TESIS
IC998
F3
V.1

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

DISEÑO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES POR IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO M.T.C.

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: 19

JURADO EXAMINADOR

Firma: _____
Nombre: ING. ANDRES PINAUID.

Firma: _____
Nombre: ING. AUGUSTO JUGO.

Firma: _____
Nombre: ING. GUSTAVO CORREDOR.

REALIZADO POR: FARRERAS OSUNA, SIMÓN JOSÉ.
LÓPEZ RODRÍGUEZ, FRANCISCO JOSÉ.

PROFESOR GUIA: ING. ANDRÉS PINAUID.

FECHA: OCTUBRE 1998.

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a quienes nos brindaron su guía y colaboración en la realización de este trabajo.

Ingeniero Andrés Pinaud.

Ingeniero Hugo Pérez Ayala.

Ingeniero Wickard Miralles.

Licenciada Josefina Osuna de Farreras.

Licenciada Egleé Mota de Rodríguez.

Julio Barreiro.

Carmy Silva.

Ingeniero Jaime Araujo.

A Freya y a Francisco, por darme lo mejor de sus vidas y ayudarme a ser alguien en la vida..

Francisco.

Dedico este Trabajo a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido en su realización.

Pero muy especialmente agradezco de corazón a:

Dios

Mi Papá

Mi Mamá

Ana V. Reyes

Armando Grisanti

Ligia Bolívar

Alessandro Castorina

Abfreddy Sanchez

Francisco López (Picky)

... y a todos aquellos que comparten conmigo la culminación de una etapa tan importante.

A todos ustedes Muchas Gracias ...

Simón Farreras Osuna.

SINOPSIS.

El *Método de Diseño de Pavimentos Flexibles del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (M.T.C.)*, fue desarrollado basándose tanto en la experiencia del comportamiento de los pavimentos diseñados y construidos en Venezuela con anterioridad al año 1975, como también en los criterios planteados en *the Manual Highway Construction Practices and Methods de la American Asocietion States Transport Official (A.A.S.H.T.O. 1972)* y en el *Shell Pavement Design Method* (1978). En la actualidad, en nuestro país se diseñan pavimentos flexibles mediante la aplicación de los métodos antes nombrados, con su correspondiente actualización a través de los años (*A.A.S.H.T.O.* 1986, *A.A.S.H.T.O.* 1993).

Cabe destacar que la función de un pavimento flexible es la de proveer una superficie confortable y resistente al tránsito, sirviendo a éste de manera segura, cómoda, eficiente, permanente y ***económica***. Lo que trae como consecuencia constantes investigaciones que incorporen mejoras a los métodos de diseño.

El objetivo principal de este trabajo es complementar el modelo estructural, tomado como base para el desarrollo del Método M.T.C. Investigaciones realizadas (Método *Shell*), han demostrado, que las capas granulares (base y subbase) que forman parte de la estructura de pavimento flexible, trabajan estructuralmente (trasmiten y distribuyen los esfuerzos provenientes del tránsito) hasta cierto límite de espesor de capa, el cual depende principalmente de su módulo de elasticidad, del módulo de elasticidad de la subrasante y de la intensidad del tránsito que sobre ella actúa (N_t).

Se plantea determinar y establecer estos límites de espesores de capa de forma rápida y sencilla, a través de ecuaciones y presentarlos en tablas en función de los parámetros de diseño y de las características de los materiales granulares para base y subbase.

Para lograr el objetivo propuesto, las investigaciones fueron dirigidas hacia la evaluación del Método de Diseño *Shell*, el cual contempla las restricciones de espesor de capa para materiales granulares de base y subbase. Tomando en cuenta las restricciones existentes de los materiales de construcción de una estructura de pavimento flexible en nuestro país establecidos en la Norma COVENIN 2000-87, tanto como por su disponibilidad.

El trabajo contempla una herramienta que facilita el cálculo de estructuras de pavimento flexible constituidas por capas asfálticas y capas granulares, donde éstas se diseñan bajo el Método M.T.C., tomando en cuenta los límites de espesores de materiales granulares.

La importancia del estudio radica en la optimización del uso de materiales en la estructura de pavimento.

ÍNDICE

Introducción. 1

Objetivos. 3

Capítulo I. Generalidades. 4

1. Pavimento Flexible. 5
   1.1 Introducción. 5
   1.2 Definición. 5
   1.3 Aspectos Generales de la Estructura del Pavimento. 5
2. Materiales Usados en un Pavimento Flexible. 7
   2.1 Materiales Granulares. 7
   2.2 Mezclas Asfálticas. 8
3. Aplicación de Esfuerzos en la Estructura del Pavimento. 8

Capítulo II. Capas Granulares. 12

1. Tipos y Procedencia. 13
2. Clasificación según la Norma COVENIN 2000-87. 13
3. Propiedades Generales. 14
   3.1. Densidad y Estabilidad. 14
   3.2. Efecto de las Partículas Fracturadas. 17
   3.3. Efecto de la Plasticidad. 17
   3.4. Efecto de la Discontinuidad. 18
   3.5. Resistencia a la Abrasión e Impacto. 18
   3.6. Textura Superficial. 18
   3.7. Limpieza. 19
   3.8. Permeabilidad. 19
   3.9. Fenómeno de Intrusión. 19
4. Funciones Básicas. 20
5. Especificaciones. 21

Capítulo III. Métodos de Diseño. 25

1. Shell Pavement Design Method. 26
   1.1 Introducción. 26
   1.2 Modelo de la Estructura del Pavimento. 27
   1.3 Criterios de Diseño. 28
      1.3.1 Generalidades. 28
      1.3.2 Deformación Permisible por Compresión en la Subrasante. 29 30
      1.3.3 Esfuerzo en las Capas Asfálticas. 30
      1.3.4 Esfuerzos en Capas Granulares. 30
      1.3.5 Deformación Superficial. 30
   1.4 Principios de Diseño. 31

1.4.1 Tráfico. 31
1.4.2 Temperatura y Clima. 32
1.4.3 Subrasante. 33
1.4.4 Materiales de Base y Subbase. 33
1.4.5 Capas Asfálticas. 35
1.4.5.1 Rigidez de las Mezclas Asfálticas. 35
1.4.5.2 Fatiga de las Mezclas Asfálticas. 36
1.5 Diseño Estructural. 37
1.5.1 Cartas de Diseño. 37
1.5.2 Uso de las Cartas de Diseño. 38
1.5.3 Capas Granulares. 39
2. Método de Diseño de Pavimentos Flexibles del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (M.T.C.) 40
2.1 Introducción. 40
2.2 Principio de Diseño. 41
2.2.1 Tránsito. 41
2.2.2 Estructura del Pavimento. 42
2.2.3 Consideraciones Estructurales. 42
2.2.4 Factor Regional. 42
2.2.5 Características de los Materiales. 44
2.2.5.1 Materiales Cohesivos y Granulares. 44
2.2.5.2 Mezclas Asfálticas. 44
2.2.5.3 Material Seleccionado. 45
2.2.6 Ecuación de Diseño. 46
2.2.7 Coeficiente Estructural. 47
2.2.8 Capacidad Estructural. 48
2.2.9 Espesor Mínimo de Capa Asfáltica. 48

Capítulo IV. Obtención de Espesores Máximos Estructurales. 50

1. Hipótesis. 51
2. Obtención de la Información en las Cartes de Diseño HN del Método Shell 1978. 51
2.1 Criterios Utilizados en la Obtención de Valores. 51
2.2 Relación entre el Espesor del Material Granular que Brinda Aporte Estructural y su Relación de Soporte C.B.R. 53
2.3 Obtención de las Cartas HN para C.B.R. de Subrasante de 3.75, 7.5 y 15. 54
3. Metodología y Procedimiento. 59
4. Expresiones / Tabla de Valores. 62
5. Análisis de Resultados 64

Capítulo V. Especificaciones para Venezuela. 65

1. Introducción. 66
2. Espesores Máximos Para Venezuela. 67
3. Incorporación de Consideraciones Estructurales Complementarias al 70

Método M.T.C.
4. Desarrollo del Programa de Diseño. 70
4.1. Introducción. 70
4.2. Objetivos. 71
4.3. Alcances y Limitaciones. 71
4.4. Desarrollo del Método M.T.C. con el Aporte Complementario. 72
4.4.1. Selección del Modelo. 72
4.4.2. Introducción de datos. 72
4.4.3. Procesamiento de la Información. 73
4.4.4. Resultados. 73
4.4.5. Ajuste del Diseño. 74
5. Ejemplo. 74

Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones. 77
1. Conclusiones. 78
2. Recomendaciones. 79

Bibliografía. 84

Anexos. 85

ÍNDICE DE GRÁFICOS.

Capítulo I. Generalidades.

1.1 Curva esfuerzo Penetración dada por Boussinesq 10
1.2 Curva esfuerzo Penetración dada por Burmister 11

Capítulo II. Capas Granulares.

2.1 Variación de valores de Peso Unitario y de C.B.R. en función del Contenido de Finos en una Mezcla de Grava con Granos Redondeados de Textura Lisa. 15
2.2 Variación de valores de Peso Unitario y de C.B.R. en función del Contenido de Finos en una Mezcla de Piedra Picada con Granos Triturados de Textura Aspera. 15
2.3 Variación de valores de Peso Unitario y de C.B.R. en función del Contenido de Finos y Tamaño Máximo de la Mezcla de Agregados. 16
2.4 Comparación de valores de C.B.R. en muestras de igual Densidad, en función del Porcentaje de Finos en Mezclas de Agregados. 16
2.5 Efecto de la Plasticidad sobre la Resistencia Triaxial de una Grava. Tamaño Máximo igual a 1 " 17

Capítulo III. Métodos de Diseño.

1. Shell Pavement Design Method.
   3.1.1. Factores de Ponderación vs Temperatura Mensual. 32
   3.1.2. Rigidez de la Mezcla vs Rigidez del Ligante Asfáltico. 35
   3.1.3. Rigidez de la Mezcla vs Temperatura de la Mezcla. 36
   3.1.4. Deformación por Fatiga del Asfalto vs Rigidez de la Mezcla. (Para distintas curvas N y F_1) 37
   3.1.5. Deformación por Fatiga del Asfalto vs Rigidez de la Mezcla. (Para distintas F_i y F_2) 37
   3.1.6. Tipos de Cartas de Diseño (HN, TN, EN, HT) 38
   3.1.7. Determinación de Espesores Requeridos. 39

2. Método de Diseño de Pavimentos Flexibles del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (M.T.C.).
   3.2.1. Servicapacidad vs Período de Diseño. 41
   3.2.2. Factor Regional (Rta) vs TMAA. 43
   3.2.3. Coeficientes Estructurales 47
   3.2.4. Espesores Mínimos por Fatiga de la Capa Asfáltica. 49

Capítulo IV. Obtención de Espesores Máximos Estructurales.

4.1 Comportamiento de los Valores que Definen a los Materiales 52

Asfálticos (Fatiga, Rigidez, Penetración)
4.2 Obtención de Espesores Máximos que brindan aporte estructural extraídos de las Cartas HN-25 para $N=10^8$. 53
4.3 Curvas H2 vs. $C.B.R._{SR}$ para Rangos de $C.B.R._{MG}$ 53
4.4 Extracción de valores H_1,H_2 de las Cartas HN-25 y HN-57 para $N=10^8$ 55
4.5 S1-Pen 50- $C.B.R._{SR}$=3.75 (HN-25 y 57) w-MAAT=28°C
4.6 Curva H2 vs. $C.B.R._{SR}$ para Rangos de Valores de $C.B.R._{MG}$ y N 55
4.7 Ajuste Lineal para la Obtención de las Líneas Límites. 56
4.8 Líneas Límite para distintas condiciones de Mezcla Asfáltica para el mismo valor de $C.B.R._{SR}$ 56
4.9 HN-25, HN-57, HN- 89, HN-121. 57
4.10 Líneas Límites. 58
4.11 Curvas de Correlación de H2 vs. $C.B.R._{SR}$ para Rangos de $C.B.R._{MG}$. 59
4.12 Correlación entre a y b vs. Log(Nt) para de H2 vs. $C.B.R._{SR}$ para Rangos de $C.B.R._{MG}$. 60
4.13 Correlación a_1, a_2 y b_1, b_2 vs. $C.B.R._{SR}$ para Rangos de $C.B.R._{MG}$. 61

ÍNDICE DE TABLAS.

Capítulo II. Capas Granulares.

2.1 Clasificación de los Materiales Granulares en la Norma COVENIN 2000-87. 13
2.2 Características de los Estados Físicos Mezclas de Materiales Granulares. 15
2.3 Especificaciones Generales para Materiales Granulares de Base y Subbase. 22-23
2.4 Granulometrías de Distintos Materiales Granulares Recomendados. 24

Capítulo III. Métodos de Diseño.

2. Método de Diseño de Pavimentos Flexibles del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (M.T.C.).
3.2.1 Coeficientes Estructurales Usados en el Desarrollo de la Ecuación de Diseño del N.E.V. 41

Capítulo IV. Obtención de Espesores Máximos Estructurales.

4.1 Valores de H_2 vs C.B.R.$_{SR}$ 53
4.2 Valores de H_1-H_2 Obtenidos de las Cartas HN-25 y HN-57. 55
4.3 Ecuaciones de las Líneas Límites para Distinto C.B.R.$_{SR}$ 58
4.4 Ecuaciones de las Líneas Límites para Distinto C.B.R.$_{SR}$ 58
4.5 Valores de a y b de las Líneas Límites. 58
4.6 Valores de H_2 vs C.B.R.$_{SR}$ 59
4.7 H_2=a*Ln(C.B.R.$_{SR}$)+b para cada Nt y cada rango de C.B.R.$_{MG}$ 59
4.8 Valores de a y b vs Log(Nt) para cada rango de C.B.R.$_{MG}$ 60
4.9 Valores de a1, a2, b1y b2 vs C.B.R.$_{MG}$ 61
4.10 Ecuación general de H_2 62
4.11 Fórmula H_2=*f*(C.B.R.$_{SR}$, Nt, C.B.R.$_{MG}$) para Pen50-28°C-S_1 62
4.12 Ecuaciones H2=*f*(C.B.R.$_{SR}$, Nt, C.B.R.$_{MG}$) 62
4.13 Espesores Máximos de Material Granular de Base y Subbase para Diferentes Condiciones de C.B.R$_{SR}$-Nt-C.B.R.$_{MG}$ 63
4.14 Valores Obtenidos de las Fórmulas, Extraídos de las Cartas HN y Su Desviación. 64

Capítulo V. Incorporación al Método M.T.C.

5.1 Penetración del Cemento Asfáltico recomendada según la TMAA en Venezuela. 66
5.2 Espesores Máximos de Material Granular de Base y Subbase Recomendados Para Venezuela con un C.B.R$_{SR}$=2.5 y Diferentes Condiciones de Nt-C.B.R$_{mg}$ y Penetración del Cemento Asfáltico. 67
5.3 Espesores Máximos Ponderados Recomendados de Material Granular de Base y Subbase con un C.B.R$_{SR}$=2.5, Nt=10^8y Diferentes Condiciones de C.B.R$_{mg}$ recomendados para Venezuela 68
5.4 Ecuaciones Eg=*f*(C.B.R.$_{SR}$, Nt, C.B.R.$_{MG}$) Recomendadas para Venezuela 68
5.5 Espesores Máximos de Material Granular de Base y Subbase para diferentes

Condiciones de C.B.R.$_{SR}$, Nt, C.B.R.$_{MG}$ Recomendados para Venezuela. 69
5.6 Rango de Validez de cada una de las Variables que se consideran en el Programa. 72

Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones.

6.1 Espesores que brindan aporte estructural para materiales granulares contemplados en la Norma COVENIN 2000-87 para un C.B.R$_{SR}$=2.5. 80
6.2 Espesores que brindan aporte estructural para materiales granulares contemplados en la Norma COVENIN 2000-87 para un C.B.R$_{SR}$=5. 81
6.3 Espesores que brindan aporte estructural para materiales granulares contemplados en la Norma COVENIN 2000-87 para un C.B.R$_{SR}$=10. 82
6.4 Espesores que brindan aporte estructural para materiales granulares contemplados en la Norma COVENIN 2000-87 para un C.B.R$_{SR}$=15. 83

ÍNDICE DE FIGURAS.

Capítulo I. Generalidades.

1.1 Estructura Típica de un Pavimento Flexible. 6
1.2 Diagrama de Esfuerzos para una Capa. 9
1.3 Sistema de dos Capas. 10

Capítulo II. Capas Granulares.

2.1 Estados Físicos de las Mezclas de Materiales Granulares. 14

Capítulo III. Métodos de Diseño.

1. Shell Pavement Design Method.
   3.1.1. Modelo Estructural del Pavimento. 26
   3.1.2. Criterios de Diseño (a-b-c). 27
   3.1.3. Módulo Dinámico de Elásticidad de la Subrasante o Material Granular. 34

2. Método de Diseño de Pavimentos Flexibles del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (M.T.C.).
   3.2.1. Curva típica N en una Carta HN. 40
   3.2.2. Análisis Estructural de Pavimento. 48

Capítulo IV. Obtención de Espesores Máximos Estructurales.

4.1 Variables de la Mezcla Asfáltica tomadas en Cuenta. 52

Capítulo V. Incorporación al Método M.T.C.

5.1 Esquema de Procedimiento del Programa. 72
5.2 Primera Fase. 75
5.3 Segunda Fase. 75
5.4 Resultados del Programa. 76
5.5 Resultados del Programa Ajustados. 76

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Capítulo I. Generalidades.

1.1 Boussinesq1. 9
1.2 Boussinesq2. 9

Capítulo II. Capas Granulares.

2.1 Criterio ante el Fenómeno de Intrusión. 20

Capítulo III. Métodos de Diseño.

1. Shell Pavement Design Method.
   3.1.1. Ubicación del Máximo Esfuerzo en la Capa Asfáltica. 29
   3.1.2. $\varepsilon_3=f(N)$. 30
   3.1.3. $E_i=f(C.B.R._i)$. 33
   3.1.4. $E_2=f(E_3,K_2)$. 34
   3.1.5. $K_2=f(H_2)$ 34

2. Método de Diseño de Pavimentos Flexibles del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (M.T.C.)
   3.2.1. Relación entre H_1,H_2 y N.E.V. 40
   3.2.2. Rg. 43
   3.2.3. Nt. 43
   3.2.4. $e_{minMS.}$ 45
   3.2.5. $C.B.R._{equiv.}$ 45
   3.2.6. $N.E.V._{req}$ 46
   3.2.7. $N.E.V._{col.}$ 48
   3.2.8. Relación entre $N.E.V._{col}$ y $N.E.V._{req}$ 48

INTRODUCCIÓN.

El diseño de pavimentos ha evolucionado basándose en la experiencia acumulada, las nuevas investigaciones y la evaluación de su comportamiento, surgiendo de ésta forma una variedad de métodos de diseños en concordancia con las características propias de cada región. No obstante, ellos tienen principios comunes, que permiten establecer criterios de diseño.

Un pavimento flexible no es más que la superestructura de una vía, construida sobre el terreno de fundación (subrasante), y compuesta por distintas capas donde cada una brinda aporte estructural, cuya función principal es la de soportar las cargas rodantes y distribuir los esfuerzos a la subrasante, de tal forma que no se produzcan deformaciones permanentes. Este mismo debe servir al tránsito de manera segura, cómoda, eficiente, permanente y económica.

El método de diseño *M.T.C*, está fundamentado en el análisis de la Teoría Elástica, el cual considera al pavimento como un sistema multicapa elástico lineal, donde los materiales se caracterizan por su módulo de elasticidad y por la relación de Poisson. Se asume que los materiales son homogéneos e isotrópicos, que las capas son infinitas en dirección horizontal y finitas en la dirección vertical, con excepción del terreno de fundación que se considera infinito en ambas direcciones.

Generalmente la estructura de pavimento está constituida por dos (2) o más materiales diferentes, siendo las capas de base y subbase construidas utilizando materiales granulares, los cuales, van a ser evaluados en este trabajo con el objeto de definir el espesor máximo a colocar de ellos que le brinden aporte estructural al pavimento. Por ello, en este trabajo sólo se hace hincapié en el tema central de evaluación de materiales granulares y sólo se menciona someramente la existencia de cualquier otro tipo de material.

El objetivo principal es el de complementar el Método de Diseño de Pavimentos Flexibles del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (M.T.C.), tomando en cuenta el criterio estructural dado en el *Shell Pavement Design Method* que no fue tomado en cuenta inicialmente. De acuerdo a ello los materiales granulares utilizados en bases y subbases soportan, transmiten y distribuyen los esfuerzos aplicados en un todo de acuerdo a la relación existente entre el Módulo de Elasticidad de la capa considerada y la capa de apoyo. El propósito del trabajo es el de establecer espesores de uso práctico que permitan una distribución efectiva de los esfuerzos y una reducción en la deflexión esperada para una misma condición de tránsito.

En el trabajo se establece el límite de espesor de capa para materiales de diferente calidad, a través de ecuaciones o de tablas en función de las características de la estructura de pavimento.

El trabajo contempla una herramienta que facilita el cálculo de estructuras de pavimento flexible constituidas por capas asfálticas y capas granulares, permitiendo maximizar el aprovechamiento del aporte estructural de los materiales delimitando sus condiciones de uso dentro de una amplia gama de soluciones que permita el diseño de pavimentos flexibles por el Método M.T.C.

OBJETIVOS

1. El principal objetivo perseguido por este Trabajo Especial de Grado consiste en la determinación de los *espesores máximos estructurales*, de cualquier material granular de Base y Subbase, *que brinden aporte estructural al Pavimento* para cualquier condición de subrasante, tránsito, mezclas asfálticas, y calidades de los mismos; con la finalidad de establecer condiciones de borde, las cuales facilitarían y optimizarían el diseño, logrando el máximo aprovechamiento de los materiales.

2. Complementar el Método M.T.C. con los resultados obtenidos a título de recomendaciones, a fin de que su uso sea incorporado en un futuro cercano.

3. Desarrollar un Programa que permita la utilización del Método M.T.C. complementado con los resultados obtenidos en este Trabajo Especial de Grado.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES.

1.- Pavimento Flexible.

1.1.- Introducción.

El diseño de pavimentos ha evolucionado basándose en la experiencia y las nuevas investigaciones realizadas en todas partes del mundo, surgiendo de ésta forma una variedad de métodos de diseños en concordancia con las características propias de cada región. No obstante, ellos tienen principios comunes que permiten establecer criterios de diseño.

Su diseño, será en consecuencia el proceso de determinación de una combinación de espesores de distintos materiales que garanticen tanto el comportamiento estructural del conjunto, como el cumplimiento de las funciones para las cuales ha sido diseñado.

En Venezuela, basándose en varios métodos de diseño (A.A.S.H.T.O 1972 y Shell 1978), y junto a la experiencia de los ingenieros dedicados al tema, se desarrolló el Método M.T.C. (1982), que toma en cuenta las condiciones que caracterizan a las distintas regiones del país.

1.2.- Definición.

Podemos definir a un pavimento flexible como "*la superestructura de una vía, construida sobre la subrasante, y compuesta normalmente por la subbase, base y la capa de rodamiento, cuya función principal es la de soportar las cargas rodantes y transmitir los esfuerzos al terreno, distribuyéndolos en tal forma que no se produzcan deformaciones perjudiciales, así como proveer una superficie lisa y resistente para los efectos del tránsito*"[1].

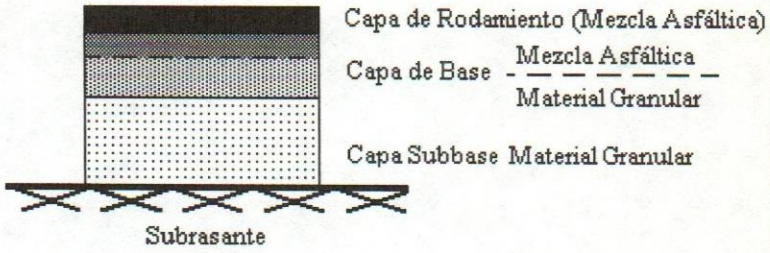
1.3.- Aspectos Generales de la Estructura del Pavimento.

Una estructura de pavimento típica construida en Venezuela es un sistema multicapa, donde ésta se define como se muestra en la *Figura 1.1* de la siguiente manera:

---

[1] Definición extraída del Congreso Panamericano de Carreteras (O.E.A.)

- **Capa de rodamiento**: Capa superior del pavimento que se ubica sobre la base, ésta soporta directamente el tránsito, diseñada para soportar esfuerzos tangenciales, a su vez distribuye los esfuerzos verticales a las capas inferiores, evita la desintegración de la base con el paso de vehículos, está constituida generalmente por una capa de concreto asfáltico de 5 cm de espesor. Esta capa debe ser diseñada para ofrecer una buena resistencia a la fricción y debiéndose mantener en el tiempo.



Estructura Típica de un Pavimento Flexible
Figura 1.1

- **Base**: Capa de alto valor de soporte, que se coloca sobre la subbase. Su función es transmitir, distribuir y soportar los esfuerzos aplicados sin sufrir deformaciones permanentes, puede estar constituida por una o más capas de mezclas asfálticas, materiales granulares y/o suelos estabilizados.
- **Subbase**: Es la capa de material que se coloca sobre la subrasante, sirve para transmitir, distribuir y soportar los esfuerzos provenientes de la capa de base de manera que sean permisibles para ser soportados por la subrasante. Esta constituida por materiales granulares o estabilizados.

El terreno de fundación[2] o Subrasante está constituida por el suelo que ha sido conformado superficialmente para soportar la estructura del pavimento, soportando los esfuerzos provenientes de la subbase, ella puede estar constituida por materiales de relleno, corte, material seleccionado, etc.

- La subrasante tiene dos funciones principales:
  - Proporcionar una capacidad mínima de soporte que permita colocar una estructura de pavimento económica.
  - Proporcionar un soporte continuo, sin asentamientos significativos ni diferenciales, evitando que se produzcan flujos plásticos o desplazamientos laterales.
- Las cualidades deseables en la subrasante son:

[2] La subrasante no forma parte de la estructura del pavimento, pero es una variable fundamental para su diseño.

- Alta resistencia inicial.
- Permanencia de la resistencia.
- Uniformidad.
- Alta densidad.
- Baja susceptibilidad al agua.
- Facilidad de compactación.
- Permanencia de la compactación.

Debido a la variabilidad de los materiales para subrasante, es necesario clasificar a los suelos encontrados en las unidades de diseño. La manera más frecuente es utilizando algún sistema de clasificación de suelos. (*Ver Anexos del Capítulo I*)

Material Seleccionado: Material local obtenido del banqueo, préstamos laterales y préstamos cercanos a la obra, que por sus características sea de calidad superior al de material de subrasante, el cual tiene como función mejorar las condiciones de soporte de la misma (mejorar el C.B.R.) en caso de que sea necesario. Este material generalmente no cumple con las especificaciones establecidas para base y subbase.

2.- Materiales Usados en un Pavimento Flexible.

2.1.- Materiales Granulares.

Son mayormente utilizadas, en la capa de base y en la capa de subbase. Los materiales granulares considerados en la Norma COVENIN 2000-87 son:

- Suelo Agregado.
- Granzón Natural (de Mina o de Río).
- Granzón Mezclado.
- Grava Estabilizada.
- Piedra Picada.
- Macadam Hidraúlico.

Las especificaciones y detalles de los materiales granulares, por ser el objetivo principal de este Trabajo, se presentan en el Capítulo II.

2.2.- Mezclas Asfálticas[3].

Son mayormente utilizadas, en la capa de rodamiento y en la capa de base. Las mezclas asfálticas consideradas en la Norma COVENIN 2000-87 son:

Mezclas Asfálticas en Caliente:

- Concreto Asfáltico: Se contemplan diez tipos de mezclas; cinco de granulometría densa (Tipo I a V) y cinco de granulometría abierta (Tipo VI a X).
- Base Asfáltica en Caliente: Se contemplan dos tipos de mezclas (B.A.C.I y B.A.C.II). Son mezclas de menor calidad, su uso está limitado a capas de base.
- Arena Asfalto en Caliente (A.A.C.): Se usan preferiblemente en vías de tránsito medio o en áreas donde escasean los materiales pétreos de río, mina y/o canteras, generalmente son mezclas de menor estabilidad con flujo y vacíos altos.

Mezclas Asfálticas en Frío:

- Arena Asfalto en Frío (A.A.F.): Son mezclas de bajo costo elaboradas con asfaltos líquidos y materiales naturales o semi-procesados, las cuales se utilizan principalmente en vías de tránsito bajo o medio. Con ausencia de agregados pétreos.
- Mezcla en Frío Densamente Gradado (M.F.D.G): Están constituidas por agregados naturales, procesados o semi-procesados, mezcladas con asfaltos líquidos.

3.- Aplicación de Esfuerzos en la Estructura del Pavimento.

Un aspecto importante en el estudio de los materiales que conforman la estructura del pavimento es la forma en la que éstos soportan, distribuyen y transmiten, los esfuerzos aplicados, a las capas inferiores.

De aquí que varios investigadores realizaron extensos estudios en los que se sugieren expresiones matemáticas que permiten determinar los esfuerzos verticales,

[3] La intensión es de darlas a conocer, sin entrar en detalle, ya que escapa del alcance de este trabajo.

tangenciales y radiales con sus respectivas deformaciones para un elemento diferencial dentro de una estructura de pavimento tanto de una capa, como de varias capas (multicapa).

Uno de estos investigadores fue *Boussinesq*, siendo éste uno de los primeros en explicar mediante el desarrollo de una ecuación (*Ver Ecuación 1.1 y Ecuación 1.2*), el comportamiento de los esfuerzos en una masa de suelo sometida a cargas superficiales, en donde dicha masa es considerada como un material homogéneo, isotrópico y elástico (*Ver Figura 1.2*).

$$\sigma_z = k\,P / z^2 \qquad \textit{Ecuación 1.1}$$

$$k = 2 / 3\pi \left[1 + (r/z)^2 \right]^{5/2} \qquad \textit{Ecuación 1.2}$$

Donde:

σ_z : Esfuerzo vertical.

P : Carga puntual superficial.

r : Distancia radial al eje de carga.

z : Profundidad.

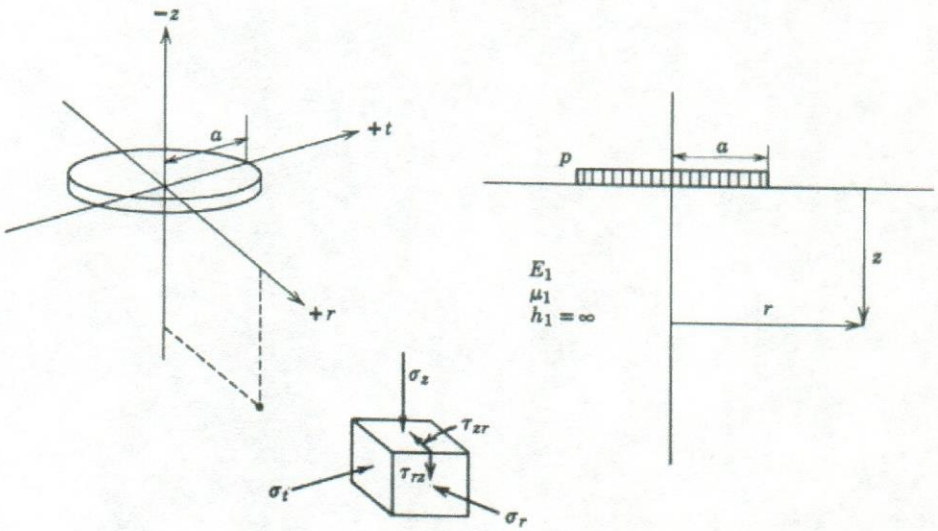
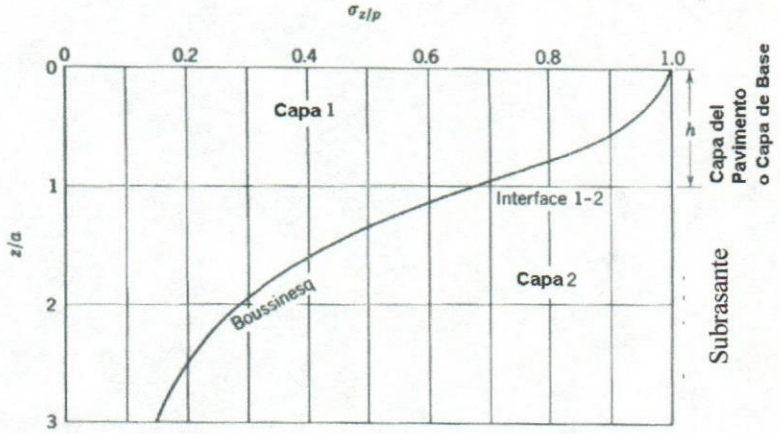


Diagrama de Esfuerzos para una Capa
Figura 1.2

De la *Ecuación 1.1* y *Ecuación 1.2* se observa que el esfuerzo vertical (σ_z) depende de la profundidad (z), distancia radial (r), y carga puntual (P), siendo independiente de las propiedades de los materiales, tales como el Módulo de Elasticidad (E) y relación de Poisson (ν).

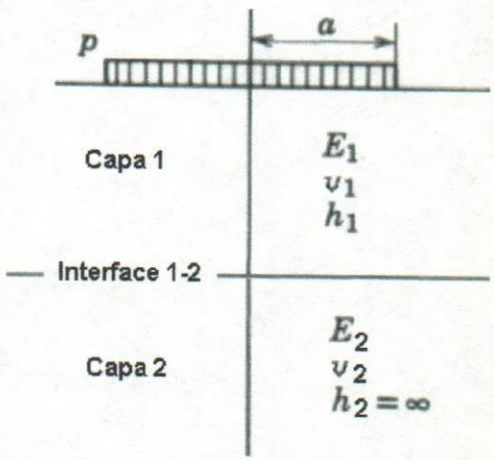
El *Gráfico 1.1* describe el comportamiento de los esfuerzos verticales producidos en una masa de suelo cualquiera en conformidad con la *Ecuación 1.1.* y la *Ecuación 1.2*, en donde *a* representa el radio de la zona circular cargada asociada con la huella de la rueda del vehículo. Dicha zona circular (considerada en algunos casos como elíptica) en combinación con el valor de la carga puntual (*P*) aplicada sobre la superficie de la estructura del pavimento produce un esfuerzo, igual a la presión de inflado del neumático del vehículo.



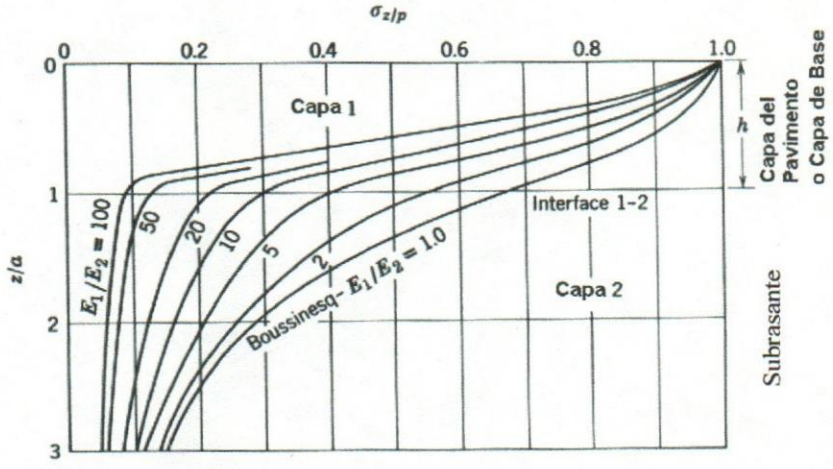
Curva de Esfuerzos dada por Boussinesq
Gráfico 1.1

Nótese que la ecuación desarrollada por *Boussinesq* sólo podría ser aplicable para estructuras de pavimento con una sola capa; o sea, el terreno de fundación (subrasante). Es entonces donde otros investigadores, como *Burmister*, lograron describir el comportamiento de los esfuerzos para sistemas de dos o más capas, donde la relación entre los módulos de elasticidad de los distintos materiales juega un papel muy importante.

En el *Gráfico 1.2* se observa como la relación entre los módulos de elasticidad (E_1/E_2) de dos materiales granulares cualesquiera, colocados uno encima del otro y debidamente compactados, afectan el desarrollo de los esfuerzos verticales debido a la acción de una carga uniformemente repartida en la superficie de éstas. (*Ver Figura 1.3*)



Sistema de dos Capas
Figura 1.3



Curva de Esfuerzos dada por Burmister
Gráfico 1.2

Nótese que para relaciones E_1/E_2 elevadas, el esfuerzo vertical obtenido a nivel de la "interface" entre las capas, resulta ser considerablemente menor en comparación con el obtenido para la relación $E_1/E_2=1$, en donde los esfuerzos verticales disipados para relaciones $E_1/E_2=100$ y $E_1/E_2=1$ son de un 90% y 30% respectivamente, en comparación con el esfuerzo aplicado en la superficie de contacto (presión de inflado del caucho). También se puede observar que a partir de cierta profundidad (*$z/a>3$, Ver Gráfico 1.2*), el comportamiento de los esfuerzos verticales no se ve muy afectado por la relación E_1/E_2, y que por muy alta que ésta llegase a ser, los esfuerzos tenderán a un mismo valor.

Es entonces a partir de estas observaciones donde se toma en cuenta la importancia de considerar sistemas de varias capas (de distintos módulos de elasticidad) para la construcción de pavimentos, pues al colocar capas de materiales con mejor capacidad de soporte en la parte superior, se logran disipar con mayor eficiencia los esfuerzos aplicados que en los casos en los que se emplee un sólo material.

CAPÍTULO II. CAPAS GRANULARES.

CAPÍTULO II. CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUBBASE.

1.- Tipos y Procedencia.

- Agregados naturales: Son gravas y arena encontradas en depósitos de ríos o minas, y son empleadas sin ningún procesamiento adicional, salvo tamizado o lavado. Son utilizados en capas de subbase exclusivamente.
- Agregados procesados: Son gravas o rocas que se someten a procesos de cernido y/o trituración para lograr incrementar su resistencia, mejorar su granulometría, reducir el tamaño máximo de las partículas, cambiar la forma de las partículas y mejorar la textura superficial de los granos.
- Agregados Artificiales: Son aquellos provenientes de la modificación fisico-química de los materiales naturales. En Venezuela se pueden conseguir: Agregados Livianos, tal como el "Aliven" formado por arcillas expandidas, la Escoria de Acerías, subproducto de la elaboración del acero y la bauxita, subproducto de la elaboración del aluminio.

2.- Clasificación según la norma COVENIN 2000-87.

Las *Normas Venezolanas para la Construcción de Carreteras* (COVENIN 2000-87), contemplan los siguientes tipos de materiales y/o mezclas para su posible utilización en la construcción de capas de base y subbases. (*Ver Tabla 2.1*)

Tipo	COVENIN 2000-87	Uso	
		Base	Subbase
Mezcla de Suelo y Agregado	11-1	X*	X
Granzón Natural a. De mina. b. De Río.	11-2	X**	X
Granzón Mezclado. a. Sobre la vía. b. En patio. c. En Planta.	11-3	X	X
Grava Estabilizada. a. Material integral. b. Mezcla sobre la vía. c. Mezcla en patio y en planta.	11-4	X	X
Piedra Picada a. Material Integrado. b. Mezcla sobre la vía. c. Mezcla en patio. d. Mezcla en Planta.	11-5	X	

Tabla 2.1 Clasificación de los Materiales Granulares en la Norma COVENIN 2000-87.

Macadam Hidráulico.	11-6	X***	
Escoria de Acería	En preparación	X	

Tabla 2.1
(Continuación)

*En caso de un muestreo extenso del material que garantice uniformidad en su resistencia, cumpliendo con los requerimientos de la Norma 2000-87 (*Ver Tabla 2.3*). Sí no se realiza ningún estudio en el reconocimiento del material, sólo debe usarse como subbase.

** Debe garantizar resistencia, cumpliendo con los requerimientos de la Norma 2000-87 (*Ver Tabla 2.3*). Sí no se puede garantizar, sólo debe usarse como subbase. Se debe tener cuidado con la plasticidad en el caso de que este sea Granzón natural de Mina.

***Se encuentra actualmente en desuso.

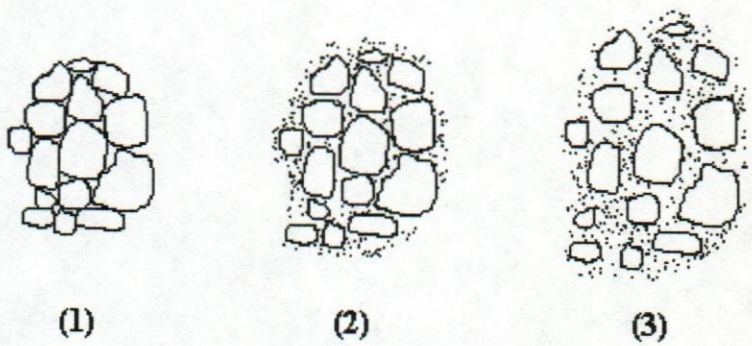
3.- Propiedades Generales.

3.1.- Densidad y Estabilidad.

En el estudio de los factores que afectan la estabilidad de una mezcla de materiales granulares encontramos que la distribución granulométrica, forma de las partículas, densidad relativa, fricción Interna y cohesión son determinantes. Se ha observado, que para alcanzar la máxima estabilidad, es necesario alcanzar una alta fricción interna para resistir las deformaciones causadas por las cargas impuestas.

De esta misma forma, la fricción interna, y consecuentemente la resistencia al corte, dependen de la densidad, forma de las partículas, y distribución granulométrica. Pero principalmente, la distribución granulométrica y especialmente la proporción entre las fracciones finas y gruesas, se considera como la más importante.

A continuación se presentan tres condiciones diferentes de mezclas en la *Figura 2.1* que permiten establecer las principales diferencias entre una y otra en sus aspectos más importantes. La *Figura 2.1 (1)* representa las mezclas de agregados con poco o ningún contenido de finos; la *Figura 2.1 (2)* representa las mezclas de agregados con suficiente contenido de finos para llenar parcial o totalmente los vacíos entre las partículas y la *Figura 1.2 (3)* representa aquellas mezclas que contienen un excesivo contenido de finos. Algunas características de éstas mezclas se presentan en la *Tabla 2.2*.



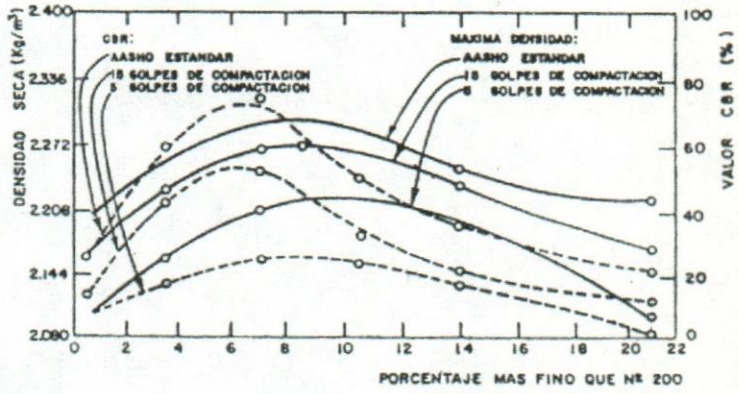
Estados Físicos de las Mezclas Granulares
Figura 2.1

	(1)	(2)	(3)
Estabilidad	Conferido por el contacto partícula-partícula.	Conferido por el contacto partícula-partícula, donde los finos llenan los espacios vacíos.	Menor a las anteriores, y el grueso simplemente "flota" en los finos.
Densidad	Baja	Alta	Baja
Permeabilidad	Alta	Baja	Nula
Otras	De naturaleza No Cohesiva	Alta resistencia al corte	Estabilidad afectada por las condiciones de humedad

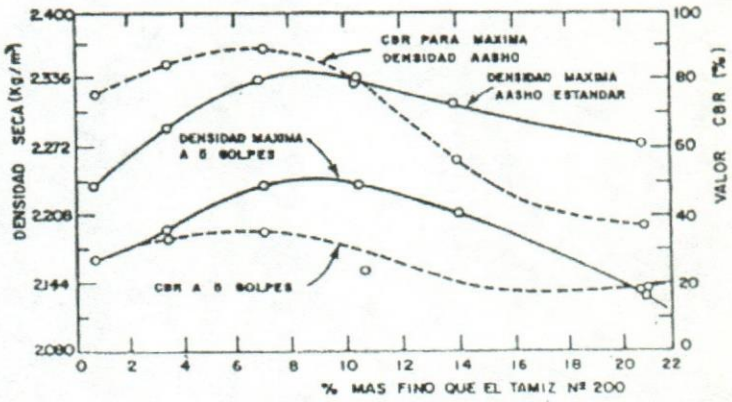
Tabla2.2-Características de los Estados Físicos de las Mezclas Granulares

Como consecuencia de lo expresado anteriormente, se observa que la estabilidad de una mezcla de agregados depende de una adecuada distribución granulométrica.

Ensayos realizados variando los valores de peso unitario y de C.B.R. en función del contenido de finos en distintas muestras (las muestras ensayadas son mezclas de grava con granos redondeados con textura lisa, (*Ver Gráfico 2.1*) y mezclas de piedra picada con granos triturados de textura áspera, (*Ver Gráfico 2.2*) encontrándose que el efecto de la fracción fina sobre el C.B.R. de mezclas elaboradas con granos triturados, es menos marcado que en el caso de los granos redondeados. Se observa también, que para los mismos valores del % de pasante del tamiz # 200, los valores de C.B.R. de la muestra de piedra picada son siempre mayores que los correspondientes de la muestra de grava; esto se debe al efecto de la forma de las partículas y a su textura superficial.

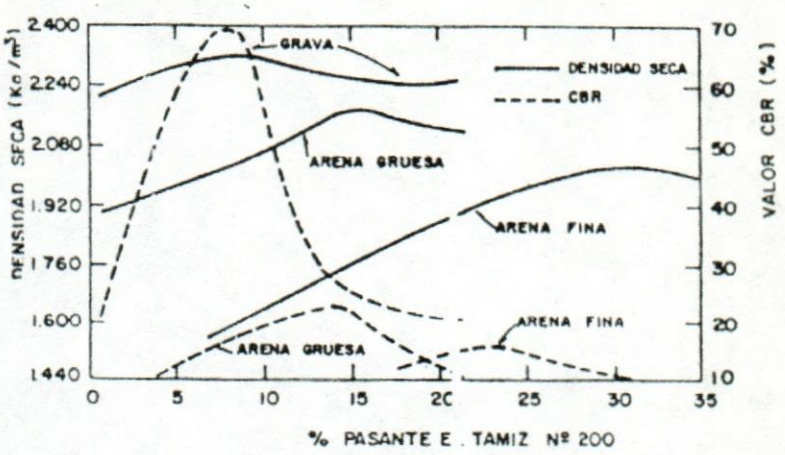


Variación de Valores de peso Unitario y de C.B.R. en función del Contenido de Finos en una Mezcla de Grava con Granos Redondeados de Textura Lisa
Gráfico 2.1



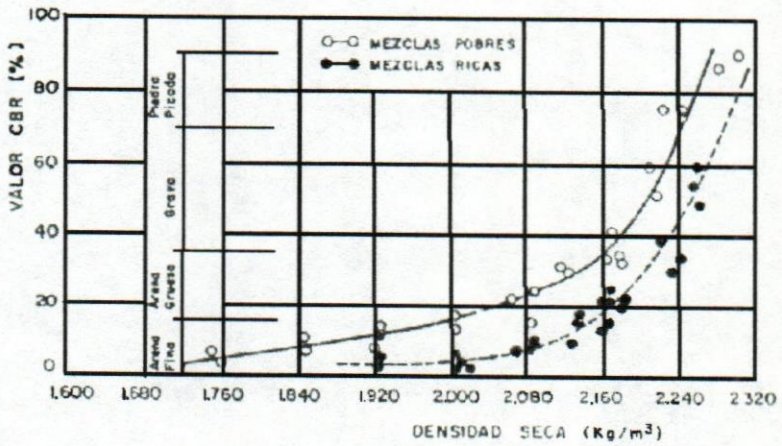
Variación de Valores de peso Unitario y de C.B.R. en función del Contenido de Finos en una Mezcla de Piedra Picada con Granos Triturados de Textura Áspera
Gráfico 2.2

Luego, ensayos realizados variando los valores de peso unitario y de C.B.R. en función del contenido de finos y tamaño máximo de la mezcla de agregados, han demostrado que tanto la densidad como el C.B.R. aumentan al aumentar el tamaño máximo del agregado en cada mezcla. Adicionalmente, se observa que la máxima estabilidad ocurre cuando la cantidad de finos, pasante del tamiz # 200, es algo menor que la requerida para alcanzar la máxima densidad. (*Ver Gráfico 2.3*)



Variación de Valores de Peso Unitario y de C.B.R. en Función del Contenido De Finos y Tamaño Máximo de la Mezcla de Agregados
Gráfico 2.3

En conclusión, el uso de la densidad como criterio de la estabilidad, sólo se podrá utilizar como indicativo, cuando se conozca la distribución granulométrica de la base o subbase granular en estudio. Según se puede observar en el *Gráfico 2.4*, las granulometrías con contenido de finos mayores a la del óptimo tendrán resistencias mucho menores de las que poseen un contenido de finos menor al óptimo, explicándose esto al hecho que, las primeras ven afectadas su estabilidad por el contenido de finos, y en las segundas su estabilidad dependerá principalmente del contacto partícula-partícula, y el efecto de los finos es mucho menos marcado.



Comparación de valores C.B.R. en muestras de igual Densidad, en función del Porcentaje de Finos en la Mezcla de Agregados.
Gráfico 2.4

3.2.- Efecto de las Partículas Fracturadas.

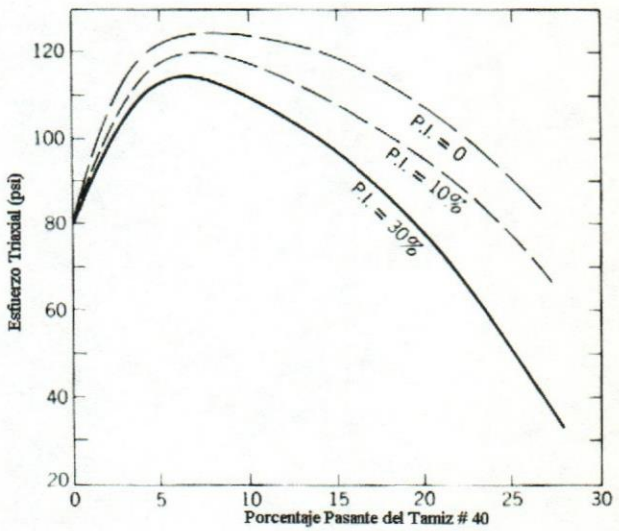
Las mezclas que poseen agregados gruesos con partículas fracturadas tienen, en general, mayores estabilidad que los materiales con partículas redondeadas; esto se debe principalmente al efecto de "entrabamiento" de las partículas de la mezcla. Adicionalmente, para una determinada granulometría también se observan mayores coeficientes de permeabilidad, lo que se traduce en mejores condiciones de drenaje de las aguas superficiales o de capilaridad.

Es recomendable, si es económicamente viable, que las partículas fracturadas estén en un cierto porcentaje dentro de las mezclas usadas para materiales de base granular, la norma venezolana establece un mínimo de 50 % de caras producidas por fracturas.

3.3.- Efecto de la Plasticidad.

Las propiedades físicas de la fracción fina de los suelos tienen un efecto importante sobre la estabilidad cuando el contacto partícula-partícula se destruye.

De un estudio realizado sobre el efecto de la plasticidad sobre la resistencia triaxial de una grava (tamaño máximo 1"), se observa, que cuando el porcentaje de pasante del tamiz # 40 es bajo, la plasticidad tiene muy poco efecto sobre la resistencia y viceversa. (*Ver Gráfico 2.5*)



Efecto de la Plasticidad sobre la Resistencia Triaxial de una Grava Tamaño Máximo igual a 1"
Gráfico 2.5

Concluyendo que, el efecto de la plasticidad depende de la cantidad de finos en la mezcla de agregados. Para porcentajes bajos de la fracción fina, la plasticidad tiene muy poco efecto, y es sólo cuando el porcentaje de ésta fracción se acerca al valor óptimo para la máxima densidad que, la plasticidad pasa a ser relevante.

3.4.- Efecto de la Discontinuidad.

El efecto real de este tipo de granulometría es que existe una carencia, o deficiencia, en algunos tamaños intermedios, por lo tanto el volumen de vacíos ocupados por aire será mayor y los requisitos de plasticidad y porcentaje de finos no tienen la misma aplicación que el caso de materiales bien gradados.

Sería erróneo fijar criterios definitivos sobre el uso de dichas granulometrías, pero cabe destacar que, siempre que se encuentre material de este tipo, el mismo se podrá evaluar a través de ensayos de resistencia siempre y cuando la economía del proyecto lo permita, antes de apoyarse única y exclusivamente en su granulometría.

Estudios realizados por Faiz[1], han demostrado que la granulometría discontinua puede ser beneficiosa bajo ciertas condiciones.

3.5.- Resistencia a la Abrasión e Impacto.

Para los efectos de bases y subbases, definimos la resistencia a la abrasión como la habilidad de un material para soportar la trituración y/o desgaste por fricción, lo cual es muy importante por la generación de finos bajo la acción de la maquinaria de compactación en la etapa constructiva, y posteriormente, el efecto de las cargas impuesta por el tráfico.

Un agregado que se rompa fácilmente no se debe utilizar, por lo tanto, se toma como regla general, aceptar en la construcción cualquier agregado con un valor en el ensayo de Desgaste de Los Angeles igual o menor a 50%.

3.6.- Textura Superficial.

Como se dijo anteriormente, se observan siempre valores de C.B.R mayores para las mezclas con piedra picada que para las de grava redondeada. Esto es debe a la mayor fricción interna en la piedra picada, es decir, una mejor trabazón entre los granos debido a una mayor dificultad al desplazamiento de un grano sobre otro debido a lo áspero de las superficies de contacto.

---

[1] Faiz A. "The Effect of Skip-Grading on Stability of Soil Aggregate Mixtures" Highway Research Report, Número 10, 1971.

Las superficies rugosas o muy rugosas (areniscas, caliza y granito), producirán bases con mayor C.B.R. que las conformadas por granos de superficie lisa (grava de río). La textura superficial se puede medir a través de la trabajabilidad y estabilidad de la mezcla.

En conclusión, el incremento de las partículas fracturadas y/o agregados con textura superficial rugosa o muy rugosa mejoran significativamente a la estabilidad de una mezcla para base o subbase no tratada.

3.7.- Limpieza.

El agregado debe estar libre de material vegetal, lutitas, partículas blandas, pelotas de arcilla, o arcilla adherida, etc.

La determinación de la limpieza del agregado de una base granular, se determina mediante el ensayo de granulometría lavada, y por la inspección visual del agregado.

3.8.- Permeabilidad.

Se puede definir como la facilidad con que un material permite el drenaje del agua, la cual depende de su granulometría, el tipo de agregado grueso, el tipo de fracción fina y su densidad.

Es importante destacar que un material granular se torna menos permeable cuando se le añade material o fracción fina. Un agregado que cumpla los requisitos de máxima densidad es prácticamente impermeable.

3.9.- Fenómeno de Intrusión.

Cuando se empleen capas de base o subbase, construidas con materiales gruesos de granulometría abierta directamente sobre la subrasante, puede ser necesario evitar la migración de los finos provenientes de la subrasante hacia las capas superiores (intrusión), para evitar esto, se podrían tomar en cuenta las siguientes medidas:

- Colocación de una membrana geotextil.
- Colocación de una capa con un espesor aproximado de 5 cm., de un material granulométricamente adecuado.

Ambas medidas, proporcionarán una barrera efectiva entre la subrasante y el material grueso susceptible a la intrusión. Para tomar medidas preventivas acerca de este criterio, se deberá cumplir con la *Ecuación 2.1*, la cual se muestra a continuación.

$$\frac{D_{15}}{D_{85}} > 5 \qquad \textit{Ecuación 2.1}$$

Donde:

D_{15}: Tamaño de partícula, en materiales de base o subbase, que cumpla la condición de que el 15% del material es más fino que este tamaño.

D_{85}: Tamaño de partícula, en el suelo de subrasante, que cumpla la condición de que el 85% del material es más fino que este tamaño.

La verificación de ésta relación debe ser realizada al emplear bases y subbases granulares sobre cualquier material, ya que su cumplimiento mejorará el comportamiento de las capas inferiores bajo condiciones de servicio.

4.- Funciones Básicas.

La función básica de éstas capas es la de brindar aporte estructural a la estructura del pavimento, lo cual se logra mediante la construcción de capas con espesores relativamente altos[2], proporcionando adicionalmente rigidez y resistencia a la fatiga, con lo cual el pavimento logra distribuir efectivamente las cargas a niveles tolerables para las capas inferiores evitando deformaciones permanentes. Estas capas pueden proporcionar drenaje a la estructura del pavimento, así como también reducir los costos de construcción.

La capa de subbase, persigue como propósito adicional prevenir la "intrusión" de los finos de la subrasante, evitar el cambio de volumen de los suelos de la subrasante en caso de que ellos tengan posibilidad de expansión y por último proporcionar una plataforma que permita absorber las desviaciones de las tolerancias de trabajo de la subrasante, permitiendo de ésta manera alcanzar cotas y secciones más convenientes y ajustadas a los niveles de mayores exigencias que se establecen para las capas superiores.

---

[2] Estos espesores serán delimitados más adelante en el Capítulo IV, en función de sus propiedades (Módulo de Young y relación de Poisson), el cual es el tema principal de este trabajo.

5.- Especificaciones.

A continuación presentamos una serie de especificaciones contempladas en la norma venezolana COVENIN 2000-87 (Tomo I, Capítulo V), las cuales representan los límites recomendados de aceptación y rechazo para el uso de materiales granulares como parte de la estructura del pavimento, específicamente, para su incorporación como materiales de base y subbase.

Para tal efecto, la norma contempla seis tipos de materiales granulares: Mezcla de Suelos y Agregados, Granzón Natural, Granzón Mezclado, Grava Estabilizada, Piedra Picada y Macadam Hidráulico; los cuales compararemos y describiremos a continuación:

Terminología Empleada:

Agregado Grueso (A.G.): Fracción de la mezcla retenida en el cedazo # 10; con excepción del Macadam Hidráulico, donde queda retenido en el cedazo 3 / 8 "

Agregado Fino (A.F.): Fracción de la mezcla pasante del cedazo # 10

Material Integral (M.I.): Material, que sometido a procesos de trituración, satisface los requerimientos establecidos en esta especificación, sin requerir algún mezclado adicional.

Mezcla de Materiales (M.M.): Material resultado de la trituración, el cernido y el mezclado en proporción determinada de los agregados que lo integran.

Material Llenante (M.LL.): Pasante del cedazo 3 / 8 ", en su totalidad, con propiedades cementantes y constituido por material calcáreo o por cualquier otro material mineral no plástico.

Especificaciones Generales para Materiales Granulares de Base y Subase.											
Tipo de Agregado	Propiedad	Mezcla de Suelo y Agregados		Granzón Natural		Granzón Mezclado		Grava Estabilizada	Piedra Picada	Macadam Hidráulico
Agregado Grueso	% de Partículas alargadas y planas	-		20 %		20 %		20 %	15 %	5 %
	% de caras producidas por fractura	≥ 40 % mezclado con P.P. y G.P.		-		-		≥ 50 %	100 %	100 %
	Desgaste de Los Angeles	< 50 %		< 50 %		< 50 %		< 50 %	< 50 %	< 50 %
Pasante del cedazo # 40	Capa	SB	B	SB	B	SB	B	SB y B	SB y B	SB y B
	LL máx.	35 %	25 %	35 %	25 %	35 %	25 %	25 %	25 %	-
	IP máx.	9 %	6 %	9 %	6 %	9 %	6 %	6 %	6 %	-
Pasante del cedazo # 200	Con relación a la fracción pasante del cedazo # 40	SB		-		-		-	-	-
		< que 2 / 3								
		B		-		-		-	-	-
		< que 1 / 2								
	Con relación al total de la Mezcla	≤ que 1 / 4		-		-		-	-	-
Otras divisiones	A.F.	-		Sí		Sí		Sí	Sí	-
	M.I.	-		-		-		Sí	Sí	-
	M.M.	-		-		-		Sí	Sí	-
	M.LL.	-		-		-		-	-	Sí

Tabla 2.3

Aspectos relativos al C.B.R.							
Propiedad		Mezcla de Suelo y Agregados	Granzón Natural	Granzón Mezclado	Grava Estabilizada	Piedra Picada	Macadam Hidráulico
C.B.R. mínimo para Materiales de Subbase	Cualquier tipo de Trafico	-	20 %	20 %	20 %	20 %	-
C.B.R. mínimo para Materiales de Base	Tráfico Pesado ($Nt \geq 10^6$)	-	80 %	80 %	80 %	80 %	-
	Tráfico Liviano ($Nt < 10^6$)	-	60 %	60 %	60 %	60 %	-

Tabla 2.3 (Continuación)

En cuanto a las Mezcla de Suelo y Agregados, no se permite más de un 5 % de su peso de material orgánico, su tamaño máximo debe ser menor o igual a 6,5 cm. y en ningún caso debe ser mayor de 2 / 3 del espesor de la capa compactada.

