\text{promedio}} = 2.7 \text{ MPa}$). Sin embargo, la diferencia entre ambas desviaciones se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos, como, por ejemplo, en febrero de 2015, febrero y septiembre de 2016, donde se presentan resistencias más altas (ver Gráfico 4.81).

4.6.1.2.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.225 se tiene que las muestras pertenecientes al subperiodo T_1 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 1 MPa, lo que implica una dosificación óptima. Las muestras pertenecientes al subperiodo T_2 presentan una resistencia media por debajo a la requerida en 1.3 MPa, lo que representa una dosificación límite. Las muestras pertenecientes al subperiodo T_3 presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 5.6 MPa, lo que representa una dosificación holgada.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación holgada durante el 19% del tiempo, una dosificación óptima durante el 9% y una dosificación límite que representa el 3% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 69% del tiempo. Ver Tabla 4.228.

Tabla 4.228 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de Hormigón HB25 (10) 20/10, Planta F-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	19
Ajustada	-
Óptima	9
Límite	3
Periodo de ajuste	69

4.6.1.3 Hormigón HN30 (10) 20/10 de Planta F-RM, Hormigonera F

4.6.1.3.1 Resultados de resistencia a compresión del total de muestras

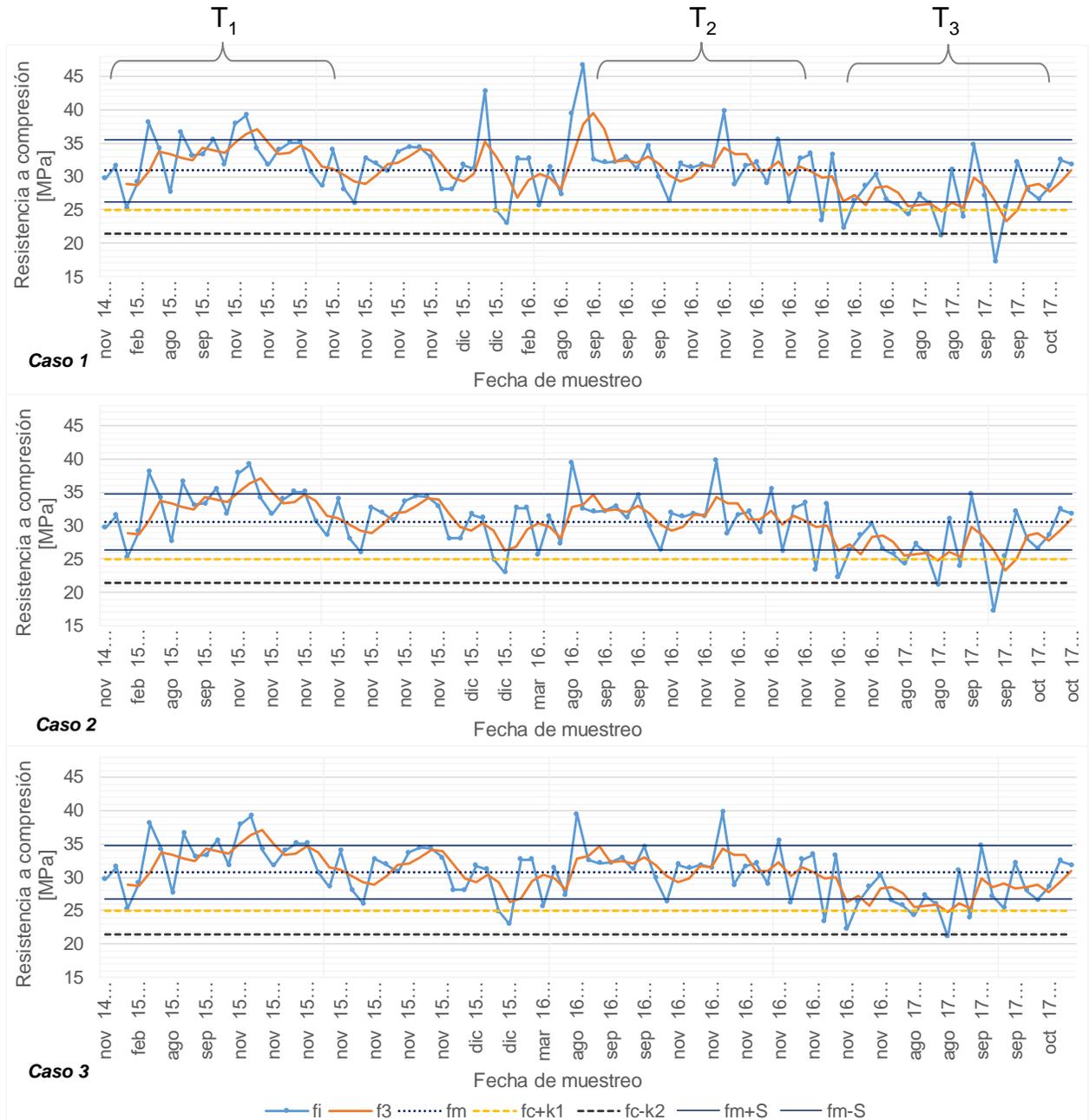


Gráfico 4.83 Resultados de resistencia a compresión Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta F-RM.

4.6.1.3.2 Análisis de variabilidad del total de muestras

Al considerar la totalidad de muestras, para el caso 3, se tiene una resistencia media de 30.7 MPa y una desviación estándar de 4.0 MPa, por lo tanto, el hormigón presenta una variabilidad general alta. Este valor de desviación estándar se asocia a un control de calidad bueno, según código ACI 214R-11, y el hormigón se debe diseñar para una resistencia requerida $f_c + tS = 30.2$ MPa. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.229.

Tabla 4.229 Resultados del análisis del total de muestras Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta F-RM.

Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
caso 1	4.7	90	30.9	31.0
caso 2	4.2	88	30.6	30.4
caso 3	4.0	87	30.7	30.2

Del Gráfico 4.83 se observa que, para el caso 3, hay una diferencia de aproximadamente 17 MPa entre los valores más alto y más bajo de resistencia alcanzados. Además, se tiene 3 subperiodos en los que la resistencia media se mantiene constante. Estos subperiodos se ubican entre puntos de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye. Se observa al menos 2 puntos de cambio durante el periodo analizado. En el Gráfico 4.84 se presenta los 3 subperiodos con mayor detalle.

4.6.1.3.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

Se observa que la resistencia media está por sobre a la resistencia requerida en 0.5 MPa ($f_m = 30.7$ MPa y $f_c + tS = 30.2$ MPa) por lo tanto, el hormigón debería cumplir con la normativa en cuanto a resistencia. Sin embargo, del Gráfico 4.83 se observa que, para el caso 3, una muestra no cumple con la condición de resistencia media móvil. Este porcentaje de no cumplimiento del 1% está dentro del 10% de fracción defectuosa que puede presentar el hormigón. Respecto a la condición de resistencia individual, se tiene que, para el caso 3, una muestra no la cumple. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.230.

Tabla 4.230 Porcentaje de no cumplimiento de resultados de resistencia HN30 (10) 20/10, Planta F-RM (según NCh1998.Of89).

Caso	$f_3 < f_c + k_1$		$f_i < f_c - k_2$	
	Nº Muestras	Muestras [%]	Nº Muestras	Muestras [%]
caso 1	3	3	2	2
caso 2	3	3	2	2
caso 3	1	1	1	1

4.6.1.3.4 Resultados de resistencia a compresión de subperiodos

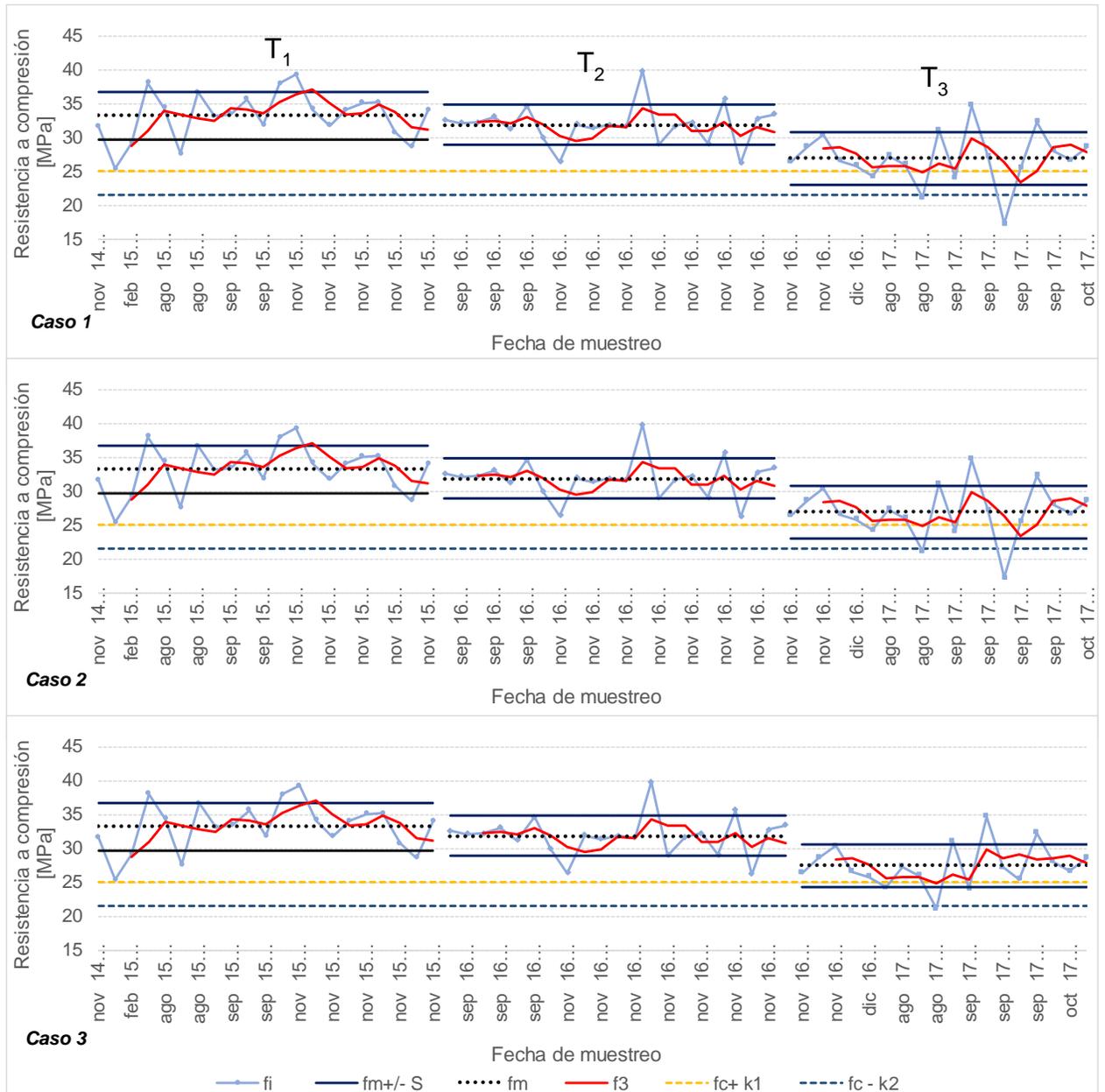


Gráfico 4.84 Resistencia a compresión de subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta F-RM.

4.6.1.3.5 Análisis de variabilidad de subperiodos de resistencia media constante

En la Tabla 4.231 se presentan los resultados de análisis de los subperiodos, cuya resistencia media permanece prácticamente constante. Se tiene que, para el caso 3, la desviación estándar de los subperiodos varía entre 2.9 a 3.6 MPa, con un promedio de 3.2 MPa según Tabla 4.232. Este valor representa la variabilidad básica del proceso de confección del hormigón.

Tabla 4.231 Resultados del análisis de subperiodos Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta F-RM.

N° subperiodo	Caso	S [MPa]	N	Resistencia media f_m [MPa]	Resistencia requerida $f_c + tS$ [MPa]
T ₁	caso 1	3.6	21	33.2	29.7
	caso 2	3.6	21	33.2	29.7
	caso 3	3.6	21	33.2	29.7
T ₂	caso 1	2.9	21	31.8	28.9
	caso 2	2.9	21	31.8	28.9
	caso 3	2.9	21	31.8	28.9
T ₃	caso 1	3.9	19	26.9	30.2
	caso 2	3.9	19	26.9	30.2
	caso 3	3.2	18	27.5	29.3

Tabla 4.232 Promedio de desviación estándar de resistencia individual Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta F-RM.

Caso	S _{promedio} [MPa]
caso 1	3.5
caso 2	3.5
caso 3	3.2

En la Tabla 4.233 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos. Para el caso 3, se tiene que la desviación estándar de la resistencia media es 3.0 MPa. Este valor representa la variabilidad del hormigón causada por su dosificación. Cabe mencionar que, en los subperiodos, las muestras difieren en sus resistencias medias en hasta 5.7 MPa.

Tabla 4.233 Desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos HN30 (10) 20/10, Planta F-RM.

Caso	f_m promedio [MPa]	S _{fm} [MPa]
caso 1	30.6	3.3
caso 2	30.6	3.3
caso 3	30.8	3.0

Se concluye que este hormigón presenta una variabilidad media asociada al proceso de confección ($S_{promedio} = 3.2$ MPa) y una variabilidad media asociada a su dosificación ($S_{fm} = 3.0$ MPa).

Se observa que la desviación estándar de la totalidad de muestras tiene un valor levemente mayor a la desviación de la resistencia individual y a la desviación de la resistencia media de los subperiodos ($S = 4.0$ MPa, $S_{promedio} = 3.2$ MPa y $S_{fm} = 3.0$ MPa). Aun así, la resistencia media del total de muestras es similar al promedio de la resistencia media de los subperiodos (30.7 MPa y 30.8 MPa, respectivamente). Esta diferencia entre

las desviaciones estándar se explica porque al considerar la totalidad de muestras se tienen periodos de ajuste que no son considerados en el análisis de subperiodos.

4.6.1.3.6 Tipos de dosificaciones a partir de resultados de resistencia de subperiodos

De la Tabla 4.231 se tiene que las muestras pertenecientes a los subperiodos T₁ y T₂ presentan una resistencia media por sobre a la requerida en 3.5 y 2.9 MPa, respectivamente, lo que representa una dosificación ajustada. Las muestras pertenecientes al subperiodo T₃ presentan una resistencia media por debajo a la requerida en 1.8 MPa, lo que representa una dosificación límite.

Se concluye que, para este hormigón, la planta presenta una dosificación ajustada durante el 47% del tiempo y una dosificación límite que representa el 21% del tiempo estudiado. El periodo de ajuste representa un 32% del tiempo. Ver Tabla 4.234.

Tabla 4.234 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones Hormigón HN30 (10) 20/10, Planta F-RM.

Tipo de dosificación	Tiempo [%]
Holgada	-
Ajustada	47
Óptima	-
Límite	21
Periodo de ajuste	32

4.6.2 Comentarios Planta F-RM

Sus hormigones presentan una variabilidad general alta a muy alta, asociada principalmente a su dosificación y a sus periodos de ajuste. Además, las muestras alcanzan diferencias entre sus resistencias de entre 17 a 30 MPa, lo que tiene relación con la variabilidad que presentan.

Se observa que no hay continuidad en el tiempo de los resultados de resistencia de esta planta. No obstante, es posible identificar algunas fechas en que los cambios en la resistencia media coinciden en los 3 hormigones, y que podrían atribuirse a una variación del cemento o alguna materia prima que utiliza la planta, o a un cambio en las condiciones climáticas. En febrero de 2015 y febrero de 2016, se tienen muestras con resistencias altas, en los hormigones HB30 y HB25, y en febrero de 2017, se tiene una baja en la resistencia en estos dos hormigones. Además, en noviembre a diciembre de 2014 se observa una baja de resistencia en los tres hormigones, que coincide con la temporada en donde las temperaturas ambientales comienzan a aumentar, por lo que podría atribuirse a esto. Las alzas y bajas en la resistencia tienen una duración cercana a un mes, lo que indica que una vez detectadas la planta reacciona frente a estas variaciones mediante ajustes en su dosificación, cuando se produce un alza en la resistencia luego se produce una baja, y cuando se produce una baja en la resistencia, ésta es seguida por un alza continua en la resistencia.

