

Capítulo I

Introducción

1.1 Introducción

Las empresas buscan constantemente herramientas que les permitan solucionar problemas presentes en sus diferentes procesos, todo esto con el fin de lograr mayor competitividad en los mercados de hoy, los cuales presionan a las compañías a realizar actividades de diseño, manufactura y procesos de negocios, con un agresivo enfoque de costos y a merced de una serie de restricciones. Con el fin de superar este desafío las organizaciones requieren técnicas y herramientas que les permitan desarrollar productos de calidad de manera consistente y continua en el tiempo, así como obtener mejoras en los procesos por ellas ya establecidos.

Las técnicas de Diseño de Experimentos (DDE) son de gran ayuda en este aspecto, puesto que son utilizadas con el fin de manejar los procesos de modo que sean estos por si mismos los que provean del conocimiento necesario para lograr su mejora continua. Estas técnicas no solamente consisten en pruebas de significancia que emplean factores con niveles pre-establecidos, sino que además proveen un modelo predictivo de respuesta acerca del proceso en estudio, el cual tiene un sin número de aplicaciones en lo que a mejora continua se refiere.

Es precisamente esta herramienta (DDE) la que se empleará a lo largo de esta tesis con el fin de mejorar el desempeño de un proceso de tratamiento térmico presente en una empresa de la ciudad de Monterrey dedicada a la elaboración de maquinaria agrícola. Se espera a través de ella determinar los factores o interacciones de factores que mayor influencia posean sobre el proceso ya implantado y lograr establecer de ese modo niveles adecuados de operación que eleven el nivel de calidad actual en el producto final, el cual presenta elevados niveles de re-trabajo y desecho.

1.2 Antecedentes

La Calidad ha sido en los últimos años parte intangible básica de todo producto o servicio, sin embargo ya a inicios del siglo pasado, la apenas naciente industria moderna establecía los primeros laboratorios en Gran Bretaña (1901) para verificación de estándares (Montgomery,1996), e iniciaba un recorrido hasta ahora mantenido en

donde herramientas y metodologías, cada vez más elaboradas, se han ido sumando con el fin de lograr un control y una mejora sistemática de la calidad.

Con la introducción del concepto de carta de control por parte de W.A. Shewhart en los laboratorios Bell en 1924 (Montgomery,2001), se dio un inicio formal al control estadístico de procesos, sin embargo aun a finales de los treinta esta metodología no era ampliamente reconocida por la industria, fue la Segunda Guerra Mundial la cual expandió grandemente su uso y aceptación, especialmente en empresas de manufactura. Durante los años cincuenta y sesenta con el advenimiento de la filosofía de Deming la calidad pasó de ser de una simple característica de productos a una forma de administrar las organizaciones, con lo cual todas las metodologías hasta ese momento desarrolladas lograron mayor notoriedad.

Por otra parte el Diseño de Experimentos (DDE), técnica central de toda la tesis, ha ido evolucionando en cuatro etapas a lo largo de su historia. La primera conocida como la era agrícola fue inicializada por el pionero Sir. Ronald A. Fisher a inicios de los años treinta. Durante esta época Fisher fue responsable del análisis estadístico de datos en la Estación Experimental de Agricultura de Rothamsted cerca de Londres, Inglaterra. Fisher en este puesto introdujo de manera sistemática el pensamiento estadístico y los principios del diseño experimental, incluyendo el concepto de diseño factorial y el análisis de varianza (Montgomery,2001).

La segunda etapa del diseño experimental que se podría considerar industrial, fue catalizada a través del desarrollo de la metodología de análisis de superficie respuesta (ASR) por Box y Wilson en 1951 (Myers, Montgomery,1995). Ellos reconocieron y explotaron el hecho de que muchos experimentos industriales son fundamentalmente diferentes de sus contrapartes agrícolas en dos maneras:

- a) La variable de respuesta puede ser observada (en la mayoría de las ocasiones) inmediatamente.
- b) El experimentador puede rápidamente obtener información crucial de un grupo de corridas que puede ser utilizada en el siguiente experimento.

Box llamó a estas dos características inmediatez y continuidad. Por los siguientes treinta años el análisis de superficie respuesta y otras técnicas de diseño se aplicaron principalmente en industrias de procesos como lo son las químicas, generalmente en proyectos de investigación y desarrollo, sin embargo la aplicación del diseño estadístico a nivel de procesos de manufactura o de planta no fue aplicada de manera extendida tan rápidamente. Algunas de las razones fueron el entrenamiento inadecuado en conceptos estadísticos y métodos de ingeniería, y la falta de recursos computacionales y software estadístico amigable para soportar la aplicación de diseño de experimentos (Myers, Montgomery, 1995).

El interés por parte de la industria en mejorar su calidad inició a finales de los años setenta, con esto se iniciaba la tercera etapa del diseño experimental. El trabajo realizado por Genichi Taguchi tuvo un impacto significativo en esta época al expandir el interés en el uso de esta herramienta. Taguchi apoyaba el uso del diseño de experimentos con el fin de lograr lo que él llamó Diseño de Parámetros Robustos (G. Taguchi, 1991). El mismo tenía como principales objetivos:

- 1._Lograr procesos que no sean sensibles a factores ambientales u otros factores que sean difíciles de controlar.
- 2._Obtener productos no sensibles a la variación transmitida por sus componentes.
- 3._Encontrar niveles en ciertas variables que lleven la media del proceso a un valor esperado al mismo tiempo que reduzcan la variabilidad alrededor de este valor.

Taguchi sugirió ampliamente el diseño de experimentos factoriales fraccionados y arreglos ortogonales junto con algunos métodos estadísticos novedosos para solucionar problemas. Este tipo de metodología generó mucha discusión y controversia, parte de esta controversia nació debido a que los métodos de Taguchi fueron aplicados a las industrias sin que haya sido previamente revisada y validada desde el punto de vista estadístico.

A finales de los años ochenta los resultados indicaban que los conceptos de Taguchi y sus objetivos se encontraban bien fundados, sin embargo no dejaron de existir

problemas sustanciales con respecto a su estrategia experimental y al análisis de los datos.

Podría decirse que existen al menos tres resultados positivos de la controversia originada por la metodología Taguchi (Montgomery, 2001).

- a) El Diseño de Experimentos llegó a ser más ampliamente usado en la industria de partes incluyendo la automotriz y la de manufactura aeroespacial, electrónica y de semiconductores y muchas otras industrias que habían hecho muy poco uso de este tipo de técnicas.
- b) Dio origen a la cuarta etapa del Diseño de Experimentos la misma que incluyó un interés general renovado en el diseño estadístico tanto por investigadores como por personal de planta.
- c) Se desarrollaron nuevos enfoques y usos en los problemas experimentales en la industria mundial incluyendo técnicas alternativas derivadas de la metodología Taguchi que permitieron que los conceptos de ingeniería sean llevados a la práctica de manera efectiva y eficiente.
- d) La educación formal de estas técnicas llegó a ser parte de muchos programas de ingeniería en universidades tanto a nivel de grado como de postgrado.

Las técnicas de diseño de experimentos en esta su última etapa han encontrado diversas aplicaciones en muchas disciplinas, esto se debe a que la experimentación es parte fundamental del proceso científico y por ende de las ciencias en general. En el mundo de la ingeniería ha sido empleada especialmente cuando se ha requerido mejoras en el desempeño de procesos de manufactura o en el desarrollo de nuevos productos. Una demostración de ello la podemos encontrar al ver como el DDE ha sido considerada una de las herramientas más importantes dentro de la metodología Seis Sigma con un enfoque orientado firmemente a la mejora. (Breyfogle, Forrest.,2003)

Es la utilidad de esta herramienta y el uso renovado que se le está dando en la actualidad, lo que la hace lo suficientemente atractiva, útil y actual para ser empleada

en compañías orientadas a la mejora continua de sus procesos y productos, como es el caso que se presentará a continuación en este trabajo de tesis a través de su aplicación práctica en un proceso de tratamiento térmico, operación grandemente difundida en industrias metal-mecánicas de todo el mundo.

1.3 Planteamiento del Problema

La empresa en cuestión que colaboró en el desarrollo de esta tesis, se dedica a la fabricación de maquinarias agro-industriales, y se encuentra establecida en la ciudad de Monterrey en el estado de Nuevo León, México.

Por el tipo de giro de la empresa, esto es metalmecánica, dentro de sus procesos productivos encontramos frecuentemente operaciones de tratamiento térmico, es decir operaciones que utilizan calor con el fin de modificar las características y composición de ciertos metales, entre ellos el acero, de acuerdo a los requerimientos que deberá cumplir la pieza en su posterior uso.

Entre los equipos fabricados por la compañía, se encuentra el llamado arado de vertederas mismo que tiene como función ser parte de una maquinaria agrícola empleada en la remoción de tierras. Básicamente el arado de vertederas, tal como se puede observar en la Figura 1.1 es una pieza que junto con otras dos conforman una pala mecánica que agrupadas y ayudadas por la fuerza de un tractor permiten la remoción de materiales suaves y medianamente duros. Debido al esfuerzo al que se verá sometida la pieza en este tipo de trabajos, fue necesario que durante su proceso de elaboración adquiriera un nivel de dureza adecuado. Por esto, una vez que el producto ha sido formado pasa por una operación de tratamiento térmico con el cual se obtienen la dureza y resistencias apropiadas.

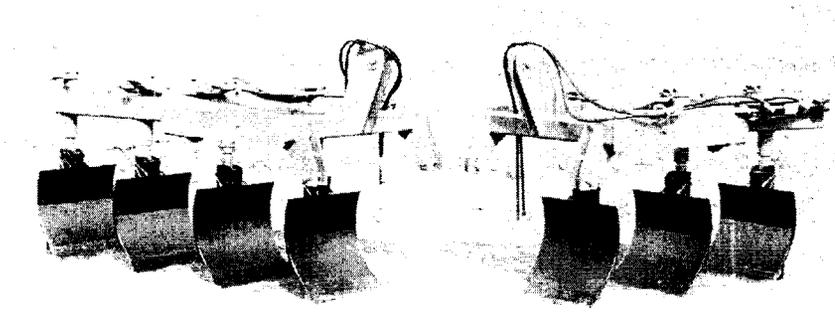


Fig 1.1 Arado de Vertederas

Posterior a la operación de tratamiento térmico se ha visto y registrado, que han existido problemas al momento de acoplar la pieza vertedera con sus contrapartes con el fin de conformar el llamado arado de vertederas, todo esto producto de la deformación que se presenta en la pieza como resultado de las altas temperaturas a las cuales es sometida la vertedera durante el tratamiento térmico.

Este efecto produce, según datos manejados por la propia empresa, un total de 548 vertederas rechazadas por año, lo cual financieramente se traduce en un monto considerable (aproximadamente USD. 27.000/año), este valor es resultado únicamente del costo de material de las piezas desechadas.

Con el fin de remediar la deformación presente en las vertederas, la compañía recurrió a la implementación de una operación de tipo correctiva llamada calibración, la cual se inicia luego de que el operario descubre que la pieza, posterior al tratamiento térmico, no se acopla correctamente a sus contrapartes. Esto lo hace a través del uso de un simulador de ensamble, el cual consiste en una matriz con la forma de las piezas sobre la cual la vertedera será ensamblada. La verificación se realiza de forma visual ya que el operario únicamente observa que no existan zonas en las cuales no coincidan las dos superficies de contacto (vertedera y simulador). En caso de que el operario detecte deformaciones, deberá encargarse de solucionar estas a través del calibrado, un moldeado en frío de la pieza que emplea una prensa de 100 Ton y diferentes pedazos de metal. La misma consiste en golpear la vertedera en diferentes lugares claves hasta lograr que la deformación presente en la misma sea eliminada.

La operación de calibrado genera tanto costos de pobre calidad como incrementos en tiempos de producción, ya que muchas veces ocasiona la destrucción de la pieza debido al endurecimiento previo de la misma, o implica un desgaste excesivo de horas hombre o herramientas puesto que el calibrar una pieza puede llegar a tomar 10 min. y un lote de estas está conformado por aproximadamente 200 vertederas, esto afecta a todo el sistema de producción el cual emplea la metodología Just in Time que requiere una elaboración de productos con el mayor nivel de calidad posible, lo cual en este caso en particular no se está cumpliendo.

Por estas razones, es la deformación de las piezas al finalizar el proceso de tratamiento térmico, lo que se desea reducir puesto que de esta forma se minimizaría el tiempo utilizado en el calibrado final de las mismas e incluso se podría lograr eliminar esta operación de tipo correctiva que no agrega ningún valor al producto, y al mismo tiempo reducir o eliminar el riesgo de piezas destruidas las cuales no tienen opción a reproceso, todo esto a través del control de los factores posiblemente influyentes en la operación de tratamiento térmico. Todas las mejoras que se realicen en el proceso se verán traducidas de manera directa en la reducción del tiempo de calibrado de las piezas, ya que a menor deformación menor requerimiento de acciones correctivas.

Puesto que la empresa en cuestión ha sido por muchos años líder en su área así como en la implementación de buenas prácticas de manufactura, decidió poner a disposición de este trabajo de investigación, su proceso de tratamiento térmico para la pieza vertedera con el fin de que a través de la metodología de Diseño de Experimentos (DDE), lograr obtener una mejora en los resultados, los cuales actualmente representan costos innecesarios tanto por rechazos como por operaciones que no agregan ningún tipo de valor al producto final.

En resumen el problema presente en este proceso podría sintetizarse en los siguientes tres ítems:

Piezas Vertederas con deformación: La vertedera luego del proceso de tratamiento térmico, debido a las temperaturas sometidas y al choque térmico producido en la operación de enfriado con aceite, sufre deformaciones que posteriormente afectarán el proceso de ensamble.

Tiempo de Calibrado: Las vertederas que no pasan la inspección con la matriz de ensamble, son calibradas por el operario utilizando una prensa hidráulica de 100 Ton. Dependiendo de la dureza que ha adquirido la pieza y de su nivel de deformación, el tiempo de calibrado variará llegando incluso a tomarse cerca de 10 min. por pieza. Un valor excesivo si consideramos que es una operación meramente correctiva. Se buscará si no eliminar al menos reducir este tiempo.

Dureza de la Pieza: La dureza de la pieza debe ser controlada de modo que al momento de finalizar el proceso de tratamiento térmico se encuentre dentro de especificaciones (310-350 Bhn). En algunos casos la dureza de las piezas presentan valores superiores, lo cual afecta la operación de calibrado e incrementa su fragilidad en el trabajo.

1.4 Justificación de Metodología de Solución

En los procesos de producción existen una serie de características las cuales en mayor o menor grado tienen relación con el nivel de calidad del producto final, técnicas como el Control Estadístico de Procesos (CEP) fueron desarrolladas con el fin de monitorear dichas características, a través del tomar muestras, calcular un estimador muestral y determinar si dicho estadístico excede o no límites previamente definidos (Montgomery,1996). Esta clase de control permitía a los encargados del proceso establecer si existía algún tipo de comportamiento irregular, el cual de ser identificado generaría una búsqueda de causas asignables con el fin de colocar el proceso en el status quo previamente definido como dentro de control.

Sin embargo a pesar de la gran utilidad que este tipo de herramientas ofrece, únicamente señalan la presencia de un factor extraño que en ese momento se encuentra ejerciendo algún tipo de influencia sobre el proceso, sin que necesariamente nos indique de manera clara el origen o la naturaleza del mismo. Es en este tipo de situaciones donde se requiere de técnicas que permitan no solo identificar la presencia, sino además el tipo de factor particular que mayor incidencia tenga sobre el proceso productivo, ya sea de manera positiva o negativa, con el fin de eliminarlo o si es el caso controlarlo de modo que siempre se mantenga presente en la medida adecuada.

Una de estas metodologías es el Diseño de Experimentos la cual ha obtenido estupendos logros a través de su aplicación en todo el mundo. Un ejemplo de ello se encuentra en el área química específicamente en una empresa petroquímica de quinientos acres de extensión (BASF) (Drickhamer,2002) ubicada en Freeport, Texas, dedicada a la fabricación de nylon tipo seis.

Esta empresa aplicó la metodología de diseño de experimentos con el fin de mejorar el proceso de producción de ciclohexano, un compuesto crítico usado en la elaboración de caprolactana, eventualmente nylon tipo seis. Hasta ese momento el proceso no había sufrido cambios durante cuarenta y un años. En el proyecto el equipo de trabajo requirió 16 experimentos los mismos que luego se transformarían en 32 debido al incremento en los factores, una vez obtenida la información y realizados los análisis correspondientes el equipo de trabajo realizó los cambios sugeridos por la metodología aplicándolos en el proceso. Dichos cambios han permitido a la empresa BASF lograr ahorros anuales por \$ 742.000 dólares y un ahorro en capital de trabajo por \$ 750.000 dólares. Considerando que el tiempo del proyecto no fue mayor a seis meses y que la inversión no fue sino la requerida para pagar los servicios del experto y de las pruebas realizadas, podríamos afirmar que la inversión en esta clase de proyectos es mínima si consideramos los beneficios que normalmente se obtienen de su aplicación.

Otro ejemplo exitoso que justifica la aplicación de este tipo de herramienta en la solución de problemas de tipo industrial, es aquel que se realizó para una marca de autos de tipo NASCAR con el fin de mejorar el desempeño aerodinámico del automóvil de competencias (Kowalsky,2003). Este proyecto fue desarrollado por NASA, Old Dominion University y la Universidad del Estado de Florida.

Los equipos de automóviles de carreras usualmente emplean enfoques ad-hoc con el fin de desarrollar los experimentos necesarios ya sea para el diseño o mejora de sus autos, sin embargo el tiempo y costos que estos suelen involucrar no siempre proveen el mejor de los resultados, por esta razón se utilizó la metodología DDE la cual evaluó al inicio variables como por ejemplo altura de la parte delantera y trasera del auto. A lo largo de la investigación se iban añadiendo nuevos factores relacionados con partes internas del automóvil.

Al finalizar los experimentos, se elaboró un modelo matemático el cual permitió a los miembros del equipo de autos obtener información acerca de los niveles en que debían establecerse los factores utilizados en el estudio con el fin de encontrar el resultado más óptimo posible en lo que al desempeño del auto se refiere.

La conclusión final mostró que la rejilla del radiador debía encontrarse completamente cubierta y la parte trasera del auto debía ubicarse en su nivel más alto con el fin de obtener el mejor desempeño aerodinámico, además se determinó que cumpliendo estas dos condiciones la altura de la parte frontal no tenía ningún tipo de influencia sobre la respuesta del proceso.

Un último ejemplo entre los muchos que se podrían encontrar lo hallamos en la industria farmacéutica Glaxo S Kline (GSK) (Smith,2002) la cual invierte la mayoría de su tiempo en investigación en cuatro áreas terapéuticas como son: anti infectivos, medicamentos enfocados al sistema nervioso central, al sistema respiratorio y gastro-intestinal. GSK es el líder en el desarrollo de vacunas y tiene un alto crecimiento en el portafolio de productos oncológicos. Actualmente es el líder en productos de cuidado oral y bebidas nutricionales.

Los departamentos de investigación y desarrollo de GSK se encuentran localizados en 24 sitios, en siete países diferentes. Cerca de cuatro billones de dólares los destina al descubrimiento y desarrollo de drogas.

Usualmente el trabajo de investigación para desarrollar una nueva droga toma aproximadamente entre 10 y 12 años, este es el tiempo que transcurre entre el descubrimiento y que el producto llegue al mercado, todo esto por un costo cercano a los 800 millones de dólares, por esta razón es crítico para este tipo de compañías encontrar metodologías de investigación menos largas pero que al mismo tiempo aseguren productos farmacéuticos seguros y efectivos.

El inicio del proceso comienza identificando sustancias químicas en el cuerpo que estén directamente relacionadas con la enfermedad que se desea combatir, una vez establecidas las relaciones se determina que sustancias podrían modificar o influir sobre las sustancias químicas previamente identificadas y de esa manera combatir la

enfermedad. Es en esta etapa en que el Diseño de Experimentos es utilizado puesto que los científicos establecen un objetivo o mejor llamada variable de respuesta la cual variará de acuerdo a la composición de las distintas sustancias bajo estudio. DDE permite a los científicos determinar que sustancias deberán ser utilizadas y en que proporción para obtener la mejor variable de respuesta esto es un medicamento seguro y con las características deseadas como bio-disponibilidad y estabilidad.

Luego de haber revisado algunos ejemplos, podemos anotar que de manera general la aplicación de este tipo de técnicas (DDE) en nuestros procesos puede resultar en (Montgomery,2001) :

- a) Producir procesos mejorados desde el inicio
- b) Reducir la variabilidad y acercar el proceso a su valor nominal
- c) Reducir el tiempo de desarrollo de procesos y reducción de costos.

Este tipo de métodos también son usados ampliamente en actividades de diseño ingenieril, donde nuevos productos son desarrollados y los existentes mejorados. Algunas aplicaciones en esta área incluyen: Evaluación y comparación de configuraciones de diseño básicas, evaluación de materiales alternativos, selección de parámetros de diseño de tal modo que el producto trabaje de manera correcta bajo una gran variedad de condiciones, esto es que sea robusto, y determinación de parámetros de diseño de producto claves que impacten directamente en el desempeño del producto final.

En lo que a optimización se refiere el Diseño de Experimentos ayuda a los investigadores a determinar de manera clara y confiable los factores que dentro del proceso afectan la variable de respuesta y las características de calidad deseadas (Montgomery,2001). Un paso lógico dentro de cualquier proceso de optimización es determinar la región en los factores que se determinen como claves, que permita obtener el mejor nivel de respuesta en estas características logrando a través de ello la optimización de los procesos productivos.

El proceso que se desea optimizar en este proyecto de investigación, posee una variedad de factores como: temperatura del horno, temperatura del aceite refrigerante,

tipo de ubicación de las piezas al realizar el tratamiento térmico entre otros. Estos factores pueden ser considerados por la técnica de diseños de experimentos perfectamente, con el fin de determinar el nivel en el que los mismos deben establecerse con el fin de obtener el menor número de piezas con deformaciones graves o al menos reducir de manera general esta en los lotes. A pesar de que podrían existir diversas técnicas para alcanzar el mismo objetivo, el diseño de experimentos tiene como ventaja, el que se ajusta a la metodología usualmente utilizada en procesos metalúrgicos, químicos o en cualquier departamento de investigación, y al mismo tiempo optimizar los recursos puesto que genera experimentos eficientes y efectivos eliminando aquellos innecesarios.

Las técnicas DDE además permiten considerar todos los factores relevantes y sus interacciones que en algunos casos pueden ser de mayor influencia que los factores en si, ésto último es una de las mayores ventajas presentes en este tipo de metodología en comparación con el enfoque usualmente utilizado que evalúa un factor a la vez (Montgomery,2001).

Con respecto al problema presente en la planta, el cual servirá con el fin de aplicar la metodología de Diseño de Experimentos, podemos agregar que posee un costo financiero importante tal como se puede observar a continuación.

Número de piezas	Monto en dólares	Descripción
548	26.590/año	Vertedera

Tabla 1.1 Costo financiero problema tratamiento térmico

Además de este costo existen aquellos que no se encuentran directamente relacionados con la pieza desechada aunque sin embargo tienen similar importancia, como lo es el costo que involucra mantener el sistema de producción detenido, en especial debido a que la empresa posee un sistema Just in Time que requiere un flujo constante de producto de manera sincronizada, sin que existan problemas como los originados por el tratamiento térmico.

Se considera que la resolución de este problema de tipo industrial, utilizando la metodología DDE nos permitirá además de lograr una mejora técnica y financiera en

una empresa, desarrollar una aplicación práctica que contribuya al proceso de expansión del conocimiento en este caso de tipo estadístico a través de la aplicación de esta metodología en particular en un problema práctico.

Adicionalmente esta investigación se convertirá en una adecuada referencia para organizaciones que deseen emplear esta u otras técnicas estadísticas en sus procesos, puesto que ofrecerá un ejemplo metodológico de aplicación práctica de una de las herramientas estadísticas actuales de mayor importancia por su involucramiento directo en metodologías como el Seis Sigma y por su demostración de efectividad en el campo industrial. Por lo tanto este documento servirá de guía en el momento de replicar su uso en otro tipo de problemas industriales, permitiendo que la misma se realice con una mayor probabilidad de éxito.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Establecer para los factores identificados como influyentes en el proceso de tratamiento térmico, niveles de operación que generen una reducción en la deformación de la pieza y por ende en el tiempo de calibración, manteniendo sin afectación sus propiedades de resistencia y dureza requeridas.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Identificar los factores claves presentes durante el proceso de tratamiento térmico, y que influyen de mayor manera en la deformación final de la pieza y en el tiempo que tomará ajustar la misma a sus contrapartes en la operación de ensamble.
- Establecer, a través de la experimentación y el análisis estadístico, los niveles en los cuales los factores previamente identificados como claves, logran una reducción en la deformación final de la pieza vertedera y por ende en su tiempo de calibración.
- Establecer condiciones de proceso que no afecten las propiedades de diseño de resistencia y dureza requeridas por la pieza, y necesarias debido al tipo de trabajo al que son sometidas.

1.6 Metodología de Investigación

El tipo de estudio que se utilizará en la elaboración de esta tesis será de tipo cuantitativo (Hernández, Fernández, Baptista, 2003) pues se medirá la influencia que ciertos factores previamente identificados tienen sobre el proceso de tratamiento térmico, para posteriormente determinar el impacto de cada uno de estos sobre la operación. Adicionalmente se evaluarán hipótesis y grados de interacción entre factores, a través del uso de métodos estadísticos todos ellos cuantitativos.

El tipo de estudio será co-rrrelacional puesto que se espera identificar que relación existe entre las variables independientes (temperatura del horno o del aceite), en este caso relacionadas todas al proceso y la variable de salida, (tiempo de calibración de la pieza verdadera).

El trabajo de tesis será estructurado considerando la metodología propia del Diseño de Experimentos, esto es en las siguientes secciones se abordará la planeación, selección, diseño y ejecución del experimento acorde a los objetivos establecidos. Posteriormente en una sección adicional se analizarán los resultados del mismo, lo cual otorgará la información necesaria para decidir acerca de las condiciones de operación adecuadas.

Capítulo II

Tratamiento Térmico

2.1 Descripción del Proceso de Tratamiento Térmico

La pieza vertedera es solo una parte de las tres que conforman un arado, equipo utilizado en tractores agrícolas con el fin de remover materiales de tipo arenoso o arcilloso. La vertedera es elaborada en acero tipo 1080 la cual es cortada de una plancha original, utilizando un equipo láser de alta tecnología y precisión.

Posteriormente en una operación de forja la pieza adquiere la forma curvada requerida con el fin de cumplir las labores de acarreo. Una vez finalizada esta operación y antes del proceso de tratamiento térmico, la vertedera es ubicada sobre una matriz que permite identificar si la misma no presenta anomalías originadas desde forja, a esta operación se la conoce con el nombre de pre-calibrado, en el casi 100% de los casos la pieza en esta inspección no muestra desajustes graves, sin embargo todas son moldeadas en una prensa de 100 toneladas de modo que queden perfectamente alineadas con respecto al simulador de ensamble. Cabe recalcar que las piezas pre-calibradas, no requerirían ningún tipo de calibrado posterior, si durante el tratamiento térmico no se producen deformaciones mayores.

Con el fin de que las piezas adquieran las características de dureza y resistencia requeridas, son sometidas a un proceso de tratamiento térmico el cual consiste en: Una operación de temple, una operación de enfriado con aceite y una operación de revenido. Es durante este proceso, donde las vertederas son sometidas a temperaturas entre los 500°C y 900°C así como a choques térmicos productos del enfriamiento con aceite. Estos cambios bruscos de temperatura provocan deformación, la cual valga anotar no es notoria a simple vista ya que el metal se deforma generando cambios milimétricos apenas perceptibles al ojo humano. Sin embargo estas pequeñas deformaciones son suficientes para evitar que la misma se acople de manera correcta con sus cotrapartes con el fin de formar el arado. Esta es la razón por la cual surge la necesidad de reducir la deformación ya que en algunos casos al haber la pieza adquirido una mayor dureza, el calibrar o modificar la forma de la misma a través de un moldeado en frío se dificulta de gran modo, teniendo como resultado un excesivo tiempo de calibrado (10 min. /

pieza), o en el peor de los casos la fractura de la pieza y por ende la generación de desechos altamente costosos para la compañía.

2.2 Flujo de Procesos Vertedera

A continuación se expondrá el flujo de procesos requerido para la elaboración de la pieza vertedera.

FLUJO DE PROCESOS ELABORACION DE PIEZA VERTEDEIRA

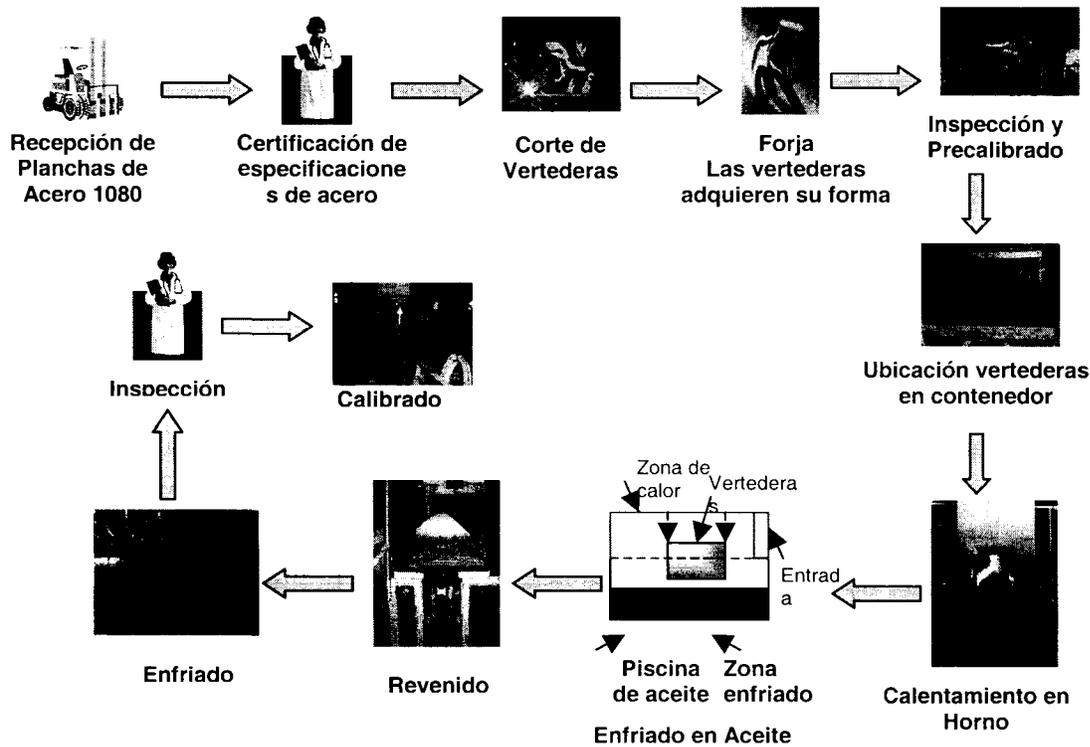


Fig. 2.1 Flujo de Procesos elaboración de pieza vertedera

2.3 Descripción detallada de operaciones

1. Recepción de materias Primas: La única materia prima empleada para esta operación son planchas de acero del tipo 1080, es decir un 0.8% de su constitución es de carbono. La compañía previo el envío recibe información acerca de las características y composición química de las planchas a ser entregadas.

2. Certificación de materiales: Una vez que el acero ha llegado, se toma una muestra del metal y se analiza y valida su constitución con respecto a lo establecido en el informe enviado por el proveedor, si la información es coincidente entonces las planchas de acero pueden pasar a producción, si por otro lado los cambios son importantes el acero es devuelto.

3. Corte de Vertederas: Empleando una máquina de corte láser, las vertederas son obtenidas de las planchas de acero siguiendo la forma que se puede observar en la figura inferior, claro esta que hasta ese momento la superficie es totalmente plana.

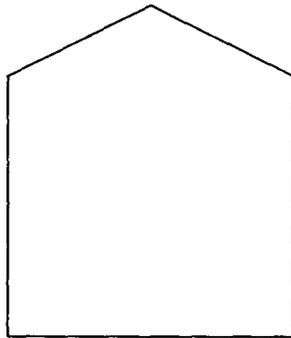


Fig. 2.2 Forma de Vertedera al momento del corte

4. Forja: Como lo dice su descripción, es la formación de un metal en caliente golpeándolo o ejerciendo presión sobre el. En este caso consiste en calentar la vertedera y a través de golpes lograr que adquiriera la forma pandeada requerida para las labores de acarreo. Es importante anotar que esta es la única operación productiva donde el metal debe adquirir las características de forma necesarias.

5. Pre-Calibrado: En un simulador de ensamble (Fig. 2.3), el cual consiste en un matriz con forma similar a las piezas en las cuales la vertedera será acoplada, se prueba si luego de la forja la misma se ajustará de manera adecuada a estas. En la mayoría de los casos las vertederas poseen muy pequeñas diferencias las cuales son rápidamente ajustadas en una prensa de 100 Ton., aproximadamente al operario en promedio le toma 1 min. pre-calibrar una pieza. Cabe indicar que al terminar esta operación, de tipo preventiva, la pieza posee un ajuste casi perfecto es decir su forma es la adecuada para el ensamble.