En general, las fracciones de agregados gruesos deben ser limpias y los agregados deben prevenir de materiales resistentes y no deben poseer terrones de arcillas o finos que formen una película alrededor da los agregados.

En cuanto a las especificaciones relacionadas con los límites granulométricos, de los materiales contemplados en ésta Norma, estos son presentados a continuación en la *Tabla 2.4*.

Para la determinación de los límites de ésta Norma, se recomienda consultar lo siguiente:

COVENIN 1124: Porcentaje de caras producidas por fractura.

COVENIN 1125: Determinación de LL y el IP.

COVENIN 266: Desgaste de Los Angeles.

MOP – E – 126: Determinación del C.B.R.

Cedazo	Porcentaje en peso del Material que pasa los cedazos											
	Mezcla de Suelos y Agregados		Granzón Natural		Granzón Mezclado		Grava Estabilizada			Piedra Picada		
	SB y B	B	SB y B	B	SB y B	B	SB y B			B		
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
2 "	-	100	-	100	-	100	100	100	-	100	100	100
1 "	100	70-100	100	70-100	100	70-100	-	75-95	100	-	75-95	50-85
3 / 8 "	60-100	30-85	60-100	30-85	60-100	30-85	30-65	40-75	50-85	30-65	40-75	50-85
4	50-85	25-65	50-85	25-65	50-85	25-65	25-55	30-60	35-65	25-55	30-60	35-65
10	40-70	15-50	40-70	15-50	40-70	15-50	15-40	20-45	25-50	15-40	20-45	25-50
40	20-50	8-90	20-50	8-90	20-50	8-90	8-20	15-30	15-30	8-20	15-30	15-30
200	5-20	2-20	5-20	2-20	5-20	2-20	2-10	5-20	5-18	2-10	5-20	5-18

Tabla 2.4

SB: Material adecuado para ser colocado en las capas de Subbase.

B: Material adecuado para ser colocado en las capas de Base.

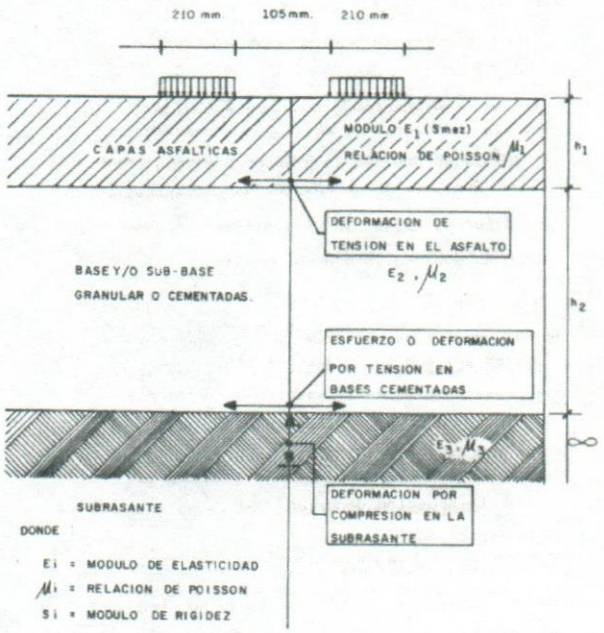
CAPÍTULO III. MÉTODOS DE DISEÑO.

CAPÍTULO III. MÉTODOS DE DISEÑO

1.- Shell Pavement Design Method.

1.1.- Introducción.

El método de diseño para estructuras de pavimentos flexibles está fundamentado en el análisis de la Teoría Elástica, el cual considera al pavimento como un sistema multicapa elástico lineal, donde los materiales se caracterizan por su módulo de elasticidad y por la relación de Poisson. Se asume que los materiales son homogéneos e isotrópicos, que las capas son infinitas en dirección horizontal y finitas en la dirección vertical, con excepción de la subrasante que se considera infinita en ambas direcciones. (*Ver Figura 3.1.1*)

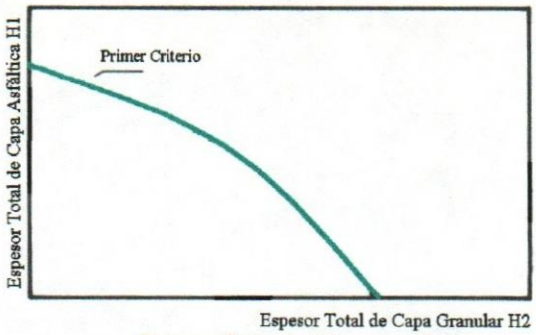


Modelo Estructural del Pavimento
Figura 3.1.1

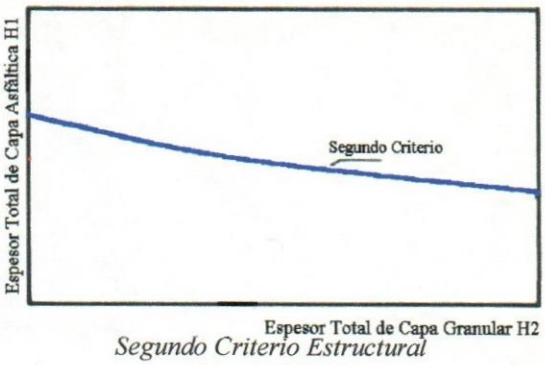
El método en su desarrollo tomó en cuenta los siguientes dos criterios fundamentales:

Primero: Si la deformación por compresión de la superficie en la subrasante es excesiva, ésta se reflejará de forma permanente en la superficie del pavimento. (*Ver Figura 3.1.2a*)

Segundo: Si la deformación horizontal por tensión en la capa asfáltica es excesiva, ocurrirán agrietamientos en ella. (*Ver Figura 3.1.2b*)



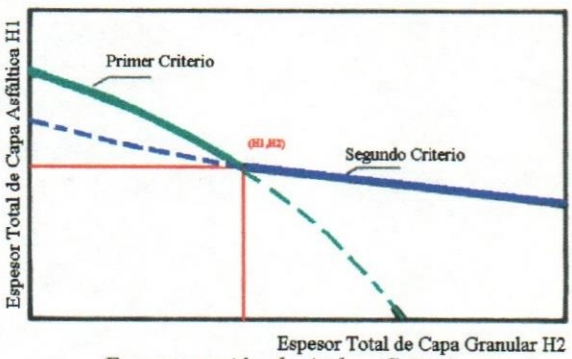
Primer Criterio Estructural
Figura 3.1.2a



Segundo Criterio Estructural
Figura 3.1.2 b

Los dos criterios antes nombrados fueron unificados (*Ver Figura 3.1.2c*), donde la intersección de ambas curvas (par H_1-H_2) define el rango de dominio de cada criterio, es decir, a la derecha del par H_1-H_2, domina el segundo criterio en el diseño y a la izquierda, domina el primer criterio.

Sobre la base de estos criterios, se elaboró un manual que contiene un grupo de Gráficas de Diseño, que permiten de forma rápida el diseño estructural del pavimento y el estudio de diferentes alternativas. Los gráficos de diseño combinan los siguientes aspectos: Espesor de Capas Asfálticas (H_1), espesor de Capas Granulares (H_2), características de la Subrasante (E_3), Tipo de Mezclas Asfálticas, Penetración del Cemento Asfáltico (Pen), diferentes condiciones de Temperatura Ambiente (w - TMAA) y niveles de Tránsito (N).



Estructuración de Ambos Criterios
Figura 3.1.2 c

1.2.- Modelo de la Estructura del Pavimento.

La estructura del pavimento se considera como un sistema Multicapa – Elástico – Lineal, en el cual los materiales están caracterizados por su módulo de Young y la relación de Poisson. Los mismos se asumen homogéneos e isotrópicos, y las capas se consideran infinitas en dirección horizontal. Las cargas actúan verticalmente y/o horizontalmente sobre la superficie y se asumen distribuidas uniformemente sobre una o más áreas circulares.

Bajo la base de este modelo, se desarrolló el programa de computación BISAR[1], que permite el cálculo de todos los esfuerzos y desplazamientos en cualquier punto del sistema multicapa, incluyendo los valores de esfuerzos principales y la dirección en la cual estos ocurren. El programa BISAR es una versión mejorada del programa BISTRO[2], incorporando, la capacidad de considerar tanto las cargas horizontales como la fricción entre las capas.

Adicionalmente, se toma en cuenta la naturaleza visco-elástica del Ligante Asfáltico por el uso de los valores de rigidez (análogo al módulo de Young), apropiados para distintos valores de temperatura y tiempos de carga aplicada.

El procedimiento general de diseño considera la estructura del pavimento como un sistema de tres capas, como se observa en la *Figura 3.1.1.* La capa inferior, se considera semi-infinita en dirección vertical, la cual representa a la Subrasante. La capa intermedia, representa los materiales granulares de Base y Subbase o, las Bases Cementadas; y la capa superior, representa la capa asfáltica. Se considera la existencia de una fricción completa entre las capas, y que éstas soportan la carga de un eje patrón de ruedas duales. Esta configuración cubre la mayoría de los modelos estructurales utilizados. Casos particulares como el de estructuras de asfalto a capacidad plena ("Full-Depth") se incorpora fácilmente al considerar nulo el espesor de las capas granulares.

1.3.- Criterios de Diseño.

1.3.1.- Generalidades.

El uso del Programa BISAR permite considerar para un amplio rango de valores de módulo de elasticidad y espesores de capa el máximo esfuerzo que ocurre en la estructura del pavimento para las consideraciones de carga. Los criterios de diseño a considerar son:

- El esfuerzo de compresión en la superficie de la subrasante, para controlar la deformación permanente en la superficie del pavimento.
- El esfuerzo de tracción horizontal en la capa asfáltica, para controlar su agrietamiento.

---

[1] De Joung, D.L., Peutz, M.G.F. y Korswagen, A.R. "Computer Program BISAR, Layered Systems under Normal and Tangential Surface Load", Koninklijke/Shell-Laboratorium, Amsterdan, Rxternal Report AMSR.0006.73, 1973.

[2] Peutz, m.g.f., Van Kempen, H.P.M., y Jones, A. "Layered System under Normal Surface Load", Highway Research Record, N° 228, pp.34-45 (1968).

Para las condiciones normales de carga (carga vertical debida a ruedas duales), ambos valores máximos son iguales, y se determinan para ambas ruedas, en el eje vertical a través del centro del área cargada, o en el eje vertical de simetría entre las dos áreas cargadas. En el mismo caso, ante la presencia de una alta relación modular entre las capas de base y asfálticas, el esfuerzo máximo horizontal, en la capa asfáltica, no se encuentra en el tercio inferior, sino, un poco más elevado. Se ha encontrado que, para estructuras con materiales granulares de base y subbase, la ubicación de dicho esfuerzo depende del factor "c" como se indica en la *Ecuación 3.1.1*:

$$c = H_1 (E_2 / E_1) \ [mm] \qquad \textit{Ecuación 3.1.1}$$

En donde E_1 y E_2, corresponden a los valores del módulo de elasticidad en N/m^2 de la capa asfáltica y de la capa granular, respectivamente. Y H_1, corresponde al espesor de la capa asfáltica, en mm. Cuando $c > 133$ mm, el esfuerzo máximo no ocurrirá en el límite inferior; y en caso de que $H_1 \leq 200$ mm, este ocurrirá en la mitad inferior.

Los criterios complementarios a considerar son:

- El esfuerzo de tracción debe ser permisible en cualquiera de las capas de las bases cementadas.
- La deformación resultante, en la superficie del pavimento, viene dada por el aporte individual a ella de cada una las capas que conforman la estructura del pavimento.
- La calidad de los materiales granulares de base y subbase, deben satisfacer los niveles mínimos requeridos de módulo de elasticidad.

Así mismo, se puede utilizar como criterio de diseño la resistencia al agrietamiento térmico de las capas asfálticas en aquellas zonas en las que los cambios de temperatura ambiente son muy marcados durante un corto período de tiempo.

1.3.2.- Deformación permisible por compresión en la Subrasante.

La relación entre el esfuerzo resultante del número de repeticiones acumuladas de cargas de Eje patrón (N), y la deformación permisible por compresión en la subrasante (ε_3), se obtuvo del análisis realizado con el programa BISAR de una selección representativa de ensayos realizados por la A.A.S.T.H.O, usando valores del módulo de Young en concordancia con el procedimiento descrito para la determinación de las propiedades de

los materiales en el aparte 1.4.4. de este capítulo. La relación de Poisson (ν) fue tomada para todas las capas igual a 0,35[3]. Encontrándose una relación que vincula los valores de N (repeticiones de cargas del Eje Patrón) con la deformación permisible por compresión en la subrasante (ε_3), como se muestra en la *Ecuación 3.1.2.*

$$\varepsilon_3 = 2{,}8 \times 10^{-2} N^{0{,}25} \qquad \textit{Ecuación 3.1.2}$$

1.3.3.- Esfuerzo en Las Capas Asfálticas.

Generalmente, el criterio de fatiga para las capas asfálticas se basa en el esfuerzo permisible como una función del número acumulado de cargas del Eje Patrón y valores de módulo de elasticidad del asfalto. Para ello, se realizaron ensayos en un gran número de mezclas asfálticas diferentes, con la finalidad de simular el comportamiento de aquellas usadas en otros países. Otro criterio puede ser decisivo bajo condiciones especiales de carga. Por ejemplo, ante la presencia de fuerzas horizontales en la superficie (frenados y cruces); se pueden llegar ha desarrollar en la estructura esfuerzos cortantes elevados. Para los propósitos generales de diseño, se asume que la unión entre las capas individuales es suficientemente buena para asegurar una completa fricción entre ellas; si este no fuese el caso, el máximo esfuerzo dentro de las capas asfálticas será considerablemente elevado, particularmente a altas temperaturas.

1.3.4.- Esfuerzos en Capas Granulares.

La distribución de esfuerzos en las capas granulares depende de los módulos de elasticidad de las capas individuales, y de sus espesores. Para asegurar que los esfuerzos ocurridos no causen fallas en las capas, se especifica un módulo dinámico mínimo, o valor de C.B.R., el cual depende del valor del módulo de elasticidad (E_3) de la subrasante y de los espesores de capas granulares.

1.3.5.- Deformación Superficial.

En principio, el esfuerzo de compresión permisible en la superficie de la subrasante es escogido de forma tal que la deformación permanente al nivel de la subrasante sea

---

[3] Usándose una Servicapacidad (PSI) de 2.5

restringida a niveles convenientes; por otra parte, la integración de las deformaciones permanentes en cada una de las capas de la estructura del pavimento puede llevar a deformaciones superficiales inaceptables. Por lo tanto, debido a investigaciones realizadas en muchos países, referente a las deformaciones producidas en las capas asfálticas, este método contempla un procedimiento para la predicción de dichas deformaciones bajo la influencia del tráfico, proveniente de mediciones en laboratorio. El procedimiento es empleado en la etapa final de diseño, para estimar la deformación permanente en el pavimento. Sobre la base del criterio de esfuerzo permisible, es probable que este exceda el límite estimado durante el transcurso de su período de servicio.

El nivel de deformación permisible dependerá del tipo de carretera, pudiendo variar en muchos países. Generalmente, dicha deformación es llamada "Rut Depth"; o sea, la diferencia de altura entre en centro de la huella de la rueda y sus bordes. Los valores límites, aplicados en la práctica, están por el orden de 10 a 30 mm. para carreteras de altas y bajas velocidades, respectivamente.

1.4.- Principios de Diseño.

Un gran número de parámetros se encuentran envueltos en el diseño estructural del pavimento. Estos incluyen las condiciones ambientales (temperatura, humedad, viento), condiciones de carga (Eje Patrón, distribución de la carga, área de contacto, tiempo de carga, efectos dinámicos), y propiedades de los materiales (módulo de Young, relación de Poisson). Además, la mayoría de éstos parámetros varían en el tiempo. Para la obtención de un sistema de trabajo práctico, se requirió efectuar una serie de simplificaciones, siendo este descrito seguidamente.

1.4.1.- Tráfico.

El tráfico se expresa en cargas equivalentes[4] del Eje Patrón, que actúan tanto vertical como horizontalmente sobre la estructura del pavimento, y se distribuyen en una o más áreas circulares. El período de servicio del pavimento se representa por el número acumulado de cargas equivalentes, sin que se produzcan deformaciones permanentes en el

[4] Se define como el factor daño unitario para un eje patrón.

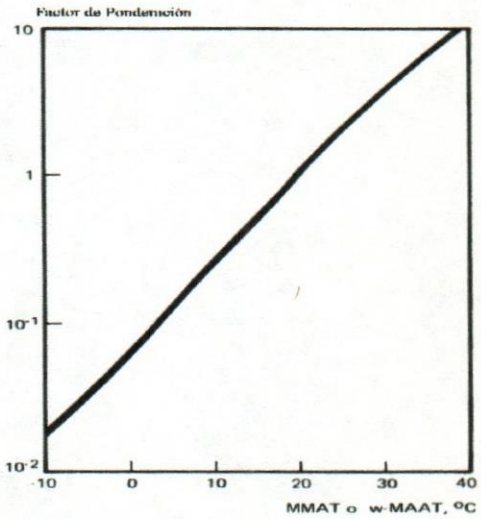
pavimento, o agrietamientos en las capas asfálticas. Para el diseño se adopta que la carga por Eje Patrón es de 80 KN. Cada eje se asume de dos ruedas, o dual (20 KN por rueda), los cuales poseen una presión de contacto de 600 KN/m^2 actuando en un área de contacto con radio igual a 105 mm. Esta configuración de ejes de carga, es usada en mucho países. Para las gráficas de diseño, se contemplan aplicaciones de eje patrón entre 10^4 y 10^8 KN.

Pequeñas variaciones en el tamaño y forma del área de contacto y en la distribución del esfuerzo, resultan insignificantes en relación con el esfuerzo de compresión al nivel de la subrasante y el esfuerzo máximo en las capas asfálticas y, serán por lo tanto, consideradas como constantes.

El tiempo de carga en un punto determinado dentro de la estructura del pavimento varía con la velocidad, distribución lateral de la carga por rueda, espesor del pavimento, profundidad en la estructura, y en el caso de pavimentos asfálticos, de la temperatura. Aunque en principio, éstas variaciones pueden ser permitidas, pero por practicidad se usa un tiempo de carga constante igual a 0,02 segundos, el cual es representativo de los promedios de carga en vehículos comerciales a una velocidad entre 50 y 60 Kph. Además, pequeñas variaciones en el tiempo de carga se consideran poco influyentes respecto al diseño del pavimento.

1.4.2.- Temperatura y Clima.

Las variaciones en la temperatura ambiente generalmente no influyen de manera significativa en el módulo de elasticidad de los materiales granulares; pero poseen una marcada influencia en las propiedades del asfalto. A fin de obtener la temperatura ponderada del aire (w – TMAA) en base anual, a partir de la temperatura promedio mensual del aire (TMMA) para un lugar dado se desarrolló un procedimiento para los propósitos de diseño, el cual consiste en la determinación del promedio de los factores de ponderación (*Ver Gráfico 3.1.1*) para cada una de las temperaturas mensuales (TMMA), y a partir de este, la posterior determinación



Curva de Ponderación de Temperatura
Gráfico 3.1.1

de la w – TMAA. Los valores de la TMMA se obtienen de las estaciones meteorológicas o publicaciones de las mismas, o de cualquier otra fuente confiable especializada.

La w – TMAA se relaciona con la temperatura efectiva del asfalto y así como con su módulo de elasticidad efectivo. Para los propósitos del método, las temperaturas (w - TMAA) tomadas en cuenta en las gráficas de diseño son 4, 12, 20 y 28 °C.

1.4.3.- Subrasante.

El método de diseño incorpora el módulo de elasticidad dinámico de la subrasante (E_3), como parámetro de diseño.

Mediciones efectuadas en laboratorio y en campo, han demostrado que la teoría Elástica – Lineal puede ser usada para determinar las respuestas del pavimento. De aquí, que la mayor parte de los suelos para subrasante muestran un comportamiento dependiente de la compresión, por lo que el módulo de elasticidad podría ser determinado in situ por medición de la deflexión dinámica con cargas representativas al tráfico y con un contenido de humedad de equilibrio.

Alternativamente, ensayos realizados en laboratorio, tales como el triaxial, o cualquier otro que modele las condiciones de densidad y humedad del suelo, podrán realizarse para determinar las propiedades del mismo.

Cuando dicha información no este disponible bajo las condiciones de carga, densidad y humedad; podrá utilizarse de manera conjunta las relaciones empíricas mostradas en la *Figura 3.1.3* como una buena aproximación, en las que se relaciona el valor del C.B.R. y E_3 (módulo dinámico de la subrasante) por medio de la *Ecuación 3.1.3*:

$$E_3 = C.B.R.\ x\ 10^7\ N/m^2 \qquad \textit{Ecuación 3.1.3}$$

Para las gráficas de diseño, se contemplan distintos tipos de subrasante con una capacidad portante (C.B.R.) de: 2,5; 5; 10 y 20, que corresponden aproximadamente a módulos de elasticidad de: 2,5; 5; 10 y 20 $x10^7$ N/m^2.

1.4.4.- Materiales de Base y Subbase.

Extensos ensayos en campo, soportados por el análisis teórico, han demostrado que el módulo de elasticidad (E_2) de los materiales granulares, de base y subbase, dependen de

su espesor (H_2), y del módulo de elasticidad de la subrasante (E_3), de acuerdo con la *Ecuación 3.1.4 y 3.1.5.*

$$E_2 = k_2 E_3 \qquad \textit{Ecuación 3.1.4}$$

En donde: $k_2 = 0{,}2\, H_2^{0{,}45}$, con H_2 en mm y $2 < k_2 < 4$. *Ecuación 3.1.5*

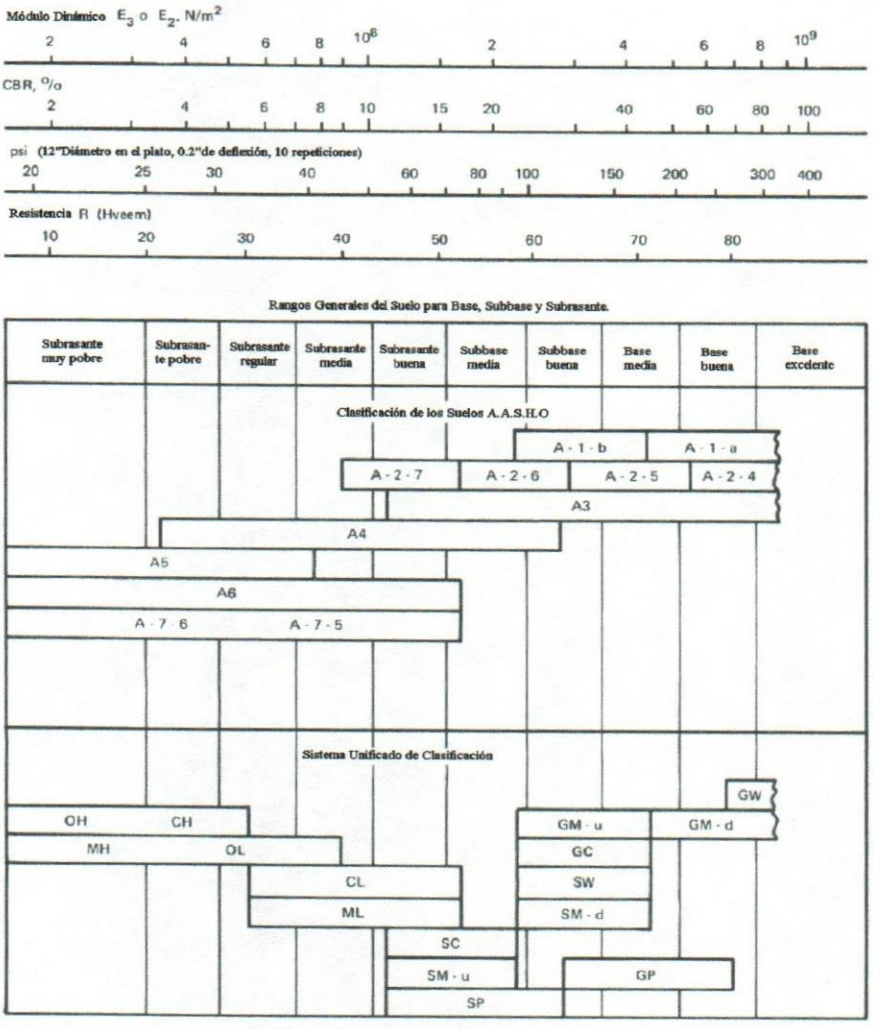


Figura 3.1.3-Módulo Dinámico de Elasticidad de la Subrasante o Material Granular

Por lo tanto, se debe tener cuidado, ya que los espesores de capas seleccionados para el pavimento deben ser capaces de desarrollar un adecuado módulo de elasticidad y resistencia. Los valores mínimos, de módulo de elasticidad, requeridos a diferentes niveles de las capas de base y subbase, son indicados en las cartas de diseño según sea el valor de E_3 (C.B.R. de la subrasante).

El módulo de elasticidad del material de base o subbase seleccionado para el proyecto puede ser estimado por medio del uso de la *Figura 3.1.3*. El procedimiento de selección del material, de acuerdo con lo establecido en los apartes anteriores, se describe en el *aparte 1.3*.

1.4.5.- Capas Asfálticas.

Existe toda una variedad de tipos de mezcla asfáltica; pero para los propósitos del método, sólo dos propiedades son significativas: La Rigidez de la mezcla (S_x), para pequeños instantes de carga (*Ver aparte 1.4.1*), y sus características de Fatiga (F_y).

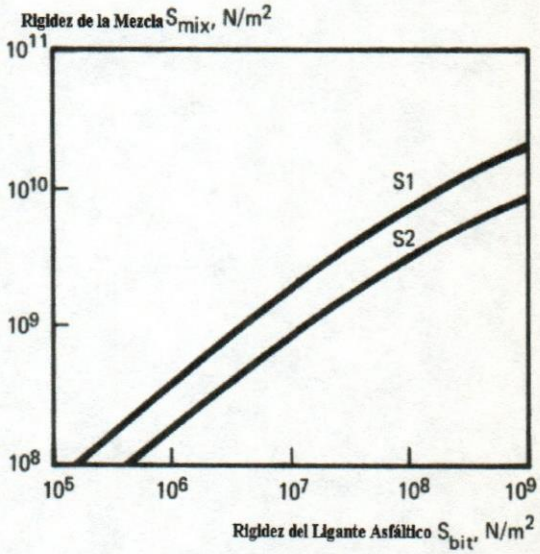
Las Cartas de Diseño han sido preparadas para mezclas asfálticas con propiedades típicas de rigidez (indicadas como S_1 y S_2), y características de fatiga (indicadas como F_1 y F_2), para cemento asfáltico de penetración 50 y 100. Al combinar las condiciones de rigidez y fatiga de mezcla asfáltica con la penetración del cemento asfáltico se obtienen gráficas de diseño para ocho condiciones diferentes, las cuales se indican a continuación: S_1-F_1-50, S_1-F_1-100, S_1-F_2-50, S_1-F_2-100, S_2-F_1-50, S_2-F_1-100, S_2-F_2-50, S_2-F_2-100.

1.4.5.1.- Rigidez de las Mezclas Asfálticas.

Sólo los rangos de rigideces de mezclas asfálticas comprendidos entre 10^8 y $5x10^{10}$ N/m^2, son estructuralmente relevantes en relación con los criterios de falla.

Las Cartas de Diseño han sido preparadas para dos curvas características de rigidez (*ver Gráfico 3.1.2.*). Estas curvas son llamadas S_1 y S_2, las cuales no están asociadas directamente con algún tipo particular de mezcla asfáltica.

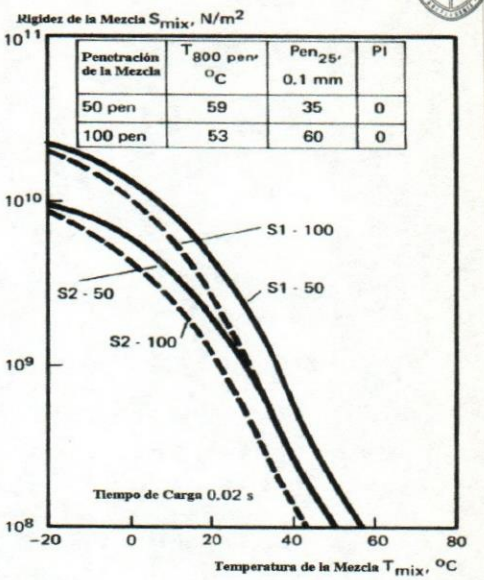
Dichas curvas relacionan la Rigidez del ligante asfáltico, denominado S_{bit}, con la Rigidez de la Mezcla Asfáltica, denominada S_{mix}. Dicha relación ($S_{mix} - S_{bit}$), se ha convertido en una relación S_{mix} vs. Temperatura del asfalto para un tiempo de carga de 0,02 segundos para los dos tipos de



Rigidez de la Mezcla vs Rigidez del Ligante Asfáltico
Gráfico 3.1.2

ligante asfáltico ya indicados (*Ver Gráfico 3.1.3*). Se consideran diferentes sistemas de "gradación" por ejemplo: para una penetración 100: 80/100, 85/100, 80/120, B80, etc. y para una penetración 50: 40/50, 40/60, 45/60, B45, etc.

El hecho de que el ligante asfáltico, alcance un endurecimiento adicional durante su período de servicio, depende en mayor parte de los vacíos totales. Para mezclas densas e impermeables, este fenómeno es poco marcado; pero a medida que las mezclas presenten mayor número de vacíos, el diseño debe ser revisado para tomar en cuenta los efectos de un grado más severo de penetración del ligante asfáltico a utilizar.



Penetración de la Mezcla	$T_{800\ pen}$ °C	$Pen_{25°}$ 0.1 mm	PI
50 pen	59	35	0
100 pen	53	60	0

Rigidez de la Mezcla vs Temperatura de la Mezcla
Gráfico 3.1.3

Sobre la base de los tipos de mezclas asfálticas disponibles, los proyectistas deberán seleccionar cuál código de mezcla, S_1 o S_2, y cuál grado de penetración, 100 o 50, es el más representativo de las propiedades in situ.

Las curvas se pueden considerar representativas de los siguientes tipos de mezclas:

S_1 : Son aquellas mezclas densamente gradadas, con bajo contenido de vacíos. Por lo tanto, representa la rigidez promedio de las mezclas densas más comunes.

S_2 : Las que no cumplan con lo establecido para las S_1.

Si se requiere una mayor precisión en la escogencia del código de la mezcla, lo cual podría resultar conveniente para mezclas muy particulares, la determinación de las curvas de rigidez podrán ser determinadas en laboratorio, o se podrán estimar mediante el uso de nomogramas[5].

1.4.5.2.- Fatiga de las Mezclas Asfálticas.

Sobre la base de mediciones efectuadas en laboratorio sobre diferentes mezclas asfálticas, se han fijado dos curvas características para el propósito de diseño. Estas curvas, designadas por F_1 y F_2, se muestran en el *Gráfico 3.1.4 y Gráfico 3.15* para diferentes valores

[5] The University of Michigan, "FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENT", Volume I, Página 48

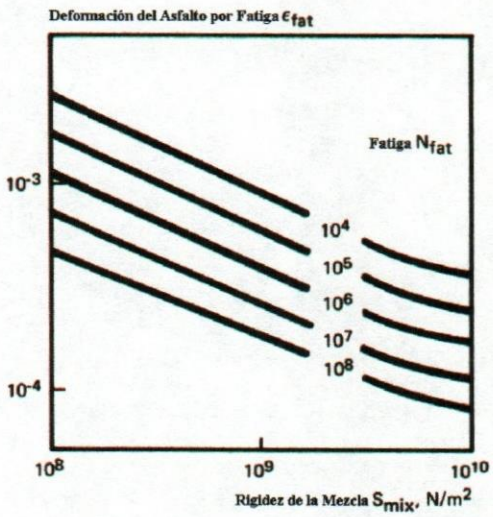
de N (Número acumulado de cargas del Eje Patrón). Al igual que las curvas de rigidez, las curvas de fatiga no están relacionadas directamente con algún tipo particular de mezcla asfáltica.

Las curvas se pueden considerar representativas de los siguientes tipos de mezclas:

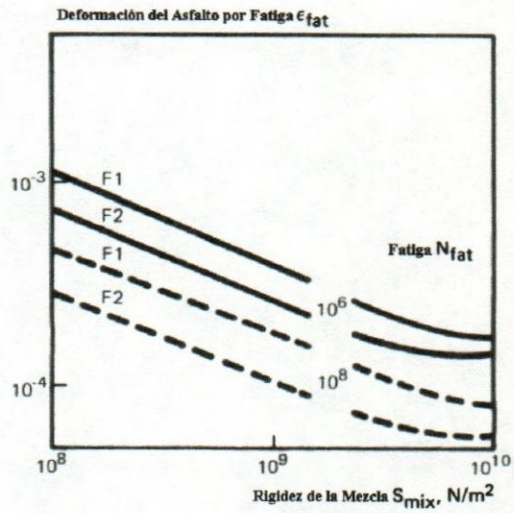
F_1 : Son aquellas mezclas con contenidos de asfalto mayor o igual al óptimo y con un contenido bajo de vacíos.

F_2 : Son aquellas mezclas con contenidos bajos de asfalto o alto contenido de vacíos.

Para una especificación de mezcla, sólo se puede seleccionar una (S_x F_y).



Rigidez vs Deformación a la Fatiga para una Mezcla Asfáltica F_1
Gráfico 3.1.4



Rigidez vs Deformación a la Fatiga para una Mezcla Asfáltica F_1 y F_2
Gráfico 3.1.5

1.5.- Diseño Estructural.

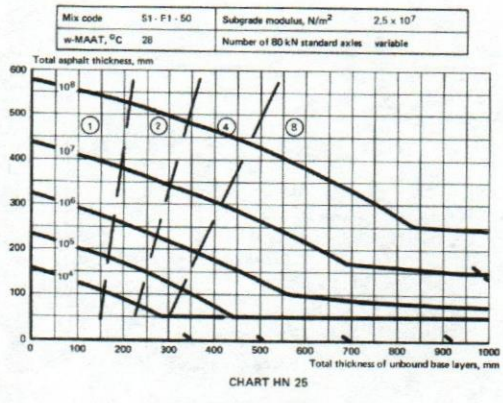
1.5.1.- Cartas de Diseño.

Como se ha mencionado anteriormente, las gráficas de diseño se elaboraron con la finalidad de obtener el espesor de cada capa para las distintas alternativas de construcción, cumpliendo con los criterios permisibles de resistencia ya establecidos.

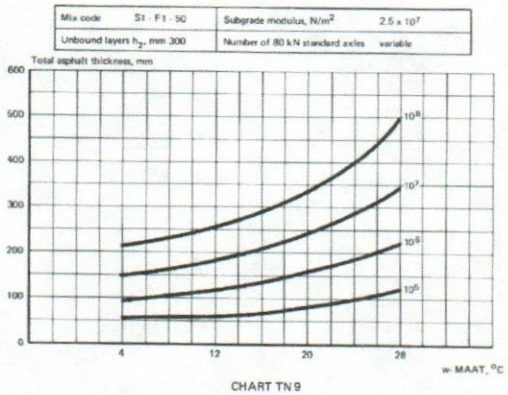
Las gráficas o cartas de diseño incorporan los siguientes parámetros:

- Tipo de mezcla asfáltica: S1-F1-50, S1-F1-100, etc.
- Condiciones climáticas, como la w – TMAA.
- Período de servicio, número de repeticiones (N).
- Módulo de elasticidad de la subrasante, como E_3

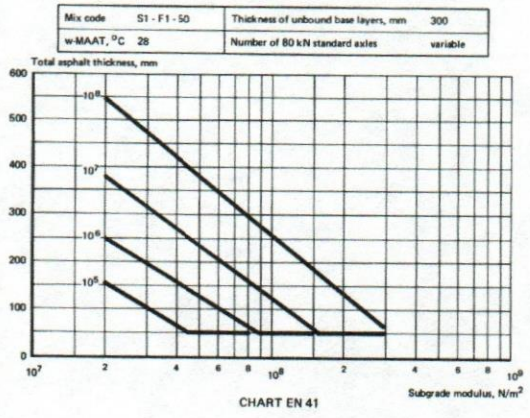
El primer conjunto de cartas (HN 1 hasta la HN 128), se podrán considerar como las más importantes, éstas muestran el espesor total de las capas asfálticas (H_1) como una función del espesor total de las capas granulares de base y subbase (H_2), en donde la variable es el factor tráfico N, el cual se representa por la familia de curvas. Para facilitar la interpolación de los diversos parámetros, otros grupos de cartas son presentadas, como lo son las cartas HT, TN y la EN. Un ejemplo de éstas cartas se muestra en el *Gráfico 3.1.6(a,b,c,d).*



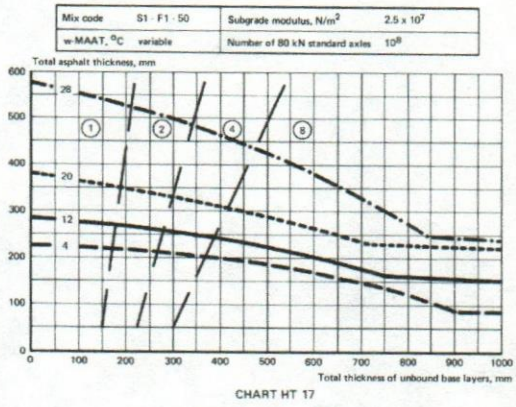
(a) Carta HN



(b) Carta TN



(c) Carta EN



(d) Carta HT

Gráfico 3.1.6

1.5.2.- Uso de las Cartas de Diseño.

Las cartas pueden ser usadas directamente entrando con los parámetros de diseño. El grupo de Cartas más conveniente a ser empleadas, en cualquier caso, dependerá de la información disponible. La determinación de dichos parámetros, con las respectivas interpolaciones y ajustes, determinará cuál carta usar para la determinación de los espesores H_1 y H_2. El procedimiento debería ser, por lo tanto, empleado íntegramente sin

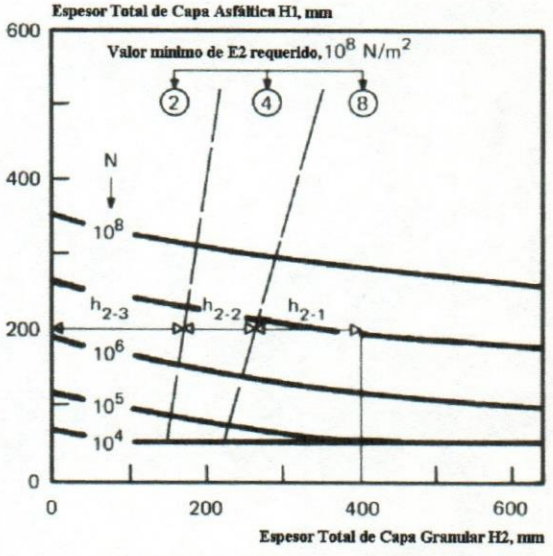
modificaciones. Sí por otra parte, el proyectista necesita modificar el método, por ejemplo, introducir un criterio de diseño diferente, o diseñar estructuras más complejas, etc.; el método propone guías para orientar el diseño, en donde se tocan puntos como: Variaciones o Fluctuaciones en el módulo de la subrasante, Tipos Alternativos de Mezclas Asfálticas (Composiciones de las Mezclas, Tipo de Ligante Asfáltico y Rigidez, y Fatiga en las Mezclas), Condiciones especiales de Tráfico (Tráfico Diario, Variaciones Estacionales, Canalización del Tráfico, Condiciones especiales de carga).

1.5.3.- Capas Granulares.

El módulo de elasticidad dinámico mínimo de las capas de base y subbase depende de su posición en la capa granular como un todo, y del módulo de elasticidad dinámico de la subrasante. Estos valores son indicados en las cartas HN y HT por las líneas segmentadas inclinadas, las cuales dan la subdivisión entre los materiales granulares en concordancia con los valores mínimos de módulo de elasticidad. (*Ver Gráfico 3.1.7*)

Dicho de otra manera, los puntos en los cuales dichas líneas intersecten las curvas, representadas en las cartas correspondientes, corresponderá al espesor máximo de material granular, que brinda un aporte estructural, con un módulo de elasticidad comprendido entre los que dicha línea divida, cumpliendo por supuesto con los criterios de diseño. Por ejemplo, los puntos sobre la línea entre 2 y 4 corresponden a materiales con módulos comprendidos entre 2 y 4 $x10^8$ N/m^2 o de C.B.R. entre 20 y 40. (*Ver Gráfico 3.1.7*). Para materiales con valores de módulo o C.B.R mayores de 8 y 80, respectivamente, no existe limitación respecto al espesor máximo.

Para el propósito de determinar la composición de los materiales granulares en una capa, se puede utilizar cualquiera de las cartas HN y HT, con el C.B.R. adecuado de subrasante. Cuando el valor de éste, se encuentre entre los valores dados por las cartas, las líneas de subdivisión pueden ser halladas por medio de interpolaciones.



Determinación de Espesores Requeridos
Gráfico 3.1.7

2.- Método de Diseño de Pavimentos Flexibles del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (M.T.C.)

2.1.- Introducción.

El objeto del método es diseñar estructuras de pavimento flexible, basándose tanto en la experiencia del comportamiento de los pavimentos diseñados y construidos en Venezuela con anterioridad al año 1975, como en los criterios estructurales planteados en el método A.A.S.H.T.O. (1972) y en el método Shell (1978). De donde se obtiene un método de diseño que relaciona ambos criterios de falla (funcional y estructural), el efecto de la temperatura media ambiente anual y de la penetración del cemento asfáltico. Así mismo, se establece un procedimiento de evaluación para determinar la capacidad portante de la subrasante con la inclusión o no de material seleccionado adaptado a las condiciones del país.

En su desarrollo establece una correspondencia entre los gráficos HN publicados en el Shell Pavement Design Manual (*Ver Figura 3.2.1*) y el Método A.A.S.H.T.O, donde a cada par (H_1, H_2) se le asigna una capacidad estructural (*Ver Ecuación 3.2.1*).

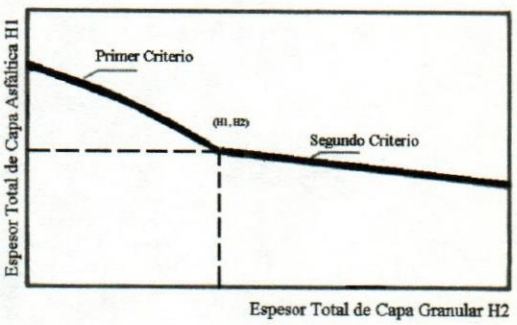


Figura 3.2.1-Curva Típica N en una Carta HN

$$(H_1,H_2)=a_1*e_1+ a_2*e_2+a_3*e_3 =N.E.V \qquad \textit{Ecuación 3.2.1}$$

Donde:

e_i: Espesor de la capa en cm.

a_i: Coeficiente estructural.

N.E.V: Número Estructural Venezolano. (*Ver Ecuación 3.2.6*)

En la correspondencia establecida sólo se consideraron aquellos casos en que el diseño se realiza controlando la deformación por compresión en la subrasante y la servicapacidad (P_t) final esperada del pavimento es igual a 2.5. Así mismo, para el cálculo de las cargas equivalentes se establecieron factores de equivalencia constantes determinados para una capacidad estructural (SN) de 5. Para relacionar el N.E.V. con los espesores de material granular y concreto asfáltico, derivados de las curvas del método Shell, se utilizaron los siguientes coeficientes estructurales a_i. (Ver *Tabla 3.2.1.*)

Tabla 3.2.1-Coeficientes a_i Utilizados en la determinación de la Ecuación de Diseño (N.E.V.)

Coeficiente Estructural. a_i	**Capa de Pavimento.**	**Valor.**
a_1	Rodamiento de Concreto Asfáltico Espesor 5 cm.	0.44
a_{21}	Base Asfáltica. Espesor Remanente de Concreto Asfalto.	0.34
a_{22}	Base de Piedra Picada. Espesor de 15 cm.	0.14
a_3	Base-Subase Granular. Espesor Remanente.	0.11

La intención durante el desarrollo del método fue la de obtener una ecuación de diseño única, que pudiese establecer la correspondencia entre los métodos antes mencionados. Ello no fue posible, y en su lugar se determinó una ecuación de diseño para una temperatura media ambiente anual (T.M.A.A.) de 28°C y una penetración del cemento asfáltico de 40-50, estableciéndose un criterio para determinar un factor regional que permitiera pasar de las condiciones de la ecuación de diseño a las condiciones de construcción.

2.2.- Principio de Diseño.

2.2.1.- Tránsito.

El efecto del tránsito se toma en cuenta como repeticiones acumuladas de la carga del Eje Patrón de diseño, que corresponde a 8.2 Toneladas (80 KN, 18 Kips.) por ejes simples de ruedas duales. (*Ver Gráfico 3.1.1*)

Los pavimentos se diseñan para soportar el número de repeticiones de cargas equivalentes totales a ser aplicadas durante el período de diseño en el cual la servicapacidad[6] o capacidad de servicio del pavimento determinada de acuerdo con el criterio A.A.S.H.T.O.[7], será estimada al final del período de diseño en 2.5, como se observa en el *Gráfico 3.2.1*

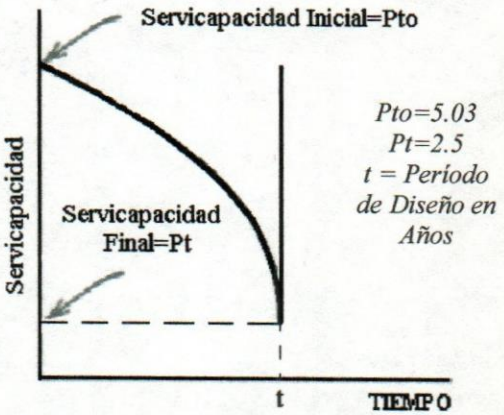


Gráfico3.2.1-Curva de Servicapacidad vs Período de Diseño.

[6] Coeficiente que clasifica el estado de la capa de rodamiento, para su mantenimiento, el cual oscila entre 5.03 y 2.5 (el valor mínimo depende de la importancia de la vía), si este es considerado menor del mínimo, se dice que ha fallado funcionalmente.

[7] Se halla a través de una expresión, cuyas variables están relacionadas con las condiciones de la estructura del pavimento.

2.2.2.- Estructura del Pavimento.

La estructura del pavimento se considera como un sistema elástico lineal multicapa, en el cual los materiales están definidos por su módulo de Young (E) y la relación de Poisson (μ). Los materiales se consideran homogéneos e isotrópicos y las capas son infinitas en sentido horizontal. *(Ver Figura 3.1.1)*

En dicha figura (*Figura 3.1.1*), el modelo considerado de la estructura del pavimento, el cual está constituido por tres capas. La inferior representa la subrasante, considerada semi-infinita en el sentido vertical, la capa intermedia representa las capas de subbase y base, cementadas o no. La capa superior representa todas las capas asfálticas. Se considera que entre todas éstas capas existe una fricción completa.

2.2.3.- Consideraciones Estructurales.

El Método M.T.C. se fundamenta en los mismos criterios estructurales ya establecidos en el Método Shell, los cuales se indican seguidamente:

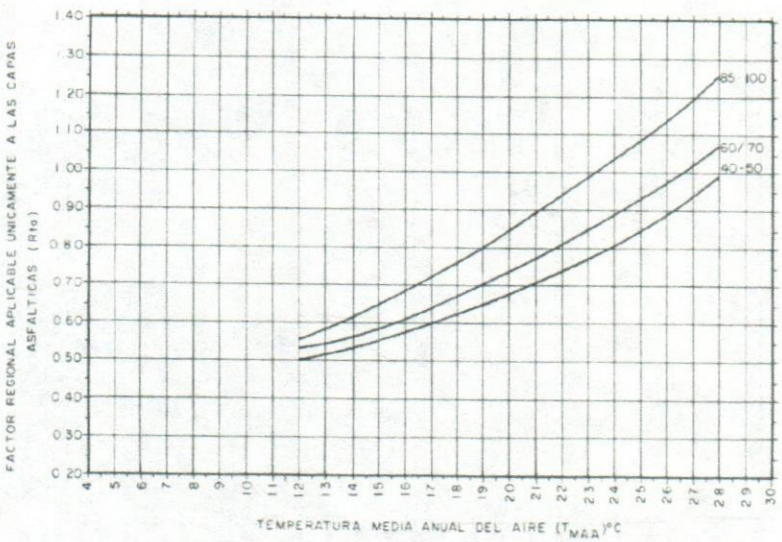
- Deformación por compresión en la superficie de la subrasante. Si ésta es excesiva ocurrirán deformaciones que se reflejarán en la superficie del pavimento.
- Deformación horizontal por tensión en las capas asfálticas. Si ésta es excesiva ocurrirán agrietamientos por fatiga de la capa asfáltica. La deformación máxima ocurre, por lo general, en la parte inferior de la capa asfáltica.
- El esfuerzo de tensión o deformación unitaria permisible en bases cementadas. Si son excesivas, las bases se agrietarán por fatiga. Los valores máximos ocurren en la parte inferior de las capas cementadas.

Dependiendo de los materiales utilizados y de las condiciones prevalecientes en una unidad de diseño, los criterios arriba señalados determinarán el espesor de la estructura del pavimento.

2.2.4.- Factor Regional.

Las condiciones climatológicas y topográficas se consideran a través del factor regional (F.R.V.) el cual está constituido por los siguientes componentes:

- R_{ta}: Componente que toma en cuenta la influencia de la temperatura ambiente y las propiedades del cemento asfáltico. Es un factor de ajuste que se aplica únicamente al espesor de capas asfálticas, ya que la rigidez de estos materiales varía con la temperatura. (*Ver Gráfico 3.2.2*)



FACTOR REGIONAL (R_{TO}) Vs. TEMPERATURA MEDIA AMBIENTE ANUAL

Gráfico 3.2.2

- R_m: Componente que toma en cuenta la influencia combinada de la lluvia, drenaje, profundidad de la mesa de agua y características de los materiales. Afecta a toda la estructura de pavimento y se considera al seleccionar las condiciones en las cuales se realizará el ensayo para la determinación de la capacidad de soporte C.B.R.
- R_g: Componente que toma en cuenta el incremento de la severidad de los esfuerzos del tránsito en vías con pendientes pronunciadas. Hallándose según la *Ecuación 3.2.2*:

$$R_g = \sqrt[4]{\frac{P}{3}} \quad \text{Para } P \geq 3\%; \quad R_g = 1 \quad \text{Sí} \quad P < 3\% \qquad \textit{Ecuación 3.2.2}$$

$$N\,t = N't * Rg \qquad \textit{Ecuación 3.2.3}$$

Donde:

N´t: Número de aplicaciones de cargas equivalentes totales obtenido para las condiciones del tránsito en la vía en estudio[8].

[8] Ecuación del número total de cargas equivalentes del eje patrón desarrollada en Anexos del Capítulo III

Nt: Número de aplicaciones de cargas equivalentes totales utilizada en la ecuación general del N.E.V (*Ver Ecuación 3.2.3 y Ecuación 3.2.6*).

P: Pendiente longitudinal del tramo de la unidad de diseño, expresada en porcentaje.

2.2.5.- Características de los Materiales.

2.2.5.1.- Materiales Cohesivos y Granulares.

El módulo de elasticidad E, de estos materiales, se puede correlacionar aproximadamente con su capacidad de soporte C.B.R. (*Ver Ecuación 3.1.3*)

Por la facilidad de ejecución del ensayo C.B.R., se ha establecido la ecuación de diseño en base a la capacidad de soporte C.B.R. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que esta es una correlación aproximada (*Ecuación 3.1.3*), y que mayor precisión se obtendrá, si se determinan los módulos de elasticidad en base a ensayos triaxiales dinámicos con carga cíclica, o en ensayos dinámicos de campo, especialmente en los materiales granulares de C.B.R. alto donde ésta correlación es menos confiable.

Donde la confiabilidad de este valor viene dado en función de las características del ensayo realizado para tal fin. Tomando en cuenta lo siguiente:

- En los suelos granulares la capacidad de soporte C.B.R. y el módulo de elasticidad dependen del nivel de los esfuerzos empleados; por lo tanto, ellos deben tratar de reproducir las condiciones de campo.
- En los suelos cohesivos, la capacidad de soporte C.B.R. está menos influenciada por la sobrecarga utilizada en el ensayo, sin embargo, en suelos susceptibles a cambios volumétricos, la carga utilizada durante el período de saturación disminuye la variación volumétrica y consecuente pérdida de densidad, lo cual influye en la capacidad de soporte del suelo.

2.2.5.2.- Mezclas Asfálticas.

El módulo de elasticidad de las mezclas asfálticas depende de:

- Tipo de ligante: Penetración del cemento asfáltico.
- Viscosidad del cemento asfáltico.

- Temperatura media ambiente anual en el área de influencia de la vía.
- Contenido de vacíos de la mezcla: Mezclas densas (vacíos inferiores al 5%), ó mezclas abiertas (vacíos superiores al 5%)
- Características del Agregado.

Como la rigidez de una mezcla asfáltica varía con su viscosidad, la cual depende de la penetración del cemento asfáltico y de la temperatura ambiente de la vía; los espesores requeridos de Mezclas Asfálticas dependerán a su vez de esos factores; por lo tanto, es necesario que el tipo de cemento asfáltico se seleccione de acuerdo a la temperatura ambiente de la obra.

2.2.5.3.- Material Seleccionado.

Se denomina material seleccionado a todo aquel material de calidad superior al que constituye la subrasante, pero que no llega a cumplir con los requisitos exigidos por las normas a los materiales para la construcción de capas de base y subbase. Se usa para mejorar la capacidad portante (C.B.R.) de la subrasante. Al usar un espesor de material seleccionado, el C.B.R. resultante para el diseño de la estructura de pavimento, se designará como $C.B.R._{equivalente.}$

Para obtener un espesor mínimo de material seleccionado a colocar se procede de la siguiente forma:

- Se determina el espesor mínimo de material seleccionado según la *Ecuación 3.2.4.*

$$e_{min.M.S.} = \frac{N.E.V._{S.R.} - N.E.V._{M.S.}}{a_{M.S.}} \qquad \textit{Ecuación 3.2.4}$$

- Si se coloca un espesor igual o superior al e_{min} de material seleccionado determinado, entonces el $C.B.R._{equiv}$ será igual al C.B.R. del material seleccionado.
- Si se coloca un espesor menor de material seleccionado, el C.B.R. equivalente se determina utilizando la *Ecuación 3.2.5*

$$C.B.R._{equiv} = C.B.R._{S.R.} + (C.B.R._{M.S.} - C.B.R._{S.R.}) * \left(\frac{e_{M.S.}}{e_{minM.S.}} \right)^3 \qquad \textit{Ecuación 3.2.5}$$

Donde:

N.E.V.$_{S.R.}$: Número Estructural Venezolano, calculado para las condiciones iniciales de la subrasante. (*Ver Ecuación 3.2.6*)

N.E.V.$_{M.S.}$: Número estructural Venezolano, calculado para las condiciones iniciales del material seleccionado. (*Ver Ecuación 3.2.6*)

$a_{M.S.}$: Coeficiente estructural del material seleccionado. (*Ver Gráfico 3.2.3 a*)

$e_{M.S.}$: Espesor de material seleccionado colocado sobre la subrasante.

$e_{min.M.S.}$: Espesor límite de material seleccionado a colocar, para mejorar la capacidad portante de la subrasante al máximo (C.B.R.$_{MS}$).

La capacidad de soporte C.B.R. del material seleccionado, debido a que no cumple con los requisitos de los materiales de base y subbase, no deberá considerarse para el diseño de pavimentos, en ningún momento superior a 20%, exceptuando en los suelos granulares tales como fragmentos de grava, roca y arena (A-1, según la clasificación A.A.S.H.T.O.) donde puede llegar a 30%, si se garantiza la uniformidad del sitio de préstamo.

2.2.6.- Ecuación de Diseño[9].

La Ecuación de diseño (*Ecuación 3.2.6*) fue desarrollada en el Método M.T.C para las condiciones mostradas en la *Tabla 3.2.1.*, para una temperatura media ambiente anual (T.M.A.A.) de 28°C y una penetración del cemento asfáltico de 40-50.

$$NEV = \frac{3.236 * Nt^{10^{(0.094*\log(C.B.R.)-0.932)}}}{C.B.R.^{0.533}} \qquad \textit{Ecuación 3.2.6}$$

Donde:

NEV: Número Estructural Venezolano. Representa la capacidad estructural del pavimento requerida para soportar el tránsito previsto durante el período de diseño considerado.

Nt: Número de repeticiones de cargas equivalentes totales esperadas durante el período de diseño considerado.

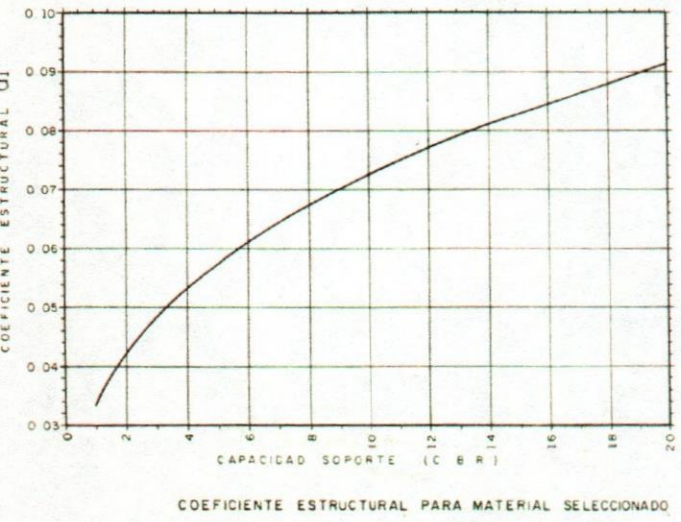
CBR: Capacidad de Soporte (California Bearing Ratio) de la Subrasante o de las capas de base y subbase cuando éstas se construyen utilizando material granular.

---

[9] Las tablas relacionadas al diseño son presentadas con detalle en los Anexos del Capítulo III

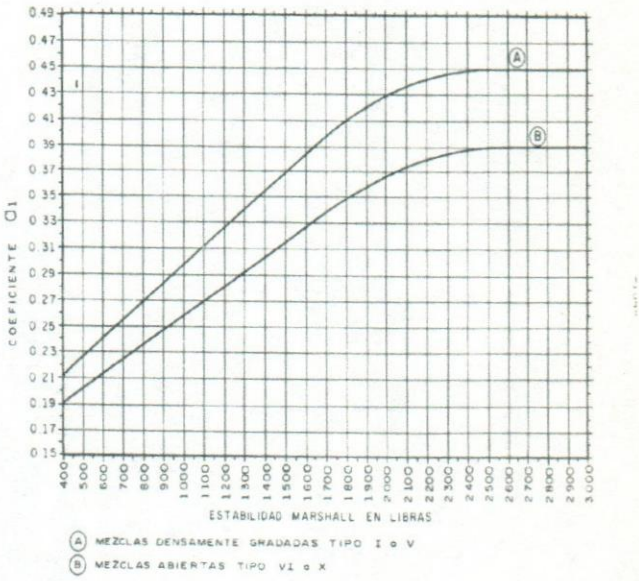
2.2.7.- Coeficiente Estructural.