La planta funciona principalmente en base a una dosificación ajustada. Los periodos que presentan dosificación límite y óptima corresponden a bajas en la resistencia media, debidas, por ejemplo, a una variación de alguna materia prima, como el cemento, o a cambios en las temperaturas ambientales, y presentan una duración cercana a un mes, ya que son compensados mediante ajustes de dosificación. El hormigón HB25 presenta principalmente una dosificación holgada, lo que podría indicar que está diseñado con una dosis mínima de cemento para hacerlo bombeable, y que por lo tanto su dosificación no se ajusta durante periodos en que las resistencias son más altas a causa de un cambio en la calidad del cemento, por ejemplo.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De las 6 hormigoneras analizadas, la hormigonera A es la que presenta un mayor volumen de muestras y, por lo tanto, podría asociarse a un mayor volumen de producción de hormigón, con un 33% del total de muestras. En el Gráfico 5.1, se presentan los números de muestras de cada hormigón.

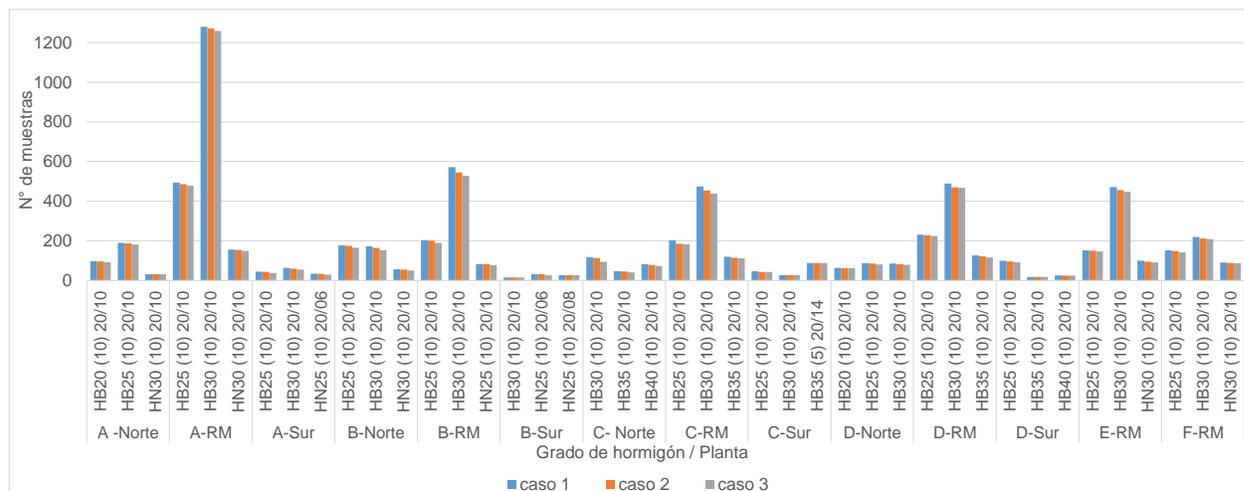


Gráfico 5.1 Número de muestras analizadas de distintos hormigones para cada planta, según los 3 casos de análisis.

Los porcentajes del total de muestras analizadas, que presenta cada hormigonera se indican en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Porcentajes del total de muestras analizadas según cada hormigonera

Hormigonera	Muestras [%]
Hormigonera A	33
Hormigonera B	18
Hormigonera C	16
Hormigonera D	17
Hormigonera E	10
Hormigonera F	6

Además, se observa que las distintas zonas de Chile presentan grandes diferencias en la cantidad de muestras de hormigón. La región metropolitana (RM) presenta el mayor número de muestras, equivalentes a un 77% del total, y la zona sur presenta cantidades muy bajas, con un 7% del total de muestras. Esta diferencia se relaciona con la cantidad y tamaño de las obras que se realizan en la región metropolitana, las que en general, al ser proyectos más grandes utilizan un mayor volumen de hormigón, y por lo tanto, requieren un mayor control, lo que implica mayor frecuencia de muestreo. El porcentaje de muestras estudiadas según la zona de procedencia se indica en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Porcentajes de muestras que presentan las plantas de las distintas zonas de Chile.

Zona	Muestras [%]
Norte	16
RM	77
Sur	7

5.1 Casos de análisis

En el caso 1 se considera todas las muestras. En el caso 2, no se considera las muestras que presentan valores anómalos de resistencia, correspondientes a casos aislados y que equivalen al 7% del total de muestras. Por último, en el caso 3, no se considera las muestras que están asociadas a posibles errores de laboratorio y que representan un 10% del total. Los porcentajes de muestras no consideradas, según cada caso de análisis, se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Muestras no consideradas según casos de análisis.

caso	Muestras no consideradas [%]
caso 1	0
caso 2	7
caso 3	10

5.2 Análisis de Variabilidad

5.2.1 Análisis de variabilidad general a partir del total de muestras

La variabilidad del total de muestras representa la variabilidad general del hormigón y está relacionada directamente con la desviación estándar de la resistencia a compresión. Un valor de desviación estándar menor a 2.8 MPa se asocia a un control de calidad excelente, según código ACI 214R-11, y, además, el hormigón presenta una baja variabilidad, según lo indicado en la Tabla 3.2 (Capítulo 3.2.1.4.)

En el Gráfico 5.2 se tienen las desviaciones estándar de la resistencia a compresión que presenta cada hormigón.

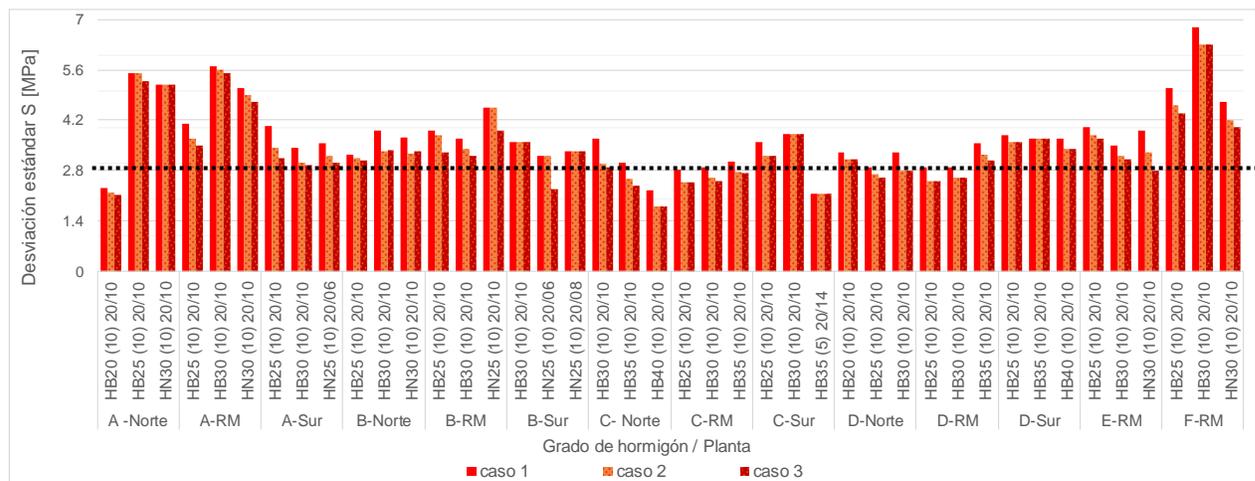


Gráfico 5.2 Desviación estándar de resistencia del total de muestras de distintos hormigones, según los 3 casos de análisis.

Se observa que la planta F-RM, presenta hormigones con mayor desviación estándar, cuyos valores varían entre 4 a 7 MPa. Luego, se tiene la hormigonera A, específicamente la plantas A-Norte y A-RM, que presentan dos hormigones con desviaciones mayores a 4 MPa. Asimismo, la planta A-Norte, tiene un hormigón que presenta una desviación estándar menor a 2.8 MPa. En general, la mayoría de las plantas tienen desviaciones menores a 4 MPa, lo que se asocia a un control de calidad bueno según código ACI 214R-11, y representa una variabilidad general media. Las plantas C-Norte, C-RM, D-Norte, y D-RM presentan hormigones cuya desviación estándar es menor a 2.8 MPa, y por lo tanto tienen una variabilidad general baja.

Además, se observa que las plantas A-Norte y A-RM, presentan mucha variación entre sus distintos hormigones. Por ejemplo, en la planta A-Norte, se tienen hormigones cuya desviación estándar es baja ($S < 2.8$ MPa) y hormigones cuya desviación estándar es muy alta ($S > 5$ MPa). La planta A-RM presenta variaciones menores entre las desviaciones estándar de sus hormigones, cuyos valores varían entre 4 a 5.6 MPa aproximadamente, presentando una variabilidad general alta a muy alta. La planta A-Sur presenta desviaciones estándar más parejas entre sus distintos hormigones. Las

hormigoneras B, C, D y E, también tienen un comportamiento similar entre sus distintas plantas y hormigones. Las plantas de las hormigoneras C y D, en general, presentan desviaciones estándar menores a 2.8 MPa. Las plantas de las hormigoneras B y E, presentan valores levemente mayores a 2.8 MPa.

5.2.1.1 Comentarios y conclusiones

Las plantas cuyos hormigones presentan una mayor variabilidad general son la F-RM, seguida de las plantas A-Norte y A-RM. Las plantas de las hormigoneras B, C, D, y E presentan hormigones con una variabilidad general media a baja.

La hormigonera A presenta plantas y hormigones con distintos comportamientos en cuanto a su variabilidad general. El resto de las hormigoneras presenta un comportamiento similar entre sus distintas plantas y hormigones.

No se observan grandes diferencias entre los casos de análisis 1, 2 y 3.

5.2.2 Análisis de variabilidad de subperiodos

5.2.2.1 Análisis de variabilidad básica de subperiodos de resistencia media constante

La desviación estándar de la resistencia individual en los subperiodos está asociada a la variabilidad básica que presenta el hormigón, debida al proceso de confección. En el Gráfico 5.3 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia de los subperiodos.

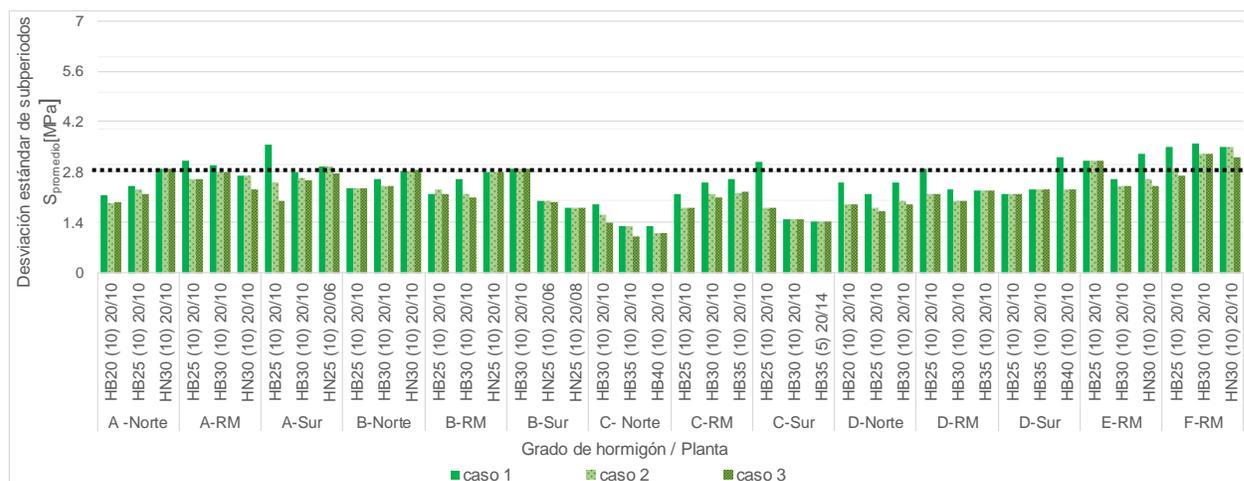


Gráfico 5.3 Desviación estándar promedio de la resistencia de subperiodos de distintos hormigones.

Un valor de desviación estándar menor a 2.8 MPa se asocia a un control de calidad excelente, según código ACI 214R-11 y además, el hormigón presenta una baja variabilidad debido a su confección, según lo indicado en la Tabla 3.2 (Capítulo 3.2.1.4.).

Del Gráfico 5.3, se observa que, la desviación estándar de los distintos hormigones, en general, es menor a 2.8 MPa, lo que representa una variabilidad básica baja asociada al proceso de confección. Los hormigones de la planta F-RM, presentan desviaciones mayores a este valor, pero no superan los 3.5 MPa, lo que implica una variabilidad básica media. La planta C-Norte, presenta hormigones con la menor desviación estándar.

5.2.2.2 Comentarios y conclusiones

Todas las plantas presentan una variabilidad básica entre baja y media, por lo tanto, en general, presentan un control de calidad muy bueno a excelente del proceso de confección de sus hormigones, según código ACI 214R-11.

Los casos de análisis, en general, no presentan grandes diferencias en los resultados de desviación estándar, y, por lo tanto, en la variabilidad básica que presentan los hormigones.

Las plantas pertenecientes a las hormigoneras B, C y D presentan las menores variabilidades, por lo tanto, el proceso de confección presenta un control de calidad excelente.

5.2.2.3 Análisis de variabilidad asociada a dosificación

La desviación estándar de la resistencia media de los distintos subperiodos está relacionada con los cambios en la resistencia media que éstos presentan y, por lo tanto, está asociada a la variabilidad de la dosificación del hormigón, y está originado por un ajuste de dosificación para compensar una variación de alguna materia prima, como el cemento, por ejemplo. En el Gráfico 5.4 se presentan los resultados de la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos.

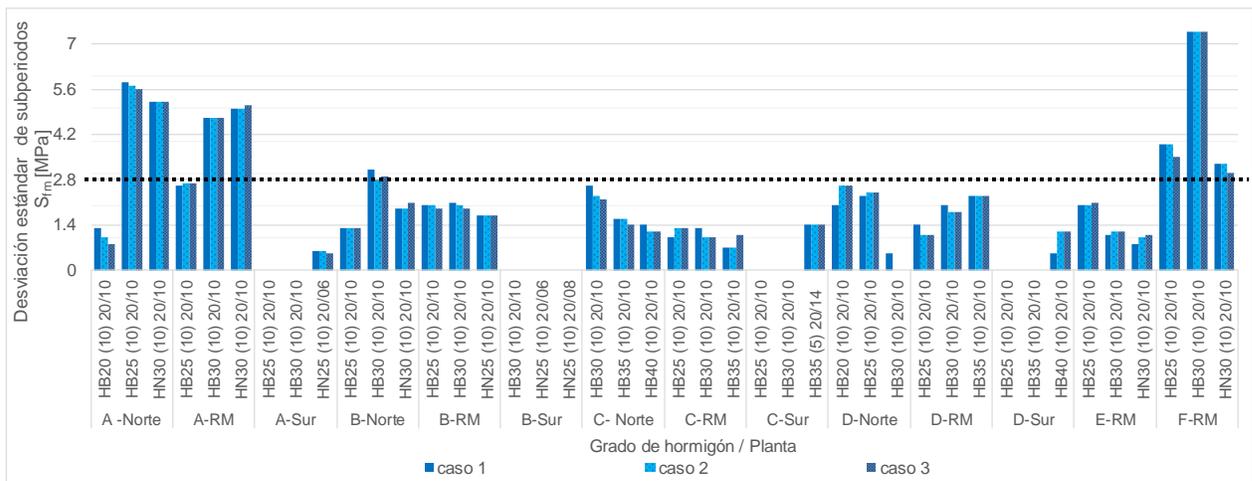


Gráfico 5.4 Desviación estándar de la resistencia media de subperiodos de distintos hormigones, según los 3 casos de análisis.