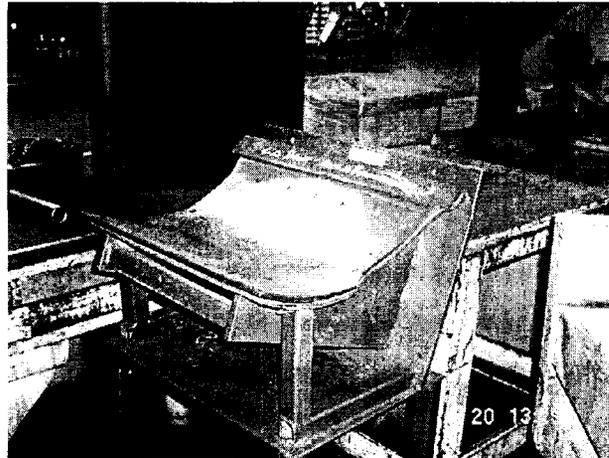


Fig. 2.3 Simulador de Ensamble

6. Ubicación de vertederas en el contenedor: Primeramente es importante describir al contenedor, el cual es una estructura metálica que como se puede apreciar en las Figura 2.4 posee rendijas dentro de las cuales se permite la colocación cómoda de hasta un total de 34 vertederas. Una característica particular de los contenedores que se empleaban en el proceso es que posee apoyos, como le llamaremos a lo largo de la tesis a los pedazos de metal sobre los cuales descansan las vertederas, unos más grandes que otros.

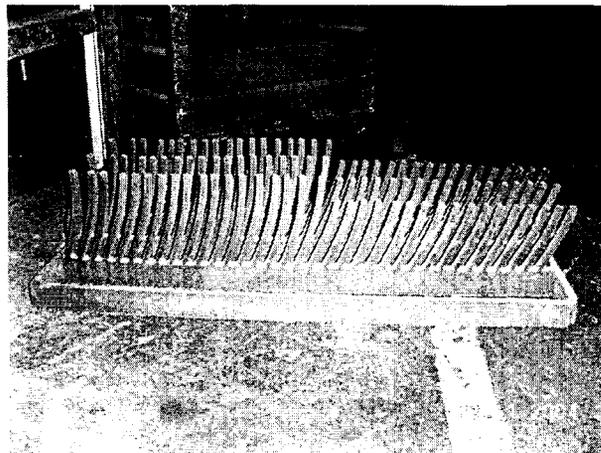


Fig. 2.4 Contenedor vacío con apoyos de distintos tamaños

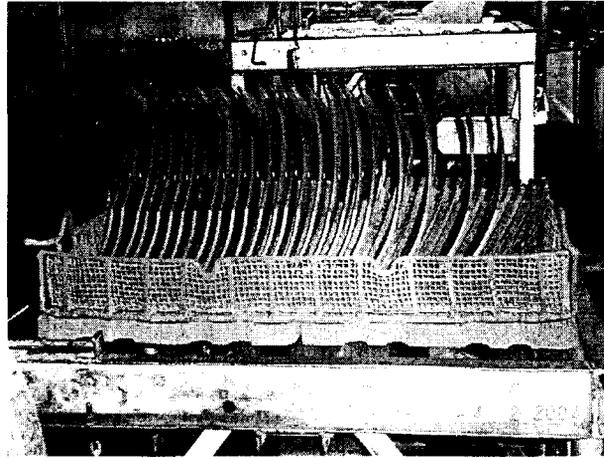


Fig. 2.5 Contenedor cargado con vertederas

7. Temple: Las vertederas ya en el contenedor son ingresadas a un horno el cual ha sido previamente calentado y posee al momento de su ingreso una temperatura aproximada de 843°C . Dentro del mismo las vertederas permanecerán por cerca de 45 min. y adquirirán una dureza promedio de 600 Bhn (Brinell), valor muy alto pues implica una gran fragilidad. La dureza excesiva será desminuida posteriormente a través de la operación de Revenido.

8. Enfriado en Aceite: Una vez que las piezas han sido calentadas por aproximadamente 45 min. ingresan automáticamente a una piscina de aceite (Fig. 2.6), ubicada en la parte inferior del horno, es decir no requieren salir del mismo para ser enfriadas. Esta operación produce un choque térmico fuerte puesto que las piezas pasan de 843°C a 120°C , pudiendo esta ser causa importante de su deformación.

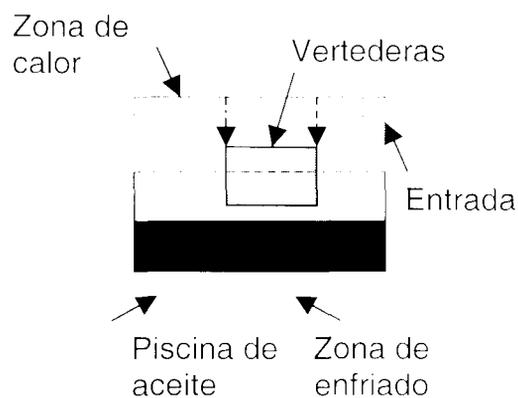


Fig. 2.6 Esquema de enfriado en aceite

9. Revenido: En el mismo contenedor las vertederas ingresan a otro horno el cual posee una temperatura de 528°C , por un periodo de una hora y tiene como objetivo reducir la dureza inicial obtenida en el calentamiento, de modo que esta se encuentre dentro de especificaciones esto es de 310-350 Bhn.

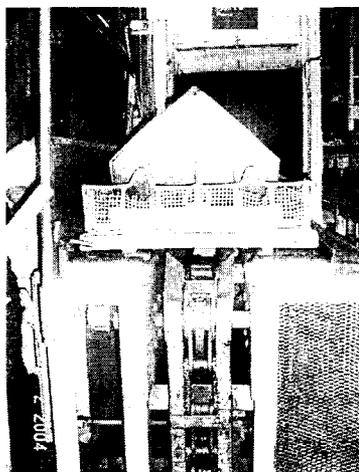


Fig. 2.7 Entrada de piezas a horno de revenido

10. Enfriado: Luego del proceso de revenido las vertederas son enfriadas al ambiente para posteriormente ser enviadas al proceso de inspección y calibrado.

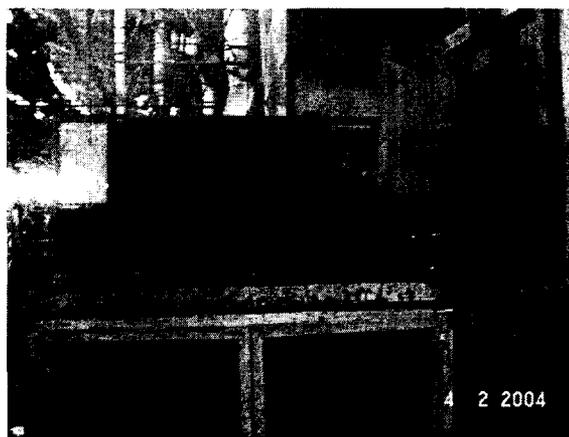


Fig. 2.8 Enfriado de vertederas al ambiente luego de revenido

11. Calibrado: Las vertederas una vez enfriadas son colocadas nuevamente en el simulador de ensamble para determinar si la pieza se acoplará de manera correcta a sus contrapartes. Normalmente ninguna pieza puede pasar esta inspección sin que sea necesaria la operación correctiva de calibrado, la que nuevamente consiste en que el

operario a través del uso de la prensa de 100 Ton y la aplicación de golpes sobre la vertedera en frío logre eliminar la deformación producto del tratamiento térmico. Esta operación toma en promedio un total de 10 min. por pieza, sin que la misma agregue ningún tipo de valor al producto, pues es una operación de tipo correctiva. Precisamente es este el tiempo que esperamos reducir.

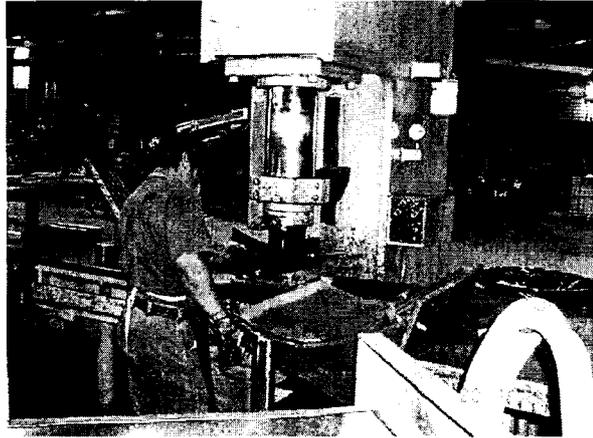


Fig. 2.9 Calibración de vertederas empleando prensa hidráulica

Durante los siguientes capítulos se desarrollará cada uno de los experimentos que fueron necesarios a lo largo de nuestra investigación con el fin de establecer los factores y los niveles adecuados para reducir el tiempo de calibración y por ende el nivel de deformación de las vertederas. En el sexto y último capítulo se sintetizarán todas y cada una de las conclusiones y recomendaciones recogidas en los capítulos precedentes.

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY
DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



TECNOLÓGICO
DE MONTERREY

DISEÑO DE EXPERIMENTOS APLICADO PARA LA MEJORA
DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE CALIDAD
Y PRODUCTIVIDAD

POR

MARCOS BUESTAN BENAVIDES

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE 2004

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY
DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY**

**DISEÑO DE EXPERIMENTOS APLICADO PARA LA MEJORA
DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE CALIDAD
Y PRODUCTIVIDAD**

POR

MARCOS BUESTAN BENAVIDES

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE 2004

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

**CAMPUS MONTERREY
DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.®**

**Diseño de experimentos aplicado para la mejora de un proceso de
tratamiento térmico**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADEMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD**

POR:

MARCOS BUESTAN BENAVIDES

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE DE 2004

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**

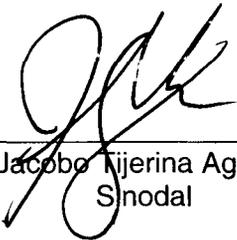
Los miembros del comité de tesis recomendamos que el presente proyecto de tesis presentado por el Ing. Marcos N. Buestán Benavides sea aceptado como requisito parcial para obtener el grado académico de:

**Maestro en Ciencias en Sistemas de Calidad y Productividad
Especialidad en Ingeniería Estadística**

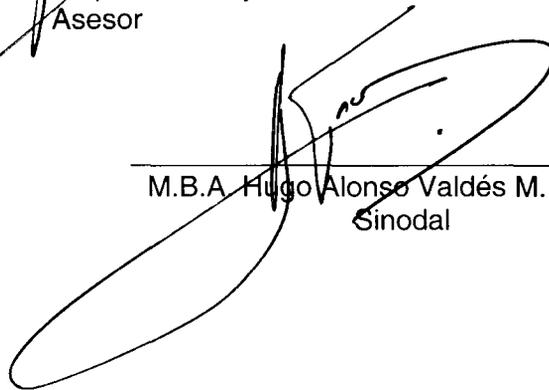
Comité de Tesis:



Dr. José Guadalupe Ríos Alejandro
Asesor



M.C. Jacobo Tijerina Aguilera
Sinodal



M.B.A. Hugo Alonso Valdés M. del C.
Sinodal

Aprobado:



Dr. Federico Viramontes Brown
Director del Programa de Graduados en Ingeniería
Diciembre, 2004

Dedicatoria

A **Dios** mi Padre, creador y protector a quien debo la vida y cada minuto de mi existencia.

A Mis Padres, **Luis y Jenny**, instrumentos divinos, gestores de mi carácter y espiritualidad, motivadores y amigos incondicionales.

A mis Hermanos **Tatiana y Enrique**, compañeros de Vida, mi fuerza y ánimo cuando los he necesitado.

Agradecimiento

A Dios por siempre, ya que en vano se esfuerzan los constructores si El no bendice la obra.

A mis Padres, por que desde mi niñez han sido abnegados guardianes y formadores de mi vida, incansables consejeros y mentores de mis logros más grades. A ellos cada una de las horas de sacrificio y esfuerzo depositadas en este trabajo.

A mis Hermanos, a quienes debo aun con su corta edad, haber sido referencia y ejemplo de Vida

A mi Director de Tesis, Dr. José Guadalupe Ríos, catedrático y maestro por excelencia

A Industrias John Deer, a todos sus empleados y administradores quienes me dieron la oportunidad de ser parte de esa gran familia durante el desarrollo de este proyecto, especialmente al Ingeniero Hugo Alonso Valdés por su invaluable colaboración.

Al Ingeniero Jacobo Tijerina por su apoyo en el perfeccionamiento en este trabajo.

A mis Amigos los de siempre y a los que en este país tuve la suerte de encontrar y que desde ahora podré considerar mis hermanos.

A la Organización de Estados Americanos, institución formadora y forjadora de mentes en este nuestro Continente.

INDICE

Capítulo I Introducción	
1.1. Introducción	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Planteamiento del Problema	5
1.4 Justificación de Metodología de Solución	8
1.5 Objetivos	13
1.5.1 Objetivo General	13
1.5.2 Objetivos Específicos	13
1.6 Metodología de Investigación	14
Capítulo II Tratamiento Térmico	
2.1 Descripción del Proceso de Tratamiento Térmico	15
2.2 Flujo de Proceso Vertedera	16
2.3 Descripción detallada de operaciones	16
Capítulo III Marco Teórico Diseño de Experimentos	
3.1 Diseño de Experimentos	22
3.1.1 Experimentos y Procesos	22
3.1.2 Principios básicos de experimentación	23
3.1.3 Enfoques de Experimentos	25
3.1.4 Diseños anidados y de parcelas divididas	28
Capítulo IV Diseño Experimental	
4.1 Reconocimiento del Proceso y sus Restricciones	33
4.1.1 Restricciones y observaciones importantes sobre el proceso	36
4.2 Establecimiento de factores y niveles	37
4.2.1 Establecimiento de Variable de Respuesta	37
4.2.2 Análisis del Proceso	39
4.3 Selección del Diseño Experimental	49
4.4 Desarrollo del Experimento	54
4.5 Recolección de Datos	60
4.6 Análisis de Datos	64
4.6.1 Análisis Factor Dureza luego de revenido	67
4.6.2 Análisis Factor Pre-calibración	69
4.6.3 Análisis desviación de puntos co-lineales 1-3 y 4-6	78
4.6.4 Análisis Interacción Temperatura Pre-calibrado	80
Capítulo V Análisis Estadístico Proceso de Revenido	
5.1 Descripción y función del Proceso de revenido	82
5.2 Niveles actuales del proceso	83
5.3 Análisis Estadísticos de datos de dureza	85
5.4 Alternativa de Solución	87
5.5 Conclusiones de Análisis de Revenido	89
Capítulo VI Conclusiones	
6.1 Conclusiones y Recomendaciones	91
6.2 Beneficios y Resultados	94
6.3 Investigaciones Futuras	94
Bibliografía	95

CAPITULO III**Marco Teórico Diseño de Experimentos****3.1 Diseño de Experimentos****3.1.1 Experimentos y Procesos**

En general los experimentos son usados con el fin de estudiar el desempeño de procesos y sistemas los cuales pueden definirse como una combinación de máquinas, métodos y personas que en conjunto transforman recursos o materiales en un producto final que posee una o más características observables (Montgomery,1996).

Algunas de las variables de los procesos o sistemas estudiados, son controlables ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_P$) mientras que otras no lo son ($Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_P$), sin embargo en algunos casos durante la experimentación es preciso tomar control sobre estas últimas por requerimiento del diseño experimental. (Fig. 3.1)

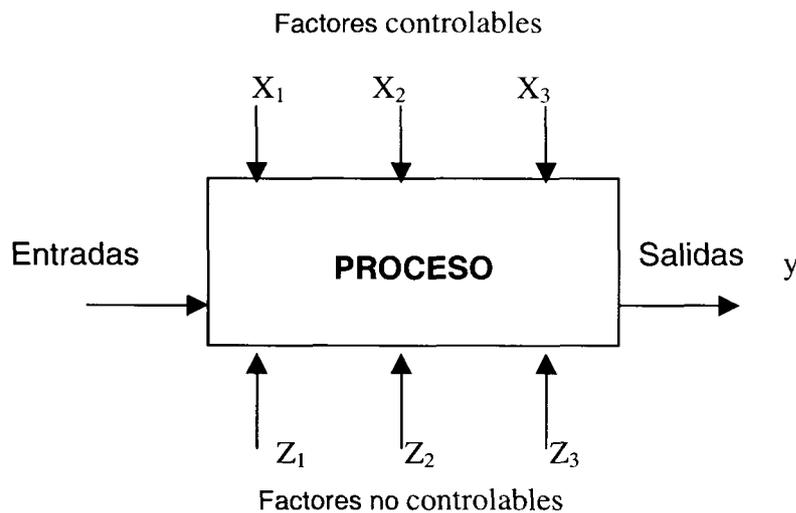


Fig. 3.1 Esquema de un Proceso

En general los objetivos de todo experimento son los siguientes (Montgomery,1996):

1. Determinar que factores son los que mayor influencia tienen sobre la(s) variable(s) de salida.

2. Determinar en que valores o niveles deberán quedar establecidos los factores de mayor influencia “x”, de modo que la variable de salida “y” se encuentre muy cerca de su deseado *valor nominal*

3. Determinar en que valores o niveles deberán quedar establecidos los factores de influencia “x”, de tal modo que la *variabilidad* en la variable de salida “y”, sea muy pequeña.

4. Determinar las condiciones en que deberán quedar establecidos los factores “x” de modo que los efectos por parte de las variables incontrolables Z sean mínimos.

El fin básico del proceso de experimentación en nuestro caso buscará obtener como resultado piezas lo más cercanamente posible a su nivel óptimo esto es con cero deformaciones y se buscará que la variación con respecto a este nivel objetivo sea mínima, adicionalmente se tratará de obtener un proceso lo suficientemente robusto de modo que las variables incontrolables afecten el resultado de la variable deformación en el menor grado posible.

3.1.2 Principios básicos de la experimentación

Independiente del tipo de experimento que se utilice, los principios básicos de la experimentación son: replicación, aleatoriedad y bloqueo (Box, George 1993).

a) Replicación: Por replicación se entiende las veces que se realiza el mismo experimento considerando el mismo número y nivel de factores. La replicación tiene dos importantes propiedades:

1) Permite al experimentador obtener un estimado del error experimental; dicho error llega a ser una unidad básica de medida para determinar si las diferencias observadas en los datos tienen validez estadística.

2) Si la media muestral es usada para estimar los efectos de un factor en el experimento, la replicación le permite al investigador obtener un valor mucho más preciso de este estimador. (Montgomery,2001).

Es importante anotar que en el caso de nuestro estudio las replicas son limitadas debido al alto costo que implica repetir experimentos, sin embargo se buscará incrementar las réplicas en el mayor número posible.

b) Aleatoriedad: Es la piedra angular sobre la que se basa el uso de métodos estadísticos en el diseño de experimentos. Por aleatoriedad se entiende que tanto la asignación de los materiales del experimento como el orden en que estos son realizados han sido determinados al azar. Los métodos estadísticos requieren que las observaciones sean variables aleatorias independientemente distribuidas, la aleatoriedad usualmente hace esta asunción válida.

Al realizar aleatoriamente nuestros experimentos eliminamos el efecto que podría producirse por factores extraños que posiblemente están presentes en la prueba.

c) Bloqueo: Es una técnica de diseño usada para mejorar la precisión con la que las comparaciones de los factores de interés son hechas. Usualmente el bloqueo es usado para reducir o eliminar la variabilidad transmitida por factores de ruido, esto es factores que podrían influenciar de alguna manera el desempeño del experimento, pero en los cuales no estamos interesados en investigar.

Generalmente el bloqueo se expresa en función de una serie de condiciones experimentales homogéneas, cada factor que no se desea evaluar se debe convertir en un bloqueo (Montgomery, 2001), por tanto el investigador tendrá resultados dependiendo del bloque en que estos fueron realizados es decir aislados.

El bloqueo en el diseño de este experimento se verá compuesto por una serie de medidas preventivas las cuales evitarán introducir dentro del proceso de análisis variables tales como diferencia entre materiales, o proveedores, clásicas variables generadoras de “ruido” en un experimento. Pueda incluso que el bloqueo sea una medida necesaria debido a los condiciones del experimento.

3.1.3 Enfoques de Experimentos

a) Experimento por tanteo: Este enfoque para la realización de experimentos es frecuentemente usado en la práctica por ingenieros e incluso científicos, usualmente se obtienen buenos resultados si el investigador posee gran conocimiento ya sea este técnico o teórico del sistema que se está estudiando así como gran experiencia práctica en el. Sin embargo se pueden encontrar dos desventajas en este tipo de enfoque, primero se asume siempre que el primer intento no ofrece los mejores resultados, ya que la mayoría de las personas al menos realiza dos experimentos cuando estos son realizados por intuición o experiencia (Montgomery, 2001).

Buscando la mejor combinación de factores sin ningún otro respaldo que la experiencia, al investigador le puede tomar un largo periodo de tiempo considerar todos aquellos factores que aparentemente son importantes, sin que exista garantía de éxito.

En segundo lugar, otra de las desventajas presentes en este tipo de enfoque es que el investigador no posee nada que le garantice que la mejor solución ha sido encontrada, por tanto se puede ver tentado a detenerse en cualquier momento.

Por la cantidad de factores encontrados en el experimento de tratamiento térmico podría ser no factible utilizar este tipo de enfoque.

b) Experimentos un solo factor a la vez: Este método consiste en seleccionar un punto de partida o establecer valores para un grupo de factores que serán considerados como la línea de base de los experimentos, con el fin de posteriormente variar uno a uno cada factor mientras se mantienen constantes los demás. Luego de que todos los experimentos son desarrollados una serie de gráficos son realizados con el fin de observar como la variable de respuesta es afectada al variar cada uno de los factores mientras los otros permanecen constantes.

La mayor desventaja que posee este enfoque, radica en que no permite considerar cualquier posible interacción entre factores. Una interacción puede producirse de modo que un factor a cierto nivel tenga diferente influencia sobre la variable de salida “y”, cuando otro factor involucrado se encuentra en un nivel en particular por tanto en ese

caso podríamos afirmar que ambos se encuentran relacionados positiva o negativamente (Montgomery,2001).

Este tipo de enfoques siempre serán menos eficientes que cualquier otro método cuyo diseño se encuentra basado en un enfoque de tipo estadístico.

A pesar de que ofrecen muy buena información con respecto a factores principales elimina el efecto generado por las interacciones de los mismos lo cual podría obviar el factor principal que se relaciona directamente con la característica de calidad en este caso las deformaciones en la vertedera.

c) Experimentos Factoriales: Esta es una estrategia en la que el investigador, en cada experimento, realiza todas las combinaciones posibles de manera aleatoria para cada factor en cada uno de sus niveles. De modo que si existieran “a” niveles posibles para el factor A y “b” niveles posibles para el factor B las réplicas contendrían todas las $a*b$ combinaciones de tratamiento que pudieran realizarse.

El efecto de un factor es cambiado a media que se varía el nivel en el cual este se ubica, esto es llamado efecto principal puesto que estos se refieren a los efectos principales presentes en el experimento. En algunos experimentos podemos encontrar que la diferencia en la respuesta entre los niveles de un factor no es la misma en todos los niveles de los otros factores, cuando esto ocurre podríamos decir que hay una interacción entre factores. Esto es una de las ventajas que podemos encontrar en este tipo de enfoque.

Sin embargo a pesar de las grandes ventajas que ofrece este enfoque, el mismo puede implicar una gran cantidad de experimentos, los cuales podrían generar un costo muy elevado. Por ejemplo si existieran k factores, cada uno con posibilidades de ser ubicado en dos niveles diferentes, el diseño de este experimento requeriría de 2^k corridas, en caso de que el valor de k fuera 10 se requerirían 1024 experimentos, lo cual sería prácticamente imposible tanto por el costo que eso involucraría como por el tiempo que tomaría realizarlo.

Afortunadamente si existen mas de cinco factores, es usualmente innecesario desarrollar todas las combinaciones posibles pues existe un enfoque adicional conocido como Experimentos factoriales fraccionados (Montgomery,2001).

El uso de este enfoque de experimentos depende de ciertas restricciones relacionadas directamente con el nivel de interacción entre factores, usualmente el mismo es utilizado en diseños en los cuales no se encuentran ligados unos dentro de otros (anidados).

d) Experimentos factoriales fraccionados: Como se pudo ver es una variación de el diseño básico de experimentos factoriales, sin embargo en este caso se consideran únicamente un subgrupo de todos los experimentos que en teoría deberían realizarse. Este tipo de enfoque es ampliamente utilizado en investigaciones industriales, y en desarrollo y mejoramiento de procesos puesto que en estos casos se tiene una gran cantidad de factores por probar y se trata de buscar únicamente aquellos que poseen el mayor efecto.

El efecto en el uso de los experimentos factoriales fraccionados se basan en las siguientes tres ideas (Montgomery,2001):

1. La poca densidad de los efectos principales: Cuando existen muchas variables, los sistemas o procesos se ven muy probablemente manejados por algunos de los principales efectos, y en un orden menor por parte de las interacciones.

2. La propiedad de proyección: Los experimentos factoriales fraccionados pueden proyectar resultados confiables utilizando apenas un subgrupo de los factores principales.

3. Experimentación secuencial: Es posible combinar los experimentos de dos o más factoriales fraccionados para ensamblar secuencialmente un diseño mucho mas grande que permita estimar los efectos de las interacciones de interés.

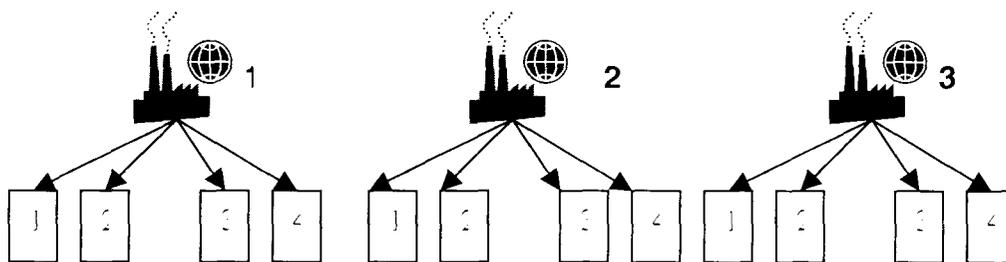
3.1.4 Diseños anidados y de parcelas divididas

1) Diseño de experimentos anidados

En ciertos experimentos, los niveles de un factor pueden ser similares aunque no idénticos a los niveles de otro, cuando se presenta este caso el tipo de experimento lleva el nombre de anidado o diseño jerárquico esto es cuando los niveles de un factor B están anidados a los niveles de un factor A.

Se pudiera ilustrar mejor el concepto de diseño anidado a través del siguiente ejemplo:

Proveedores



Lotes

Fig. 3.2 Esquema Diseño Anidado

Una compañía posee tres proveedores de un producto x (Figura 3.2), los mismos que han entregado cuatro lotes de materia prima y de cada lote se toman 3 muestras. A primera vista pudiera parecer que se trata de un simple experimento factorial, sin embargo si el mismo fuera factorial se asumiría que existiría un solo lote 1, un solo lote 2 y así sucesivamente, sin embargo la realidad es que existe un lote uno proveniente del proveedor uno, el cual no tiene ninguna conexión con el lote uno del proveedor dos de modo que no pueden considerarse uno solo y así sucesivamente, incluso si se desease ser aun más estricto sería recomendable reenumerar los lotes de modo que aquellos considerados 1,2,3 y 4 para el proveedor uno, se conviertan en 5,6,7 y 8 para el proveedor 2 y así sucesivamente de acuerdo con el número de proveedores que se utilizarán. De este modo los lotes deberían analizarse siempre a la luz del proveedor es decir del factor al cual se encuentren ligados. Una de las señales que más claramente nos indican si el diseño deberá ser anidado o factorial, viene dada por la posibilidad de

enumerar los factores de manera aleatoria, de poder hacerlo probablemente el experimento deberá tener un diseño de tipo anidado (Montgomery,2001).

2) Diseño de experimentos de parcelas divididas

En algunos experimentos factoriales es imposible colocar aleatoriamente el orden de las corridas, es en ese momento donde puede ser conveniente el diseño de experimentos de parcelas divididas. Al igual que en el caso anterior expondré un ejemplo para facilitar la comprensión.

Consideremos un fabricante de papel quien está interesado en evaluar la fuerza de tensión resultante luego de probar tres métodos de preparación de pulpa y cuatro diferentes temperaturas de cocción. En este caso el experimento factorial completo requiere de doce observaciones, si además el fabricante ha decidido realizar tres réplicas y por el momento únicamente es capaz de hacer una por día, le tomara tres realizar las pruebas totales.

Los experimentos se desarrollan diariamente de la siguiente manera: Un lote de pulpa es producido por uno de los tres métodos bajo estudio, luego dicho lote es dividido en cuatro muestras cada una de las cuales es cocinada a una de las cuatro temperaturas preestablecidas. Posteriormente el siguiente lote es producido de acuerdo al segundo método que se desea analizar, igualmente el lote es dividido en cuatro muestras las cuales son cocinadas a diferentes temperaturas. El proceso es repetido usando el último lote de pulpa tal como se lo hizo con los anteriores (Fig. 3.3).

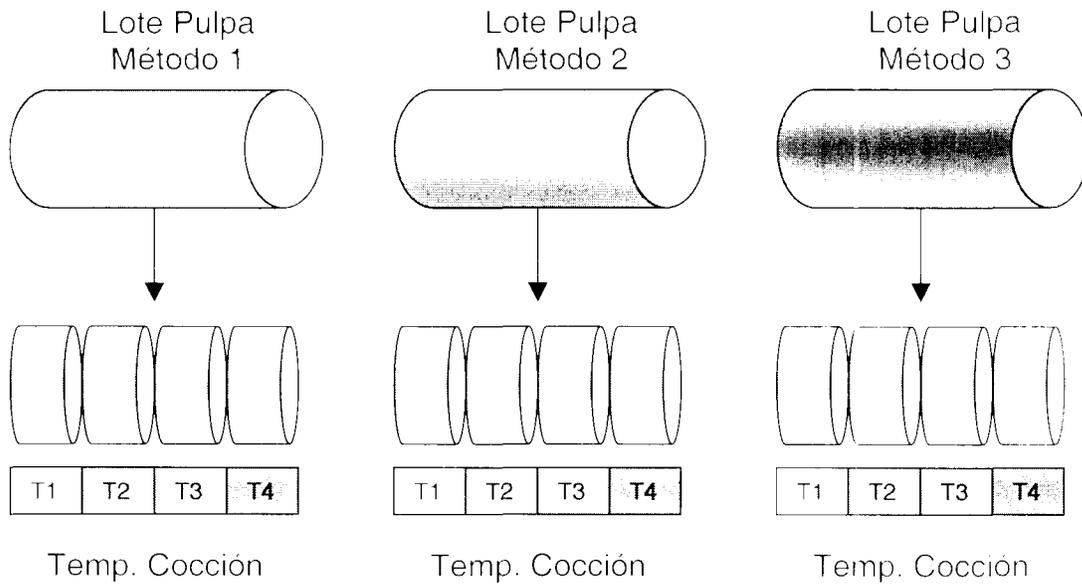


Fig. 3.3 Esquema Diseño Parcelas Divididas

Inicialmente podíamos haber considerado este caso como un experimento factorial general con tres niveles para el factor métodos de preparación y cuatro niveles para el factor temperatura (temperaturas de cocción) en un bloque aleatorio (días). De haberlo hecho el orden de experimentación dentro de cada replica o bloque (día) debía haber sido completamente aleatorio. Esto es, en cada uno de los tres días hubiera sido necesario seleccionar aleatoriamente 12 combinaciones originadas de los dos factores, método de preparación y temperatura, considerando sus tres y cuatro niveles respectivamente tal como se puede ver a continuación.

DIA 1		
1	METODO 3	T3
2	METODO 3	T1
3	METODO 1	T4
4	METODO 2	T2
5	METODO 2	T4
6	METODO 1	T2
7	METODO 3	T4
8	METODO 1	T4
9	METODO 2	T1
10	METODO 3	T2
11	METODO 1	T3
12	METODO 2	T3

Tabla 3.1 Ejemplo Programación de Experimento sin Parcelas

Sin embargo para el investigador esto hubiera sido complicado y costoso ya que involucraba elaborar 12 lotes de pulpa por día de manera independiente (36 en total), uno por cada experimento. En este caso por el contrario cada lote fue dividido en cuatro secciones para evaluar las temperaturas de cocción y por ende únicamente se emplearon nueve, tres por cada día en que se realizaron las réplicas

Este tipo de experimentos se conocen con el nombre de experimentos de parcelas divididas y presentan un excelente desempeño en situaciones similares a las descritas. En el ejemplo anterior el lote de pulpa fue dividido en tres partes, donde cada una de ellas toma el nombre de parcela y los métodos de preparación con que se elaboraron llevan el nombre de tratamientos principales. Cada una de estas parcelas a su vez es dividida en lo que se conoce con el nombre de sub-parcelas las cuales corresponderán a cada una de las temperaturas de cocción. Las temperaturas se conocen con el nombre de tratamientos de sub-parcela. Nótese que si existen otros factores no controlables y estos factores varían de un tipo de tratamiento de fabricación de pulpa a otro, como es el caso del ejemplo, cualquier efecto que produzcan en la variable de respuesta (fuerza de tensión), serán confundidos con el efecto de la preparación de la

pulpa. Por esta razón es conveniente considerar la mayoría de estos factores como tratamientos de sub-parcelas logrando así que los mismos no sean confundidos durante el proceso.

Con el fin de comprender mejor la analogía con respecto al lenguaje agrícola, propio de este tipo de experimentos, observemos la siguiente tabla.

Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3
Método 1	Método 2	Método 3
Temp. 1	Temp. 1	Temp. 1
Temp. 2	Temp. 2	Temp. 2
Temp. 3	Temp. 3	Temp. 3
Temp. 4	Temp. 4	Temp. 4

Tabla 3.2 Ejemplo Programación de Experimento con Parcelas

En la gráfica se puede observar que aunque se aplican los mismos cuatro niveles de temperatura para cada una de las parcelas (Métodos de preparación de pulpa) las conclusiones que se obtengan con respecto a ellas, deberán tomarse siempre considerando la parcela en la cual fueron probadas. De esta manera, podemos notar que el diseño de parcelas divididas puede ser visto como dos experimentos combinados o superpuestos. Uno de ellos experimenta con los factores principales mientras el otro simultaneo se aplica a las unidades experimentales más pequeñas, donde las conclusiones que se obtengan de estas últimas se encierran únicamente en el marco (parcelas) en el cual fueron obtenidas. Para mayor referencia (Montgomery, 2002)

Para concluir, El tipo de diseño seleccionado para la elaboración de este trabajo dependerá del grado de complejidad que el proceso presente y las restricciones que el mismo posea, de modo que los factores de investigación no se superpongan y las conclusiones se pierdan o confundan.

Capítulo IV

Diseño Experimental

4.1 Reconocimiento del Proceso y sus Restricciones

El proceso de tratamiento térmico, objeto de nuestro estudio, puede ser dividido para su análisis en dos operaciones importantes: Temple y Revenido.

a) Temple

La operación de temple tiene como fin elevar el nivel de dureza de las piezas luego del proceso de forja.

Desglosada en sus mínimas actividades se puede describir de la siguiente manera:

1. Colocación de las piezas vertederas sobre el contenedor, todas ellas ubicando la punta de la vertedera hacia la parte de arriba tal como se observa en la figura 4.1

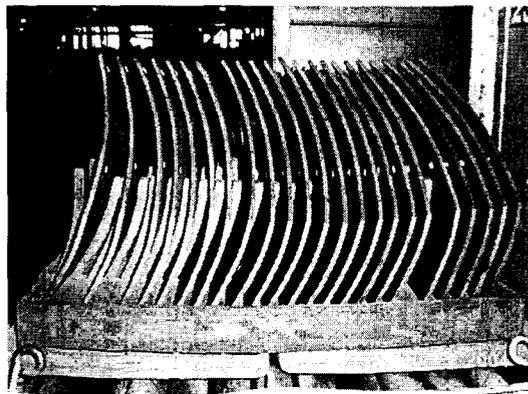


Fig. 4.1 Vertederas sobre el contenedor

2. Ingreso de carga de vertederas en el horno. Todas las vertederas ingresan al horno a una misma temperatura, es decir cada una de las vertederas sobre el contenedor debe ser sometida al mismo proceso de calentamiento (Fig. 4.2)

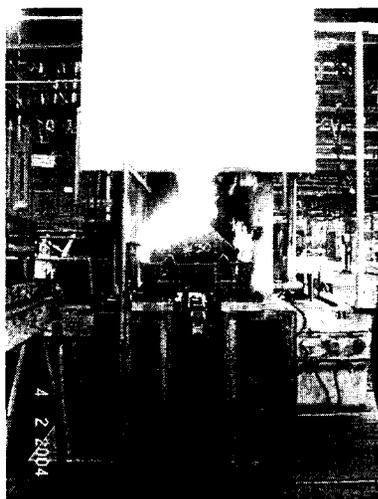


Fig. 4.2 Ingreso de vertederas en el horno

3. Enfriado en Aceite. Una vez transcurridos los 45 min. establecidos, periodo durante el cual la carga de vertederas ha sido calentada a una misma temperatura (843 C). El contenedor desciende a una piscina de aceite ubicada en la parte inferior del horno, todo esto sin que haya sido necesaria la salida previa de la carga de vertederas al exterior. Tal como se puede apreciar en la siguiente figura 4.3.

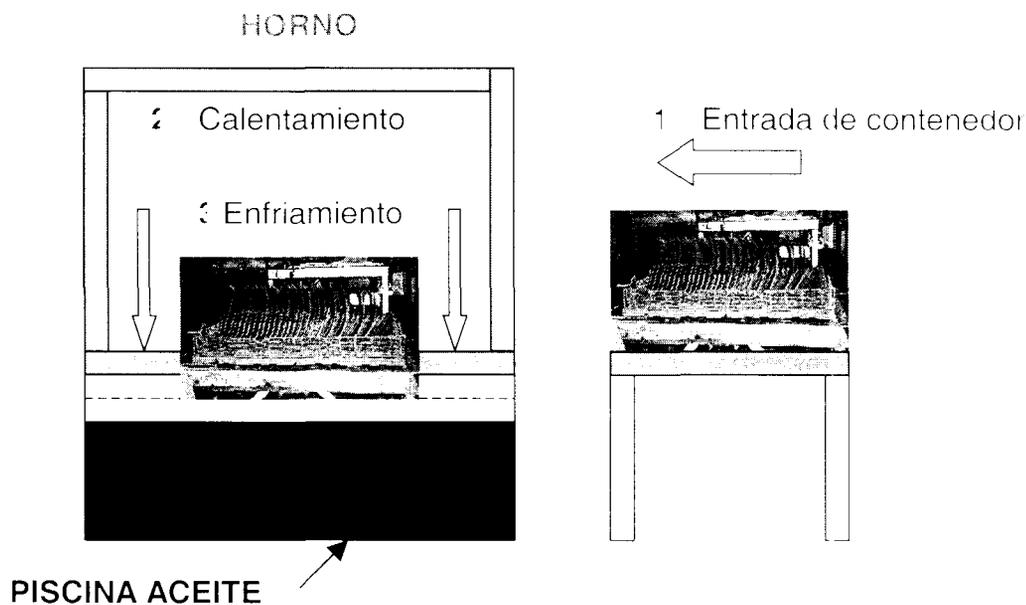


Fig. 4.3 Enfriado de vertederas en aceite

Es precisamente este cambio brusco de temperatura (horno 843 C- aceite 120 C), uno de los posibles factores que influyen en el nivel de deformación.

La operación de enfriado en aceite es la actividad más restrictiva dentro de nuestro proceso ya que no existe manera de separar las vertederas calentadas de modo que ciertas piezas puedan ser enfriadas a una temperatura u otra. Al momento de determinar el diseño experimental esta restricción será clave en la selección.

b) Revenido

La segunda de las dos operaciones que conforman el proceso de tratamiento térmico es el revenido, la misma tiene como objetivo reducir el exceso de dureza y las tensiones internas de la pieza presentes luego de que al salir del calentamiento el promedio por pieza es de 600 Bhn., un valor de dureza alto si consideramos que la especificación para las vertederas va de 310 Bhn a 350 Bhn.

En el revenido las vertederas son introducidas en otro horno a una temperatura de 528°C por una hora, cabe indicar que hasta este momento las piezas no han sido descargadas ni movidas de su contenedor original tal como puede observarse a continuación.

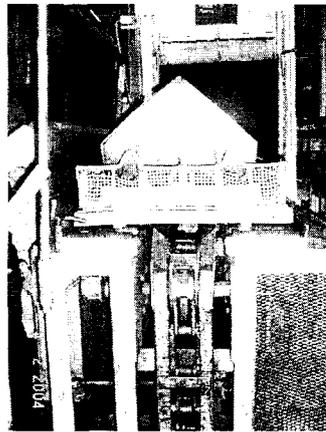


Fig. 4.4 Ingreso de vertederas a revenido

La operación de revenido además de reducir el promedio de dureza en toda la carga tiene como característica particular reducir la variación entre los valores individuales de dureza en las vertederas. es decir la dureza entre cada pieza luego de revenido es muy similar, lo cual contrasta con las grandes diferencias encontradas en las vertederas solo después de la operación de temple.

4.1.1 Restricciones y observaciones importantes sobre el Proceso

Luego de este análisis descriptivo más detallado podemos establecer como restricciones del proceso de tratamiento térmico las siguientes:

- Es imposible realizar experimentos completamente aleatorios en la operación de calentamiento, ya que todas las piezas una vez calentadas deberán ingresar a una sola temperatura en la piscina de aceite sin que técnicamente sea posible lograr que ciertas piezas puedan ser enfriadas a una u otra temperatura, ya que existe una sola piscina y esta se encuentra en la parte inferior del horno. Esto podría ser posible si al menos existieran dos piscinas por horno y además se contara con un sistema que permitiera separar (sin salir del horno) las piezas a ser enfriadas a las diferentes temperaturas de aceite.
- Otra manera en que pudieran realizarse experimentos completamente aleatorios dependería de la posibilidad de realizar muchos de estos, de modo que en cada carga se probaran las diferentes combinaciones entre los factores que se establezcan en el estudio como importantes y el factor temperatura de aceite (Diseño factorial general). Esto sin embargo es económicamente infactible debido al alto costo del proceso de tratamiento térmico y a las limitaciones de producción en el número de vertederas, ya que de esta manera en cada prueba sería necesario desarrollar todo el proceso de tratamiento térmico con los costos que esto representa por el uso de equipos, materia prima y combustibles, mientras que si consideramos la restricción del aceite en nuestro diseño podría ser posible reducir significativamente el valor ya de por si alto de las pruebas.
- El contenedor actualmente utilizado no es homogéneo, posee apoyos (nombre con el cual se llama a los pedazos de metal soldado y sobre los cuales descansa la vertedera) de diferente longitud, tal como se puede apreciar en la fotografía inferior. Esto puede considerarse una restricción ya que actualmente la planta solo cuenta con contenedores con este diseño.

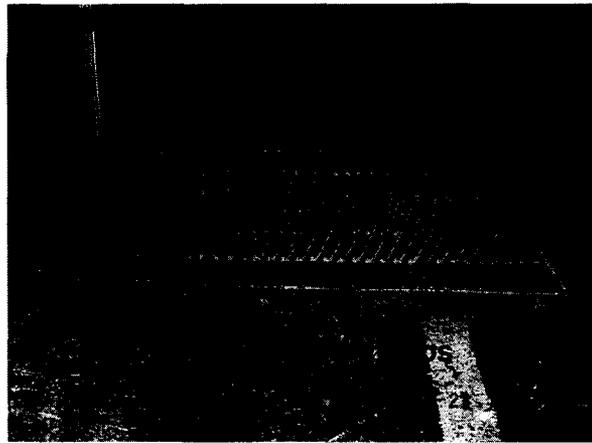


Fig. 4.5 Apoyos de contenedor para vertederas

- Previo el tratamiento térmico las vertederas pasan por una operación de Pre-calibrado, la misma inspecciona que luego de la forja las piezas obtengan la forma correcta a través de una matriz de ensamble, tal como se lo hace en la posterior operación de calibrado. Es importante considerar dentro de nuestro análisis la permanencia o no, de esta operación de tipo preventiva.
- A pesar de que es la operación de calentamiento la que en primera instancia le da a las vertederas dureza, es la de revenido la que regula la variación y el valor medio permanente de estas. Puesto que la dureza esta relacionada con la ductilidad, es decir con la propiedad que indica si la pieza es fácilmente modelable o no, considero importante incluir dentro del diseño del experimento la dureza de la pieza luego de revenido.

4.2 Establecimiento de factores y niveles

Para la obtención de los factores de estudio se empleó la metodología Seis Sigma la cual permite reducir el número de variables posibles de influencia a través de un proceso metódico de valoración.

4.2.1 Establecimiento de variable de respuesta

Aunque la varianza entre puntos de comparación de la vertedera antes y luego del tratamiento térmico permiten cuantificar la deformación, es el tiempo que le toma al operario calibrar la pieza, la variable que de mejor manera nos brinda información acerca del desempeño del proceso, puesto que ilustra práctica y claramente que tan

bien las piezas se encuentran en su forma luego de finalizar el proceso de tratamiento térmico.

El tiempo como variable de respuesta conjuga además cualquier efecto que aunque no considerado dentro del análisis podría afectar la calibración y por ende la calidad de la pieza luego del calentamiento.

Adicionalmente el tiempo refleja el costo por hora hombre y por empleo de equipo que se ocupa en calibrar una pieza, ya que fácilmente puede ser transformado en unidades monetarias, además nos da una idea de cuanto tiempo tendrá que esperar en promedio la línea de producción con el fin de corregir las piezas tratadas térmicamente, algo crítico si consideramos que la compañía en que se produce la pieza trabaja con el sistema Just in Time.

4.2.2 Análisis del Proceso

Con el fin de establecer los factores que pudieran estudiarse a través del diseño de un experimento se analizó el proceso a nivel macro como se observa a continuación, a través del uso de un macromapa de proceso.

MACROMAPA DEL PROCESO

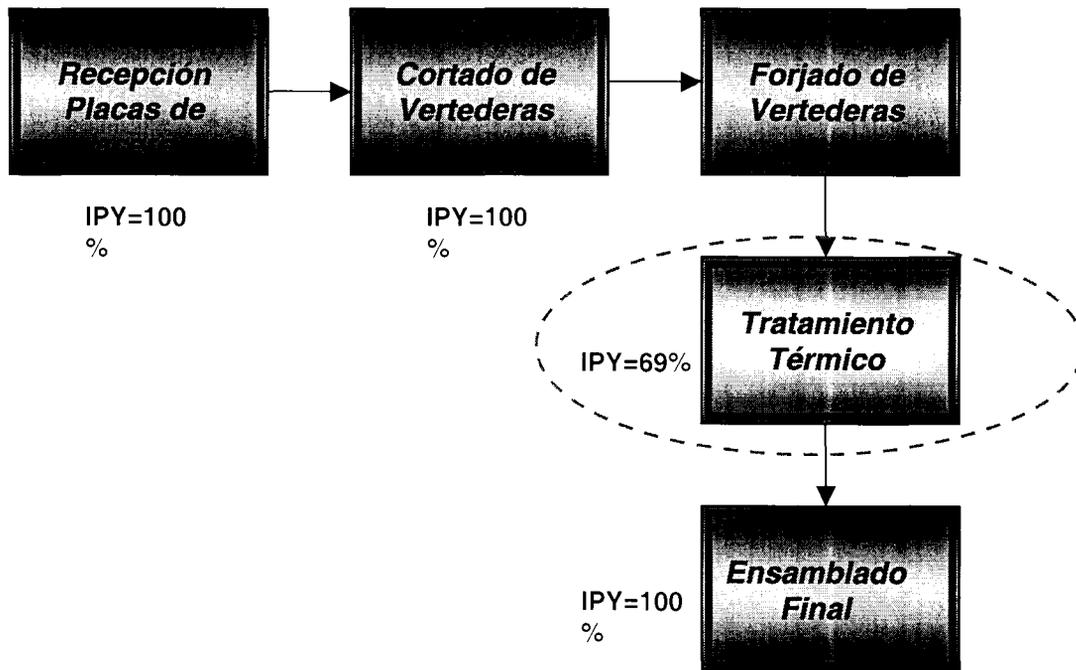


FIG. 4.6 Macromapa del Proceso

En cada una de las macroetapas se puede observar un valor IPY el cual es un indicador del proceso que representa la probabilidad de que en el mismo se genere un producto sin rechazo (scrap) o fallas, se nota que es en la etapa de tratamiento térmico donde existe un alarmantemente bajo nivel de IPY del 69 por ciento. Lo cual nos indica que existe apenas un 69% de probabilidad de que una pieza pase por dicho proceso, sin que exista en ella retrabado, defecto u obviamente rechazo. En el caso de que en el producto no se generen rechazos o re-trabajo el IPY será del 100%, los cálculos para la obtención del IPY en el tratamiento térmico pueden verse a continuación.

El IPY de acuerdo a la metodología seis sigma puede calcularse empleando la fórmula.

$$IPY_{fin} = e^{-DFU}$$

Tipos de defectos	Piezas	DPU	IPY _π	IPY _π
Piezas Rechazadas / reprocesadas	548 piezas	548/1500	$e^{-0.365}$	69%

Tabla Número de piezas rechazadas considerando una producción de 1500

Luego de establecer el tratamiento térmico como la etapa crítica dentro del proceso de fabricación de la vertedera, por su bajo nivel de IPY, se procedió a elaborar un estudio mucho más detallado de ésta, lo cual se logró a través de flujos y mapas detallados del proceso que pueden observarse a continuación.

FLUJO DETALLADO PROCESO

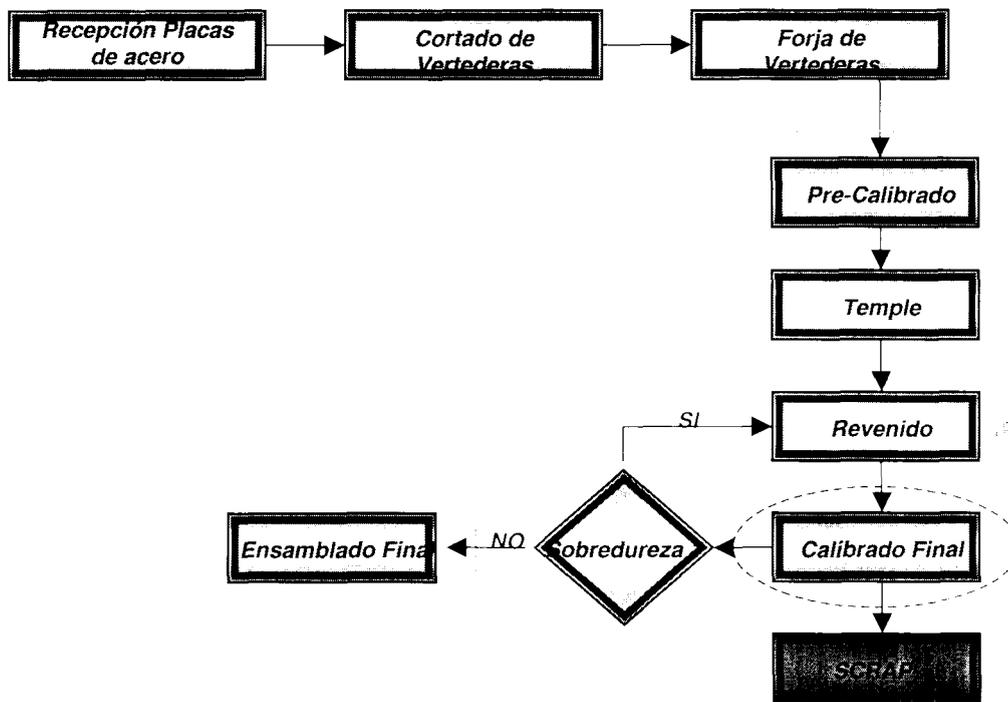


FIG. 4.7 Flujo detallado del Proceso

El flujo detallado presenta cada una de las etapas involucradas dentro del proceso de Temple y muestra de manera más clara el origen de los defectos.

Con el fin de identificar precisamente estos, se empleó un mapa detallado y una matriz causa efecto que pueden verse en la figura 4-8 y 4-9. Como se puede observar en la figura 4_8 cada uno de los pasos involucrados en el proceso posee un grupo de entradas que en nuestro caso son los posibles factores a investigar (temperaturas, dureza, contenedor, etc). Con el fin de evaluar la significancia de estos factores se procedió a emplear una matriz de causa-efecto, la cual evaluará la relación existente entre cada uno de ellos y la variable de respuesta tiempo de calibrado final. En la matriz causa efecto un valor de cero implicará ninguna relación entre el factor y la variable de respuesta, 1 una relación baja, 3 una relación de nivel medio y 9 implicará una gran relación entre el factor analizado y la variable de respuesta tiempo de calibración final.

Pasos del Proceso	VA/NVA	Entradas Salidas	Tipo ES	Especificaciones	C/N	Capacidad	Equipo
Pre-Calibrado	NVA	Forma Vertedera Formada	Entrada		N	IPY = 100%	Prensa 100 Ton
		Operario	Entrada		C		
		Diseño del Simulador de Ensamble	Entrada		C		
		Diseño de la vertedera	Entrada		C		
		Sistema de evaluación	Entrada				
		Prensa	Entrada		C		
		Herramental	Entrada		C		
Vertedera Corregida	Salida						
Temple	VA	Temperatura Horno	Entrada	843°C	C	IPY = 100%	Horno
		Tiempo de Horneado	Entrada	45 min.	C		
		Habilidad del operario del horno	Entrada				
		Contenedor	Entrada		C		
		Temperatura de Aceite de Enfriado	Entrada	100°C-120°C	C		
Vertedera Endurecida (Exceso)	Salida						
Revenido	VA	Temperatura Horno Revenido	Entrada	538°C	C	IPY=69%	Horno
		Habilidad del Operario de Revenido					
		Tiempo de Horneado Revenido	Entrada	60 min.	C		
		Vertedera dureza reducida	Salida				
Calibrado Final	NVA	Dureza de la vertedera	Entrada	310-350 Bhn		IPY=100%	Prensa 100 Ton
		Prensa	Entrada		C		
		Herramental	Entrada		C		
		Operario	Entrada		C		
		Vertedera lista para ensamble	Salida				

FIG. 4.8 Mapa detallado del Proceso

Proceso	Prioridad	Fragilidad de la Pieza (Sobre-Dureza)		Tiempo de Calibrado Final	Total
		10	8		
Pre-calibrado	Forma Vertedera Formada	0	9		72
	Diseño Simulador Ensamble	0	3		24
	Diseño de la Vertedera	0	3		24
	Sistema de Evlución	0	1		8
	Operario	0	0		0
	Prensa	0	0		0
	Herramental	0	0		0
Temple	Temperatura Horno	9	0		90
	Tiempo de Horneado	9	0		90
	Habilidad del Operario del Horno	0	0		0
	Contenedor	3	3		54
	Temperatura de Aceite de Enfriado	9	9		162
Revenido	Temperatura Horno Revenido	9	3		114
	Habilidad del Operario de Revenido	0	0		0
	Tiempo de Horneado Revenido	9	3		114
Calibrado Final	Dureza de la vertedera	0	9		72
	Prensa	0	0		0
	Herramental	0	0		0
	Operario	0	0		0

Fig. 4.9 Matriz Causa Efecto

De acuerdo a esta matriz y seleccionando únicamente los factores que poseen valores Totales de relación mayores o iguales a 50, obtenemos como posibles factores de análisis:

Temperatura de aceite de enfriado: La temperatura de aceite a la cual las vertederas son enfriadas determinará el choque térmico al que las piezas estarán sometidas, por tanto un cambio en la temperatura puede ser importante analizar.

Forma Vertedera: Esta factor podría ser estudiado considerando las vertederas que pasan o no por el proceso de pre-calibración, y analizando las características de diseño y forma con que llegan las piezas a la operación de calibración.

Contenedor: Las diferencias en el objeto que contiene las vertederas al entrar al temple podría tener influencia en la deformación y por ende en el tiempo de calibrado.

Dureza de la vertedera: La Dureza con la cual el operario recibe la pieza al momento de calibrar es un factor importante de considerar dentro de la experimentación.

Es importante indicar que aunque el factor Operario tuvo un valor de correlación de 3 no se considerará en el análisis puesto que durante todas las etapas del tratamiento térmico se emplea permanentemente el mismo individuo.

Cada uno de los factores seleccionados son analizados con mayor detenimiento a continuación:

Factor 1

Temperatura del aceite en el cual son enfriadas las vertederas: Al final del proceso de temple, primera operación del tratamiento térmico, las vertederas deben ser enfriadas en una piscina de aceite, lo cual somete a la pieza a un fuerte choque térmico por la gran variación de temperatura a la cual se ven sometidas en un periodo corto de tiempo (843°C-120°C). Esto posiblemente puede influir en la deformación de la pieza.

Niveles Temperatura del aceite: Actualmente el nivel de temperatura empleado es de 100°C, puesto que de alguna manera se intenta reducir el choque térmico se decidió probar con un incremento en la temperatura de 20°C. De esta manera los niveles para la temperatura del aceite quedan de la siguiente forma.

- **Nivel Bajo** 100°C
- **Nivel Alto** 120°C

Factor 2

Precalibrado (Forma de vertedera): La operación anterior al calentamiento, con el nombre de pre-calibrado, tiene como objetivo evitar que vertederas con defectos en su forma ,originados desde la forja, mantengan sus imperfecciones durante el tratamiento térmico. Al ser ésta una operación de tipo preventiva, se consideró importante evaluarla durante los experimentos con el fin de determinar si la misma influía o no en el desempeño del proceso, y por tanto debía o no mantenerse dentro del flujo de operaciones establecidos.

Niveles Precalibrado: Aunque numéricamente no se puede determinar un nivel bajo y alto para este factor, cualitativamente se puede establecer como:

- **Nivel Bajo:** Piezas no Precalibradas (NOP)
- **Nivel Alto:** Piezas Pre-Calibradas (Precal)

Factor 3

Tamaño de los Apoyos del Contenedor: Como se puede observar en la sección 4.1.1 el contenedor donde se colocan las vertederas no posee apoyos con igual longitud, recordemos que apoyo se definió como los pedazos de metal soldado sobre los cuales descansa la vertedera. Debido a esto la carga no se distribuye de igual manera para todas las piezas dentro del contenedor y por tanto podría ser un factor influyente en el desempeño uniforme del proceso.

Niveles: Se consideraron para los apoyos, niveles cualitativos como son

- **Nivel bajo:** Apoyos de contenedor chico (C)
- **Nivel Alto:** Apoyos de contenedor grande (G)

Factor 4

Dureza de la vertedera luego de revenido: Aunque la dureza de la pieza originada a través del proceso de tratamiento térmico no influye de manera directa en la deformación del metal, si lo hace con respecto al tiempo y esfuerzo que le toma al operario corregir los defectos en el calibrado, ya que es ésta dureza (luego de revenido) la que tendrá la pieza durante la operación correctiva.

Niveles: Al ser la dureza de las vertederas una variable, que aunque influyente en el desempeño general del proceso no puede ser directamente controlada, se consideró más apropiado establecerla como una co-variable, lo que implica un análisis de co-varianza que es el analizar de manera separada la forma en que cierta variable no controlable puede influir en la variable de respuesta, sin que necesariamente exista manera de establecerla en un valor determinado.

En este caso será necesario en el desarrollo del experimento medir la dureza luego de revenido para cada una de las vertederas que se incluirán en la prueba, ya que una co-variable debe ser medida a la par de la variable de respuesta para cada pieza objeto de estudio.

Factor 5

Desviación estándar en Puntos Co-lineales (Forma Vertedera): Durante el análisis del proceso de tratamiento térmico y junto con los encargados del mismo, se observó que al momento de realizar la operación de calibrado el mayor problema se originaba en las diferencias que existían en los puntos co-lineales de las vertederas. Esta diferencia puede observarse de mejor manera en la figura inferior (Fig. 4.10) donde podemos ver una vertedera en la que se han trazado líneas imaginarias, sobre cada una de las cuales recaen tres puntos co-lineales. Si tuviéramos la posibilidad de poder observar a simple vista las diferencias que existen entre estos tres puntos a través de un corte transversal, podríamos distinguir algo similar a lo que se observa en la figura contigua a la de la vertedera.

Como se puede apreciar en la figura 4.10, hay una diferencia entre las alturas de cada uno de los puntos co-lineales. Estas alturas obviamente requieren de un marco de referencia que debe ser establecido por quien desarrolle las mediciones, en este caso fue una superficie plana ubicada en la parte inferior de la pieza.

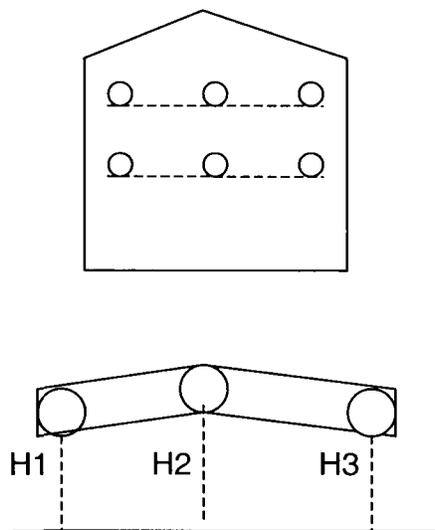


Fig. 4.10 Esquema desviación en puntos co-lineales

Son precisamente estas diferencias en las alturas de los puntos co-lineales las que provocan que en ciertas ocasiones la operación de calibrado se extienda por más tiempo. Con el fin de medir esta variación se consideró adecuado utilizar la desviación

estándar, puesto que nos permitía conocer que tanta diferencia existía entre las alturas. Una mayor desviación mostraba que las diferencias y por ende la deformación en esa sección de la pieza era superior a otra con una desviación menor, vale aclarar que la desviación estándar no es más que un indicador que muestra de que forma se distribuyen los puntos co-lineales y no una medida exacta.

Con el fin de obtener estas mediciones para toda la pieza, fue necesario establecer sobre ella un total de 4 líneas imaginarias cada una conformada por tres puntos co-lineales, además de un punto adicional ubicado en la punta de la vertedera tal como se puede observar en la figura inferior.

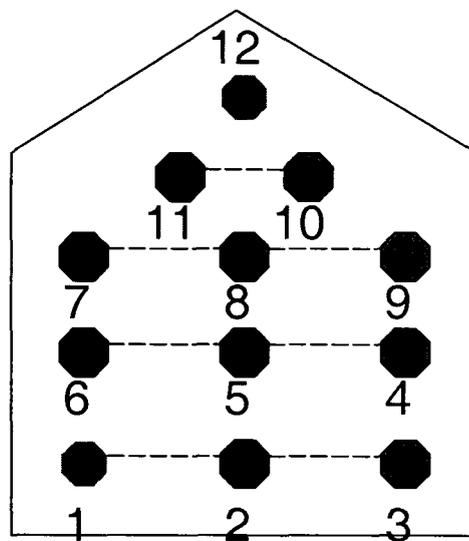


Fig. 4.11 Esquema puntos de medición sobre vertederas

Posteriormente se estableció una línea de referencia con el fin de medir la altura que existía entre dicha línea y cada uno de los puntos antes señalados. La línea de referencia en cuestión fue una mesa de trazo sobre la cual se asentaban las vertederas y donde se realizaba la medición, tal como se puede observar a continuación.

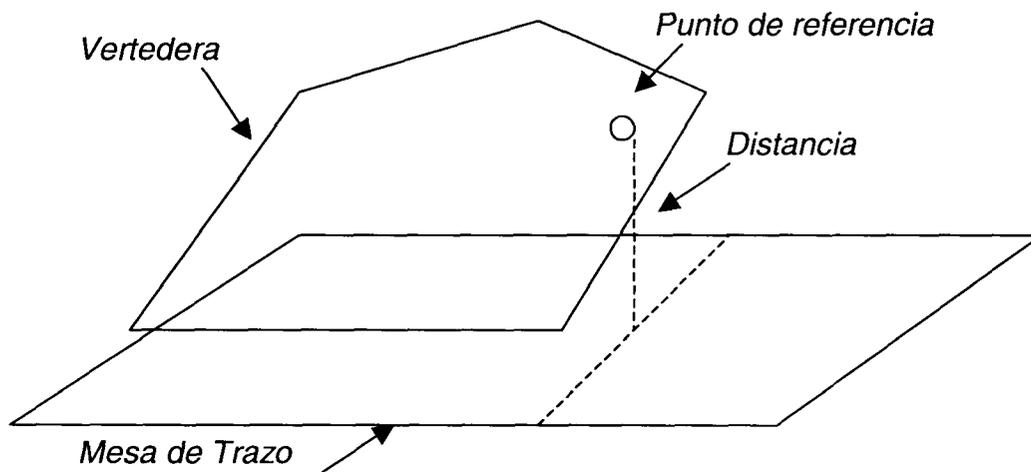


Fig. 4.12 Diagrama método de medición en vertederas

Las vertederas todas ellas sin tratamiento térmico eran medidas empleando una máquina de medición por coordenadas (Fig. 4.13) la cual registraba la ubicación exacta del punto de medición. Este equipo brindaba la altura que existía entre la línea de referencia, en este caso la mesa de trazo y cada uno de los doce puntos establecidos. De esta forma fueron medidas las piezas tanto antes como después del tratamiento térmico, lo cual nos proveyó de una información valiosa sobre la manera en que las piezas cambiaban debido al proceso de temple, esto solo fue posible gracias a que el equipo permitía que la medición que se realizaba antes del tratamiento térmico sea repetida exactamente sobre el mismo punto (coordenada) luego del proceso de tratamiento térmico.

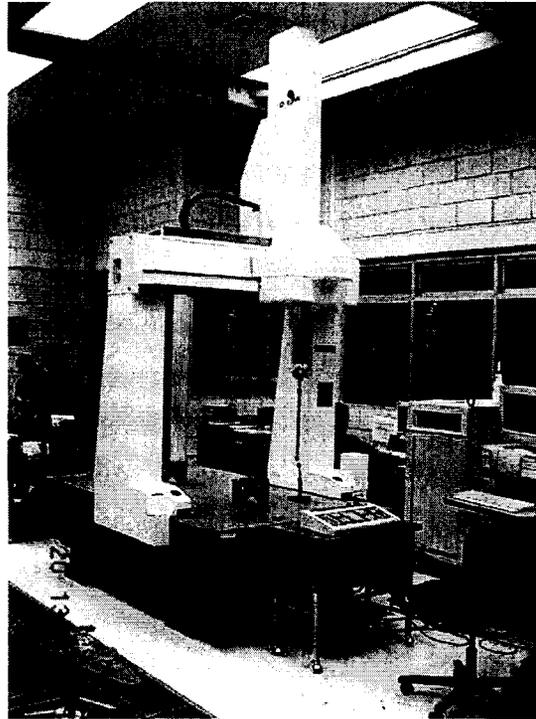


Fig. 4.13 Máquina de Medición por coordenadas

Un ejemplo de la forma de recopilación de datos puede ser observado a continuación, en la tabla siguiente es posible incluso determinar a simple vista los puntos donde aparentemente, luego del proceso de tratamiento térmico se produjo una mayor variación.