El coeficiente estructural es una relación adimensional que expresa la capacidad relativa o aporte estructural del material considerado. (*Ver Gráfico 3.2.3 a, b, c y d*)



COEFICIENTE ESTRUCTURAL PARA MATERIAL SELECCIONADO

(a)

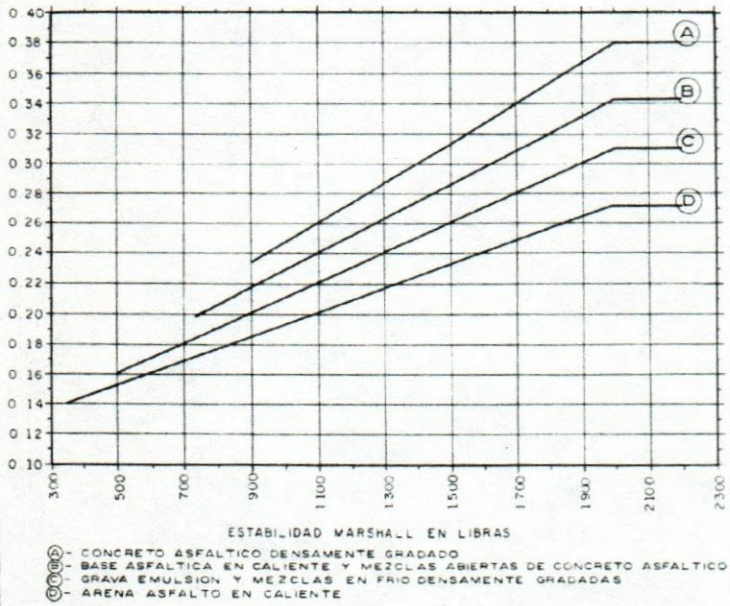


COEFICIENTE ESTRUCTURAL PARA CAPA DE RODAMIENTO DE CONCRETO ASFALTICO

(b)

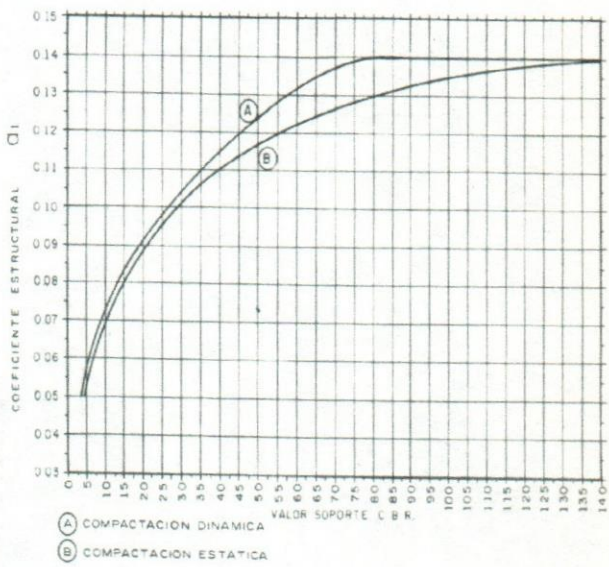
Gráfico 3.2.3

(c)



COEFICIENTE ESTRUCTURAL PARA MEZCLAS ASFALTICAS

(d)



COEFICIENTE ESTRUCTURAL PARA MATERIALES GRANULARES DE BASES Y SUB-BASES

2.2.8.- Capacidad Estructural.

La capacidad estructural del pavimento construido ($N.E.V_{col}$) determinado por la *Ecuación 3.2.7*, debe ser superior a la capacidad estructural requerida determinada por la *Ecuación 3.2.6*, para cualquier capa como se muestra en la *Ecuación 3.2.8*.

$$N.E.V._{col} = a_1 * e_1 + a_2 * e_2 + \ldots\ldots\ldots + a_n * e_n \qquad \textit{Ecuación 3.2.7}$$

$$N.E.V._{req} \leq N.E.V._{col} \qquad \textit{Ecuación 3.2.8}$$

Donde:

a_i : Coeficientes estructurales de los materiales que constituyen las distintas capas de la estructura pavimento.

e_i : Espesor correspondiente a cada una de las capas, expresado en cm.

$N.E.V._{requerido}$: Calculado según las condiciones del tránsito y el C.B.R. del material. (*Ecuación 3.2.6*)

$N.E.V._{colocado}$: Valor que aporta la estructura de pavimento. (*Ver Figura 3.2.2*)

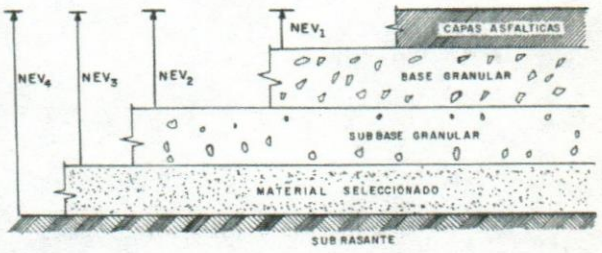


Figura 3.2.2-Análisis Estructural del Pavimento

En el cálculo del espesor de las capas que constituyen la estructura de pavimento, se busca que el $N.E.V._{req}$ y el $N.E.V._{col}$ sean iguales a nivel de la subrasante.

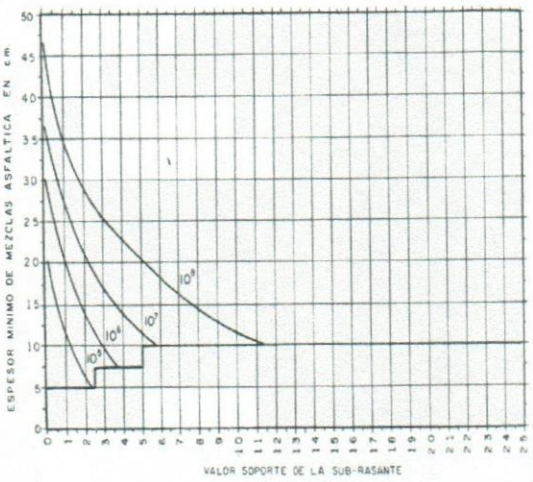
2.2.9.- Espesor Mínimo de Capa Asfáltica.

El espesor mínimo requerido de capa asfáltica para evitar la falla por fatiga, debido a deformaciones unitarias o tensiones excesivas depende de:

- El contenido de vacíos totales de la mezcla, siendo determinante el de las capas de base.
- Intensidad del tránsito, reflejadas en el número de aplicaciones de cargas (Nt).
- Capacidad soporte de la subrasante, indicado por su valor C.B.R.

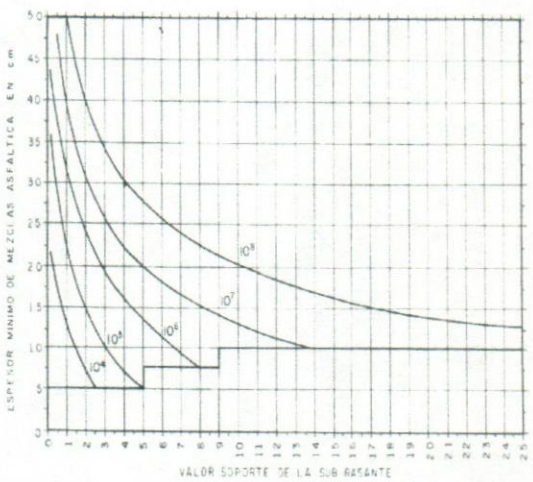
El espesor mínimo por fatiga corresponde al espesor en el cual el pavimento se diseña tomando en cuenta los dos criterios fundamentales (criterios de diseño del Método Shell), es decir, en un gráfico HN cualquiera corresponde al punto de intersección de las curvas, o al punto de inflexión aparente (*Ver Figura 3.2.1*). Este espesor es prácticamente independiente de la penetración del cemento asfáltico.

Los espesores mínimos requeridos por fatiga para las capas asfálticas, se han correlacionado con el C.B.R. de las subrasante, el nivel de tránsito Nt y el tipo de mezcla empleada, según se indica en el *Gráfico 3.2.4 (a y b)*.



ESPESOR MINIMO RECOMENDADO DE MEZCLAS ASFALTICAS DE ACUERDO AL VALOR SOPORTE C.B.R. DE LA SUB-RASANTE AL UTILIZAR MEZCLAS ASFALTICAS DENSAMENTE GRADADAS

(a)



ESPESOR MINIMO RECOMENDADO DE MEZCLAS ASFALTICAS DE ACUERDO AL VALOR SOPORTE C.B.R. DE LA SUB-RASANTE AL UTILIZAR MEZCLAS ASFALTICAS ABIERTAS

(b)

Gráfico 3.2.4

CAPÍTULO IV. OBTENCIÓN DE ESPESORES MÁXIMOS ESTRUCTURALES.

CAPÍTULO IV. OBTENCIÓN DE ESPESORES MÁXIMOS ESTRUCTURALES.

1.- Hipótesis.

El modelo estructural tomado como base en el desarrollo de este trabajo para el diseño de una estructura de pavimento flexible, está basado en las mismas hipótesis establecidas en el método Shell, enunciadas en el Capítulo III. Este método se fundamenta en el uso de *Cartas de Diseño*, las cuales relacionan el espesor de las capas asfálticas (H_1), con el espesor de las capas granulares (H_2)[1], donde las cartas están en función tanto de variables intrínsecas a los materiales que conforman la estructura del pavimento (penetración del cemento asfáltico, temperatura media ambiente anual, fatiga y rigidez de las mezclas asfálticas, y C.B.R de los materiales granulares), como a las intrínsecas al diseño ($C.B.R._{S.R.}$, Nt), de forma tal que se recomiendan espesores granulares máximos de base y subbase de acuerdo a su capacidad portante (C.B.R.).

Se tratarán de definir ecuaciones que expresen el espesor máximo de las capas granulares (H_2), en función de su C.B.R. y las variables relacionadas al diseño ($C.B.R._{S.R.}$, Nt), de forma tal que se pueda simplificar el trabajo. El hecho de está simplificación radica en que se tomará en cuenta, para el desarrollo de éstas ecuaciones, únicamente el primer criterio del Método Shell[2], que resulta predominante en la determinación de los espesores de material granular. Ello con el fin de optimizar el espesor de las capas granulares para que ellas brinden aporte estructural en la estructura del pavimento, definiendo a la estructura como un sistema multicapa elástico lineal, donde las cargas actuantes a través de la estructura del pavimento son soportadas y distribuidas hasta niveles tolerables por cada una de las capas y la subrasante.

2.- Obtención de la Información en las Cartas de Diseño HN del Método Shell 1978.

2.1.- Criterios Utilizados en la Obtención de Valores.

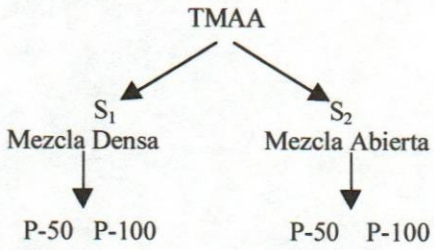
Para la obtención de valores se fijaron los siguientes criterios:

---

[1] En el desarrollo de este trabajo sólo se tomaron en cuenta las Cartas HN.

[2] Este criterio se menciona en el Capítulo III, aparte 1.

Primero: Dentro de una misma temperatura, se obtuvieron valores de H_2 para distintas condiciones de capacidad portante (C.B.R.) de la subrasante, para cada penetración del cemento asfáltico y mezcla asfáltica clasificada por su rigidez; repitiendo lo mismo para diferentes condiciones. Siguiendo el procedimiento esquemático indicado en la *Figura 4.1.*



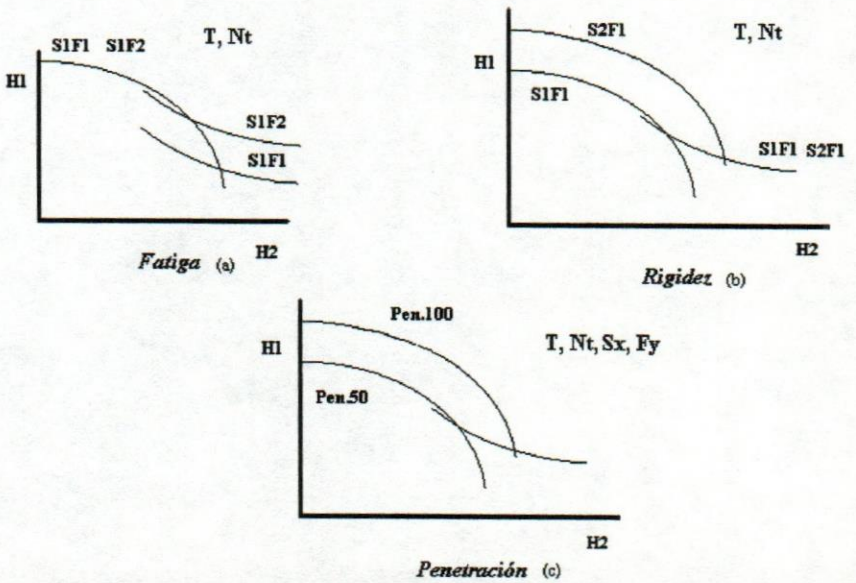
Variables de la Mezcla Asfáltica Tomadas en Cuenta

Figura 4.1

Segundo: La fatiga (F_y) de la mezcla asfáltica, en las cartas HN del Método Shell, no afectan la rama de la curva que expresa el primer criterio, en consecuencia, ella no se toma en cuenta. De tal modo que, las cartas S_1F_1 y S_1F_2 son iguales (tomando en cuenta el primer criterio) y la misma penetración del cemento asfáltico; lo mismo ocurre con S_2F_1 y S_2F_2. Como se muestra en el *Gráfico 4.1 a.*.

Tercero: La rigidez (S_x) de las mezclas asfálticas, en las cartas HN del Método Shell afectan la rama de la curva que expresa el primer criterio, en consecuencia, ésta variable fue tomada en cuenta, como se muestra en el *Gráfico 4.1 b.*

Cuarto: Al variar la penetración del cemento asfáltico, la rama de la curva que expresa el primer criterio varía, como se observa en la *Gráfico 4.1 c*, por ende esta variable también fue tomada en cuenta.



Comportamiento de las Variables que Definen a las Mezclas Asfálticas (Fatiga-Rigidez-Penetración)

Gráfico 4.1.

Quinto: Los valores de H_2 obtenidos, que tengan un correspondiente valor de H1, menor de 5 cm, son descartados. Esto se debe a que constructivamente, los requerimientos mínimos de estructuras de pavimento deben tener al menos una capa de rodamiento con dicho espesor.

2.2.- Relación entre el Espesor del Material Granular que Brinda Aporte Estructural y su Relación de Soporte C.B.R.

Tomando en cuenta el primer criterio descrito en el *aparte 2.1* se procedió al uso de las Cartas HN de Shell, donde cada espesor de material granular que brinda aporte estructural, fue obtenido de la intersección de cada línea límite (10-20, 20-40, 40-80)[3] con cada curva N (intensidad del tránsito: 10^8, 10^7, 10^6, 10^5 y 10^4) relativa al primer criterio del Método Shell. Un ejemplo de esto se muestra en el *Gráfico 4.2*, donde las líneas verticales indican el espesor límite correspondiente a cada material para un valor de $N=10^8$.

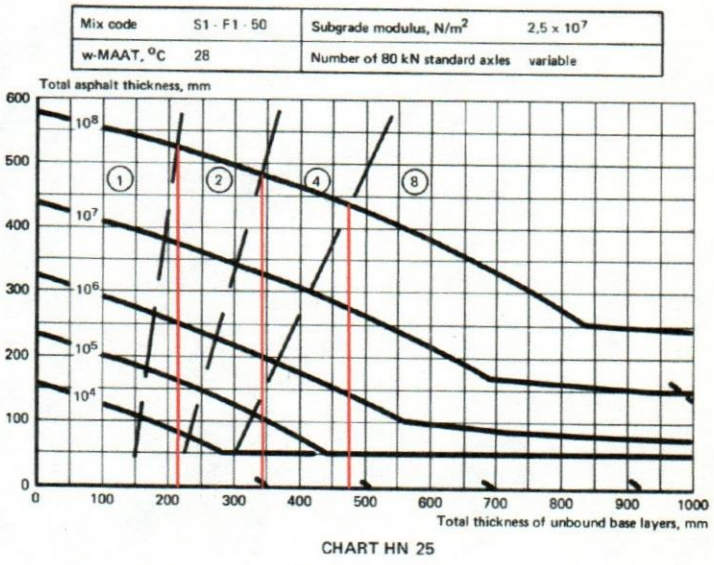


Gráfico 4.2-Obtención de Espesores Máximos que Brindan Aporte Estructural Extraídos de la CartaHN-25 para $N=10^8$

Los valores obtenidos de la manera antes descrita, se agruparon tal como se indica en la *Tabla 4.1*, de manera tal que se pudiese relacionar el espesor máximo H_2, con el C.B.R. de la de la subrasante, como se muestra en el *Gráfico 4.3*

TMAA 28°C	S_1	Pen. 50	$N = 10^8$
H_2 40 – 80	H_2 20-40	H_2 10-20	CBR sr
47	34	22	2.5
32	20		5
18			10
			20

Tabla 4.1-Valores de H_2 vs $C.B.R._{SR}$

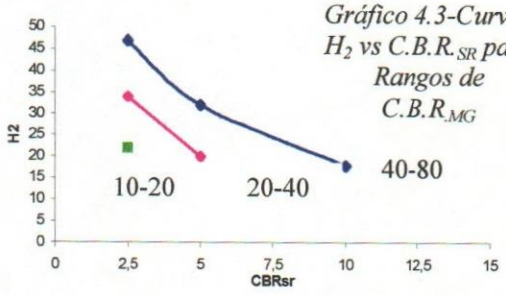


Gráfico 4.3-Curvas H_2 vs $C.B.R._{SR}$ para Rangos de $C.B.R._{MG}$

[3] Las líneas límites de los materiales granulares presentes en las cartas HN del Método Shell, varían únicamente, cuando varía el C.B.R. de la subrasante. Ver Capítulo III aparte 1.5.3

Del conjunto de tablas y gráficos obtenidos[4] (por ejemplo: *Tabla 4.1 y Gráfico 4.3*), se concluye lo siguiente (manteniendo constante la Pen, S_x y TMAA en las mezclas asfálticas):

- El espesor de material granular que brinda aporte estructural varía en función de su capacidad portante (C.B.R.), de la capacidad portante del terreno de fundación (C.B.R. de la subrasante) y de la intensidad del tránsito (N).
- El espesor que brinda aporte estructural para un mismo material granular disminuye, a medida que aumenta el C.B.R. de la subrasante.
- Para una misma capacidad portante (C.B.R.) de la subrasante a medida que aumenta la capacidad portante del material granular a usar como subbase o base, el espesor que brinda aporte estructural aumenta.
- Para una misma capacidad portante (C.B.R.) de la subrasante y del material granular, al aumentar las cargas equivalentes esperadas (N) aumenta el espesor estructural del material.

La necesidad de cuantificar lo expuesto anteriormente a través de expresiones algebraicas y la falta de información, debido a las restricciones de las cartas HN[5] en cuanto a los rangos de valores utilizados, conlleva a la interpolación de dichas cartas. Hallando cartas para valores de C.B.R. de la subrasante de 3.75 (punto medio entre 2.5 y 5), 7.5 (punto medio entre 5 y 10), 15 (punto medio entre 10 y 20) que contemplen únicamente el primer criterio de diseño del Método Shell.

2.3.- Obtención de las Cartas HN para C.B.R. de Subrasante de 3.75, 7.5 y 15.

Estas cartas fueron obtenidas utilizando el siguiente procedimiento:

- Se agruparon las cartas HN para una misma temperatura media ambiente anual, rigidez, y penetración del cemento asfáltico, quedando como variable la capacidad portante (C.B.R.) de la subrasante.
- Se tomaron valores de H_1 y H_2 que estuvieran dentro del primer criterio. Definiendo para un mismo valor de H_2, el correspondiente valor de H_1 para cada curva N en cada carta HN.(*Ver Gráfico 4.4 a y b.*)

---

[4] Ver Anexos Capítulo IV.
[5] Expuestas en el Capítulo III aparte 1.4.

a *b*

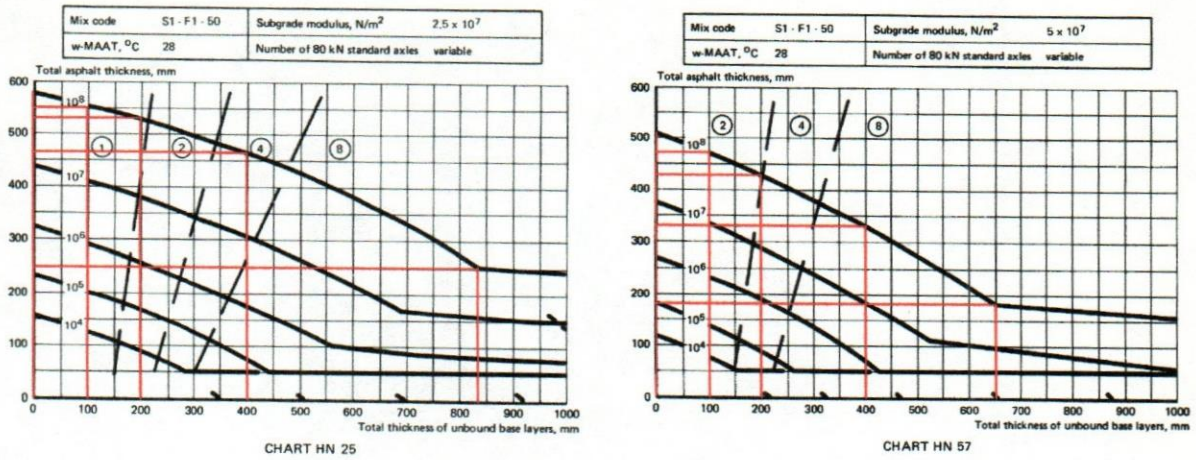


Gráfico 4.4-Extracción de Valores H_1-H_2 de las Cartas HN –25 y HN –57 para N=10^8

El *Gráfico 4.4* es un ejemplo del procedimiento seguido para la curva N de 10^8. Las líneas auxiliares (verticales y horizontales) muestran la obtención del par H_1, H_2 (*Ver Tabla 4.2*) en las cartas HN-25 (C.B.R. de la subrasante de 2.5) y HN-57 (C.B.R. de la subrasante de 5), para obtener pares H_1, H_2 de una carta de C.B.R. de subrasnte de 3.75 (*Ver Tabla 4.2*), para luego ser graficados, como se observa en el *Gráfico 4.5*[6].

28°C. Pen 50 S1						
C.B.R. Sr	HN-25 2,5		HN-57 5		HN 25-57 3,75	
Nt	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	58	0	51	0	54	0
	55	10	47	10	51	10
	53	20	43	20	48	20
	47	40	33	40	40	40
	25	84	18	65	22	75
10^7	44	0	37	0	40	0
	41	10	33	10	37	10
	38	20	29	20	34	20
	31	40	19	40	25	40
	17	68	11	52	14	60
10^6	32	0	27	0	30	0
	29	10	24	10	26	10
	26	20	19	20	23	20
	18	40	8	40	13	40
	10	56	5	43	8	49
10^5	24	0	18	0	21	0
	20	10	14	10	17	10
	17	20	9	20	13	20
	8	40	5	26	6	33
	5	44	5	40		
10^4	16	0	12	0	14	0
	13	10	8	10	10	10
	9	20	1	20	5	20
	5	28				

Tabla 4.2-Valores de H_1-H_2 Obtenidos de las Cartas HN-25 y HN-57

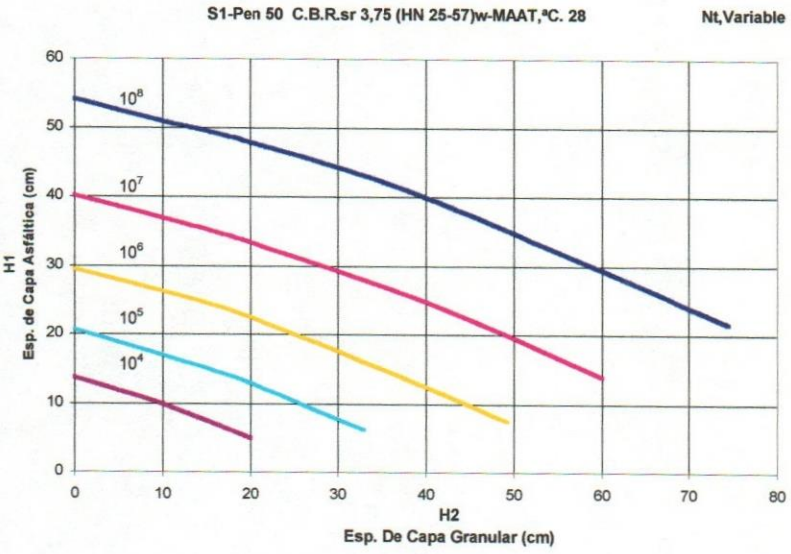


Gráfico 4.5

Con este procedimiento se obtuvieron las curvas N de cada carta HN requerida, faltando por definir las líneas límites dentro de éstas cartas.

Considerando los gráficos similares al *Gráfico 4.3* (variando N), y fijando valores de capacidad portante (C.B.R.) de la subrasante (3.75), para una misma temperatura media

[6] En el texto se desarrolló un ejemplo representativo, todos los demás valores obtenidos se presentan en los Anexos del Capítulo IV.

ambiente anual, rigidez y penetración del cemento asfáltico, se obtienen los valores que definen a las líneas límites correspondientes a materiales con capacidad de soporte comprendida entre 20-40 y 40-80 para la carta HN interpolada. El procedimiento tomado se describe a continuación:

Primero: Se obtuvieron valores de espesores que brindan aporte estructural (H_2), como se muestra en el *Gráfico 4.6*

Segundo: Con estos valores se trazaron rectas verticales que intersecten las distintas curvas N en la gráfica HN interpolada de 3.75 (*Gráfico 4.7*), obteniendo así pares H_1 y H_2, luego se hizo un ajuste lineal obteniendo así las ecuaciones de las líneas límites 20-40 y 40-80, como se observa en el *Gráfico 4.7*.

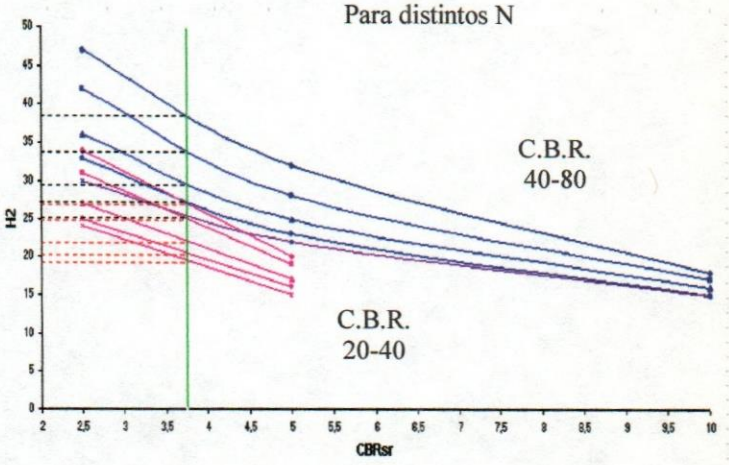


Gráfico 4.6- Curvas H_2 vs $C.B.R._{SR}$ para Rangos de $C.B.R._{MG}$ y N

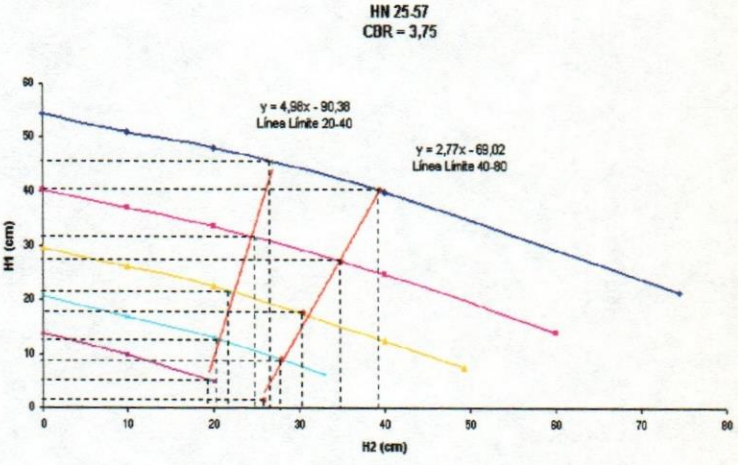


Gráfico 4.7-Ajuste Lineal para la Obtención de las Líneas Límite

Sólo queda por definir la línea límite 10-20, pero para esto se deben aclarar ciertos aspectos que caracterizan el comportamiento de las líneas límites en las cartas HN.

Las líneas límites de las cartas usadas en la interpolación poseen las mismas características (pendiente e intersección, con el eje H_1) manteniendo el mismo C.B.R. de la subrasante y variando la penetración del cemento asfáltico, la rigidez y la temperatura media ambiente anual como se observa en el *Gráfico 4.8*.

Gráfico 4.8-Líneas Límites para Distintas Condiciones de Mezcla Asfáltica para el Mismo Valor C.B.R$_{SR}$

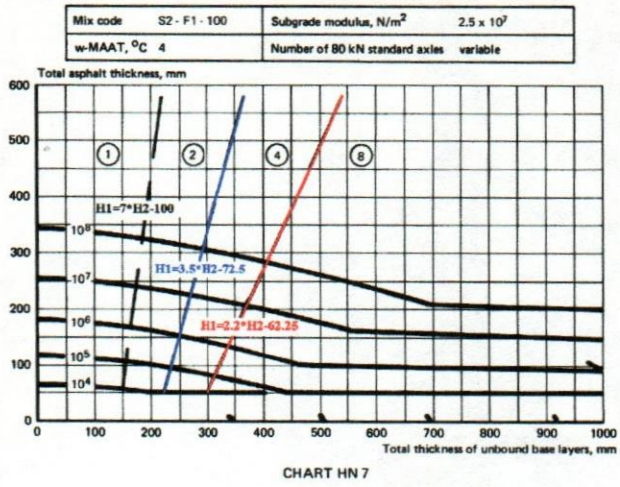


CHART HN 7

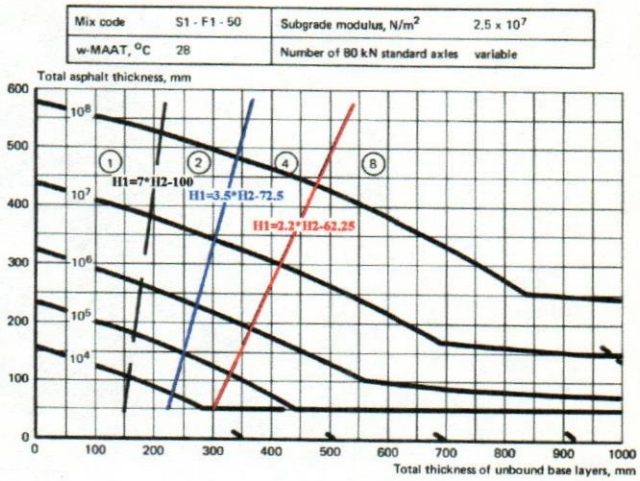


CHART HN 25

Analizando las líneas límites de los materiales granulares (C.B.R. 10-20, 20-40, 40-80), para las cartas usadas en la interpolación (tomaremos como ejemplo las Cartas HN-25, HN-57, HN-89, HN-121; *Ver Gráfico 4.9 a, b, c y d*), se observó que a medida que aumenta el C.B.R. de la subrasante manteniendo constante la penetración del cemento asfáltico, la rigidez de la mezcla asfáltica y la temperatura media ambiente anual, el espesor de material granular que brinda aporte estructural con un C.B.R. definido, disminuye (línea límite de C.B.R. 40-80 en el *Gráfico 4.9 a, b, c y d*).

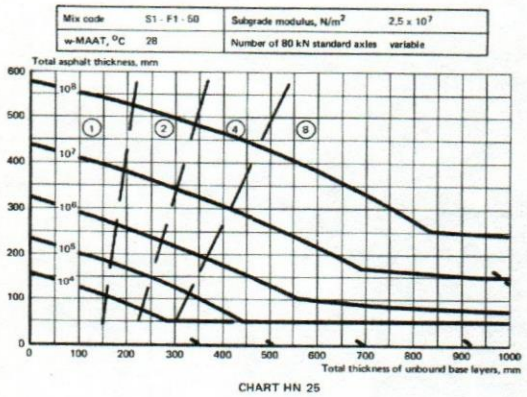


CHART HN 25

HN-25
(a)

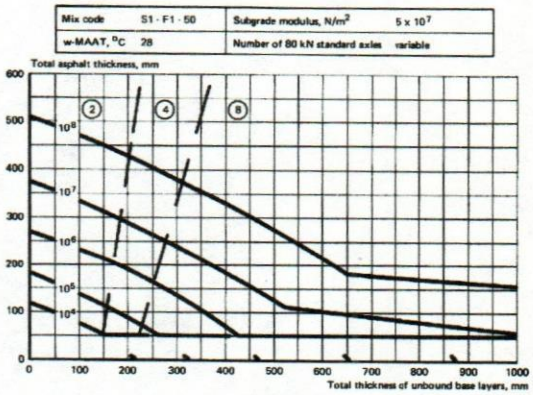


CHART HN 57

HN-57
(b)

Gráfico 4.9

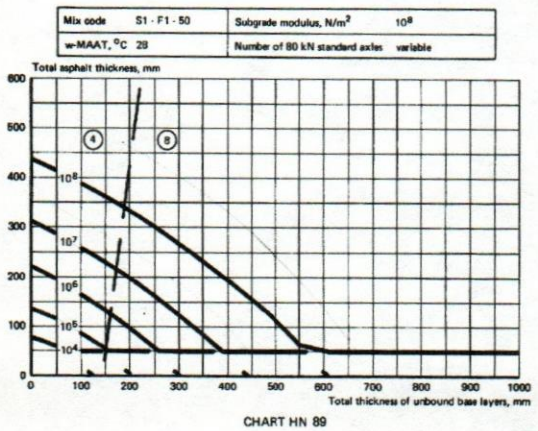


CHART HN 89

HN-89
(c)

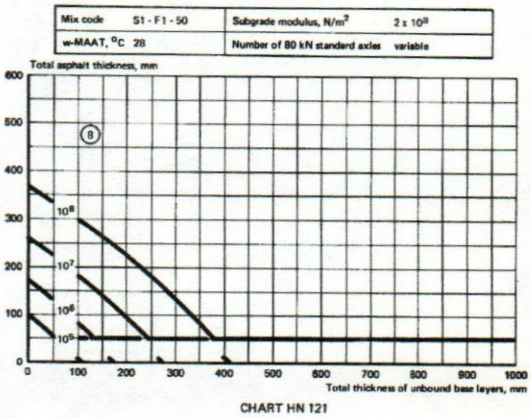


CHART HN 121

HN-121
(d)

Cuantitativamente, el comportamiento de las líneas límites para las cartas HN, se muestra a continuación en la *Tabla 4.3.*

$C.B.R._{SR}$=2.5 (HN-25)		$C.B.R._{SR}$=5 (HN-57)	
C.B.R.	Líneas Límites	C.B.R.	Líneas Límites
40-80	$H_1=2.20*H_2-61.25$	40-80	$H_1=3.50*H_2-72.50$
20-40	$H_1=3.50*H_2-72.50$	20-40	$H_1=7*H_2-100$
10-20	$H_1=7*H_2-100$	10-20	N.B.A.E.
$C.B.R._{SR}$=10 (HN-89)		$C.B.R._{SR}$=20 (HN-121)	
C.B.R.	Líneas Límites	C.B.R.	Líneas Límites
40-80	$H_1=7*H_2-100$	40-80	N.B.A.E.
20-40	N.B.A.E.	20-40	N.B.A.E.
10-20	N.B.A.E.	10-20	N.B.A.E.

N.B.A.E.: No brindan aporte estructural.

Tabla 4.3-Ecuaciones de las Líneas Límites para distintos $C.B.R._{SR}$

De forma análoga, el comportamiento cuantitativo de las líneas límites en las cartas HN interpoladas se muestra en la *Tabla 4.4.*

$C.B.R._{SR}$=3.75 (HN-25-57)		$C.B.R._{SR}$=7.5 (HN-57-89)		$C.B.R._{SR}$=15 (HN-89-121)	
C.B.R.	Líneas Límites	C.B.R.	Líneas Límites	C.B.R.	Líneas Límites
40-80	$H_1=2.77*H_2-69.02$	40-80	Por definir	40-80	Por definir
20-40	$H_1=4.98*H_2-90.39$	20-40	N.B.A.E.	20-40	N.B.A.E.
10-20	Por definir	10-20	N.B.A.E.	10-20	N.B.A.E.

N.B.A.E.: No brindan aporte estructural

Tabla 4.4-Ecuaciones de las Líneas Límites para distintos $C.B.R._{SR}$

Finalmente, para definir la línea límite 10-20, se agruparon los coeficientes de las ecuaciones ($H_1=m*H_2+b$) de las *Tablas 4.3 y 4.4* como se muestra en la *Tabla 4.5 (a y b)*, con la finalidad de relacionar la capacidad portante (C.B.R.) de la subrasante con dichos coeficientes, obteniendo expresiones algebraicas (*Ecuación 4.1 y Ecuación 4.2*) que sirvan para extrapolar los coeficientes (*m y b*) de dicha línea como se muestra en el *Gráfico 4.10 (a y b).*

a

Limite 40-80	
C.B.R. Sr	m
2,50	2,20
3,75	2,77
5,00	3,50
7,50	4,98
10,00	7,00
15,00	11,95

Tabla 4.5

b

Limite 40-80	
C.B.R. Sr	b
2,50	-61,25
3,75	-69,02
5,00	-72,50
7,50	-90,39
10,00	-100,00
15,00	-122,46

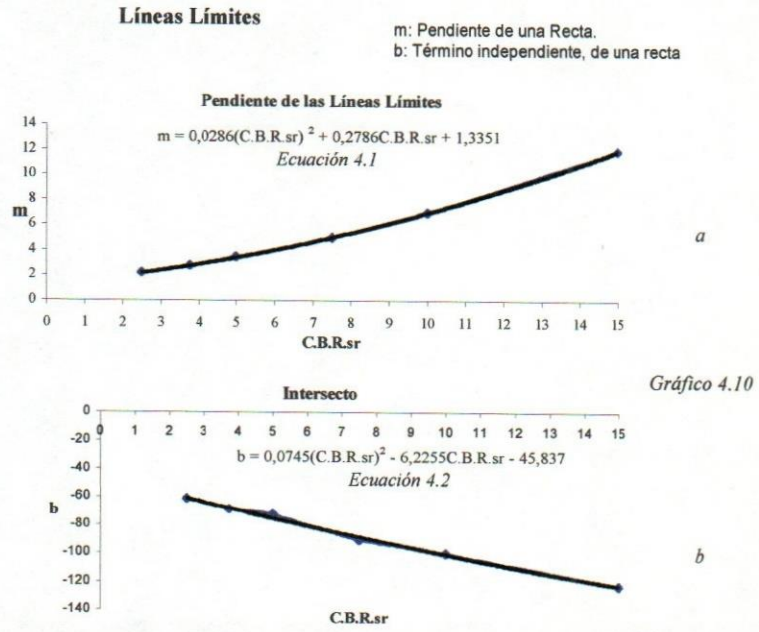


Gráfico 4.10

Los valores finalmente obtenidos se agruparon como se muestra en la *Tabla 4.6*, relacionando el espesor que brinda aporte estructural de los materiales granulares (H_2), con la capacidad portante (C.B.R.) de la subrasante, como se muestra en el *Gráfico 4.11*

TMAA 28°C	S 1	Pent 50	Nt = 10^8
H_2 40 - 80	H_2 20 - 40	H_2 10 - 20	CBR sr
47	**34**	**22**	2,5
40	**27**	**14**	3,75
32	**20**		5
25	**14**		7,5
18			10
13			15
			20

Tabla 4.6-Valores de H_2 vs C.B.R.$_{SR}$

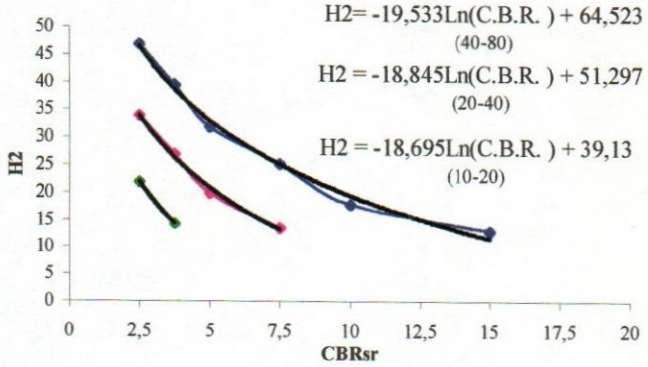


Gráfico 4.11-Curvas de Correlación de H_2 vs C.B.R.$_{SR}$ para Rangos de C.B.R.$_{MG}$

3.- Metodología y Procedimiento.

Para relacionar el espesor que brinda aporte estructural de los materiales granulares con las variables antes mencionadas; se determinaron ecuaciones particulares, hasta llegar a una general (a continuación se presentará el procedimiento de como se hallaron las ecuaciones, tomando como ejemplo, los datos de una mezcla asfáltica Pen-50, temperatura media ambiente anual de 28°C, S_1). como se indica a continuación:

- Ecuaciones de $H_2=f(C.B.R._{SR})$.

A partir del *Gráfico 4.11*, para cada curva N, se realizaron ajustes logarítmicos de regresión, en donde estos dieron una buena correlación, como se muestra en la *Tabla 4.7*.

R^2	Nt	(40-80)
0,992	10^8	-19,533Ln(x) + 64,523
0,992	10^7	-16,956Ln(x) + 56,847
0,995	10^6	-13,911Ln(x) + 48,478
0,995	10^5	-12,513Ln(x) + 44,174
0,991	10^4	-10,585Ln(x) + 39,713
		(20-40)
0,994	10^8	-18,845Ln(x) + 51,297
0,996	10^7	-17,003Ln(x) + 46,823
0,996	10^6	-14,038Ln(x) + 40,031
0,996	10^5	-12,827Ln(x) + 36,954
0,995	10^4	-12,291Ln(x) + 35,325
		(10-20)
1,000	10^8	-18,695Ln(x) + 39,13
1,000	10^7	-14,157Ln(x) + 31,972
1,000	10^6	-13,885Ln(x) + 30,723
1,000	10^5	-13,244Ln(x) + 29,135
1,000	10^4	-12,122Ln(x) + 27,107

Pen-50, 28°C, S_1

Donde x= C.B.R.$_{s.r.}$
R^2=Correlación.

Tabla 4.7- $H_2=a*Ln(C.B.R_{s.r.})+b$ para cada Nt y cada rango de C.B.R. de Material Granular

Se sabe que cada ecuación presentada en la *Tabla 4.7* es para un Nt y un rango de C.B.R. de material granular a usar como materiales de base ó subbase (10-20, 20-40, 40-80)

- Ecuaciones de $H_2=f(C.B.R._{SR}, Nt)$.

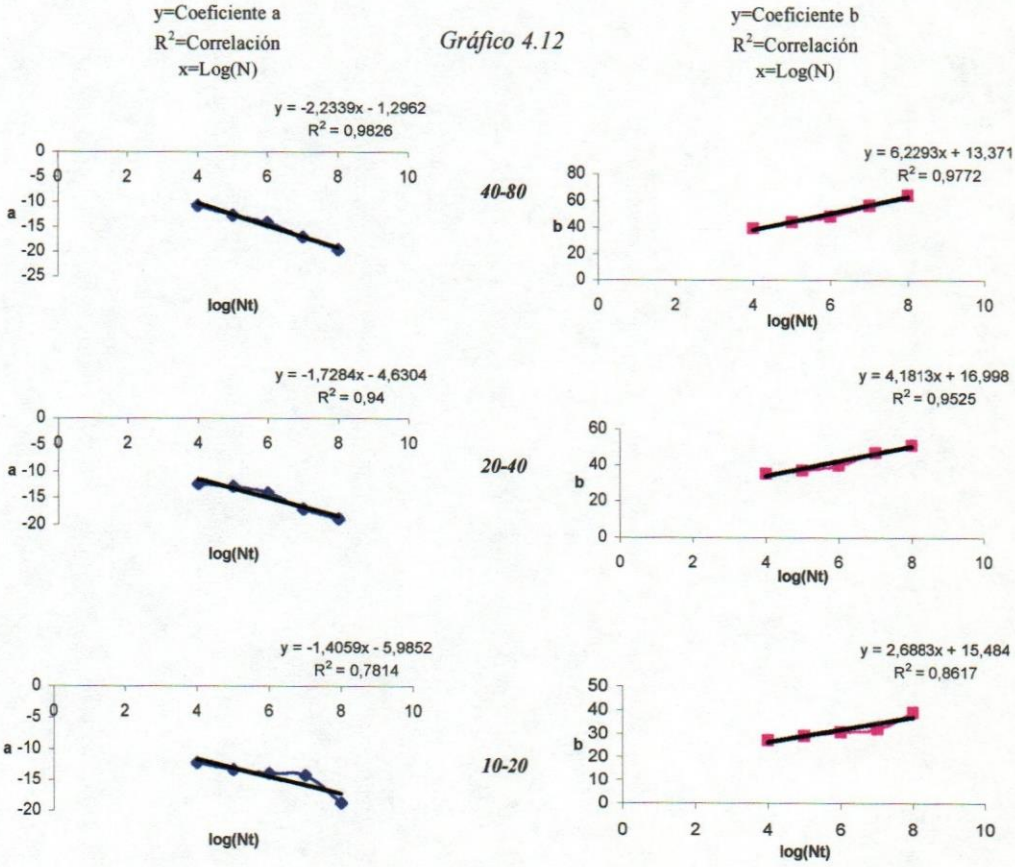
A partir de la *Tabla 4.7*, se realizaron una vez más ajustes de regresión, donde se coloca como variable Nt; relacionando los coeficientes ***a*** (acompaña al término de Ln) y ***b*** (término independiente) con *Log(*Nt*)* como se observa en el Gráfico 4.12, y esto se debe a que el comportamiento entre las curvas N dentro de una carta es logarítmico.

Pen 50 S_1		40-80		20-40		10-20	
Nt	log(Nt)	a	b	a	b	a	b
100000000	8	-19,533	64,523	-18,845	51,297	-18,695	39,13
10000000	7	-16,956	56,847	-17,003	46,823	-14,157	31,972
1000000	6	-13,911	48,478	-14,038	40,031	-13,885	30,723
100000	5	-12,513	44,174	-12,827	36,954	-13,244	29,135
10000	4	-10,585	39,713	-12,291	35,325	-12,122	27,107

Tabla 4.8-Valores a y b vs Log(Nt) por cada rango de $C.B.R._{MG}$

Se obtuvieron seis ecuaciones, dos por cada rango de $C.B.R._{MG}$ graficando los valores *a* y *b* vs *Log(Nt)* de la *Tabla 4.8*, como se observa en el *Gráfico 4.12*.

Gráfico 4.12



En el *Gráfico 4.12.* se observa el ajuste lineal obtenido pudiendo expresar ahora $H_2 = f(C.B.R._{s.r.}, Log(Nt))$, quedando las ecuaciones como se indica en la *Tabla 4.9.*

$H_2=(a_1*\log(Nt)+b_1)*\ln(C.B.R.sr)+a_2*\log(Nt)+b_2$				
$C.B.R._{MG}$	a_1	b_1	a_2	b_2
80	-2,2339	-1,2962	6,2293	13,371
40	-1,7284	-4,6304	4,1813	16,998
20	-1,4059	-5,9852	2,6883	15,484

Tabla 4.9-Valores de a1, a2, b1 y b2 vs C.B.R$_{MG}$

Cada ecuación se utiliza para un rango de C.B.R. determinado de material granular a usar como base y/o subbase.

- Ecuaciones de *$H_2=f(C.B.R._{SR}, Nt, C.B.R._{MG})$*.

A partir de lo realizado anteriormente, se hicieron nuevos ajustes de regresión, donde se coloca como variable el C.B.R. del material granular; relacionando los coeficientes ***a_1***, ***b_1*** y ***a_2***, ***b_2*** de las ecuaciones expuestas en la *Tabla 4.9*, con el C.B.R. del material granular, como se observa en el *Gráfico 4.13.*

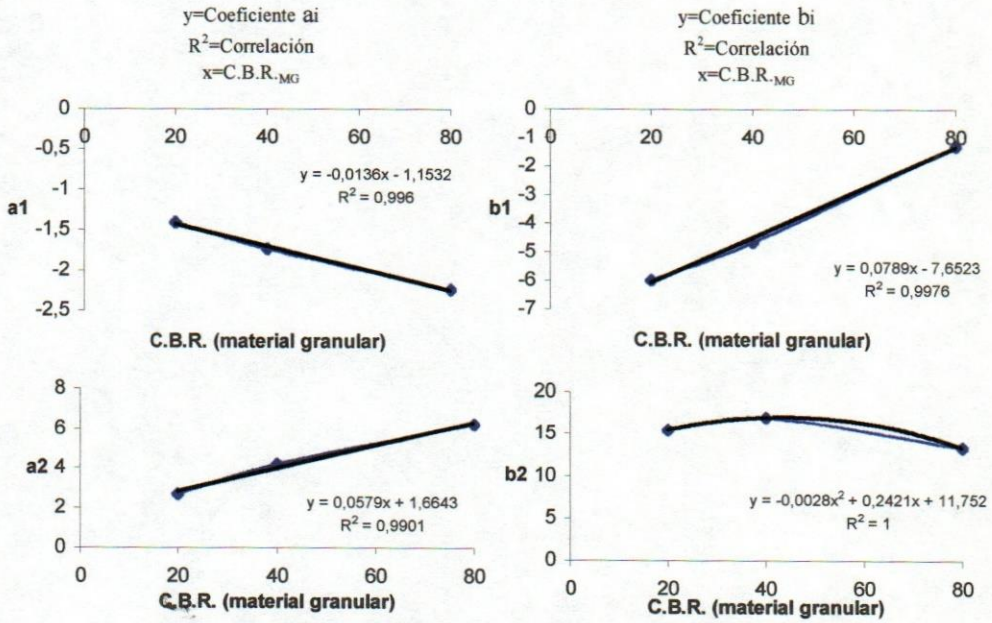


Gráfico 4.13

Se obtiene un ajuste muy bueno con los datos de la *Tabla 4.9*, al utilizar una ecuación de segundo grado[7] como se observa en el *Gráfico 4.13.* Con éstas ecuaciones se pudo expresar $H_2=f(C.B.R._{s.r}, Nt, C.B.R._{MG})$, quedando las ecuaciones finalmente como se indica en la *Tabla 4.11.*

[7] En algunos casos dependiendo de la correlación obtenida, también se realizaron ajustes lineales, como se presenta en el ejemplo.

Para llegar a ecuaciones como la de la *Tabla 4.11*, sólo hace falta sustituir los valores de los coeficientes auxiliares de la *Tabla 4.10* (por ejemplo, la intersección de la fila.1 con la columna a1 resulta el coeficiente a1.1).

H_2=((a1.1*C.B.R.$_{MG}^2$+a1.2* C.B.R.$_{MG}$+a1.3)*log(Nt)+(b1.1* C.B.R.$_{MG}^2$+b1.2* C.B.R.$_{MG}$+b1.3))* LN(C.B.Rsr)+((a2.1* C.B.R.$_{MG}^2$+a2.2* C.B.R.$_{MG}$+a2.3)* log(Nt)+(b2.1* C.B.R.$_{MG}^2$+b2.2* C.B.R.$_{MG}$+b2.3))

	a1	b1	a2	b2
.1	0	0	0	-0,0028
.2	-0.0136	0.0789	0.0579	0,2421
.3	-1.1532	-7.6523	1.6643	11.752

Tabla 4.10

Fórmula H_2=*f*(C.B.R.$_{s,r}$, Nt, C.B.R.$_{MG}$) para *Pen-50, 28°C, S_1*

$$H_2 = \left((-0.0136 * C.B.R - 1.1532) * \log(N_t) + 0.0789 * C.B.R - 7.6523\right) * \ln(C.B.R_{sr}) + \left(0.0579 * C.B.R + 1.6643\right) * \log(N_t) - 0.0028 * C.B.R^2 + 0.2421 * C.B.R + 11.752$$

Tabla 4.11

4.- Expresiones/Tabla de Valores.

La *tabla 4.12*, presentan los coeficientes a utilizar en todas las ecuaciones de una forma esquematizada, para cualquier temperatura media ambiente anual, penetraciones de 50 y 100 y mezclas asfálticas densas (S_1) y/o abiertas (S_2).

H_2=((a1.1*C.B.R.$^2_{MG}$+a1.2* C.B.R.$_{MG}$+a1.3)*log(Nt)+(b1.1* C.B.R.$^2_{MG}$+b1.2* C.B.R.$_{MG}$+b1.3))*LN(C.B.Rsr)+ ((a2.1* C.B.R.$^2_{MG}$+a2.2* C.B.R.$_{MG}$+a2.3)* log(Nt)+(b2.1* C.B.R.$^2_{MG}$+b2.2*C.B.R.$_{MG}$+b2.3))

Tmaa	Pen.	Sx	a1.1	a1.2	a1.3	b1.1	b1.2	b1.3	a2.1	a2.2	a2.3	b2.1	b2.2	b2.3
28°C.	50	s1	0,0000	-0,0136	-1,1532	0,0000	0,0789	-7,6523	0,0000	0,0579	1,6643	-0,0028	0,2421	11,7520
		s2	0,0005	-0,0604	-0,7452	-0,0020	0,2704	-8,9067	-0,0013	0,1935	0,0629	0,0021	-0,2624	15,8780
	100	s1	-0,0001	0,0006	-2,2687	0,0016	0,1467	1,0692	-0,0005	0,1076	2,1518	-0,0031	0,3389	1,5586
		s2	0,0000	-0,0074	-2,2502	0,0009	-0,0534	-0,9867	-0,0006	0,1264	2,1213	-0,0021	0,1718	5,4098
20°C	50	s1	0,0000	-0,0043	-0,9838	0,0000	0,0088	-6,6614	0,0000	0,0329	1,4362	-0,0019	0,3082	11,5510
		s2	0,0005	-0,0634	-0,0180	-0,0030	0,3919	-14,6950	-0,0010	0,1592	-0,0575	0,0020	-0,2439	17,7140
	100	s1	0,0005	-0,0634	-0,0180	-0,0030	0,3919	-14,6950	-0,0010	0,1592	-0,0548	0,0020	-0,2439	18,3640
		s2	0,0007	-0,0916	0,2799	-0,0036	0,4551	-14,4880	-0,0014	0,2144	-1,0574	0,0033	-0,4142	22,9090
12°C	50	s1	-0,0002	-0,0238	-1,6139	0,0016	-0,1768	-1,5613	0,0000	0,0294	1,3465	-0,0039	0,5126	5,6380
		s2	-0,0002	0,0186	-1,5141	0,0021	-0,2086	-2,1022	-0,0001	0,0437	1,2779	-0,0450	0,5457	6,0061
	100	s1	-0,0001	0,0033	-1,2759	0,0014	-0,1451	-2,0966	-0,0001	0,0451	1,2839	-0,0042	0,5433	4,6468
		s2	0,0004	-0,0526	-0,1012	-0,0013	0,1713	-9,3049	-0,0008	0,1253	-0,0909	-0,0008	0,1236	14,8721
4°C	50	s1	-0,0006	0,0641	-2,2713	0,0049	-0,5360	5,3003	0,0005	-0,0330	2,3806	-0,0080	0,9871	-2,1869
		s2	-0,0006	0,0745	-2,9684	0,0044	-0,5481	8,2037	0,0004	-0,0322	3,0506	-0,0069	0,9463	-4,6834
	100	s1	-0,0006	0,0745	-2,9684	0,0044	-0,5481	8,2037	0,0004	-0,0322	3,0506	-0,0069	0,9463	-2,2520
		s2	-0,0002	0,0155	-1,4668	0,0017	-0,1665	-2,7865	0,0000	0,0415	1,3160	-0,0043	0,5159	7,8541

Tabla 4.12

Seguidamente en la *Tabla 4.13* se presentan los espesores máximos de material granular para diferentes las condiciones de diseño.

		28°C				20°C				12°C				4°C			
		C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 2,5			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	47	51	52	55	42	46	47	50	39	40	43	45	37	39	40	42
	20-40	34	38	38	40	30	33	34	36	28	29	31	32	27	28	29	30
	10-20	22	23	24	25	19	21	21	22	18	19	19	20	17	18	18	19
10^7	40-80	42	44	45	46	38	40	41	43	36	37	39	38	34	36	37	38
	20-40	31	32	33	34	28	30	30	32	26	27	27	28	25	26	27	28
	10-20	19	21	21	22	18	19	19	20	17	17	18	18	17	17	17	18
10^6	40-80	36	37	39	40	35	36	36	37	33	34	35	35	32	34	34	34
	20-40	27	28	29	30	25	27	27	28	24	25	26	26	24	24	25	26
	10-20	18	19	18	20	17	18	18	18	16	17	17	17	16	16	17	17
10^5	40-80	33	34	34	35	32	32	33	33	30	31	32	32	30	32	32	32
	20-40	25	26	26	27	24	24	25	25	23	24	24	24	23	23	23	24
	10-20	17	17	17	18	16	17	17	17	15	15	16	16	15	15	16	16
10^4	40-80	30	30	31	31	30	30	30	30	28	28	30	30	28	29	29	29
	20-40	24	23	24	24	23	23	23	23	22	22	23	23	22	22	22	22
	10-20	16	16	16	16	15	16	16	16	15	15	15	15	14	14	15	15
		C.B.R.sr = 3,75				C.B.R.sr = 3,75				C.B.R.sr = 3,75				C.B.R.sr = 3,75			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	40	42	42	45	35	38	39	41	33	34	35	37	32	34	35	35
	20-40	27	29	29	31	25	26	27	29	23	24	25	26	22	23	24	24
	10-20	14	16	16	16	13	14	14	15	12	13	13	14	12	12	13	13
10^7	40-80	35	37	37	38	32	34	34	36	31	31	32	33	30	30	31	32
	20-40	25	26	26	27	23	24	24	23	22	22	23	23	21	21	22	22
	10-20	13	14	14	15	12	13	13	13	12	12	12	13	12	12	12	12
10^6	40-80	31	32	32	33	30	31	30	31	28	29	30	30	28	28	29	29
	20-40	22	23	23	24	21	24	22	23	20	21	21	22	20	20	21	21
	10-20	12	13	13	13	12	13	12	13	11	12	12	12	11	11	12	12
10^5	40-80	28	28	29	29	27	28	28	28	27	27	27	27	26	27	27	27
	20-40	21	21	21	22	20	20	20	21	19	20	20	20	19	19	20	20
	10-20	12	12	12	12	11	11	11	12	11	11	11	11	11	11	11	11
10^4	40-80	26	26	26	27	26	26	26	26	26	26	26	26	25	25	25	25
	20-40	20	19	20	20	19	19	19	19	19	19	19	19	18	18	19	19
	10-20	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10	11
		C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr = 5			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	32	33	33	36	28	30	30	32	27	28	28	30	26	27	28	28
	20-40	20	22	22	23	19	20	20	21	18	18	18	19	17	18	18	18
	10-20																
10^7	40-80	28	29	29	30	26	27	27	29	25	25	26	27	24	25	26	26
	20-40	19	20	20	20	17	18	18	19	17	17	17	18	16	17	17	17
	10-20																
10^6	40-80	25	26	26	27	24	24	25	25	23	24	24	24	23	23	24	24
	20-40	17	18	18	18	16	17	17	17	16	16	16	17	15	16	16	16
	10-20																
10^5	40-80	23	23	24	24	23	23	22	23	22	23	22	22	22	22	22	22
	20-40	16	16	16	16	15	16	15	15	15	15	15	15	14	15	15	15
	10-20																
10^4	40-80	22	22	22	22	21	21	21	21	21	21	21	21	20	20	20	20
	20-40	15	15	15	15	14	15	14	15	14	14	14	14	13	14	14	14
	10-20																
		C.B.R.sr =7,5				C.B.R.sr =7,5				C.B.R.sr =7,5				C.B.R.sr =7,5			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	25	27	27	28	23	25	25	26	22	23	23	24	21	22	23	23
	20-40	14	15	15	15	13	13	13	14	12	12	13	13	12	12	13	13
	10-20																
10^7	40-80	23	24	24	25	21	22	22	23	21	21	22	22	20	21	21	21
	20-40	13	13	13	14	12	12	12	13	12	12	12	12	11	11	12	12
	10-20																
10^6	40-80	21	22	22	22	20	21	21	21	20	20	20	20	19	19	20	20
	20-40	12	12	12	13	11	12	12	12	11	11	11	12	11	11	11	11
	10-20																
10^5	40-80	19	19	19	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
	20-40	11	11	11	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	10-20																
10^4	40-80	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	17	18	18	18	18	18
	20-40	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10	11	10	10	10	10
	10-20																
		C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 10			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	18	20	20	21	17	18	18	19	17	17	17	18	16	17	17	17
	20-40																
	10-20																
10^7	40-80	17	18	18	18	16	17	17	17	16	16	16	17	16	16	16	16
	20-40																
	10-20																
10^6	40-80	16	16	16	16	16	16	15	16	15	15	15	15	15	15	15	15
	20-40																
	10-20																
10^5	40-80	15	15	15	15	15	15	14	15	14	15	14	15	14	14	14	14
	20-40																
	10-20																
10^4	40-80	15	15	15	15	13	13	13	14	13	13	13	14	13	13	13	13
	20-40																
	10-20																
		C.B.R.sr = 15				C.B.R.sr = 15				C.B.R.sr = 15				C.B.R.sr = 15			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	13	14	14	14	12	13	13	13	12	12	12	13	11	12	12	12
	20-40																
	10-20																
10^7	40-80	12	12	12	13	11	12	12	12	11	11	11	12	11	11	11	11
	20-40																
	10-20																
10^6	40-80	11	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	20-40																
	10-20																
10^5	40-80	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10	11			10	10
	20-40																
	10-20																
10^4	40-80					11	11	11	11			10	10				
	20-40																
	10-20																

Tabla 4.13-Espesores Máximos de Material Granular de Base y Subbase para Diferentes Condiciones de C.B.R. $_{SR}$ -Nt-C.B.R. $_{MG}$

5.- Análisis de Resultados.