Del Gráfico 5.4 se observa que la desviación estándar de la resistencia media de los subperiodos, varía entre 0 a casi 8 MPa para los distintos hormigones. Este valor representa la variabilidad asociada a la dosificación. Un hormigón de la planta F-RM presenta la mayor desviación, cuyo valor es cercano a 8 MPa. Se observa, que los hormigones de la planta A-Norte y A-RM también presentan desviaciones altas, con valores entre 4 a 6 MPa aproximadamente. Estos valores indican que los hormigones presentan una alta variabilidad en la resistencia media de sus subperiodos y, por lo tanto, una alta variabilidad asociada a su dosificación.

El resto de los hormigones, en general, presentan desviaciones inferiores a 2.8 MPa, y por lo tanto su dosificación varía muy poco, o en algunos casos, es prácticamente constante.

Además, se observa que las plantas A-Norte y A-RM de la hormigonera A tiene distintos comportamientos entre sus distintos hormigones. Algunos presentan una variabilidad muy alta asociada a su dosificación y otros presentan una dosificación prácticamente constante.

La planta F-RM también presenta distintos comportamientos en sus hormigones. Como ya se mencionó, un hormigón de esta planta presenta la mayor variabilidad en cuanto a su dosificación, pero los otros dos hormigones presentan una variabilidad media.

5.2.2.4 Comentarios y conclusiones

Respecto a la resistencia media de los subperiodos se observa que, ésta tiende a ser constante en el subperiodo, hasta que se produce un punto de cambio, donde la resistencia media aumenta o disminuye, y posteriormente llega a ser constante nuevamente. Por lo tanto, existe un continuo equilibrio entre las variaciones de alguna materia prima, y los ajustes en la dosificación. Sin embargo, también se da el caso, en que las variaciones de resistencia están únicamente relacionadas a las variaciones de las materias primas, y las dosificaciones son constantes. La variabilidad de la dosificación abarca los dos casos, y no es posible diferenciarlos claramente, solo, a partir de los resultados de resistencia a compresión.

Un ejemplo asociado a una variación de alguna materia prima, es cuando dos subperiodos presentan un punto de cambio entre ellos, por ejemplo, dado por una baja continua de la resistencia y luego un alza continúa de ésta, pero sus resistencias medias son similares. En este caso, se asume que la dosificación es prácticamente constante, a pesar de que fue ajustada para compensar estas variaciones. Un segundo caso, corresponde a dos subperiodos, que presentan resistencias medias distintas, pero su dosificación no necesariamente ha cambiado, por lo tanto, la variación de la resistencia se atribuye a un cambio de alguna materia prima. Debido a que en este análisis solo se considera la resistencia del hormigón, este cambio se atribuye a un cambio de dosificación, a pesar de que podría ser la misma.

Lo importante es que, si un hormigón presenta una alta variabilidad debida a su dosificación, puede estar asociada a dos cosas, o a una combinación de ambas. Primero, a que la planta puede realmente estar ajustando continuamente su dosificación. O, por el contrario, la planta no realiza los ajustes pertinentes frente a algún cambio de sus materias primas. En ambos casos, se tendrá una alta variabilidad en los resultados de resistencia a compresión.

Del Gráfico 5.4, se tiene que, las plantas A-Sur, B-Sur, C-RM, C-Sur, D-Sur y E-RM, presentan una desviación estándar de la resistencia media inferior a 1.5 MPa, por lo que se considera que su dosificación es prácticamente constante, y las variaciones de la resistencia se deben principalmente a periodos de ajuste, ocasionados, por ejemplo, por una variación en alguna materia prima, por variaciones en el clima, u otras causas.

Las plantas B-Norte, B-RM, C-Norte, D-Norte y D-RM presentan una desviación estándar menor a 2.8 MPa, y, por lo tanto, una baja variabilidad asociada a su dosificación. En estos hormigones esta variabilidad en la resistencia media podría estar asociada a un cambio menor en la dosificación o a un periodo de ajuste, o a una combinación de ambos.

Las plantas A-Norte y A-RM presentan desviaciones estándar de la resistencia media mayores a 5 MPa, lo que indica una alta variabilidad asociada a la dosificación. La planta

F-RM presenta una desviación mayor a 7 MPa, en uno de sus hormigones, lo que indica una variabilidad muy alta de la resistencia media, y, por lo tanto, su dosificación presenta cambios evidentes entre un periodo u otro.

Por último, se observa que los casos 1, 2 y 3 de análisis no presentan grandes diferencias en los resultados.

5.2.3 Variabilidad de hormigones

El Gráfico 5.5 presenta los valores de las distintas desviaciones estándar determinadas para cada hormigón, según los 3 casos de análisis.

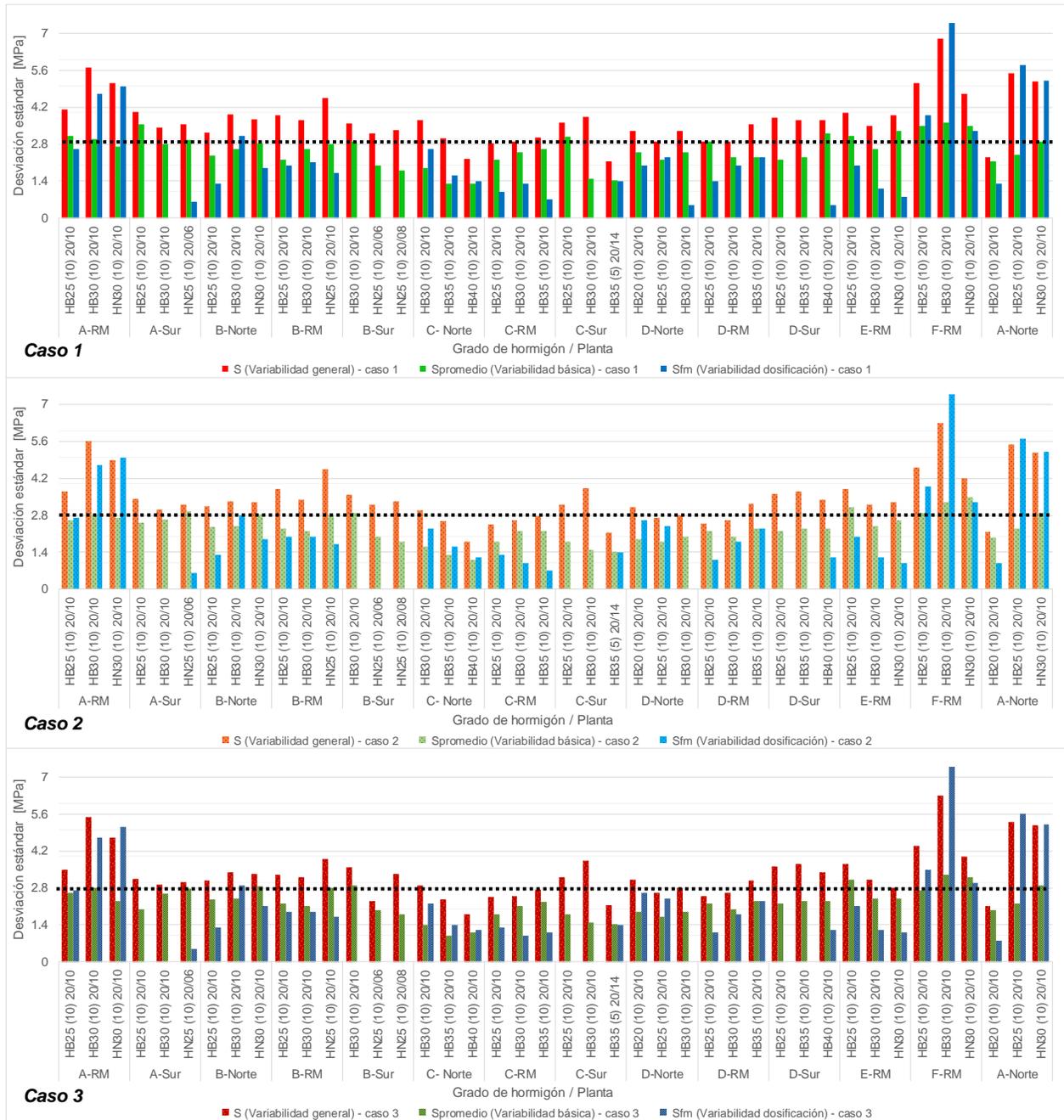


Gráfico 5.5 Desviaciones estándar para cada hormigón.

Se observa que la desviación de la totalidad de muestras, en general, es levemente mayor a la desviación de la resistencia individual y a la desviación de la resistencia media de los subperiodos, debido a que considera las variaciones que presentan los periodos

de ajuste, que no son considerados en el análisis de subperiodos. Sin embargo, en la mayoría de los hormigones, se observa que la desviación de la totalidad de muestras tiene un valor similar, a la mayor de las desviaciones de los subperiodos. Es decir, si un hormigón presenta una variabilidad mayor asociada a su dosificación ($S_{fm} > S_{promedio}$), la variabilidad general refleja principalmente la variabilidad de la dosificación ($S \sim S_{fm}$). Si un hormigón presenta una dosificación que varía muy poco, o es prácticamente constante ($S_{fm} < S_{promedio}$), la variabilidad general refleja la variabilidad básica del proceso de confección ($S \sim S_{promedio}$).

Los hormigones que presentan una mayor diferencia entre la desviación de la totalidad de muestras y la desviación del subperiodo, presentan además una variabilidad asociada a los periodos de ajustes.

5.2.3.1 Comentarios y conclusiones

Los hormigones pertenecientes a las plantas A-Norte, A-RM y F-RM son los que presentan la mayor variabilidad, y está asociada principalmente a la dosificación. Además, los hormigones de las plantas A-Norte y A-RM presentan distintos comportamientos en cuanto a variabilidad.

Todos los hormigones presentan una variabilidad asociada al proceso de confección de baja a media, lo que representa un control de calidad excelente a muy bueno, según código ACI 214R-11, y por lo tanto, la mayor variabilidad que presentan ciertos hormigones está dada por la dosificación.

Los hormigones que presentan una baja variabilidad en cuanto a su dosificación, o cuya dosificación es prácticamente constante, presentan una variabilidad general de baja a media. En estos casos, la variabilidad general está influenciada principalmente por las variaciones que presenta la resistencia en los periodos de ajuste, ya que el proceso de confección está controlado.

5.3 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según normativa

De la evaluación de los resultados de resistencia a partir de lo indicado en norma NCh1998.Of89 se tiene que la planta C-Norte no cumple con la condición de resistencia media móvil de tres muestras consecutivas, debido a que el hormigón HB35 (10)20/10, presenta más de un 20% de muestras con resistencias menores a la indicada, superando la fracción defectuosa que puede presentar este hormigón. El resto de las plantas cumplen con esta condición.

Además, las plantas A-RM, A-Sur, B-Norte, C-Norte y F-RM no cumplen con la condición de resistencia individual indicada en la misma norma. Considerando el caso 3 de análisis, se tiene que estas plantas presentan al menos una muestra cuya resistencia es inferior $f_c - k_2$. Estos resultados se presentan en el Gráfico 5.6.

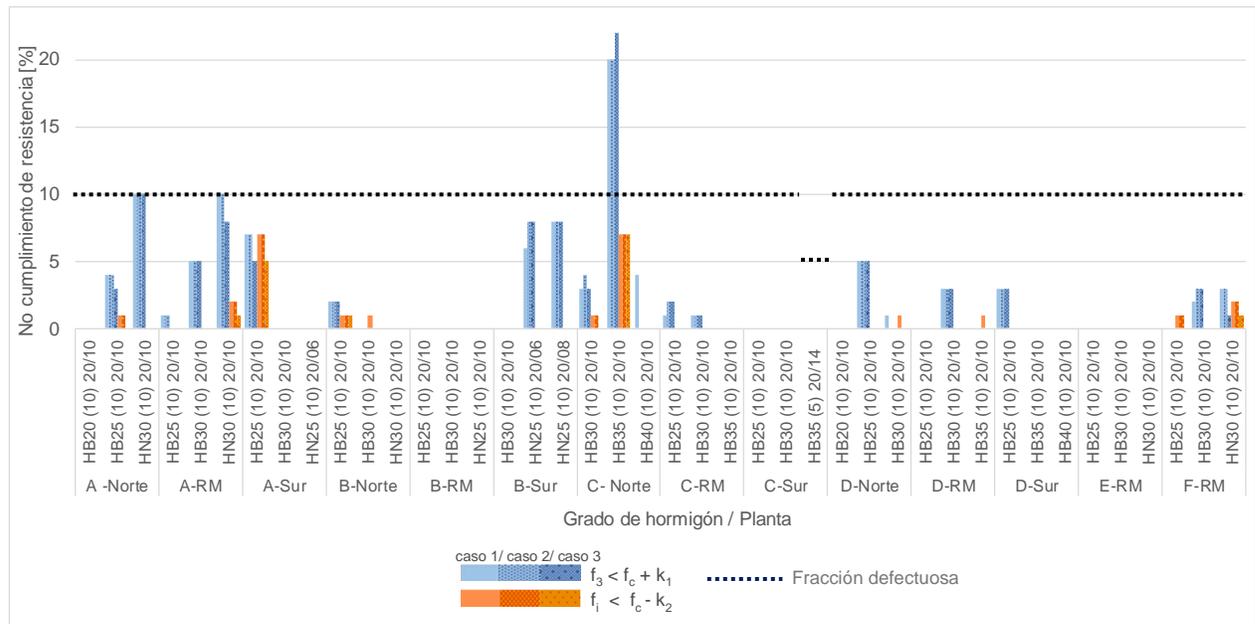


Gráfico 5.6 Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según evaluación estadística de norma NCh1998.Of89 de distintos hormigones para cada planta, según los 3 casos de análisis.

En cuanto al no cumplimiento de ambas condiciones de resistencia que presenta la planta C-Norte, se observa de Gráfico 4.37, Gráfico 4.39 y Gráfico 4.41 del capítulo 4.3.1, que esta baja de resistencia se produce en los 3 hormigones analizados de la planta C-Norte, y corresponden a un periodo de ajuste entre febrero y marzo de 2016. Por lo tanto, se concluye que, en este periodo hubo una baja de calidad del cemento utilizado en la planta, lo que provoca la baja resistencia de sus hormigones en general. Además, se observa que este periodo tiene una duración aproximada de un mes, y luego se produce un aumento continuo en la resistencia del hormigón. Esto indica que la planta, a partir de sus resultados de resistencia a compresión a los 28 días, reacciona a esta baja de resistencia, cambiando su dosificación, específicamente aumentando sus dosis de cemento.

La planta A-RM, presenta dos muestras de su hormigón HN30, que no cumplen con la condición de resistencia individual. De Gráfico 4.8, Gráfico 4.10 y Gráfico 4.12 se observa que esta baja de resistencia se presenta en los 3 hormigones de esta planta, lo que podría estar relacionado a una baja en la calidad del cemento, o al aumento de las temperaturas ambientales durante octubre de 2017, provocando una baja de resistencia en la planta en general.

La planta A-Sur, presenta dos muestras de su hormigón HB25, que no cumplen con la condición de resistencia individual. De Gráfico 4.13, Gráfico 4.15 y Gráfico 4.17 se observa que esta baja de resistencia se presenta en los 3 hormigones de esta planta, lo que podría estar relacionado a una baja en la calidad del cemento durante agosto de 2017, provocando una baja de resistencia en la planta en general.