VERTEDERA 1			
Punto	ANTES	DESPUES	Diferencia
1	27.079	26.552	0.527
2	26.05	24.19	1.86
3	28.312	27.255	1.057
4	58.251	55.447	2.804
5	57.338	55.106	2.232
6	57.967	56.635	1.332
7	68.5	66.211	2.289
8	67.743	66.178	1.565
9	68.141	63.494	4.647
10	57.058	54.955	2.103
11	56.805	55.666	1.139
12	33.831	33.74	0.091

Tabla 4.1 Ejemplo medición puntos de control en vertederas

Aunque la información provista por las mediciones de los doce puntos de la vertedera permiten realizar múltiples pruebas y desarrollar análisis de muchos tipos, por el momento nos centraremos en la desviación estándar de las alturas de los puntos co-lineales, de las vertederas que ya han pasado por el tratamiento térmico.

Para ellos se emplearán los datos obtenidos en las mediciones y la fórmula de varianza común.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n(n-1)}$$

La desviación estándar por tanto será igual a la raíz cuadrada de los valores que se obtengan luego de aplicar la fórmula arriba mencionada.

Niveles

El factor desviación estándar de los puntos co-lineales de las vertederas que han pasado por el tratamiento térmico, será tratado de igual modo como se trató la dureza luego de revenido, es decir como una co-variable. Por esta razón es necesario que la desviación para cada una de las 4 líneas establecidas en la vertedera sea medida para todas las piezas en estudio luego de que estas hayan salido del tratamiento térmico. De este modo cada vertedera poseerá cuatro medidas de variación que son las siguientes.

- Desviación estándar puntos co-lineales 1-3
- Desviación estándar puntos co-lineales 4-6
- Desviación estándar puntos co-lineales 7-9
- Desviación estándar puntos co-lineales 10-11

4.3 Selección del Diseño Experimental

Con el fin de seleccionar el diseño experimental adecuado se consideraron los requerimientos de cada tipo de diseño (Factorial, Factorial Fraccionado, Anidado y Parcelas Divididas).

Tipo de Experimento	Requerimientos del Diseño		
	Aleatoriedad en corridas	Factores NO iguales	Alto número réplicas
<i>Factorial</i>	SI	NO	SI
<i>Factorial Fraccionado</i>	SI	NO	NO
<i>Anidado</i>	NO	SI	NO
<i>Parcelas Divididas</i>	NO	NO	NO

Tabla 4.2 Requerimientos del Diseño

Y se compararon contra las condiciones del proceso obtenidas luego de la etapa de observación y reconocimiento que pudo detallarse en la sección 4.1.

Condiciones del Proceso	Efecto
Restricción de Aleatoriedad	NO Aleaoriedad en Corrida
Factores idénticos	Todos los factores son iguales
Costo alto de experimentación	Número de réplicas limitado

Tabla 4.3 Condiciones del Proceso

Si observamos la columna de efecto de la tabla 4.2 podemos notar que las condiciones actuales del proceso implican.

- Dificultad técnica para alcanzar aleatoriedad en las corridas.
- Factores de análisis iguales y No sólo similares.
- Un número de réplicas posibles limitado.

Si esto a su vez lo comparamos con la tabla 4.1 de requerimientos del Diseño podemos darnos cuenta que el diseño de tipo Parcelas Divididas es el único que satisface en toda su extensión las condiciones impuestas por el proceso. Cabe indicar que la condición más fuerte que llevó a seleccionar este diseño es la dificultad de lograr aleatoriedad en todas las corridas, esto se produce especialmente debido a que la temperatura del aceite para el enfriado de las vertederas es un factor difícil de cambiar para cada prueba, por lo tanto el desarrollar experimentos donde se requiera que este varíe aleatoriamente junto con los demás factores (precalibrado y apoyos) es técnica y

financieramente infactible. Es decir experimentos factoriales de cualquier tipo, incluyendo los fraccionados, son descartados totalmente como posibles elecciones de diseños experimentales por esta condición.

A continuación se desarrolla un gráfico que ilustra la forma en que se realizará el experimento, considerando un diseño de parcelas divididas.

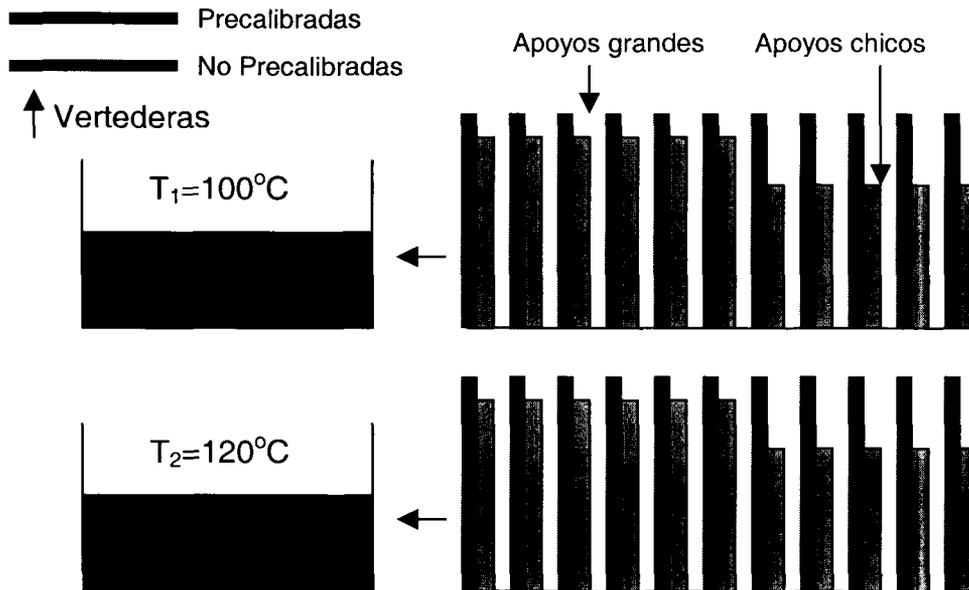


Fig. 4.14 Diagrama Desarrollo de pruebas experimentales

En el gráfico se puede observar una carga simulada de vertederas en un contenedor donde tanto las piezas precalibradas como no precalibradas son asignadas en los apoyos grandes y chicos de manera aleatoria, sin embargo cada contenedor es enfriado a una temperatura de aceite establecida como fija, la cual puede ser variada únicamente para una carga completa.

Si observamos el esquema y lo comparamos con la descripción del Diseño Split Plot o de Parcelas Dividida en la sección 3.1.4, veremos que la similitudes son bastantes grandes ya que en este caso existe un factor que muy difícilmente puede ser variado como es el caso de la temperatura del aceite y encontramos un par de factores (apoyos, pre-calibración), los cuales no poseen ninguna restricción con respecto a su

aleatoriedad y que pueden ser analizados dentro del factor definido como restrictivo. Esto confirma que se realizó una elección adecuada con respecto al tipo de diseño.

Empleando la terminología propia de los diseños de parcelas divididas, el factor temperatura de aceite será llamado whole plot o main treatment (Parcela), dentro del cual se ubicarán de manera aleatorias dos factores que tomaran el nombre de subplot treatments o subparcelas (Montgomery,2001). Ya que no existe ninguna restricción para lograr aleatoriedad en estos últimos dos factores, pueden analizarse a través de un experimento factorial 2^2 .

Con el fin de ilustrar de manera más clara el diseño se desarrolló el siguiente esquema.

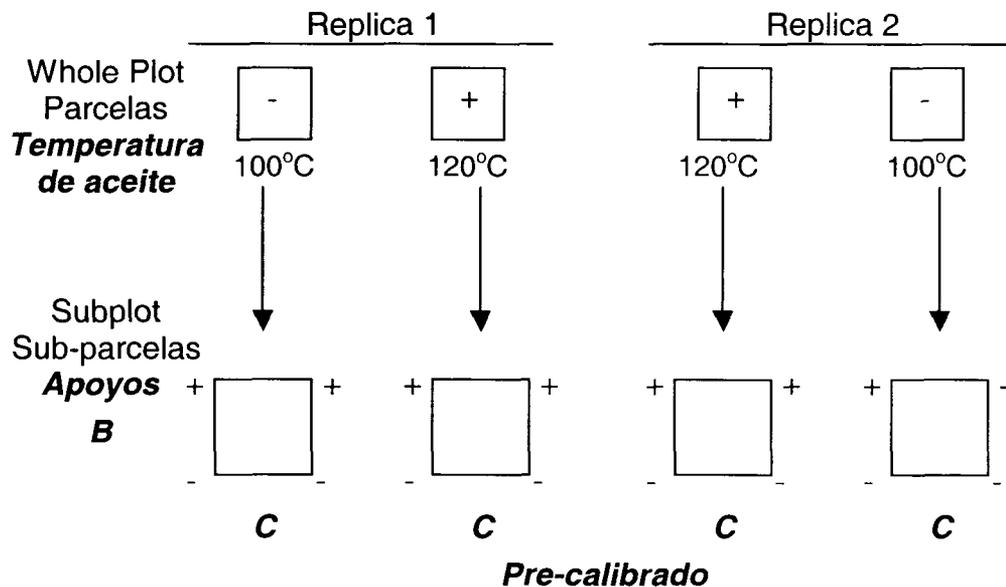


Fig. 4.15 Diagrama Diseño Experimental

En este diseño como se ve en la parte superior, existe un factor que posee niveles muy difíciles de variar a lo largo del experimento (temperatura de aceite), lo cual es una restricción en cuanto a su aleatoriedad, sin embargo se presentan factores sin ninguna restricción como son el orden de las piezas pre-calibradas y no pre-calibradas y la ocupación de los apoyos chicos o grandes. De este modo el diseño constará de dos parcelas que contienen dentro de si cada una cuatro sub-parcelas que son resultado de

un experimento factorial 2^2 originado por los factores Apoyos y Precalibrado, cabe indicar que este último experimento si será realizado con total aleatoriedad.

El modelo para este experimento puede ser expresado a través de la siguiente ecuación:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \theta_{ij} + \gamma_k + \delta_l + (\gamma\delta)_{kl} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + \varepsilon_{ijkl}$$

$i = 1,2$

$j = 1,2$

$k = 1,2$

$l = 1,2$

Donde:

τ = Representa las réplicas

β = Representa el efecto principal de la parcela (temperatura de aceite)

θ = Representa el error de la parcela

γ = Representa el efecto principal de la sub-parcela (Apoyos)

δ = Representa el efecto principal e la sub-parcela (Pre-calibración)

ε = Representa el error de la sub-parcela

De esta manera el modelo expresado en sus factores quedará de la siguiente manera:

Modelo

Réplica	Temperatura	Réplica*Temperatura	Apoyos	Precalibrado
	Temperatura*Precalibrado		Temperatura*Apoyos	Apoyos*Precalibrado
				Temperatura*Apoyos*Precalibrado

En el paquete estadístico será necesario identificar como único factor aleatorio a las réplicas.

Adicionalmente al modelo se le agregarán las cinco co-variables definidas en la sección 4.2 las mismas que son.

- Dureza luego de revenido
- Desviación estándar final puntos 1-3
- Desviación estándar final puntos 4-6
- Desviación estándar final puntos 7-9
- Desviación estándar final puntos 10-11

Todas las desviaciones serán medidas luego de que las vertederas hayan pasado por el tratamiento térmico.

4.4 Desarrollo del Experimento

El experimento que se desarrolló en resumen considera los siguientes aspectos:

- **Variable de Respuesta:** Tiempo de Calibración
- **Factores:** Temperatura de aceite, Pre-calibración, Apoyos del contenedor
- **Co-variables:** Desviación de puntos co-lineales, Dureza luego de revenido
- **Número de réplicas:** 2
- **Tipo de Diseño:** Parcelas Divididas (Split Plot)

Para la realización de los experimentos en cuestión se llevaron a cabo los siguientes pasos:

Paso 1

Selección de vertederas

La empresa proveyó 32 piezas vertederas recién forjadas, todas ellas del mismo lote de acero, las cuales fueron seleccionadas aleatoriamente de un lote de aproximadamente 200 piezas en total. Todas las vertederas habían sido forjadas empleando el mismo equipo y operario.

Paso 2

Pre-calibración

De las 32 vertederas, 16 de ellas fueron seleccionadas aleatoriamente para ser pre-calibradas, esto con el fin de realizar pruebas considerando el factor Pre-calibrado. Las otras 16 piezas fueron dispuestas de modo que pasen por el tratamiento térmico sin haber recibido ningún tipo de modificación en su forma luego de la forja.

Paso 3**Numeración de Piezas**

Tanto las piezas precalibradas como las no precalibradas fueron numeradas, las no precalibradas llevan la numeración que va desde el 1 al 16, mientras que las piezas calibradas llevan marcados los números del 17 al 32. El marcado se hizo utilizando moldes numéricos y una prensa hidráulica, de modo que la marca sobre el acero fuera indeleble.

Paso 4**Medición de puntos sobre las vertederas**

Cada una de las vertederas, tanto pre-calibradas como no pre-calibradas son ingresadas al departamento de metrología donde empleando una máquina de medición por coordenadas son medidas en 12 puntos previamente establecidos.

Esta información será ampliamente utilizada en el análisis estadístico de datos ,ya que estas medidas nos proporcionan una información valiosa acerca de la forma de las vertederas previo el tratamiento térmico.

Paso 5**Diseño de la prueba**

Como se explicó en la sección anterior, el experimento será desarrollado tomando en cuenta un diseño de parcelas divididas donde el factor parcela es la temperatura del aceite, por esta razón cada ingreso de un contenedor en el horno estará relacionado exclusivamente con una temperatura de aceite establecida. Ya que un experimento completo deberá considerar los dos niveles de temperatura (100°C,120°C), será necesaria la carga de dos contenedores con el fin de completar una prueba. El tiempo que toma llevar a cabo una prueba completa (2 cargas), es de un día de trabajo por esto la réplica del experimento deberá ser desarrollada en un día diferente.

En total se llevarán a cabo cuatro tratamientos térmicos, dos cada día cada uno de ellos considerando una temperatura de enfriado de aceite de 100°C y 120°C.

Paso 6**Ubicación de Piezas en Contenedores**

Con el fin de eliminar cualquier influencia originada por el uso de equipos diferentes, cada una de las cuatro cargas emplearán el mismo contenedor, por esto la vertederas serán colocadas sobre el contenedor justamente antes de ingresar en el horno.

Es necesario indicar que aunque los contenedores tienen suficiente espacio para albergar hasta un total de 34 vertederas, en cada carga solamente 8 de ellas pertenecerán a nuestras pruebas, 4 ubicadas en apoyos grandes y 4 en apoyos chicos, de cada juego de 4 vertederas 2 son precalibradas y 2 sin calibrar, de ese modo en cada carga se encontrarán todas las posibles combinaciones entre el factor precalibrado y apoyos. Esto se puede apreciar de mejor modo en la siguiente tabla.

CARGA DE VERTEDERAS EN CONTENEDOR

Apoyo Grande	No Precalibradas	2 Vertederas
Apoyo Chico	Precalibradas	2 Vertederas
Apoyo Grande	Precalibradas	2 Vertederas
Apoyo Chico	No Precalibradas	2 Vertederas
Total de vertederas por contenedor		8 Vertederas

Tabla 4.4 Esquema Carga de vertederas en Contenedor

Si se observa la tabla superior podemos darnos cuenta que en cada contenedor se encontrarán las combinaciones completas del diseño factorial 2^2 , desarrollado entre los factores Apoyos y Pre-calibrado.

La manera en que las vertederas son colocadas en el contenedor, es decir el orden en que las piezas pre-calibradas y no pre-calibradas son ubicadas entre los apoyos chicos y grandes debe ser aleatorio. Tomando en cuenta esto, el layout para cada una de las 4 cargas fue definido de la siguiente manera.

Primera Réplica

Primera Carga

Temperatura de aceite: 100°C

Factor Apoyos	Factor Pre-Calibrado	Vertederas
Apoyo Grande	No Precalibradas	13 - 10
Apoyo Chico	Precalibradas	17 - 21
Apoyo Grande	Precalibradas	20 - 27
Apoyo Chico	No Precalibradas	12 - 8

APOYOS GRANDES				APOYOS CHICOS			
13	10	20	27	17	21	12	8

Tabla 4.5 Layout de Primera Carga de Experimentación

Segunda Carga

Temperatura de aceite: 120°C

Factor Apoyos	Factor Pre-Calibrado	Vertederas
Apoyo Grande	No Precalibradas	1 - 14
Apoyo Chico	Precalibradas	26 - 23
Apoyo Grande	Precalibradas	25 - 18
Apoyo Chico	No Precalibradas	5 - 4

APOYOS GRANDES				APOYOS CHICOS			
1	14	25	18	26	5	4	23

Tabla 4.6 Layout de Segunda Carga de Experimentación

Segunda Réplica

Primera Carga

Temperatura de aceite: 100°C

Factor Apoyos	Factor Pre-Calibrado	Vertederas
Apoyo Grande	No Precalibradas	2 - 7
Apoyo Chico	Precalibradas	32 - 24
Apoyo Grande	Precalibradas	29 - 19
Apoyo Chico	No Precalibradas	6 - 3

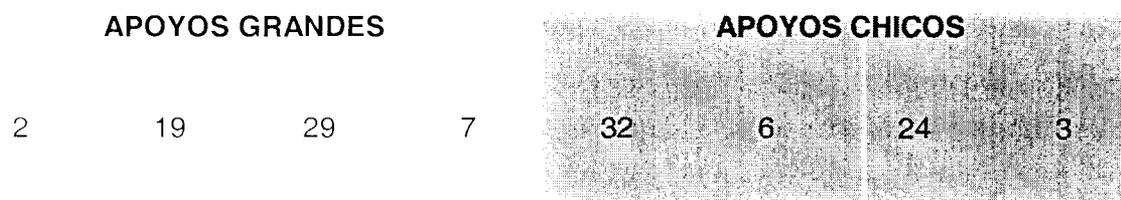


Tabla 4.7 Layout de tercera carga de experimentación

Segunda Carga

Temperatura de aceite: 120°C

Factor Apoyos	Factor Pre-Calibrado	Vertederas
Apoyo Grande	No Precalibradas	16 - 11
Apoyo Chico	Precalibradas	31 - 22
Apoyo Grande	Precalibradas	28 - 30
Apoyo Chico	No Precalibradas	9 - 15

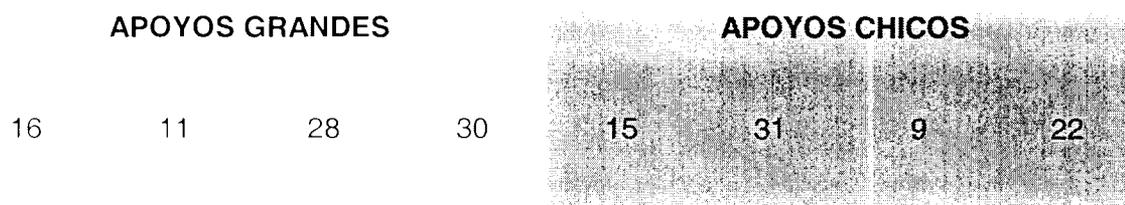


Tabla 4.8 Layout de cuarta carga de experimentación

Paso 7**Calentamiento de Piezas en el Horno (Temple)**

Una vez cargado el contenedor, este ingresa al horno donde permanecerá por aproximadamente 45 min. Esta temperatura es constante para cada una de las cuatro cargas que se usarán en la prueba.

Paso 8**Enfriamiento de Piezas en Aceite**

Pasado el tiempo establecido, el contenedor cargado con todas sus piezas, desciende a la piscina de aceite ubicada en la parte inferior del horno. En ese momento cada una de las vertederas recibe un choque térmico puesto que el aceite se encontrará a 100°C o 120°C, dependiendo de la carga ingresada, una temperatura mucho menor si la comparamos con los 843°C a los cuales las vertederas se vieron sometidas durante 45 min en la parte superior del horno.

Paso 9**Medición de Dureza Previo Revenido**

Puesto que la dureza es un factor influyente en el tiempo de calibrado de las vertederas, se decidió medir esta tanto antes como después de revenido con el fin de conocer de mejor manera el comportamiento de esta característica a lo largo de todo el proceso. Todas las vertederas luego de ser medidas en su dureza, son reestablecidas en el contenedor respetando la disposición original.

Paso 10**Revenido de Piezas**

El contenedor con sus vertederas, una vez culminado el temple, ingresa a un horno adicional donde la dureza original proporcionada en el calentamiento, es reducida. Todo el contenedor recibe el mismo tratamiento.

Paso 11**Medición de Dureza luego de revenido**

Una vez revenidas las piezas pasan nuevamente a un proceso de medición de dureza. Esta finalmente será la dureza que se incluirá como co-variable en el diseño del experimento.

Paso 12**Medición de las Piezas luego de tratamiento térmico.**

Una vez concluido el proceso de tratamiento térmico con la operación de revenido, todo el contenedor nuevamente ingresa al departamento de metrología donde empleando la máquina de medición por coordenadas las vertederas son nuevamente medidas en sus 12 puntos originales. De esta manera se obtendrá información acerca de la variación que pudo haberse generado en la forma de la pieza durante el tratamiento térmico.

Paso 13**Toma de tiempos de calibración**

Una vez medidas, las piezas son enviadas a la operación de calibrado donde se tomará el tiempo exacto que le toma al obrero desarrollar esta labor, está será considerada la variable de respuesta para nuestro experimento. Vale indicar que el operario no conoce nada acerca del tratamiento al cual las piezas fueron sometidas, y las diferencias que existen entre ellas, de modo que no se ve influenciado por esta información. Posterior a la operación de calibrado, las vertederas son liberadas para que continúen con su flujo de producción normal.

Estos pasos son desarrollados para cada uno de los cuatro contenedores requeridos en nuestra prueba.

4.5 Recolección de Datos

Debido a la gran cantidad de datos que se recolectaron para este estudio, en esta sección se presentará apenas una descripción de lo que estos significan. Las tablas con las mediciones totales podrán ser encontradas en la sección de Anexos.

1) Medición de Puntos sobre Vertederas antes del tratamiento térmico.

Estos datos corresponden a las alturas medidas en la máquina de medición por coordenadas, para cada una de las 32 vertederas, en los doce puntos establecidos, antes de que las piezas hubieran pasado por el tratamiento térmico. A continuación un ejemplo de los datos que podemos observar en su totalidad en la sección Anexos (T_A1).

Precalibrada	Nro. Pieza	PUNTO 1 (mm)	PUNTO 2 (mm)	PUNTO 3 (mm)	PUNTO 4 (mm)	PUNTO 5 (mm)	PUNTO 6 (mm)
NO	1	27.079	26.05	28.312	58.251	57.338	57.967
NO	2	27.422	26.777	28.214	57.138	56.333	56.825
NO	3	27.231	26.058	27.909	57.077	56.476	57.506
NO	4	27.665	27.119	28.336	56.154	56.706	57.948
NO	5	27.021	25.778	28.136	57.923	56.811	57.681

Tabla 4.9 Medición de puntos sobre vertedera antes del tratamiento térmico

2) Desviación entre puntos co-lineales antes de tratamiento térmico

Como se explicó en la sección 4.2 sobre la vertedera se trazaron 4 líneas imaginarias con el fin de calcular la desviación estándar existente entre los 3 puntos co-lineales ubicados sobre cada línea. A continuación un ejemplo de las mediciones de desviación, realizadas en las piezas antes de llevar estas al tratamiento térmico. Los datos totales en el anexo (T_A2).

Precalibrada	Nro. Pieza	DESV 1-3 (mm)	DESV 4-6 (mm)	DESV 7-9 (mm)	DESV 10-11 (mm)
NO	1	1.13253212	0.467237627	0.3786674	0.178898016
NO	2	0.71975204	0.405803319	0.236897305	0.476589971
NO	3	0.93646623	0.517387991	1.292613373	1.261478498
NO	4	0.60956897	0.91884928	2.00467354	2.198394983
NO	5	1.17957888	0.584808801	0.807286195	0.830143361

Tabla 4.10 Medición Desviación de puntos co-lineales antes del tratamiento térmico

3) Dureza Previo Revenido

En esta sección se presentan los valores de dureza, en grados Brinell, obtenidos para las 32 vertederas, luego de que estas han pasado por el temple, aunque no por el revenido. Por esta razón podemos observar valores muy altos ya que es en la operación de revenido donde la dureza disminuye.

Igualmente los datos completos podrán ser observados en la sección Anexos (T_A3).

Precalibrada	Nro. Pieza	DUREZA PRE- REV
NO	1	600
NO	2	713
NO	3	683
NO	4	713
NO	5	627

Tabla 4.11 Medición dureza previo revenido

4) Dureza luego de revenido

Posterior al proceso de revenido, las piezas son nuevamente medidas en su dureza, a continuación unos datos ejemplo. Se puede observar la disminución drástica presente entre los datos anteriores y estos. Datos completos (T_A 4)

Precalibrada	Nro. Pieza	DUREZA REV
NO	1	351
NO	2	364
NO	3	364
NO	4	340
NO	5	340

Tabla 4.12 Medición de dureza después de revenido

5) Medición de Puntos luego del tratamiento térmico

Una vez concluido el tratamiento térmico, las vertederas son nuevamente medidas en sus 12 puntos empleando la máquina de medición por coordenadas, algunos resultados modelo pueden verse a continuación. Datos completos (T_A5).

Precalibrada	Nro.	PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO
	Pieza	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)	6 (mm)
NO	1	26.552	24.19	27.255	55.447	55.106	56.635
NO	2	26.597	26.852	27.649	54.702	54.782	54.613
NO	3	26.919	26.33	27.471	55.771	55.914	56.503
NO	4	26.407	26.272	27.633	54.717	54.841	54.784
NO	5	26.182	24.337	27.314	56.485	54.293	55.679

Precalibrada	Nro.	PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO
	Pieza	7 (mm)	8 (mm)	9 (mm)	10 (mm)	11 (mm)	12 (mm)
NO	1	66.211	66.178	63.494	54.955	55.666	33.74
NO	2	63.78	64.948	63.033	53.391	54.845	33.157
NO	3	65.573	65.374	65.014	54.524	54.246	32.921
NO	4	63.975	64.978	62.852	53.626	54.469	32.977
NO	5	64.927	65.198	65.233	53.935	54.947	32.971

Tabla 4.13 Medición de puntos luego de tratamiento térmico

6) Medición Tiempos de Calibración

Durante el proceso de calibración, son tomados los tiempos que le lleva al operario calibrar cada una de las 32 vertederas. Los resultados ejemplo se muestran en la siguiente tabla los datos totales pueden encontrarse en la sección Anexos Tabla T_A 6

PIEZA	TIEMPO DE CALIBRACION (SEG)
1	528
2	659
3	350
4	546
5	365

Tabla 4.14 Medición Tiempos de Calibración

4.6 Análisis de Datos

El Experimento de Parcelas divididas es en realidad la suma de dos experimentos, el primero analiza los factores parcelas que para nuestro caso es la temperatura de enfriado del aceite, con respecto a las réplicas, mientras que el otro analiza los factores conocidos como sub-parcelas (Apoyos, Pre-calibrado), a través de un diseño factorial de tipo 2^2 completamente aleatorio, y sus interacciones con respecto al factor temperatura de aceite (whole plot).

De este modo este experimento conjunto, al igual que todos los diseños establecidos en la metodología de Diseño de experimentos, permite la prueba de una serie de hipótesis, que en este caso son las siguientes:

a) Temperatura de aceite de enfriado.

H_{01} = La temperatura de aceite de enfriado no influye en el tiempo de calibración de las piezas vertederas.

H_{11} = La temperatura de aceite de enfriado, si influye en el tiempo de calibración de las piezas vertederas.

b) Apoyos del contenedor

H_{02} = El tamaño de los apoyos donde se asientan las vertederas en el contenedor, no influye en el tiempo de calibración de las piezas.

H_{12} = El tamaño de los apoyos donde se asientan las vertederas en el contenedor, si influye en el tiempo de calibración de las piezas.

c) Pre-calibración

H_{03} = El que la vertedera haya sido Pre-calibrada previo el tratamiento térmico no influye en el tiempo de calibración de las piezas vertederas.

H_{13} = El que la vertedera haya sido Pre-calibrada previo el tratamiento térmico si influye en el tiempo de calibración de las piezas vertederas.

Las hipótesis para las interacciones entre estos tres factores, tendrán en todos sus casos una redacción igual a la siguiente.

d) Interacciones

H_0 = La interacción entre el factor A y el factor B no influye en el tiempo de calibrado de la pieza vertedera.

H_1 = La interacción entre el factor A y el factor B si influye en el tiempo de calibrado de la pieza vertedera.

Adicionalmente tendremos hipótesis para las co-variables.

e) Dureza luego de revenido

H_{04} = La dureza luego de revenido no influye en el tiempo de calibrado de la pieza vertedera.

H_{14} = La dureza luego de revenido si influye en el tiempo de calibrado de la pieza vertedera.

Para la desviación estándar de los puntos co-lineales las hipótesis son iguales en todos los casos y tendrán la siguiente redacción.

f) Desviación estándar puntos co-lineales

H_0 = La desviación estándar de los puntos co-lineales X-X no influye en el tiempo de calibración de las piezas vertederas.

H_1 = La desviación estándar de los puntos co-lineales X-X si influye en el tiempo de calibración de las piezas vertederas.

El análisis de los datos, se realizará a través de un paquete estadístico, el cual internamente desarrollará un análisis de varianza (ANOVA) donde se evaluarán las hipótesis de cada uno de los factores a través de una prueba F, la cual evalúa el cociente que existe entre la media de cuadrados esperada de cada uno de los factores

y la media de cuadrados del error. Para mayores detalles se sugiere (Montgomery,2001).

El paquete estadístico MINITAB provee el cociente resultante de la división entre la media de cuadrados del factor y del error, pero no un F crítico, sin embargo presenta el P valor que lo podemos describir como el mínimo valor del nivel de significancia para el cual se rechaza una hipótesis nula, de modo que si el P valor mostrado en el Análisis de Varianza para un determinado factor es menor a 0.1, que será el nivel de significancia que se adoptará para esta prueba, se rechaza H_0 (Hipótesis nula) y por tanto dicho factor podremos afirmar al menos con un nivel de confianza del 90%, influye en nuestra variable de respuesta tiempo de calibración.

Como resultado de los cálculos elaborados por el paquete estadístico, se obtuvo el siguiente Análisis de Varianza. Los datos para el mismo pueden observarse en los Anexos (T_A 7).

Considerando un nivel de significancia α de 0.1

General Linear Model: Tiempo versus Replica, Temperat, Apoyos, Precal

Factor	Type	Levels	Values
Replica	random	2	REP 1, REP 2
Temperat	fixed	2	100, 120
Apoyos	fixed	2	C, G
Precal	fixed	2	NOP, Precal

Analysis of Variance for Tiempo, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Dur rev	1	88603	61430	61430	2.99	0.102
Desv 1-3	1	985	58885	58885	2.87	0.109
Desv 4-6	1	853	105548	105548	5.14	0.037
Desv 7-9	1	14482	22649	22649	1.10	0.308
Desv 10-11	1	1339	28	28	0.00	0.971
Replica	1	28515	19268	19268	1.43	0.408 x
Temperat	1	46634	53859	53859	4.26	0.309 x
Replica*Temperat	1	9590	12893	12893	0.63	0.439
Apoyos	1	8761	2001	2001	0.10	0.759
Precal	1	177978	195080	195080	9.50	0.007
Temperat*Precal	1	84226	80962	80962	3.94	0.063
Temperat*Apoyos	1	9175	9401	9401	0.46	0.508
Apoyos*Precal	1	7	2	2	0.00	0.992
Temperat*Apoyos*Precal	1	3694	3694	3694	0.18	0.677
Error	17	349170	349170	20539		
Total	31	824014				

Al observar los P valores para cada factor, podemos obtener las siguientes conclusiones preliminares:

- Aunque no por mucho, la dureza luego de revenido puede considerarse influyente en la variable de respuesta tiempo de calibración, es decir se rechaza la hipótesis nula H_{04} que afirma lo contrario.
- La desviación estándar entre los puntos co-lineales 1-3 y 4-6 influyen en la variable de respuesta tiempo de calibrado.
- De manera contundente (P valor = 0.007) el factor pre-calibrado influye en la variable de respuesta. Esto rechaza la hipótesis nula H_{03} , e implica que existe una diferencia grande en la media de los tiempos de calibración dependiendo de si las piezas han sido pre-calibradas o no.
- La interacción entre los factores temperatura y calibrado, tiene influencia sobre la variable de respuesta, esto quiere decir que un factor de los dos dependiendo del estado del otro afectará de manera distinta e importante al tiempo de calibrado.

Los demás factores y sus respectivas interacciones no presentan influencia estadísticamente representativa con respecto al tiempo de calibración.

A continuación se desarrollará un análisis más pormenorizado de los datos.