Se procedió a evaluar las ecuaciones obtenidas y comparar los resultados con los valores iniciales obtenidos en las cartas del Método Shell. La diferencia radica en que los ajustes de las ecuaciones dan un cierto error, el cual tiene un valor máximo aproximado de ± 3 cm (valores de las ecuaciones - valores de las cartas Shell), en todas las ecuaciones presentadas.

En la *Tabla 4.14(a)* se presentan los valores de espesores máximos que brindan aporte estructural obtenidos por las ecuaciones ($H_2=f(C.B.R._{SR}, Nt, C.B.R._{MG})$) para un Nt dado[8], la *Tabla 4.14(b)* presenta los valores obtenidos de las Cartas HN de Shell y la *Tabla 4.14(c)* presenta el diferencial entre el valor calculado por la *Fórmula* presentada en la *Tabla 4.11* y el obtenido de las cartas del Método Shell.

Obtenidos de las Fórmulas (a)

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.s.r = 2,5	C.B.R.s.r = 3,75	C.B.R.s.r = 5	C.B.R.s.r =7,5	C.B.R.s.r = 10	C.B.R.s.r = 15
10^8	40-80	46	38	33	25	19	11
	20-40	32	25	20	12		
	10-20	22	15				

Extraídos de las Cartas HN (b)

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.s.r = 2,5	C.B.R.s.r = 3,75	C.B.R.s.r = 5	C.B.R.s.r =7,5	C.B.R.s.r = 10	C.B.R.s.r = 15
10^8	40-80	47	40	32	25	18	13
	20-40	34	27	20	14		
	10-20	22	14				

Desviación = Fórmula – Carta HN (c)

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.s.r = 2,5	C.B.R.s.r = 3,75	C.B.R.s.r = 5	C.B.R.s.r =7,5	C.B.R.s.r = 10	C.B.R.s.r = 15
10^8	40-80	-1	-2	1	0	1	-2
	20-40	-2	-2	0	-2		
	10-20	0	1				

Tabla 4.14

En cuanto a los resultados presentados anteriormente queda a juicio del lector el uso de las ecuaciones, o de las tablas.

Los resultados aquí expresados son para situaciones generales (Nt: 10^4-10^5-10^6-10^7-10^8; C.B.R. de la subrasante: 2.5-3.75-5-7.5-10-15; C.B.R. de los materiales granulares comprendidos entre los rangos: 10-20, 20-40, 40-80).

[8] Se usará como ejemplo $N=10^8$

CAPÍTULO V. ESPECIFICACIONES PARA VENEZUELA.

CAPÍTULO V. ESPECIFICACIONES PARA VENEZUELA.

1.- Introducción.

Para construir estructuras de pavimento flexible que cumplan con los requisitos de diseño, se deben establecer las características propias de la zona en donde se construirá la obra civil y tener en cuenta la disponibilidad de materiales necesarios que puedan cumplir con los requisitos de diseño.

El método de diseño publicado por el M.T.C. contempla la incorporación de características propias de las diferentes regiones del país, las cuales permiten definir la Unidad de Diseño.

La norma venezolana (COVENIN 2000-87) contempla la utilización de distintos cementos asfálticos de penetración 60-70, 85-100, 120-150; pero en la práctica, sólo los primeros dos se producen comercialmente en las refinerías de la industria petrolera nacional (P.D.V.S.A); aunque se debe tomar en cuenta que para ciertos proyectos desarrollados en el país, se ha usado cemento asfáltico de penetración 40-50, esto se debe a que la industria petrolera venezolana está en capacidad de producir cualquier tipo cemento asfáltico de penetración. La selección del cemento asfáltico de penetración se hace de acuerdo a la temperatura media ambiente anual prevista en el proyecto. En Venezuela, ello es relativamente sencillo ya que la temperatura media ambiente anual depende sólo de la altura sobre el nivel del mar (*Ver Gráfico 8 en los Anexos del Capítulo III*), al igual que el criterio del ingeniero proyectista. Se puede establecer una temperatura media ambiente anual (TMAA) según la zona (*Ver Figura 1 en los Anexos del Capítulo III*), ya que las fluctuaciones durante el día son muy pocas.

T.M.A.A	PENETRACIÓN.
≥ 18 °C	40-50 ó 60-70
< 18 °C	60-70 ó 85-100

Tabla 5.1-Penetración de Cemento Asfáltico Recomendada Según la TMAA en Venezuela

Otra restricción para la selección del cemento asfáltico de penetración en el diseño venezolano, es la pendiente de la vía, donde se establece que para una pendiente mayor al 3% se debe evitar el uso de cemento asfáltico de penetración 85-100[1], especialmente en vías de tránsito intenso.

[1] Lo dicho anteriormente, son ejemplos de restricciones validas para Venezuela, es de recordar que el alcance de este trabajo son los materiales granulares.

Los materiales granulares, no se ven afectados por la temperatura, pero sí por la precipitación, que es capaz de alterar su comportamiento al variar su contenido de humedad.

2.- Espesores Máximos Para Venezuela.

La aplicación de las ecuaciones desarrolladas en el Capítulo IV, se simplificarán según las restricciones de los materiales de construcción que contempla el método M.T.C. y la norma COVENIN 2000-87.

Analizando los valores de espesores máximos obtenidos de las cartas HN de Shell, para una temperatura determinada, un material de un C.B.R. específico y un Nt, los mismos varían como se observa a en la *Tabla 5.2*[2].

		C.B.R.sr=2,5							
		>18°C.				<18°C.			
		28°C.				12°C.			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	47	49	52	54	40	40	44	45
	20-40	34	36	38	39	29	29	32	32
	10-20	22	23	24	25	19	19	20	20
10^7	40-80	42	43	45	46	37	37	39	38
	20-40	31	32	33	34	27	27	28	28
	10-20	19	20	21	22	17	17	18	18
10^6	40-80	36	37	39	40	34	34	35	35
	20-40	27	28	29	30	25	25	26	26
	10-20	18	19	18	19	17	17	17	17
10^5	40-80	33	34	34	35	31	31	32	32
	20-40	25	26	26	27	24	24	24	24
	10-20	17	17	17	18	15	15	16	16
10^4	40-80	30	30	31	31	28	28	30	30
	20-40	24	24	24	24	22	22	23	23
	10-20	16	16	16	16	15	15	15	15
		20°C.				4°C.			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	42	44	47	49	38	39	41	42
	20-40	30	32	34	35	28	28	30	30
	10-20	19	20	21	22	18	18	19	19
10^7	40-80	38	39	41	42	35	36	38	38
	20-40	28	29	30	31	26	26	28	28
	10-20	18	19	19	20	17	17	18	18
10^6	40-80	35	36	36	37	33	34	34	34
	20-40	25	26	27	28	24	24	26	26
	10-20	17	18	18	18	16	16	17	17
10^5	40-80	32	32	33	33	31	32	32	32
	20-40	24	24	25	25	23	23	24	24
	10-20	16	17	17	17	15	15	16	16
10^4	40-80	30	30	30	30	29	29	29	29
	20-40	23	23	23	23	22	22	22	22
	10-20	15	16	16	16	14	14	15	15

Tabla 5.2-Espesores Máximos de Material Granular de Base y Subbase recomendados para Venezuela con un C.B.R. $_{SR}$=2,5 y Diferentes Condiciones de Nt-C.B.R. $_{MG}$ y Penetraciones del Cemento Asfáltico

[2] Se presentarán valores como ejemplo, la tabla completa está en los Anexos del Capítulo V.

Se observa que la variación del espesor de material granular para diferentes penetraciones del cemento asfáltico es prácticamente despreciable para la misma rigidez y rango de temperatura (*Ver Tabla 5.1*), por ello se procedió a ponderar los mismos, como se muestra en la *Tabla 5.3*.

		C.B.R.sr=2,5			
		>18°C.		<18°C.	
		28°C.		12°C.	
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)
10^8	40-80	47	49	40	40
	20-40	34	36	29	29
	10-20	22	23	19	19
		20°C.		4°C.	
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)
10^8	40-80	42	44	38	39
	20-40	30	32	28	28
	10-20	19	20	18	18

Tabla 5.3 a

		>18°C.	<18°C.
		C.B.R.sr 2,5	
Nt	C.B.R. c.g	S1	S1
10^8	40-80	46	39
	20-40	33	29
	10-20	21	19

Tabla 5.3 b

Donde cada valor de la *Tabla 5.3b* es el resultado del promedio ponderado

Espesores Máximos Ponderados Recomendados de Material Granular de Base y Subbase para un C.B.R. $_{SR}$ =2,5 - Nt de 10^{8} y Diferentes C.B.R $_{MG}$ para Venezuela

Disminuyendo el número de ecuaciones a usar para el diseño, obteniendo como resultado cuatro ecuaciones que, dependen sólo de la temperatura media ambiente anual y de la rigidez de la capa asfáltica[3].

$$H_2=((a1.1*C.B.R.^2_{MG}+a1.2*C.B.R._{MG}+a1.3)*\log(Nt)+(b1.1*C.B.R.^2_{MG}+b1.2*C.B.R._{MG}+b1.3))*LN(C.B.Rsr)+((a2.1*C.B.R.^2_{MG}+a2.2*C.B.R._{MG}+a2.3)*\log(Nt)+(b2.1*C.B.R.^2_{MG}+b2.2*C.B.R._{MG}+b2.3))$$

Temp.	Sx	a1.1	a1.2	a1.3	b1.1	b1.2	b1.3	a2.1	a2.2	a2.3	b2.1	b2.2	b2.3
>18°C.	s1	0,0004	-0,0583	0,0104	-0,0026	0,3570	-14,9890	-0,0006	0,1258	-0,1668	-0,0001	-0,0500	20,3523
	s2	0,0001	-0,0190	-1,6433	0,0004	-0,0158	-2,7960	-0,0007	0,1334	1,2323	-0,0018	0,1632	8,3597
<18°C.	s1	0,0001	-0,0031	-1,1900	0,0008	-0,1068	-2,6068	-0,0004	0,0584	1,1072	-0,0029	0,4660	6,9936
	s2	0,0002	-0,0315	-0,4548	-0,0005	0,0656	-7,5369	-0,0002	0,0712	0,7677	-0,0035	0,3937	11,3513

Tabla 5.4-Ecuaciones Eg=f(C.B.R. $_{SR}$-Nt-C.B.R. $_{MG}$) Recomendadas para Venezuela

Para la obtención de éstas ecuaciones se procedió de manera similar a lo expuesto en el capítulo IV, en este caso el error arrojado por las ecuaciones es de ±3 cm[4].(la diferencia entre los espesores que brindan aporte estructural extraídos de las fórmulas de la *Tabla 5.4*).

[3] Según la norma venezolana, se contemplan mezclas densas (S_1) y mezclas abiertas (S2).
[4] Ver Capítulo IV aparte 5.

		>18°C.		<18°C.		>18°C.		<18°C.		>18°C.		<18°C.	
		C.B.R.sr 2.5				C.B.R.sr 3.75				C.B.R.sr 5			
Nt	C.B.R. c.g	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
10^8	40-80	46	51	39	43	38	41	34	36	31	32	28	29
	20-40	33	37	29	31	26	29	24	25	20	22	18	19
	10-20	21	23	19	20	14	15	13	14				
10^7	40-80	41	44	36	38	34	36	31	33	28	29	25	27
	20-40	30	32	27	28	24	25	22	23	19	19	17	18
	10-20	19	21	17	18	13	14	12	13				
10^6	40-80	36	38	34	35	30	32	29	30	25	26	24	24
	20-40	27	29	25	26	22	23	21	22	17	18	16	17
	10-20	18	18	17	17	12	13	12	12				
10^5	40-80	33	34	31	32	28	28	27	27	23	23	23	22
	20-40	25	26	24	24	20	21	20	20	16	16	15	15
	10-20	17	17	15	16	11	12	11	11				
10^4	40-80	30	31	29	30	26	26	26	26	22	22	21	21
	20-40	24	24	22	23	19	19	19	19	15	15	14	14
	10-20	16	16	15	15	11	11	11	11				
		C.B.R.sr 7.5				C.B.R.sr 10				C.B.R.sr 15			
Nt	C.B.R. c.g	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
10^8	40-80	25	26	23	24	18	20	17	18	13	13	12	13
	20-40	13	14	12	13								
	10-20												
10^7	40-80	22	23	21	22	17	18	16	17	11	12	11	12
	20-40	12	13	12	12								
	10-20												
10^6	40-80	21	21	20	20	16	16	15	15	11	11	11	11
	20-40	12	12	11	12								
	10-20												
10^5	40-80	19	19	19	19	15	15	15	15	11	11		11
	20-40	11	11	11	11								
	10-20												
10^4	40-80	19	19	19	18	14	14	13	14				
	20-40	11	11	11	11								
	10-20												

Tabla 5.5-Espesores Máximos de Material Granular de Base y Subbase para Diferentes Condiciones de C.B.R. $_{SR}$*-Nt-C.B.R.* $_{MG}$ *Recomendados para Venezuela*

En la *Tabla 5.5* se presentan los espesores máximos requeridos de capas granulares que brindan aporte estructural, de acuerdo a la capacidad portante (C.B.R. de la subrasante) y el número acumulado de cargas equivalentes (N_t).

3.- Incorporación de Consideraciones Estructurales Complementarias al Método M.T.C. para los Materiales Granulares.

A continuación se describirá un procedimiento rápido y sencillo para diseñar con el método M.T.C. incluyendo las recomendaciones estructurales al uso de materiales granulares:

- Establecer información básica (Nt, C.B.R.sr, Rg, Rm y materiales disponibles).
- Establecer espesor mínimo por fatiga de la capa asfáltica y fijar el espesor de la capa asfáltica ($e_{ca} \geq e_{min.\ fatiga}$).
- Pasar a la condición de proyecto de las capas asfálticas[5].
- Verificar sobre cada capa granular $NEV_{col} \geq NEV_{req}$.
- Determinar el resto de los espesores, en este punto se debe verificar que el espesor colocado en cada capa trabaje estructuralmente, es decir, que se minimice el uso de material granular como relleno[6].
- Verificar la sobrecarga, para controlar el porcentaje de hinchamiento.

4.- Desarrollo del Programa de Diseño.

4.1.- Introducción.

Como parte de los Objetivos propuestos por este Trabajo Especial de Grado, el desarrollo de un Programa que tome en cuenta los aspectos complementarios propuestos al Método M.T.C., descritos con anterioridad en este capítulo, resulta un importante aporte para todos los Profesionales dedicados a esta rama de la Ingeniería Civil.

Además, es de resaltar que el desarrollo de dicha herramienta con el enfoque que se ha realizado en este Trabajo, le permite al Proyectista la posibilidad de interactuar con cinco (5) tipos de Modelos Estructurales tomando en cuenta los mismos materiales

[5] Al establecer el espesor mínimo por fatiga, este es el espesor en la etapa constructiva, para pasarla a condición de diseño, se debe tomar en cuenta el R_{ta}.

[6] Se usarán las ecuaciones o tablas sugeridas.

previstos en el manual del *Método de Diseño de Pavimentos Flexibles* del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (M.T.C.).

La intensión de este Capítulo es la de explicar brevemente como se diseñó el Programa, resaltando aquellos aspectos relativos al propósito de este Trabajo, como también el de presentar el desarrollo de un *Ejemplo*, en el que se verán las virtudes de ésta herramienta y de como el Proyectista deberá interpretar los resultados para su máximo aprovechamiento.

El desarrollo de este Programa se realizó mediante el empleo del *Programa Visual Basic versión 5*, el cual se consideró el más conveniente. Adicionalmente, se preparó un *Manual para el Usuario* con la finalidad de guiarlo en su aplicación. Esta misma lo podrá encontrar en el Anexo relativo a éste Capítulo.

4.2.- Objetivo.

El principal objetivo de éste Programa es el de servir como herramienta al Proyectista, permitiéndole agilizar las estimaciones iniciales y seleccionar una estructura de pavimento acorde con el proyecto.

4.3.- Alcances y limitaciones

El Programa, denominado *MTC,* determina los espesores requeridos en cada capa de la Estructura del Pavimento (Asfáltica y Granular), y determina el espesor máximo estructural para las capas granulares, con lo que el proyectista podrá tomar decisiones en cuanto a qué espesor de material granular conviene, bajo las condiciones propias del Proyecto.

El desarrollo del Programa se limita a los materiales granulares establecidos en la Norma en cuanto al tipo de materiales a los estrictamente utilizados en el Método M.T.C. Adicionalmente, el Programa permite que el usuario introduzca valores de Coeficientes Estructurales y Factores de Tránsito a su propio juicio. Para facilitar el trabajo, a continuación presentamos la *Tabla 5.6*, en la que se puede apreciar el rango de validez de cada una de las variables que se consideran en el Programa.

VARIABLE	Mínimo	Máximo
Nt (c.e.)	10.000	100.000.000
C.B.R. sr (%)	2,5	20
Temperatura (°C)	0	28
C.B.R. para Base Granular (%)	60	100
C.B.R. para Subbase Granular (%)	20	60
Estabilidad Marshall (Lbs.) para Concreto Asfáltico en Capas de Rodamiento	500	3000
Estabilidad Marshall (Lbs.) para Mezclas Asfálticas en Capas de Base	340	2000
Espesor Mínimo de Mezclas Asfálticas (cm.)	5	50
Coeficiente Estructural para Concreto Asfáltico en Capas de Rodamiento (a_1)	0,201	0,450
Coeficiente Estructural para Mezclas Asfálticas en Capas de Base (a_2)	0,139	0,380
Coeficiente Estructural para Materiales Granulares para Base y Subbase (a_2,a_3)	0,09	0,141
Espesor Mínimo de Material Granular a Colocar (cm.)	10	-

Tabla 5.6-Rango De Validez de cada una de las Variables que se Consideran en el Programa.

El Programa cuenta con la facultad de diseñar cinco (5) tipos de Estructuras diferentes, aunque no en forma simultanea, en donde la diferencia radica en la disposición de los Materiales Granulares.

4.4.- Desarrollo del Método MTC con el Aporte Complementario.

Como en todo diseño, es necesario que el Proyectista cumpla con un ordenamiento secuencial, en los que la Selección del Modelo, Introducción de datos, Procesamiento de la Información, Resultados y Ajuste del Diseño, son los pasos más importantes a cumplir. A tal efecto, en la *Figura 5.1*, se presenta un esquema del procedimiento a seguir.

Figura 5.1- Esquema de Procedimiento del Programa

4.4.1.- Selección del Modelo.

El Programa presenta cinco (5) alternativas de diseño distintas, en las que la selección de un *Modelo Estructural de Pavimento Flexible* debe ser realizada por el Proyectista.

4.4.2.- Introducción de Datos.

Esta consta de dos partes. En la primera parte se le pide al usuario el valor de todas aquellas variables relacionadas con los parámetros externos a la Estructura del Pavimento, tales como el Número acumulado de repeticiones de cargas del Eje Patrón (Nt), Capacidad soporte (C.B.R.) de la Subrasante, Temperatura Media Ambiental Anual (TMAA), Factor

Regional relativo a la TMAA (Rta), como el Espesor Mínimo Requerido por las Mezclas Asfálticas ($e_{min\ M.A.}$).

En la segunda parte, se le pide al usuario el valor de todas aquellas variables relacionadas con los parámetros intrínsecos a los materiales (Estabilidades, C.B.R. y Coeficiente Estructural), a ser usados en la Estructura del Pavimento.

4.4.3.- Procesamiento de la Información

Una vez incorporadas todas las variables, el Programa realiza los cálculos necesarios siguiendo los principios de diseño establecidos en el Método M.T.C. (Ver Capítulo III), en donde la determinación de los espesores de las distintas capas granulares del Pavimento obedecen a la relación $NEVc \geq NEVr$, donde el *NEVr* depende únicamente de las propiedades de los Materiales Granulares (C.B.R.) e intensidad del Tránsito (Nt), y el *NEVc* en función del aporte estructural de cada material (a_i) según sus espesores (e_i); y la determinación de los espesores de las capas asfálticas del Pavimento depende del cumplimento del espesor mínimo requerido por las mezclas asfálticas en concordancia con el cumplimiento del criterio de Fatiga, en donde dicho espesor depende de la intensidad del Tránsito (Nt) y la capacidad de soporte (C.B.R.) de la subrasante, para dos condiciones de mezcla asfáltica (Densa y Abierta). Es de aclarar, que el desarrollo de éstas Ecuaciones se presentan en el Capítulo IV, donde son discutidas.

El Programa no reportará espesores de capas granulares inferiores a 10 cm; o sea, en los casos en donde el espesor a colocar sea inferior a 10 cm, el Programa descartará dicho valor asignándole el mínimo (10 cm).

4.4.4.- Resultados

Aquí, el usuario podrá observar un resumen de la información suministrada por él mismo, como los espesores requeridos por las distintas capas, y los Espesores Máximos de Material Granular que brindan Aporte Estructural, según el Modelo Estructural escogido en un principio. A partir de este punto, el usuario tiene una serie de opciones, entre las que podrá:

- Imprimir los Resultados.
- Regresar al inicio.
- Ajustar el Diseño.
- Salir del Programa.

4.4.5.- Ajuste del Diseño.

Si el usuario selecciona la opción Ajustar Diseño, el Programa procederá a evaluar los espesores de las capas granulares en concordancia con las recomendaciones de Espesores Máximos Estructurales, ajustando primero las capas granulares superiores, asignándoles el espesor Máximo Estructural, con lo que los espesores de las capas restantes quedarán determinados siguiendo los principios establecidos en el Método M.T.C.

5.- Ejemplo.

Para una mejor comprensión del uso del Programa y del Objetivo principal de este Trabajo, se ha decidido presentar un diseño hipotético de una tramo de vía en estudio, el cual desarrollaremos a continuación, destacando aquellos aspectos importantes en relación con la implementación de propuestas complementarias al Método de Diseño venezolano M.T.C. en cuanto al ajuste de diseños estructurales según los espesores máximos de materiales granulares que brindan aporte estructural.

A continuación se presenta la información relativa al diseño:

Transito :

Pendiente longitudinal (P) = 4 %.

Fecha de Puesta en servicio = 1er Trimestre del año 1999.

PDT_{1994} = 2000 veh./día

Tasa de Crecimiento del Transito (r) = 5 %, fija hasta el año 2020.

Período de Servicio (n) = 20 años.

Porcentaje de Vehículos Pesados (%Vp) = 20 %.

Factor Camión (Fc) = 2,75.

El Transito se considera Balanceado y la vía posee dos canales por sentido.

Características de los Materiales:

Concreto Asfáltico Tipo IV (Densamente Gradado) de Estabilidad = 2000 Lbs.

Base Asfáltica en Caliente I (Densamente Gradada) de Estabilidad = 1200 Lbs.

C.B.R. de la Subrasante = 2,5 %.

Grava Procesada de C.B.R. = 50 %.

Granzón de Mina de C.B.R. = 30 %.

Características Climáticas:

Altitud de la vía = 900 m.s.n.m.

Modelo Estructural Sugerido:

Se sugiere el siguiente uso de los Materiales:

Rodamiento : Concreto Asfáltico Tipo IV.

Base Asfáltica: Base Asfáltica en Caliente I

Subbase Granular 1: Grava Procesada

Subbase Granular 2: Granzón de Mina.

La introducción de los datos iniciales se presentan a continuación para la Primera Fase y Segunda Fase, tal y como se muestra en la *Figura 5.2 y 5.3*

Figura 5.2-Primera Fase

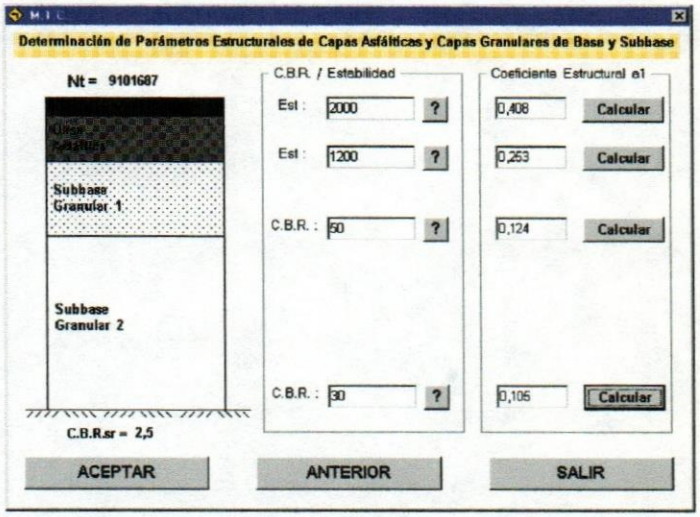


Figura 5.3-Segunda Fase

La forma detallada en la que se introducen los datos se muestra en el Anexo relativo a este Capítulo, en donde podrá consultar una "Manual para el Usuario" basada en el desarrollo de este Ejemplo.

La determinación de los Coeficientes Estructurales da cada material pueden ser determinados por el Programa si el usuario lo desea; a tal efecto, en los Anexos referentes al Capítulo III se presentan los Gráficos recomendadas por el Método M.T.C. con sus respectivas curvas de correlación, desarrolladas especialmente para los fines de este Trabajo a ser empleadas en el Programa.

Paso seguido, el Programa procesa toda ésta información, obteniendo resultados como los que se muestran en la *Figura 5.4.*

Cabe mencionar, que para el caso propuesto, los espesores obtenidos según el Método M.T.C. resultan ser distintos a los recomendados como Máximos Estructurales (Eg). Fíjese que el material de C.B.R.=50% tiene un espesor menor al recomendado (10<34), de aquí que, se podría aumentar su espesor al máximo (34 cm). Este aumento repercutirá en la capa inferior de C.B.R.=30%, traduciéndose en una disminución del espesor original requerido, pues es claro, que ahora la capa superior soportará más esfuerzos y repartirá menos esfuerzos, del que antes hacia, con lo que la capa inferior requerirá un espesor menor para cumplir con los principios de diseño.

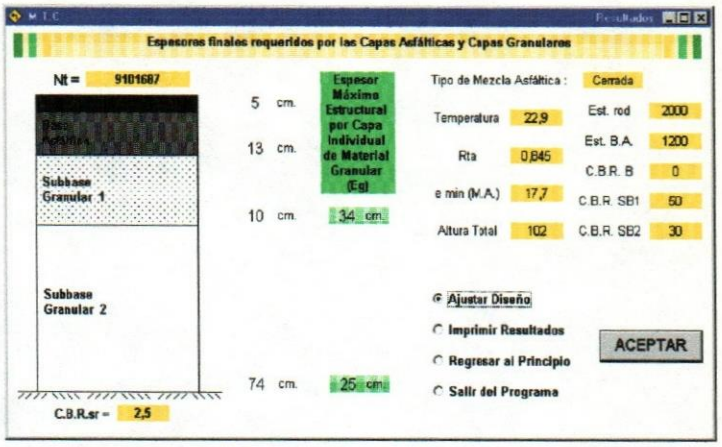


Figura 5.4-Resultados del Programa

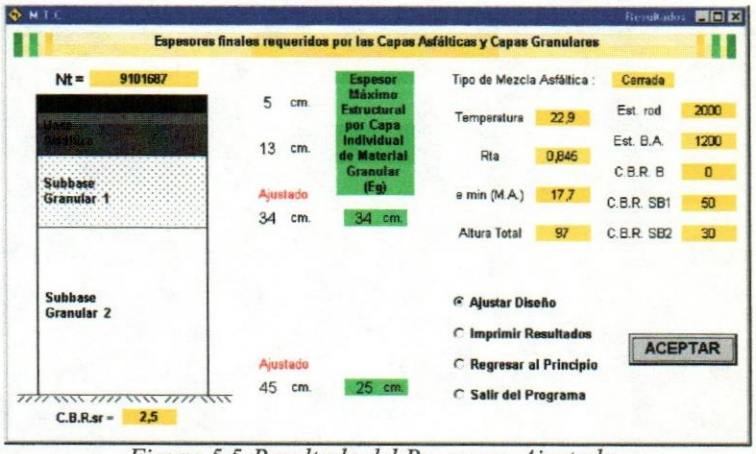


Figura 5.5-Resultado del Programa Ajustado

En virtud de esto, el Programa se complementa con un procedimiento de ajuste a los espesores de capas de acuerdo a las recomendaciones de espesores máximos de capas granulares que brindan aporte estructural. A tal efecto, en la *Figura 5.5.* se puede observar el resultado sugerido por el Programa al pedirle que Ajuste el Diseño.

Fíjese ahora como los espesores de las capas granulares se han modificado; ahora la capa de C.B.R. = 50%, posee un espesor de 34 cm, aumentando en unos 24 cm; y la de C.B.R. = 30%, ahora posee 45 cm, disminuyendo en unos 29 cm. Como consecuencia de este ajuste, la estructura ha disminuido 5 cm en comparación con la no ajustada, sin dejar de cumplir con los principios establecidos por el Método M.T.C., resultando una estructura equivalente que garantiza una mejor distribución de los esfuerzos a la subrasante.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1.- Conclusiones.

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo:

- La disipación de esfuerzos en un sistema multicapa, se ve influenciado por la relación entre el Módulo de Elasticidad de la capa asfáltica y el Módulo de Elasticidad de la capa granular (E_1/E_2), de aquí que el espesor máximo que brinda aporte estructural dependerá de dicha disipación.
- Los espesores de las capas granulares que brindan aporte estructural se encuentran influenciados directamente por la capacidad portante del terreno de fundación, por la intensidad del tránsito (N_t) y la capacidad portante de dicho material, e indirectamente por la temperatura media ambiente anual (TMAA), rigidez de la mezcla asfáltica y penetración del cemento asfáltico, los cuales afectan el Módulo de Elasticidad (E_1) de la capa asfáltica.
- El espesor que brinda aporte estructural para un mismo material granular disminuye, a medida que aumenta la capacidad portante (C.B.R.) del terreno de fundación, manteniendo constante las variables que afectan a las capas asfálticas.
- Para una misma capacidad portante (C.B.R.) de la subrasante a medida que aumenta la capacidad portante del material granular a usar como subbase o base, el espesor que brinda aporte estructural aumenta, manteniendo constante las variables que afectan a las capas asfálticas.
- Para una misma capacidad portante (C.B.R.) de la subrasante y del material granular, al aumentar las cargas equivalentes esperadas (Nt) aumenta el espesor estructural del material, manteniendo constante las variables que afectan a las capas asfálticas.
- Espesores de material granular colocados en exceso a los recomendados en este trabajo para condiciones de diseño definidas ($C.B.R._{sr}$, C.B.R. del material granular, N_t, TMAA, Sx, penetración del cemento asfáltico), no trabajan estructuralmente siendo considerados como relleno.

2.- Recomendaciones.

En cuanto al Uso de las Ecuaciones.

Al evaluar los espesores máximos de material granular que brindan aporte estructural se hacen las siguientes consideraciones:

- Se asumirán sólo valores enteros en el espesor del material granular.
- En caso de que el espesor de material granular sea menor de cero, se asume que no se requiere y el espesor máximo que brinda aporte estructural será igual a cero.
- En caso de que el espesor de material granular sea menor de diez, se asume que el espesor máximo que brinda aporte estructural será igual a cero y el aporte estructural se dará con otro material de mejor calidad.
- Serán únicamente los correspondientes a materiales con capacidad portante (C.B.R.) entre 20% y 80%. En caso de ser menor de 20%, la Norma no lo contempla para usarse como material de base ni de subbase. En caso de que el C.B.R sea mayor de 80%, no posee limitación en cuanto al aporte estructural del espesor de capa.
- Acepta valores de capacidad portante (C.B.R.) del terreno de fundación comprendido entre 2.5% y 15%. En caso de ser mayor de 15%, sólo se podrá usar material granular que posea un C.B.R. mayor de 80%.
- Acepta valores de intensidad del tránsito entre 10^4 y 10^8 cargas equivalentes.

De los espesores máximos de materiales granulares que brindan aporte estructural obtenidos de la evaluación de las ecuaciones para condiciones de tránsito muy pesado y pesado, para una temperatura media ambiente anual $\geq$ 18°C la cual es representativa del 95% de las carreteras construidas en Venezuela, y para un nivel de la capacidad de soporte del terreno de fundación=2,5%-5%-10%-15% se han construido las *Tablas 6.1-6.2-6.3-6.4*, en la que se consideran materiales granulares contemplados en la norma COVENIN 2000-87 con valores de C.B.R. característicos:

TMAA ≥ 18 °C C.B.R.sr = 2,5 %			Tráfico Muy Pesado $10^7 < Nt \leq 10^8$ Eg (cm)		Tráfico Pesado $10^6 < Nt \leq 10^7$ Eg (cm)	
USO	**MATERIAL**	**C.B.R.$_{M.G.}$ (%)**	**Mezclas Asfálticas Densamente Gradadas**	**Mezclas Asfálticas Abiertas**	**Mezclas Asfálticas Densamente Gradadas**	**Mezclas Asfálticas Abiertas**
S.B.	**Granzón Natural**	**≤ 30**	27	30	25	28
S.B.	**Granzón de Mina**	**≤ 30**	27	30	25	28
S.B.	**Granzón Mezclado**	**40**	33	37	30	33
S.B.	**Suelo Agregado**	**40**	33	37	30	33
S.B.	**Grava Procesada**	**40**	33	37	30	33
B	**Grava Procesada**	**60**	41	46	38	41
B	**Piedra Picada**	**80 ***	46	49	42	44
B	**Grava Estabilizada**	**80 ***	46	49	42	44

**Valores de C.B.R. > 80% se consideran sin limitación en cuanto a su aporte estructural.*

Tabla 6.1- Espesores que brindan aporte estructural para materiales granulares contemplados en la norma COVENIN 2000-87.

TMAA ≥ 18 °C C.B.R.sr = 5 %			Tráfico Muy Pesado $10^7 < Nt \leq 10^8$ Eg (cm)		Tráfico Pesado $10^6 < Nt \leq 10^7$ Eg (cm)	
USO	**MATERIAL**	**C.B.R.$_{M.G.}$ (%)**	**Mezclas Asfálticas Densamente Gradadas**	**Mezclas Asfálticas Abiertas**	**Mezclas Asfálticas Densamente Gradadas**	**Mezclas Asfálticas Abiertas**
S.B.	**Granzón Natural**	**≤ 30**	15	16	14	15
S.B.	**Granzón de Mina**	**≤ 30**	15	16	14	15
S.B.	**Granzón Mezclado**	**40**	20	22	19	20
S.B.	**Suelo Agregado**	**40**	20	22	19	20
S.B.	**Grava Procesada**	**40**	20	22	19	20
B	**Grava Procesada**	**60**	28	30	26	28
B	**Piedra Picada**	**80 ***	32	34	30	31
B	**Grava Estabilizada**	**80 ***	32	34	30	31

**Valores de C.B.R. > 80% se consideran sin limitación en cuanto a su aporte estructural.*

Tabla 6.2- Espesores que brindan aporte estructural para materiales granulares contemplados en la norma COVENIN 2000-87.

TMAA ≥ 18 °C C.B.R.sr = 10 %			Tráfico Muy Pesado $10^7 < Nt \leq 10^8$		Tráfico Pesado $10^6 < Nt \leq 10^7$	
			Eg (cm)		Eg (cm)	
USO	**MATERIAL**	**C.B.R.$_{M.G.}$ (%)**	**Mezclas Asfálticas Densamente Gradadas**	**Mezclas Asfálticas Abiertas**	**Mezclas Asfálticas Densamente Gradadas**	**Mezclas Asfálticas Abiertas**
S.B.	Granzón Natural	≤ 30	0	0	0	0
S.B.	Granzón de Mina	≤ 30	0	0	0	0
S.B.	Granzón Mezclado	40	0	0	0	0
S.B.	Suelo Agregado	40	0	0	0	0
S.B.	Grava Procesada	40	0	0	0	0
B	Grava Procesada	60	14	15	14	14
B	Piedra Picada	80 *	19	19	17	18
B	Grava Estabilizada	80 *	19	19	17	18

**Valores de C.B.R. > 80% se consideran sin limitación en cuanto a su aporte estructural.*

Tabla 6.3- Espesores que brindan aporte estructural para materiales granulares contemplados en la norma COVENIN 2000-87.

TMAA ≥ 18 °C C.B.R.sr = 15 %			Tráfico Muy Pesado $10^7 < Nt \leq 10^8$		Tráfico Pesado $10^6 < Nt \leq 10^7$	
			Eg (cm)		Eg (cm)	
USO	**MATERIAL**	**C.B.R.$_{M.G.}$ (%)**	**Mezclas Asfálticas Densamente Gradadas**	**Mezclas Asfálticas Abiertas**	**Mezclas Asfálticas Densamente Gradadas**	**Mezclas Asfálticas Abiertas**
S.B.	**Granzón Natural**	**≤ 30**	0	0	0	0
S.B.	**Granzón de Mina**	**≤ 30**	0	0	0	0
S.B.	**Granzón Mezclado**	**40**	0	0	0	0
S.B.	**Suelo Agregado**	**40**	0	0	0	0
S.B.	**Grava Procesada**	**40**	0	0	0	0
B	**Grava Procesada**	**60**	0	0	0	0
B	**Piedra Picada**	**80 ***	11	11	10	10
B	**Grava Estabilizada**	**80 ***	11	11	10	10

**Valores de C.B.R. > 80% se consideran sin limitación en cuanto a su aporte estructural.*

Tabla 6.4-Espesores que brindan aporte estructural para materiales granulares contemplados en la norma COVENIN 2000-87.

BIBLIOGRAFÍA.

1. **Corredor, Gustavo**, "APUNTES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS", Volumen I, Edición 1988, Impresión Mayo de 1991, Universidad Santa María.

2. **Halvorson, Michael**, "APRENDA VISUAL BASIC 5 YA" Microsoft Press, Editorial Mc Graw Hill, 1997.

3. **Jeuffroy, Georges**, "PROYECTOS Y CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS", Tomo I y II, Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona 1972.

4. **Lambe T., William, Whitman V. Robert, (M.I.T.)**, "MECÁNICA DE SUELOS", Limusa Noriega Editores.

5. **Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Dirección General de Vialidad.** "MÉTODO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES", Volumen I, II y III. Venezuela, Diciembre 1982.

6. **Moncayo V., Jesús**, "MANUAL DE PAVIMENTOS", Tercera Edición, Editorial C.E.C.S.A, México, Abril 1985.

7. **Pinaud, Andrés**, "APUNTES DE CLASE CÁTEDRA DE PAVIMENTOS", Caracas Venezuela, 1998.

8. **Shell International Petrolium Company Limited**, "SHELL PAVEMENT DESIGN MANUAL", London 1978.

9. **The University of Michigan**, "FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENT", Volume I, II Proceeding, August 22-26, 1977, Michigan U.S.A.

10. **Yoder, E.J., Witczak, M.W.**, "PRINCIPLES OF PAVEMENT DESIGN", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1975

TESIS
IC998
F3
V.2

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

DISEÑO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES POR IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO M.T.C.

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: .....

JURADO EXAMINADOR

Firma:	Firma:	Firma: .....
Nombre: ING. ANDRÉS PINAUID.	Nombre: ING. AUGUSTO JUGO.	Nombre: ING. GUSTAVO CORREDOR.

REALIZADO POR: FARRERAS OSUNA, SIMÓN JOSÉ.
LÓPEZ RODRÍGUEZ, FRANCISCO JOSÉ.

PROFESOR GUIA: ING. ANDRÉS PINAUID.

FECHA: OCTUBRE 1998.

A N E X O S

CAPITULO I

Identificación en el campo (excluyendo las partículas mayores de 7.6 cm (3") y basando las fracciones en pesos estimados)				Símbolo del grupo[a]	Nombres típicos	Información necesaria para la descripción de los suelos	Criterios de clasificación en el laboratorio
Suelos de grano grueso-Más de la mitad del material es retenido por el tamiz No. 200[b] (La abertura del tamiz No. 200 corresponde aproximadamente al tamaño de la menor partícula apreciable a simple vista)	Gravas-Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz No. 4 (Para la clasificación visual puede suponerse que la abertura del tamiz No. 4 equivale a medio centímetro)	Gravas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	*GW*	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con pocos finos o sin ellos	Dese el nombre típico; indíquense los porcentajes aproximados de grava y arena, tamaño máximo, angulosidad, estado superficial y dureza de los granos gruesos; el nombre local o geológico y cualquier otra información o descripción pertinente y el símbolo entre paréntesis Para los suelos inalterados agréguese información sobre estratificación, compacidad, cementación, condiciones de humedad y características de drenaje Ejemplo: *Arena limosa*, con grava; aproximadamente un 20 % de partículas de grava angulosa de 1.5 cm de tamaño máximo; arena gruesa a fina, con partículas redondeadas o subangulosas, alrededor del 15 % de finos no plásticos, con baja resistencia en estado seco compacta y húmeda *in situ*; arena aluvial; *(SM)*	Determínense los porcentajes de grava y arenas a partir de la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción que pasa por el tamiz No. 200) los suelos gruesos se clasifican como sigue: *GW, GP, SW, SP* *GM, GC, SM, SC* *Casos límites* que requieren el empleo de símbolos dobles Menos del 5% Más del 12% 5% al 12%
		Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	Fracción fina no plástica (para la identificación ver el grupo *ML* más abajo)	*GM*	Gravas limosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y limo		$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Mayor de 4 $C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo *CL* más abajo)	*GC*	Gravas arcillosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla		No satisfacen todos los requisitos granulométricos de las *GW*
	Arenas-Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4	Arenas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	*SW*	Arenas bien graduadas, arenas con grava, con pocos finos o sin ellos		Límites de Atterberg por debajo de la línea "A" o I_p menor de 4 / Por encima de la línea "A", con I_p entre 4 y 7: casos límites que requieren el uso de símbolos dobles Límites de Atterberg por encima de la línea "A" con I_p mayor de 7
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	*SP*	Arenas mal graduadas, arenas con grava, con pocos finos o sin ellos		$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Mayor de 6 $C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3
		Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	Finos no plásticos (para identificación ver el grupo *ML* más abajo)	*SM*	Arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas		No satisfacen todos los requisitos granulométricos de las *SW*
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo *CL* más abajo)	*SC*	Arenas arcillosas, mezclas mal graduadas de arenas y arcillas		Límites de Atterberg por debajo de la línea "A" o I_p menor de 4 / Por encima de la línea "A" con I_p entre 4 y 7: casos límites que requieren el empleo de símbolos dobles Límites de Atterberg por debajo de la línea "A", con I_p mayor de 7
Suelos de grano fino-Más de la mitad del material pasa por el tamiz No. 200	Métodos de identificación para la fracción que pasa por el tamiz No. 40.						Utilícese la curva granulométrica para identificar las fracciones de suelo indicadas en la columna de identificación en el campo
	Limos y arcillas con límite líquido menor de 50	Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Dilatancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia cerca del límite plástico)			
		Nula a ligera	Rápida a lenta	Nula	*ML*	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad	
		Media a alta	Nula a muy lenta	Media	*CL*	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras	
		Ligera a media	Lenta	Ligera	*OL*	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
	Limos y arcillas con límite líquido mayor de 50	Ligera a media	Lenta a nula	Ligera a media	*MH*	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o con diatomeas, limos elásticos	
		Alta a muy alta	Nula	Alta	*CH*	Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas grasas	
		Media a alta	Nula a muy lenta	Ligera a media	*OH*	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta	
Suelos altamente orgánicos		Fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa			*Pt*	Turba y otros suelos altamente orgánicos	

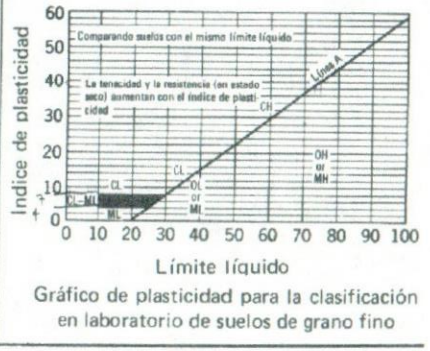


Gráfico de plasticidad para la clasificación en laboratorio de suelos de grano fino

Según Wagner, 1957.

[a] *Casos límites*. Los suelos que poseen características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos. Por ejemplo, *GW-GC*, mezcla bien graduada de arena y grava en una matriz arcillosa.

[b] Todos los tamaños de tamices se refieren al U.S. Standard.

Métodos de identificación en el campo de suelos o fracciones finas

Estos procedimientos se realizan con las partículas que pasan por el tamiz No. 40 (aproximadamente 0.4 mm). A fines de clasificación en el campo no es necesario el tamiz, basta con eliminar a mano las partículas gruesas que estorben para la prueba.

Dilatancia (reacción a la agitación)

Después de eliminar las partículas de tamaño superior al del tamiz No. 40, se prepara una pastilla de suelo húmedo de un volumen aproximado de 10 cm^3, si es necesario añádase agua suficiente para dejar el suelo blando pero no pegajoso.

Colóquese la pastilla en la palma de la mano y agítese horizontalmente, golpeando vigorosamente varias veces contra la otra mano. Una reacción positiva consiste en la aparición de agua en la superficie de la pastilla, la cual adquiere una consistencia gelatinosa y de aspecto brillante. Cuando se aprieta con los dedos, el agua y el brillo desaparecen de la superficie, la pastilla se vuelve dura y por último se resquebraja o desmorona. La rapidez de aparición del agua en la agitación y de desaparición al apretarla sirven para identificar el carácter de los finos de un suelo.

Las arenas limpias muy finas dan la reacción más rápida y clara mientras que una arcilla plástica no presenta reacción. Los limos inorgánicos, como un polvo de roca típico, muestran una reacción moderadamente rápida.

Resistencia en estado seco (a la disgregación)

Después de eliminar las partículas que no pasan por el tamiz No. 40, se moldea una pastilla de suelo hasta alcanzar la consistencia de una masilla, añadiendo agua si es necesario. Se deja secar completamente la pastilla en una estufa o expuesta al sol y al aire, probando después su resistencia rompiéndola y desmoronándola entre los dedos. Esta resistencia es una medida del carácter y proporción de la fracción coloidal que contiene el suelo. La resistencia (en estado seco) aumenta con la plasticidad.

Una elevada resistencia (en estado seco) es característica de las arcillas del grupo CH. Un limo inorgánico típico posee una resistencia (en estado seco) muy ligera. Las arenas finas limosas y los limos tienen aproximadamente la misma resistencia (en estado seco) ligera pero pueden distinguirse por el tacto al pulverizar la muestra seca. La arena fina tiene tacto granular mientras que el limo típico da la sensación suave de la harina.

Tenacidad (consistencia cerca del límite plástico):

Después de eliminar las partículas retenidas en el tamiz No. 40, se moldea una muestra de aproximadamente 10 cm^3 hasta alcanzar la consistencia de masilla. Si el suelo está muy seco debe agregarse agua, pero tu está pegajoso debe extenderse formando una capa delgada que permita una cierta pérdida de humedad por evaporación. Posteriormente se arrolla con la mano sobre una superficie lisa o entre las palmas de las manos, formando un cilindro de aproximadamente 3 mm de diámetro, amasándolo y volviéndolo a arrollar varias veces. Con estas operaciones el contenido de humedad se reduce gradualmente y la muestra adquiere una consistencia dura, acaba perdiendo su plasticidad y se desmorona cuando se alcanza el límite plástico.

Después de desmoronarse el cilindro se vuelven a agrupar los trozos, continuando el amasado ligeramente hasta que se vuelve a desmoronar.

Cuanto más tenaz es el rollito cerca del límite plástico y cuanto más duros son los trozos al desmoronarse, más importante es la fracción arcillosa coloidal del suelo. La debilidad del rollito en el límite plástico y

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
Figura 1

CLASIFICACION DE SUELOS POR EL SISTEMA AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa la malla Núm. 200)							Materiales finos (más del 35% pasa la malla Núm. 200)			
Clasificación por grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Granulometría % más fino:											
Malla Núm. 10	50 máx	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
„ „ 40	30 máx	50 máx	51 mín	—	—	—	—	—	—	—	—
„ „ 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características del material menor que Núm. 40:											
Límite líquido, índice de plasticidad	6 máx		— NP	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín
Indice de grupo	0		0	0		4 máx		8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipos comunes de los materiales constituyentes principales	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Apreciación general como subrasante	De excelente a bueno							De regular a pobre			

Figura 2

CAPITULO III

Pisos Térmicos en el Mapa De Venezuela - Figura 1

Ecuación para el Cálculo N'_t para el Diseño de Pavimentos.

$$N'_t = K*PDT_i*\%Vp*Fc*C*A*F \qquad \textit{Ecuación 1}$$

Donde;

- K: ***Constante que indica el # de días al año que la estará servicio al público.*** Generalmente para Venezuela, éste se considera igual a 365 días.

- PDT_i: ***Volumen diario de tránsito promedio para un año, determinado para el año inicial de funcionamiento de la vía.*** Se determina a través de conteos manuales de vehículos ó conteos mecánicos de ejes. Generalmente no se cuenta con dicha información para el inicio del período de funcionamiento de la vía. De tal manera que el valor antes mencionado se proyecta para dicho año como se muestra en la siguiente ecuación:

$$PDT_i = PDT_o(1+r)^n \qquad \textit{Ecuación 2}$$

  Donde;

  PDT_o: Volumen diario de tránsito promedio para un año cualquiera, anterior al del año de inicio de funcionamiento de la vía.

  r: Taza de crecimiento del tránsito.

  n: Diferencia de años entre PDT_o y PDT_i.

- %Vp: ***Porcentaje de vehículos pesados.***

- Fc: ***Factor Camión.*** Representa el valor promedio del daño ocasionado al pavimento por un vehículo cualquiera, perteneciente a una configuración dada (# de ejes), y se expresa en cargas equivalentes por camión. Es constante para cada configuración de tránsito e independiente del volumen de vehículos. Esta comprendido entre 0 y 50 cargas equivalentes por camión.

- A: ***Factor de ajuste por tránsito desbalanceado***. Este factor sirve para mayorar las cargas equivalentes totales cuando su valor no puede ser específicamente determinado sobre el canal de diseño. Valores típicos se presentan en la *Tabla 1*.

Tipo de Tránsito	Factor de Ajuste (A)
Tránsito Desbalanceado en la mayoría de las vías.	1.2 (1.05-1.35) Rango probable en Venezuela.
Tránsito Desbalanceado en vías mineras (muy desbalanceado).	1.90
Tránsito Balanceado.	1

Valores del Factor de Ajuste (A) en función del Tipo de Tránsito - Tabla 1

- C: ***Factor Canal***. Se define como la relación entre el número de vehículos pesados que transitan por el canal de diseño y el número total de vehículos pesados que transitan en la vía. Cuando se carece de información sobre la distribución del tránsito se recomiendan los valores mostrados en la siguiente *Tabla 2*.

# Total de Canales en la Vía en los dos Sentidos.	Factor Canal (C)
2	0.50
4	0.45
6 ó más	0.40

Valores del Factor Canal (C) en función del Número de Canales Totales de la Vía - Tabla 2

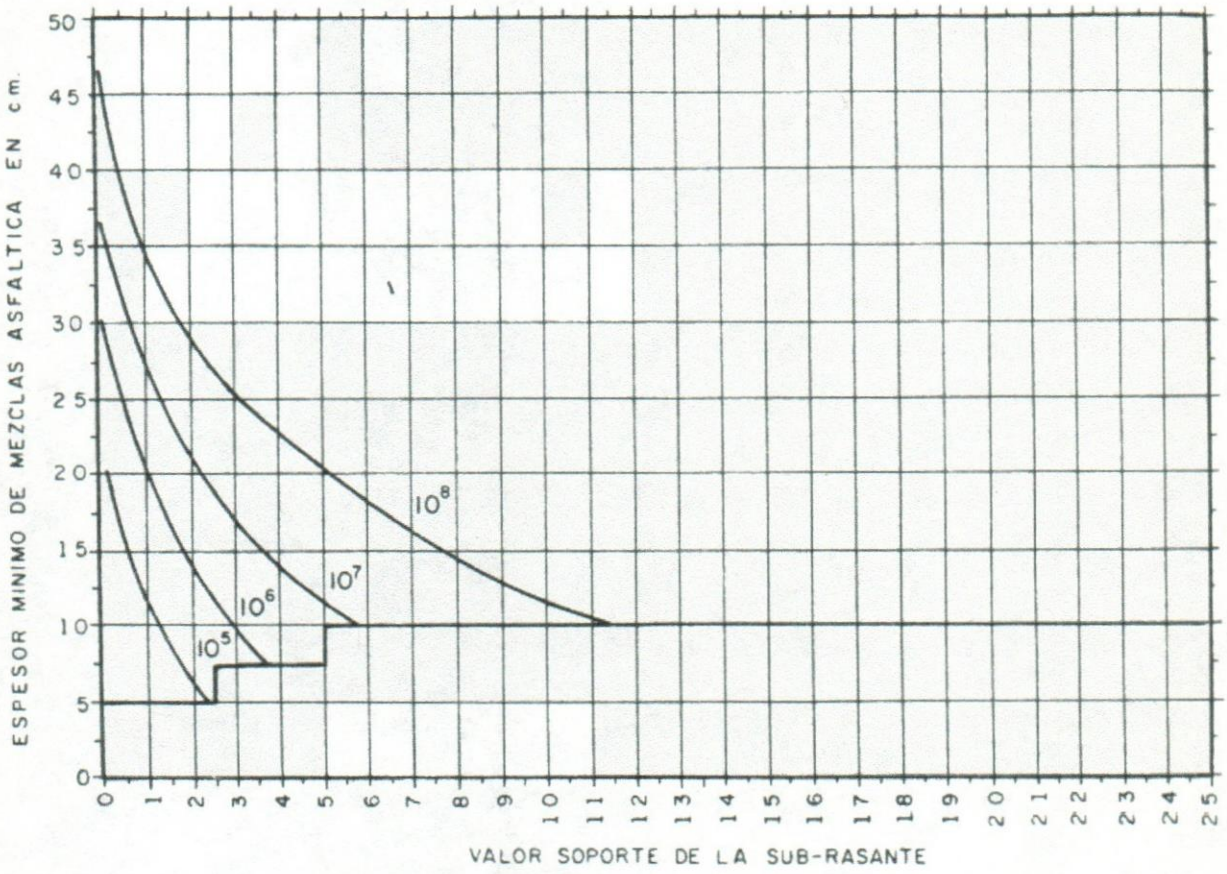
- F: ***Factor de Crecimiento de Tránsito***. Es un factor que toma en cuenta la variación del volumen de tránsito en el período de diseño determinado, y se utiliza para determinar las cargas equivalentes acumuladas. Este valor se calcula de la siguiente manera:

$$F = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$ *Ecuación 2*

Donde,

r: Taza de crecimiento del tránsito.

n: Años del período de diseño.

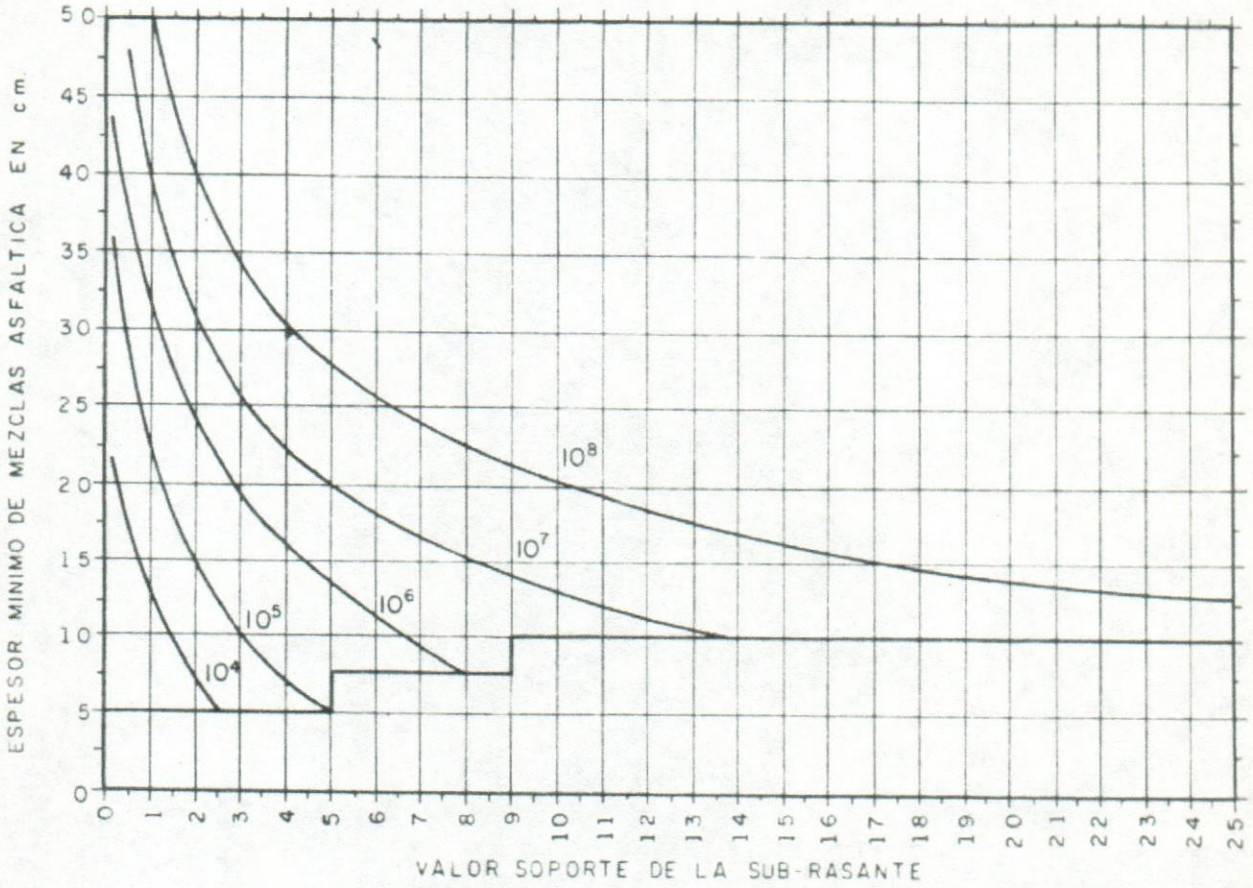


ESPESOR MINIMO RECOMENDADO DE MEZCLAS ASFALTICAS DE ACUERDO AL VALOR SOPORTE C.B.R. DE LA SUB-RASANTE AL UTILIZAR MEZCLAS ASFALTICAS DENSAMENTE GRADADAS.