La planta B-Norte presenta una muestra de su hormigón HB25, que no cumple con la condición de resistencia individual. De Gráfico 4.19, Gráfico 4.21 y Gráfico 4.23 se observa que esta baja de resistencia se presenta en los 3 hormigones de esta planta, lo que podría estar relacionado a una baja en la calidad del cemento durante entre febrero y marzo de 2015, provocando una baja de resistencia en la planta en general.

La planta F-RM, presenta una muestra de su hormigón HN30, que no cumple con la condición de resistencia individual, del Gráfico 4.83 se observa que esto ocurre en un periodo de baja resistencia durante agosto de 2017, que no se observa en el resto de los hormigones, debido a que no tienen resultados de ensayo en esa fecha. Esta baja en la resistencia se pudo originar por una baja en la calidad del cemento o alguna otra materia prima, junto a algun otro factor, como por ejemplo un mayor tiempo de traslado a obra.

Se observa que posterior a estos periodos de baja resistencia, se produce un aumento constante de la resistencia. Por lo tanto, estas plantas llevan un control de sus hormigones, y cuando detectan una baja en los resultados de resistencia a 28 días, ajustan la dosificación, por ejemplo, aumentando las dosis de cemento, y de esta forma, tratan de evitar caer en el incumplimiento de la normativa.

5.4 Tipos de dosificación a partir de la resistencia a compresión

En el Gráfico 5.7 se presentan los distintos tipos de dosificación que presentan los hormigones a partir de sus resultados de resistencia a compresión, determinados según la Tabla 3.3 del Capítulo 373.2.3.

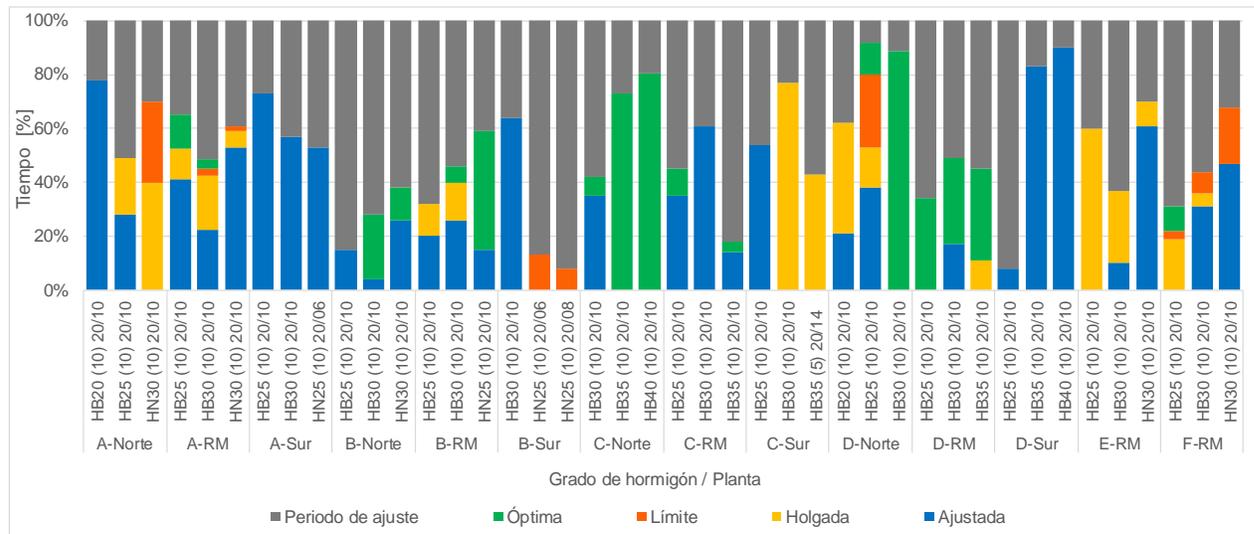


Gráfico 5.7 Fracción de tiempo que presentan los tipos de dosificaciones de distintos hormigones.

Se observa que la dosificación ajustada es la que tiene mayor frecuencia y está presente en la mayoría de los hormigones. Las dosificaciones menos comunes son la óptima y la dosificación límite. Sin embargo, lo que más predomina en los distintos hormigones son los periodos de ajuste. Los periodos de ajuste están originados principalmente por variaciones aleatorias, que se pueden atribuir a las materias primas, temperatura ambiente al momento del hormigonado, o tiempos de transporte del hormigón, entre otras cosas. Además, los periodos de ajuste también incluyen los periodos en los que se están realizando ajustes de dosificación.

5.4.1 Comentarios y conclusiones

Los periodos de ajustes predominan en la mayoría de los hormigones, representando desde un 10% hasta un 90% del tiempo.

Los hormigones de las plantas A-Norte y A-RM, presentan distintos tipos de dosificación lo que está relacionado a la mayor variabilidad asociada a los cambios de dosificación que presentan. Sus dosificaciones son principalmente holgadas y ajustadas. Sin embargo, se esperaría que la dosificación holgada se presente en menor proporción, considerando que la planta ajusta constantemente su dosificación. Por lo tanto, estas plantas no tienen como objetivo principal la optimización de su dosificación, y quizás los cambios continuos son en respuesta a la alta variabilidad de sus materias primas.

Los hormigones de la planta F-RM, también presentan distintos tipos de dosificación, lo que se relaciona con la variabilidad muy alta que presentan. Su dosificación es principalmente ajustada, lo que implica que si existe una optimización en su dosificación.

El resto de plantas presentan un comportamiento similar en sus dosificaciones.

La dosificación límite es la que se presenta en menor medida, por lo tanto, las plantas no tienen como objetivo el diseño de sus hormigones según este tipo de dosificación, si no más bien es una consecuencia de las variaciones en las materias primas, por ejemplo. Por lo que, generalmente presentan poca duración.

Las dosificaciones óptima y ajustada se presentan en mayor medida en las plantas que presentan menor variabilidad.

Considerando que el cemento es el principal responsable de la resistencia del hormigón, además del componente más costoso, y el que genera una mayor huella de carbono. Una planta que optimiza sus dosis de cemento, presentaría principalmente una dosificación óptima. Para poder optimizar la dosificación, es primordial que las plantas mantengan baja su variabilidad, permitiendo diseñar sus hormigones para una resistencia requerida menor. Las plantas deberían fijarse como objetivo funcionar en base a una dosificación óptima, lo que les permitirá tener una mayor rentabilidad, y lo que es de mayor importancia en la actualidad reducir su huella de carbono.

5.5 Comportamiento de plantas

En el presente capítulo se presenta el comportamiento de las 14 plantas estudiadas en cuanto a variabilidad, tipo de dosificación, e incumplimiento de normativa chilena a partir de los resultados de resistencia a compresión de sus hormigones.

En el gráfico denominado con la letra (a) se presenta la variabilidad general, la variabilidad básica del proceso de confección y la variabilidad asociada a la dosificación de cada hormigón. Esta variabilidad está definida a partir de los valores de la desviación estándar de la resistencia a compresión de la totalidad de muestras y de los subperiodos, tal como se definió en el ítem 3.2.1.4 del capítulo de Metodología. Se observa que la variabilidad general es similar a la mayor de las variabilidades determinadas del análisis de los subperiodos. Cuando la resistencia media entre los subperiodos varía muy poco (o es prácticamente constante), es decir, la variabilidad asociada a la dosificación es menor a la variabilidad básica del proceso de confección ($V_{\text{dosificación}} < V_{\text{básica}}$), la variabilidad general es similar a la variabilidad básica del proceso de confección ($V_{\text{general}} \sim V_{\text{básica}}$). Cuando la resistencia media varía de manera evidente entre los subperiodos, es decir, existe una mayor variabilidad asociada a la dosificación que la relacionada al proceso de confección ($V_{\text{dosificación}} > V_{\text{básica}}$) se tiene que la variabilidad general es similar a la variabilidad asociada a la dosificación ($V_{\text{general}} \sim V_{\text{dosificación}}$). Los hormigones que presentan una mayor diferencia entre la variabilidad general y la variabilidad básica o la variabilidad asociada a la dosificación, presentan además una variabilidad asociada a los periodos de ajustes.

En el gráfico denominado con la letra (b), se presenta los distintos tipos de dosificación que presenta cada hormigón, según lo definido en el ítem 3.2.3 del capítulo de Metodología, y a partir del análisis de los resultados de resistencia a compresión. Los periodos de ajuste representan las muestras que no pertenecen a los subperiodos, y por lo tanto, la resistencia media de estas muestras no es constante, debido ya sea a una variación de alguna materia prima, como el cemento por ejemplo, o a un ajuste de dosificación (o a una combinación de ambos).

En el gráfico denominado con la letra (c), se presenta los porcentajes de no cumplimiento de las condiciones de resistencia planteadas en la norma NCh1998.Of89. La condición de resistencia individual es la más restrictiva de ambas condiciones, puesto que si una muestra presenta un valor por debajo de $f_c - k_2$, el hormigón no cumple con la resistencia especificada y debe ser considerado como un riesgo potencial, por lo que se deben tomar acciones. Éstas van desde comprobar la validez del ensayo, verificar eventuales errores de colocación, hasta incluso la extracción de testigos de hormigón endurecido. Dependiendo de estos resultados se rechaza o acepta el hormigón. Además, la aceptación del hormigón puede estar condicionada a reparación y/o refuerzo, o puede estar sujeta a penalizaciones.

5.5.1 Planta A-Norte

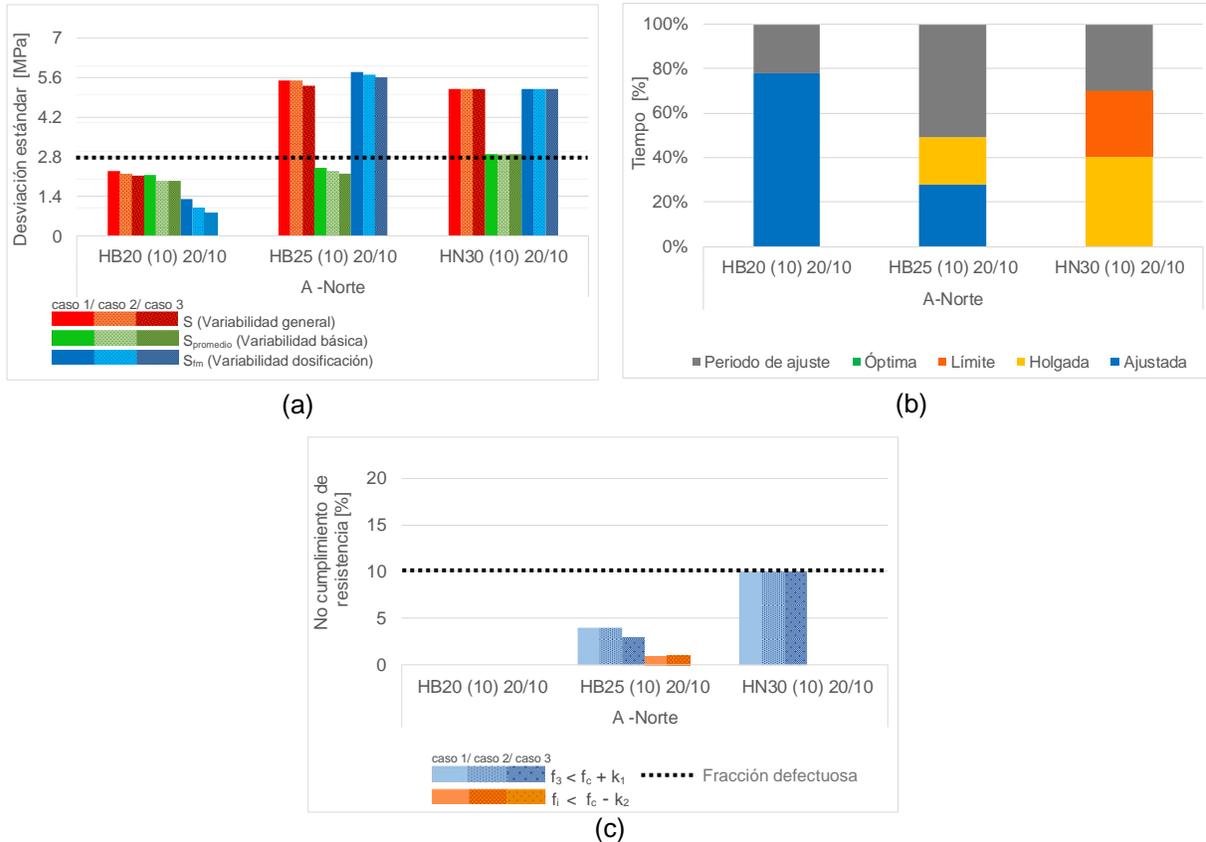


Gráfico 5.8 Planta A-Norte: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

Esta planta presenta una variabilidad general muy alta principalmente asociada a su dosificación, lo que puede ser originado por ajustes de dosificación para compensar por ejemplo alguna variación en sus materias primas. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica media a baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad muy bueno a excelente, según código ACI 214R-11. Esta planta diseña sus hormigones HB20 con dosis mínima de cemento, para hacerlos bombeables, por lo que este hormigón no presenta grandes ajustes en su dosificación. Ver Gráfico 5.8a.

La planta trabaja principalmente con una dosificación ajustada y holgada. El periodo de dosificación límite corresponde a una baja en la resistencia atribuible a un cambio en la calidad del cemento o alguna otra materia prima. Ver Gráfico 5.8b.

Del Gráfico 5.8c, para el caso 3, se tiene que la planta cumple con ambas condiciones de resistencia según norma NCh1998.Of89.

5.5.2 Planta A-RM

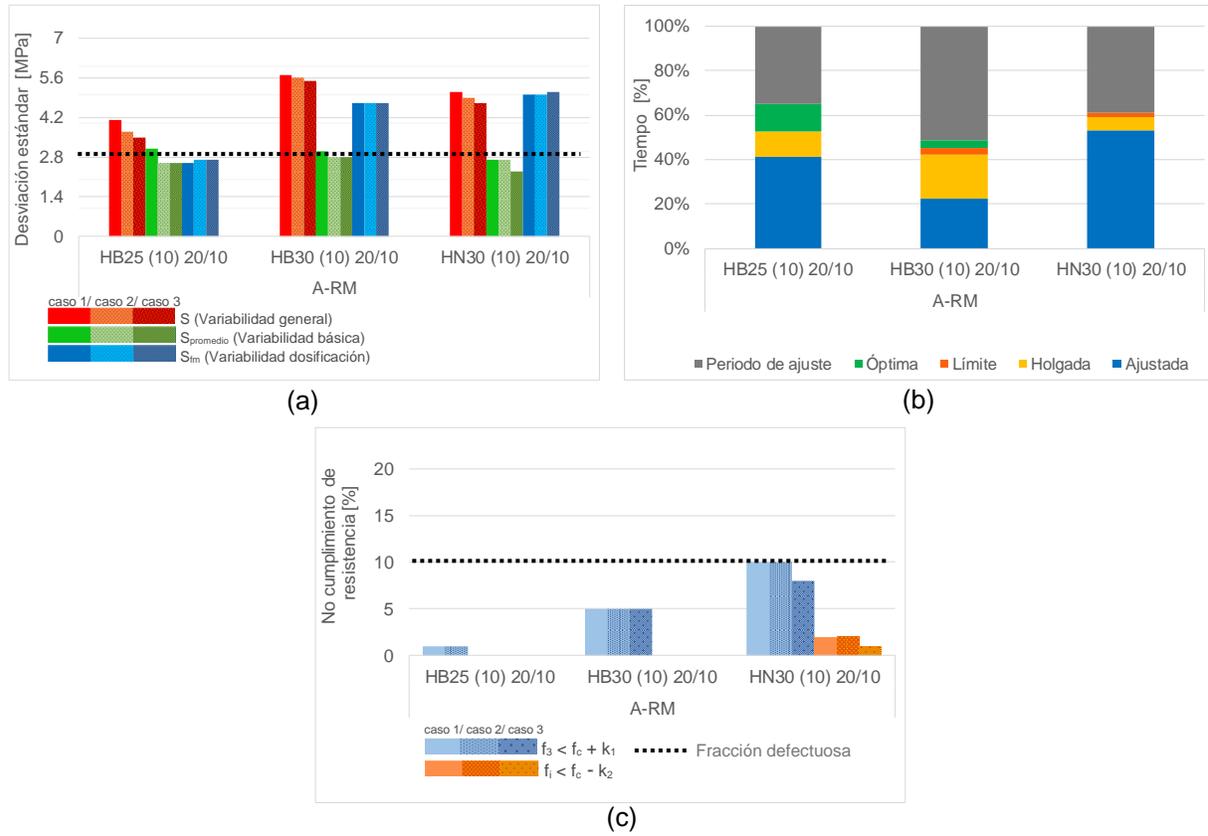


Gráfico 5.9 Planta A-RM: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

Esta planta presenta una variabilidad general muy alta principalmente asociada a su dosificación, lo que puede ser originado por ajustes de dosificación para compensar por ejemplo alguna variación en sus materias primas o cambios en la temperatura ambiente. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica media a baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad muy bueno a excelente, según código ACI 214R-11. Además, esta planta diseña sus hormigones HB25 con dosis mínima de cemento, para hacerlos bombeables, por lo que este hormigón no presenta grandes ajustes en su dosificación. Ver Gráfico 5.9a.