4.6.1 Análisis Factor Dureza luego de revenido

La dureza aunque analíticamente aparenta tener no demasiada influencia sobre la variable de respuesta, podemos confirmar la notoriedad y la importancia de esta a través del gráfico de efectos principales en la figura inferior. Si además consideramos la especificación técnica establecida por los expertos para la dureza de las vertederas terminadas (310 Bhn – 350 Bhn) nos daremos cuenta que es precisamente en ese rango donde se obtiene un tiempo de calibración casi en su totalidad por debajo de la media (450 seg). Esto confirma que el rango establecido como adecuado para este tipo de piezas es el correcto, incluso relacionándolo con el tiempo de calibrado.

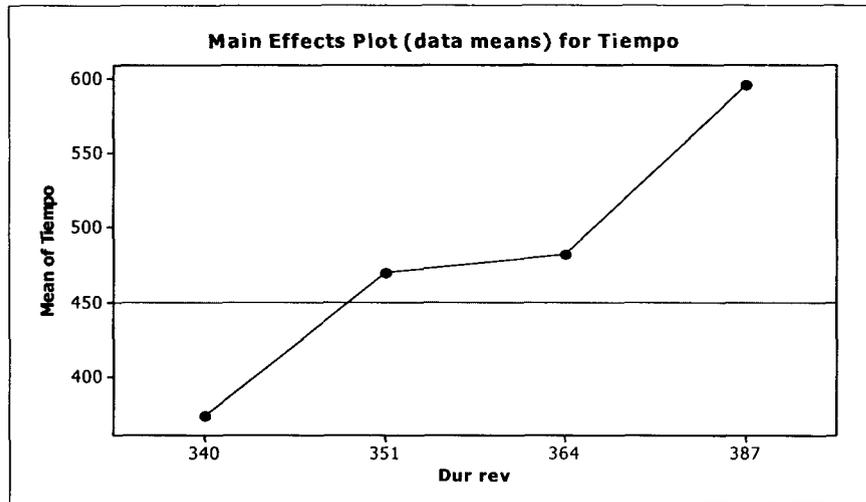


Fig. 4.16 Gráfico de efectos Principales Factor Dureza

Sin embargo al revisar los datos de las durezas luego de revenido (dureza final) de las 32 vertederas, vimos que en su mayoría no se encontraban dentro de especificación, en el siguiente gráfico se muestra el porcentaje de piezas de acuerdo a las durezas finales obtenidas en cada una de ellas.

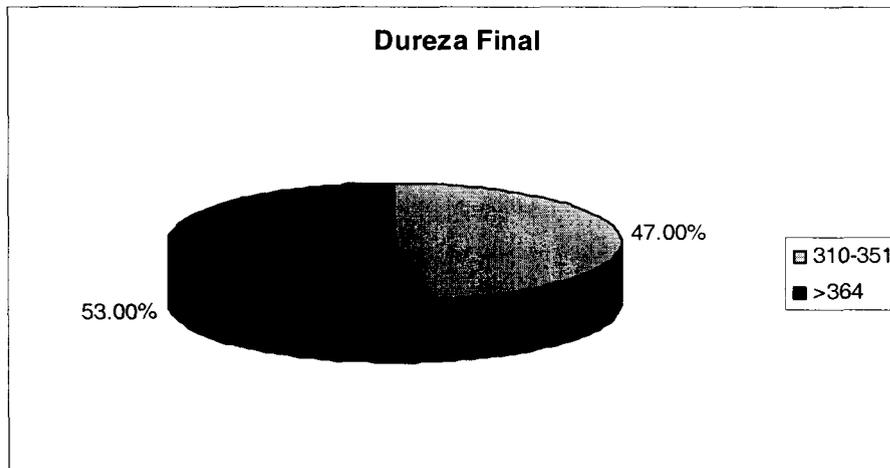


Fig. 4.17 Porcentaje de Vertederas fuera de especificación

Es notorio que durante el tratamiento térmico las piezas no están adquiriendo una dureza adecuada, si contamos además con el hecho de que este factor es importante con respecto al tiempo de calibración nos daremos cuenta que el estudiar la manera de lograr colocar la dureza dentro de especificación es crítico.

Aunque en un principio no era parte de nuestro estudio, en el siguiente capítulo se abordará el problema de las durezas fuera de especificación con mayor profundidad, ya que es un tópico directamente relacionado con nuestro objetivo final, que es el disminuir el tiempo o la necesidad de calibración de las piezas vertederas al final del tratamiento térmico.

4.6.2 Análisis Factor Pre-Calibración

Tal vez este sea el factor más importante por su alto nivel de influencia en el tiempo de calibración ($P = 0.007$), tal como lo podemos confirmar en el siguiente gráfico de efectos principales.

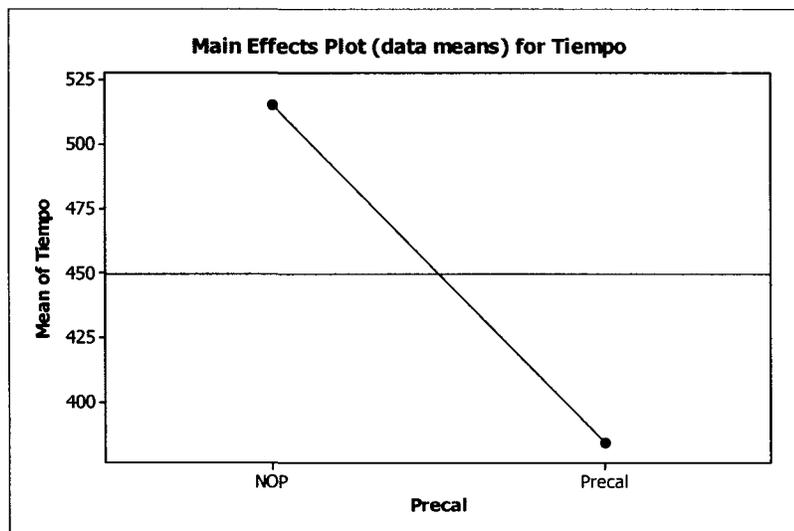


Fig. 4.18 Gráfico de efectos principales Factor Pre-calibrado

Existe como podemos ver una diferencia bastante considerable entre los tiempos de las piezas pre-calibradas y no-precalibradas. Esto en primera instancia podría simplemente sugerir el mantener la operación preventiva pre-calibrado antes de llevar a cabo el tratamiento térmico, sin embargo considero adecuado mas bien, previamente, realizar un análisis el cual nos permitiera identificar las características físicas de las vertederas que han sido pre-calibradas con respecto a las que no, tanto antes como luego del tratamiento térmico, de esa manera conoceremos que modificaciones implica el realizar la operación de pre-calibrado y de que manera poder lograr que estas sean ya características inherentes de las piezas y no sea necesario añadírselas a través de una

operación adicional. Para esto se hará uso de la información obtenida por la máquina de medición por coordenadas.

a) Análisis de altura de los puntos de la vertedera

Las alturas de los puntos, se refiere al valor que existe entre cada uno de los 12 puntos de la vertedera y el nivel de referencia establecido que en nuestro caso es una mesa de trazo. Se realizó una prueba de hipótesis para comparar las medias de las alturas de cada uno de los puntos, considerando si las vertederas habían o no sido pre-calibradas, esto determinó si existía evidencia estadística suficiente para afirmar que las alturas de los puntos de las vertederas pre-calibradas eran distintas a las alturas de los puntos de las vertederas sin pre-calibrar.

Para esto se empleo el programa MINITAB, el cual recurre a un recurso gráfico que muestra para cada punto la media de las alturas, especificando si esta procede de las vertederas pre-calibradas o no, estas se ubicarán junto con un par de límites que denota el área de aceptación, si es que los dos valores de media, caen dentro de estos límites, entonces implica que no existe evidencia estadística para afirmar que las medias de los puntos para los dos tipos de piezas sean distintas, por el contrario si al menos una de las medias se encuentra fuera de los puntos denotará que existe evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula que en este caso dice.

H_0 : La media de las alturas del punto X, de las vertederas pre-calibradas y no pre-calibradas, son iguales.

H_1 : La media de las alturas del punto X, de las vertederas pre-calibradas y no pre-calibradas, no son iguales.

Esta prueba es realizada con un nivel de confianza de 0.05, es decir si los valores de media salen de los límites, rechazaríamos la hipótesis nula con un 95% de confianza.

A continuación los gráficos obtenidos en el MINITAB, de algunos de los puntos de las vertederas, todos los demás gráficos para los doce puntos podrán encontrarse en la sección anexos (Anexo 8).

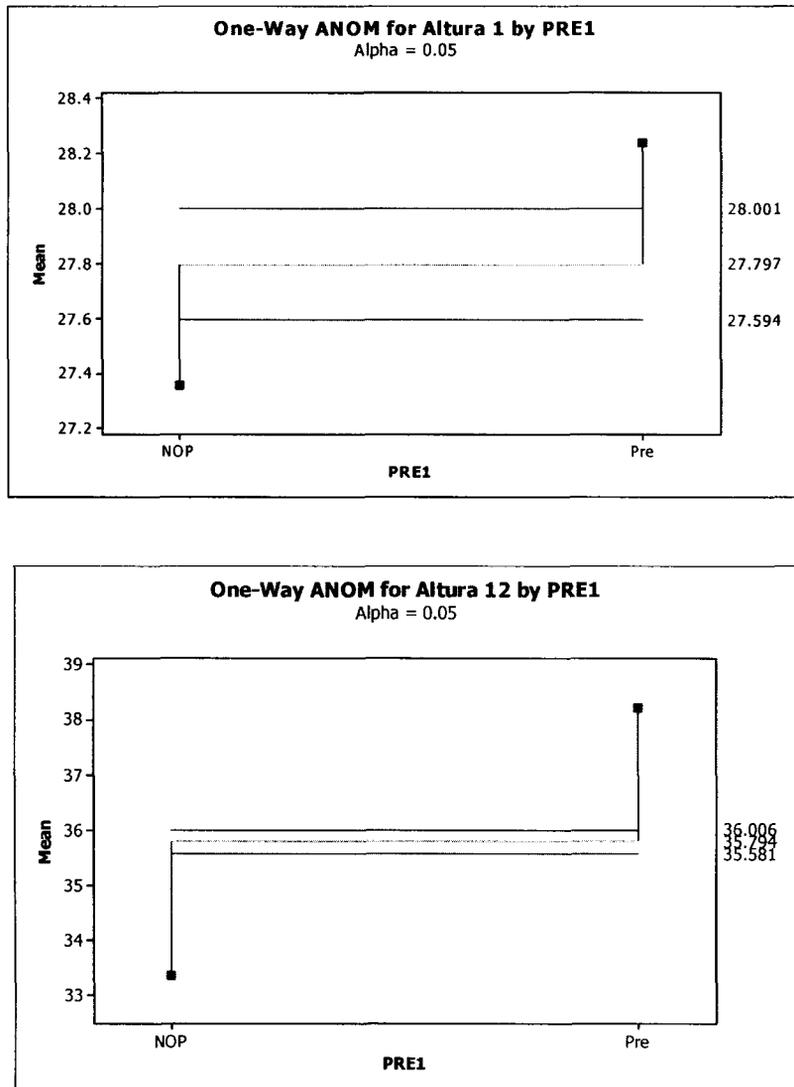


Fig. 4.19 Pruebas de hipótesis gráfica alturas de vertederas previo tratamiento térmico

Como se puede observar para todos los puntos a lo largo de la vertedera, se repite el mismo patrón, las medias de las alturas de las piezas Pre-calibradas son en todos los casos mayores a los de las vertederas No- Precalibradas. Aunque en todos los puntos se mantiene la misma tendencia, esta diferencia fue respaldada estadísticamente en 11 de los doce puntos donde se rechazó con un nivel de confianza del 95% la hipótesis nula que afirma que las vertederas poseían valores iguales para las medias de sus alturas. El único punto donde aunque se mantuvo la misma tendencia, no hubo la suficiente evidencia para rechazar la hipótesis H_0 fue en el punto 2.

Estadísticamente encontramos que las vertederas pre-calibradas poseen como característica particular una mayor altura en sus puntos que la que encontramos en una vertedera no pre-calibrada, de esta manera si observáramos un par de vertederas, tanto pre-calibradas como no-precalibradas en una vista de su perfil, lo más probable es que encontremos sigan el siguiente patrón.

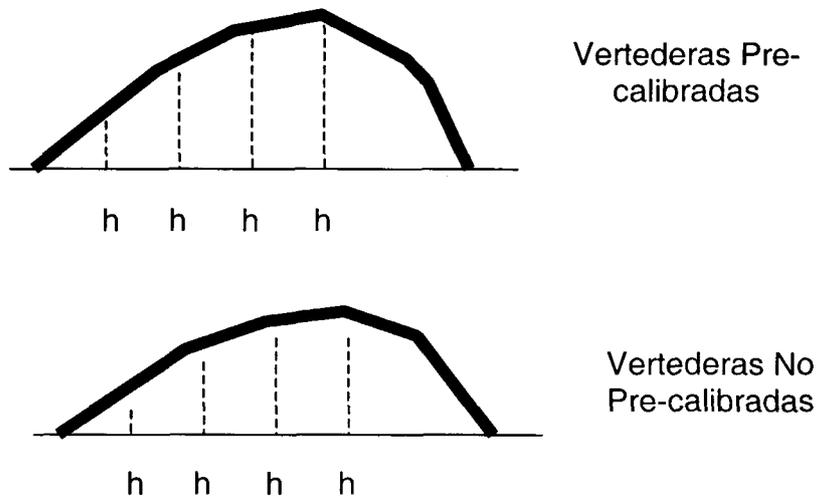


Fig. 4.20 Perfil de Vertederas

Como se podrá observar en el gráfico ilustrativo anterior las vertederas Pre-calibradas presentan alturas mayores que las que se pueden obtener en los mismos puntos en las no pre-calibradas. Las gráficas muestran también una forma pandeada en las vertederas lo cual es acorde a su diseño y futura operación en labores de acarreo.

Con el fin de conocer mejor la manera en que los puntos se distribuyen a lo largo de la vertedera y obtener una más clara imagen de las diferencias que existen entre las alturas de los puntos de las Pre-calibradas y no Pre-calibradas, se desarrollo el siguiente gráfico de tendencia en el cual se puede observar como se distribuyen los puntos a lo largo de la pieza y como sus valores medios se comparan entre los dos tipos de piezas.

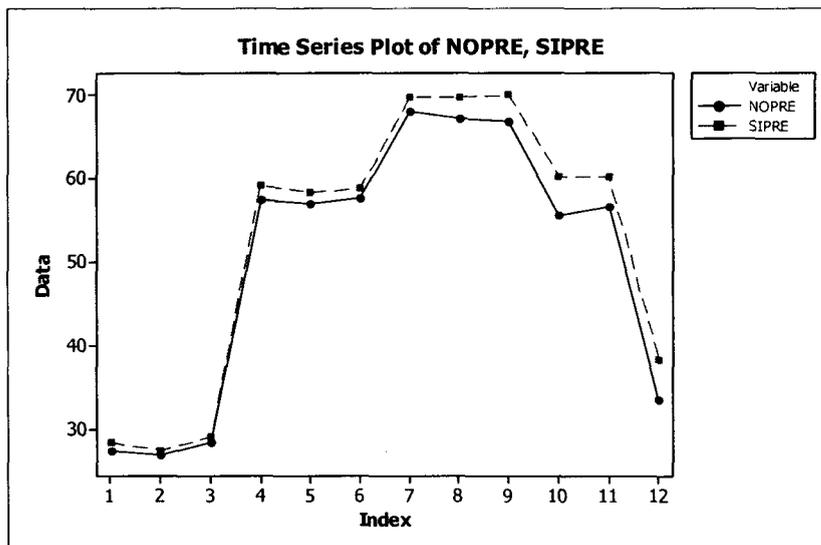


Fig. 4.21 Altura de puntos a lo largo de la vertedera

En el gráfico anterior, la línea superior que lleva la clave SIPRE representa los 12 puntos de la vertedera los cuales describen una superficie pandeada, y en todos los casos se encuentran por encima de los promedios de los puntos de las gráficas no pre-calibradas (NOPRE). Esto ratifica los hallazgos encontrados en las pruebas de hipótesis hechos anteriormente, y nos entrega información valiosa acerca de una característica que por el momento está siendo añadida a las piezas a través de una operación preventiva como es el pre-calibrado, cuando lo óptimo sería que la misma sea parte del diseño de la pieza.

El análisis realizado anteriormente describe el comportamiento de los puntos de la vertedera antes del tratamiento térmico, con el fin de conocer en que forma se comportan los puntos durante el tratamiento térmico, se decidió realizar el siguiente gráfico el cual muestra de que manera varían sus alturas para algunos puntos tomados al azar, durante el tratamiento térmico.

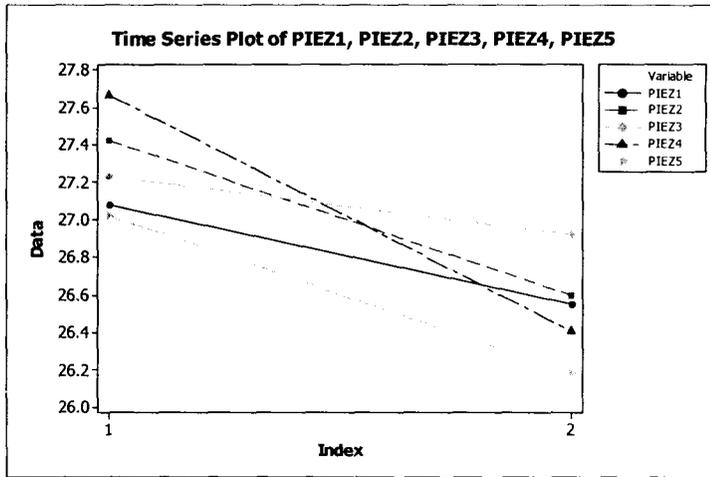
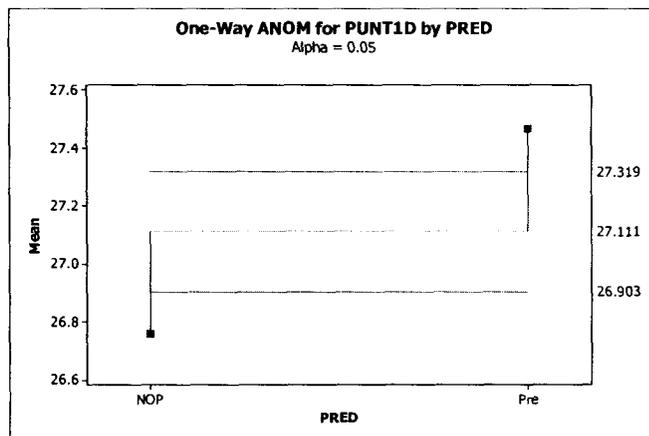


Fig. 4.22 Variación en altura de la vertedera durante el tratamiento térmico

En este gráfico podemos observar como varían cinco puntos tomados aleatoriamente de cinco vertederas igualmente recogidas al azar, durante el tratamiento térmico, esto nos muestra que en el desarrollo del mismo las alturas disminuyen.

Con el fin de conocer la tendencia de las medias de las alturas de los puntos de las vertederas pre-calibradas y no pre-calibradas luego del tratamiento térmico, se desarrollaron nuevamente pruebas de hipótesis para cada uno de los 12 puntos de las piezas, a continuación los gráficos obtenidos en MINITAB. Los gráficos para los 12 puntos pueden observarse en su totalidad en el Anexo 9.



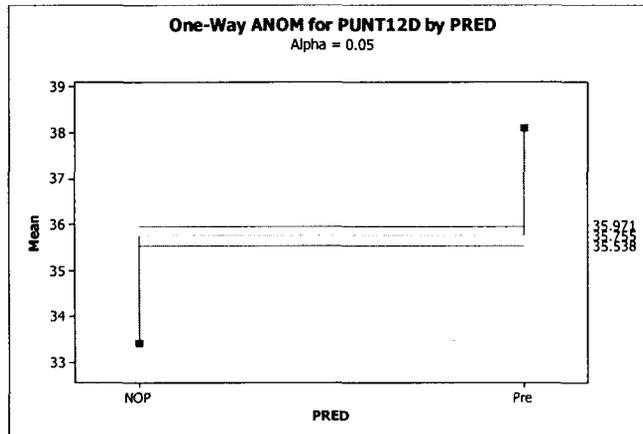


Fig. 4.23 Prueba de hipótesis gráfica alturas de vertederas luego de tratamiento térmico

Es claro que luego del tratamiento térmico la tendencia se mantiene es decir se evidencia estadísticamente que las alturas de las vertederas Pre-calibradas son superiores a las de las vertederas sin Pre-calibrar, por tanto el mantener un nivel superior de alturas permitirá al final mantener esta misma característica lo que en las vertederas Pre-calibradas permite lograr un tiempo de calibración evidentemente menor.

b) Análisis de Variación de los puntos co-lineales

Adicionalmente al análisis de las alturas realizado para las vertederas pre-calibradas y no pre-calibradas, se desarrolló una comparación de la variación presente entre las medias de las desviaciones de los puntos co-lineales considerando igualmente la misma clasificación en las piezas. Para esto se recurrió a la misma prueba usada durante el análisis de las medias de las alturas es decir la pruebas de hipótesis de las medias de las desviaciones para cada una de las series de puntos co-lineales esto es 1-3, 4-6 , 7-9 y 10-11. A continuación se presentan los resultados, tanto antes como luego del tratamiento térmico.

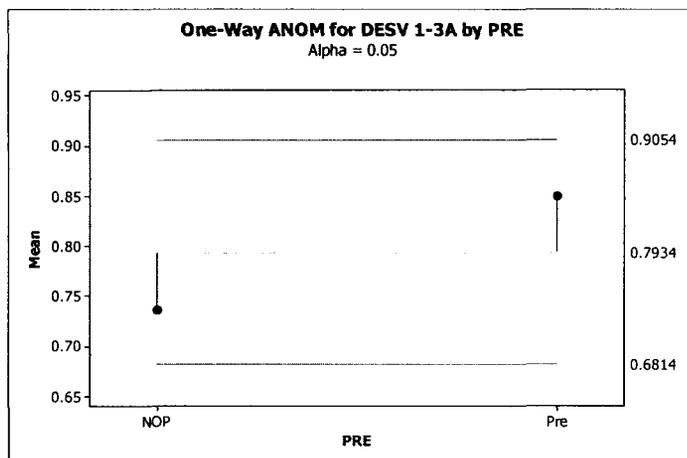


Fig. 4.24 Prueba de hipótesis gráfica promedio de desviación de puntos co-lineales 1-3 antes de tratamiento térmico

Gráfico de las medias de las desviaciones de los puntos 1-3 antes del tratamiento térmico.

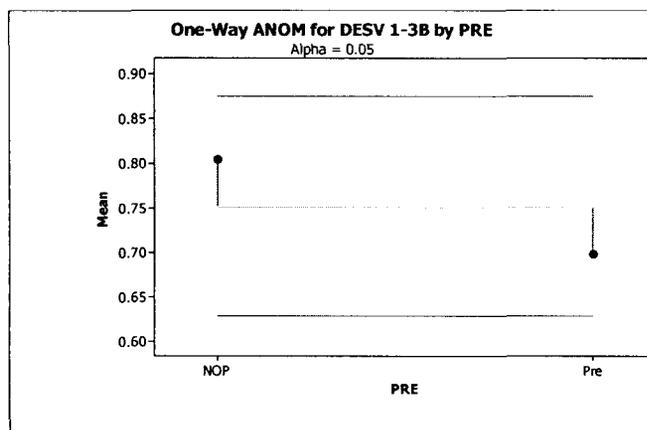


Fig. 4.25 Prueba de hipótesis gráfica promedio de desviación de puntos co-lineales 1-3 luego de tratamiento térmico

Gráfico de las medias de las desviaciones de los puntos 1-3 luego del tratamiento térmico.

En el caso de las medias de la desviación de los puntos 1-3 vemos como a pesar de que la misma era mayor en las vertederas pre-calibradas antes del tratamiento térmico, disminuye luego de este lo cual reafirma lo establecido por los encargados de este proceso, quienes afirmaban que si existía menor desviación co-lineal el tiempo de calibrado era menor.

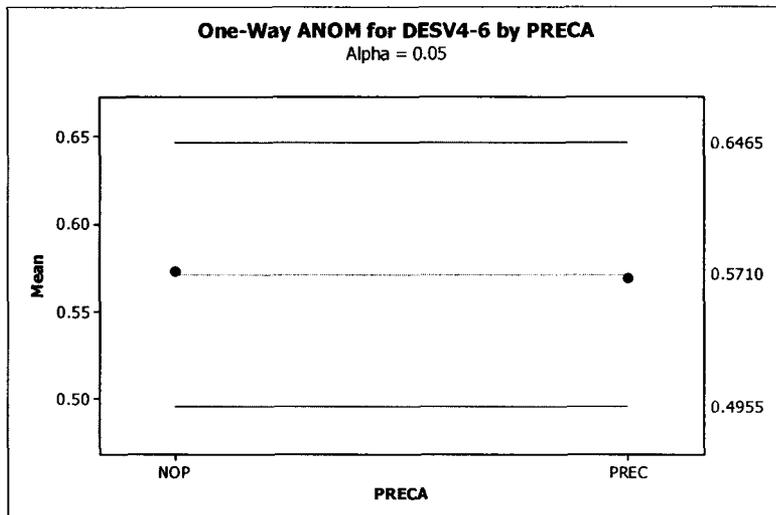


Fig. 4.26 Prueba de hipótesis gráfica promedio de desviación de puntos co-lineales 4-6 antes de tratamiento térmico

Gráfico de las medias de las desviaciones de los puntos 4-6 antes del tratamiento térmico.

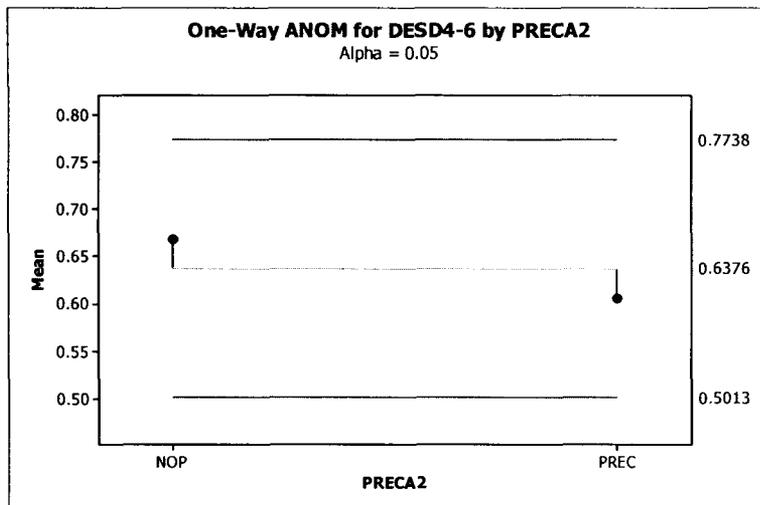


Fig. 4.27 Prueba de hipótesis gráfica promedio de desviación de puntos co-lineales 4-6 luego de tratamiento térmico

Gráfico de las medias de las desviaciones de los puntos 4-6 luego del tratamiento térmico.

Si observamos los resultados de las pruebas de hipótesis para los puntos co-lineales 4-6 vemos que la tendencia se mantiene es decir, aunque la media de la desviación estándar era la misma antes del tratamiento, esta disminuía en su valor medio luego de este proceso.

En conclusión las desviación estándar en los puntos 1-3, y 4-6 que son los de mayor importancia por la influencia que estos poseen sobre la variable de respuesta, como se observó en el análisis de los factores en la sección 4.5.2, tienden para las vertederas Pre-calibradas a permanecer en su valor medio reducidas con respecto a las que no pasaron por este proceso. Esto es consistente con la idea de que a menor desviación menor tiempo de calibración. Es entonces de particular importancia, así como se enfatizó en mantener una media de altura superior para los puntos de la vertedera desde diseño, lograr igualmente desde el proceso de forja piezas con un nivel de desviación co-lineal bajo de modo que pueda sino eliminarse al menos disminuirse los tiempos requeridos para el pre-calibrado y calibrado final.

Los gráficos para los puntos 7-9 y 10-11 no se incluyeron. No fueron considerados ya que por el resultado experimental se obtuvo que las desviaciones de sus puntos no poseen influencia sobre la variable de respuesta en estudio.

4.6.3 Análisis desviación de puntos co-lineales 1-3 y 4-6

Aunque ya se realizó un análisis pormenorizado en la sección anterior, sobre la influencia y las tendencias presentes en estas co-variables y su relación con la operación de Pre-calibrado y la variable de respuesta, solo conviene exponer los resultados obtenidos del gráfico de efectos principales luego de haberlo aplicado sobre estos factores de modo que podamos observar la manera en que el tiempo de calibración se ve afectado a medida que se incrementa el valor de las desviaciones.

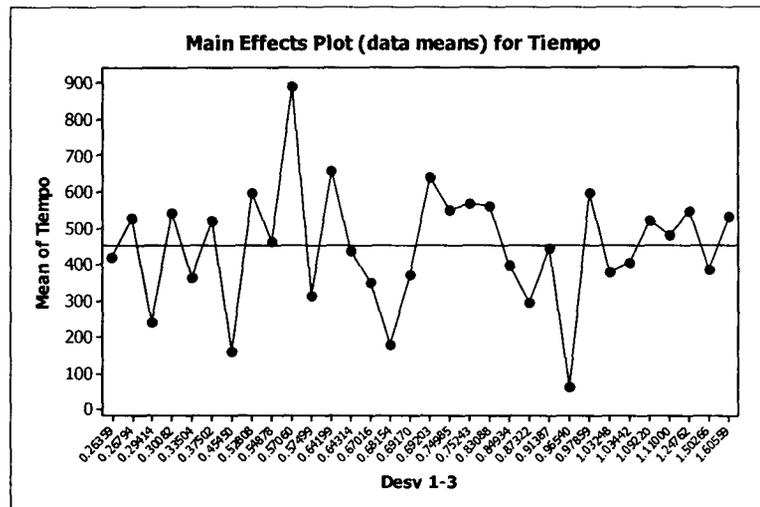


Fig. 4.28 Gráfico de efectos principales Desviación puntos co-lineales 1-3

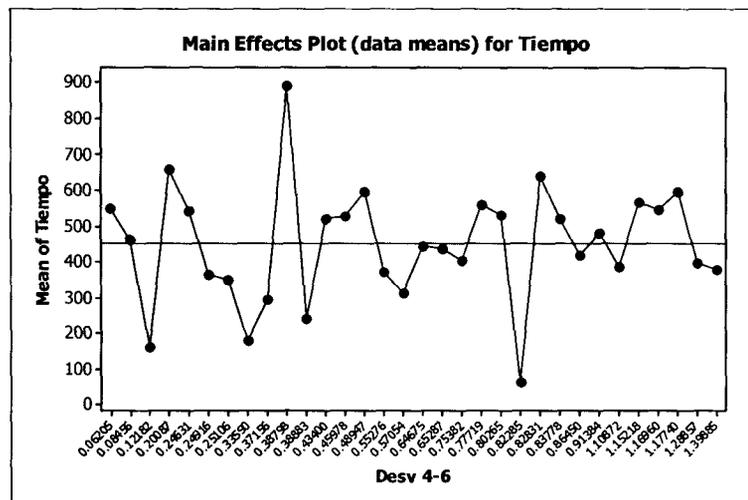


Fig. 4.29 Gráfico de efectos principales Desviación puntos co-lineales 4-6

Aunque no se puede observar de manera muy clara, en el primer gráfico vemos una casi imperceptible tendencia de incremento en el tiempo de calibración a medida que la desviación estándar en los puntos co-lineales 1-3 se incrementa, esto es consistente con los resultados del experimento en donde este factor apenas con un P valor de 0.1009 lograba ser considerado como influyente, sin embargo al observar el gráfico de efectos principales para la desviación en los puntos 4-6 vemos como la tendencia es más pronunciada, esto ratifica los resultados del experimento donde para este factor se obtuvo un P valor mucho menor 0.037 es decir el mismo puede ser considerado como

influyente con respecto al tiempo de calibrado con un nivel de confianza de al menos el 95%.

Los resultados obtenidos tanto al observar las tendencias, como en el análisis de las piezas hecho en la sección de Pre-calibración corroboran lo dicho por los encargados del proceso, quienes afirmaban que la reducción en la variación entre los puntos co-lineales disminuiría el tiempo de calibración, es responsabilidad entonces del departamento de diseño lograr este tipo de características en sus piezas de modo que las operaciones preventivas y correctivas sean menos consumidoras de tiempo o eliminadas. Un análisis más profundo de las opciones que la empresa posee, será realizado más adelante.

4.6.4 Análisis Interacción Temperatura Pre-calibrado

Se puede decir que una interacción es influyente en la variable de respuesta si es que al cambiar el nivel de uno de los factores que la conforma el otro afecta de una manera muy diferente la variable de respuesta. En este caso lo observamos en la interacción presente entre la temperatura y el Pre-calibrado como se observa en el siguiente gráfico de interacción.