Gráfico 1

Nt	*Ecuaciones*	R^2
10^8	e_{min}=-9.72876*LN(C.B.R.sr)+35.07764	0.984
10^7	e_{min}=-9.19867*LN(C.B.R.sr)+26.80560	0.984
10^6	e_{min}=-8.82755*LN(C.B.R.sr)+19.70353	0.989
10^5	e_{min}=-6.77467*LN(C.B.R.sr)+11.06172	0.992

Espesor mínimo de Mezcla Asfáltica (cm)	C.B.R.sr (%)
5	≤2.5
7.5	2.5<C.B.R. ≤5
10	>5



ESPESOR MINIMO RECOMENDADO DE MEZCLAS ASFALTICAS DE ACUERDO AL VALOR SOPORTE C B R DE LA SUB-RASANTE AL UTILIZAR MEZCLAS ASFALTICAS ABIERTAS

Gráfico 2

Nt	*Ecuaciones*	R^2
10^8	$e_{min}=55.17796(C.B.R.sr)^{-0.44587}$	0.992
10^7	$e_{min}=-11.23261*LN(C.B.R.sr)+38.65180$	0.997
10^6	$e_{min}=-10.98947*LN(C.B.R.sr)+31.08923$	0.997
10^5	$e_{min}=-10.46676*LN(C.B.R.sr)+21.7429$	0.998
10^4	$e_{min}=-7.32806*LN(C.B.R.sr)+12.24282$	0.987

Espesor mínimo de Mezcla Asfáltica (cm)	C.B.R.sr (%)
5	≤5
7.5	5<C.B.R. ≤9
10	>9

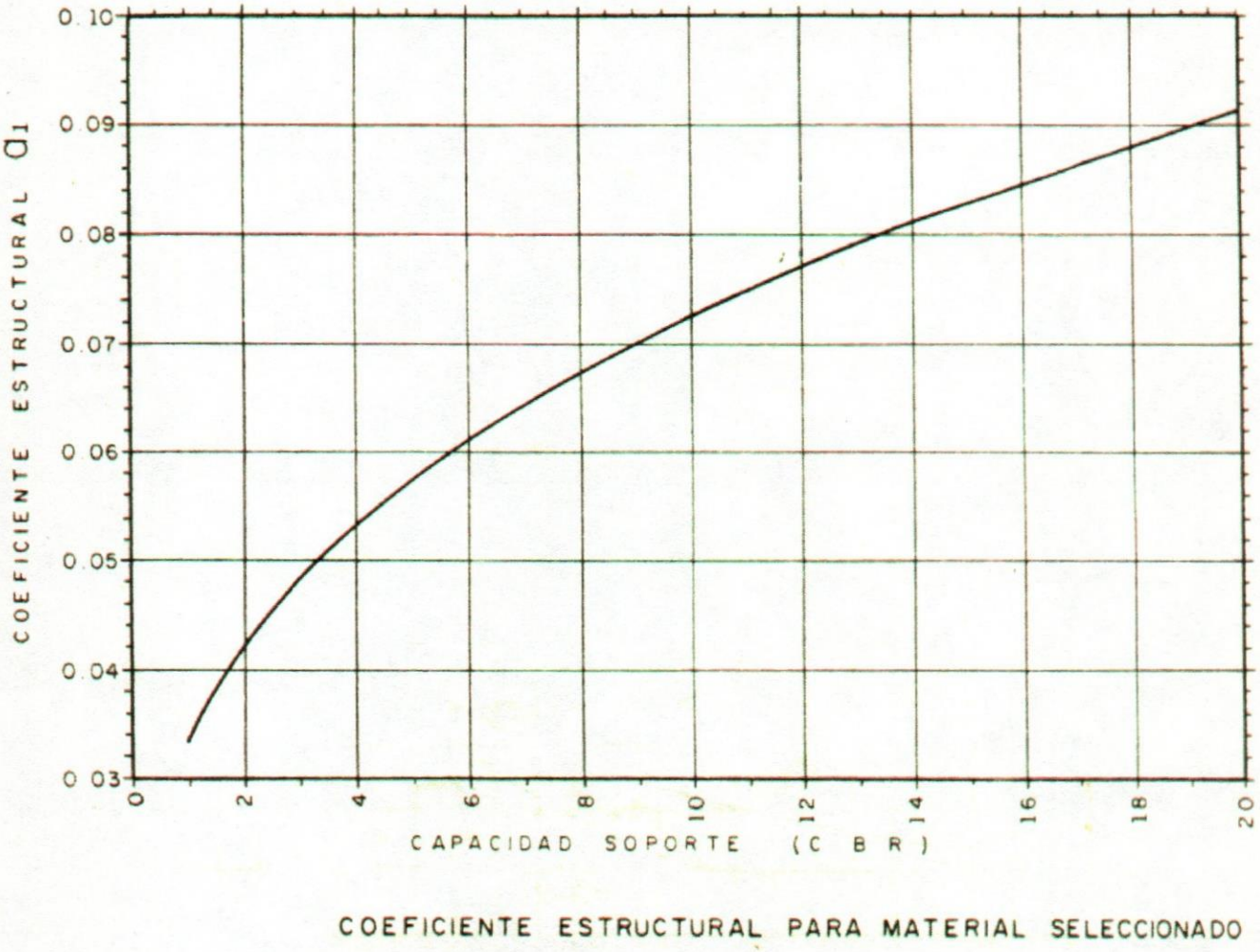

0.10
0.09
0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
COEFICIENTE ESTRUCTURAL a_1
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
CAPACIDAD SOPORTE (C B R)
COEFICIENTE ESTRUCTURAL PARA MATERIAL SELECCIONADO

Gráfico 3

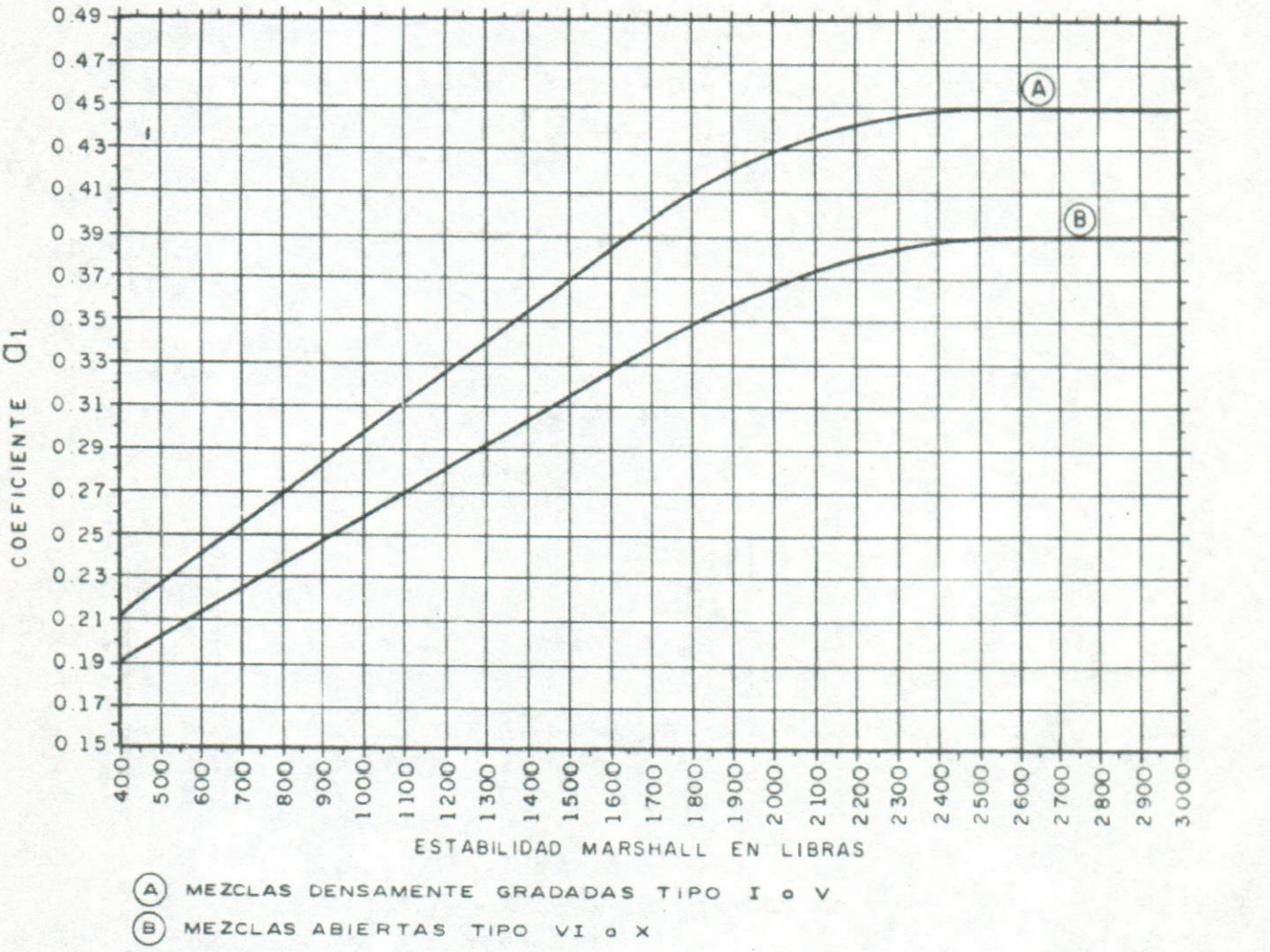
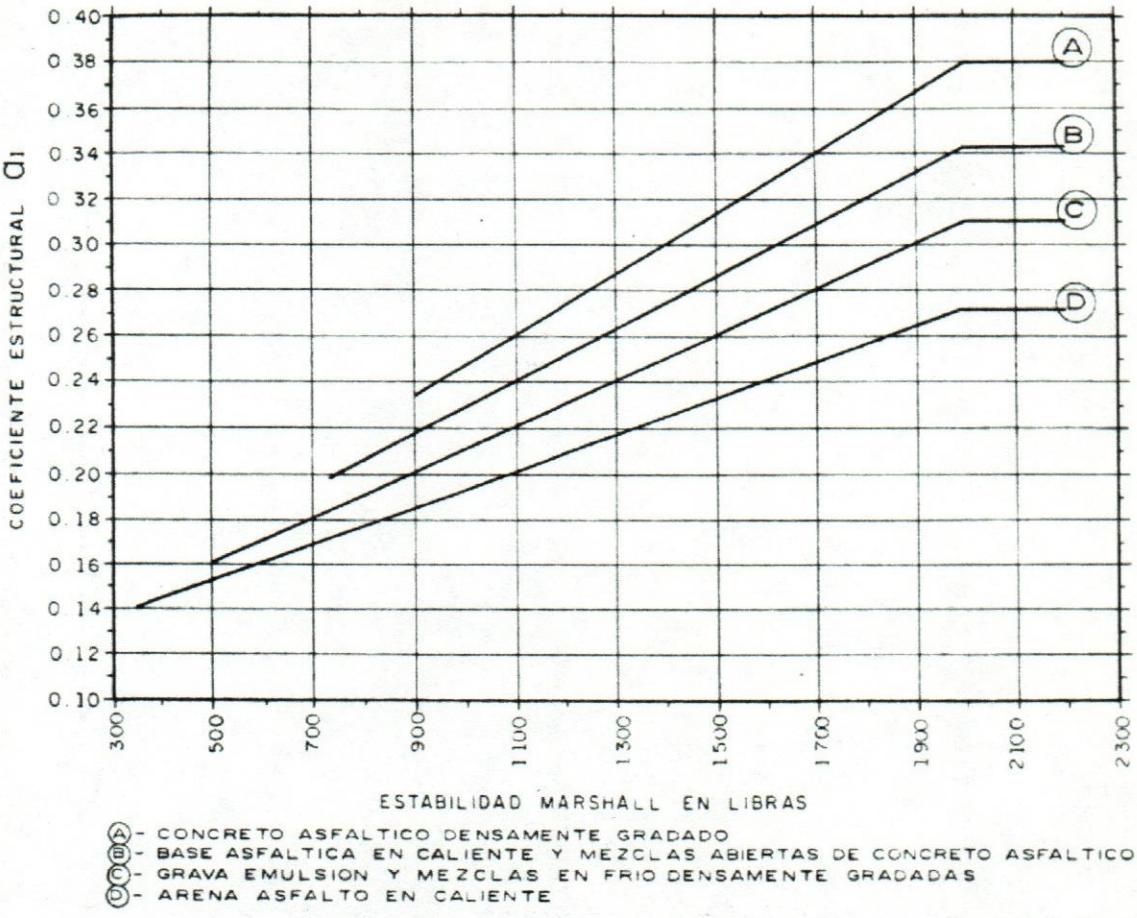


Gráfico 4

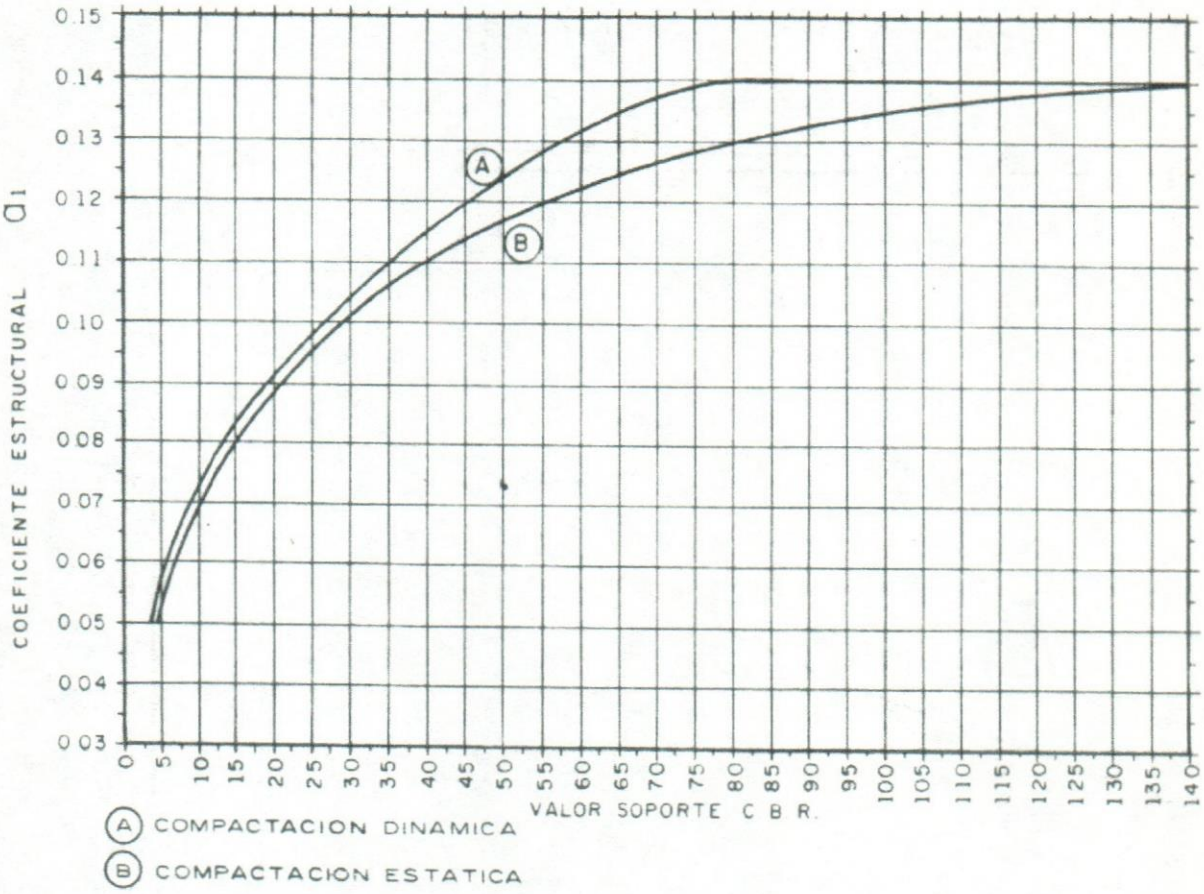
Ecuación para la obtención del Coeficiente Estructural a_1				
Estabilidad Marshall (lbs)	Mezclas Densamente Gradadas (Tipo I a V)	R^2	Mezclas Abiertas (Tipo VI a X)	R^2
400-1200	a_1=0.0001425 (Est.)+0.155	1	a_1=0.0001138 (Est.)+0.14444615	1
1200-1700	a_1=-6.4*10^{-8} *(Est.)^2+ 0.000337398(Est.)+0.01341209	0.998	a_1=0.0001138 (Est.)+0.14444615	1
1700-2500	a_1=-6.4*10^{-8} *(Est.)^2+ 0.000337398(Est.)+0.01341209	0.998	a_1=-5.9*10^{-8} *(Est.)^2+ 0.000314515(Est.)-0.026618182	0.998
2500-3000	a_1=0.450	1	a_1=0.390	1



COEFICIENTE ESTRUCTURAL PARA MEZCLAS ASFALTICAS

Gráfico 5

Ecuación para la obtención del Coeficiente Estructural a_1			
	Estabilidad Marshall (lbs)	Ecuaciones	R^2
A	900-2000	a_1=0.0001327(Est.)+0.1145455	1
B	750-2000	a_1=0.0001109 (Est.)+0.1201250	1
C	500-2000	a_1=0.0001 (Est.)+0.11	1
D	350-2000	a_1=0.000081 (Est.)+0.1116564	1

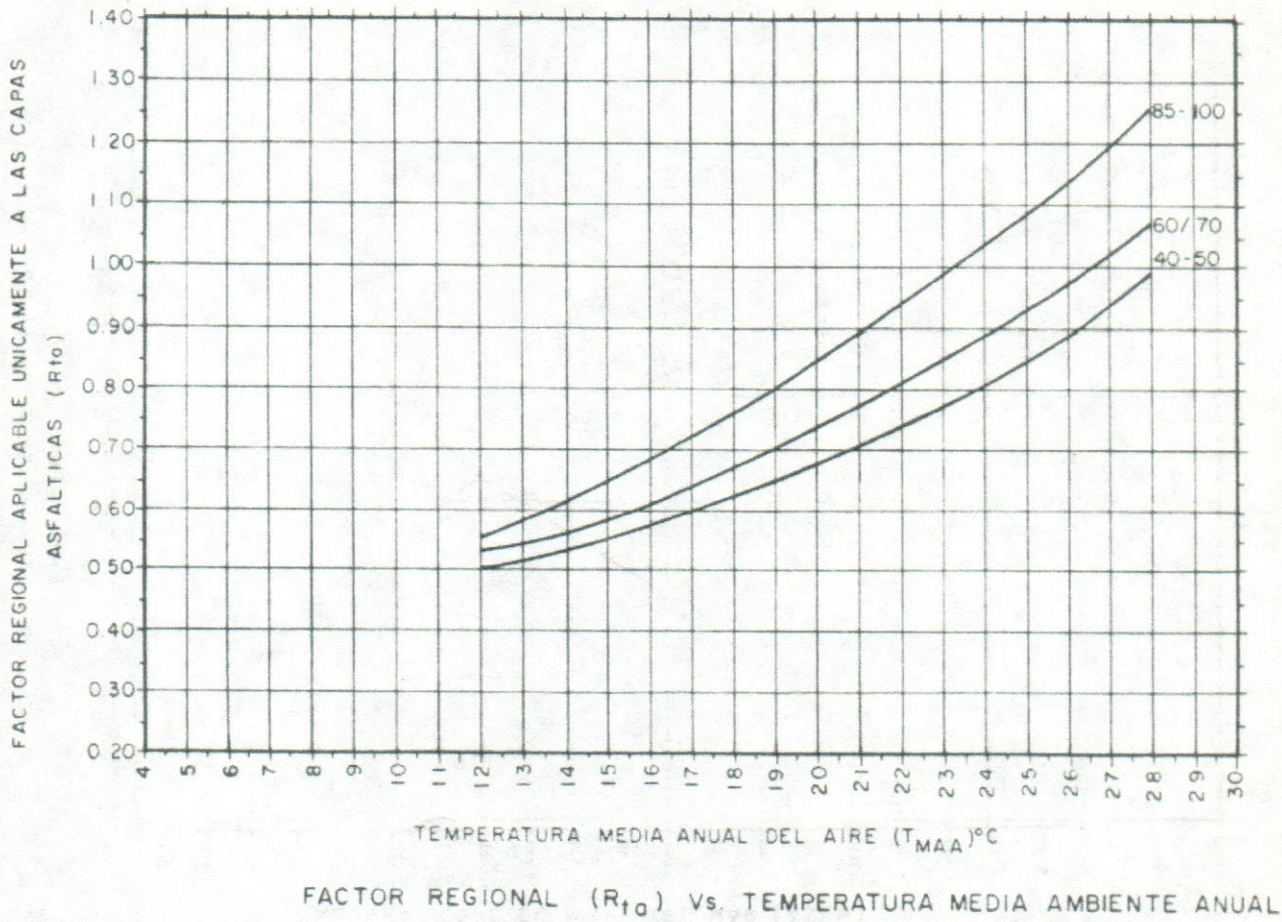


COEFICIENTE ESTRUCTURAL PARA MATERIALES GRANULARES DE BASES Y SUB-BASES.

Gráfico 6

Ecuación para la obtención del Coeficiente Estructural a_1				
C.B.R. (%)	Compactación Dinámica *	R^2	Compactación Estática	R^2
> 20	a_1=0.0374982*LN(C.B.R.)-0.0223236	0.987	a_1=0.028217*LN(C.B.R.)+0.0059416	0.998

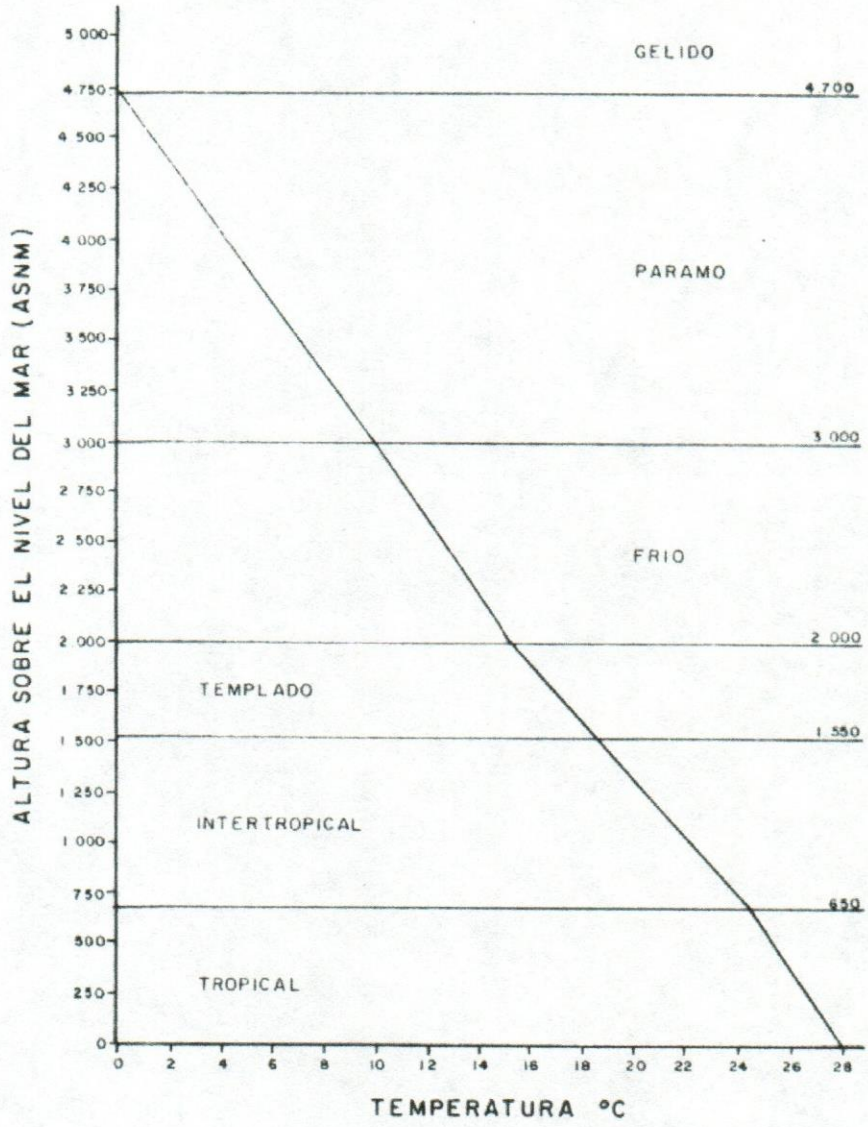
* Para un C.B.R. ≥ 78% a_1=0.141



FACTOR REGIONAL (R_{ta}) Vs. TEMPERATURA MEDIA AMBIENTE ANUAL

Gráfico 7

Temperatura Media Ambiente Anual (°C)	Penetración del Cemento Asfáltico	Ecuación	R^2
< 18	85-100	$Rta=0.3028e^{0.0511(Tmaa)}$	0.992
≥ 18	60-70	$Rta=0.3002e^{0.0452(Tmaa)}$	0.989



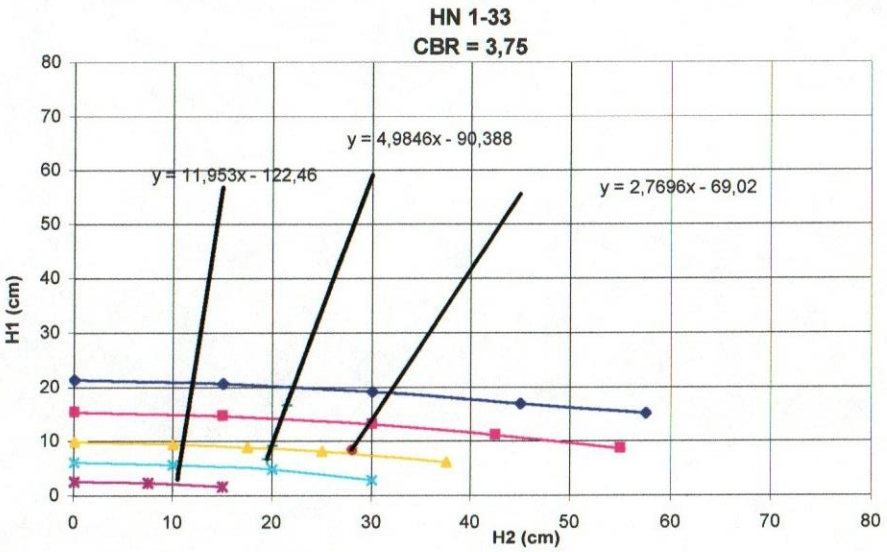
RELACION DE LA TEMPERATURA MEDIA AMBIENTE ANUAL (TMAA) CON LA ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR (ASNM).

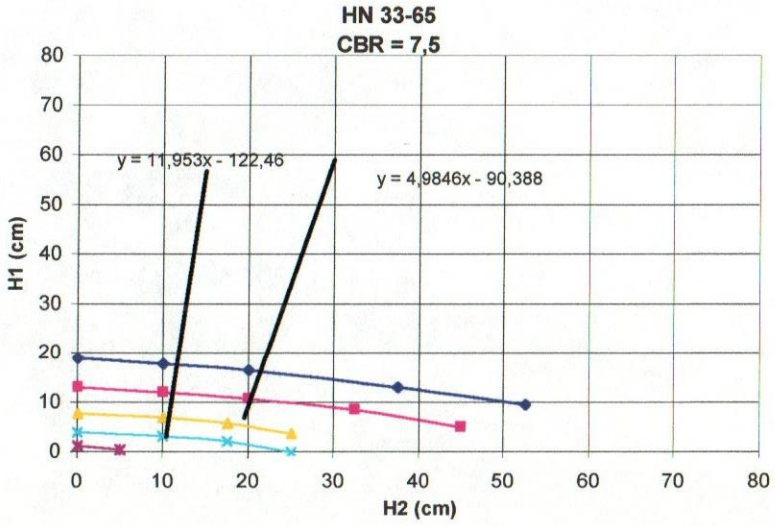
Gráfico 8

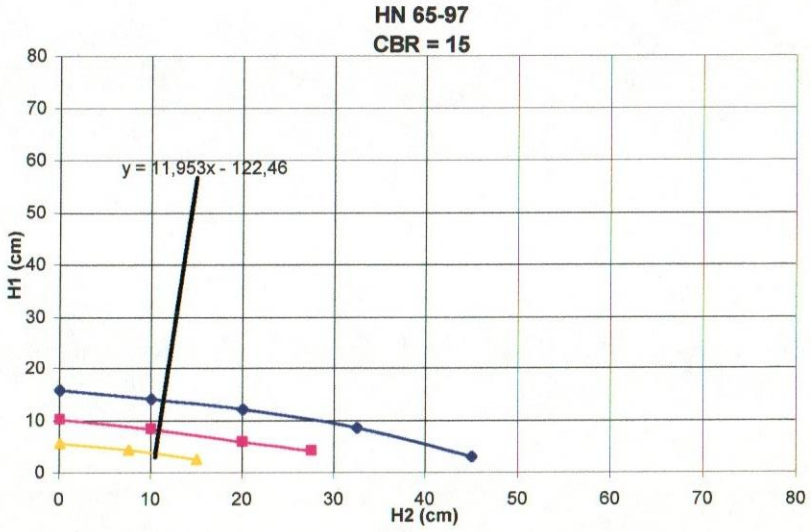
CAPITULO IV

T.M.A.A. 4ºC

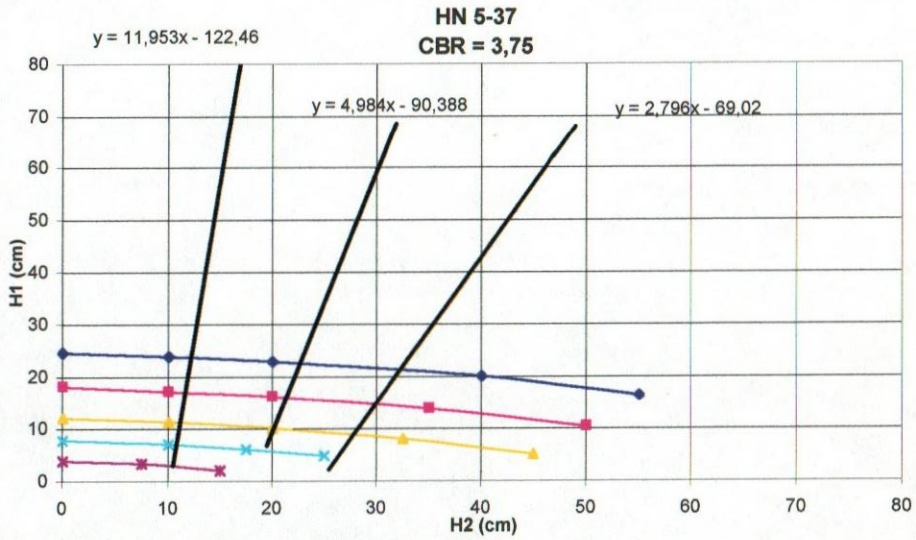
Nt	C.B.R 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	22	0	19	0	16	0
	21	15	18	10	14	10
	19	30	17	20	12	20
	17	45	13	38	9	33
	15	58	10	53	3	45
10^7	16	0	13	0	10	0
	15	15	12	10	9	10
	13	30	11	20	6	20
	11	43	9	33	4	28
	9	55	5	45		
10^6	10	0	8	0	6	0
	10	10	7	10	5	8
	9	18	6	18	3	15
	8	25	4	25		
	6	38				
10^5	6	0	4	0		
	6	10	3	10		
	5	20	2	18		
	3	30	0	25		
10^4	3	0	1	0		
	3	8	1	5		
	2	15				

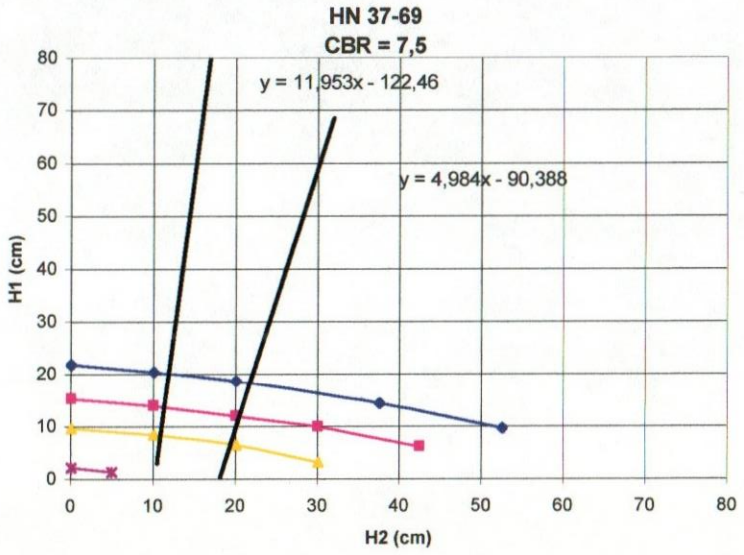


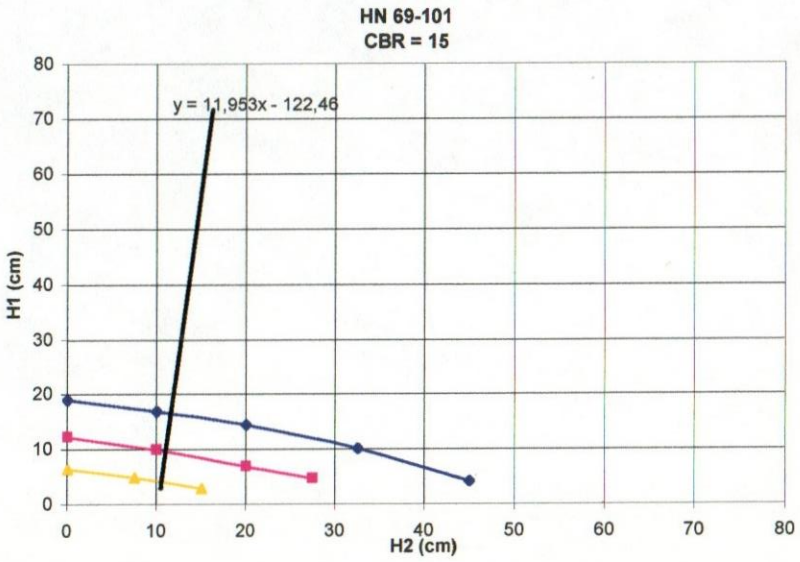




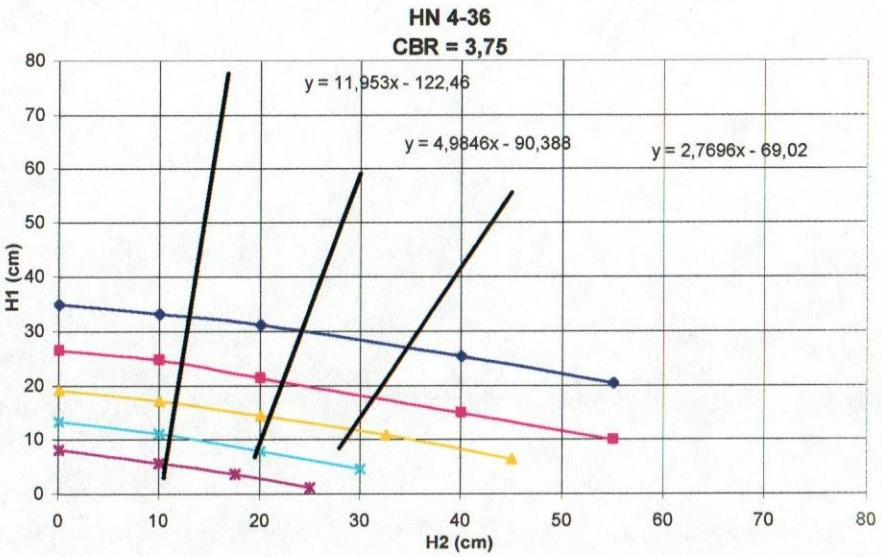
Nt	C.B.R 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	25	0	22	0	19	0
	24	10	21	10	17	10
	23	20	19	20	15	20
	20	40	15	38	10	33
	17	55	10	53	4	45
10^7	18	0	15	0	12	0
	17	10	14	10	10	10
	16	20	12	20	7	20
	14	35	10	30	5	28
	11	50	6	43		
10^6	12	0	10	0	7	0
	12	10	9	10	5	8
	10	20	7	20	3	15
	8	33	3	30		
	5	45				
10^5	8	0	6	0		
	7	10	5	8		
	6	18	4	13		
	5	25	3	18		
10^4	4	0	2	0		
	4	8	2	5		
	2	15				

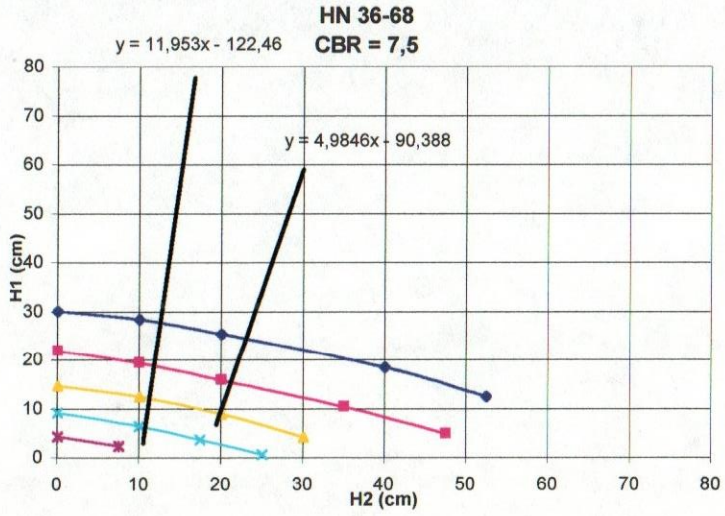


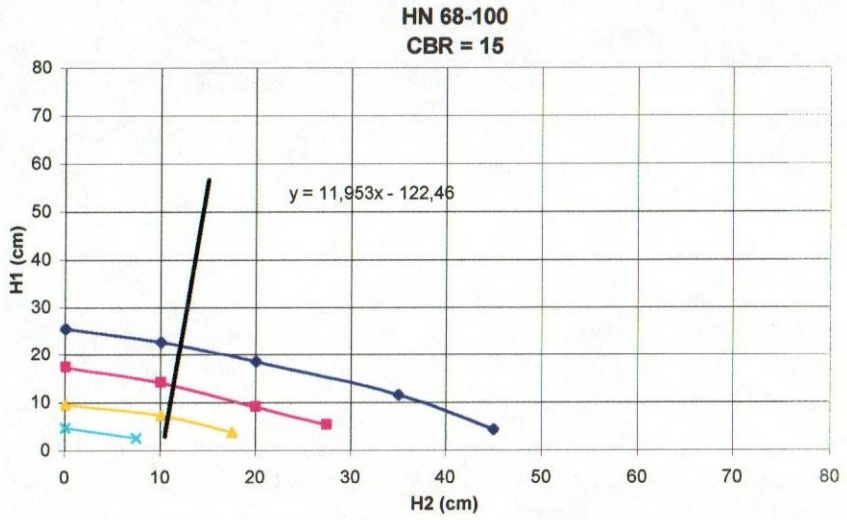




Nt	C.B.R 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	35	0	30	0	26	0
	33	10	29	10	23	10
	31	20	26	20	19	20
	26	40	19	40	12	35
	21	55	13	53	5	45
10^7	27	0	22	0	18	0
	25	10	20	10	14	10
	22	20	16	20	9	20
	15	40	11	35	6	28
	10	55	5	48		
10^6	19	0	15	0	10	0
	17	10	13	10	8	10
	15	20	9	20	4	18
	11	33	4	30		
	7	45				
10^5	14	0	9	0	5	0
	11	10	7	10	3	8
	8	20	4	18		
	5	30	1	25		
10^4	8	0	5	0		
	6	10	3	8		
	4	18				
	1	25				

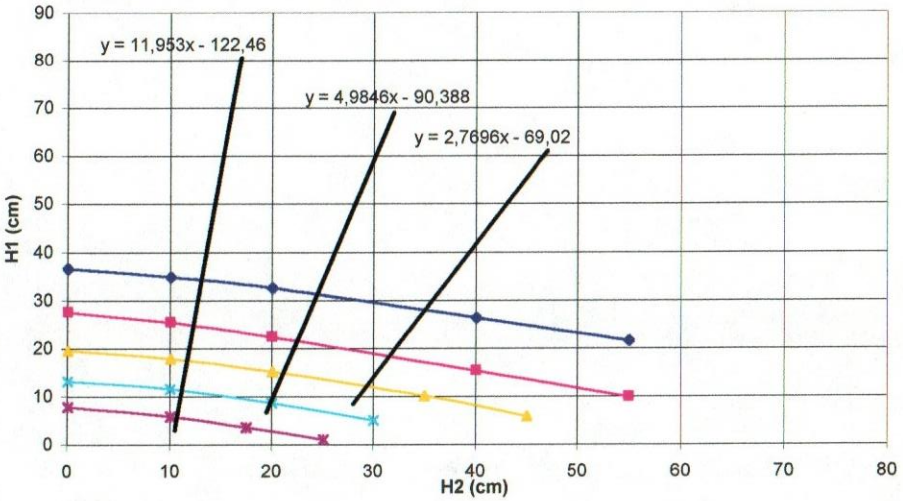




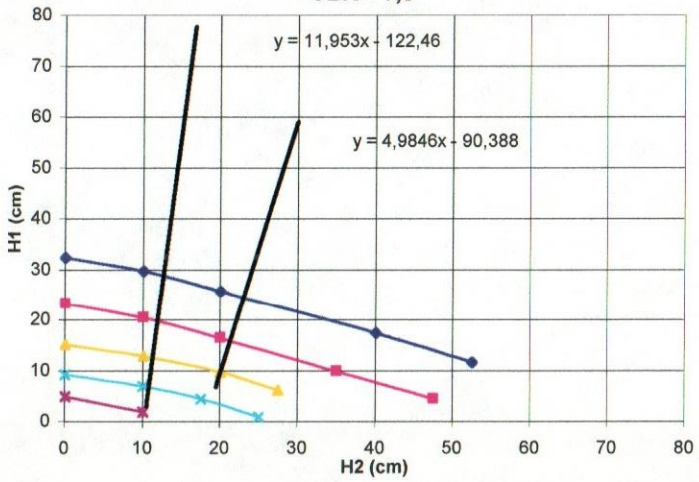


Nt	C.B.R. 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	37	0	33	0	28	0
	35	10	30	10	24	10
	33	20	26	20	19	20
	27	40	18	40	11	35
	22	55	12	53	4	45
10^7	28	0	23	0	19	0
	26	10	21	10	16	10
	23	20	17	20	10	20
	16	40	10	35	5	28
	10	55	5	48		
10^6	20	0	15	0	11	0
	18	10	13	10	8	10
	15	20	10	20	4	18
	10	35	6	28		
	6	45				
10^5	13	0	9	0	6	0
	12	10	7	10	3	8
	9	20	5	18		
	5	30	1	25		
10^4	8	0	5	0		
	6	10	2	10		
	4	18				
	1	25				

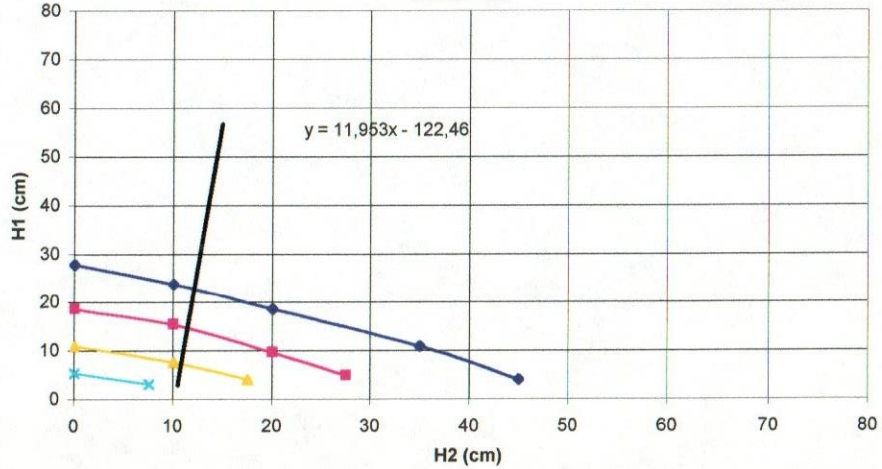
HN 8-40
CBR = 3,75



HN 40-72
CBR = 7,5



HN 72-104
CBR = 15



Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 2.5				C.B.R.sr = 3,75			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	37	39	40	42	32	34	35	35
	20-40	27	28	29	30	22	23	24	24
	10-20	17	18	18	19	12	12	13	13
10^7	40-80	34	36	37	38	30	30	31	32
	20-40	25	26	27	28	21	21	22	22
	10-20	17	17	17	18	12	12	12	12
10^6	40-80	32	34	34	34	28	28	29	29
	20-40	24	24	25	26	20	20	21	21
	10-20	16	16	17	17	11	11	12	12
10^5	40-80	30	32	32	32	26	27	27	27
	20-40	23	23	23	24	19	19	20	20
	10-20	15	15	16	16	11	11	11	11
10^4	40-80	28	29	29	29	25	25	25	25
	20-40	22	22	22	22	18	18	19	19
	10-20	14	14	15	15	11	11	10	11

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	26	27	28	28	21	22	23	23
	20-40	17	18	18	18	12	12	13	13
	10-20								
10^7	40-80	24	25	26	26	20	21	21	21
	20-40	16	17	17	17	11	11	12	12
	10-20								
10^6	40-80	23	23	24	24	19	19	20	20
	20-40	15	16	16	16	11	11	11	11
	10-20								
10^5	40-80	22	22	22	22	19	19	19	19
	20-40	14	15	15	15	11	11	11	11
	10-20								
10^4	40-80	20	20	20	20	18	18	18	18
	20-40	13	14	14	14	10	10	10	10
	10-20								

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	16	17	17	17	11	12	12	12
	20-40								
	10-20								
10^7	40-80	16	16	16	16	11	11	11	11
	20-40								
	10-20								
10^6	40-80	15	15	15	15	11	11	11	11
	20-40								
	10-20								
10^5	40-80	14	14	14	14			10	10
	20-40								
	10-20								
10^4	40-80	13	13	13	13				
	20-40								
	10-20								

Valores de H2 Obtenidos de las Cartas HN de Shell para 4ºC

TMAA=4°C S 1 Pent 50 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
37	27	17	2,5
32	22	12	3,75
26	17		5
21	12		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA=4°C S 1 Pent 50 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
34	25	17	2,5
30	21	12	3,75
24	16		5
20	11		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA=4°C S 1 Pent 50 Nt = 10^6

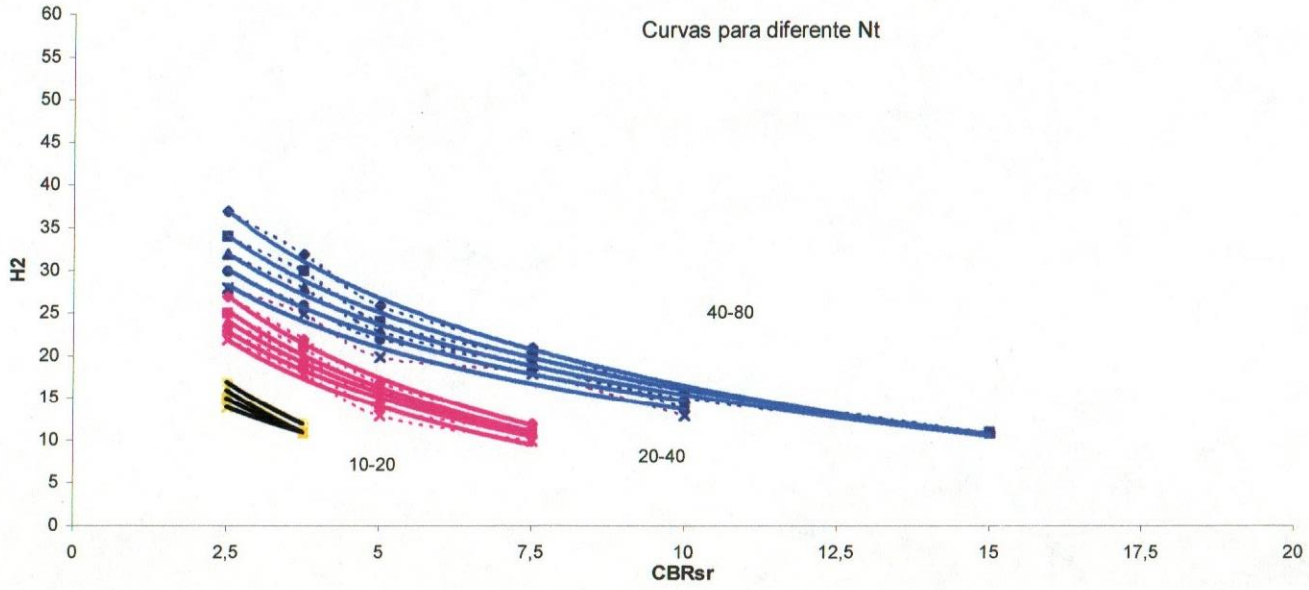
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
32	24	16	2,5
28	20	11	3,75
23	15		5
19	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=4°C S 1 Pent 50 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
30	23	15	2,5
26	19	11	3,75
22	14		5
19	11		7,5
14			10
			15
			20

TMAA=4°C S 1 Pent 50 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
28	22	14	2,5
25	18	11	3,75
20	13		5
18	10		7,5
13			10
			15
			20



TMAA=4°C S 1 Pent 100 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
39	28	18	2,5
34	23	12	3,75
27	18		5
22	12		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA=4°C S 1 Pent 100 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
36	26	17	2,5
30	21	12	3,75
25	17		5
21	11		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA=4°C S 1 Pent 100 Nt = 10^6

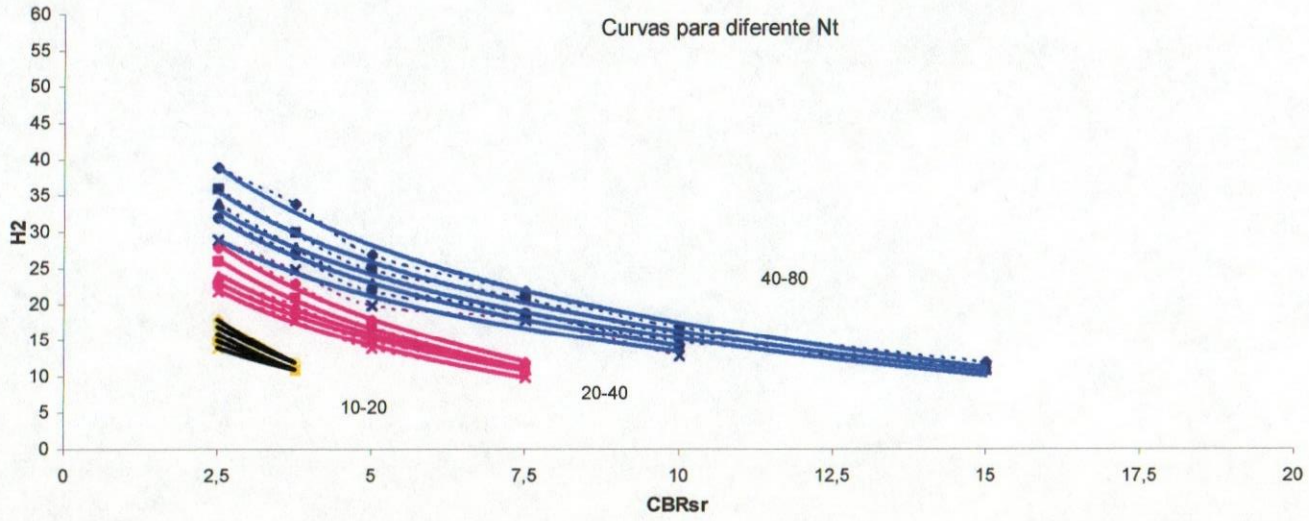
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
34	24	16	2,5
28	20	11	3,75
23	16		5
19	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=4°C S 1 Pent 100 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
32	23	15	2,5
27	19	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
14			10
			15
			20

TMAA=4°C S 1 Pent 100 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
29	22	14	2,5
25	18	11	3,75
20	14		5
18	10		7,5
13			10
			15
			20



TMAA=4°C S 2 Pent 50 $Nt = 10^8$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
40	29	18	2,5
35	24	13	3,75
28	18		5
23	13		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA=4°C S 2 Pent 50 $Nt = 10^7$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
37	27	17	2,5
31	22	12	3,75
26	17		5
21	12		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA=4°C S 2 Pent 50 $Nt = 10^6$

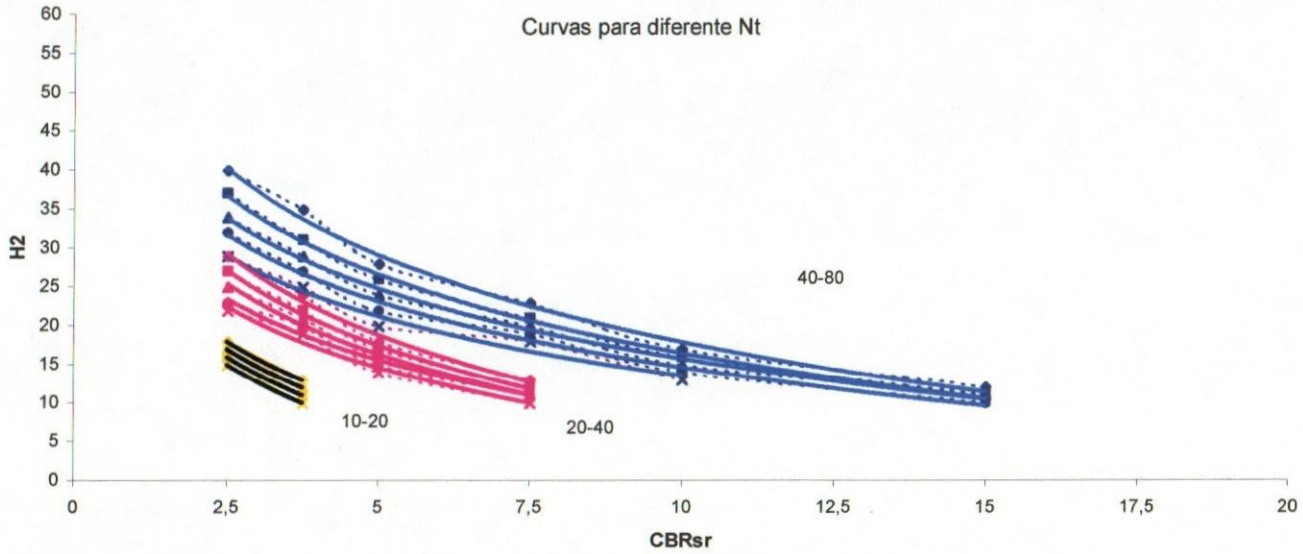
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
34	25	17	2,5
29	21	12	3,75
24	16		5
20	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=4°C S 2 Pent 50 $Nt = 10^5$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
32	23	16	2,5
27	20	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
14			10
10			15
			20

TMAA=4°C S 2 Pent 50 $Nt = 10^4$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
29	22	15	2,5
25	19	10	3,75
20	14		5
18	10		7,5
13			10
			15
			20



TMAA=4°C S 2 Pent 100 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
42	30	19	2,5
35	24	13	3,75
28	18		5
23	13		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA=4°C S 2 Pent 100 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
38	28	18	2,5
32	22	12	3,75
26	17		5
21	12		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA=4°C S 2 Pent 100 Nt = 10^6

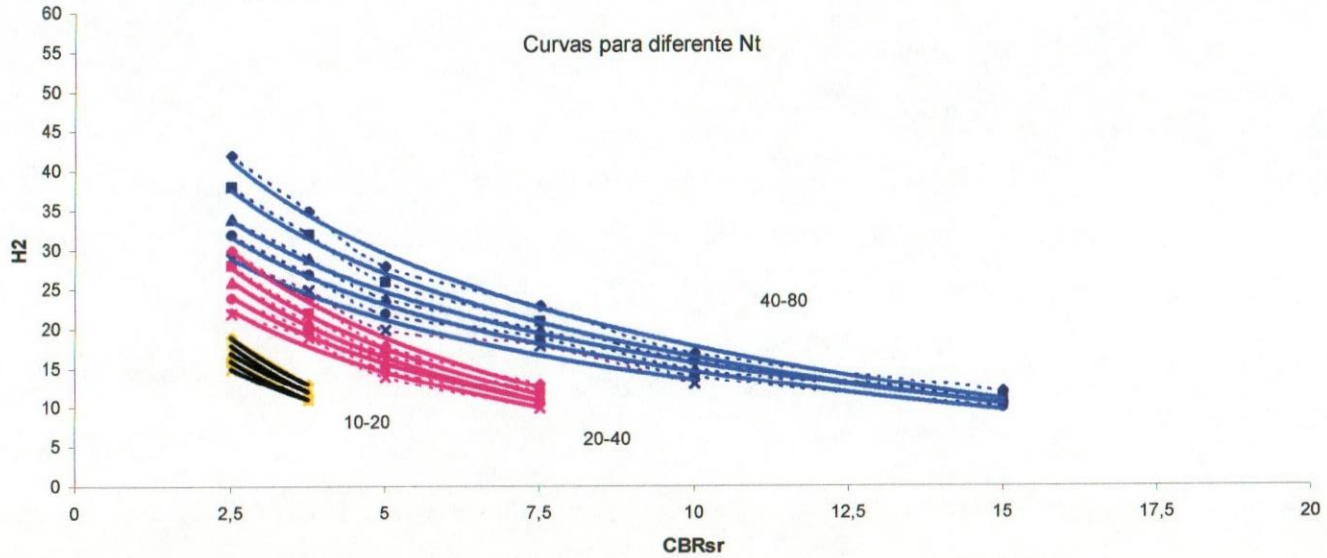
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
34	26	17	2,5
29	21	12	3,75
24	16		5
20	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=4°C S 2 Pent 100 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
32	24	16	2,5
27	20	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
14			10
10			15
			20

TMAA=4°C S 2 Pent 100 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
29	22	15	2,5
25	19	11	3,75
20	14		5
18	10		7,5
13			10
			15
			20



Nt	Pen 50-S1 (40-80)	R^2	Pen 100-S1 (40-80)	R^2
10^8	-14,828Ln(x) + 50,704	0,996	-15,467Ln(x) + 53,196	0,992
10^7	-13,043Ln(x) + 46,136	0,993	-13,869Ln(x) + 48,3	0,996
10^6	-11,99Ln(x) + 43,062	0,995	-12,817Ln(x) + 44,892	0,991
10^5	-11,185Ln(x) + 40,465	0,987	-12,632Ln(x) + 43,429	0,987
10^4	-10,571Ln(x) + 38,062	0,970	-11,165Ln(x) + 39,233	0,976
	(20-40)		(20-40)	
10^8	-13,893Ln(x) + 39,861	0,996	-14,745Ln(x) + 41,86	0,996
10^7	-13,041Ln(x) + 37,363	0,990	-13,67Ln(x) + 38,784	0,998
10^6	-12,189Ln(x) + 35,364	0,988	-11,966Ln(x) + 35,287	0,996
10^5	-11,337Ln(x) + 33,366	0,978	-11,114Ln(x) + 33,289	0,996
10^4	-11,337Ln(x) + 32,366	0,978	-11,114Ln(x) + 32,289	0,996
	(10-20)		(10-20)	
10^8	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000	-14,798Ln(x) + 31,559	1,000
10^7	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000
10^6	-12,332Ln(x) + 27,299	1,000	-12,332Ln(x) + 27,299	1,000
10^5	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000
10^4	-7,3989Ln(x) + 20,78	1,000	-7,3989Ln(x) + 20,78	1,000

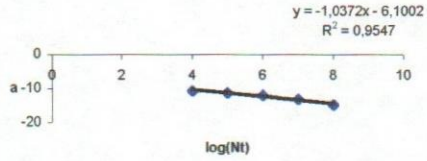
	Pen 50-S2 (40-80)	R^2	Pen 100-S2 (40-80)	R^2
10^8	-16,107Ln(x) + 55,021	0,992	-16,933Ln(x) + 56,852	0,992
10^7	-14,602Ln(x) + 50,128	0,998	-15,241Ln(x) + 51,619	0,996
10^6	-13,043Ln(x) + 45,802	0,995	-13,043Ln(x) + 45,802	0,995
10^5	-12,31Ln(x) + 42,974	0,992	-12,31Ln(x) + 42,974	0,992
10^4	-11,165Ln(x) + 39,233	0,976	-11,165Ln(x) + 39,233	0,976
	(20-40)		(20-40)	
10^8	-14,968Ln(x) + 42,936	0,990	-15,819Ln(x) + 44,435	0,992
10^7	-13,893Ln(x) + 39,861	0,996	-14,745Ln(x) + 41,36	0,996
10^6	-13,041Ln(x) + 37,363	0,990	-13,893Ln(x) + 38,861	0,996
10^5	-11,337Ln(x) + 33,866	0,978	-12,189Ln(x) + 35,364	0,988
10^4	-11,337Ln(x) + 32,866	0,978	-11,337Ln(x) + 32,866	0,978
	(10-20)		(10-20)	
10^8	-12,332Ln(x) + 29,299	1,000	-14,798Ln(x) + 32,559	1,000
10^7	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000	-14,798Ln(x) + 31,559	1,000
10^6	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000
10^5	-12,332Ln(x) + 27,299	1,000	-12,332Ln(x) + 27,299	1,000
10^4	-12,332Ln(x) + 26,299	1,000	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000

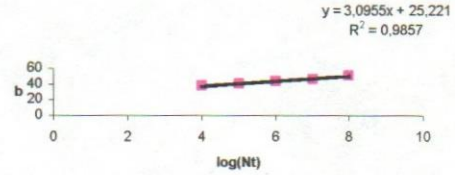
Donde $F(X)=H_2$

X=*C.B.R. sr*

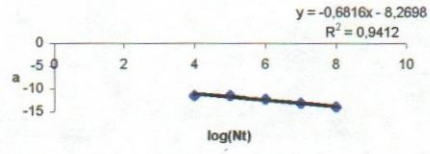
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-14,828	50,704	-13,893	39,861	-12,332	28,299
10000000	7	-13,043	46,136	-13,041	37,363	-12,332	28,299
1000000	6	-11,99	43,602	-12,189	35,364	-12,332	27,299
100000	5	-11,185	40,465	-11,337	33,366	-9,8652	24,039
10000	4	-10,571	38,062	-11,337	32,366	-7,3989	20,78