La planta trabaja principalmente con una dosificación ajustada. Los periodos de dosificación límite, óptima y holgada se atribuyen a un cambio de alguna materia prima, como el cemento o a cambios en la temperatura ambiente. Ver Gráfico 5.9b.

Del Gráfico 5.9c, para el caso 3, se tiene que la planta no cumple con la condición de resistencia individual según norma NCh1998.Of89, específicamente para el hormigón HN30.

5.5.3 Planta A-Sur

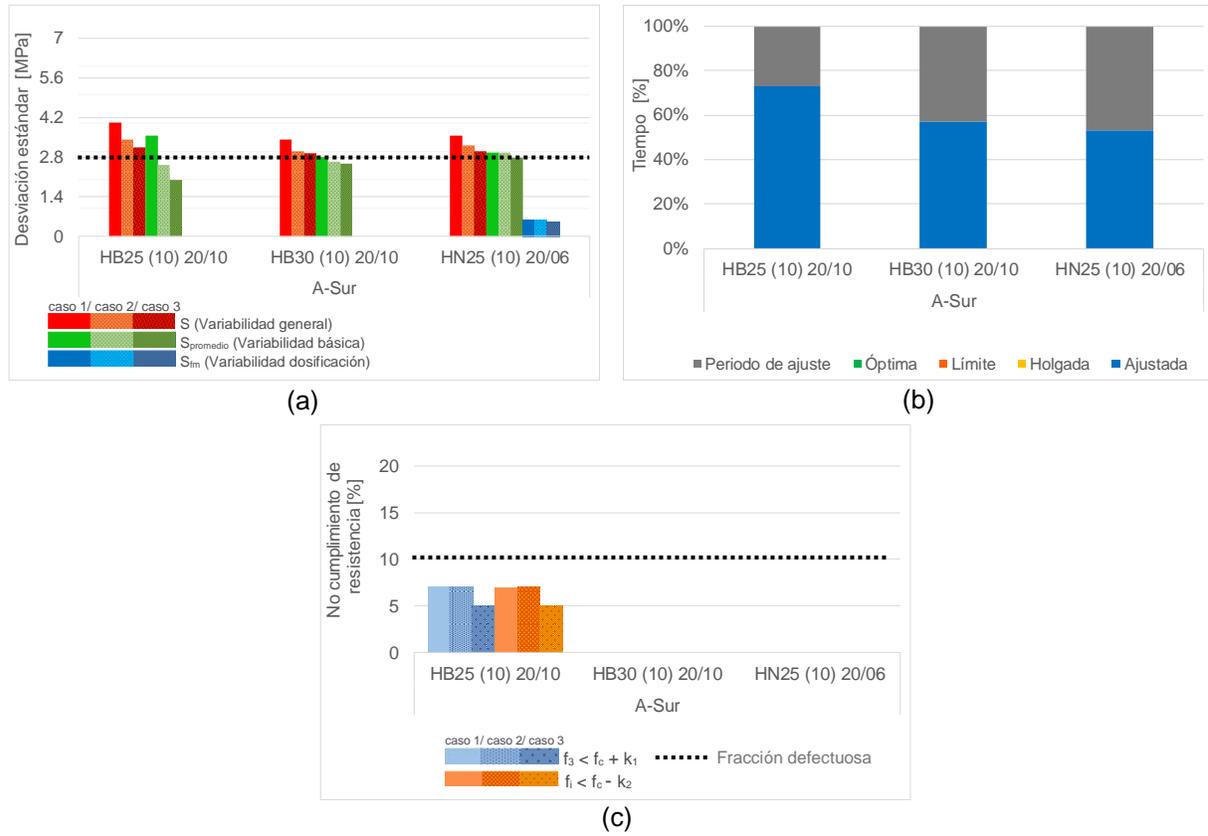


Gráfico 5.10 Planta A-Sur: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

Esta planta presenta una variabilidad general media asociada a su proceso de confección y a sus periodos de ajuste, su dosificación es prácticamente constante. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica media a baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad muy bueno a excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.10a.

La planta trabaja en base a una dosificación ajustada. Ver Gráfico 5.10b.

Del Gráfico 5.10c, para el caso 3, se tiene que la planta no cumple con la condición de resistencia individual según norma NCh1998.Of89, específicamente para el hormigón HB25.

5.5.4 Planta B-Norte

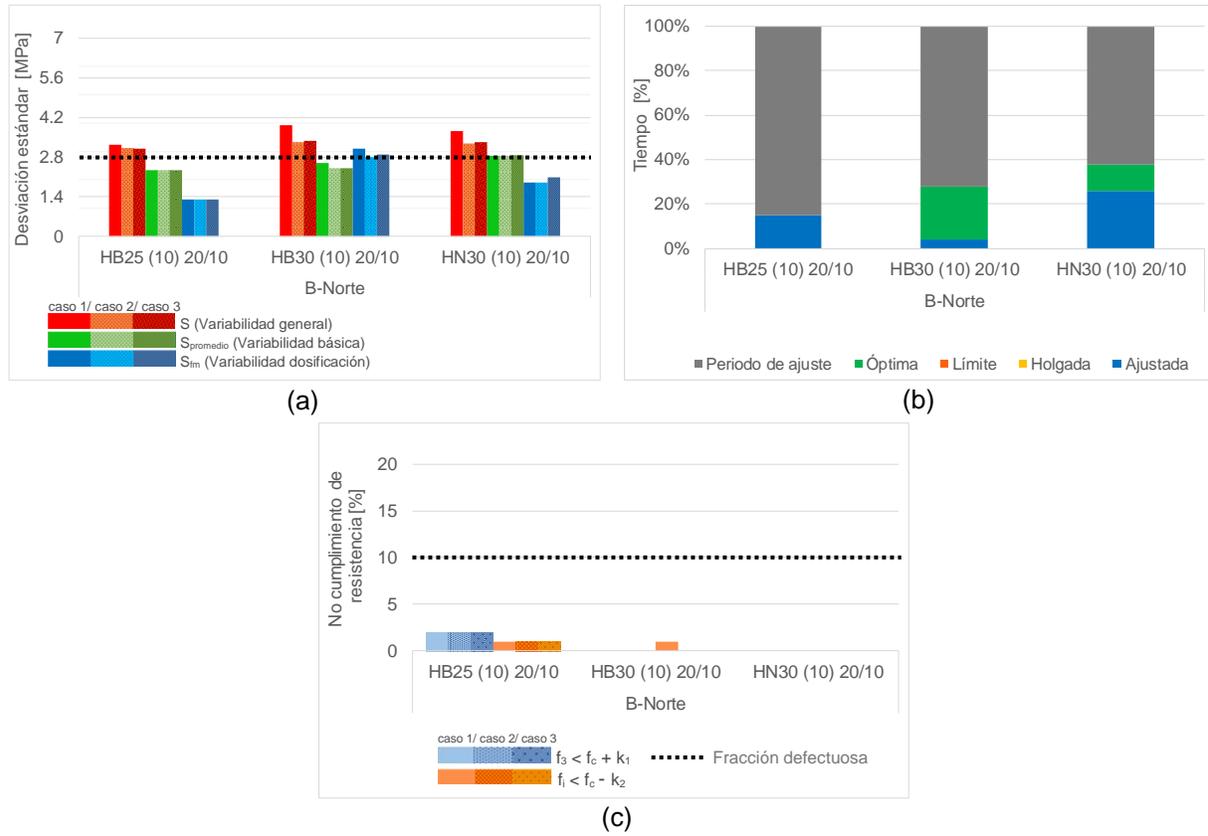


Gráfico 5.11 Planta B-Norte: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

Esta planta presenta una variabilidad general media principalmente asociada a su proceso de confección y a periodos de ajuste, su dosificación varía muy poco. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica media a baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad muy bueno a excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.11a.

La planta funciona principalmente en base a una dosificación ajustada. Además, presenta periodos de ajuste la mayor parte del tiempo, en respuesta a las variaciones de alguna materia prima, como por ejemplo el cemento, o a cambios de las condiciones climáticas. El periodo de dosificación óptima está asociado a bajas de resistencia originadas por un aumento en la temperatura ambiente. Ver Gráfico 5.11b.

Del Gráfico 5.11c, para el caso 3, se tiene que la planta no cumple con la condición de resistencia individual según norma NCh1998.Of89, específicamente para el hormigón HB25.

5.5.5 Planta B-RM

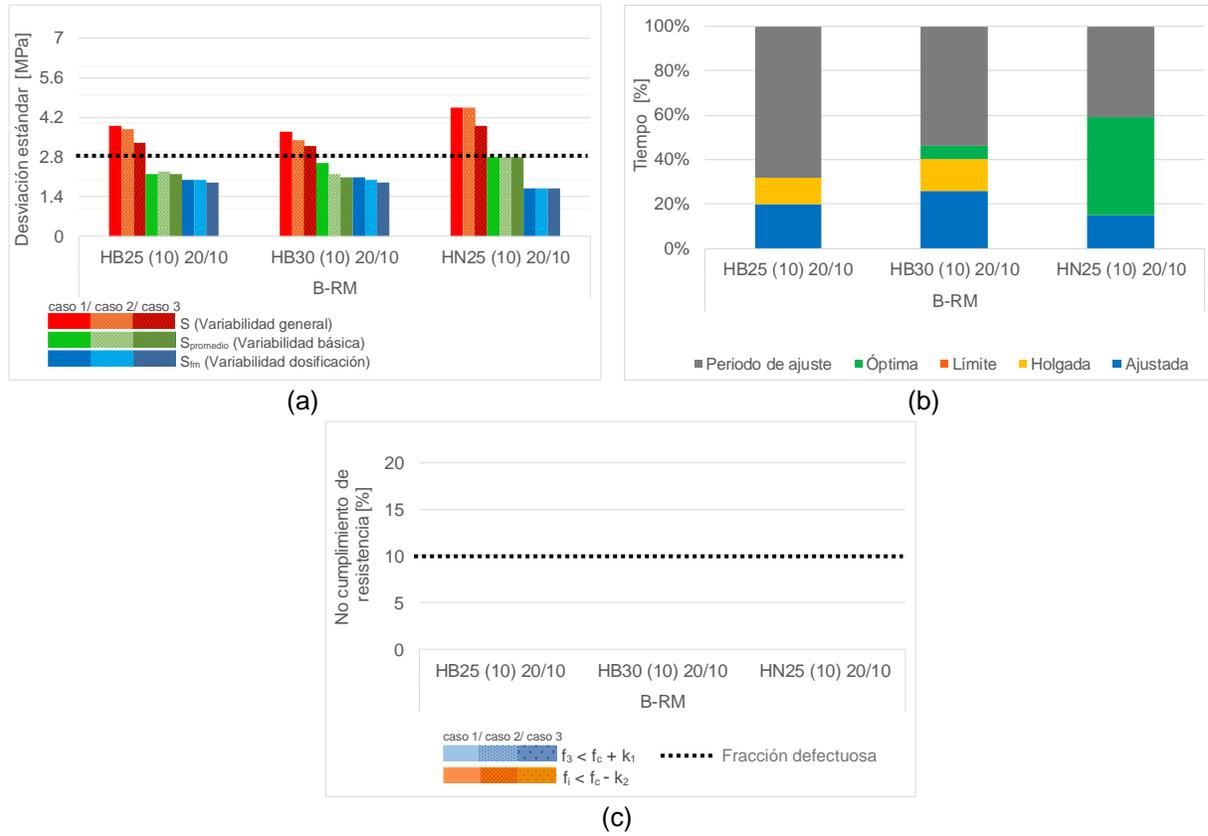


Gráfico 5.12 Planta B-RM: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

Esta planta presenta una variabilidad general media, asociada a su proceso de confección y a sus periodos de ajuste, y su dosificación varía muy poco. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica media a baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad muy bueno a excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.12a.

La planta trabaja principalmente con una dosificación ajustada, además presenta periodos de ajuste originados, por ejemplo, por variaciones de sus materias primas, cambios en las condiciones climáticas, o debido a variaciones aleatorias como el tiempo de traslado. Los periodos de dosificación holgada y óptima también están originados por variaciones de las materias primas o de las condiciones climáticas. Ver Gráfico 5.12b.

Del Gráfico 5.12c, se tiene que la planta cumple con ambas condiciones de resistencia según norma NCh1998.Of89.

5.5.6 Planta B-Sur

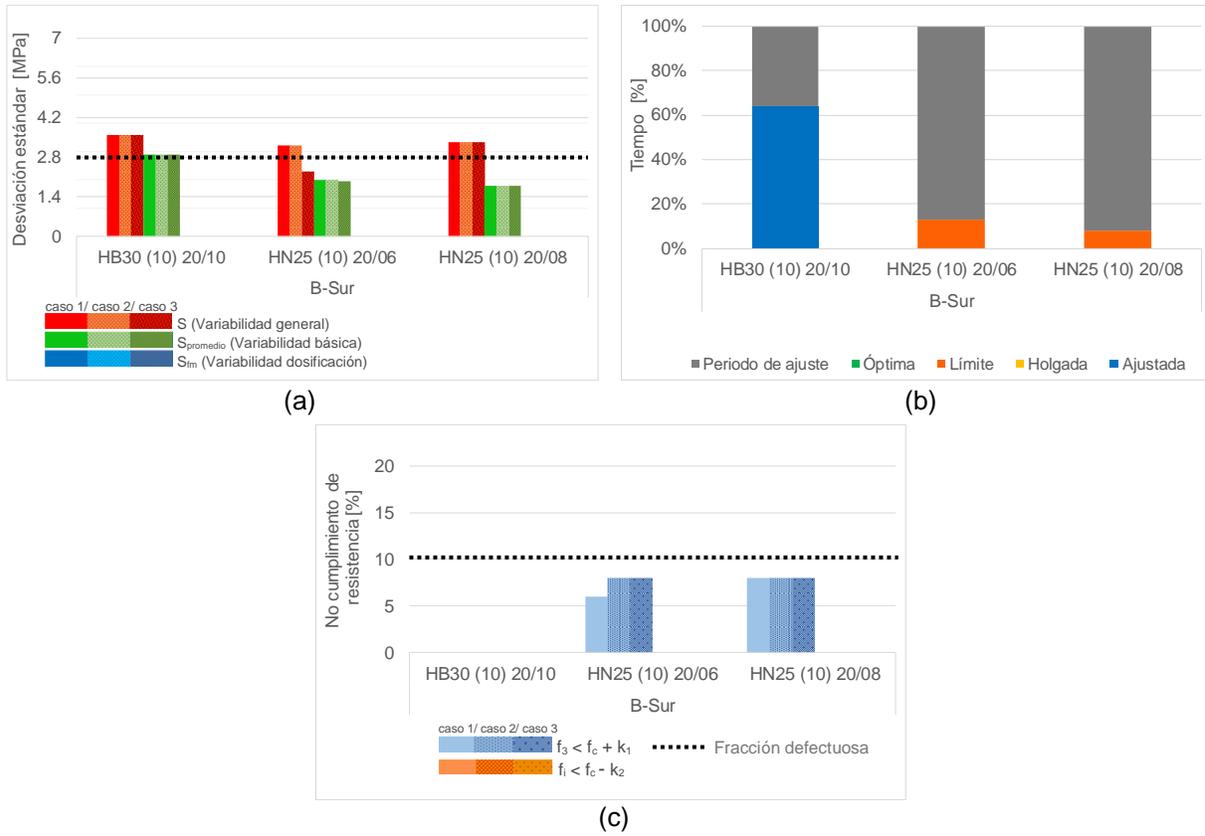


Gráfico 5.13 Planta B-Sur: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

Esta planta presenta principalmente una variabilidad general media que está asociada a su proceso de confección y a los periodos de ajuste. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica media a baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad muy bueno a excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.13a.