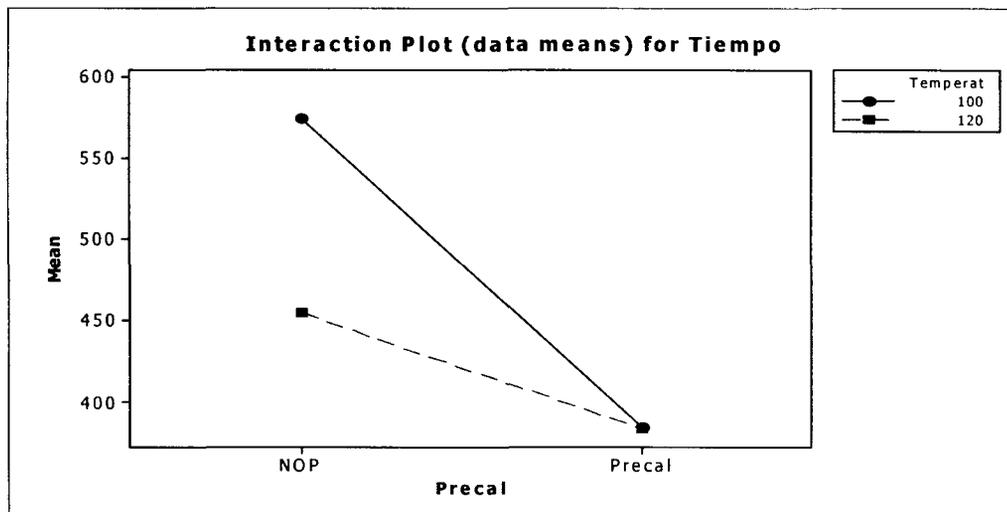


Fig. 4.30 Gráfico de interacción Factor Temperatura de aceite – Precalibrado

En el gráfico podemos observar como el que la pieza sea Pre-calibrada o no, o para decirlo de otra manera el que la pieza posea una altura superior y una reducida desviación co-lineal o no, influye de tal modo que el tiempo de calibrado será el mismo

independientemente de la temperatura de aceite que se esté usando para enfriado, sin embargo si observamos lo que sucede con las piezas que no han sido pre-calibradas o no poseen las características físicas que esto implica, veremos que cuando disminuye la temperatura de aceite se incrementa el tiempo de calibración en gran medida, esto es lógico ya que si se disminuye la temperatura de enfriado en este caso 100°C , el choque térmico que experimentan las vertederas es mayor y por tanto la deformación se incrementa, sin embargo vemos como el hecho de obtener una pieza con ciertas características ya sea por el pre-calibrado o desde el diseño, permitirá que el proceso sea mucho más robusto frente a posibles variaciones de temperatura lo que lo hará un proceso mucho más confiable y consistente.

Las conclusiones con respecto a los hallazgos encontrados en esta última sección del capítulo serán establecidas de manera detallada en el capítulo 6.

Capítulo V

Análisis Estadístico Proceso de Revenido

Durante el análisis estadístico de datos del capítulo 4, se encontró que las piezas vertederas estaban fuera de especificación (310-350 Bhn) lo cual tal como se halló en el análisis del experimento influye de manera directa en el tiempo de calibración. Por esta razón en este capítulo se desarrollará un análisis más profundo con el fin de conocer las posibles causas de esta variación y las medidas que permitan ubicar nuevamente la dureza dentro de la especificación adecuada.

5.1 Descripción y función del Proceso de Revenido

El Proceso de Revenido es un tratamiento complementario al temple y consiste en calentar las piezas de acero a una temperatura inferior a su punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones (Conceptos Térmicos,2004).

Los fines que se consiguen en general con el revenido son:

- Mejorar los efectos del temple, llevando al acero a un estado de mínima fragilidad.
- Disminuir las tensiones internas de transformación, que se originan en el temple.
- Modificar las características mecánicas, en las piezas templadas produciendo los siguientes efectos:
- Disminuir la resistencia a la rotura por tracción, el límite elástico y la dureza.
- Aumentar las características de ductilidad; alargamiento, estricción y las de tenacidad; resiliencia.

Los factores que influyen en el revenido son la **temperatura** y el **tiempo de revenido** (a partir de un cierto tiempo límite la variación es tan lenta que se hace antieconómica su prolongación, siendo preferible un ligero aumento de temperatura), la **velocidad de enfriamiento** (es prudente que el enfriamiento no se haga rápido con el fin de disminuir en mayor medida las tensiones internas) y las **dimensiones de la pieza** (la duración de

un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 horas por cada 25 mm de espesor o diámetro).

Las piezas vertederas del estudio pasan por el proceso de revenido por un periodo de 60 minutos a una temperatura de 528°C, esto reduce su fragilidad al lograr que el acero que las conforman se vuelva más tenaz y menos quebradizo. Posteriormente son enfriadas lenta y controladamente logrando así una reducción en las tensiones internas de la pieza y una disminución en su nivel de dureza. Este proceso en conjunto permite que las vertederas puedan soportar mayores tensiones y esfuerzos durante el trabajo de campo, ya que de otra manera las tensiones internas sumadas a las tensiones propias del trabajo, llevarían en un tiempo corto a la fractura de la pieza.

5.2 Niveles Actuales del Proceso

Durante la fase experimental la dureza de las piezas fue medida tanto antes como después del proceso de revenido, con el fin de encontrar posibles patrones de comportamiento a lo largo del proceso que expliquen las diferencias en la variable de respuesta tiempo de calibración, gracias a esto se halló que la mayoría de las vertederas (53%) poseían un nivel de dureza (luego de revenido) por encima de su límite superior de especificación, tal como se puede observar en la siguiente figura, donde fue graficada la dureza de cada una de las 32 vertederas (4 lotes) que intervinieron en los experimentos.

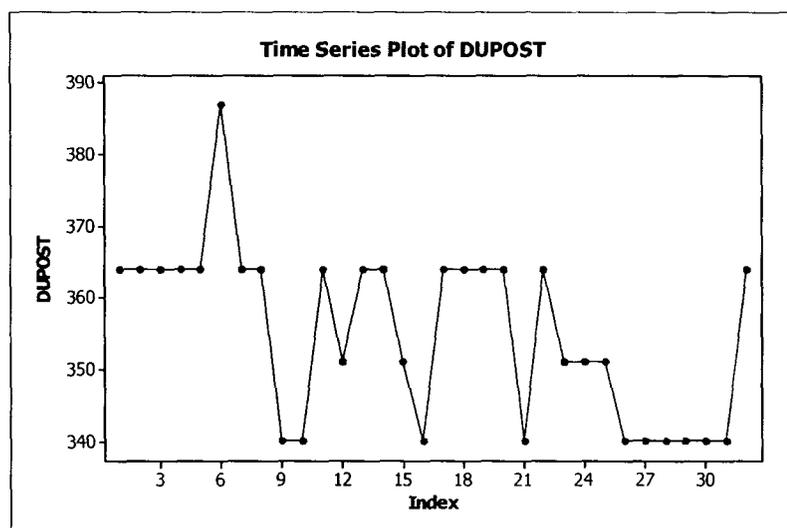


Fig. 5.1 Dureza de vertederas luego de revenido

Estos mismos datos traducidos a un gráfico de barras muestran como la mayoría de las vertederas no cumplen con la especificación.

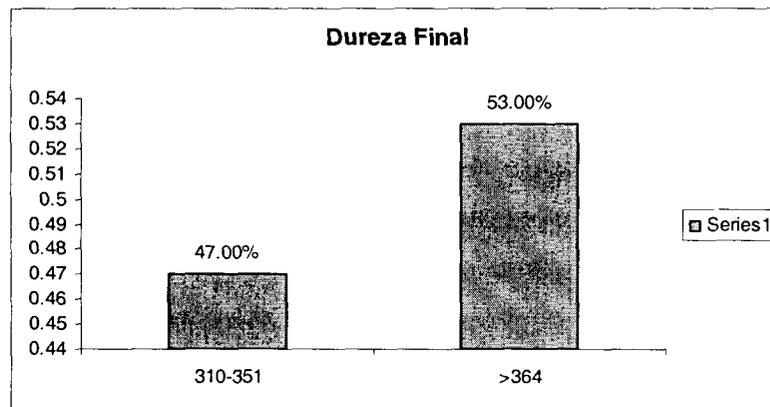


Fig. 5.2 Porcentaje de vertederas fuera de especificación de dureza

Ya que las piezas son generadas por lotes se obtuvieron los valores promedios para cada uno de los cuatro que se generaron durante los experimentos, en la gráfica inferior se puede observar que apenas uno de ellos en promedio posee una dureza dentro de especificación (Lote 4).

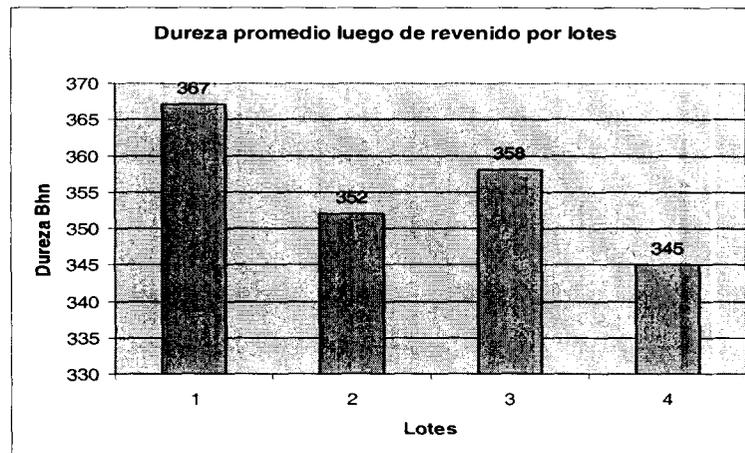


Fig. 5.3 Dureza promedio luego de revenido por lotes

En todos los lotes la temperatura de revenido que se empleo fue la misma y durante el mismo tiempo 60 min.

5.3 Análisis Estadísticos de datos de dureza

Aunque aparentemente existe diferencia entre la dureza promedio de cada uno de los lotes, se consideró apropiado desarrollar una prueba de hipótesis con el fin de establecer si esta diferencia era estadísticamente significativa. Los resultados obtenidos como se puede observar a continuación en la siguiente figura, demostraron que con un 95% de confianza podemos afirmar que las medias de las durezas de los lotes no son iguales.

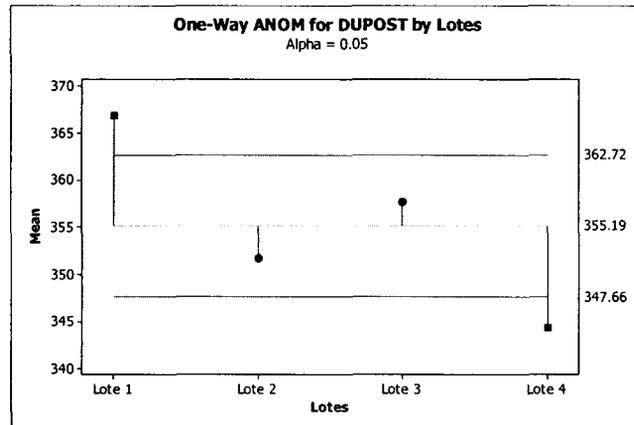


Fig. 5.4 Prueba de hipótesis media de las durezas de los lotes

Al desarrollar intervalos de confianza de la media para cada lote podemos descubrir que apenas el número 2 y 4 poseen intervalos que ingresan dentro de los límites de especificación permitidos, esto nos permite visualizar de que manera las medias de las durezas varían por lote.

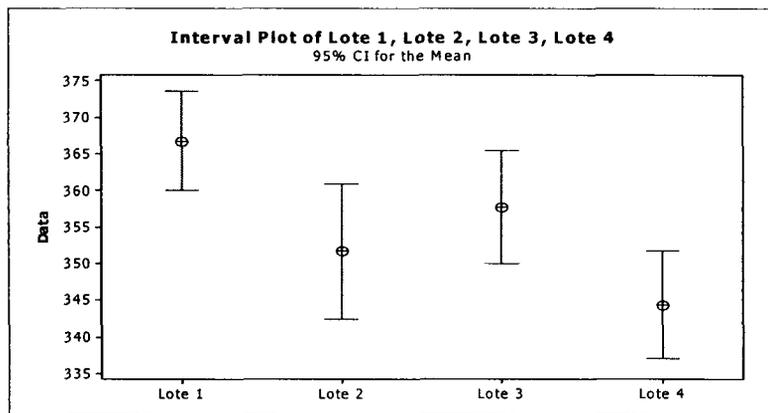


Fig. 5.5 Intervalos de confianza medias de dureza de los lotes

Aunque durante el proceso de revenido la temperatura de calentamiento y el tiempo de permanencia en el horno fueron los mismos, existieron otros factores durante las pruebas que pudieron haber afectado la dureza luego de revenido. Entre estos ellos tenemos.

- Precalibrado de las Piezas
- Temperatura de enfriado de Aceite
- Tamaño de los Apoyos del Contenedor
- Dureza de las piezas antes de revenido (Co-variable)

Con el fin de comprobar la influencia o no de estos factores se realizó un diseño de experimentos de parcelas divididas, manteniendo exactamente el mismo modelo empleado para la variable de respuesta tiempo de calibración (sección 4.4), con la única diferencia de que en este caso la variable de respuesta es la dureza luego de revenido, además de la introducción de la co-variable dureza antes de revenido. El modelo empleado es igual al que se uso para la variable de respuesta tiempo de calibración (sección 4.4)

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \theta_{ij} + \gamma_k + \delta_l + (\gamma\delta)_{kl} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + \varepsilon_{ijkl}$$

Los resultados obtenidos a partir del paquete estadístico MINITAB 14.0 fueron los siguientes. Los datos para el diseño pueden se encuentran en el Anexo (T_A10) .

General Linear Model: Dur rev versus Replica, Temperat, Apoyos, Precal

Factor	Type	Levels	Values
Replica	random	2	REP 1, REP 2
Temperat	fixed	2	100, 120
Apoyos	fixed	2	C, G
Precal	fixed	2	NOP, Precal

Analysis of Variance for Dur rev, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Dur ant	1	172.3	340.0	340.0	1.77	0.198
Replica	1	0.1	3.2	3.2	0.14	0.919 x
Temperat	1	101.9	134.3	134.3	4.53	0.704 x
Replica*Temperat	1	42.8	61.3	61.3	0.32	0.578
Apoyos	1	6.2	5.9	5.9	0.03	0.863
Precal	1	2.0	1.9	1.9	0.01	0.922
Temperat*Precal	1	169.5	173.2	173.2	0.90	0.353
Temperat*Apoyos	1	18.2	16.5	16.5	0.09	0.772
Apoyos*Precal	1	2.2	2.0	2.0	0.01	0.919
Temperat*Apoyos*Precal	1	102.4	102.4	102.4	0.53	0.473
Error	21	4031.3	4031.3	192.0		
Total	31	4648.9				

x Not an exact F-test.

S = 13.8552 R-Sq = 13.29% R-Sq(adj) = 0.00%

En el Análisis de Varianza anterior podemos observar que ninguno de los factores o sus respectivas interacciones influyen en la variable de respuesta dureza luego de revenido, incluyendo la co-variable dureza luego de temple. Esto excluyó de nuestras alternativas de mejora la modificación de cualquiera de estos factores.

5.4 Alternativa de Solución

Luego de analizar con los encargados del proceso las variables de influencia directa en el revenido como son: Tiempo y temperatura de revenido, se decidió elevar la temperatura del horno en 10°C y 20°C, todo esto basándonos en la experiencia de los expertos del proceso quienes conocían que a mayor temperatura menor nivel de dureza.

Con estas modificaciones se generaron dos lotes de producción compuestos por 8 vertederas de prueba cada uno, los cuales fueron revenidos a una temperatura de

538°C y 548°C, respectivamente. Los resultados de las durezas alcanzadas en estas piezas se presentan a continuación.

Temperatura de Revenido: 538°C			
TEMP	Pieza	Dureza A	Dureza D
558	1	460	340
558	2	512	321
558	3	652	340
558	4	495	340
558	5	380	334
558	6	450	320
558	7	377	340
558	8	445	321

Temperatura de Revenido : 548°C			
TEMP	Pieza	Dureza A	Dureza D
548	1	375	340
548	2	495	321
548	3	418	332
548	4	444	321
548	5	420	334
548	6	372	340
548	7	417	331
548	8	375	342

Tabla 5.1 Dureza de vertederas luego de cambio en proceso de revenido

Al analizar los promedios de la dureza luego de revenido para los dos lotes de prueba, veremos que no existe ninguna diferencia entre ellos tal como podemos observar en la siguiente figura y prueba estadística la cual no rechaza la hipótesis que afirma que en ambos lotes las medias de sus durezas son iguales.

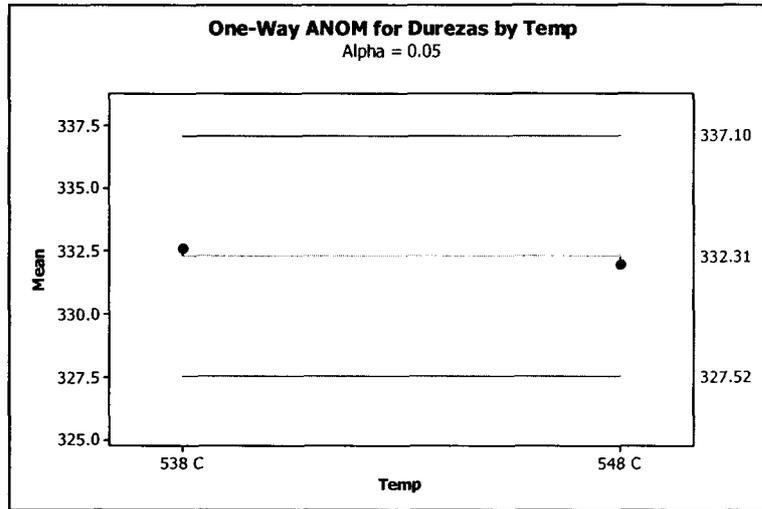


Fig. 5.6 Prueba de hipótesis media de dureza de lote de vertederas revenido modificado

Al desarrollar intervalos de confianza para cada uno de los lotes de prueba podemos observar que en los dos casos los límites de estos intervalos coinciden con los de las especificaciones deseadas (310-350 Bhn).

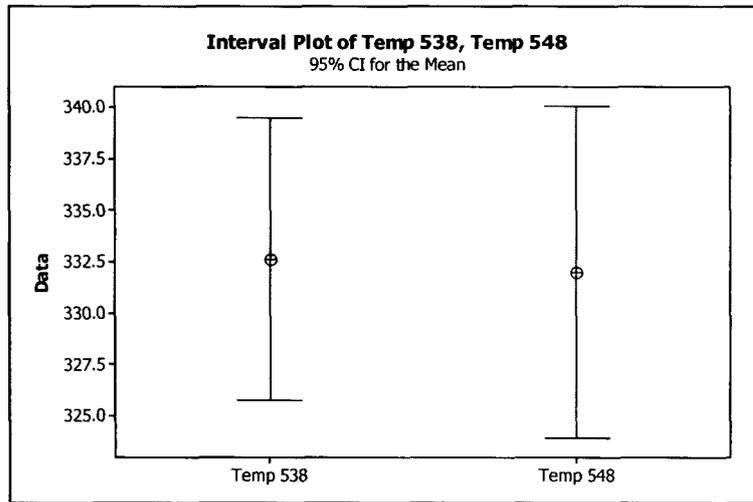


Fig. 5.7 Intervalos de confianza media de dureza de lote revenido modificado

5.5 Conclusiones de Análisis de Revenido

Luego de analizar los resultados de las pruebas se encontró que no existe ninguna diferencia entre las durezas de las piezas calentadas a 538°C y 548°C, se sugiere establecer para el proceso una temperatura de 550°C ya que normalmente la

temperatura tiende a disminuir en el horno. Con esta pequeña modificación en el proceso fue posible como se puede observar en la gráfica inferior, colocar la dureza de revenido dentro de la especificación establecida.



Fig. 5.8 Dureza luego de revenido dentro de especificación de cada pieza de prueba

Este cambio no únicamente significa mejorar las propiedades físicas de las piezas, las cuales hasta este momento habían tenido una fragilidad elevada que perjudicaba su tiempo de vida, sino además se orienta a reducir nuestra variable de respuesta de interés como es el tiempo de calibración, como se puede observar en el siguiente gráfico.

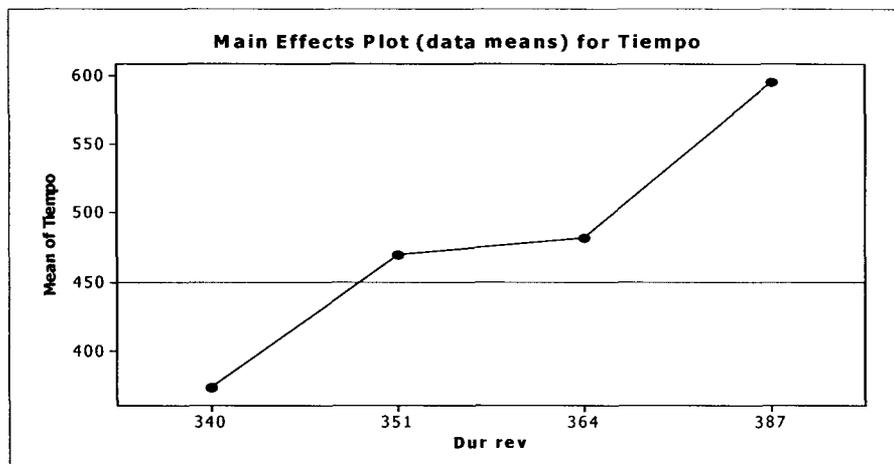


Fig. 5.9 Gráfico de efectos principales influencia de la dureza en tiempo de calibrado

Capítulo VI**Conclusiones****6.1 Conclusiones y Recomendaciones**

Luego del análisis estadístico del experimento se pudieron obtener las siguientes conclusiones con respecto al proceso de tratamiento térmico:

1. La dureza luego de revenido influye directamente en el tiempo de calibración de la vertedera esto se observa gráficamente en la figura inferior (fig. 6.1) donde se ven los intervalos de confianza para la media de los tiempos de calibrado (seg.) de piezas con dureza dentro (in) y fuera (out) de especificación. Por lo tanto el mantener un control sobre esta propiedad luego del tratamiento térmico será crítico para evitar un excesivo tiempo de calibración.

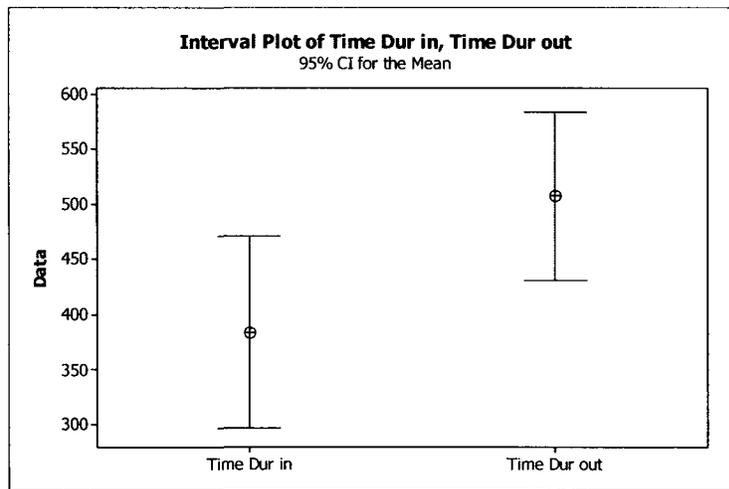


Fig. 6.1 Intervalos de confianza para la media de tiempos de calibración considerando dureza dentro y fuera de especificación.

2. La dureza puede ser establecida dentro de especificación (310 Bhn -350 Bhn), si como se vio a través de pruebas en el capítulo 5, el horno donde se produce el revenido se mantiene a temperaturas entre los 538°C y 548°C.
3. La dureza luego de revenido no se ve influenciada por la dureza inicial obtenida luego de la operación de temple, como se demostró en la sección 5.3, lo que

reduce las labores de control en lo que respecta a dureza únicamente a la salida de revenido.

4. La dureza luego de revenido no tiene relación con al menos ninguno de los factores estudiados durante la operación de temple como fueron: Temperatura de enfriado con aceite, tamaño de apoyos y Pre-calibración.
5. El que las piezas hayan pasado por la operación de Pre-calibración influye positivamente en una reducción en el tiempo de calibrado como se pudo observar en el gráfico de efectos principales (Fig. 4.13) en el capítulo 4. Se sugiere por tanto mantener esta operación vigente como medida preventiva temporal.
6. La Pre-calibración es una operación preventiva y puede ser eliminada si se considera desde el proceso de forja las siguientes características en el diseño y forma de la pieza:
 - La altura de la vertedera debe ser superior para cada uno de los doce puntos de control (Fig. 4.7) de modo que la curvatura de la misma sea más pronunciada, tal como se mostró en la sección 4.7.2 (Fig. 4.15).
 - Una mayor altura en los puntos de control luego de forja es importante debido a que durante el tratamiento térmico esta disminuye para cada punto sobre la pieza como se observó en la figura 4.17, lo cual reduce la curvatura de la misma. Para recuperar ésta se emplea el calibrado final, operación que podría ser eliminada si las piezas vinieran con una altura superior a la actual.
 - Durante la forja el operario debe considerar de manera especial la forma transversal de la pieza, ya que a mayor desviación (Vease el concepto de puntos co-lineales Fig. 4.6) mayor tiempo de pre-calibración y calibración final como se observó en la sección 4.7.3.
 - El área de la pieza donde la desviación transversal es crítica por su influencia en el tiempo de calibrado está comprendida entre las líneas transversales de puntos

co-lineales 1-3 y 4-6, por lo tanto comprende la zona inferior de la vertedera, esto se puede observar de manera más clara en el siguiente gráfico (Fig. 6.2).

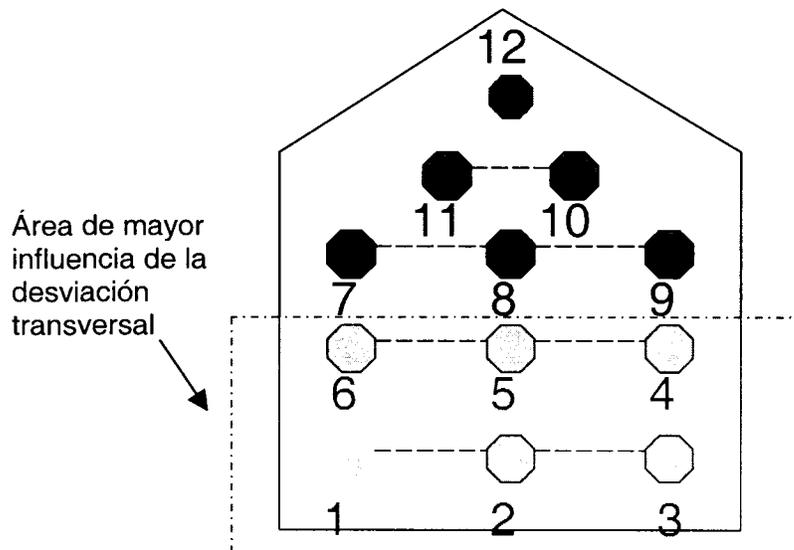


Fig. 6.2 Área de mayor influencia de la desviación transversal en la vertedera

7. Todas las recomendaciones provistas anteriormente para forja son actualmente desarrolladas durante el proceso de pre-calibración como medidas correctivas, por lo tanto el que las piezas pre-calibradas requieran un menor tiempo de calibrado final, dice implícitamente que las piezas con un diseño que posea mayor altura (curvatura) y menor desviación transversal requerirán menor tiempo de calibración pues generarán una menor deformación durante el tratamiento térmico.
8. La interacción entre los factores temperatura de enfriado de aceite y Pre-calibración influye en el tiempo de calibrado final (sección 4.7.4), de modo que si las piezas son pre-calibradas (lo cual puede entenderse como con forma adecuada) no existirá ninguna influencia por parte de la temperatura de aceite de enfriado que se usa en el temple con respecto al tiempo de calibración (Fig. 4.25). Por el contrario si la pieza no ha sido forjada correctamente o al menos no ha pasado por el pre-calibrado, una menor temperatura de aceite (100°C) generará mayor deformación y por ende la pieza requerirá de más tiempo al momento de su calibración final.

9. Se sugiere para reducir el efecto de fallas en forja al momento de dar la forma a la pieza, el mantener la temperatura de aceite en su nivel alto es decir 120°C de esa manera el choque térmico al momento del enfriado con aceite será menor y por ende la deformación no tan crítica.

6.2 Beneficios y resultados

Durante el año 2003 la empresa produjo un total de 548 piezas rechazadas, con un costo para la compañía solo en materiales de cerca de USD. 27.000, entre las causas tenemos:

- Fractura de la pieza por exceso de dureza durante el periodo de calibración.
- Excesiva deformación no corregida adecuadamente durante el calibrado final

Luego de que el proceso de tratamiento térmico en la empresa aplicara las siguientes tres recomendaciones generadas de la experimentación:

- Incremento de la temperatura de revenido a 548°C
- Elevación de temperatura de enfriado de aceite a 120°C
- Sistema de control de dureza por muestreo para vertederas luego de revenido.

No ha existido, hasta el momento (periodo de 4 meses), ninguna pieza vertedera rechazada, adicionalmente el tiempo de calibración se redujo en aproximadamente un 30%, este tiempo podría ser reducido mucho más si se aplicarán las recomendaciones referentes al proceso de forja ya que de esa manera la deformación final luego de tratamiento se vería reducida en gran medida y por ende el tiempo requerido para calibrado.

6.3 Investigaciones futuras

Las recomendaciones hechas con respecto a forja son en si el inicio de una investigación más profunda relacionada directamente con el campo de la manufactura, ya que sugiere el desarrollar procesos y/o herramientas que permitan dar a la pieza durante su formación las características de forma sugeridas.

Bibliografía

- Box, George E. P. (1993) Estadística para investigadores : introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos (3ra. ed) Barcelona: Editorial Reverté
- Breyfogle, Forrest W (2003). Implementing Six Sigma: smarter solutions using statistical methods. (2da. ed) New York: Wiley and Sons
- Conceptos Térmicos (2004) Obtenido el 11 de Septiembre de 2004 de la World Wide Web: <http://sifunpro.tripod.com/termos.htm>
- Drickhamer D. (2002).BASF break through with statistics. Industry Week,251, 81,82.
- G. Taguchi (1991). System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost (1ra. ed) New York: White Plains
- Hernández R., Fernández C., Baptista P. (2003). Metodología de la Investigación (3ra. ed) Mexico D.F.: Mc Graw-Hill Interamericana.
- Kowalski S. (2003). Design of experiments enhances race car performance. Scientific Computing & Instrumentation, Vol.20 Iss7, 28.
- Montgomery (1996). Introduction to Statistical Quality Control. (3ra. ed). New York: John Wiley and Sons
- Montgomery (2001). Design and Analysis of Experiments. (5ta. ed) New York:John Wiley and Sons
- Myers Raymond. and Douglas Montgomery (1995). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. (1ra. ed) New York: John Wiley and Sons.
- Smith A. (2002) GlaxoSmithKline shortens R&D cycle with JMP's design of experiments.Scientific Computing & Instrumentation, Vol.19 Iss 11, 20,23.