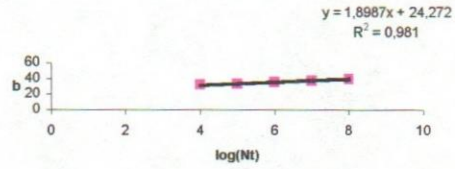
40-80



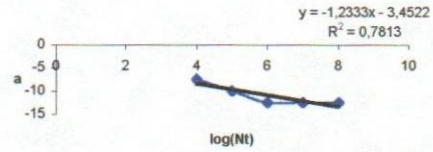


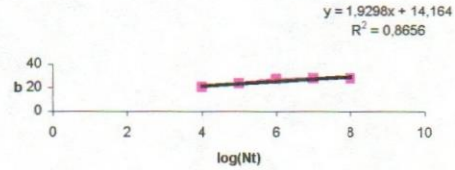
20-40



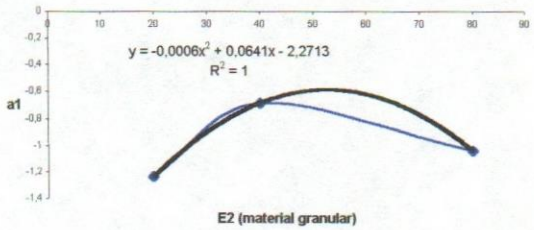


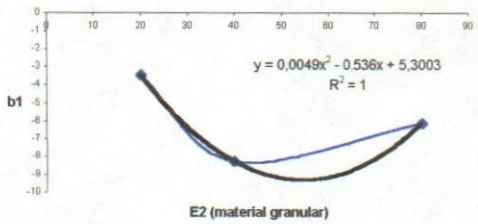
10-20

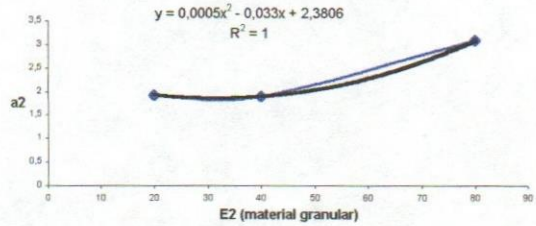


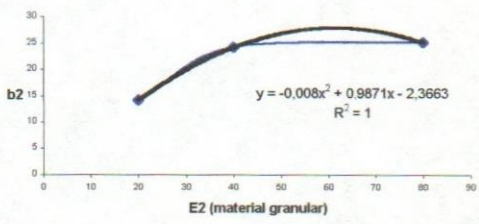


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,0372	-6,1002	3,0955	25,221
40	-0,6816	-8,2698	1,8987	24,272
20	-1,2333	-3,4522	1,9298	14,164







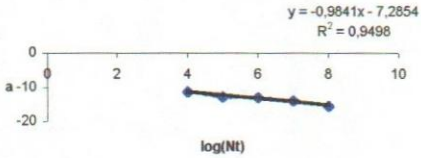


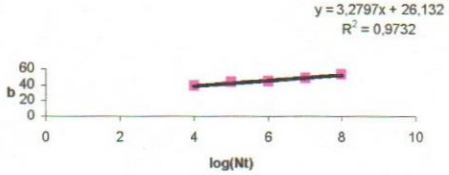
((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	-0,0006	0,0049	0,0005	-0,008
.2	0,0641	-0,536	-0,033	0,9871
.3	-2,2713	5,3003	2,3806	-2,366

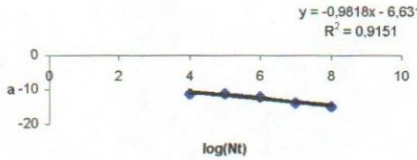
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-15,467	53,196	-14,745	41,86	-14,798	31,559
10000000	7	-13,869	48,3	-13,67	38,784	-12,332	28,299
1000000	6	-12,817	44,892	-11,966	35,287	-12,332	27,299
100000	5	-12,632	43,429	-11,114	33,289	-9,8652	24,039
10000	4	-11,165	39,233	-11,114	32,289	-7,3989	20,78

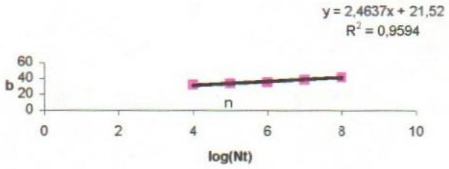
40-80



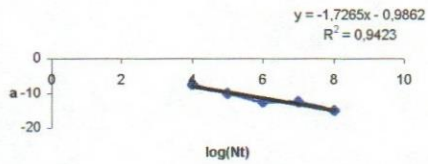


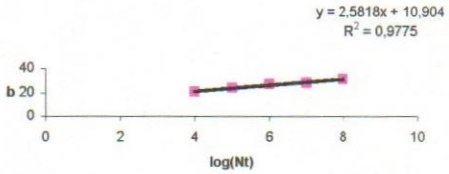
20-40



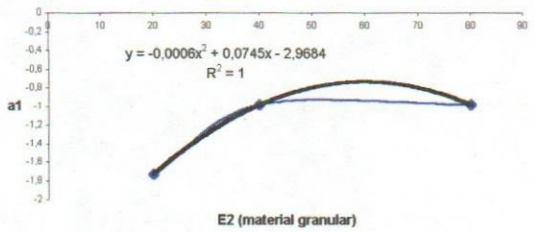


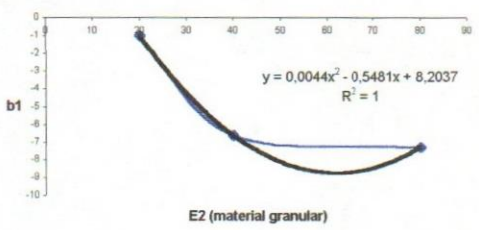
10-20

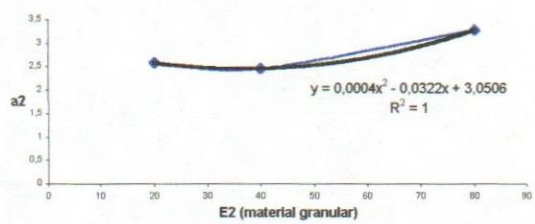


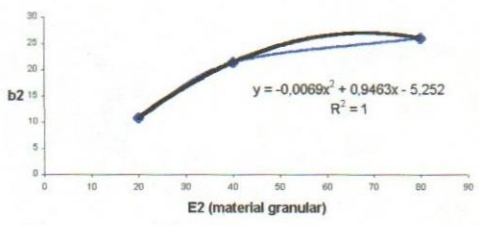


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-0,9841	-7,2854	3,2797	26,132
40	-0,9818	-6,631	2,4637	21,52
20	-1,7265	-0,9862	2,5818	10,904







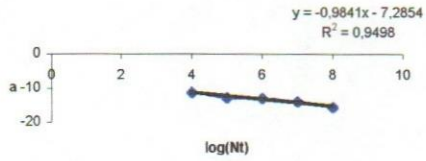


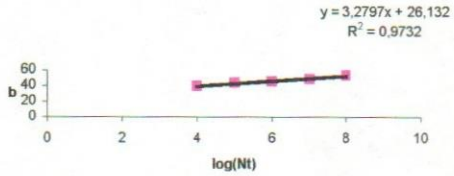
((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	-0,0006	0,044	0,0004	-0,007
.2	0,0745	-0,5481	-0,0322	0,9463
.3	-2,9684	8,2037	3,0506	-5,252

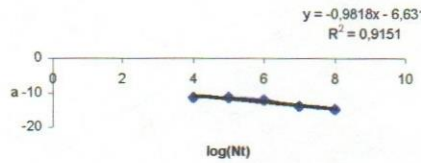
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-15,467	53,196	-14,745	41,86	-14,798	31,559
10000000	7	-13,869	48,3	-13,67	38,784	-12,332	28,299
1000000	6	-12,817	44,892	-11,966	35,287	-12,332	27,299
100000	5	-12,632	43,429	-11,114	33,289	-9,8652	24,039
10000	4	-11,165	39,233	-11,114	32,289	-7,3989	20,78

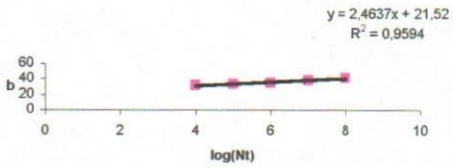
40-80



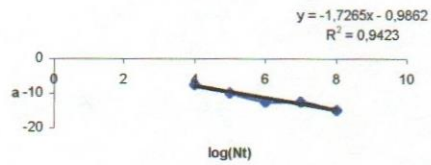


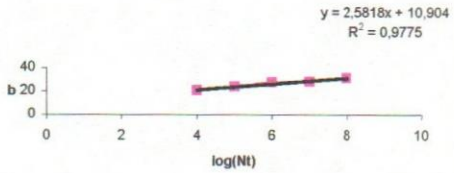
20-40



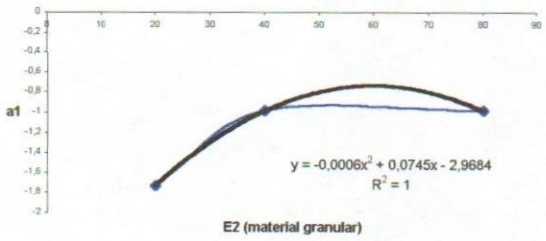


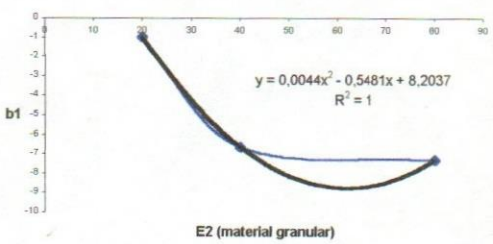
10-20

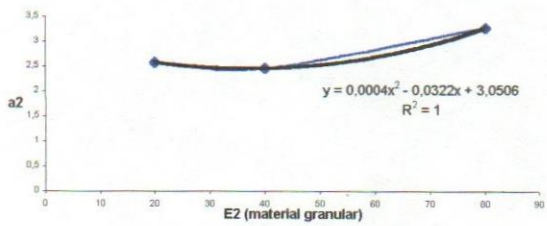


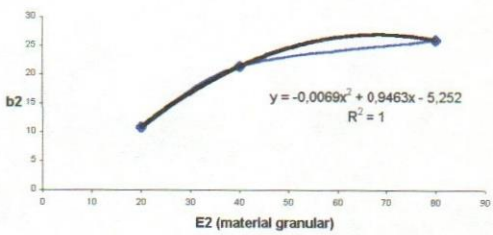


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-0,9841	-7,2854	3,2797	26,132
40	-0,9818	-6,631	2,4637	21,52
20	-1,7265	-0,9862	2,5818	10,904







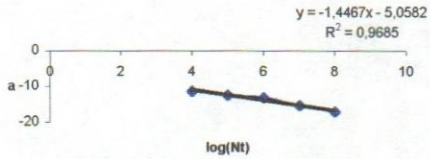


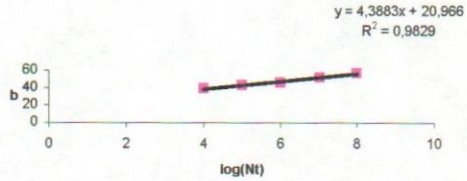
((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	-0,0006	0,0044	0,0004	-0,0069
.2	0,0745	-0,548	-0,0322	0,9463
.3	-2,9684	8,2037	3,0506	-5,252

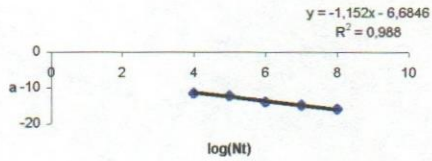
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-16,933	56,852	-15,819	44,435	-14,798	32,559
10000000	7	-15,241	51,619	-14,745	41,36	-14,798	31,559
1000000	6	-13,043	45,802	-13,893	38,861	-12,332	28,299
100000	5	-12,31	42,974	-12,189	35,364	-12,332	27,299
10000	4	-11,165	39,233	-11,337	32,866	-9,8652	24,039

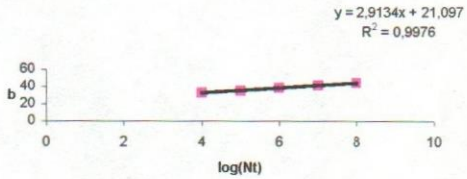
40-80



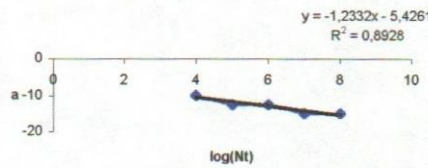


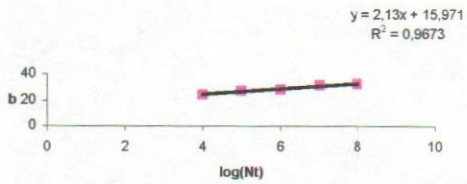
20-40



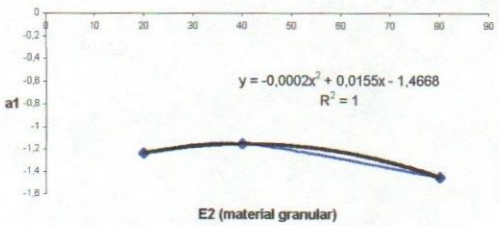


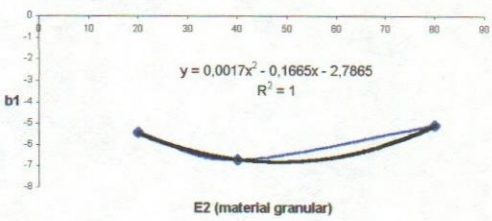
10-20

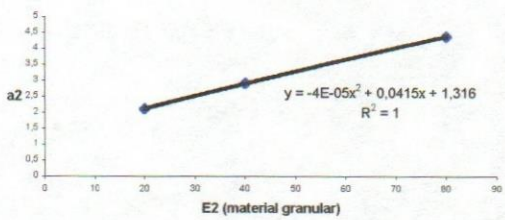


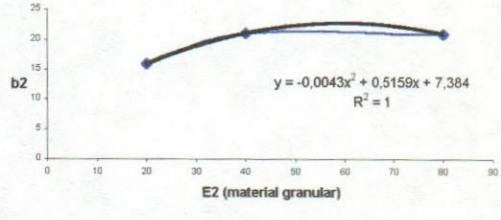


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,4467	-5,0582	4,3883	20,966
40	-1,152	-6,6846	2,9134	21,097
20	-1,2332	-5,4261	2,13	15,971









((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	-0,0002	0,0017	-0,00004	-0,0043
.2	0,0155	-0,1665	0,0415	0,5159
.3	-1,4668	-2,7865	1,316	7,384

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	36	37	38	41	30	32	32	34
	20-40	27	28	28	30	21	22	22	24
	10-20	18	18	19	19	12	12	13	13
10^7	40-80	34	35	36	38	29	30	30	31
	20-40	26	26	27	28	20	21	21	22
	10-20	17	17	18	18	12	12	12	13
10^6	40-80	32	33	34	35	27	28	28	29
	20-40	24	25	25	27	19	20	20	21
	10-20	16	16	17	17	12	11	12	12
10^5	40-80	30	31	31	32	26	26	27	27
	20-40	23	23	24	25	18	18	19	20
	10-20	15	15	16	16	11	11	12	12
10^4	40-80	28	28	29	29	24	24	25	24
	20-40	22	22	22	23	17	17	18	18
	10-20	14	14	15	15	11	11	11	11

C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3.75			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
-1	-1	-2	-1	-2	-1	-3	-1
0	0	-1	0	-1	-1	-2	0
1	0	1	0	0	0	0	0
0	0	-1	0	-1	0	-1	-1
1	1	0	0	-1	0	-1	0
0	0	1	0	0	0	0	1
0	0	0	1	-1	0	-1	0
0	1	0	1	-1	0	-1	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	1	-1	0	0	-1	0	0
0	0	1	1	-1	-1	-1	0
0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	-1	-1	0	-1
0	0	0	1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	0	0	0

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	26	28	28	29	21	22	22	22
	20-40	17	18	18	19	12	12	13	13
	10-20								
10^7	40-80	25	26	26	27	20	20	21	20
	20-40	17	17	18	18	11	12	12	12
	10-20								
10^6	40-80	24	24	25	25	19	19	20	19
	20-40	16	16	17	17	11	11	12	11
	10-20								
10^5	40-80	22	23	23	23	18	18	18	18
	20-40	15	15	16	16	10	11	11	11
	10-20								
10^4	40-80	21	21	21	21	17	17	17	16
	20-40	14	14	15	15	10	10	11	10
	10-20								

C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7.5			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
0	1	0	1	0	0	-1	-1
0	1	0	1	0	0	0	0
1	2	0	1	0	-1	0	-1
1	1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	1	0	0	0	-1
1	1	1	1	0	0	1	0
0	1	1	1	-1	-1	-1	-1
1	0	1	1	-1	0	0	0
1	1	1	1	-1	-1	-1	-2
1	0	1	1	0	0	1	0

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	17	18	18	17	11	12	12	10
	20-40								
	10-20								
10^7	40-80	16	17	17	16	11	11	12	10
	20-40								
	10-20								
10^6	40-80	15	16	16	15	10	10	11	9
	20-40								
	10-20								
10^5	40-80	15	14	15	14			10	9
	20-40								
	10-20								
10^4	40-80	14	13	14	13				
	20-40								
	10-20								

C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
1	1	1	0	0	0	0	-2
0	1	1	0	0	0	1	-1
0	1	1	0	-1	-1	0	-2
1	0	1	0			0	-1
1	0	1	0				

Valores de H2 Obtenidos de las Ecuaciones para 4°C

Desvición entre Valores Obtenidos de las Ecuaciones y Valores de las Cartas HN de Shell

Pen50

TMAA 4°C

S1F1

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-1.0372 * \log(N_t) - 6.1002) * \ln(C.B.R_{sr}) + 3.0955 * \log(N_t) + 25.221$
40	$H_2 = (-0.6816 * \log(N_t) - 8.2698) * \ln(C.B.R_{sr}) + 1.8987 * \log(N_t) + 24.272$
20	$H_2 = (-1.2333 * \log(N_t) - 3.4522) * \ln(C.B.R_{sr}) + 1.9298 * \log(N_t) + 14.272$
$H_2 = ((-0.0006 * E_2^{\,2} + 0.0641 * E_2 - 2.2713) * \log(N_t) + 0.0049 * E_2^{\,2} - 0.536 * E_2 + 5.3003) * \ln(C.B.R_{sr}) + (0.0005 * E_2^{\,2} - 0.033 * E_2 + 2.3806) * \log(N_t) - 0.008 * E_2^{\,2} + 0.9871 * E_2 - 2.1869$	

S2F2

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-0.9841 * \log(N_t) - 7.2854) * \ln(C.B.R_{sr}) + 3.2797 * \log(N_t) + 26.132$
40	$H_2 = (-0.9818 * \log(N_t) - 6.631) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.4637 * \log(N_t) + 21.52$
20	$H_2 = (-1.7265 * \log(N_t) - 0.9862) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.5818 * \log(N_t) + 10.904$
$H_2 = ((-0.0006 * E_2^{\,2} + 0.0745 * E_2 - 2.9684) * \log(N_t) + 0.0044 * E_2^{\,2} - 0.5481 * E_2 + 8.2037) * \ln(C.B.R_{sr}) + (0.0004 * E_2^{\,2} - 0.0322 * E_2 + 3.0506) * \log(N_t) - 0.0069 * E_2^{\,2} + 0.9463 * E_2 - 4.6834$	

Pen100

S1F1

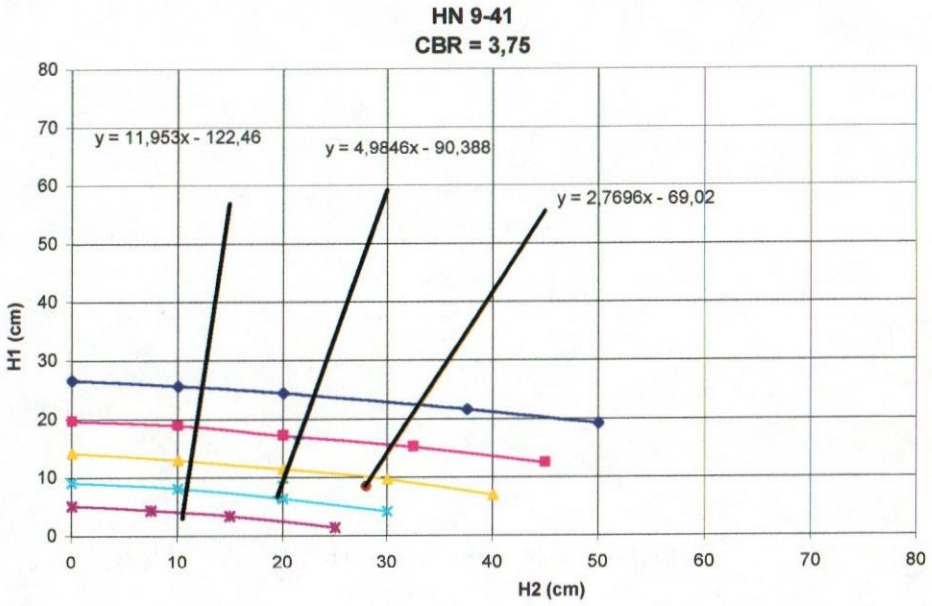
C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-0.9841 * \log(N_t) - 7.2854) * \ln(C.B.R_{sr}) + 3.2797 * \log(N_t) + 26.132$
40	$H_2 = (-0.9818 * \log(N_t) - 6.631) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.4637 * \log(N_t) + 21.52$
20	$H_2 = (-1.7265 * \log(N_t) - 0.9862) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.5818 * \log(N_t) + 10.904$
$H_2 = ((-0.0006 * E_2^{\,2} + 0.0745 * E_2 - 2.9684) * \log(N_t) + 0.0044 * E_2^{\,2} - 0.5481 * E_2 + 8.2037) * \ln(C.B.R_{sr}) + (0.0004 * E_2^{\,2} - 0.0322 * E_2 + 3.0506) * \log(N_t) - 0.0069 * E_2^{\,2} + 0.9463 * E_2 - 5.2520$	

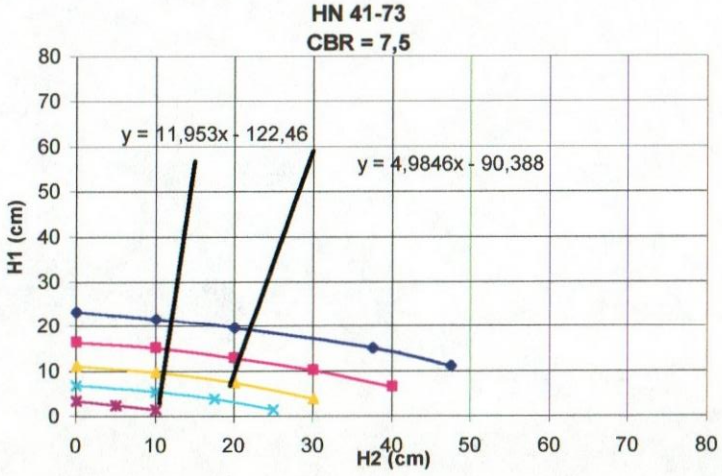
S2F2

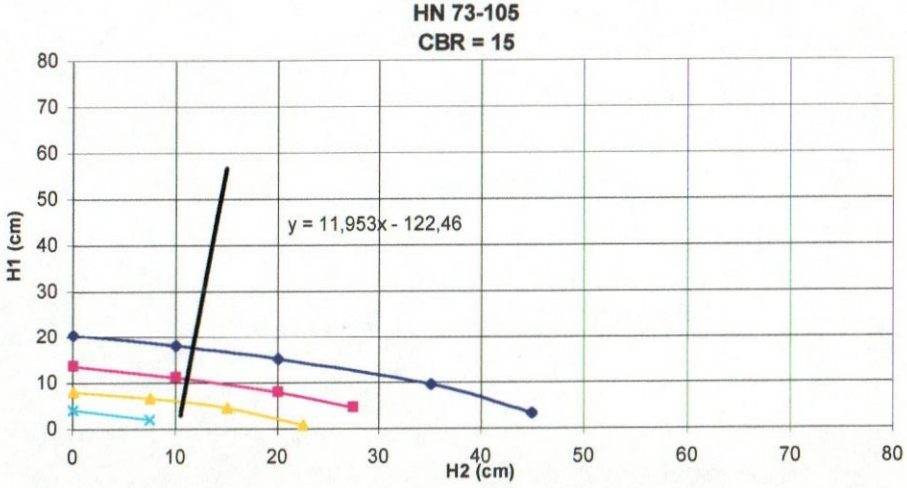
C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-1.4467 * \log(N_t) - 5.0582) * \ln(C.B.R_{sr}) + 4.3883 * \log(N_t) + 20.966$
40	$H_2 = (-1.152 * \log(N_t) - 6.6846) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.9134 * \log(N_t) + 21.097$
20	$H_2 = (-1.2332 * \log(N_t) - 5.4261) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.13 * \log(N_t) + 15.971$
$H_2 = ((-0.0002 * E_2^{\,2} + 0.0155 * E_2 - 1.4668) * \log(N_t) + 0.0017 * E_2^{\,2} - 0.1665 * E_2 - 2.7865) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.00004 * E_2^{\,2} + 0.0415 * E_2 + 1.316) * \log(N_t) - 0.0043 * E_2^{\,2} + 0.5159 * E_2 + 7.8541$	

T.M.A.A. 12ºC

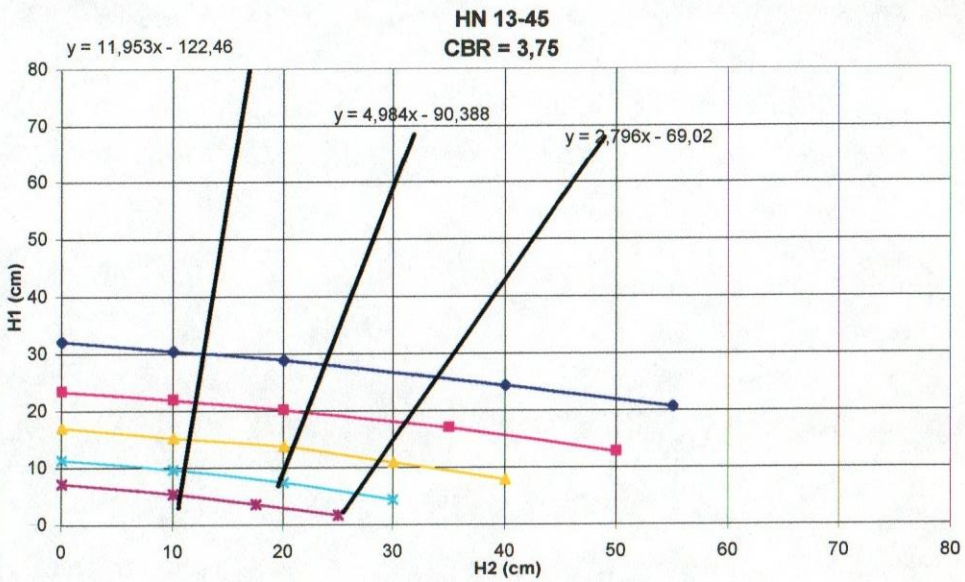
Nt	C.B.R 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	27	0	24	0	21	0
	26	10	22	10	18	10
	25	20	20	20	15	20
	22	38	15	38	10	35
	19	50	11	48	4	45
10^7	20	0	17	0	14	0
	19	10	15	10	11	10
	17	20	13	20	8	20
	15	33	10	30	5	28
	13	45	7	40		
10^6	14	0	11	0	8	0
	13	10	10	10	7	8
	12	20	8	20	5	15
	10	30	4	30	1	23
	7	40				
10^5	9	0	7	0	4	0
	8	10	6	10	2	8
	7	20	4	18		
	4	30	2	25		
10^4	5	0	4	0		
	5	8	3	5		
	4	15	2	10		
	2	25				

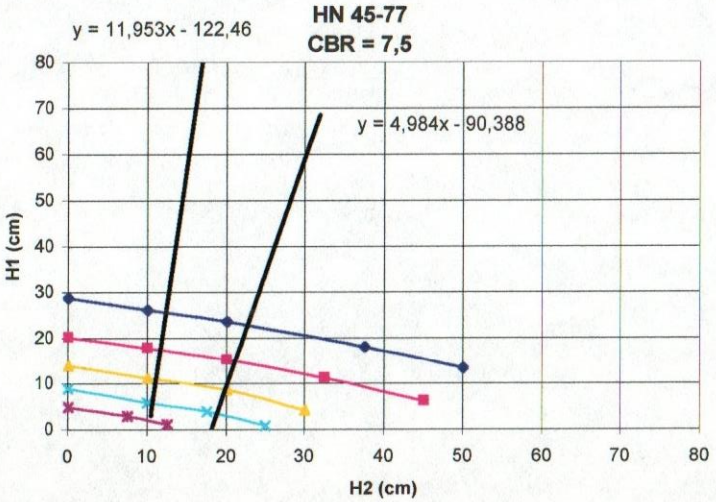


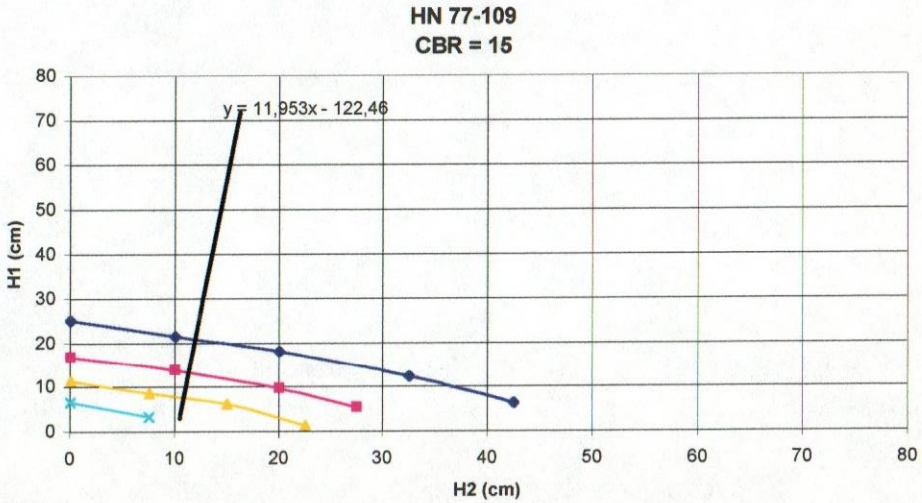




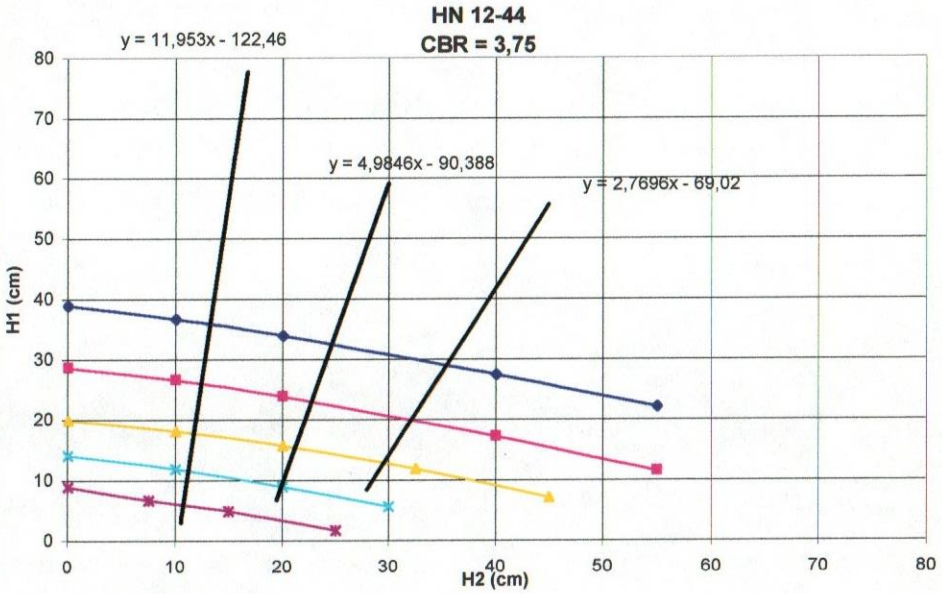
Nt	C.B.R 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	32	0	29	0	25	0
	31	10	26	10	22	10
	29	20	24	20	18	20
	25	40	18	38	13	33
	21	55	14	50	7	43
10^7	24	0	20	0	17	0
	22	10	18	10	14	10
	20	20	15	20	10	20
	17	35	11	33	6	28
	13	50	6	45		
10^6	17	0	14	0	12	0
	15	10	11	10	9	8
	14	20	9	20	6	15
	11	30	4	30	2	23
	8	40				
10^5	12	0	9	0	7	0
	10	10	6	10	4	8
	8	20	4	18		
	5	30	1	25		
10^4	7	0	5	0		
	6	10	3	8		
	4	18	1	13		
	2	25				

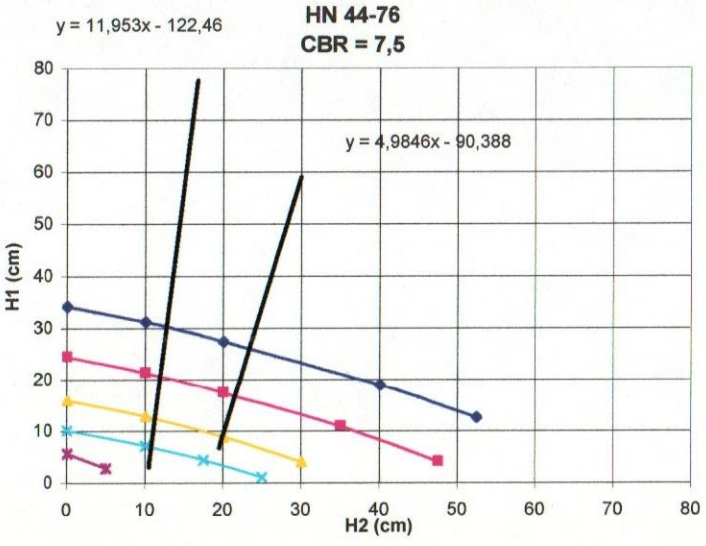


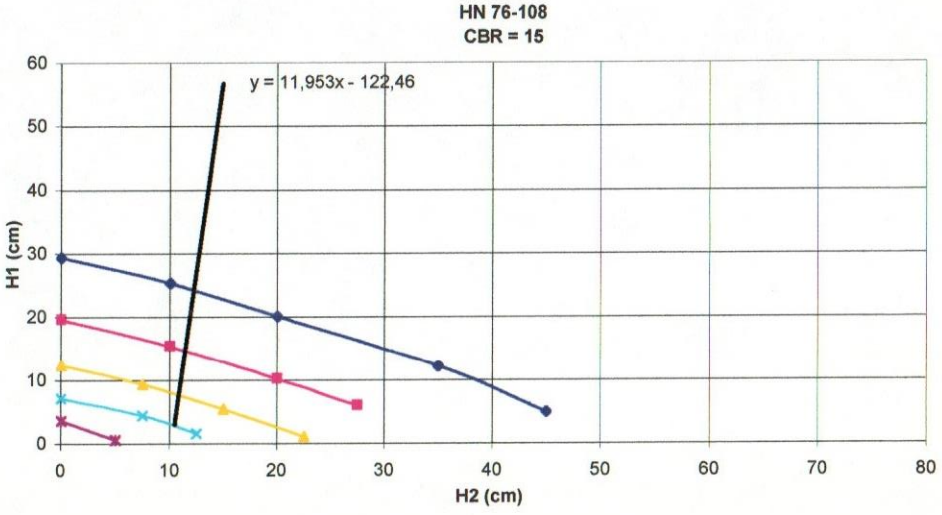




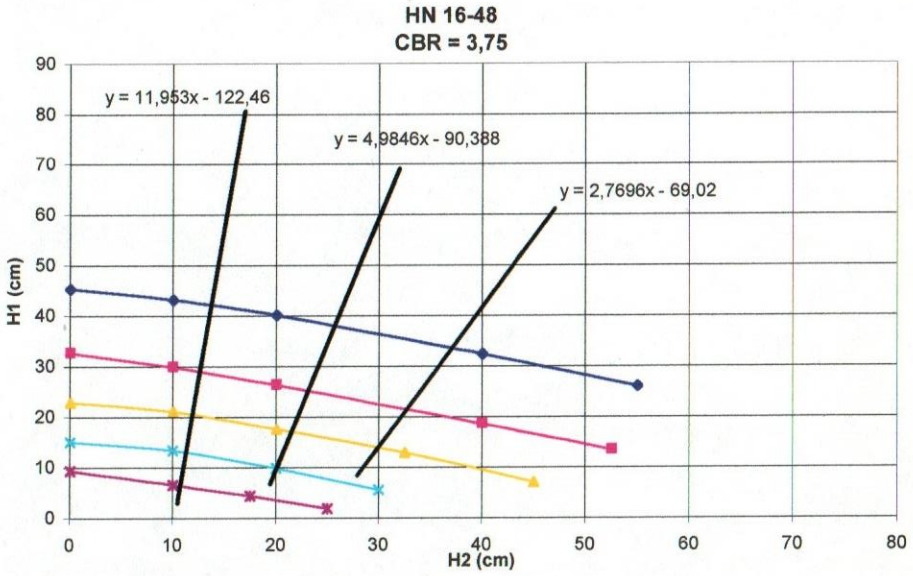
Nt	C.B.R 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	39	0	34	0	30	0
	37	10	31	10	26	10
	34	20	28	20	20	20
	28	40	19	40	12	35
	22	55	13	53	5	45
10^7	29	0	25	0	20	0
	27	10	22	10	16	10
	24	20	18	20	10	20
	17	40	11	35	6	28
	12	55	4	48		
10^6	20	0	16	0	13	0
	18	10	13	10	10	8
	16	20	9	20	6	15
	12	33	4	30	1	23
	7	45				
10^5	14	0	10	0	7	0
	12	10	7	10	5	8
	9	20	5	18	2	13
	6	30	1	25		
10^4	9	0	6	0	4	0
	7	8	3	5	1	5
	5	15				
	2	25				

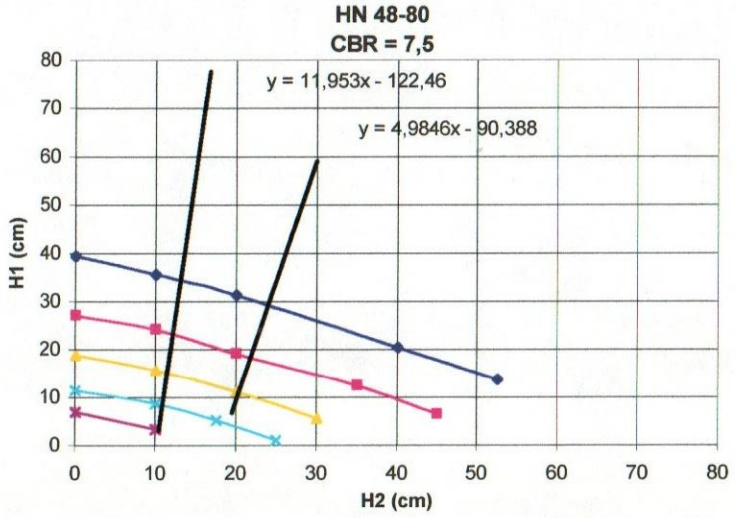


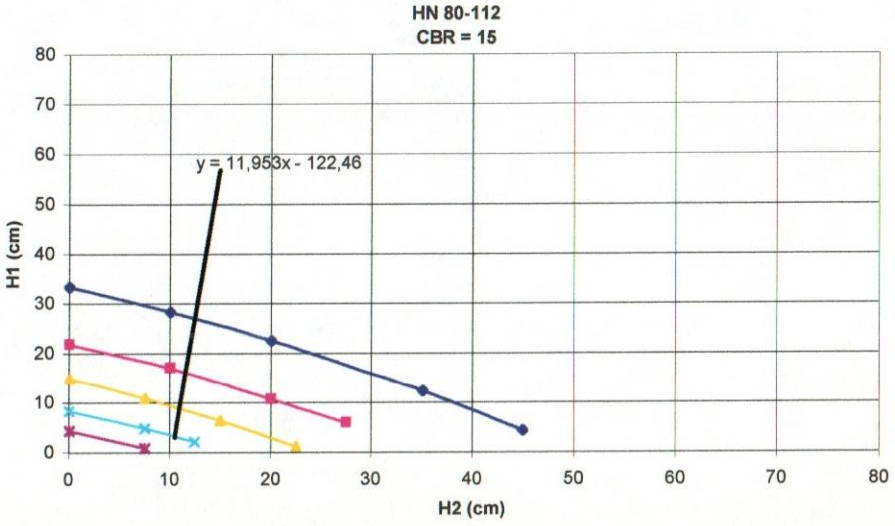




Nt	C.B.R. 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	46	0	40	0	34	0
	43	10	36	10	29	10
	40	20	32	20	23	20
	33	40	21	40	13	35
	26	55	14	53	5	45
10^7	33	0	27	0	22	0
	30	10	24	10	17	10
	27	20	19	20	11	20
	19	40	13	35	6	28
	14	53	7	45		
10^6	23	0	19	0	15	0
	21	10	16	10	11	8
	18	20	11	20	7	15
	13	33	6	30	1	23
	7	45				
10^5	15	0	12	0	9	0
	14	10	9	10	5	8
	10	20	5	18	2	13
	6	30	1	25		
10^4	10	0	7	0	5	0
	7	10	4	10	1	8
	5	18				
	2	25				







Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
		Pen50(S1F1)	Pen100(S1F1)	Pen50(S2F2)	Pen100(S2F2)	Pen50(S1F1)	Pen100(S1F1)	Pen50(S2F2)	Pen100(S2F2)
10^8	40-80	39	40	43	45	33	34	35	37
	20-40	28	29	31	32	23	24	25	26
	10-20	18	19	19	20	12	13	13	14
10^7	40-80	36	37	39	38	31	31	32	33
	20-40	26	27	27	28	22	22	23	23
	10-20	17	17	18	18	12	12	12	13
10^6	40-80	33	34	35	35	28	29	30	30
	20-40	24	25	26	26	20	21	21	22
	10-20	16	17	17	17	11	12	12	12
10^5	40-80	30	31	32	32	27	27	27	27
	20-40	23	24	24	24	19	20	20	20
	10-20	15	15	16	16	11	11	11	11
10^4	40-80	28	28	30	30	26	26	26	26
	20-40	22	22	23	23	19	19	19	19
	10-20	15	15	15	15	11	11	11	11
Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
		Pen50(S1F1)	Pen100(S1F1)	Pen50(S2F2)	Pen100(S2F2)	Pen50(S1F1)	Pen100(S1F1)	Pen50(S2F2)	Pen100(S2F2)
10^8	40-80	27	28	28	30	22	23	23	24
	20-40	18	18	18	19	12	12	13	13
	10-20								
10^7	40-80	25	25	26	27	21	21	22	22
	20-40	17	17	17	18	12	12	12	12
	10-20								
10^6	40-80	23	24	24	24	20	20	20	20
	20-40	16	16	16	17	11	11	11	12
	10-20								
10^5	40-80	22	23	22	22	19	19	19	19
	20-40	15	15	15	15	11	11	11	11
	10-20								
10^4	40-80	21	21	21	21	19	19	17	18
	20-40	14	14	14	14	11	11	10	11
	10-20								
Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
		Pen50(S1F1)	Pen100(S1F1)	Pen50(S2F2)	Pen100(S2F2)	Pen50(S1F1)	Pen100(S1F1)	Pen50(S2F2)	Pen100(S2F2)
10^8	40-80	17	17	17	18	12	12	12	13
	20-40								
	10-20								
10^7	40-80	16	16	16	17	11	11	11	12
	20-40								
	10-20								
10^6	40-80	15	15	15	15	11	11	11	11
	20-40								
	10-20								
10^5	40-80	14	15	14	15	11	11	10	11
	20-40								
	10-20								
10^4	40-80	13	13	13	14			10	10
	20-40								
	10-20								

Valores H2 Obtenidos de las Cartas HN de Shell para 12ºC

TMAA = 12 °C S 1 Pent 50 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
39	28	18	2,5
33	23	12	3,75
27	18		5
22	12		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA = 12 °C S 1 Pent 50 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
36	26	17	2,5
31	22	12	3,75
25	17		5
21	12		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA = 12 °C S 1 Pent 50 Nt = 10^6

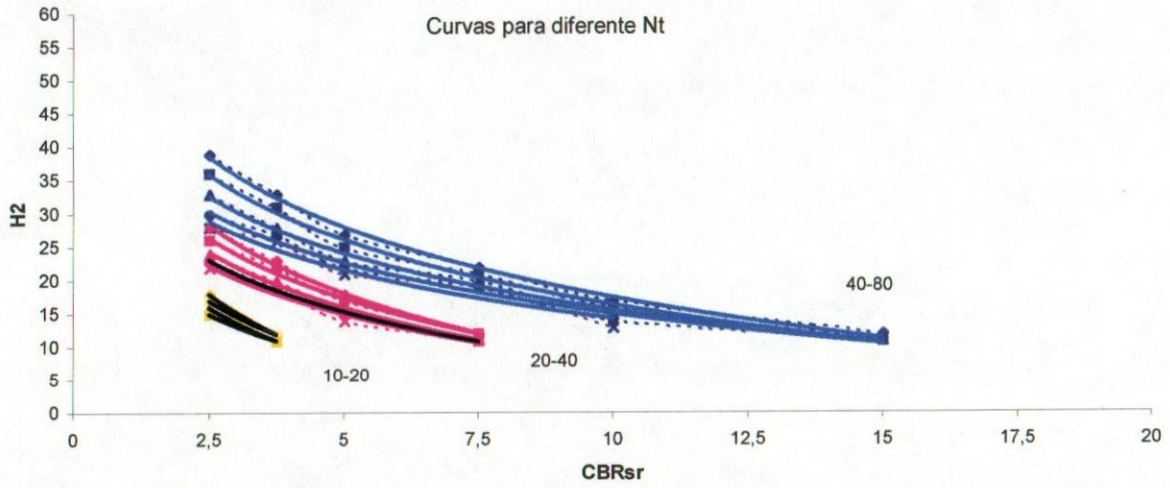
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
33	24	16	2,5
28	20	11	3,75
23	16		5
20	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA = 12 °C S 1 Pent 50 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
30	23	15	2,5
27	19	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
14			10
11			15
			20

TMAA = 12 °C S 1 Pent 50 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
28	22	15	2,5
26	19	11	3,75
21	14		5
19	11		7,5
13			10
			15
			20



TMAA = 12 °C S 1 Pent 100 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
40	29	19	2,5
34	24	13	3,75
28	18		5
23	12		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA = 12 °C S 1 Pent 100 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
37	27	17	2,5
31	22	12	3,75
25	17		5
21	12		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA = 12 °C S 1 Pent 100 Nt = 10^6

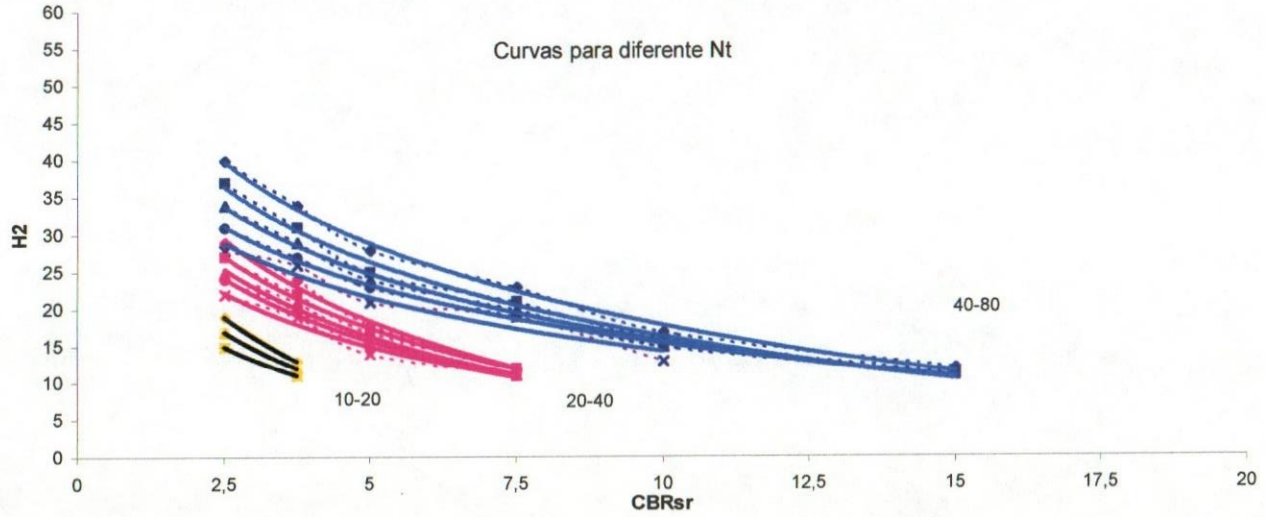
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
34	25	17	2,5
29	21	12	3,75
24	16		5
20	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA = 12 °C S 1 Pent 100 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
31	24	15	2,5
27	20	11	3,75
23	15		5
19	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA = 12 °C S 1 Pent 100 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
28	22	15	2,5
26	19	11	3,75
21	14		5
19	11		7,5
13			10
			15
			20



TMAA = 12 °C S 2 Pent 50 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
43	31	19	2,5
35	25	13	3,75
28	18		5
23	13		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA = 12 °C S 2 Pent 50 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
39	27	18	2,5
32	23	12	3,75
26	17		5
22	12		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA = 12 °C S 2 Pent 50 Nt = 10^6

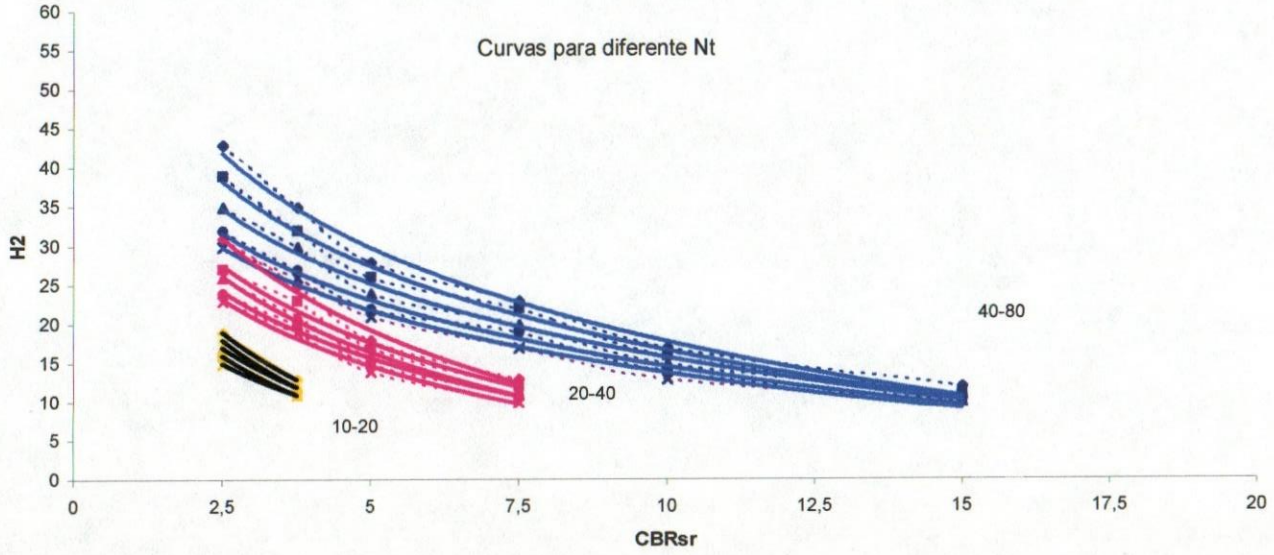
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
35	26	17	2,5
30	21	12	3,75
24	16		5
20	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA = 12 °C S 2 Pent 50 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
32	24	16	2,5
27	20	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
14			10
10			15
			20

TMAA = 12 °C S 2 Pent 50 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
30	23	15	2,5
26	19	11	3,75
21	14		5
17	10		7,5
13			10
10			15
			20



TMAA = 12 °C S 2 Pent 100 $Nt = 10^8$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
45	32	20	2,5
37	26	14	3,75
30	19		5
24	13		7,5
18			10
13			15
			20

TMAA = 12 °C S 2 Pent 100 $Nt = 10^7$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
38	28	18	2,5
33	23	13	3,75
27	18		5
22	12		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA = 12 °C S 2 Pent 100 $Nt = 10^6$

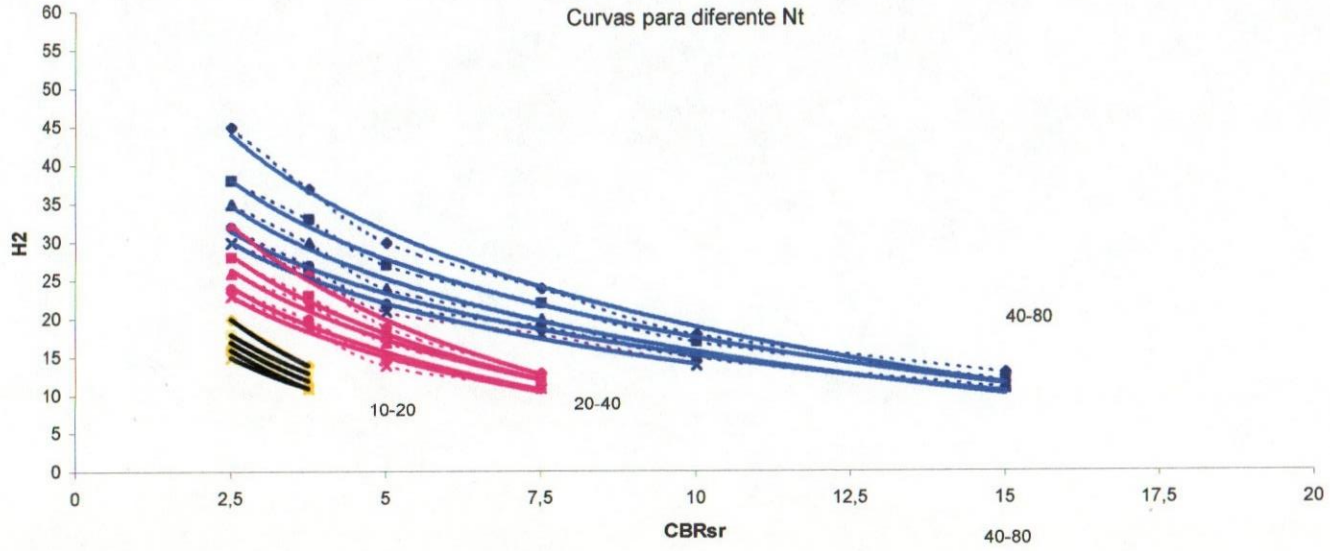
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
35	26	17	2,5
30	22	12	3,75
24	17		5
20	12		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA = 12 °C S 2 Pent 100 $Nt = 10^5$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
32	24	16	2,5
27	20	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA = 12 °C S 2 Pent 100 $Nt = 10^4$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
30	23	15	2,5
26	19	11	3,75
21	14		5
18	11		7,5
14			10
10			15
			20



Nt	Pen 50-S1 (40-80)	R^2	Pen 100-S1 (40-80)	R^2
10^8	-15,241Ln(x) + 52,619	0,996	-15,88Ln(x) + 54,445	0,996
10^7	-14,095Ln(x) + 48,876	0,994	-14,508Ln(x) + 49,792	0,993
10^6	-12,31Ln(x) + 43,974	0,992	-13,043Ln(x) + 45,802	0,995
10^5	-11,07Ln(x) + 40,562	0,986	-11,351Ln(x) + 41,57	0,998
10^4	-10,532Ln(x) + 38,598	0,947	-10,532Ln(x) + 38,598	0,947
	(20-40)		(20-40)	
10^8	-14,745Ln(x) + 41,86	0,996	-15,819Ln(x) + 43,935	0,992
10^7	-13,041Ln(x) + 38,363	0,990	-13,893Ln(x) + 39,861	0,996
10^6	-11,966Ln(x) + 35,287	0,996	-13,041Ln(x) + 37,363	0,990
10^5	-11,114Ln(x) + 33,289	0,996	-12,189Ln(x) + 35,364	0,988
10^4	-10,485Ln(x) + 31,867	0,971	-10,485Ln(x) + 31,867	0,971
	(10-20)		(10-20)	
10^8	-14,798Ln(x) + 31,559	1,000	-14,798Ln(x) + 32,559	1,000
10^7	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000
10^6	-12,332Ln(x) + 27,299	1,000	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000
10^5	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000
10^4	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000

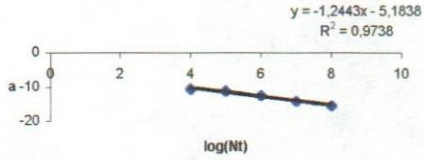
	Pen 50-S2 (40-80)	R^2	Pen 100-S2 (40-80)	R^2
10^8	-17,346Ln(x) + 57,767	0,990	-18,079Ln(x) + 60,595	0,992
10^7	-15,561Ln(x) + 52,532	0,992	-14,828Ln(x) + 51,704	0,996
10^6	-13,682Ln(x) + 47,294	0,991	-13,682Ln(x) + 47,294	0,991
10^5	-12,31Ln(x) + 42,974	0,992	-11,671Ln(x) + 42,149	0,991
10^4	-11,577Ln(x) + 40,48	0,990	-11,482Ln(x) + 40,55	0,988
	(20-40)		(20-40)	
10^8	-16,894Ln(x) + 46,51	0,986	-17,746Ln(x) + 48,509	0,991
10^7	-14,116Ln(x) + 40,438	0,983	-14,745Ln(x) + 41,86	0,996
10^6	-13,893Ln(x) + 38,861	0,996	-13,041Ln(x) + 38,363	0,990
10^5	-12,189Ln(x) + 35,364	0,988	-12,189Ln(x) + 35,364	0,988
10^4	-12,189Ln(x) + 34,364	0,988	-11,337Ln(x) + 33,366	0,978
	(10-20)		(10-20)	
10^8	-14,798Ln(x) + 32,559	1,000	-14,798Ln(x) + 33,559	1,000
10^7	-14,798Ln(x) + 31,559	1,000	-12,332Ln(x) + 29,299	1,000
10^6	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000
10^5	-12,332Ln(x) + 27,299	1,000	-12,332Ln(x) + 27,299	1,000
10^4	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000

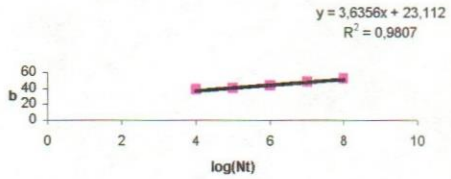
Donde $F(X)=H_2$

X=C.B.R. sr

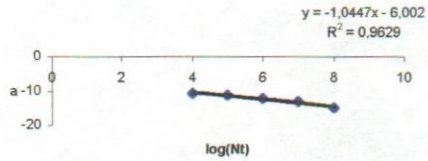
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-15,241	52,619	-14,745	41,86	-14,798	31,559
10000000	7	-14,095	48,876	-13,041	38,363	-12,332	28,299
1000000	6	-12,31	43,974	-11,966	35,287	-12,332	27,299
100000	5	-11,07	40,562	-11,114	33,289	-9,8652	24,039
10000	4	-10,532	38,598	-10,485	31,867	-9,8652	24,039