Esta planta funciona principalmente en base a una dosificación ajustada. Los periodos de dosificación límite están asociados a una variación de alguna materia prima, como, por ejemplo, una disminución en la calidad del cemento. Ver Gráfico 5.13b.

Del Gráfico 5.13c, se tiene que la planta cumple con ambas condiciones de resistencia según norma NCh1998.Of89.

5.5.7 Planta C-Norte

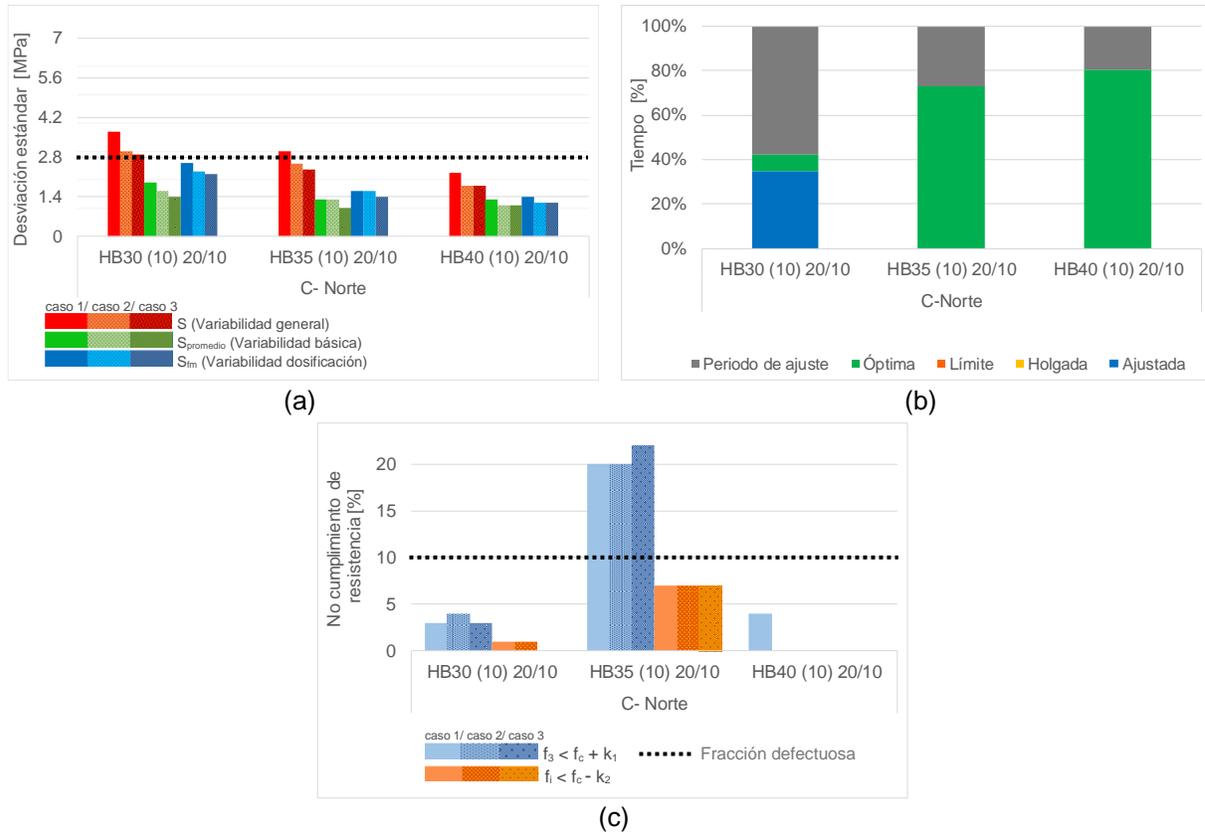


Gráfico 5.14 Planta C-Norte: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

La planta presenta una variabilidad general media a baja, asociada a su proceso de confección y a sus periodos de ajuste, y su dosificación es prácticamente constante. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.14a.

Esta planta funciona principalmente con dosificaciones óptimas y ajustadas. Ver Gráfico 5.14b.

Del Gráfico 5.14c, para el caso 3, se tiene que la planta no cumple con ambas condiciones de resistencia según norma NCh1998.Of89, específicamente para el hormigón HB35.

5.5.8 Planta C-RM

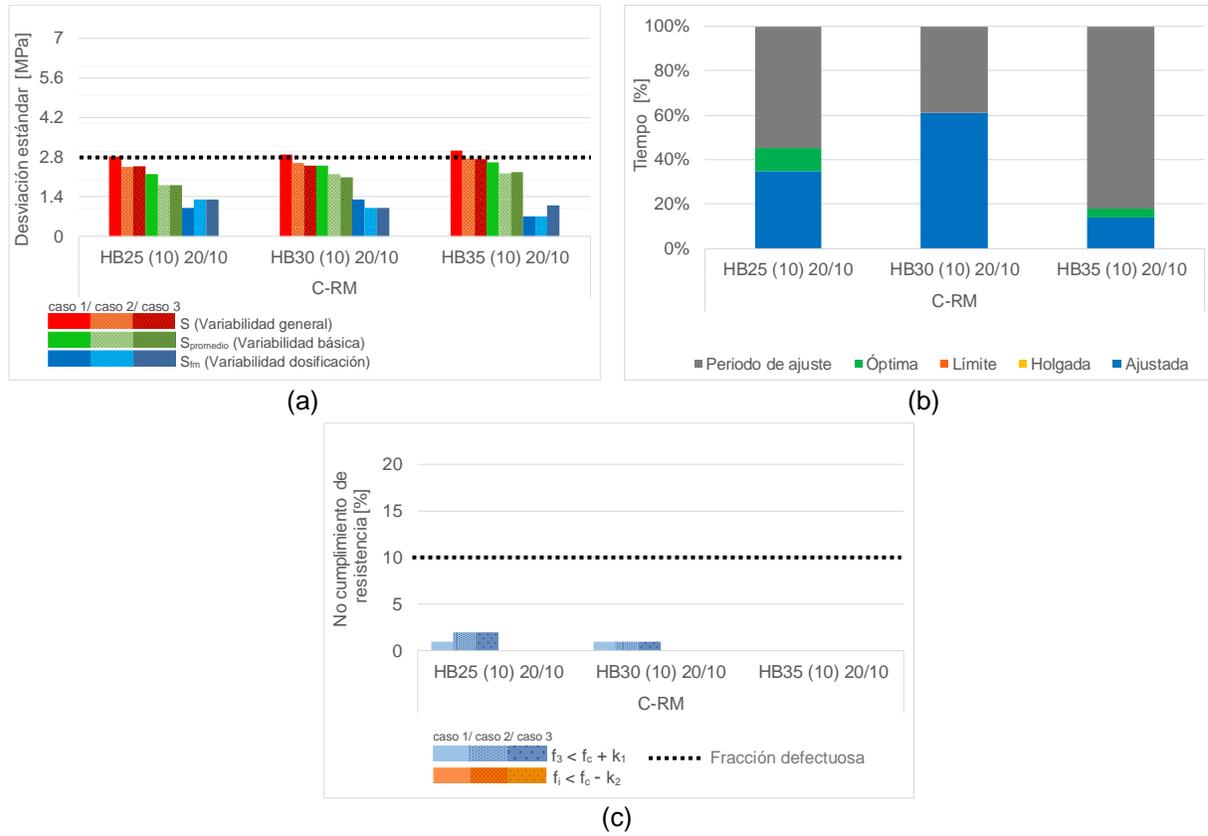


Gráfico 5.15 Planta C-RM: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

La planta presenta una variabilidad general baja, asociada a su proceso de confección y su dosificación es prácticamente constante. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.15a.

La planta funciona en base a una dosificación ajustada. Los periodos de dosificación óptima están originados por la variación de alguna materia prima. Ver Gráfico 5.15b.

Del Gráfico 5.15c, se tiene que la planta cumple con ambas condiciones de resistencia según norma NCh1998.Of89.

5.5.9 Planta C-Sur

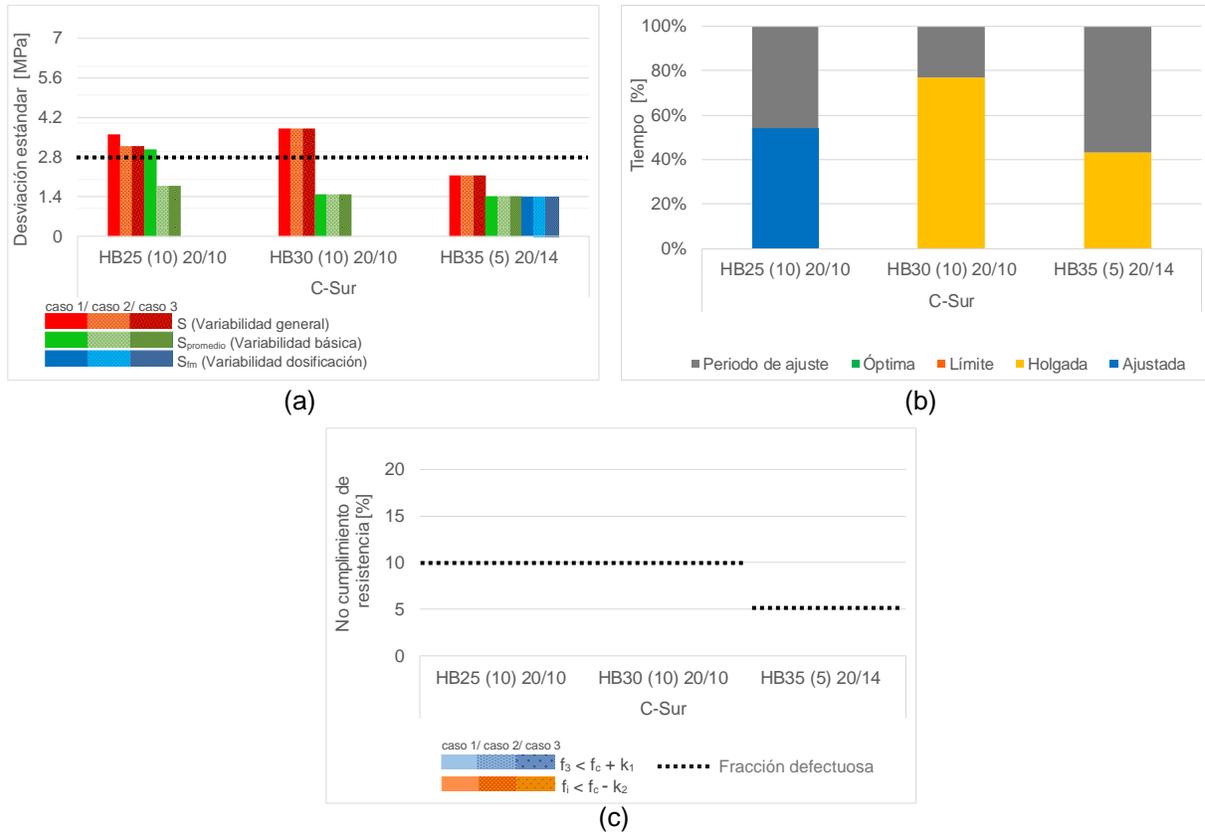


Gráfico 5.16 Planta C-Sur: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

Esta planta presenta una variabilidad general media a baja, asociada a su proceso de confección y a sus periodos de ajuste, y su dosificación es prácticamente constante. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.16a.

Esta planta funciona principalmente en base a una dosificación holgada. Ver Gráfico 5.16b.

Del Gráfico 5.16c, se tiene que la planta cumple con ambas condiciones de resistencia según norma NCh1998.Of89.

5.5.10 Planta D-Norte

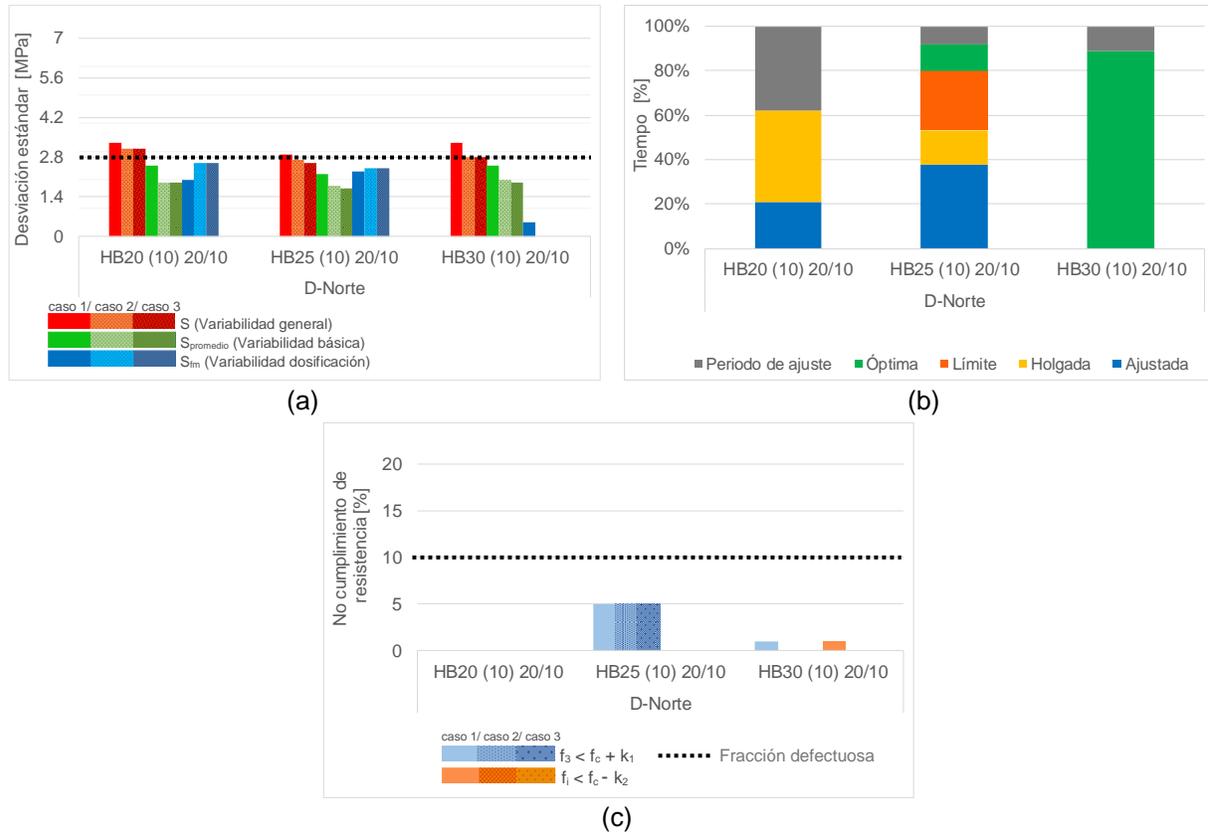


Gráfico 5.17 Planta D-Norte: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

La planta presenta una variabilidad general media a baja, asociada a su proceso de confección y a periodos de ajuste, y su dosificación varía muy poco. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.17a.