ANEXOS

T_A 1

Medición de puntos sobre vertedera antes del tratamiento térmico

Precalibrada	Nro. Pieza	PUNTO 1 (mm)	PUNTO 2 (mm)	PUNTO 3 (mm)	PUNTO 4 (mm)	PUNTO 5 (mm)	PUNTO 6 (mm)
NO	1	27.079	26.05	28.312	58.251	57.338	57.967
NO	2	27.422	26.777	28.214	57.138	56.333	56.825
NO	3	27.231	26.058	27.909	57.077	56.476	57.506
NO	4	27.665	27.119	28.336	56.154	56.706	57.948
NO	5	27.021	25.778	28.136	57.923	56.811	57.681
NO	6	27.857	27.731	28.129	55.916	56.575	57.75
NO	7	28.064	28	28.658	58.174	58.398	58.61
NO	8	27.71	27.235	28.441	58.907	57.908	57.941
NO	9	26.834	26.421	27.938	57.273	56.857	57.82
NO	10	27.494	27.525	28.898	59.4	58.386	57.87
NO	11	27.657	26.681	28.404	58.15	57.578	58.338
NO	12	27.375	27.239	28.475	57.066	56.378	56.466
NO	13	26.688	25.76	28.156	58.235	56.906	57.649
NO	14	26.517	26.794	27.809	55.42	54.746	54.683
NO	15	27.475	26.876	28.099	56.855	57.582	58.611
NO	16	27.611	27.19	28.01	56.176	56.109	57.138
SI	17	28.158	27.422	29.276	58.827	57.973	58.696
SI	18	28.884	29.097	29.711	59.81	59.827	59.246
SI	19	28.073	27.12	28.868	59.221	58.143	58.736
SI	20	29.008	28.171	29.314	59.716	59.197	59.612
SI	21	27.272	26.501	28.275	58.805	57.513	58.121
SI	22	28.619	27.492	28.923	59.154	58.33	59.127
SI	23	29.278	28.906	30.011	59.766	59.34	58.725
SI	24	28.702	27.89	29.346	59.761	59.188	59.301
SI	25	29.035	26.732	28.808	59.337	58.327	60.171
SI	26	28.473	26.933	29.015	59.663	58.238	58.684
SI	27	28.015	28.218	29.009	58.624	58.396	57.957
SI	28	28.114	27.706	29.3	59.81	58.934	58.51
SI	29	28.219	27.742	29.118	59.713	59.058	58.778
SI	30	27.445	26.466	28.036	58.336	56.866	57.737
SI	31	27.196	24.786	28.356	58.495	56.904	57.793
SI	32	27.326	26.087	27.635	57.516	56.593	58.358

Precalibrada	Nro. Pieza	PUNTO 7 (mm)	PUNTO 8 (mm)	PUNTO 9 (mm)	PUNTO 10 (mm)	PUNTO 11 (mm)	PUNTO 12 (mm)
NO	1	68.5	67.743	68.141	57.058	56.805	33.831
NO	2	67.089	66.618	66.898	55.535	56.209	33.236
NO	3	68.601	66.543	66.217	54.746	56.53	32.97
NO	4	68.839	66.745	64.831	54.189	57.298	32.97
NO	5	68.67	67.233	67.314	55.571	56.745	33.245
NO	6	68.183	66.174	65.06	54.36	56.187	32.791
NO	7	69.196	68.012	66.681	55.809	57.78	33.789
NO	8	67.963	68.322	68.893	57.764	57.07	34.407
NO	9	68.719	66.772	66.806	55.282	56.154	33.06
NO	10	68.349	68.735	69.117	57.467	57.765	34.309
NO	11	68.778	67.42	67.684	55.899	56.708	33.314
NO	12	66.567	66.121	66.644	54.97	55.577	32.996
NO	13	68.413	67.275	67.963	56.039	56.835	33.527
NO	14	64.799	64.287	64.704	53.882	54.515	32.696
NO	15	69.052	67.318	65.579	55.438	57.231	33.84
NO	16	66.78	67.858	65.801	55.034	55.549	32.978
SI	17	69.716	69.573	69.979	60.952	60.15	38.773
SI	18	70.026	70.426	69.989	59.802	60.136	37.195
SI	19	69.852	69.195	69.821	59.633	59.685	37.501
SI	20	70.673	70.84	70.767	61.228	61.062	39.149
SI	21	69.249	69.043	69.859	59.44	59.837	37.854
SI	22	69.944	69.991	70.444	59.922	59.633	37.59
SI	23	68.486	70.114	69.698	60.42	59.959	37.807
SI	24	70.029	70.123	70.253	60.121	59.976	37.668
SI	25	71.159	70.439	70.853	61.225	61.297	38.101
SI	26	69.45	69.659	70.623	60.5	59.929	38.219
SI	27	69.073	69.864	69.269	60.725	60.753	39.515
SI	28	69.727	70.26	70.725	60.737	60.302	38.392
SI	29	69.972	70.554	70.849	60.7	60.448	37.926
SI	30	69.003	68.415	69.261	59.608	59.952	38.626
SI	31	69.615	68.948	69.105	59.515	60.242	38.973
SI	32	69.682	68.296	68.629	59.298	59.783	38.148

T_A 2

Desviación entre puntos co-lineales antes de tratamiento térmico

Precalibrada	Nro. Pieza	DESV 1-3 mm	DESV 4-6 mm	DESV 7-9 mm	DESV 10-11 mm
NO	1	1.13253212	0.467237627	0.3786674	0.178898016
NO	2	0.71975204	0.405803319	0.236897305	0.476589971
NO	3	0.93646623	0.517387991	1.292613373	1.261478498
NO	4	0.60956897	0.91884928	2.00467354	2.198394983
NO	5	1.17957888	0.584808801	0.807286195	0.830143361
NO	6	0.20341419	0.929019375	1.582730025	1.291884089
NO	7	0.36283513	0.218027521	1.2582158	1.393707466
NO	8	0.60751159	0.567486564	0.46900995	0.490732106
NO	9	0.78429097	0.482982746	1.114415691	0.616597113
NO	10	0.80180068	0.778390647	0.384001736	0.210717821
NO	11	0.8640326	0.395838351	0.720034258	0.572049386
NO	12	0.67776495	0.374407977	0.282363241	0.429213816
NO	13	1.20809933	0.666043792	0.573132911	0.562856998
NO	14	0.68022276	0.40853682	0.272353324	0.447598592
NO	15	0.61154259	0.882317592	1.7365006	1.267842459
NO	16	0.41004918	0.575727656	1.028896982	0.364159992
SI	17	0.93353593	0.459928618	0.205934456	0.567099639
SI	18	0.42939764	0.330642304	0.24232829	0.236173665
SI	19	0.87518931	0.539900917	0.370694393	0.036769553
SI	20	0.59170009	0.274591211	0.083719771	0.117379726
SI	21	0.88952478	0.646372442	0.424341058	0.280721392
SI	22	0.75391268	0.468137088	0.276109278	0.20435386
SI	23	0.56224224	0.523351698	0.845811642	0.325976226
SI	24	0.7296136	0.303506727	0.11248111	0.102530483
SI	25	1.26919358	0.923398794	0.361347478	0.050911688
SI	26	1.08013024	0.728924093	0.625687089	0.403757972
SI	27	0.52518663	0.339016715	0.411930819	0.01979899
SI	28	0.82803945	0.662967068	0.499385956	0.30759145
SI	29	0.69870189	0.479869774	0.446258147	0.178190909
SI	30	0.7929504	0.739182206	0.43359428	0.243244733
SI	31	1.82110772	0.797329501	0.348720996	0.51406663
SI	32	0.81923806	0.882809719	0.723497754	0.342946789

T_A 3**Dureza Previo Revenido**

Precalibrada	Nro. Pieza	DUREZA PRE-REV (Bhn)
NO	1	600
NO	2	713
NO	3	683
NO	4	713
NO	5	627
NO	6	713
NO	7	652
NO	8	627
NO	9	600
NO	10	430
NO	11	555
NO	12	683
NO	13	512
NO	14	713
NO	15	418
NO	16	600
SI	17	512
SI	18	627
SI	19	627
SI	20	652
SI	21	713
SI	22	387
SI	23	652
SI	24	627
SI	25	627
SI	26	652
SI	27	744
SI	28	652
SI	29	652
SI	30	512
SI	31	600
SI	32	652

T_A 4**Dureza luego de revenido**

Precalibrada	Nro. Pieza	DUREZA REV (Bhn)
NO	1	351
NO	2	364
NO	3	364
NO	4	340
NO	5	340
NO	6	364
NO	7	364
NO	8	364
NO	9	351
NO	10	364
NO	11	340
NO	12	364
NO	13	364
NO	14	364
NO	15	340
NO	16	340
SI	17	364
SI	18	351
SI	19	340
SI	20	364
SI	21	364
SI	22	340
SI	23	364
SI	24	364
SI	25	340
SI	26	364
SI	27	387
SI	28	340
SI	29	351
SI	30	340
SI	31	364
SI	32	351

T_A 5

Medición de Puntos luego del tratamiento térmico

Precalibrada	Nro. Pieza	PUNTO 1 (mm)	PUNTO 2 (mm)	PUNTO 3 (mm)	PUNTO 4 (mm)	PUNTO 5 (mm)	PUNTO 6 (mm)
NO	1	26.552	24.19	27.255	55.447	55.106	56.635
NO	2	26.597	26.852	27.649	54.702	54.782	54.613
NO	3	26.919	26.33	27.471	55.771	55.914	56.503
NO	4	26.407	26.272	27.633	54.717	54.841	54.784
NO	5	26.182	24.337	27.314	56.485	54.293	55.679
NO	6	26.34	25.974	27.917	56.129	53.485	54.015
NO	7	27.464	28.819	27.9	56.012	57.113	56.649
NO	8	27.47	29.121	28.459	57.886	58.403	56.875
NO	9	26.617	26.59	27.067	55.808	56.09	56.707
NO	10	27.085	29.54	28.699	57.929	57.863	55.871
NO	11	27.302	27.628	27.972	56.663	57.098	57.091
NO	12	26.996	29.176	27.966	55.064	56.44	54.924
NO	13	26.474	27.546	28.204	57.04	56.656	56.297
NO	14	25.396	25.553	27.164	54.029	52.024	51.957
NO	15	27.535	28.004	27.978	56.001	57.362	57.605
NO	16	26.765	27.025	27.352	54.704	54.901	55.454
SI	17	27.453	27.202	28.418	56.847	56.48	56.805
SI	18	27.74	27.5	28.762	57.242	57.502	57
SI	19	27.995	28.427	28.742	57.784	58.219	58.652
SI	20	28.287	28.215	29.448	59.436	58.185	57.87
SI	21	27.337	28.182	28.435	58.702	58.025	57.568
SI	22	27.439	27.06	28.314	57.471	57.134	56.21
SI	23	27.775	28.767	29.251	57.321	57.535	55.441
SI	24	27.935	29.663	29.545	58.952	59.471	57.859
SI	25	27.26	25.494	27.542	56.618	55.107	56.753
SI	26	27.564	25.903	27.394	55.918	56.054	57.1
SI	27	27.806	28.513	28.839	58.173	57.313	57.338
SI	28	28.017	27.89	28.733	58.269	58.267	58.479
SI	29	27.287	28.7	28.81	58.435	58.892	56.467
SI	30	27.163	28.525	27.891	57.341	57.147	56.687
SI	31	26.13	26.458	28.063	56.986	56.421	55.493
SI	32	26.265	26.424	26.847	55.82	55.33	55.619

Precalibrada	Nro. Pieza	PUNTO 7 (mm)	PUNTO 8 (mm)	PUNTO 9 (mm)	PUNTO 10 (mm)	PUNTO 11 (mm)	PUNTO 12 (mm)
NO	1	66.211	66.178	63.494	54.955	55.666	33.74
NO	2	63.78	64.948	63.033	53.391	54.845	33.157
NO	3	65.573	65.374	65.014	54.524	54.246	32.921
NO	4	63.975	64.978	62.852	53.626	54.469	32.977
NO	5	64.927	65.198	65.233	53.935	54.947	32.971

NO	6	62.226	63.224	65.902	54.13	52.22	32.656
NO	7	66.014	66.753	63.034	54.443	56.498	33.898
NO	8	65.927	68.202	67.111	57.537	56.328	34.688
NO	9	66.242	66.235	64.472	54.727	55.396	33.446
NO	10	64.55	67.057	66.097	56.042	56.019	34.297
NO	11	66.474	66.894	64.986	55.141	55.997	33.622
NO	12	63.761	65.304	63.499	53.84	54.593	33.122
NO	13	66.004	66.193	65.429	54.69	55.843	33.53
NO	14	60.287	62.042	63.602	53.24	51.219	32.566
NO	15	66.409	66.878	63.602	54.947	56.197	34.084
NO	16	64.109	64.653	63.425	54.102	54.329	32.942
SI	17	66.262	68.1	66.926	59.088	58.558	38.685
SI	18	66.79	68.922	66.399	58.043	58.412	37.018
SI	19	68.746	69.237	67.239	58.319	59.232	37.467
SI	20	67.341	69.405	68.993	59.703	59.078	38.716
SI	21	67.635	69.092	69.053	59.266	59.121	37.941
SI	22	65.652	68.92	67.648	59.104	57.694	37.662
SI	23	63.91	68.308	66.254	58.434	57.736	37.534
SI	24	67.169	70.288	68.086	59.495	58.927	37.706
SI	25	67.17	67.714	66.499	58.63	59.439	38.057
SI	26	67.13	67.641	65.792	58.239	57.846	37.952
SI	27	68.142	69.088	69.018	60.954	60.029	39.33
SI	28	69.205	69.872	67.809	59.232	59.825	38.001
SI	29	66.017	70.139	68.589	59.873	58.94	38.078
SI	30	66.934	68.15	67.362	58.917	59.184	38.788
SI	31	66.475	67.918	66.464	58.311	58.716	38.543
SI	32	64.84	66.86	65.61	57.773	57.454	38.053

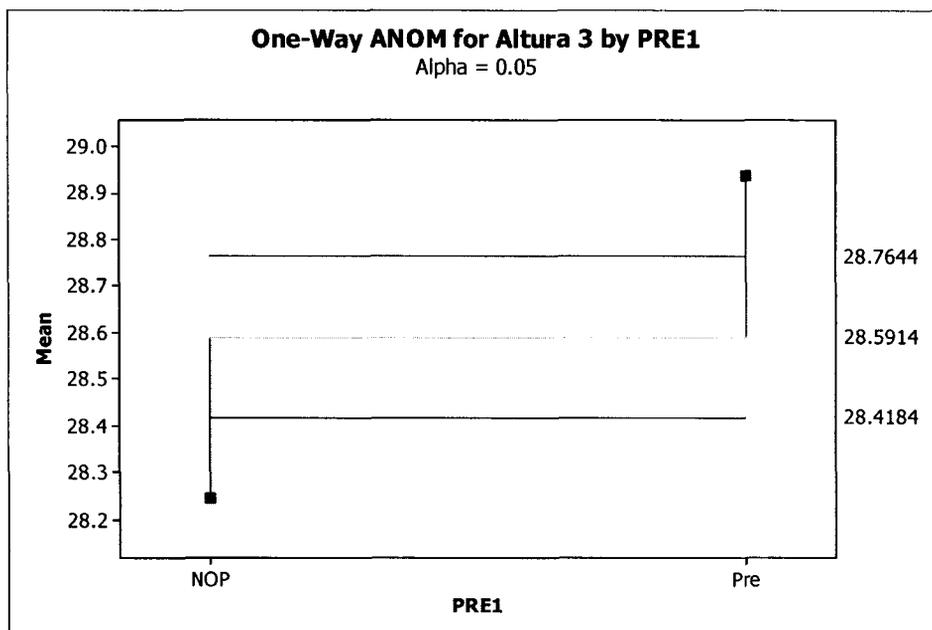
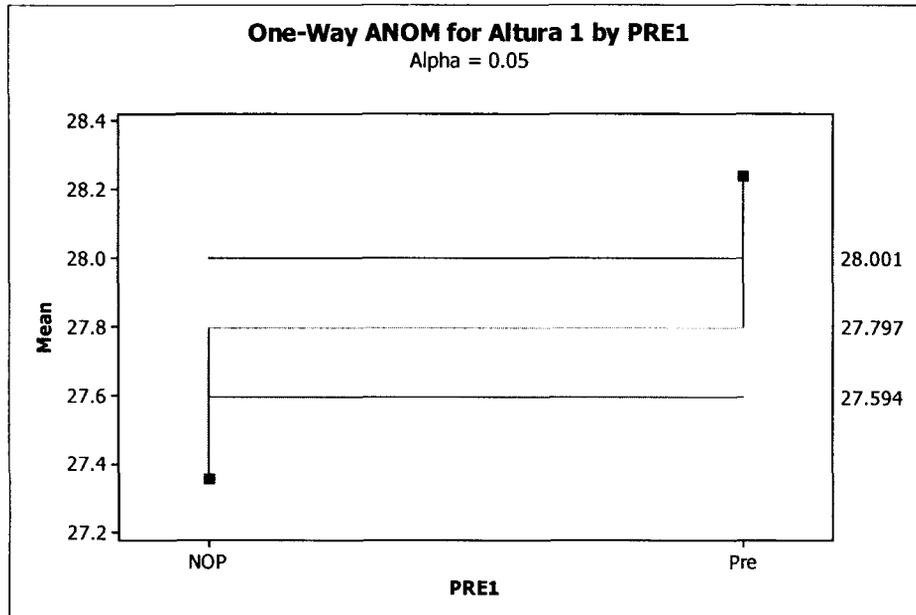
T_A 6**Medición Tiempos de Calibración**

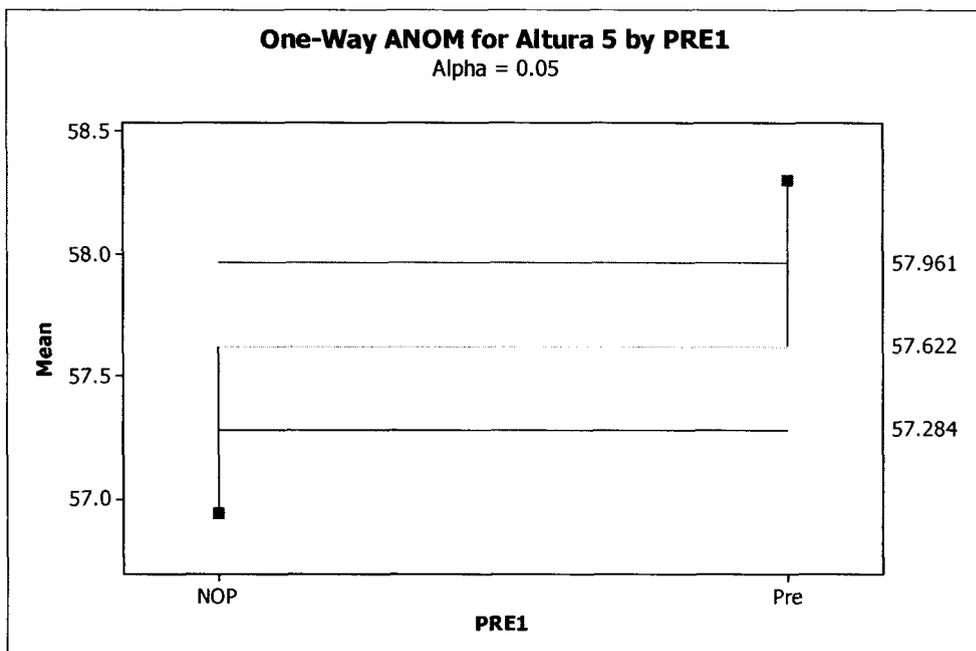
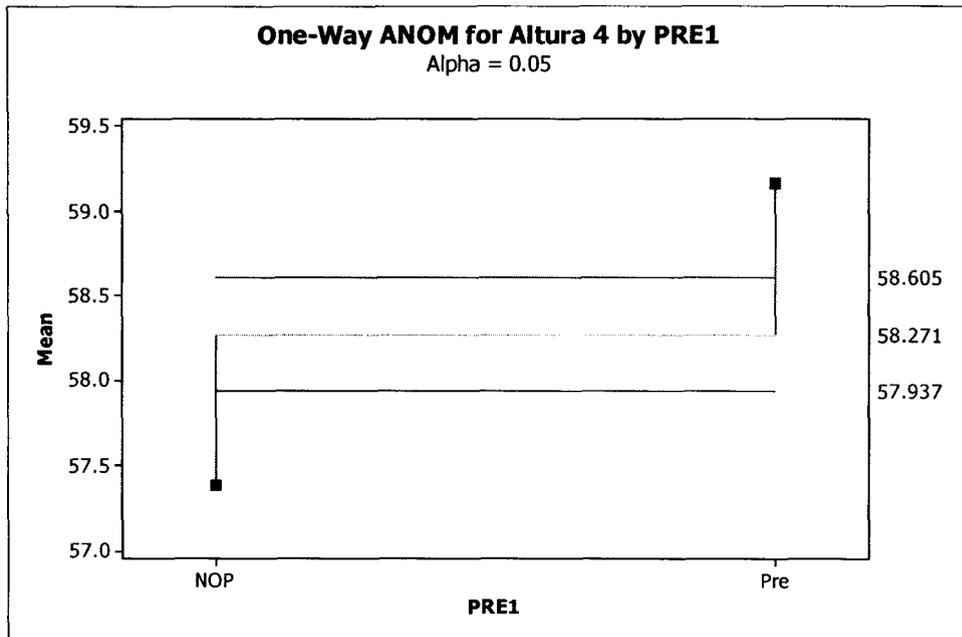
PIEZA	TIEMPO DE CALIBRACION (SEG)
1	528
2	659
3	350
4	546
5	365
6	519
7	640
8	532
9	480
10	461
11	444
12	891
13	550
14	519
15	595
16	162
17	386
18	295
19	315
20	380
21	370
22	395
23	595
24	435
25	420
26	241
27	559
28	178
29	568
30	403
31	542
32	64

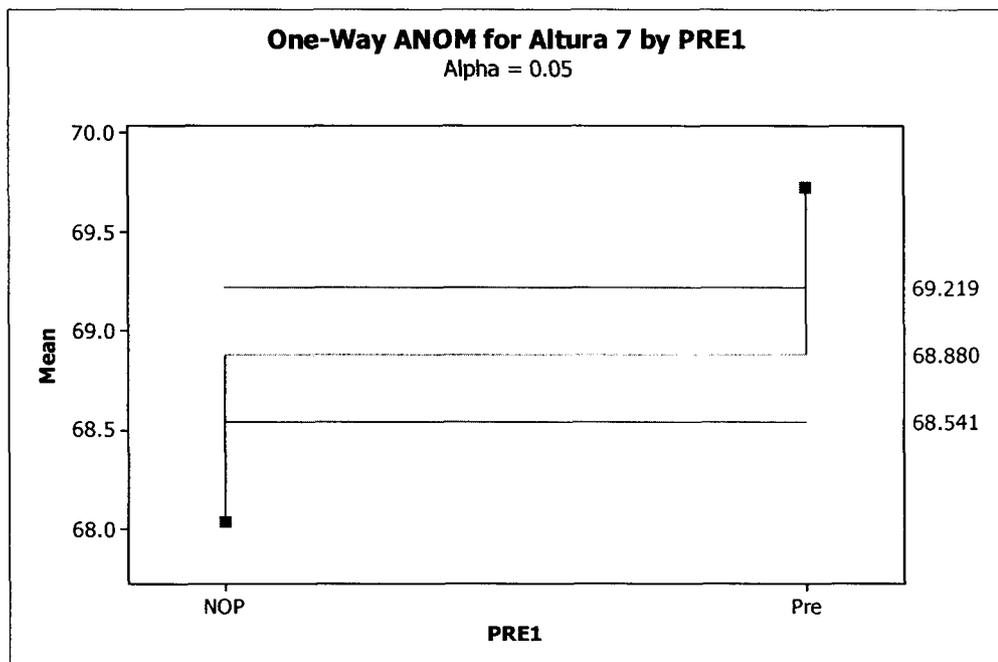
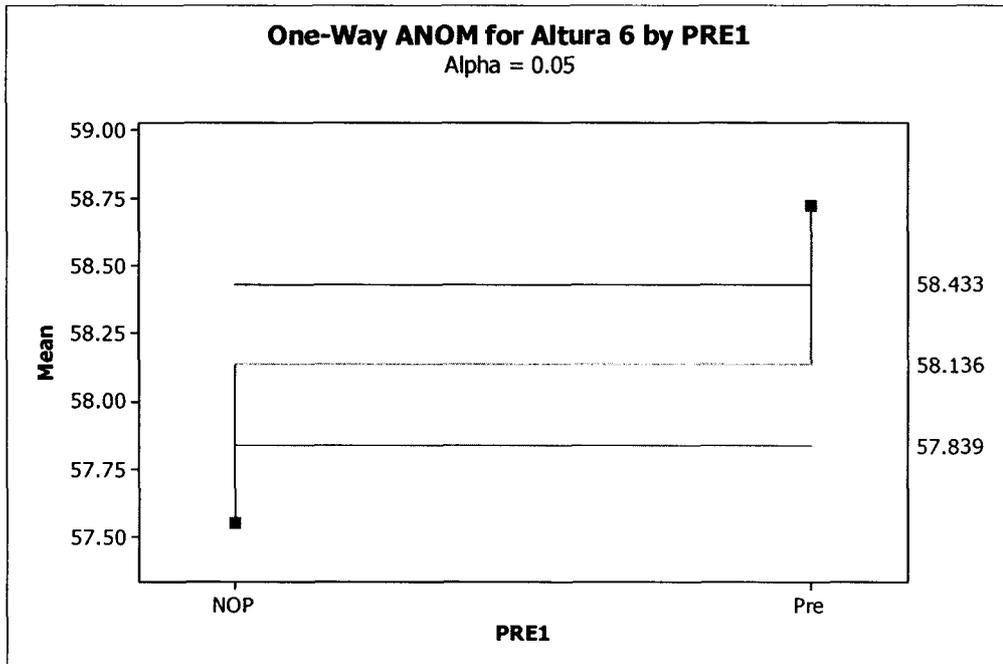
DATOS PARA DISEÑO DE PARCELAS DIVIDIDAS CON VARIABLE DE RESPUESTA TIEMPO DE CALIBRACION										
Pieza	Dureza luego de revenido	Desv 1-3	Desv 4-6	Desv 7-9	Desv 10-11	Replica	Temperatura	Apoyos	Precalibracion	Tiempo de Calibración
1	351	1.60559	0.80265	1.55922	0.50275	1	120	G	NOP	528
2	364	0.54878	0.08456	0.96518	1.02813	2	100	G	NOP	659
3	364	0.5706	0.38798	0.28334	0.19657	2	100	C	NOP	350
4	340	0.74985	0.06205	1.06356	0.59609	1	120	C	NOP	546
5	340	1.50266	1.10872	0.16748	0.71559	1	120	C	NOP	365
6	364	1.03248	1.39885	1.90091	1.35057	2	100	C	NOP	519
7	364	0.6917	0.55276	1.96882	1.4531	2	100	G	NOP	640
8	364	0.83088	0.77719	1.13782	0.85489	1	100	C	NOP	532
9	351	0.26794	0.45978	1.0199	0.47305	2	120	C	NOP	480
10	364	1.24762	1.1696	1.2649	0.01612	1	100	G	NOP	461
11	340	0.33504	0.24916	1.00258	0.60529	2	120	G	NOP	444
12	364	1.0922	0.83778	0.97532	0.53245	1	100	C	NOP	891
13	364	0.87322	0.37156	0.39792	0.81529	1	100	G	NOP	550
14	364	0.97859	1.1774	1.65846	1.42906	1	120	G	NOP	519
15	340	0.26359	0.8645	1.7716	0.88388	2	120	C	NOP	595
16	340	0.29414	0.38883	0.61533	0.1605	2	120	G	NOP	162
17	364	0.64199	0.20087	0.93072	0.37477	1	100	C	Precal	386
18	351	0.67016	0.25106	1.35793	0.26092	1	120	G	Precal	295
19	340	0.37502	0.434	1.04116	0.64559	2	100	G	Precal	315
20	364	0.69203	0.82831	1.09232	0.44194	1	100	G	Precal	380
21	364	0.57499	0.57054	0.83017	0.10252	1	100	C	Precal	370
22	340	0.64314	0.65287	1.64731	0.99702	2	120	C	Precal	395
23	364	0.75243	1.15218	2.20059	0.49356	1	120	C	Precal	595
24	364	0.9654	0.82285	1.60301	0.40163	2	100	G	Precal	435
25	340	1.11	0.91384	0.6086	0.57205	1	120	G	Precal	420
26	364	0.91387	0.64675	0.95482	0.27788	1	120	C	Precal	241
27	387	0.52808	0.48947	0.52713	0.65407	1	100	G	Precal	559
28	340	0.4545	0.12182	1.05275	0.41931	2	120	G	Precal	178
29	351	0.84934	1.28857	2.08201	0.65973	2	100	C	Precal	568
30	340	0.68154	0.3359	0.61681	0.18879	2	120	G	Precal	403
31	364	1.03442	0.75382	0.83631	0.28637	2	120	C	Precal	542
32	351	0.30082	0.24631	1.01946	0.22557	2	100	C	Precal	64

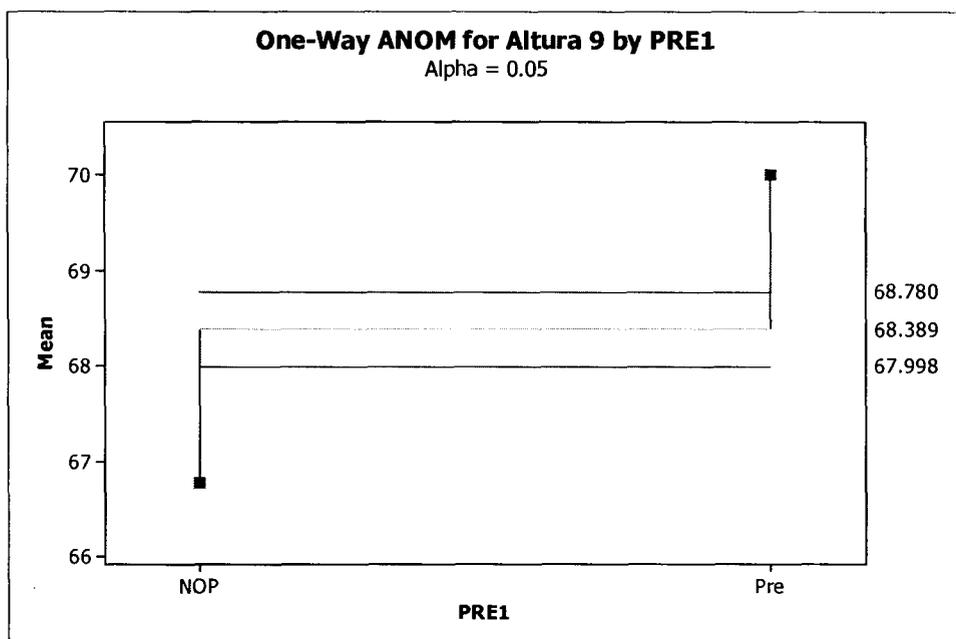
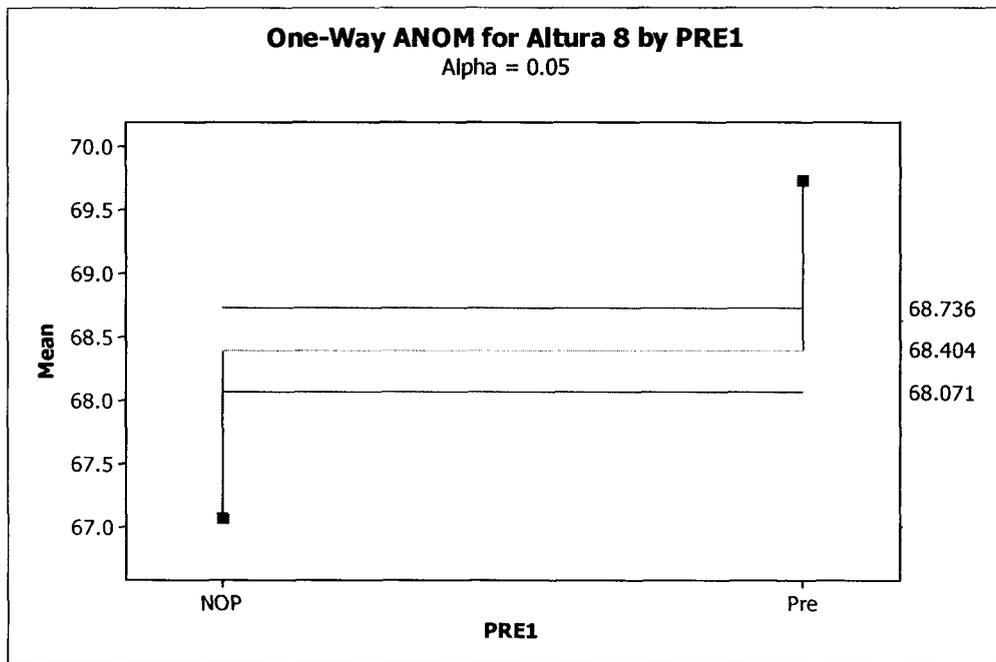
Anexo 8

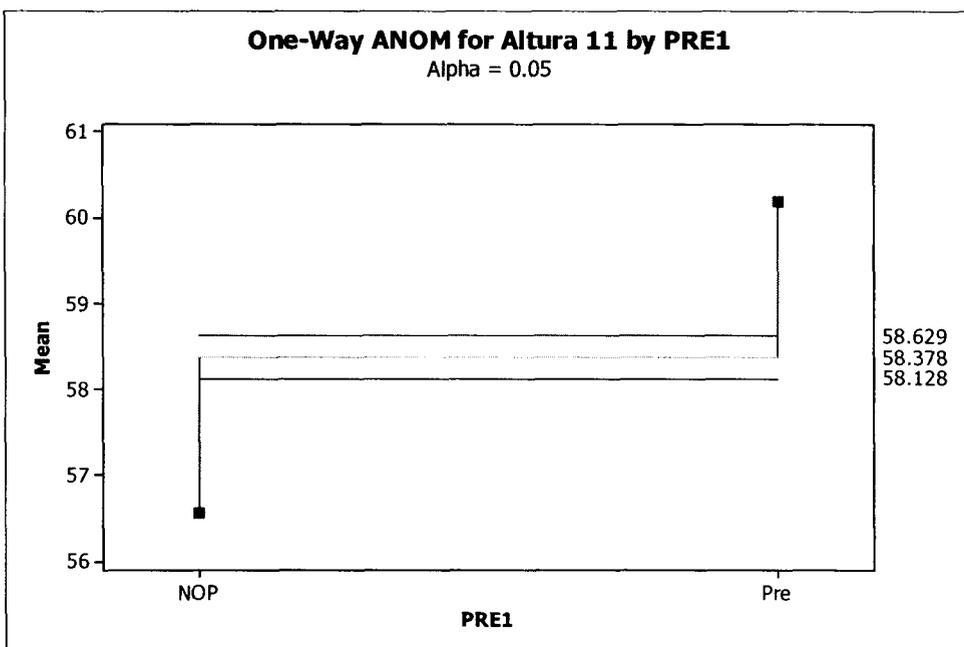
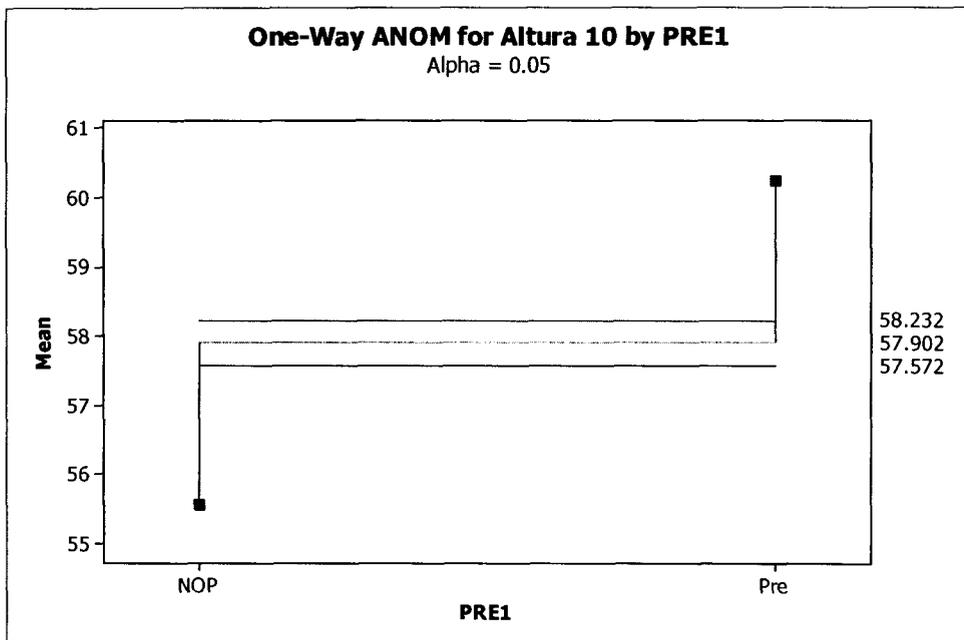
ANALISIS DE ALTURA DE LOS PUNTOS DE LA VERTEDERA ANTES DEL TRATAMIENTO TERMICO