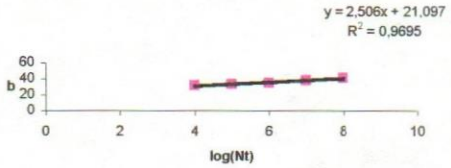
40-80



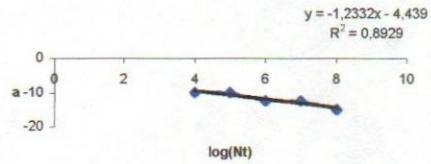


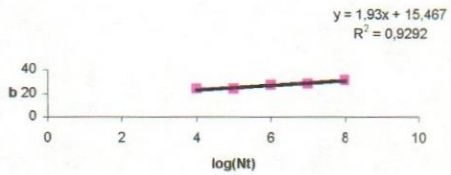
20-40



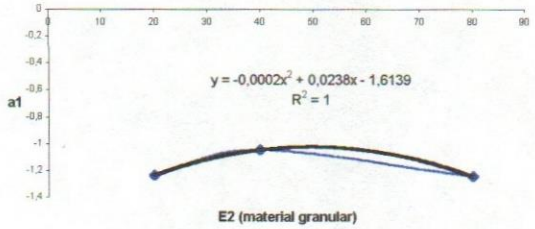


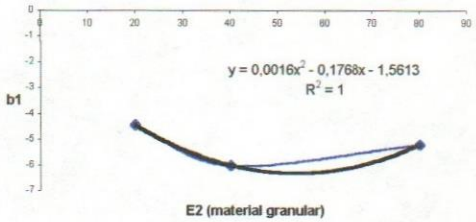
10-20

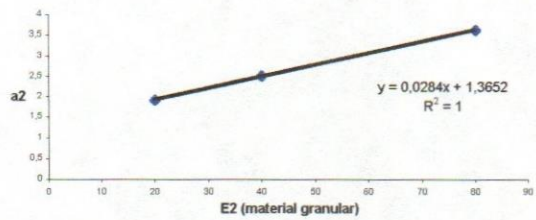


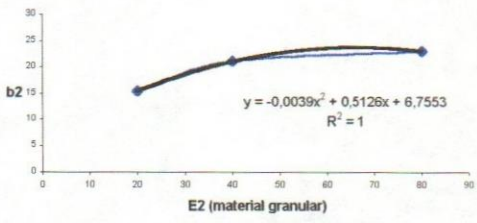


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,2443	-5,1838	3,6356	23,112
40	-1,0447	-6,002	2,506	21,097
20	-1,2332	-4,439	1,93	15,467







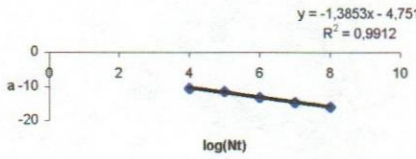


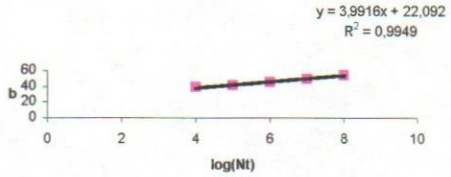
((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	-0,0002	0,0016	0	-0,004
.2	0,0238	-0,1768	0,0284	0,5126
.3	-1,6139	-1,5613	1,3652	6,7553

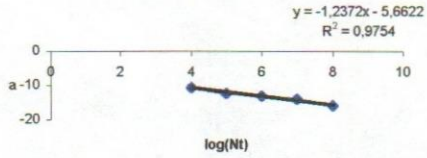
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-15,88	54,445	-15,819	43,935	-14,798	32,559
10000000	7	-14,508	49,792	-13,893	39,861	-12,332	28,299
1000000	6	-13,043	45,802	-13,041	37,363	-12,332	28,299
100000	5	-11,351	41,57	-12,189	35,364	-9,8652	24,039
10000	4	-10,532	38,598	-10,485	31,867	-9,8652	24,039

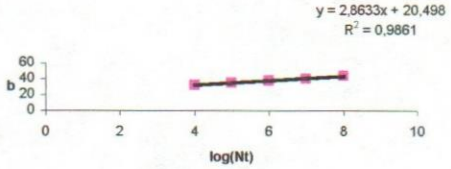
40-80



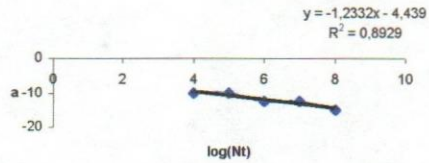


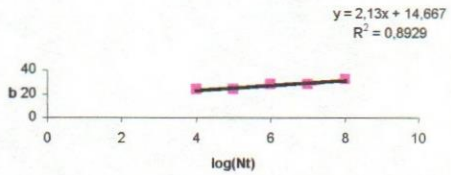
20-40



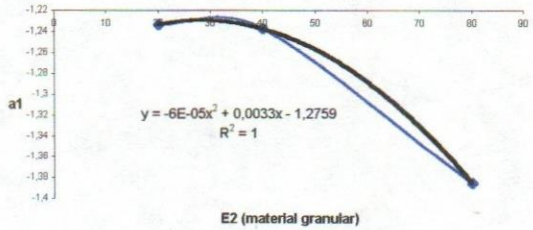


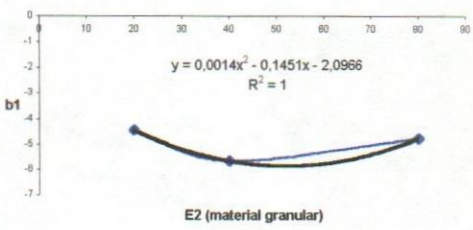
10-20

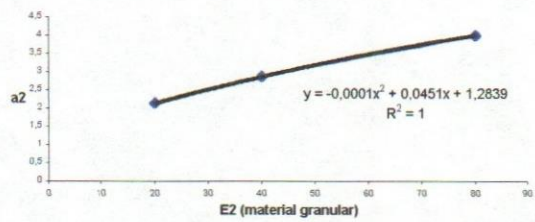


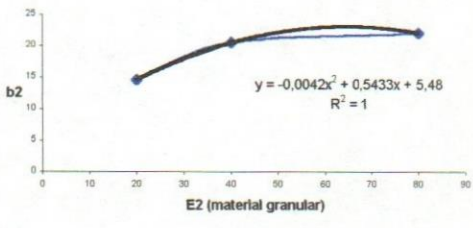


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,3853	-4,751	3,9916	22,092
40	-1,2372	-5,6622	2,8633	20,498
20	-1,2332	-4,439	2,13	14,667







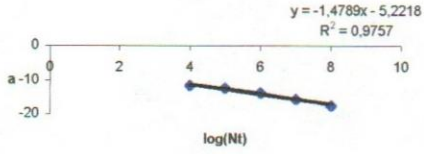


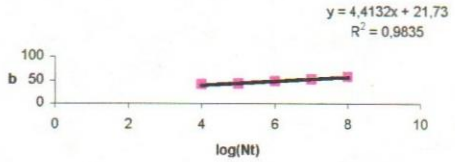
((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	-0,00006	0,0014	-0,0001	-0,004
.2	0,0033	-0,1451	0,0451	0,5433
.3	-1,2759	-2,0966	1,2839	5,48

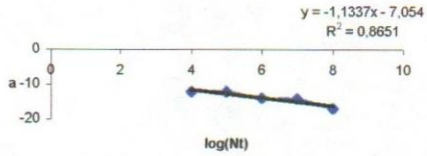
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-17,346	57,767	-16,894	46,51	-14,798	32,559
10000000	7	-15,561	52,532	-14,116	40,438	-14,798	31,559
1000000	6	-13,682	47,294	-13,893	38,861	-12,332	28,299
100000	5	-12,31	42,974	-12,189	35,364	-12,332	27,299
10000	4	-11,577	40,48	-12,189	34,364	-9,8652	24,039

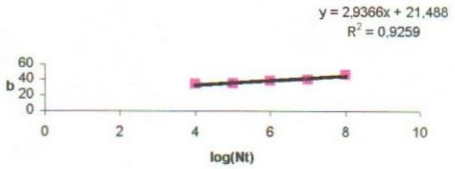
40-80



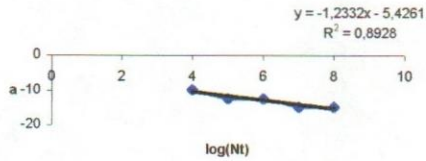


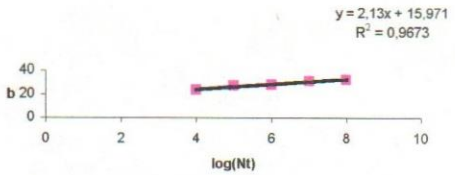
20-40



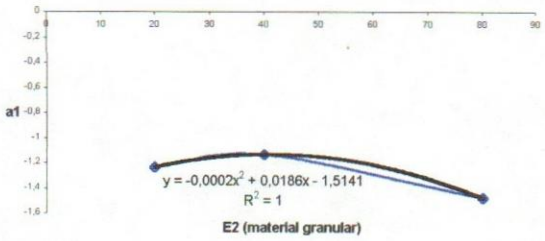


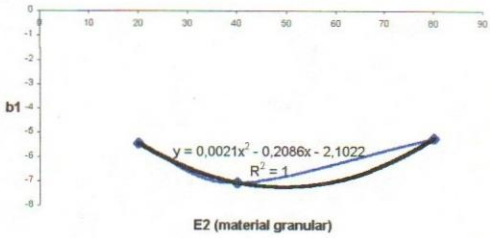
10-20

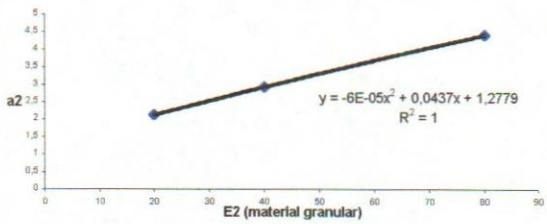


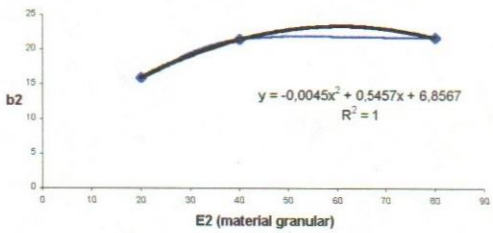


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,4789	-5,2218	4,4132	21,73
40	-1,1337	-7,054	2,9366	21,488
20	-1,2332	-5,4261	2,13	15,971







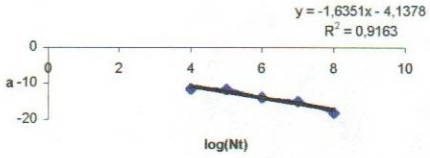


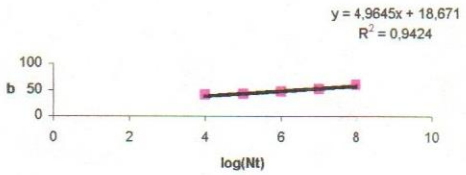
((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	-0,0002	0,0021	-0,00006	-0,0045
.2	0,0186	-0,2086	0,0437	0,5457
.3	-1,5141	-2,1022	1,2779	6,8567

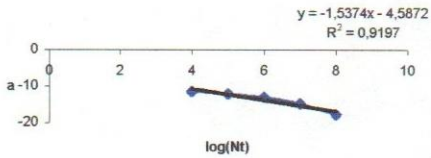
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-18,079	60,595	-17,746	48,509	-14,798	33,559
10000000	7	-14,828	51,704	-14,745	41,86	-12,332	29,299
1000000	6	-13,682	47,294	-13,041	38,363	-12,332	28,299
100000	5	-11,671	42,149	-12,189	35,364	-12,332	27,299
10000	4	-11,482	40,55	-11,337	33,366	-9,8652	24,039

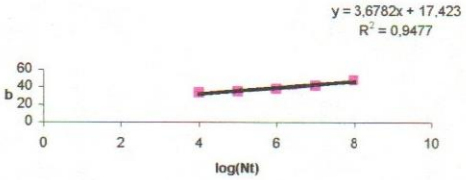
40-80



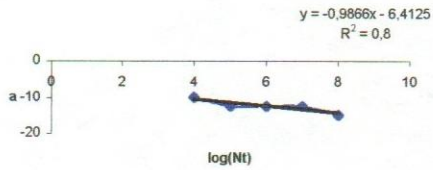


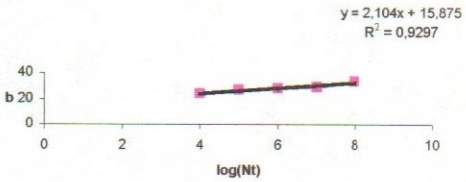
20-40



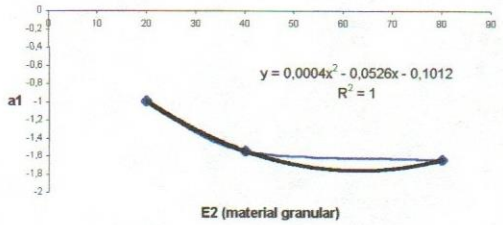


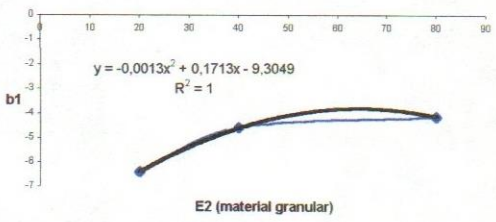
10-20

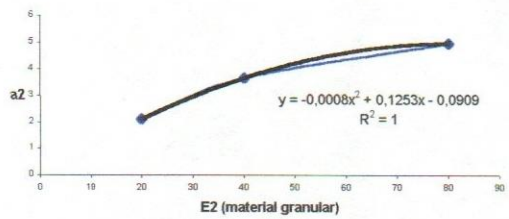


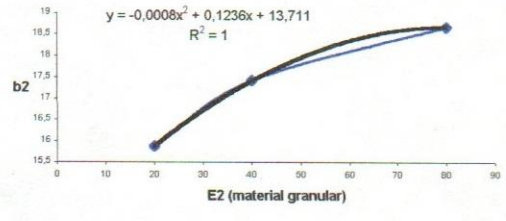


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,6351	-4,1378	4,9645	18,671
40	-1,5374	-4,5872	3,6782	17,423
20	-0,9866	-6,4125	2,104	15,875









((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	0,0004	-0,0013	-0,0008	-0,0008
.2	-0,0526	0,1713	0,1253	0,1236
.3	-0,1012	-9,3049	-0,0909	13,711

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	39	41	42	42	33	34	35	34
	20-40	27	29	30	32	22	22	23	25
	10-20	17	18	18	21	11	12	12	15
10^7	40-80	36	38	38	39	31	32	32	32
	20-40	26	27	28	30	20	21	22	24
	10-20	16	17	17	19	11	12	12	14
10^6	40-80	33	35	35	35	28	29	30	29
	20-40	24	25	26	28	19	20	20	22
	10-20	15	16	16	18	10	11	11	13
10^5	40-80	30	32	32	32	26	27	27	27
	20-40	22	23	24	25	18	19	19	20
	10-20	14	15	15	17	10	11	11	12
10^4	40-80	28	29	29	29	24	25	24	24
	20-40	21	22	22	23	17	17	17	19
	10-20	14	14	14	16	10	10	10	12

C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3.75			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
0	1	-1	-3	2	0	1	-2
-1	0	-1	0	0	0	-1	0
-1	-1	-1	1				
0	1	-1	1	1	1	0	-1
0	0	1	2	-1	-1	-1	1
-1	0	-1	1				
0	1	0	0	1	0	1	-1
0	0	0	2	0	0	0	0
-1	-1	-1	1				
0	1	0	0	0	0	0	-1
-1	-1	0	1	-1	-1	-1	1
-1	0	-1	1				
0	1	-1	-1	-2	-2	0	-2
-1	0	-1	0	-1	-1	-1	0
-1	-1	-1	1				

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	29	30	31	29	24	23	24	22
	20-40	18	18	19	20	12	12	12	13
	10-20								
10^7	40-80	27	28	28	27	22	22	22	21
	20-40	17	17	17	19	11	11	11	13
	10-20								
10^6	40-80	25	26	26	25	21	20	21	19
	20-40	16	16	16	18	11	11	11	12
	10-20								
10^5	40-80	23	24	24	23	19	19	19	18
	20-40	15	15	15	17	10	10	10	12
	10-20								
10^4	40-80	21	22	21	21	17	17	17	17
	20-40	14	14	14	16	10	10	9	11
	10-20								

C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7.5			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
0	0	0	-3	3	2	3	-1
-1	-2	-2	-1				
-1	-1	-1	1				
0	1	0	-1	3	2	2	-1
-2	-1	-1	1				
-1	0	0	1				
0	0	0	-1	2	2	2	0
-1	-1	-1	0				
-1	-1	-1	1				
-1	0	0	0	2	0	1	0
-1	-1	-1	0				
-1	0	0	1				
-2	-1	-2	-2	2	1	1	0
-2	-2	-2	0				
-1	-1	-1	1				

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	20	19	20	17	15	12	13	10
	20-40								
	10-20								
10^7	40-80	19	18	18	16	14	12	12	10
	20-40								
	10-20								
10^6	40-80	17	17	17	15	13	11	11	9
	20-40								
	10-20								
10^5	40-80	16	15	15	15	12	11	11	9
	20-40								
	10-20								
10^4	40-80	15	14	14	14			10	9
	20-40								
	10-20								

C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
2	2	3	-1	3	0	1	-3
0	0	1	1				
2	3	2	0	3	1	1	-2
0	0	0	1				
2	2	2	1	2	0	0	-2
0	0	0	1				
1	1	2	1	1	0	1	-2
0	0	0	2				
0	1	0	0			0	-1
0	0	0	2				

Valores de H2 Obtenidos de las Ecuaciones para 12ºC

Desvición entre Valores Obtenidos de las Ecuaciones y Valores de las Cartas HN de Shell

Pen50

TMAA 12°c

S1F1

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-1.2443 * \log(N_t) - 5.1838) * \ln(C.B.R_{sr}) + 3.6356 * \log(N_t) + 23.112$
40	$H_2 = (-1.0447 * \log(N_t) - 6.002) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.506 * \log(N_t) + 21.097$
20	$H_2 = (-1.232 * \log(N_t) - 4.439) * \ln(C.B.R_{sr}) + 1.93 * \log(N_t) + 15.467$
$H_2 = ((-0.0002 * E_2^{\,2} - 0.0238 * E_2 - 1.6139) * \log(N_t) + 0.0016 * E_2^{\,2} - 0.1768 * E_2 - 1.5613) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.000009 * E_2^{\,2} + 0.0294 * E_2 + 1.3465) * \log(N_t) - 0.0039 * E_2^{\,2} + 0.5126 * E_2 + 5.638$	

S2F2

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-1.4789 * \log(N_t) - 5.2218) * \ln(C.B.R_{sr}) + 4.4132 * \log(N_t) + 21.73$
40	$H_2 = (-1.1337 * \log(N_t) - 7.054) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.9366 * \log(N_t) + 21.488$
20	$H_2 = (-1.2332 * \log(N_t) - 5.4261) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.13 * \log(N_t) + 15.971$
$H_2 = ((-0.0002 * E_2^{\,2} + 0.0186 * E_2 - 1.5141) * \log(N_t) + 0.0021 * E_2^{\,2} - 0.2086 * E_2 - 2.1022) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.00006 * E_2^{\,2} + 0.0437 * E_2 + 1.2779) * \log(N_t) - 0.0045 * E_2^{\,2} + 0.5457 * E_2 + 6.0061$	

Pen100

S1F1

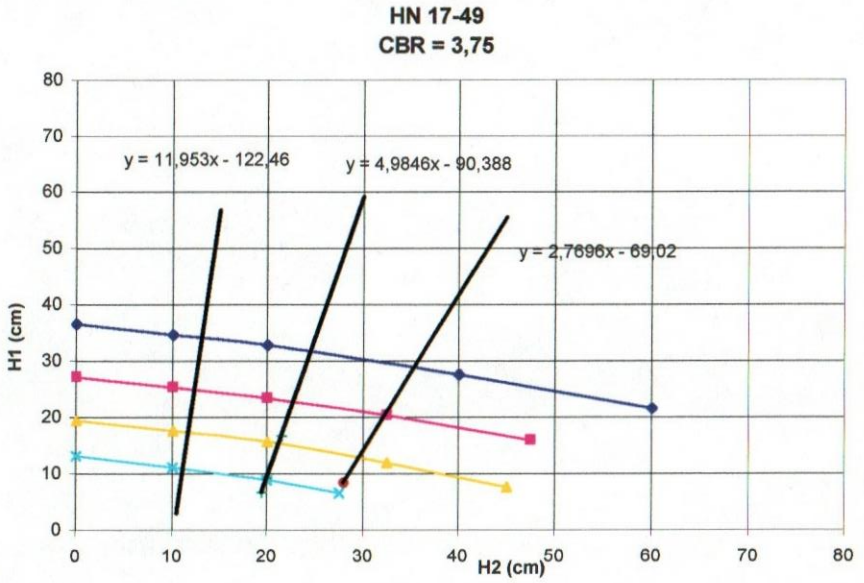
C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-1.3853 * \log(N_t) - 4.751) * \ln(C.B.R_{sr}) + 3.9916 * \log(N_t) + 22.092$
40	$H_2 = (-1.2372 * \log(N_t) - 5.662) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.8633 * \log(N_t) + 20.498$
20	$H_2 = (-1.2332 * \log(N_t) - 4.439) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.13 * \log(N_t) + 14.667$
$H_2 = ((-0.00006 * E_2^{\,2} + 0.0033 * E_2 - 1.2759) * \log(N_t) + 0.0014 * E_2^{\,2} - 0.1451 * E_2 - 2.0966) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.0001 * E_2^{\,2} + 0.0451 * E_2 + 1.2839) * \log(N_t) - 0.0042 * E_2^{\,2} + 0.5433 * E_2 + 4.6468$	

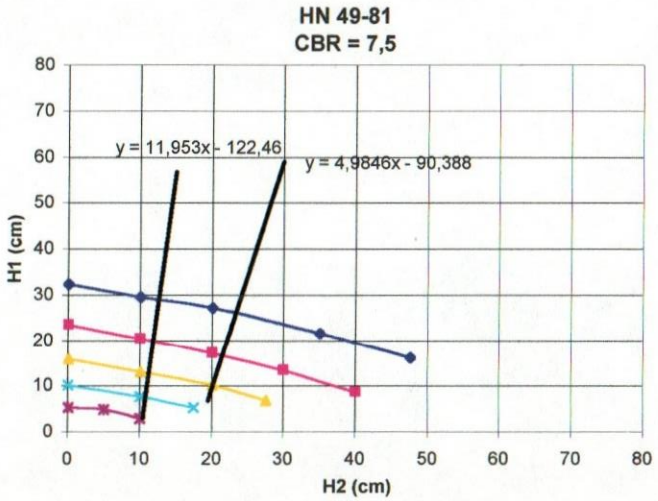
S2F2

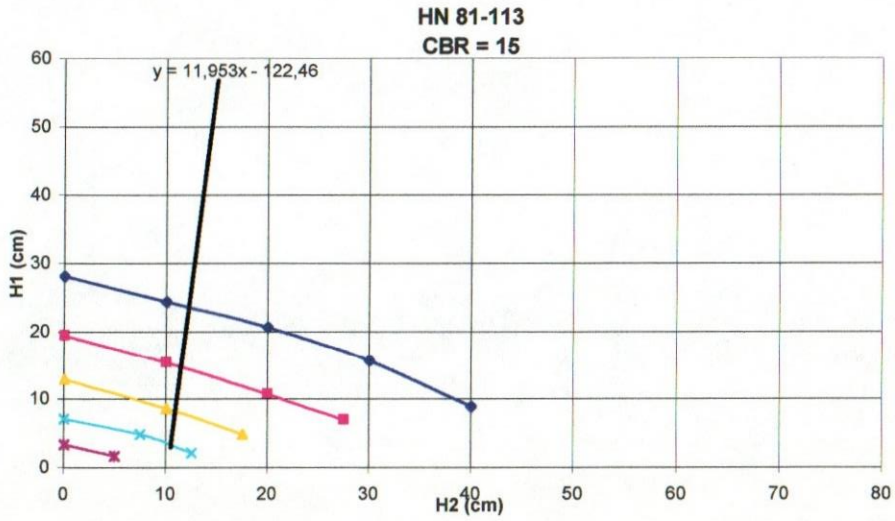
C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-1.6351 * \log(N_t) - 4.1378) * \ln(C.B.R_{sr}) + 4.9645 * \log(N_t) + 18.671$
40	$H_2 = (-1.5374 * \log(N_t) - 4.5872) * \ln(C.B.R_{sr}) + 3.6782 * \log(N_t) + 17.423$
20	$H_2 = (-0.9866 * \log(N_t) - 6.4125) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.104 * \log(N_t) + 15.875$
$H_2 = ((0.0004 * E_2^{\,2} - 0.0526 * E_2 - 0.1012) * \log(N_t) - 0.0013 * E_2^{\,2} + 0.1713 * E_2 - 9.3049) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.0008 * E_2^{\,2} + 0.1253 * E_2 - 0.0909) * \log(N_t) - 0.0008 * E_2^{\,2} + 0.1236 * E_2 + 14.8721$	

T.M.A.A. 20ºC

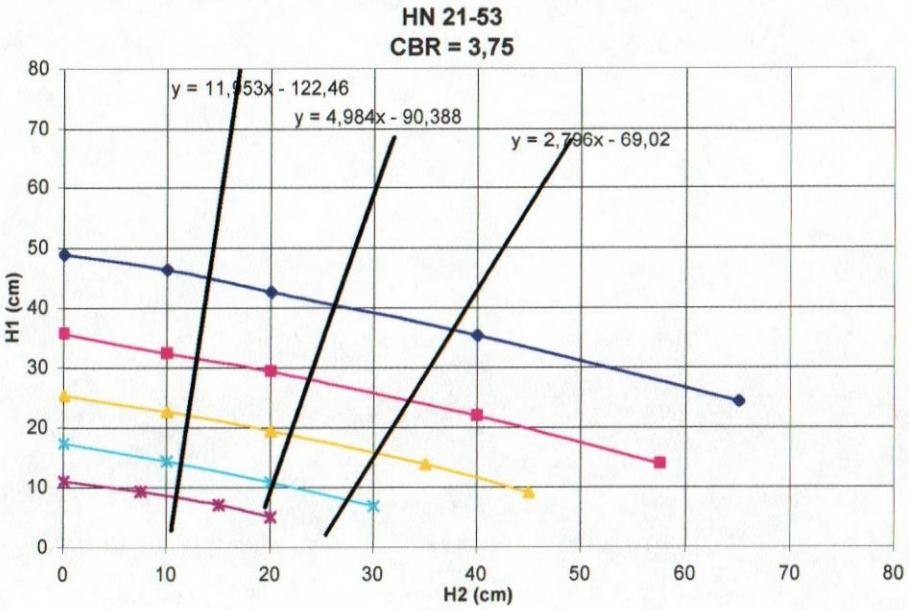
Nt	C.B.R 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	36,75	0	32,5	0	28,25	0
	34,75	10	29,75	10	24,5	10
	33	20	27,25	20	20,75	20
	27,75	40	21,75	35	15,75	30
	21,75	60	16,25	47,5	9	40
10^7	27,25	0	23,5	0	19,5	0
	25,5	10	20,5	10	15,5	10
	23,5	20	17,25	20	10,75	20
	20,5	32,5	13,5	30	7	27,5
	16	47,5	8,75	40		
10^6	19,5	0	16	0	13	0
	17,75	10	13,25	10	8,75	10
	15,75	20	10,25	20	5	17,5
	12	32,5	7	27,5		
	7,75	45				
10^5	13,25	0	10,25	0	7,25	0
	11,25	10	7,75	10	5	7,5
	9	20	5,5	17,5	2,25	12,5
	6,75	27,5				
10^4	9	0	6	0	4	0
	8	8	5	5	2	5
	6	15	3	10		
	4	20				

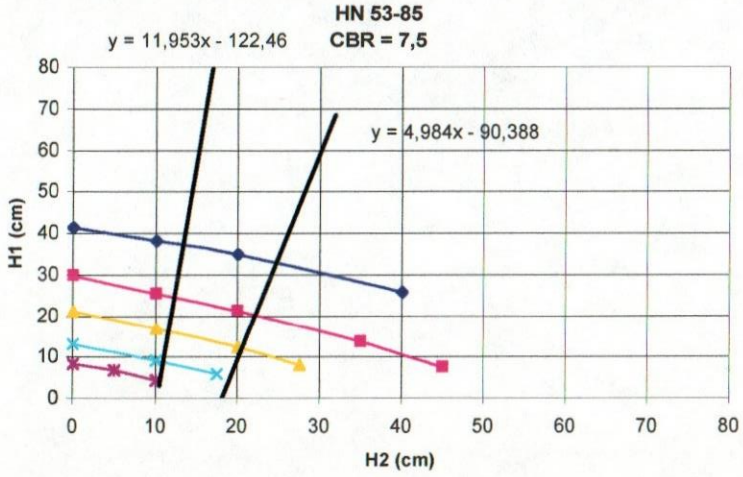


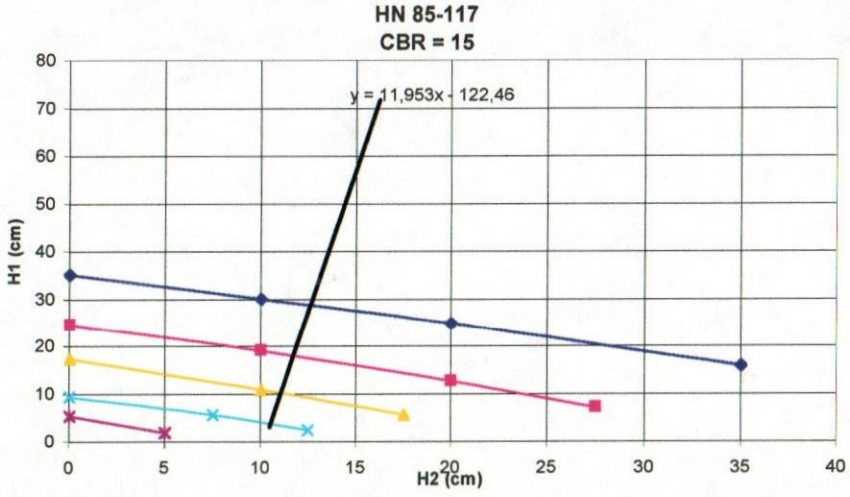




Nt	C.B.R 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	49	0	41,5	0	35,25	0
	46,5	10	38,25	10	30,25	10
	42,75	20	35	20	25	20
	35,5	40	26	40	16	35
	24,5	65				
10^7	35,75	0	30	0	24,75	0
	32,5	10	25,5	10	19,25	10
	29,5	20	21,25	20	12,75	20
	22	40	13,75	35	7,25	27,5
	14	57,5	7,5	45		
10^6	25,5	0	21,25	0	17,5	0
	22,75	10	17	10	11	10
	19,5	20	12,5	20	5,75	17,5
	14	35	8,25	27,5		
	9,25	45				
10^5	17,5	0	13,25	0	9,5	0
	14,5	10	9,25	10	5,75	7,5
	11	20	6	17,5	2,5	12,5
	7	30				
10^4	11	0	9	0	6	0
	10	8	7	5	2	5
	7	15	5	10		
	5	20				

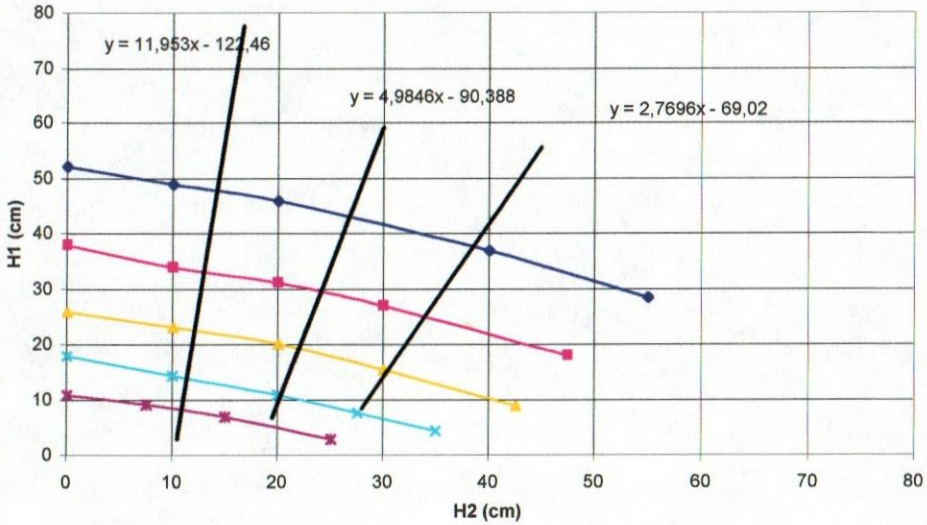




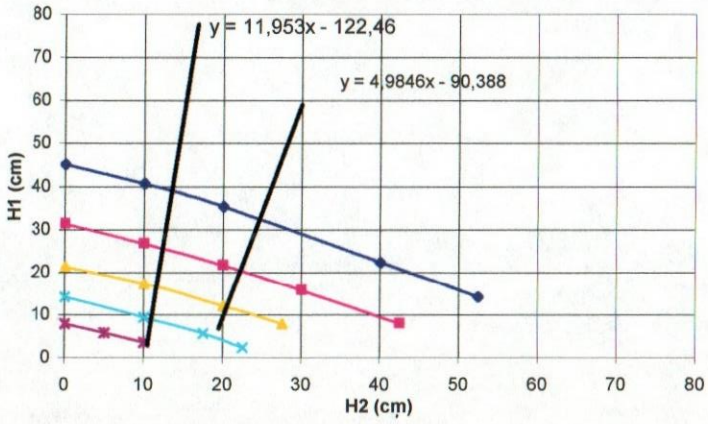


	C.B.R 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^6	52	0	45	0	39	0
	49	10	41	10	32	10
	46	20	36	20	25	20
	37	40	23	40	14	35
	29	55	14	53	5	45
10^5	38	0	32	0	26	0
	34	10	27	10	20	10
	31	20	22	20	13	20
	27	30	16	30	7	28
	18	48	8	43		
10^5	26	0	22	0	18	0
	23	10	18	10	11	10
	20	20	12	20	5	18
	16	30	8	28		
	9	43				
10^5	18	0	14	0	11	0
	15	10	10	10	6	8
	11	20	6	18	3	13
	8	28	3	23		
	5	35				
10^4	11	0	8	0	5	0
	9	8	6	5	2	5
	7	15	4	10		
	3	25				

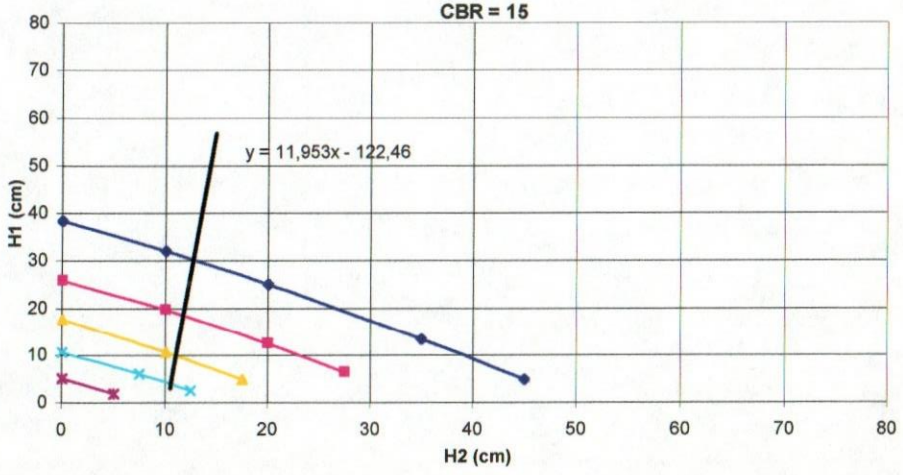
HN 20-52
CBR = 3,75



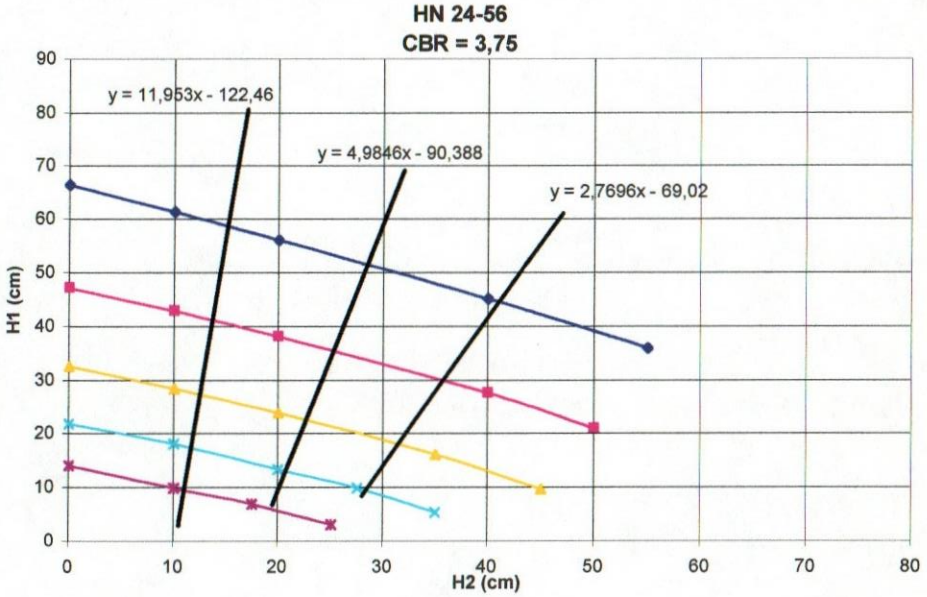
HN 52-84
CBR = 7,5

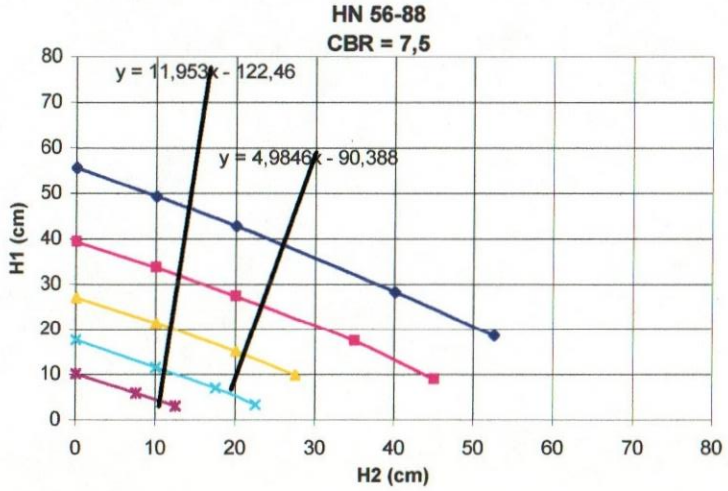


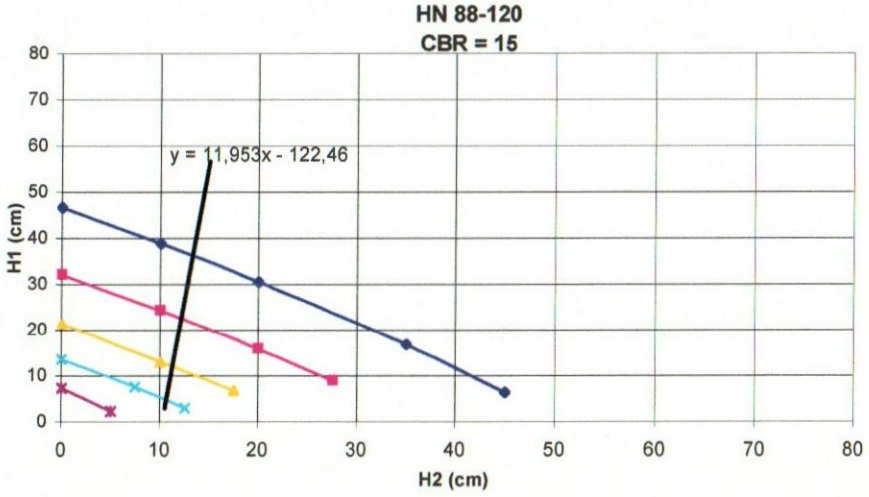
HN 84-116
CBR = 15



Nt	C.B.R. 3,75		C.B.R. 7,5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	67	0	56	0	47	0
	62	10	50	10	39	10
	56	20	43	20	31	20
	45	40	29	40	17	35
	36	55	19	53	7	45
10^7	47	0	40	0	32	0
	43	10	34	10	25	10
	38	20	28	20	16	20
	28	40	18	35	9	28
	21	50	9	45		
10^6	33	0	27	0	22	0
	29	10	22	10	13	10
	24	20	15	20	7	18
	16	35	10	28		
	10	45				
10^5	22	0	18	0	14	0
	18	10	12	10	8	8
	14	20	7	18	3	13
	10	28	4	23		
	6	35				
10^4	14	0	10	0	8	0
	10	10	6	8	3	5
	7	18	3	13		
	3	25				







Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	42	46	47	50	35	38	39	41
	20-40	30	33	34	36	25	26	27	29
	10-20	19	21	21	22	13	14	14	15
10^7	40-80	38	40	41	43	32	34	34	36
	20-40	28	30	30	32	23	24	24	23
	10-20	18	19	19	20	12	13	13	13
10^6	40-80	35	36	36	37	30	31	30	31
	20-40	25	27	27	28	21	24	22	23
	10-20	17	18	18	18	12	13	12	13
10^5	40-80	32	32	33	33	27	28	28	28
	20-40	24	24	25	25	20	20	20	21
	10-20	16	17	17	17	11	11	11	12
10^4	40-80	30	30	30	30	26	26	26	26
	20-40	23	23	23	23	19	19	19	19
	10-20	15	16	16	16	11	11	11	11
Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	28	30	30	32	23	25	25	26
	20-40	19	20	20	21	13	13	13	14
	10-20								
10^7	40-80	26	27	27	29	21	22	22	23
	20-40	17	18	18	19	12	12	12	13
	10-20								
10^6	40-80	24	24	25	25	20	21	21	21
	20-40	16	17	17	17	11	12	12	12
	10-20								
10^5	40-80	23	23	22	23	19	19	19	19
	20-40	15	16	15	15	11	11	11	11
	10-20								
10^4	40-80	21	21	21	21	19	19	19	19
	20-40	14	15	14	15	11	11	11	11
	10-20								
Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	17	18	18	19	12	13	13	13
	20-40								
	10-20								
10^7	40-80	16	17	17	17	11	12	12	12
	20-40								
	10-20								
10^6	40-80	16	16	15	16	11	11	11	11
	20-40								
	10-20								
10^5	40-80	15	15	14	15	11	11	11	11
	20-40								
	10-20								
10^4	40-80	13	13	13	14	11	11	11	11
	20-40								
	10-20								

Valores H2 Obtenidos de las Cartas HN de Shell para 20ºC

TMAA=20°C S 1 Pent 50 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
42	30	19	2,5
35	25	13	3,75
28	19		5
23	13		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA=20°C S 1 Pent 50 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
38	28	18	2,5
32	23	12	3,75
26	17		5
21	12		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA=20°C S 1 Pent 50 Nt = 10^6

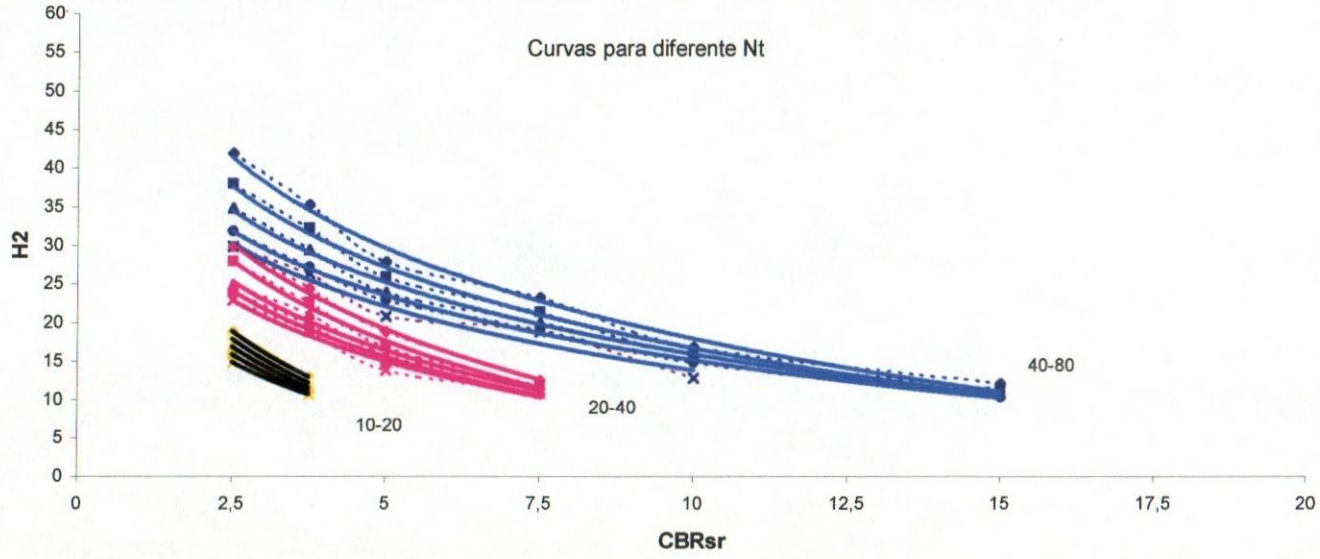
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
35	25	17	2,5
30	21	12	3,75
24	16		5
20	11		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA=20°C S 1 Pent 50 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
32	24	16	2,5
27	20	11	3,75
23	15		5
19	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=20°C S 1 Pent 50 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
30	23	15	2,5
26	19	11	3,75
21	14		5
19	11		7,5
13			10
11			15
			20



TMAA=20°C S 1 Pent 100 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
46	33	21	2,5
38	26	14	3,75
30	20		5
25	13		7,5
18			10
13			15
			20

TMAA=20°C S 1 Pent 100 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
40	30	19	2,5
34	24	13	3,75
27	18		5
22	12		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA=20°C S 1 Pent 100 Nt = 10^6

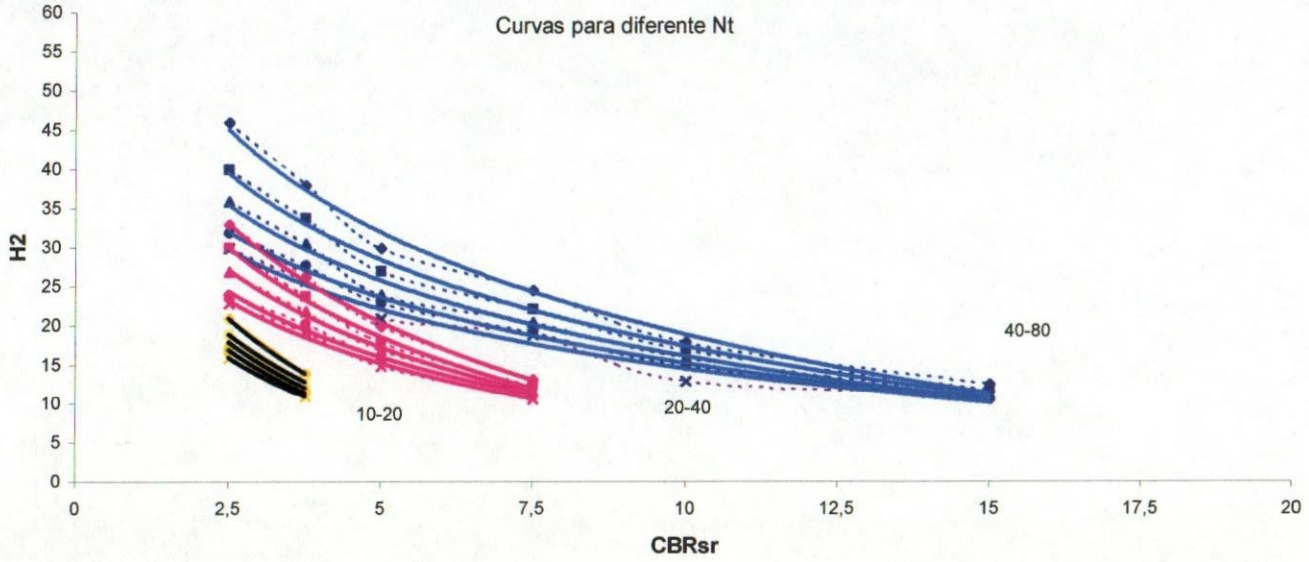
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
36	27	18	2,5
31	22	12	3,75
24	17		5
21	12		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA=20°C S 1 Pent 100 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
32	24	17	2,5
28	20	11	3,75
23	16		5
19	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=20°C S 1 Pent 100 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
30	23	16	2,5
26	19	11	3,75
21	15		5
19	11		7,5
13			10
11			15
			20



TMAA=20°C S 2 Pent 50 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
47	34	21	2,5
39	27	14	3,75
30	20		5
25	13		7,5
18			10
13			15
			20

TMAA=20°C S 2 Pent 50 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
41	30	19	2,5
34	24	13	3,75
27	18		5
22	12		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA=20°C S 2 Pent 50 Nt = 10^6

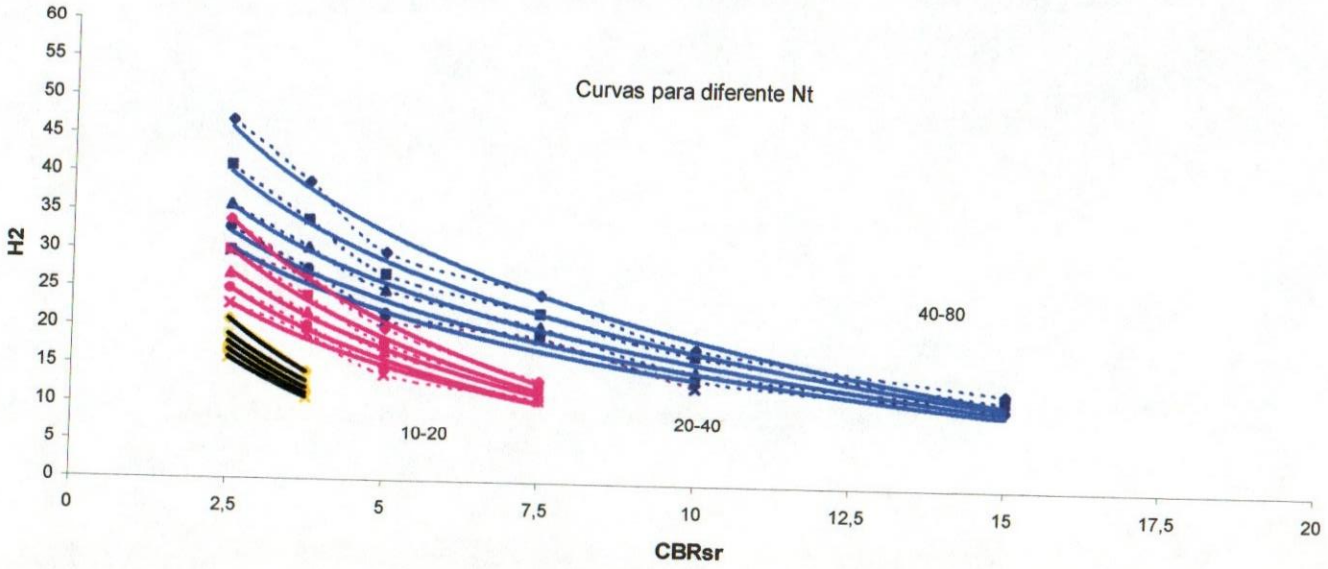
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
36	27	18	2,5
30	22	12	3,75
25	17		5
21	12		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=20°C S 2 Pent 50 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
33	25	17	2,5
28	20	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
14			10
11			15
			20

TMAA=20°C S 2 Pent 50 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
30	23	16	2,5
26	19	11	3,75
21	14		5
19	11		7,5
13			10
11			15
			20



TMAA=20°C S 2 Pent 100 $Nt = 10^8$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
50	36	22	2,5
41	29	15	3,75
32	21		5
26	14		7,5
19			10
13			15
			20

TMAA=20°C S 2 F 2 Pent 100 $Nt = 10^7$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
43	32	20	2,5
36	23	13	3,75
29	19		5
23	13		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA=20°C S 2 Pent 100 $Nt = 10^6$

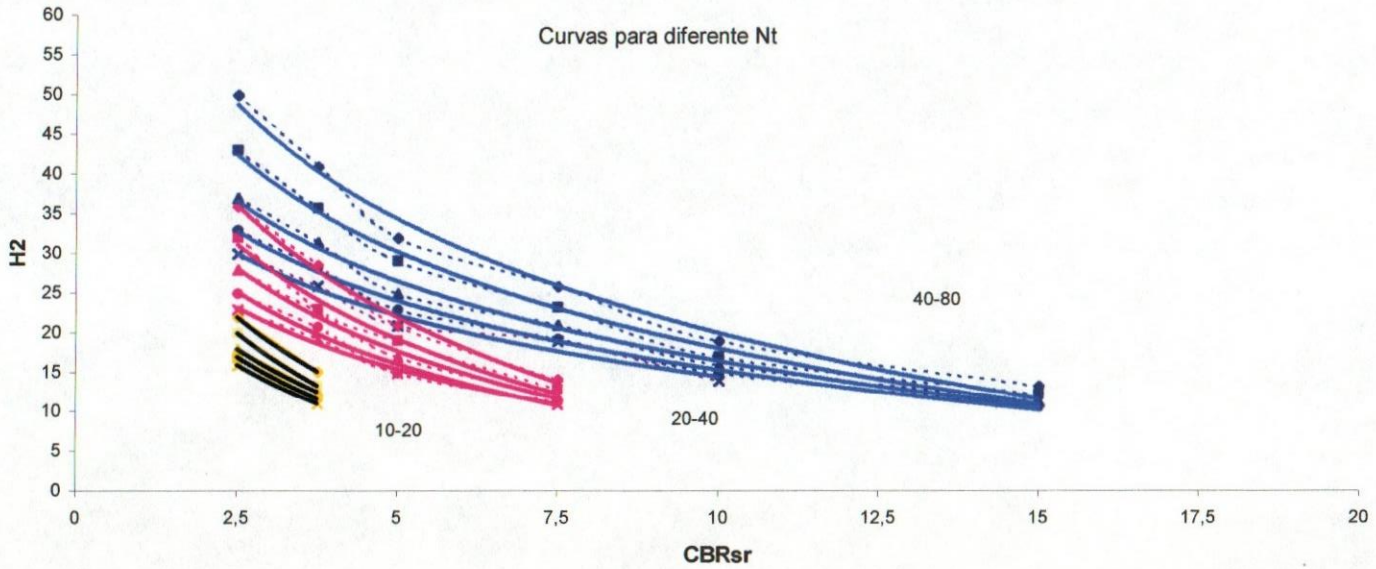
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
37	28	18	2,5
31	23	13	3,75
25	17		5
21	12		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA=20°C S 2 Pent 100 $Nt = 10^5$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
33	25	17	2,5
28	21	12	3,75
23	15		5
19	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=20°C S 2 Pent 100 $Nt = 10^4$

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
30	23	16	2,5
26	19	11	3,75
21	15		5
19	11		7,5
14			10
11			15
			20



Nt	Pen 50-S1 (40-80)	R^2	Pen 100-S1 (40-80)	R^2
10^8	-16,887Ln(x) + 56,938	0,990	-18,828Ln(x) + 62,331	0,990
10^7	-15,071Ln(x) + 51,529	0,993	-15,9Ln(x) + 54,094	0,993
10^6	-13,38Ln(x) + 46,863	0,994	-13,905Ln(x) + 48,236	0,989
10^5	-12,031Ln(x) + 42,976	0,998	-12,103Ln(x) + 43,189	0,996
10^4	-11,842Ln(x) + 41,232	0,966	-10,947Ln(x) + 39,817	0,975
	(20-40)		(20-40)	
10^8	-15,969Ln(x) + 44,956	0,996	-18,207Ln(x) + 49,831	0,997
10^7	-14,974Ln(x) + 41,859	0,993	-16,35Ln(x) + 44,988	0,996
10^6	-12,804Ln(x) + 37,15	0,987	-14,203Ln(x) + 40,202	0,997
10^5	-12,281Ln(x) + 35,448	0,989	-12,05Ln(x) + 35,485	0,991
10^4	-11,34Ln(x) + 33,372	0,978	-11,5Ln(x) + 33,821	0,993
	(10-20)		(10-20)	
10^8	-14,517Ln(x) + 32,302	1,000	-17,253Ln(x) + 36,809	1,000
10^7	-13,944Ln(x) + 30,777	1,000	-15,027Ln(x) + 32,769	1,000
10^6	-13,05Ln(x) + 28,958	1,000	-14,553Ln(x) + 31,334	1,000
10^5	-11,909Ln(x) + 26,912	1,000	-13,763Ln(x) + 29,611	1,000
10^4	-10,321Ln(x) + 24,457	1,000	-12,431Ln(x) + 27,39	1,000

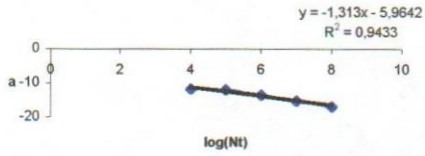
	Pen 50-S2 (40-80)	R^2	Pen 100-S2 (40-80)	R^2
10^8	-19,384Ln(x) + 63,703	0,986	-20,708Ln(x) + 67,73	0,988
10^7	-16,347Ln(x) + 55,118	0,991	-17,525Ln(x) + 58,451	0,993
10^6	-14,217Ln(x) + 48,783	0,993	-14,49Ln(x) + 49,881	0,992
10^5	-12,632Ln(x) + 43,951	0,986	-12,587Ln(x) + 44,357	0,994
10^4	-11,842Ln(x) + 41,232	0,966	-11,149Ln(x) + 40,195	0,976
	(20-40)		(20-40)	
10^8	-18,982Ln(x) + 51,39	0,996	-20,275Ln(x) + 54,634	0,994
10^7	-16,347Ln(x) + 45,062	0,994	-17,127Ln(x) + 46,827	0,986
10^6	-14,199Ln(x) + 40,216	0,996	-14,941Ln(x) + 41,807	0,993
10^5	-13,099Ln(x) + 37,023	0,988	-13,067Ln(x) + 37,146	0,980
10^4	-11,387Ln(x) + 33,493	0,975	-11,188Ln(x) + 33,481	0,992
	(10-20)		(10-20)	
10^8	-16,637Ln(x) + 36,244	1,000	-16,841Ln(x) + 37,432	1,000
10^7	-14,66Ln(x) + 32,433	1,000	-16,377Ln(x) + 35,006	1,000
10^6	-14,428Ln(x) + 31,22	1,000	-13,443Ln(x) + 30,318	1,000
10^5	-13,748Ln(x) + 29,597	1,000	-13,052Ln(x) + 28,96	1,000
10^4	-12,481Ln(x) + 27,437	1,000	-12,194Ln(x) + 27,173	1,000

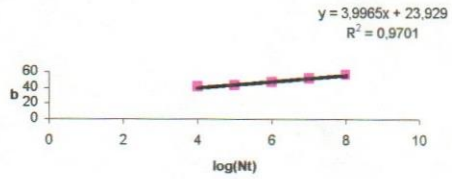
Donde $F(X)=H_2$

X=C.B.R. sr

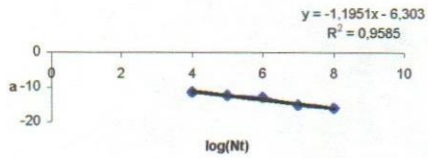
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-16,887	56,938	-15,969	44,956	-14,517	32,302
10000000	7	-15,071	51,529	-14,974	41,859	-13,944	30,777
1000000	6	-13,380	46,863	-12,804	37,150	-13,050	28,958
100000	5	-12,031	42,976	-12,281	35,448	-11,909	26,912
10000	4	-11,842	41,232	-11,340	33,372	-10,321	24,457

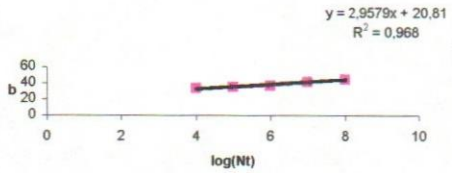
40-80



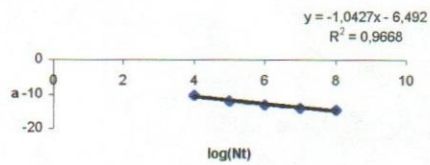


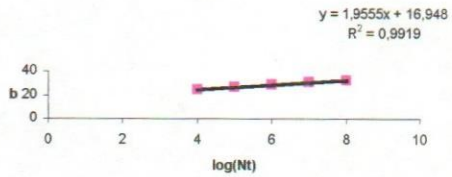
20-40



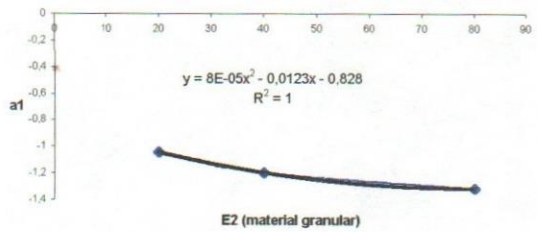


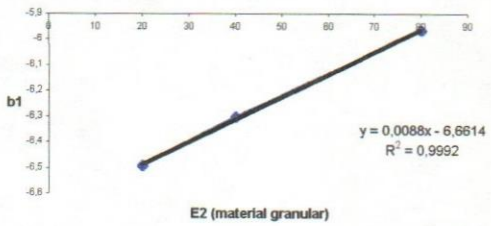
10-20

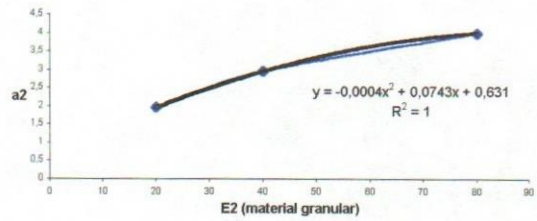


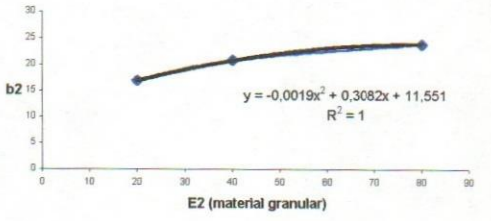


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,313	-5,9642	3,9965	23,929
40	-1,1951	-6,303	2,9579	20,81
20	-1,0427	-6,492	1,9555	16,948