La planta trabaja principalmente con una dosificación óptima. Los periodos de dosificación límite se originan por variaciones en alguna materia prima. Los periodos de dosificación holgada y ajustada se originan por cambios en alguna materia prima, sumados a diseño de sus hormigones en base a dosis mínimas de cemento (Hormigones HB25 y HB20). Ver Gráfico 5.17b.

Del Gráfico 5.17c, se tiene que la planta cumple con ambas condiciones de resistencia según norma NCh1998.Of89.

5.5.11 Planta D-RM

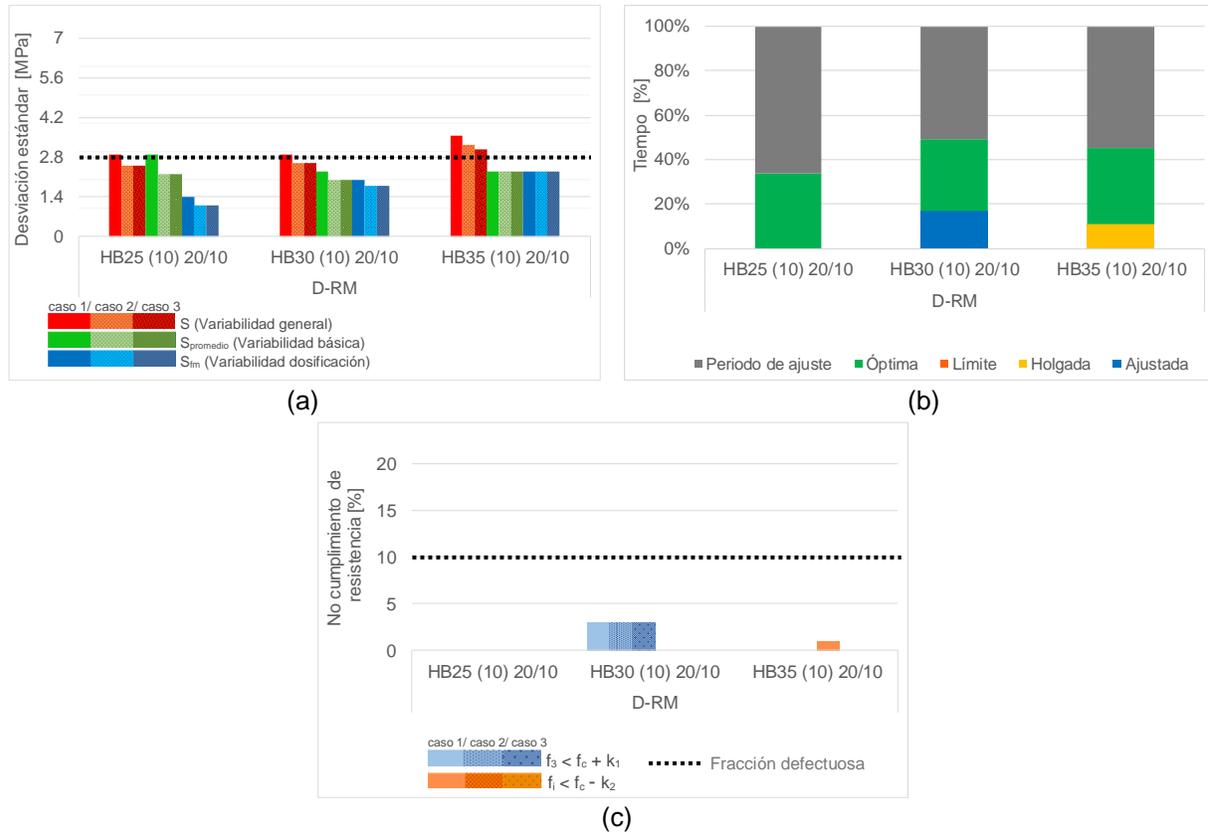


Gráfico 5.18 Planta D-RM: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

La planta presenta una variabilidad general media a baja, asociada a su proceso de confección y a sus periodos de ajuste, y su dosificación varía muy poco. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.18a.

La planta trabaja principalmente con una dosificación óptima. Los periodos de dosificación ajustada y holgada están asociados a cambios en las condiciones climáticas. Ver Gráfico 5.18b.

Del Gráfico 5.18c, para el caso 3, se tiene que la planta cumple con ambas condiciones de resistencia según norma NCh1998.Of89.

5.5.12 Planta D-Sur

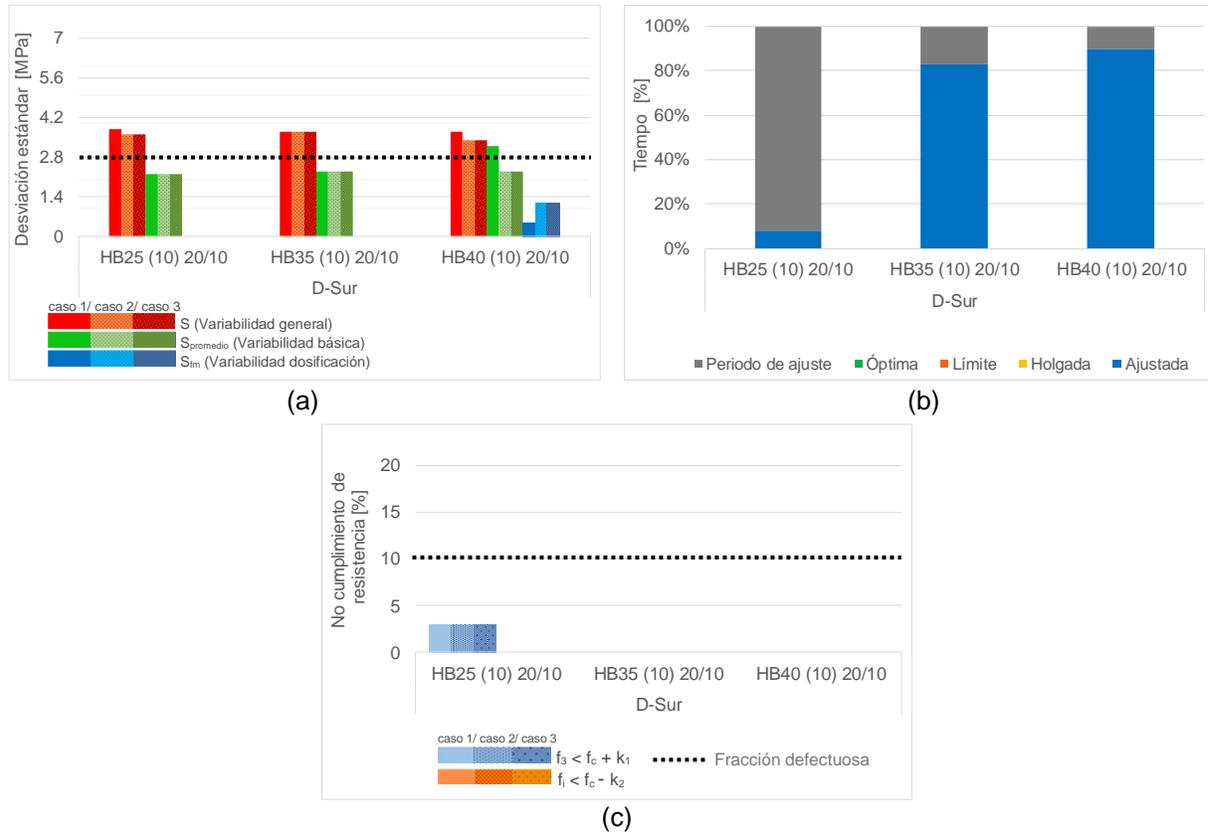


Gráfico 5.19 Planta D-Sur: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

La planta presenta una variabilidad general media, asociada a su proceso de confección y a los periodos de ajuste, y su dosificación es constante. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.19a.

La planta funciona en base a una dosificación ajustada. Ver Gráfico 5.19b.

Del Gráfico 5.19c, se tiene que la planta cumple con ambas condiciones de resistencia según norma NCh1998.Of89.

5.5.13 Planta E-RM

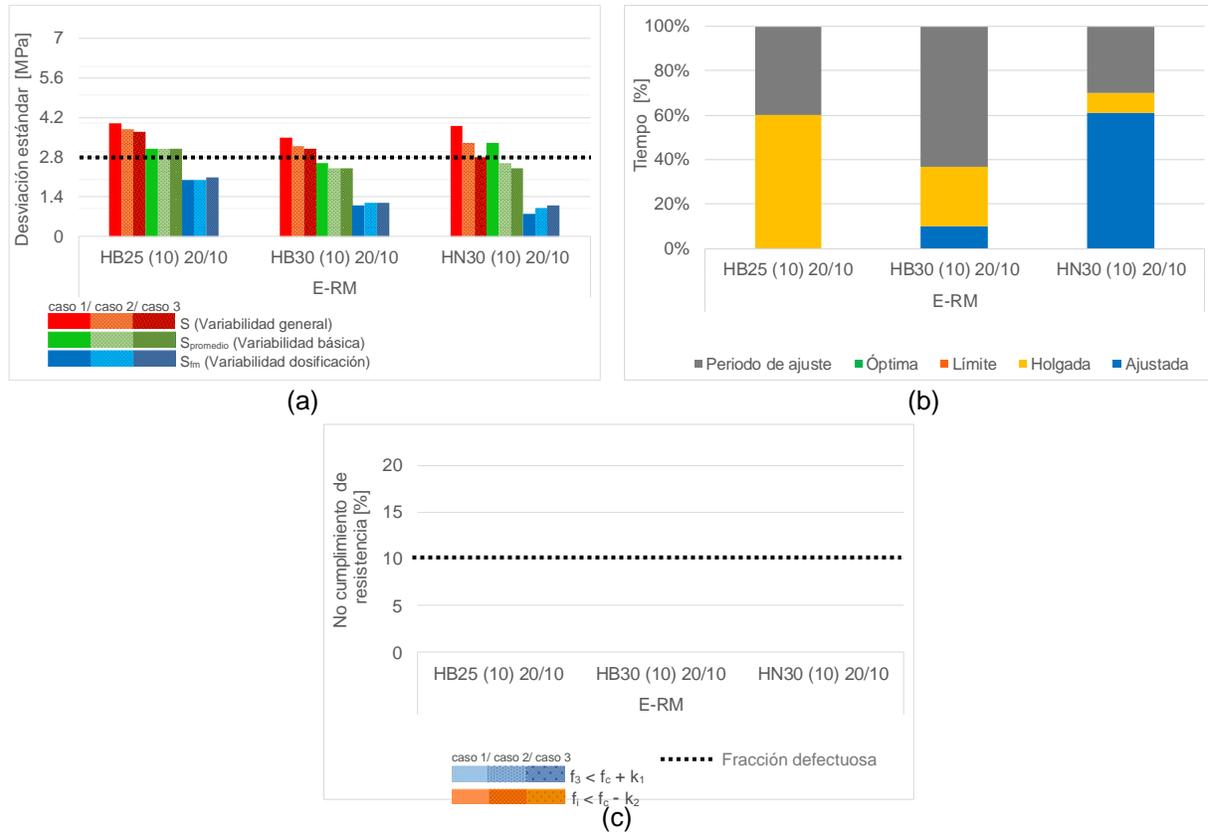


Gráfico 5.20 Planta E-RM: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

La planta presenta una variabilidad general media asociada a su proceso de confección, y a sus periodos de ajuste, su dosificación varía muy poco. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica media a baja, por lo que está bajo un estándar de control de calidad muy bueno a excelente, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.20a.

La planta funciona principalmente en base a una dosificación holgada y ajustada. Ver Gráfico 5.20b.

Del Gráfico 5.20c, se tiene que la planta cumple con ambas condiciones de resistencia según norma NCh1998.Of89.

5.5.14 Planta F-RM

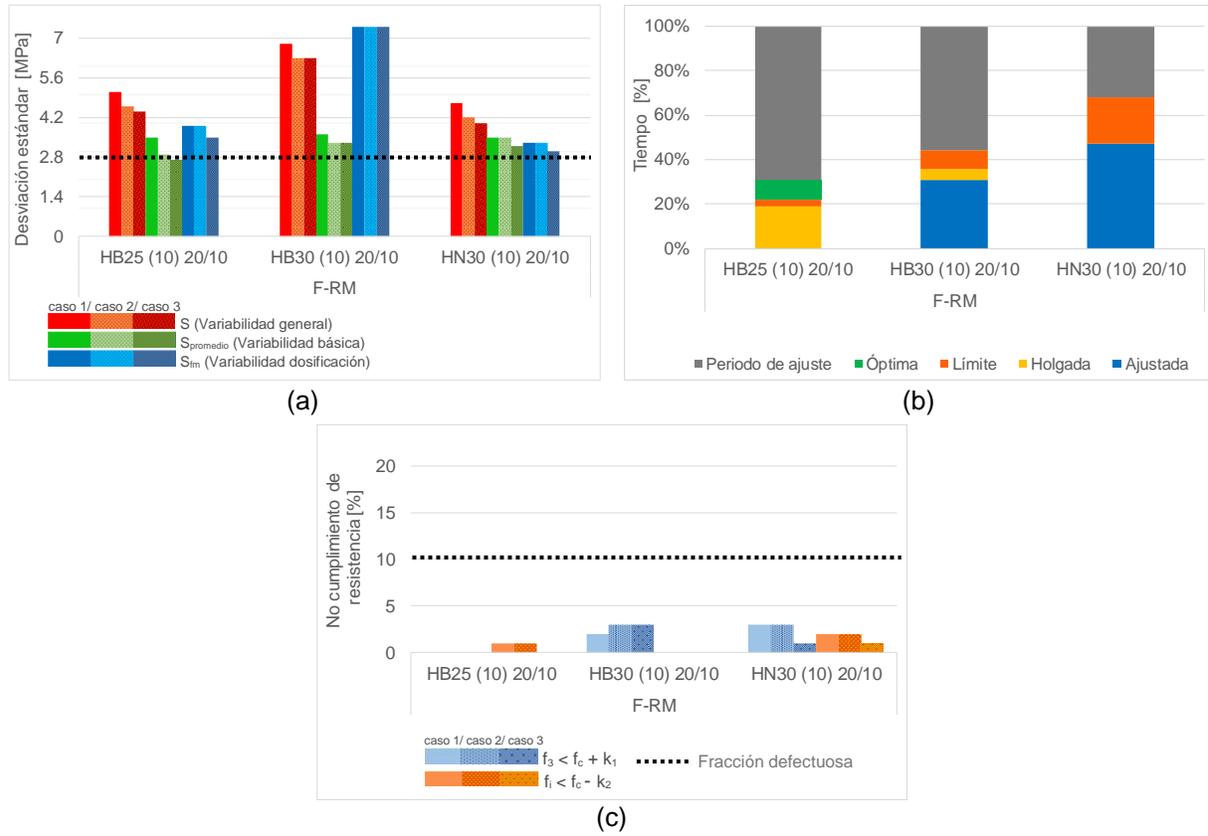


Gráfico 5.21 Planta F-RM: (a) Variabilidad general, básica y de dosificación según 3 casos de análisis; (b) Tipos de dosificación; (c) Porcentaje de no cumplimiento de resistencia según 3 casos de análisis.