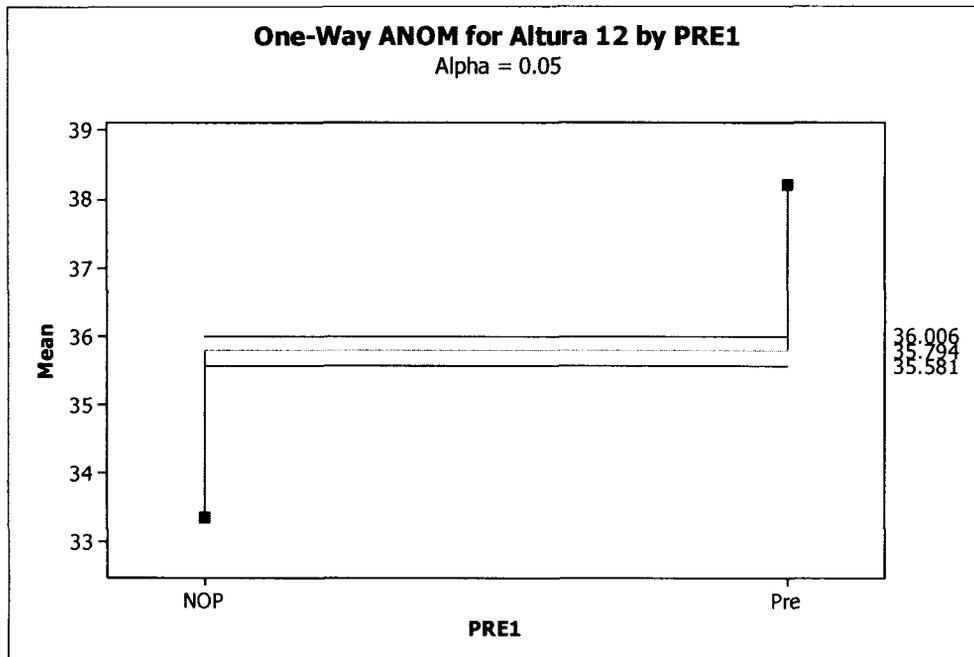






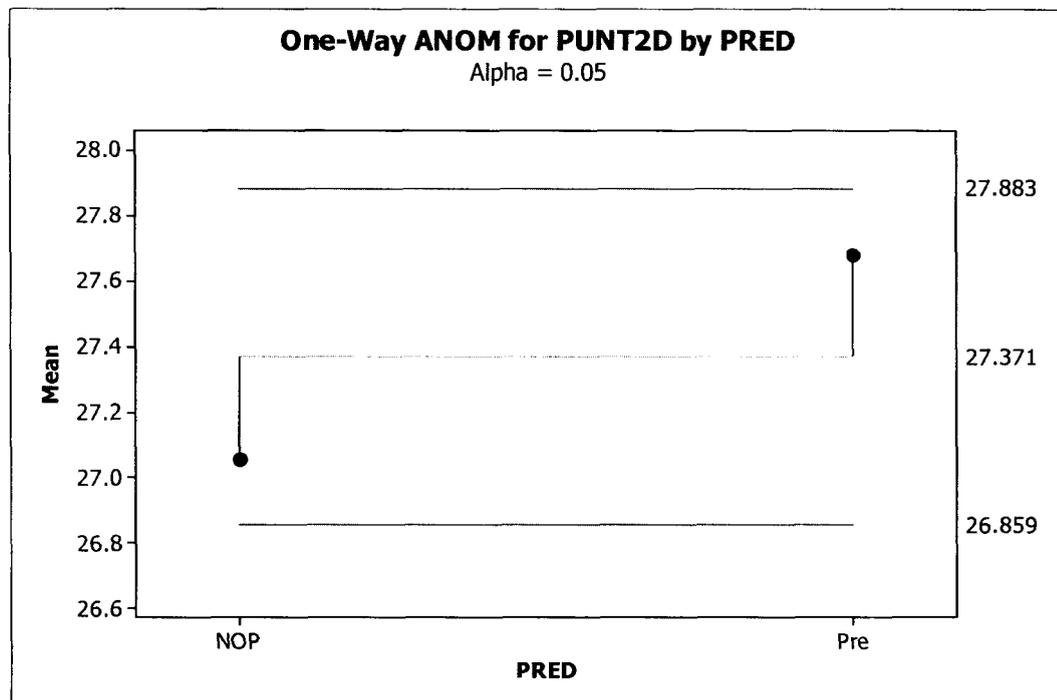
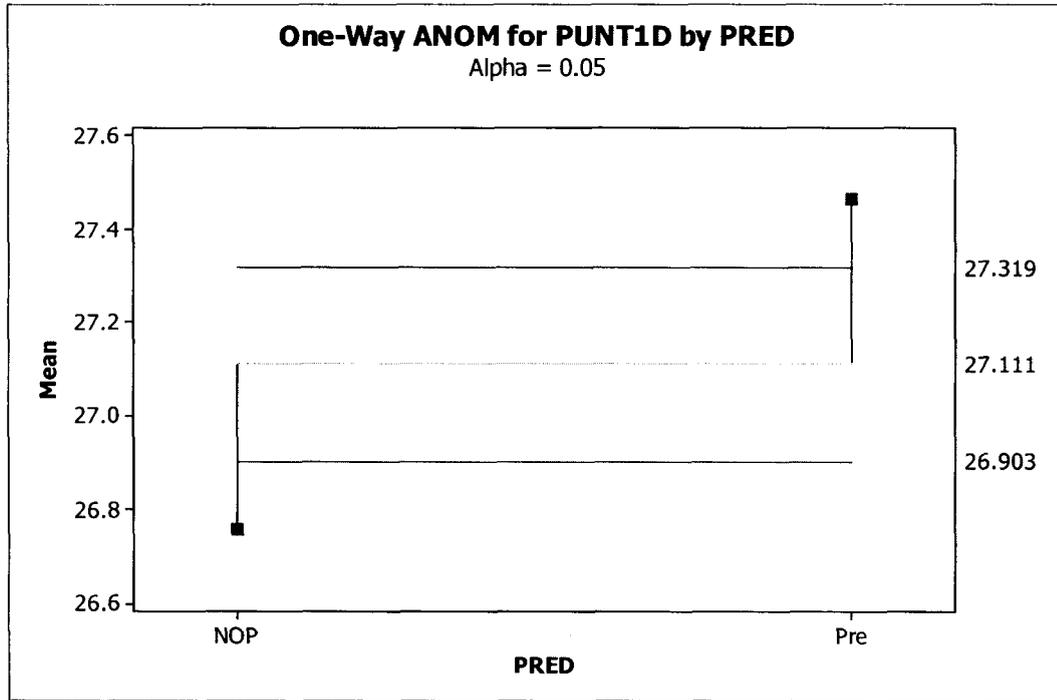


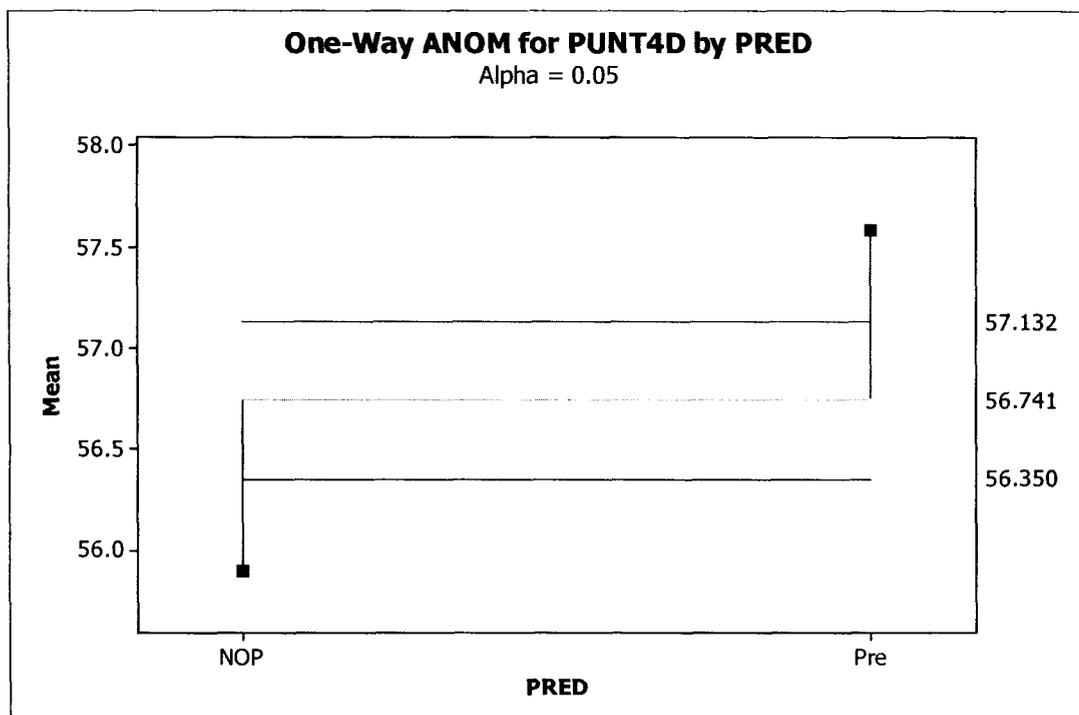
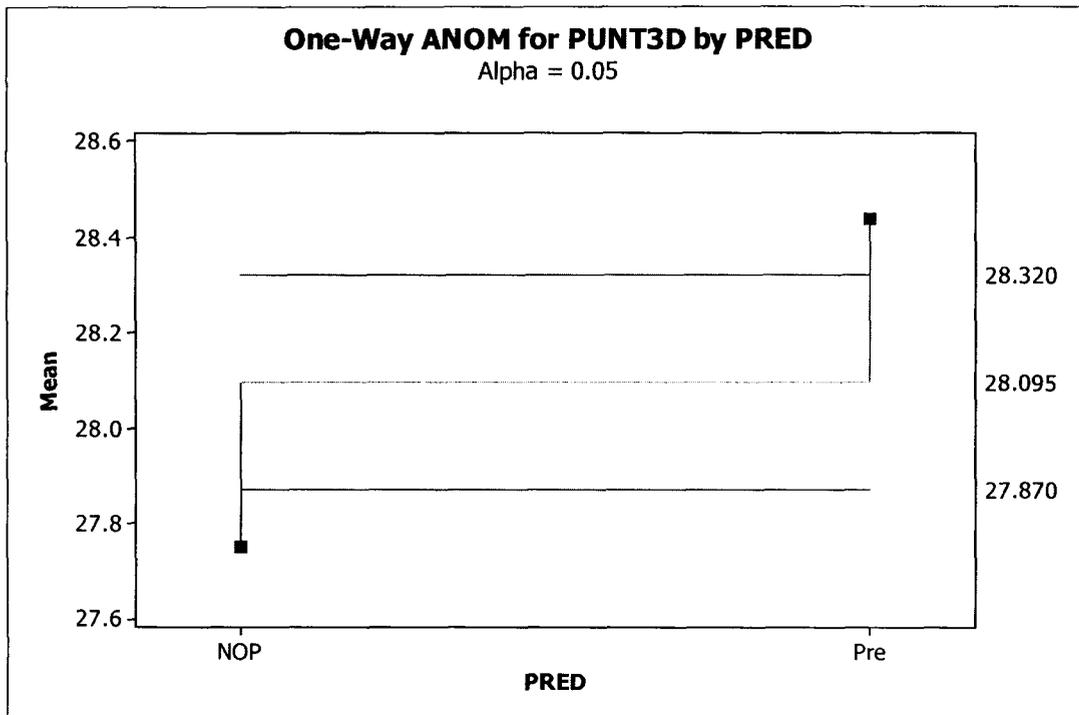


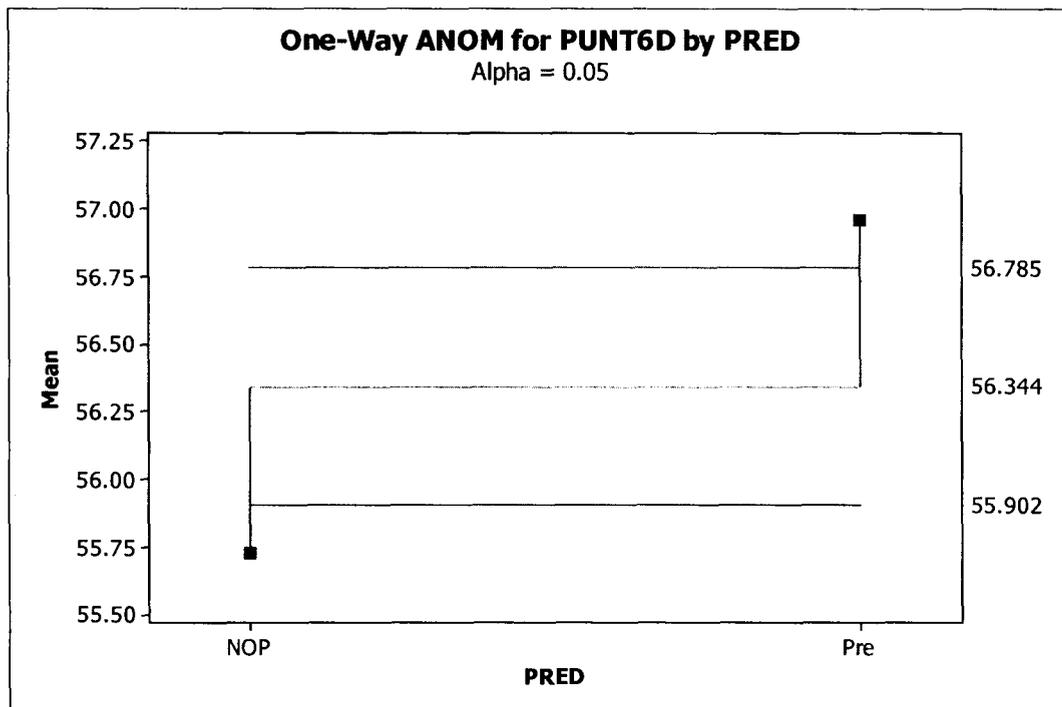
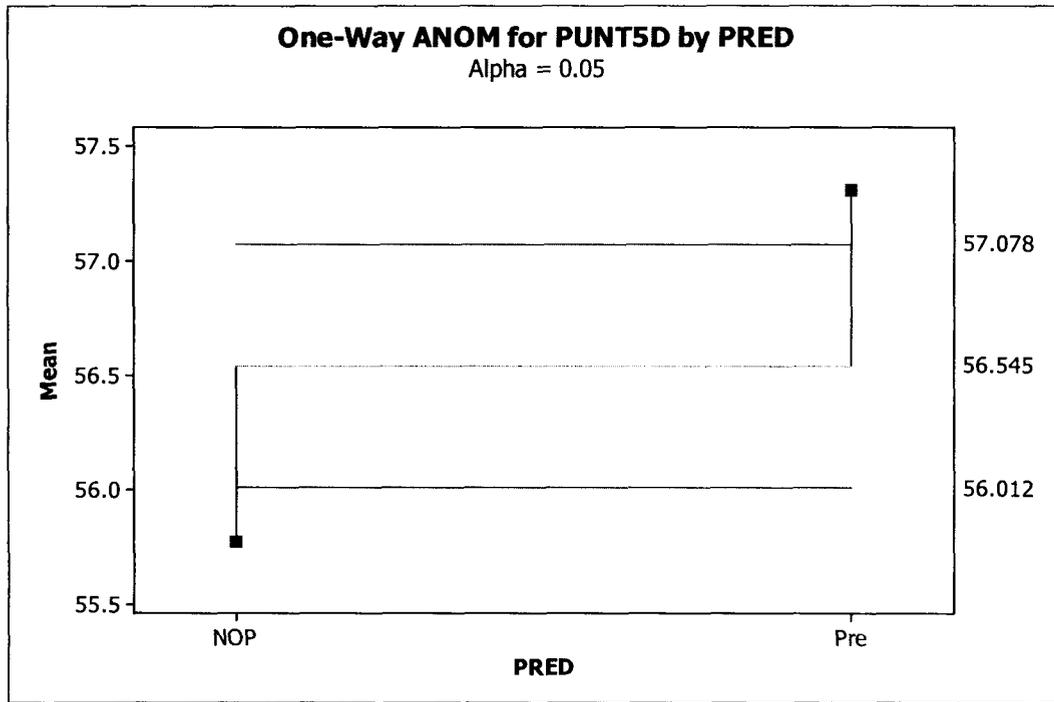


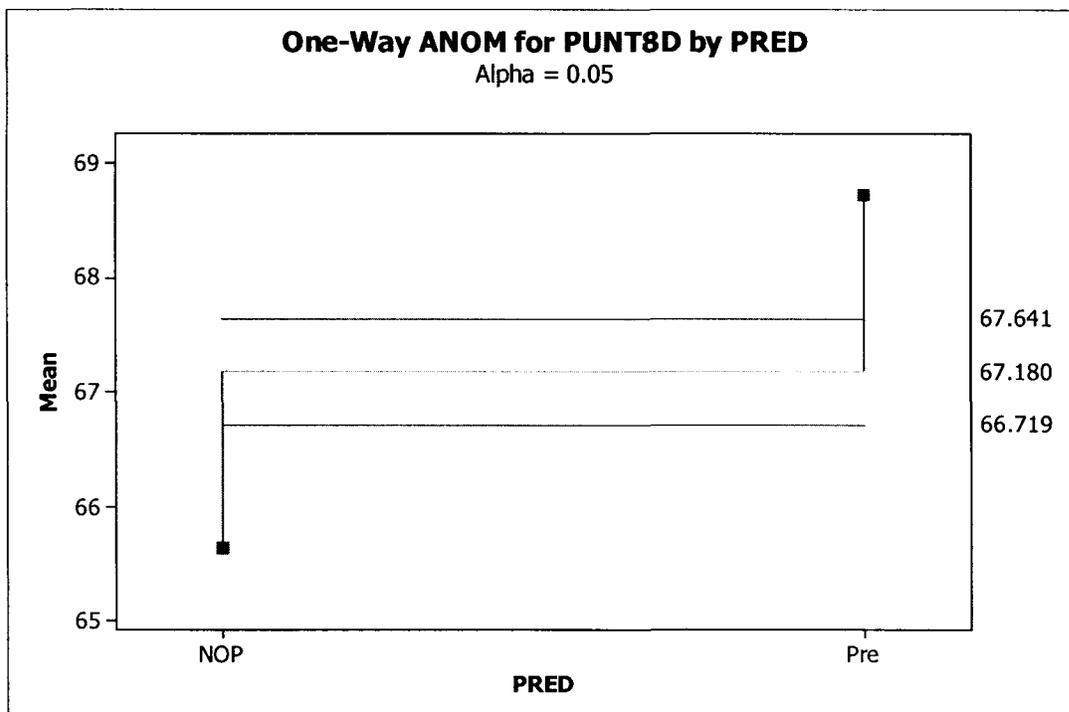
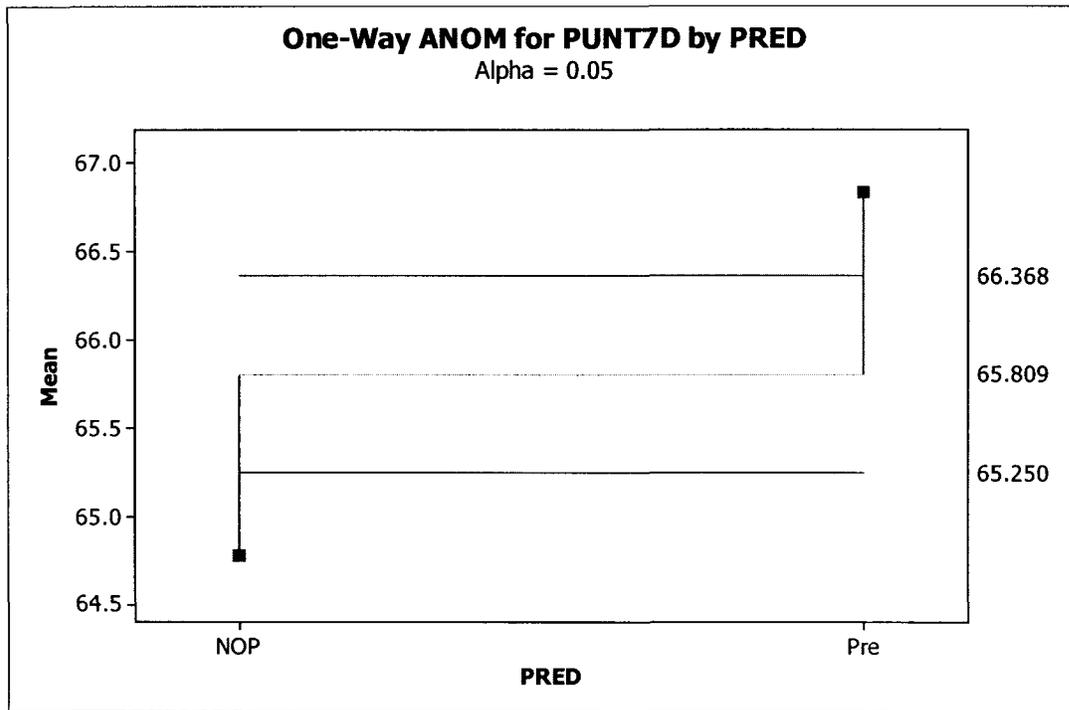
Anexo 9

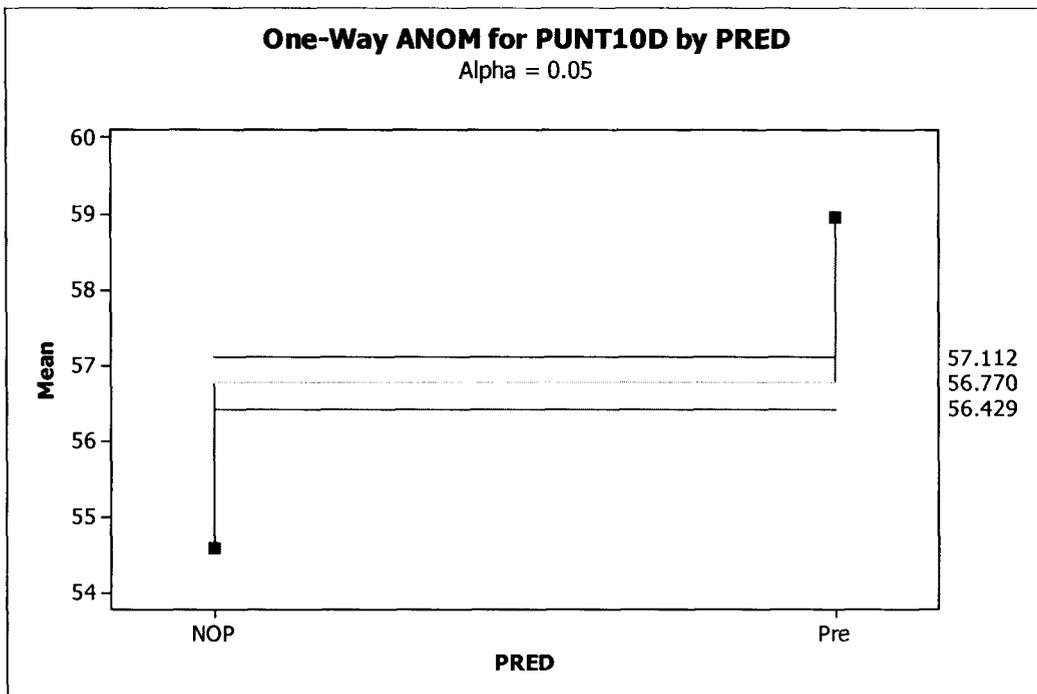
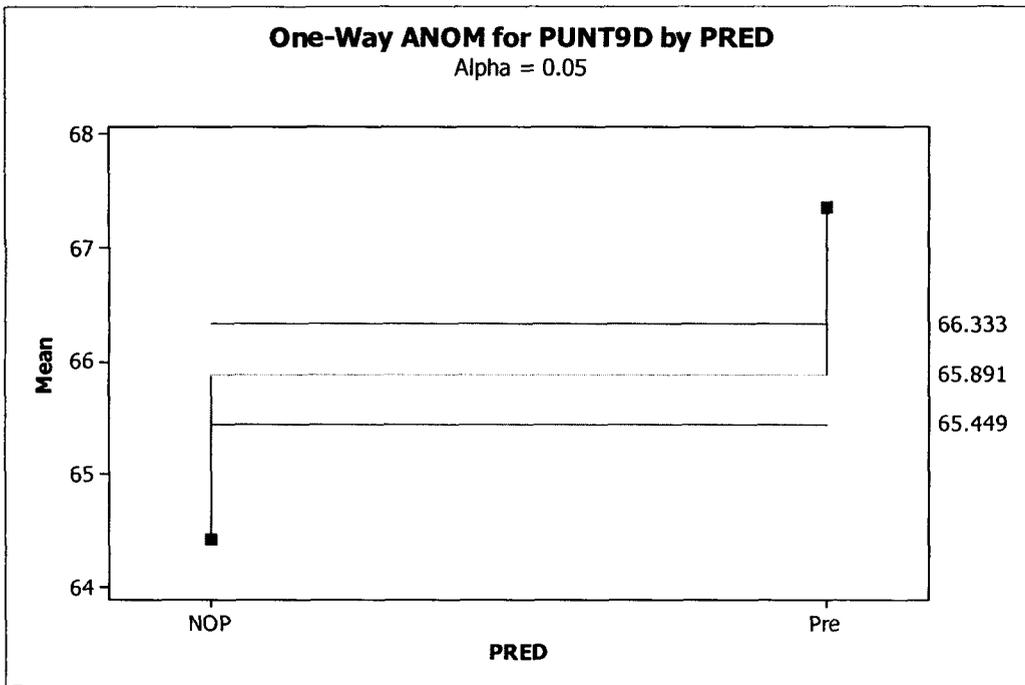
ANALISIS DE ALTURA DE LOS PUNTOS DE LA VERTEDERA LUEGO DEL TRATAMIENTO TERMICO

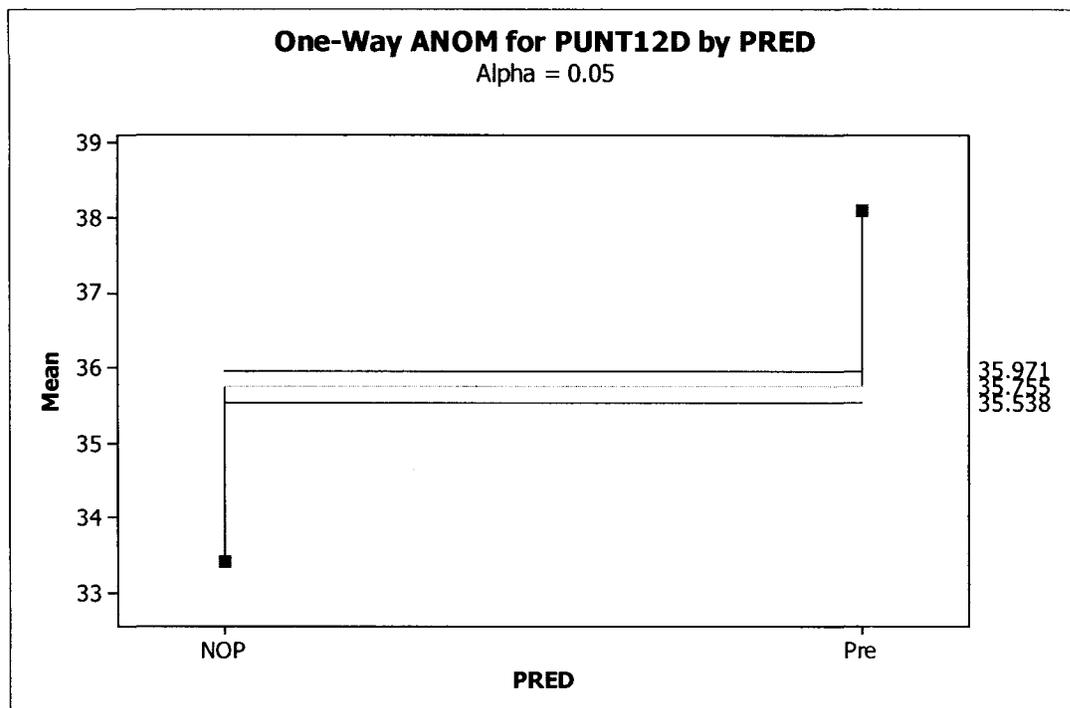
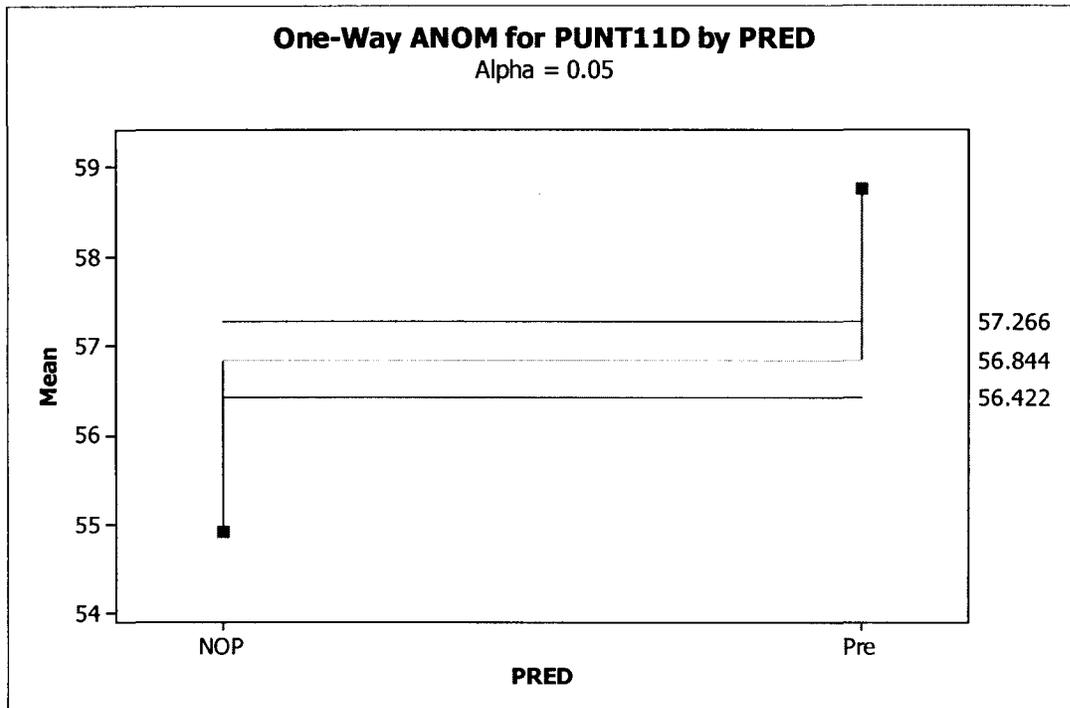












T_A10

DATOS DISEÑO PARCELAS DIVIDIDAS PARA DUREZA LUEGO DE REVENIDO					
Dureza antes de revenido	Replica	Temperatura	Apoyos	Precalibracion	Dureza luego de revenido
600	1	120	G	NOP	351
713	2	100	G	NOP	364
683	2	100	C	NOP	364
713	1	120	C	NOP	340
627	1	120	C	NOP	340
713	2	100	C	NOP	364
652	2	100	G	NOP	364
627	1	100	C	NOP	364
600	2	120	C	NOP	351
430	1	100	G	NOP	364
555	2	120	G	NOP	340
683	1	100	C	NOP	364
512	1	100	G	NOP	364
713	1	120	G	NOP	364
418	2	120	C	NOP	340
600	2	120	G	NOP	340
512	1	100	C	Precal	364
627	1	120	G	Precal	351
627	2	100	G	Precal	340
652	1	100	G	Precal	364
713	1	100	C	Precal	364
387	2	120	C	Precal	340
652	1	120	C	Precal	364
627	2	100	G	Precal	364
627	1	120	G	Precal	340
652	1	120	C	Precal	364
744	1	100	G	Precal	387
652	2	120	G	Precal	340
652	2	100	C	Precal	351
512	2	120	G	Precal	340
600	2	120	C	Precal	364
652	2	100	C	Precal	351