La planta presenta una variabilidad general muy alta a alta, asociada principalmente a su dosificación y a sus periodos de ajuste, lo que puede ser originado por ajustes de dosificación para compensar por ejemplo alguna variación en sus materias primas o cambios en la temperatura ambiente. Además, su proceso de confección presenta una variabilidad básica media, por lo que está bajo un estándar de control de calidad muy bueno, según código ACI 214R-11. Ver Gráfico 5.21a.

La planta funciona principalmente en base a una dosificación ajustada. Los periodos que presentan dosificación límite y óptima son debido a una variación de alguna materia prima, como por ejemplo el cemento, o a cambios en la temperatura ambiente. El hormigón HB25 está diseñado con dosis mínimas de cemento, para hacerlo bombeable, por lo que presenta principalmente una dosificación holgada. Ver Gráfico 5.21b.

Del Gráfico 5.21c, para el caso 3, se tiene que la planta no cumple con la condición de resistencia individual según norma NCh1998.Of89, específicamente para el hormigón HN30.

5.6 Variabilidad de plantas a partir de la variabilidad de sus hormigones

El Gráfico 5.22 presenta los valores de las distintas desviaciones estándar de las plantas a partir de los hormigones elaborados en ellas, según la desviación normal ponderada de la planta, indicada en norma NCh1934.Of92. Estos valores corresponden al caso 3 de análisis.

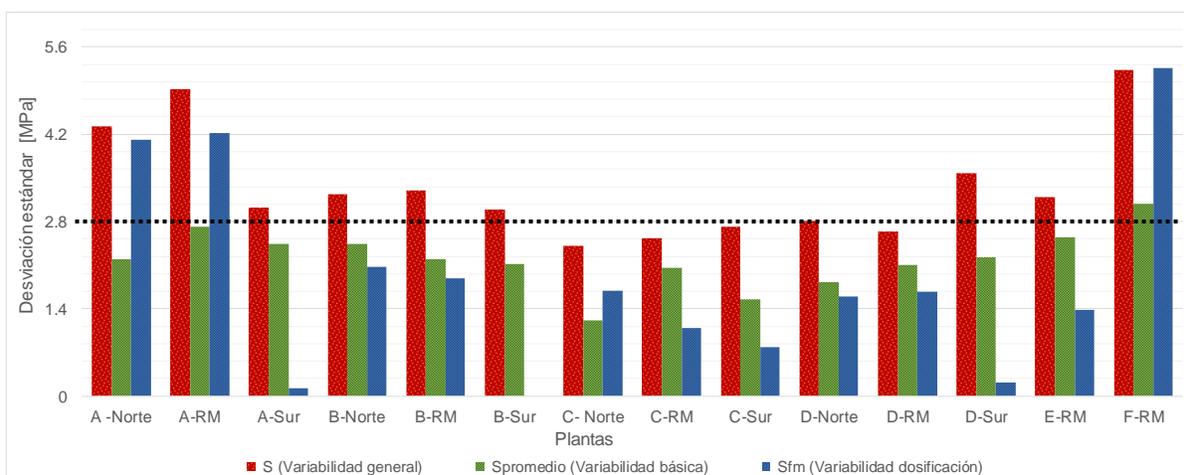


Gráfico 5.22 Desviaciones estándar para cada planta.

Del Gráfico 5.22 se observa que la desviación ponderada de la planta a partir de sus hormigones, en general, es una buena aproximación para determinar la variabilidad de la planta. Sin embargo, en las plantas que presentan hormigones con comportamientos distintos en cuanto a variabilidad, como las plantas A-Norte, A-RM y F-RM, podría perderse información relevante al considerar la desviación ponderada.

5.7 Comentarios y conclusiones

La variabilidad general de las plantas es una combinación de la variabilidad básica del proceso de confección, la variabilidad asociada a la dosificación y la variabilidad de los periodos de ajuste de los hormigones elaborados en ellas.

Determinar la variabilidad general, la variabilidad básica y la variabilidad asociada a la dosificación, permite identificar que aspecto está contribuyendo en mayor medida en aumentar la variabilidad, y de esta forma mejorar el control de éste. Además, es importante que las plantas disminuyan su variabilidad, o, lo que es equivalente, reduzcan la desviación estándar de sus hormigones, ya que, con esto, la resistencia requerida será menor, y, por lo tanto, la cantidad de cemento también, resultando hormigones con menor costo y menor huella de carbono.

Por último, del análisis se observa que, al eliminar muestras asociadas a cambios aislados o a errores del procedimiento de ensayo, no se producen grandes diferencias en los resultados de variabilidad. Sin embargo, influye al evaluar la resistencia según norma, especialmente al considerar la condición de la resistencia individual, debido a que

el caso 2, y por ende el caso 3, no considera las muestras que presentan resultados anómalos de resistencia.

6 CONCLUSIONES

De las 14 plantas estudiadas, se tiene que 11 presentan una variabilidad general de baja a media, y las 3 restantes, tienen una variabilidad alta a muy alta. Las plantas A-Norte, A-RM y F-RM son las que presentan la mayor variabilidad general. Las que presentan la menor variabilidad general son las plantas C-Norte, C-RM, C-Sur, D-Norte y D-RM.

Las plantas presentan una variabilidad básica asociada al proceso de confección de baja a media, lo que implica un excelente a muy buen control de sus procesos según código ACI 214R-11. Por lo tanto, la mayor variabilidad general que presentan ciertas plantas estudiadas está asociada principalmente a la variabilidad de la dosificación.

Las plantas A-Norte, A-RM y F-RM tienen una variabilidad alta a muy alta asociada a su dosificación. Es importante notar, que las plantas A-Norte y A-RM, pertenecen a una de las más grandes hormigoneras del país, por lo que representan el mayor volumen de producción de hormigón a nivel nacional, por lo tanto, la hormigonera A debería, particularmente, preocuparse de mejorar su sistema de control, beneficiándose no solo de una reducción del costo de sus hormigones, si no también disminuyendo su gran huella de carbono.

Las plantas trabajan principalmente con dosificaciones ajustadas. De las 14 plantas, se tiene que 7 funcionan con una dosificación ajustada, 1 planta trabaja con una dosificación holgada y 2 plantas presentan una dosificación óptima, el resto funcionan en base a una combinación de dosificación ajustada, con una dosificación holgada u óptima.

De las plantas estudiadas, se tiene que 5 presentan problemas de incumplimiento de la condición de resistencia individual. Esto se observa, generalmente, en periodos en que la resistencia presenta una baja general (prácticamente detectable en todos los productos estudiados de la planta), por lo que pueden atribuirse a variaciones de materias primas, o a cambios en las condiciones climáticas. Se observa que posterior a los periodos de baja resistencia, cuya duración es cercana a un mes, sigue un alza en la resistencia, lo que implica que existe un control de estas plantas, de al menos sus resultados a 28 días. Sin embargo, al no detectarlo a tiempo, no se alcanza a realizar los ajustes de dosificación pertinentes para evitar la situación. Por lo tanto, estas plantas deben mejorar su sistema de control, lo que les permitirá reaccionar adecuadamente y de manera anticipada, frente a una baja en la resistencia, reduciendo la probabilidad de presentar incumplimiento. Una forma de controlar esto, es realizando una predicción de una baja de la resistencia a los 28 días a partir de los resultados a 7 días.

Las plantas estudiadas son representativas de la industria de hormigón premezclado del país, por lo tanto, se concluye que, en Chile, en general, las plantas presentan un excelente a muy buen control de sus procesos según código ACI 214R-11, por lo que producen hormigones de buena calidad. No obstante, algunas plantas presentan alta variación respecto a la resistencia media de sus hormigones, lo que podría atribuirse

deficiencias respecto al control de sus materias primas, o de otros factores que afectan de forma sostenida la resistencia, como por ejemplo, un cambio en las condiciones climáticas. Por lo tanto, ante estas variaciones, estas plantas no están reaccionando de manera adecuada, es decir sus ajustes de dosificación no van en dirección de mantener una resistencia media constante, ni mucho menos se observa una optimización de las dosis de cemento. Es importante mencionar, que las plantas podrían reaccionar ante cualquier variación que afecte su resistencia, principalmente, mediante ajustes en las dosis de cemento. Para lograr esto, deben implementar un buen sistema de control, que permita detectar los cambios a tiempo, e identificar sus causas, de esta manera podrán realizar los ajustes necesarios a tiempo y en la dirección correcta. Cuando se asigna una causa errónea al cambio de resistencia se podría realizar un ajuste que contribuya aun más en aumentar la variabilidad de la resistencia, en lugar de reducirla. Además, mediante un buen sistema de control se puede diseñar un hormigón con una dosificación óptima, mediante reducciones en la cantidad de cemento, cuando se observa resistencias más altas, o en caso contrario, aumentar el contenido de cemento, cuando se producen bajas de resistencia, y de esta forma, disminuir el riesgo de incumplimiento de la resistencia según la normativa chilena.

Un buen sistema de control, implica medir múltiples variables que influyen en la resistencia a compresión, dentro de éstas se tiene, el asentamiento de cono, la densidad, temperatura al momento del hormigonado, tiempo de traslado a obra, entre otras cosas. Esto permitirá identificar las causas de las variaciones en la resistencia, y de esta forma, tomar las medidas correctivas adecuadas.

Por lo tanto, es importante que las plantas mejoren la calidad de sus hormigones, debido a que junto con ello se tienen menores costos económicos y un menor impacto ambiental en su producción. Mejorar la calidad implica hormigones con menores cantidades de cemento, menor rechazo en el despacho de éstos por incumplimiento de propiedades del hormigón fresco, y una reducción de problemas de incumplimiento del hormigón ya endurecido. Como consecuencia, se tendrá menor costo económico y un menor impacto ambiental.

Si bien, en Chile, en general, las plantas producen hormigones de buena calidad, se observa que no existe una real preocupación de optimizar sus dosificaciones, lo que se puede atribuir principalmente a la falta de un buen sistema de control.

7 BIBLIOGRAFÍA

- ACI Comite 214. (2011). Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete.
- ACI Comite 211. (1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009). *ACI Manual of Concrete Practice, Part*.
- Alexander, M. G. (1996). Aggregates and the deformation properties of concrete. *Materials Journal*, 93(6), 569-577.
- Bloem, D. L., and Gaynor, R. D.(1963). *Effect of properties on strength of concrete*, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 60, No. 10, pp. 1429–1456.
- Bloem, D. L., & Gaynor, R. D. (1970). *Factors Affecting the Homogeneity of Ready-Mixed Concrete*. Paper presented at the Journal Proceedings.
- Cerón, M., Duarte, F., & Castillo, W. (1996). Propiedades físicas de los agregados pétreos de la Ciudad de Mérida. *Boletín Académico de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 27-29.
- Cramer, S. M., Hall, M., & Parry, J. (1995). Effect of optimized total aggregate gradation on Portland cement concrete for Wisconsin pavements. *Transportation research record*, 100-106.
- Daniel, G. D., & Lobo, C. L. (2005). *User's Guide to ASTM Specification C 94 on Ready-Mixed Concrete*: Co-published by ASTM and NRMCA.
- Day, K. W. (2006). *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification* (3rd ed.).
- De Larrard, F. (1999). Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach. *E & FN Spon*, 440.
- Galloway, J. E. (1994). Grading, shape, and surface properties. *ASTM special technical publication*, 169, 401-410.
- Gaynor, R. D. (1996). Avoiding Uniformity Problems in Truck-Mixed Concrete. *Concrete Journal Magazine*, 24 pp.
- Gaynor, R. D., Meininger, R. C., & Khan, T. S. (1985). Effect of temperature and delivery time on concrete proportions. In *Temperature Effects on Concrete* (pp. pp. 68–87). T. R. Naik, Ed., American Society of Testing Materials, Philadelphia: ASTM STP 858.
- Gaynor, R. D., & Mullarky, J. I. (1975). *Mixing Concrete in a Truck Mixer*. Retrieved from
- Gibb, I., & Harrison, T. (2010). Use of control charts in the production of concrete. *ERMCO*.

- Glavind, M., Olsen, G. S., & Munch-Petersen, C. (1993). Packing calculations and concrete mix design. *Nordic Concrete Research*, 13(2).
- Goltermann, P., Johansen, V., & Palbøl, L. (1997). Packing of aggregates: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix. *Materials Journal*, 94(5), 435-443.
- Hudson, B. (1999). *Modification to the fine aggregate angularity test*. Paper presented at the Proceedings, seventh annual international center for aggregates research symposium, Austin, TX.
- Instituto Nacional de Normalización. (1968). *NCh148: Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1985). *NCh170: Hormigón - Requisitos generales*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1989). *NCh1998.Of89. (1989). Hormigón - Evaluación estadística de la resistencia mecánica*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1992). *NCh1934: Hormigón preparado en central hormigonera*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1995). *NCh2182: Hormigón y mortero - Aditivos - Clasificación y requisitos*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). *NCh1019: Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2012). *NCh1498: Hormigón y mortero - Agua de amasado - Clasificación y requisitos*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2013). *NCh163: Áridos para morteros y hormigones - Requisitos generales*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2016). *NCh170: Hormigón - Requisitos generales*.
- Johansen, V., & Andersen, P. (1995). Particle packing and concrete properties. *Materials Science of Concrete II*, 111-146.
- Johansson, L. (1979). The Effect of Aggregate Grading and Mix Proportions on the Workability for concrete made with entirely crushed aggregate. *Studies on Concrete Technology, Swedish Cement and Concrete Research Institute*, 147-160.

- Kaplan, M. (1959). *Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates*. Paper presented at the Journal Proceedings.
- Legg, F. E. J. (1998). Aggregates: Chapter 2. *Concrete construction handbook*". Cuarta Edición. McGraw-Hill. USA.
- León, M. P., & Ramírez, F. (2011). Morphological characterization of concrete aggregates by means of image analysis. *Revista Ingeniería de Construcción*, 25(2), 215-240.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (1986). *Concrete. Structure, properties and materials. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall* (2nd ed.).
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2017). *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. In.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of Concrete* (4th ed.).
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *Concrete Technology*. Longman Scientific & Technical England.
- Obla, K. H. (2015). *Improving Concrete Quality*. CRC Press.
- Popovics, S. (1998). *Strength and related properties of concrete: A quantitative approach*. John Wiley & Sons.
- Richardson, D. N. (1991). Review of variables that influence measured concrete compressive strength. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 3(2), 95-112.
- Shilstone, J. (1999). *The aggregate: The most important value-adding component in concrete*. Paper presented at the Proceedings of the Seventh Annual Symposium International Center for Aggregates Research, Austin, Texas.
- Van Oss, H. G., & Padovani, A. C. (2003). Cement manufacture and the environment part II: environmental challenges and opportunities. *Journal of Industrial ecology*, 7(1), 93-126.
- Walker, S., & Bloem, D. L. (1958). Variations in Portland Cement. *ASTM International, Vol. 58*(Proceedings), pp. 1009-1032.
- Walker, S., & Bloem, D. L. (1961). Variations in Portland Cement - Part 2. *ASTM International, Vol. 61*(Proceedings), pp. 1059-1077.
- Washa, G. (1998). *Concrete construction handbook*. ed. *Dobrowolski, J., McGraw-Hill, New York, USA*.
- Wills, M. H., Jr. (1967). How *aggregate particle shape influences concrete mixing water requirement and strength*, *Journal of Materials*, Published by ASTM, Vol. 2, No. 4.