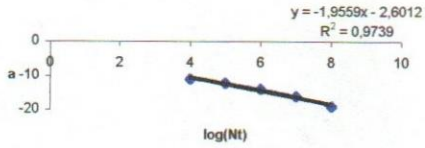


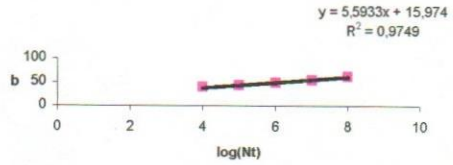
((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	0,00008	0	-0,0004	-0,002
.2	-0,0123	0,0088	0,0743	0,3082
.3	-0,828	-6,6614	0,631	11,551

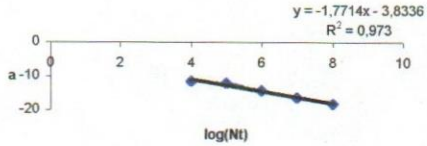
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-18,828	62,331	-18,207	49,831	-17,253	36,809
10000000	7	-15,9	54,094	-16,35	44,988	-15,027	32,769
1000000	6	-13,905	48,236	-14,203	40,202	-14,553	31,334
100000	5	-12,103	43,189	-12,05	35,485	-13,763	29,611
10000	4	-10,947	39,817	-11,5	33,821	-12,431	27,39

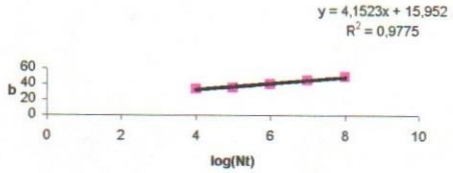
40-80



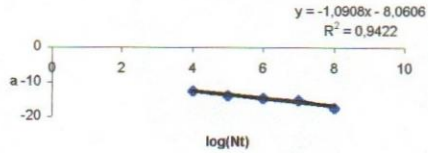


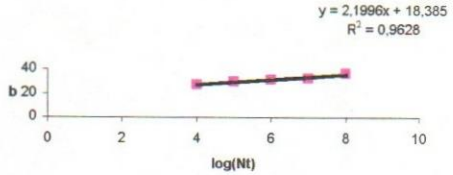
20-40



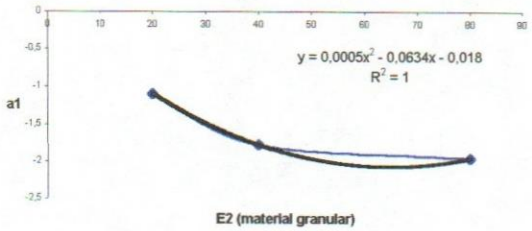


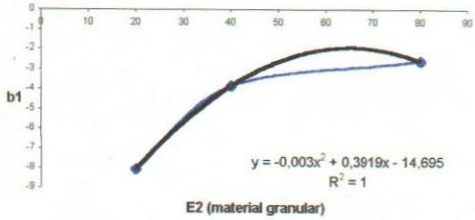
10-20

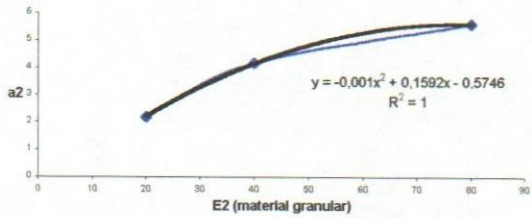


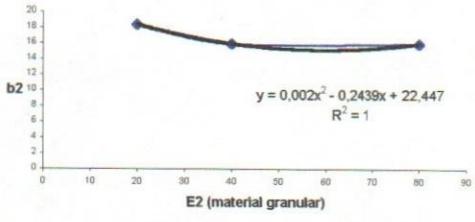


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,9559	-2,6012	5,5933	15,974
40	-1,7714	-3,8336	4,1523	15,952
20	-1,0908	-8,0606	2,1996	18,385







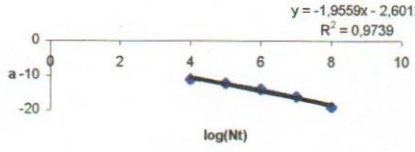


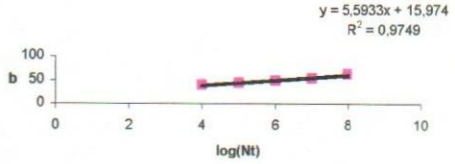
((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	0,0005	-0,003	-0,001	0,002
.2	-0,0634	0,3919	0,1592	-0,2439
.3	-0,018	-14,695	-0,5746	22,447

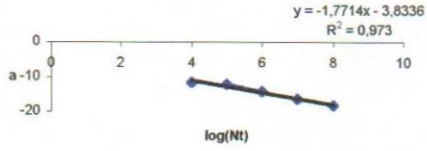
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-18,828	62,331	-18,207	49,831	-17,253	36,809
10000000	7	-15,900	54,094	-16,35	44,988	-15,027	32,769
1000000	6	-13,905	48,236	-14,203	40,202	-14,553	31,334
100000	5	-12,103	43,189	-12,05	35,485	-13,763	29,611
10000	4	-10,947	39,817	-11,5	33,821	-12,431	27,39

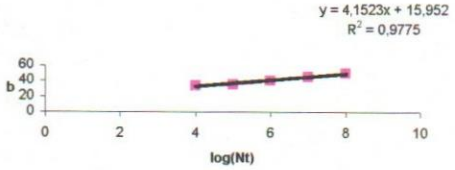
40-80



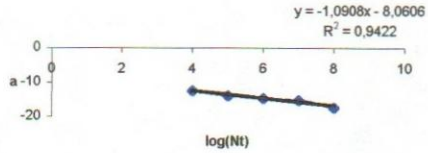


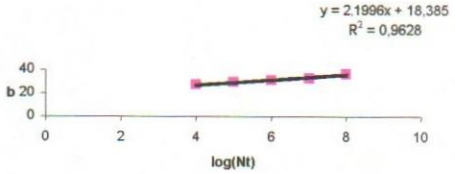
20-40



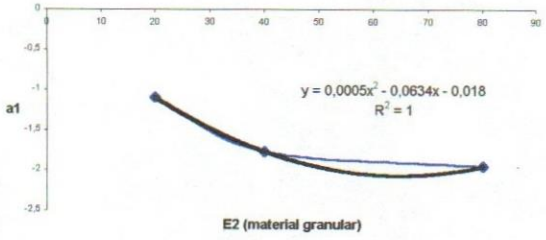


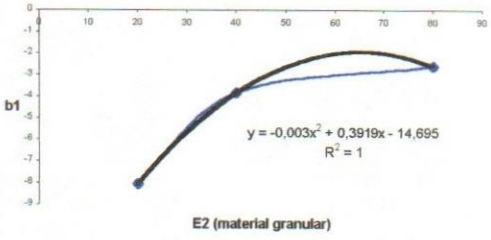
10-20

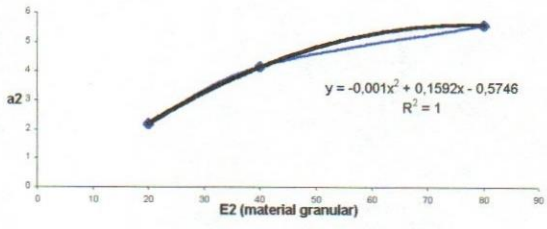


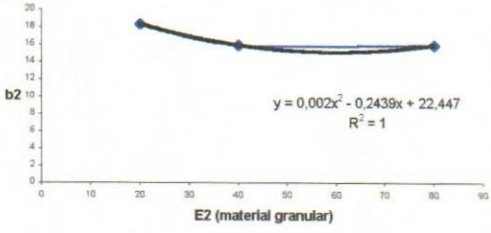


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,9559	-2,6012	5,5933	15,974
40	-1,7714	-3,8336	4,1523	15,952
20	-1,0908	-8,0606	2,1996	18,385









((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

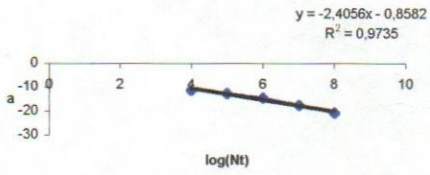
	a1	b1	a2	b2
.1	0,0005	-0,003	-0,001	0,002
.2	-0,0634	0,3919	0,1592	-0,2439
.3	-0,018	-14,695	-0,5746	22,447

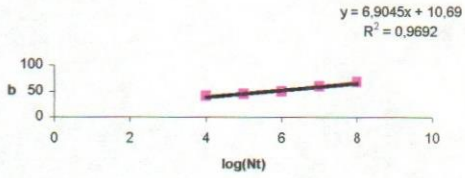
Nt	Log(Nt)	40-80	
		a	b
100000000	8	-20,708	67,730
10000000	7	-17,525	58,644
1000000	6	-14,49	49,504
100000	5	-12,587	44,357
10000	4	-11,149	40,351

20-40	
a	b
-20,275	54,634
-17,127	47,053
-14,941	41,807
-13,067	37,146
-11,188	33,481

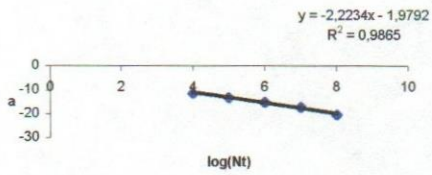
10-20	
a	b
-16,841	37,432
-16,377	35,006
-13,443	30,318
-13,052	28,96
-12,194	27,173

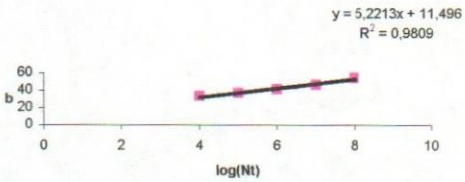
40-80



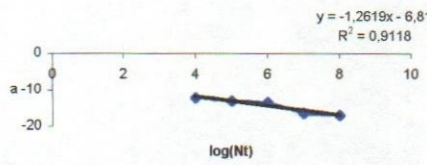


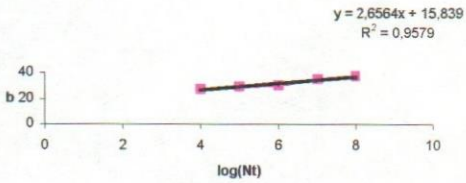
20-40



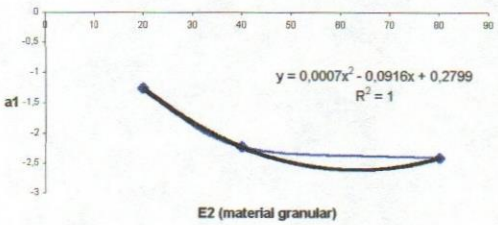


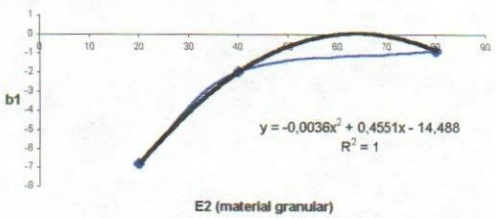
10-20

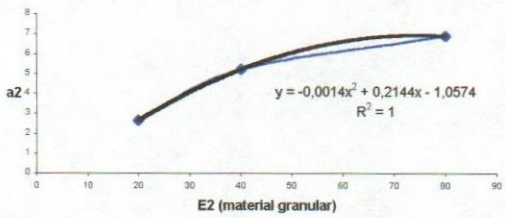


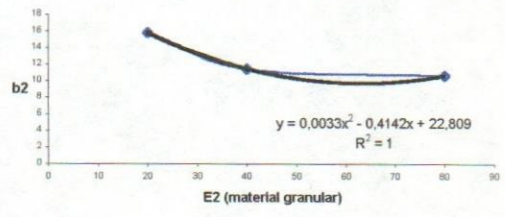


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-2,4056	-0,8582	6,9045	10,690
40	-2,2234	-1,9792	5,2213	11,496
20	-1,2619	-6,81	2,6564	15,839









((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	0,0007	-0,0036	-0,0014	0,0033
.2	-0,0916	0,4551	0,2144	-0,4142
.3	0,2799	-14,488	-1,0574	22,809

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	41	46	45	49	35	39	38	40
	20-40	30	33	32	36	24	26	25	28
	10-20	19	21	20	22	13	14	13	15
10^7	40-80	38	41	40	44	32	35	34	36
	20-40	28	30	29	33	22	24	23	25
	10-20	18	19	18	21	12	13	12	14
10^6	40-80	36	37	36	39	30	31	30	32
	20-40	26	27	26	29	21	21	20	23
	10-20	17	17	17	19	12	11	11	13
10^5	40-80	33	32	31	34	28	27	27	28
	20-40	24	24	23	26	19	19	18	21
	10-20	16	16	15	17	11	10	9	12
10^4	40-80	30	28	27	29	25	23	23	25
	20-40	23	21	20	23	18	16	16	18
	10-20	15	14	13	16	11	9	8	11

C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3.75			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
-1	0	-2	-1	0	1	-1	-1
0	0	-2	0	-1	0	-2	-1
0	0	-1	0	0	0	-1	0
0	1	-1	1	0	1	0	0
0	0	-1	1	-1	0	-1	2
0	0	-1	1	0	0	-1	1
1	1	0	2	0	0	0	1
1	0	-1	1	0	-3	-2	0
0	-1	-1	1	0	-2	-1	0
1	0	-2	1	1	-1	-1	0
0	0	-2	1	-1	-1	-2	0
0	-1	-2	0	0	-1	-2	0
0	-2	-3	-1	-1	-3	-3	-1
0	-2	-3	0	-1	-3	-3	-1
0	-2	-3	0	0	-2	-3	0

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	30	33	33	33	23	26	26	25
	20-40	19	21	20	22	13	14	13	14
	10-20								
10^7	40-80	28	30	30	30	22	24	23	23
	20-40	18	19	18	20	12	12	12	13
	10-20								
10^6	40-80	26	27	26	27	20	21	21	21
	20-40	17	17	16	18	11	11	11	12
	10-20								
10^5	40-80	24	24	23	24	19	19	18	19
	20-40	16	15	14	17	11	10	9	11
	10-20								
10^4	40-80	22	21	20	21	18	16	16	17
	20-40	15	13	13	15	10	9	8	11
	10-20								

C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7.5			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
2	3	3	1	0	1	1	-1
0	1	0	1	0	1	0	0
2	3	3	1	1	2	1	0
1	1	0	1	0	0	0	0
2	3	1	2	0	0	0	0
1	0	-1	1	0	-1	-1	0
1	1	1	1	0	0	-1	0
1	-1	-1	2	0	-1	-2	0
1	0	-1	0	-1	-3	-3	-2
1	-2	-1	0	-1	-2	-3	0

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	19	21	21	18	12	14	13	10
	20-40								
	10-20								
10^7	40-80	17	19	19	17	11	13	12	9
	20-40								
	10-20								
10^6	40-80	16	17	17	16	11	12	11	9
	20-40								
	10-20								
10^5	40-80	15	15	15	15	10	11	10	9
	20-40								
	10-20								
10^4	40-80	14	14	13	13	10	9	9	9
	20-40								
	10-20								

C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
2	3	3	-1	0	1	0	-3
1	2	2	0	0	1	0	-3
0	1	2	0	0	1	0	-2
0	0	1	0	-1	0	-1	-2
1	1	0	-1	-1	-2	-2	-2

Valores de H2 Obtenidos de las Ecuaciones para 20ºC

Desvición entre Valores Obtenidos de las Ecuaciones y Valores de las Cartas HN de Shell

Pen50

S1F1

TMAA 20°C

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-1.313 * \log(N_t) - 5.9642) * \ln(C.B.R_{sr}) + 3.9965 * \log(N_t) + 23.929$
40	$H_2 = (-1.1951 * \log(N_t) - 6.303) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.9579 * \log(N_t) + 20.81$
20	$H_2 = (-1.0427 * \log(N_t) - 6.492) * \ln(C.B.R_{sr}) + 1.9555 * \log(N_t) + 16.948$
$H_2 = ((-0.0043 * E_2 - 0.9838) * \log(N_t) + 0.0088 * E_2 - 6.6614) * \ln(C.B.R_{sr}) + (+0.0329 * E_2 + 1.4362) * \log(N_t) - 0.0019 * E_2^{\,2} + 0.3082 * E_2 + 11.551$	

S2F2

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-1.9559 * \log(N_t) - 2.6012) * \ln(C.B.R_{sr}) + 5.5933 * \log(N_t) + 15.974$
40	$H_2 = (-1.7714 * \log(N_t) - 3.8336) * \ln(C.B.R_{sr}) + 4.1523 * \log(N_t) + 15.952$
20	$H_2 = (-1.0908 * \log(N_t) - 8.0606) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.1996 * \log(N_t) + 18.385$
$H_2 = ((0.0005 * E_2^{\,2} - 0.0634 * E_2 - 0.018) * \log(N_t) - 0.003 * E_2^{\,2} + 0.3919 * E_2 - 14.695) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.001 * E_2^{\,2} + 0.1592 * E_2 - 0.05746) * \log(N_t) + 0.002 * E_2^{\,2} - 0.2439 * E_2 + 17.714$	

Pen100

S1F1

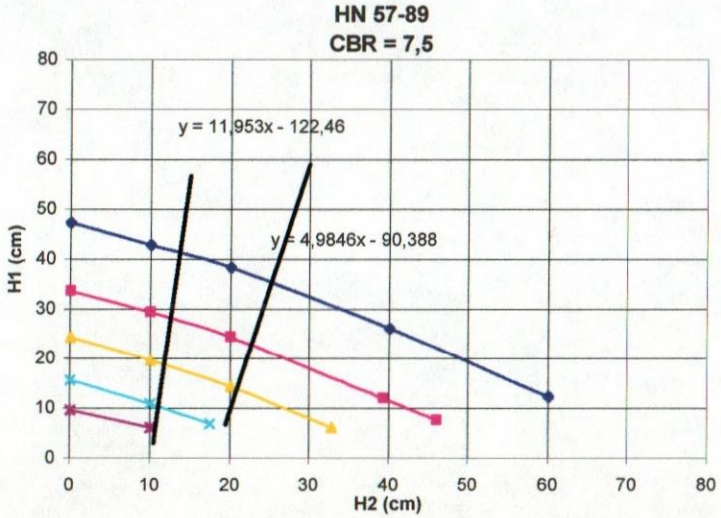
C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-1.9559 * \log(N_t) - 2.6012) * \ln(C.B.R_{sr}) + 5.5933 * \log(N_t) + 15.974$
40	$H_2 = (-1.7714 * \log(N_t) - 3.8336) * \ln(C.B.R_{sr}) + 4.1523 * \log(N_t) + 15.952$
20	$H_2 = (-1.0908 * \log(N_t) - 8.0606) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.1996 * \log(N_t) + 18.385$
$H_2 = ((0.0005 * E_2^{\,2} - 0.0634 * E_2 - 0.018) * \log(N_t) - 0.003 * E_2^{\,2} + 0.3919 * E_2 - 14.695) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.001 * E_2^{\,2} + 0.1592 * E_2 - 0.05746) * \log(N_t) + 0.002 * E_2^{\,2} - 0.2439 * E_2 + 18.364$	

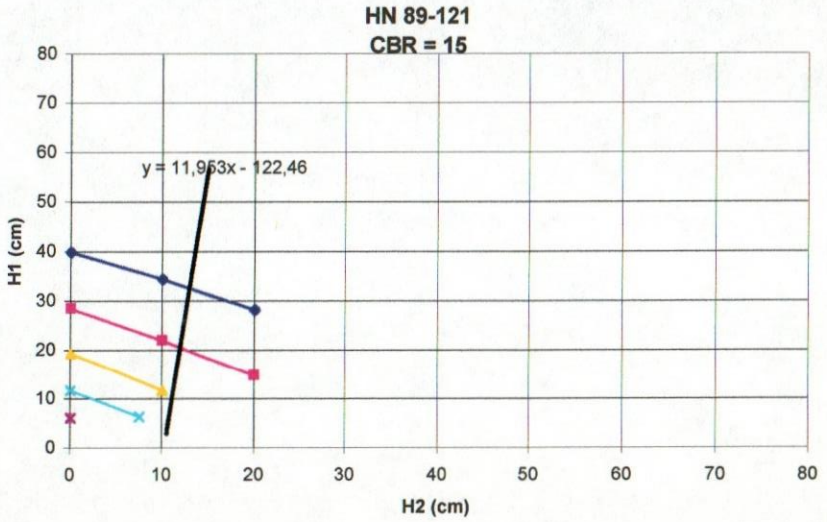
S2F2

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-2.4056 * \log(N_t) - 0.8582) * \ln(C.B.R_{sr}) + 6.9045 * \log(N_t) + 10.69$
40	$H_2 = (-2.2234 * \log(N_t) - 1.9792) * \ln(C.B.R_{sr}) + 5.2213 * \log(N_t) + 11.496$
20	$H_2 = (-1.2619 * \log(N_t) - 6.81) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.6564 * \log(N_t) + 15.839$
$H_2 = ((0.0007 * E_2^{\,2} - 0.0916 * E_2 + 0.2799) * \log(N_t) - 0.0036 * E_2^{\,2} + 0.4551 * E_2 - 14.488) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.0014 * E_2^{\,2} + 0.2144 * E_2 - 1.0574) * \log(N_t) + 0.0033 * E_2^{\,2} - 0.4142 * E_2 + 22.909$	

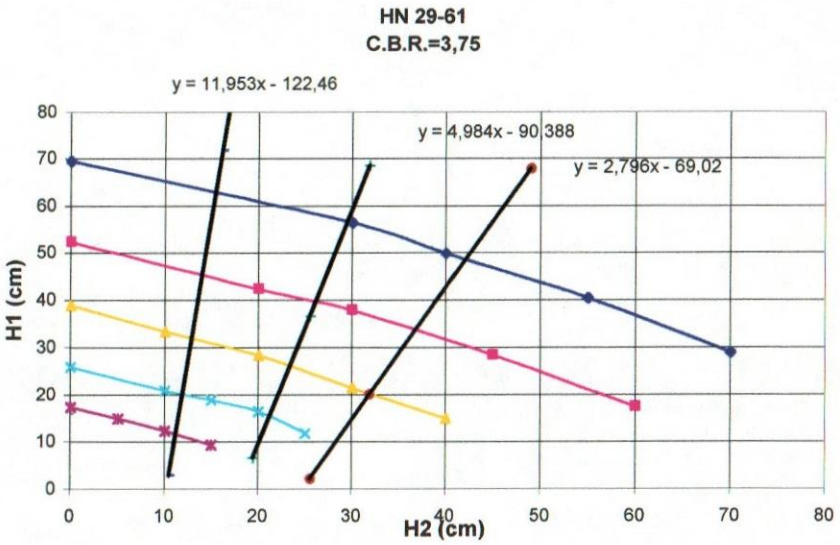
T.M.A.A. 28ºC

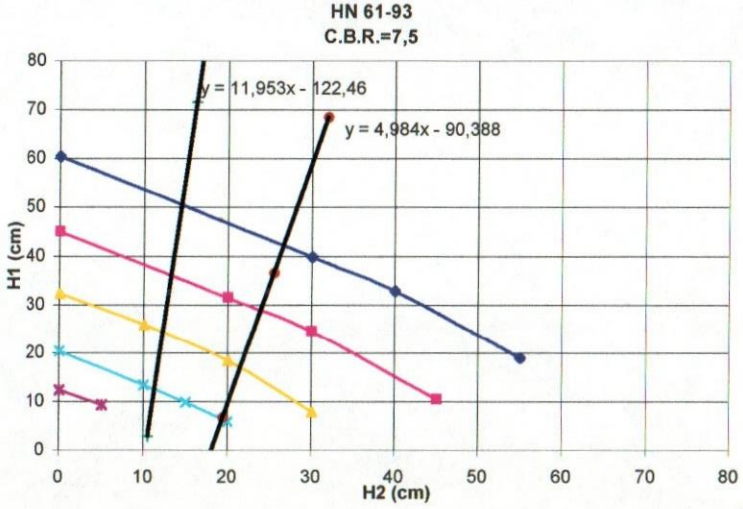
Nt	C.B.R 3.75		C.B.R. 7.5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^6	54,25	0	47,5	0	40	0
	51	10	43	10	34,5	10
	48	20	38,5	20	28,25	20
	40	40	26,25	40		
	21,5	74,5	12,5	60		
10^7	40,25	0	33,75	0	28,5	0
	37	10	29,5	10	22	10
	33,5	20	24,5	20	14,75	20
	24,75	40	12	39,25		
	14	60	7,75	46		
10^8	29,5	0	24,5	0	19,5	0
	26,25	10	19,75	10	11,75	10
	22,5	20	14,5	20		
	12,5	40	6,25	32,75		
	7,5	49,25				
10^5	20,75	0	15,75	0	11,75	0
	17	10	11	10	6,5	7,5
	13	20	7	17,5		
	6,25	33				
10^4	13,75	0	9,75	0	6,25	0
	10	10	6,25	10		
	5	20				

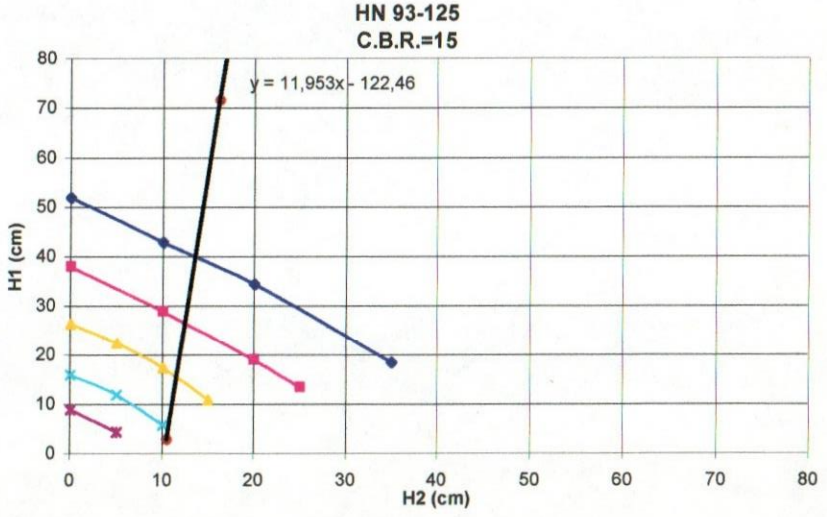




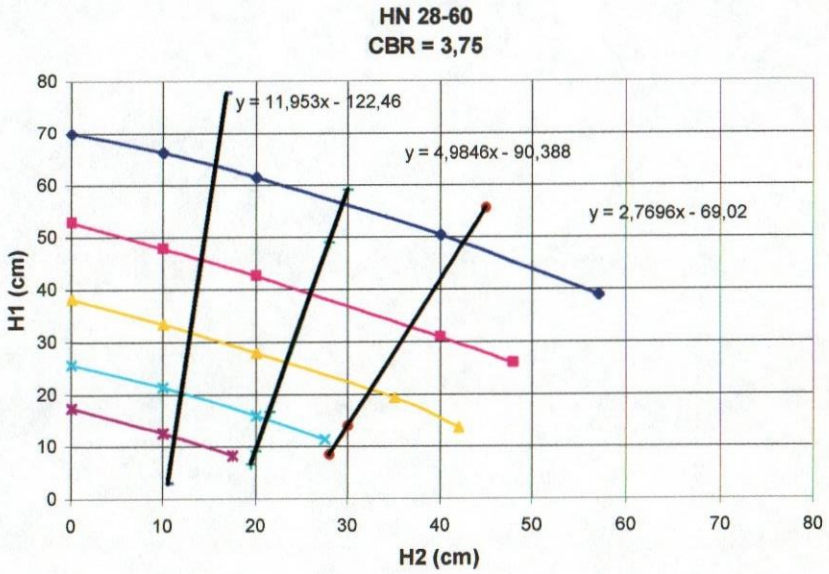
Nt	C.B.R 3.75		C.B.R. 7.5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	69,5	0	60,5	0	52	0
	56,5	30	40	30	43	10
	50	40	33	40	34,5	20
	40,5	55	19	55	18,5	35
	29	70				
10^7	52,5	0	45	0	38	0
	42,5	20	31,5	20	29	10
	38	30	24,5	30	19	20
	28,5	45	10,5	45	13,5	25
	17,5	60				
10^6	39	0	32,5	0	26,5	0
	33,5	10	26	10	22,5	5
	28,5	20	18,5	20	17,5	10
	21,5	30	8	30	11	15
	15	40				
10^5	26	0	20,5	0	16	0
	21	10	13,5	10	12	5
	19	15	10	15	6	10
	16,5	20	6	20		
	12	25				
10^4	17,5	0	12,5	0	9	0
	15	5	9,5	5	4,5	5
	12,5	10				
	9,5	15				

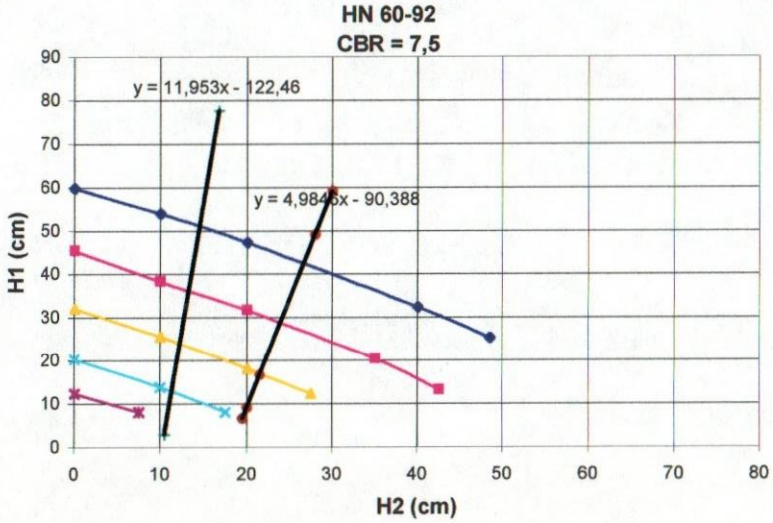


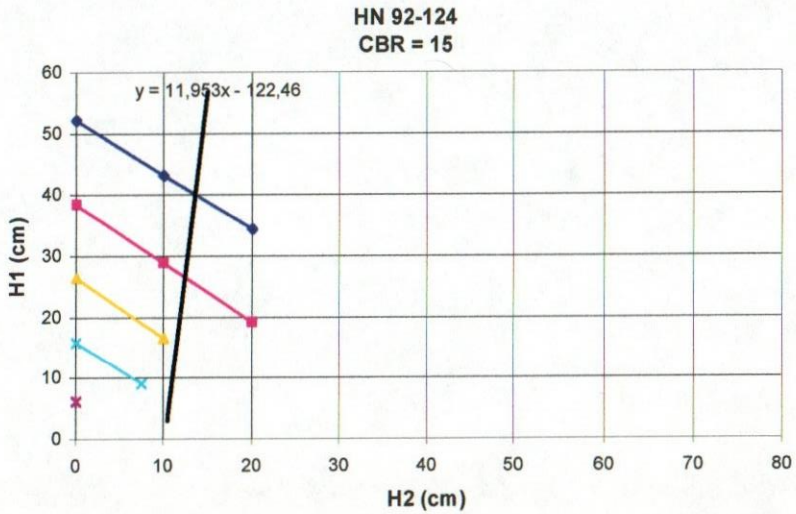




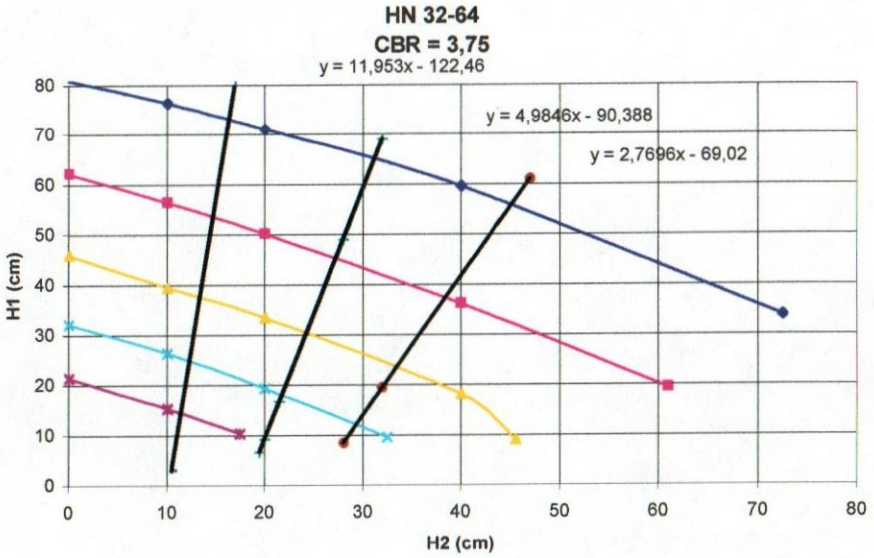
Nt	C.B.R 3.75		C.B.R. 7.5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^6	70	0	60	0	52,25	0
	66,25	10	54	10	43,25	10
	61,5	20	47,5	20	34,5	20
	50,5	40	32,5	40		
	39	57	25,5	48,5		
10^7	53	0	45,5	0	38,5	0
	48	10	38,5	10	29	10
	42,75	20	31,75	20	19,25	20
	31	40	20,5	35		
	26	48	13,25	42,5		
10^6	38,25	0	32,25	0	26,5	0
	33,5	10	25,75	10	16,75	10
	28	20	18,25	20		
	19,5	35	12,5	27,5		
	13,75	42				
10^5	25,75	0	20,5	0	16	0
	21,5	10	14	10	9,25	7,5
	16	20	8,25	17,5		
	11,5	27,5				
10^4	17,5	0	12,5	0	8,5	0
	12,75	10	8,25	7,5		
	8,5	17,5				

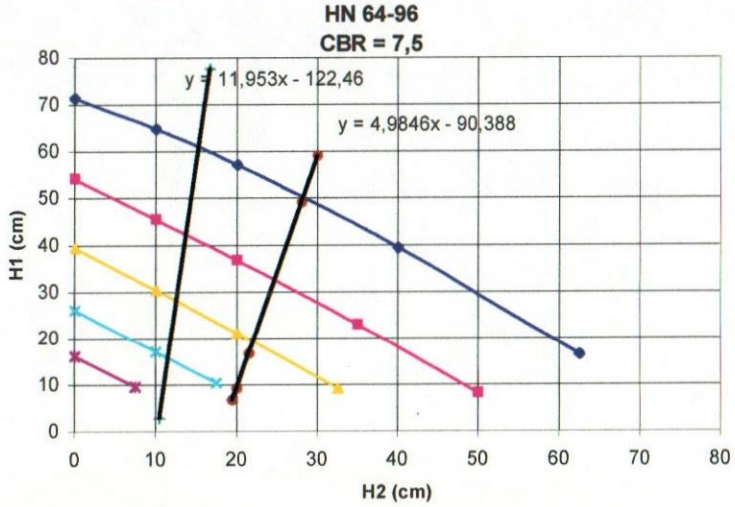


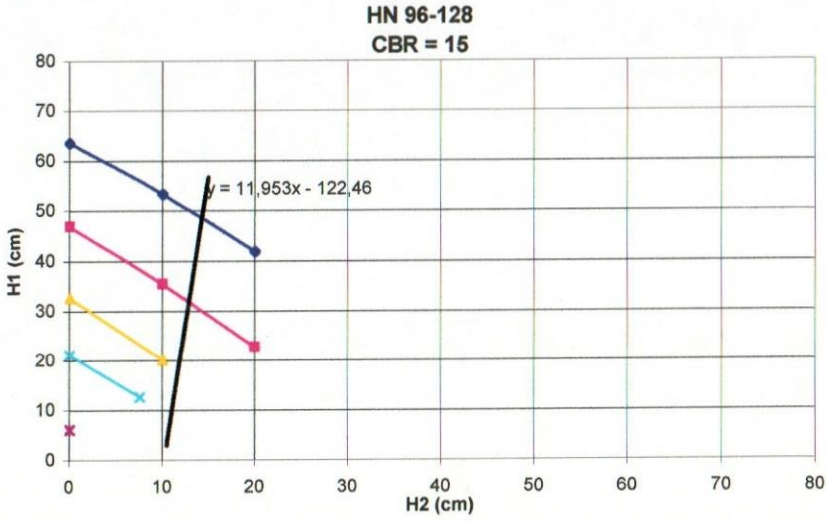




Nt	C.B.R 3.75		C.B.R. 7.5		C.B.R. 15	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
10^8	81	0	71,5	0	63,75	0
	76,5	10	65	10	53,5	10
	71,25	20	57,25	20	42	20
	59,75	40	39,5	40		
	34	72,5	16,5	62,5		
10^7	62,25	0	54,25	0	47	0
	56,5	10	45,5	10	35,5	10
	50,25	20	36,75	20	22,75	20
	36,25	40	23	35		
	19,5	61	8,25	50		
10^6	46	0	39,5	0	32,75	0
	39,5	10	30,5	10	20,25	10
	33,5	20	21,25	20	10,75	17,5
	18,25	40	9,25	32,5		
	9,25	45,5				
10^5	32,25	0	26,25	0	21,25	0
	26,5	10	17,25	10	12,75	7,5
	19,5	20	10,5	17,5	4,75	12,5
	9,75	32,5				
10^4	21,5	0	16,25	0	11	0
	15,5	10	9,75	7,5	4,5	5
	10,5	17,5				







Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	47	51	52	55	40	42	42	45
	20-40	34	38	38	40	27	29	29	31
	10-20	22	23	24	25	14	16	16	16
10^7	40-80	42	44	45	46	35	37	37	38
	20-40	31	32	33	34	25	26	26	27
	10-20	19	21	21	22	13	14	14	15
10^6	40-80	36	37	39	40	31	32	32	33
	20-40	27	28	29	30	22	23	23	24
	10-20	18	19	18	20	12	13	13	13
10^5	40-80	33	34	34	35	28	28	29	29
	20-40	25	26	26	27	21	21	21	22
	10-20	17	17	17	18	12	12	12	12
10^4	40-80	30	30	31	31	26	26	26	27
	20-40	24	23	24	24	20	19	20	20
	10-20	16	16	16	16	11	11	11	11
Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	32	33	33	36	25	27	27	28
	20-40	20	22	22	23	14	15	15	15
	10-20								
10^7	40-80	28	29	29	30	23	24	24	25
	20-40	19	20	20	20	13	13	13	14
	10-20								
10^6	40-80	25	26	26	27	21	22	22	22
	20-40	17	18	18	18	12	12	12	13
	10-20								
10^5	40-80	23	23	24	24	19	19	19	20
	20-40	16	16	16	16	11	11	11	12
	10-20								
10^4	40-80	22	22	22	22	19	19	19	19
	20-40	15	15	15	15	11	11	11	11
	10-20								
Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	18	20	20	21	13	14	14	14
	20-40								
	10-20								
10^7	40-80	17	18	18	18	12	12	12	13
	20-40								
	10-20								
10^6	40-80	16	16	16	16	11	12	12	12
	20-40								
	10-20								
10^5	40-80	15	15	15	15	11	11	11	11
	20-40								
	10-20								
10^4	40-80	15	15	15	15				
	20-40								
	10-20								

Valores de H2 Obtenidos de las Cartas HN de Shell para 28°C

TMAA=28 °C S 1 Pent 50 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
47	34	22	2,5
40	27	14	3,75
32	20		5
25	14		7,5
18			10
13			15
			20

TMAA=28 °C S 1 Pent 50 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
42	31	19	2,5
35	25	13	3,75
28	19		5
23	13		7,5
17			10
12			15
			20

TMAA=28 °C S 1 Pent 50 Nt = 10^6

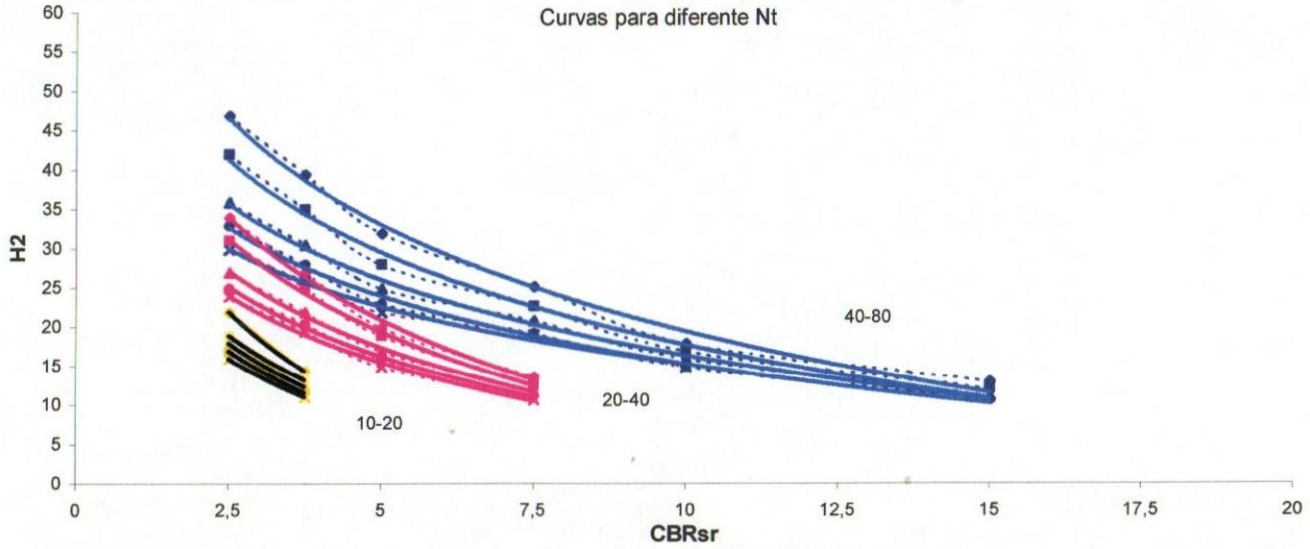
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
36	27	18	2,5
31	22	12	3,75
25	17		5
21	12		7,5
16			10
11			15
			20

TMAA=28 °C S 1 Pent 50 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
33	25	17	2,5
28	21	12	3,75
23	16		5
19	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=28 °C S 1 Pent 50 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
30	24	16	2,5
26	20	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
15			10
			15
			20



TMAA=28 °C S 1 Pent 100 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
51	38	23	2,5
42	29	16	3,75
33	22		5
27	15		7,5
20			10
14			15
			20

TMAA=28 °C S 1 Pent 100 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
44	32	21	2,5
37	26	14	3,75
29	20		5
24	13		7,5
18			10
12			15
			20

TMAA=28 °C S 1 Pent 100 Nt = 10^6

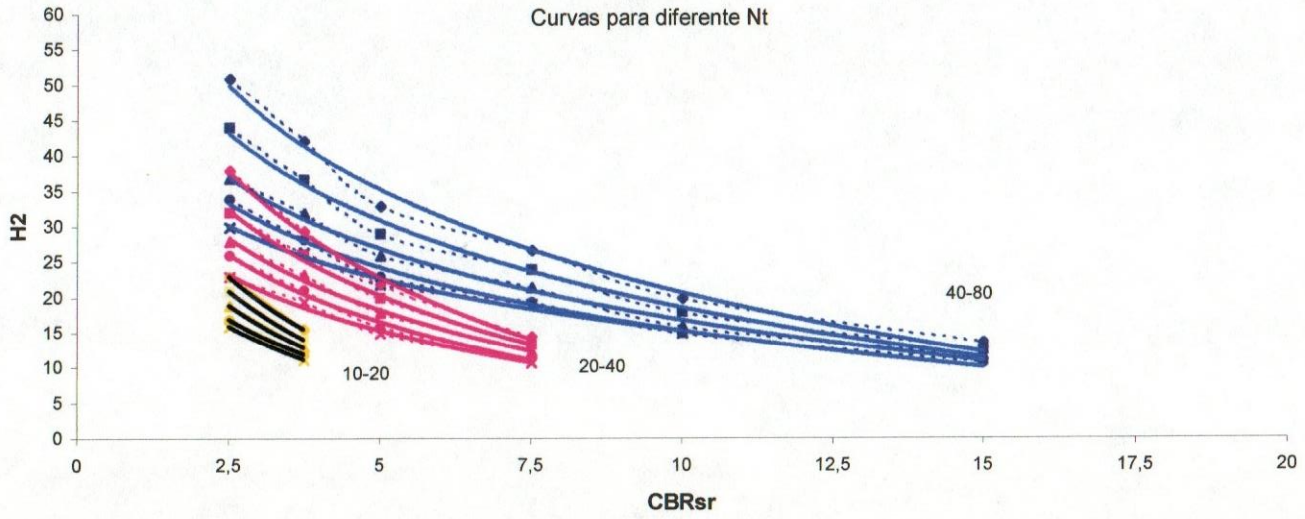
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
37	28	19	2,5
32	23	13	3,75
26	18		5
22	12		7,5
16			10
12			15
			20

TMAA=28 °C S 1 Pent 100 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
34	26	17	2,5
28	21	12	3,75
23	16		5
19	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=28 °C S 1 Pent 100 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
30	23	16	2,5
26	19	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
15			10
10,66			15
			20



TMAA=28 °C S 2 Pent 50 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
52	38	24	2,5
42	29	16	3,75
33	22		5
27	15		7,5
20			10
14			15
			20

TMAA=28 °C S 2 Pent 50 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
45	33	21	2,5
37	26	14	3,75
29	20		5
24	13		7,5
18			10
12			15
			20

TMAA=28 °C S 2 Pent 50 Nt = 10^6

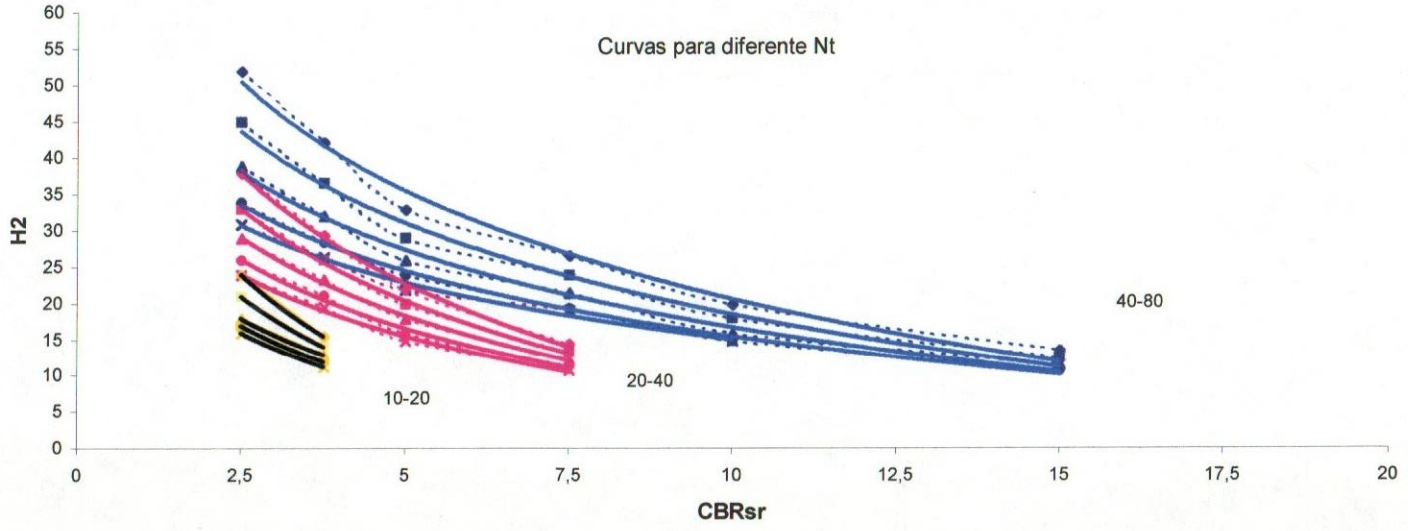
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
39	29	18	2,5
32	23	13	3,75
26	18		5
22	12		7,5
16			10
12			15
			20

TMAA=28 °C S 2 Pent 50 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
34	26	17	2,5
29	21	12	3,75
24	16		5
19	11		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=28 °C S 2 Pent 50 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
31	24	16	2,5
26	20	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
15			10
			15
			20



TMAA=28 °C S 2 Pent 100 Nt = 10^8

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
55	40	25	2,5
45	31	16	3,75
36	23		5
28	15		7,5
21			10
14			15
			20

TMAA=28 °C S 2 Pent 100 Nt = 10^7

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
46	34	22	2,5
38	27	15	3,75
30	20		5
25	14		7,5
18			10
13			15
			20

TMAA=28 °C S 2 Pent 100 Nt = 10^6

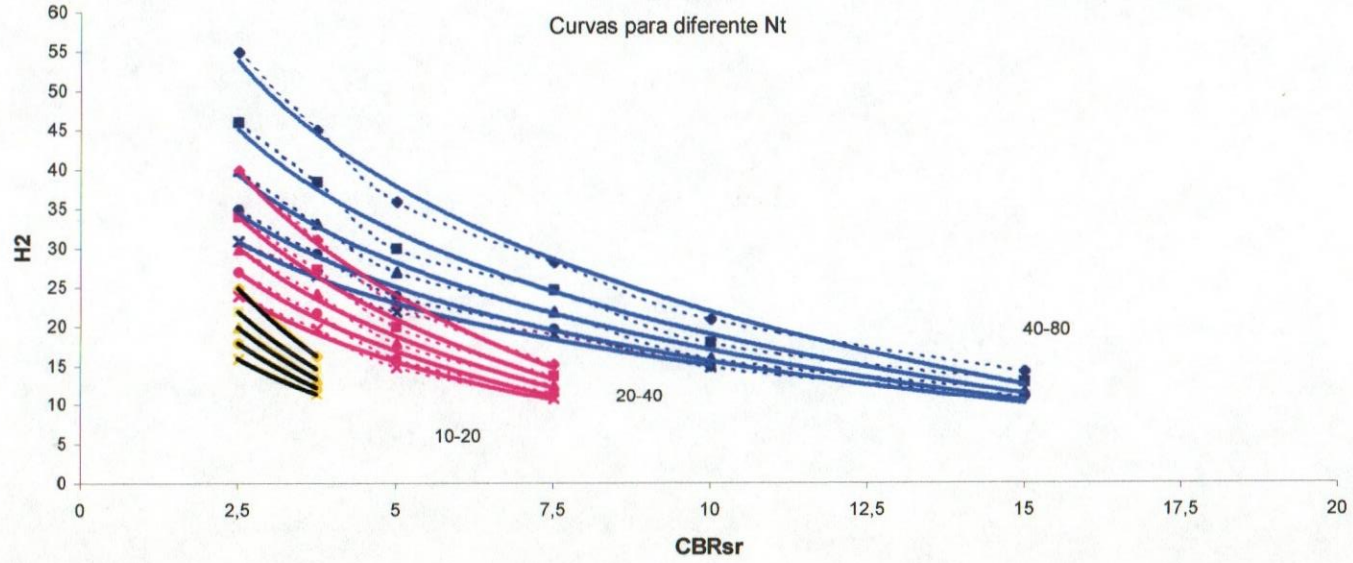
H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
40	30	20	2,5
33	24	13	3,75
27	18		5
22	13		7,5
16			10
12			15
			20

TMAA=28 °C S 2 Pent 100 Nt = 10^5

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
35	27	18	2,5
29	22	12	3,75
24	16		5
20	12		7,5
15			10
11			15
			20

TMAA=28 °C S 2 Pent 100 Nt = 10^4

H2 40 - 80	H2 20 - 40	H2 10 - 20	CBR sr
31	24	16	2,5
27	20	11	3,75
22	15		5
19	11		7,5
15			10
			15
			20



Nt	Pen 50-S1 (40-80)	R^2	Pen 100-S1 (40-80)	R^2
10^8	-19,533Ln(x) + 64,523	0,992	-21,065Ln(x) + 69,268	0,990
10^7	-16,956Ln(x) + 56,847	0,992	-17,731Ln(x) + 59,485	0,991
10^6	-13,911Ln(x) + 48,478	0,995	-14,551Ln(x) + 50,377	0,994
10^5	-12,513Ln(x) + 44,174	0,995	-12,972Ln(x) + 45,233	0,992
10^4	-10,585Ln(x) + 39,713	0,991	-10,706Ln(x) + 40,005	0,988
	(20-40)		(20-40)	
10^8	-18,845Ln(x) + 51,297	0,994	-21,642Ln(x) + 57,723	0,996
10^7	-17,003Ln(x) + 46,823	0,996	-17,288Ln(x) + 48,197	0,995
10^6	-14,038Ln(x) + 40,031	0,996	-14,567Ln(x) + 41,762	0,993
10^5	-12,827Ln(x) + 36,954	0,996	-13,673Ln(x) + 38,654	0,993
10^4	-12,291Ln(x) + 35,325	0,995	-11,434Ln(x) + 33,815	0,990
	(10-20)		(10-20)	
10^8	-18,695Ln(x) + 39,13	1,000	-18,275Ln(x) + 39,745	1,000
10^7	-14,157Ln(x) + 31,972	1,000	-17,017Ln(x) + 36,593	1,000
10^6	-13,885Ln(x) + 30,723	1,000	-14,946Ln(x) + 32,695	1,000
10^5	-13,244Ln(x) + 29,135	1,000	-12,406Ln(x) + 28,367	1,000
10^4	-12,122Ln(x) + 27,107	1,000	-11,764Ln(x) + 26,779	1,000

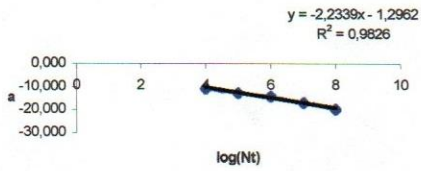
	Pen 50-S2 (40-80)	R^2	Pen 100-S2 (40-80)	R^2
10^8	-21,498Ln(x) + 70,207	0,988	-22,993Ln(x) + 74,949	0,992
10^7	-18,112Ln(x) + 60,314	0,989	-18,791Ln(x) + 62,391	0,988
10^6	-15,415Ln(x) + 52,306	0,991	-16,021Ln(x) + 54,027	0,992
10^5	-13,082Ln(x) + 45,667	0,997	-13,567Ln(x) + 46,949	0,993
10^4	-11,301Ln(x) + 41,176	0,990	-11,368Ln(x) + 41,338	0,989
	(20-40)		(20-40)	
10^8	-21,672Ln(x) + 57,764	0,996	-22,844Ln(x) + 60,862	0,995
10^7	-18,118Ln(x) + 49,638	0,998	-18,841Ln(x) + 51,371	0,992
10^6	-15,464Ln(x) + 43,329	0,997	-16,216Ln(x) + 44,979	0,992
10^5	-13,65Ln(x) + 38,643	0,993	-14,437Ln(x) + 40,252	0,988
10^4	-12,283Ln(x) + 35,342	0,994	-12,329Ln(x) + 35,496	0,990
	(10-20)		(10-20)	
10^8	-20,791Ln(x) + 43,051	1,000	-21,235Ln(x) + 44,457	1,000
10^7	-17,042Ln(x) + 36,616	1,000	-17,93Ln(x) + 38,429	1,000
10^6	-12,504Ln(x) + 29,457	1,000	-16,179Ln(x) + 34,825	1,000
10^5	-12,43Ln(x) + 28,39	1,000	-13,984Ln(x) + 30,813	1,000
10^4	-11,715Ln(x) + 26,734	1,000	-11,197Ln(x) + 26,26	1,000

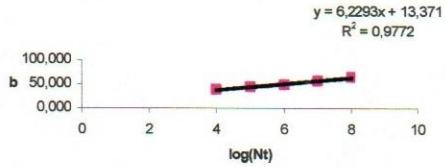
Donde $F(X)=H_2$

X=C.B.R. sr

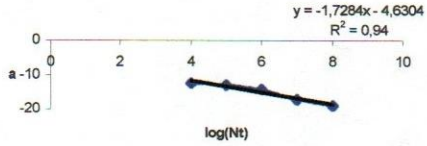
Nt	40-80			20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-19,533	64,523	-18,845	51,297	-18,695	39,13
10000000	7	-16,956	56,847	-17,003	46,823	-14,157	31,972
1000000	6	-13,911	48,478	-14,038	40,031	-13,885	30,723
100000	5	-12,513	44,174	-12,827	36,954	-13,244	29,135
10000	4	-10,585	39,713	-12,291	35,325	-12,122	27,107

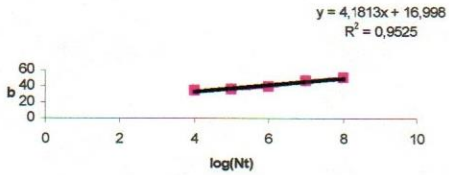
40-80



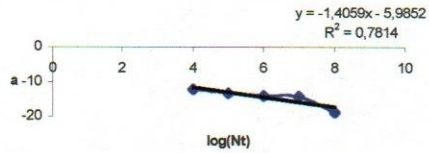


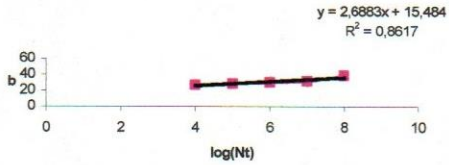
20-40



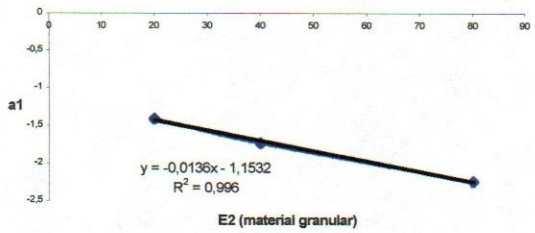


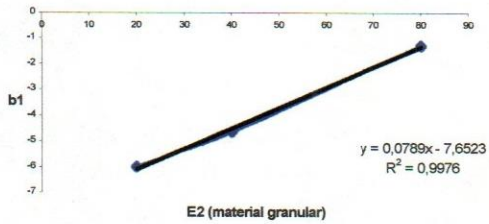
10-20

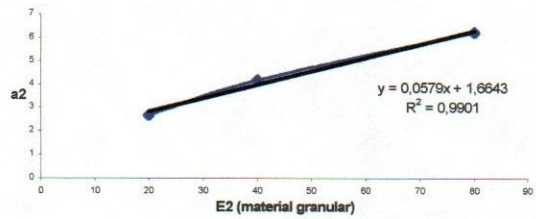


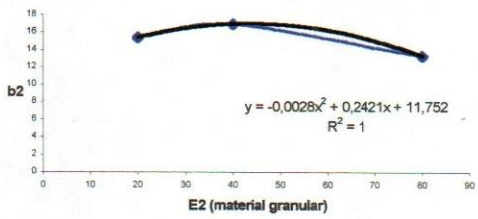


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-2,2339	-1,2962	6,2293	13,371
40	-1,7284	-4,6304	4,1813	16,998
20	-1,4059	-5,9852	2,6883	15,484









((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

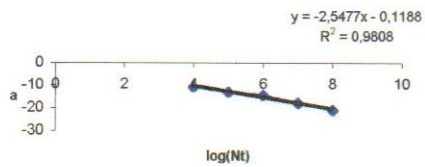
	a1	b1	a2	b2
.1	0	0	0	-0,0028
.2	-0,0136	0,0789	0,0579	0,2421
.3	-1,1532	-7,6523	1,6643	11,752

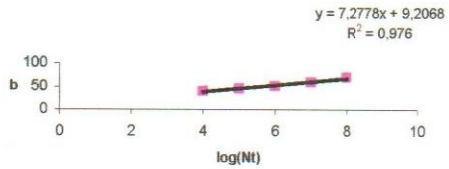
Nt		40-80	
		a	b
100000000	8	-21,065	69,268
10000000	7	-17,731	59,485
1000000	6	-14,551	50,377
100000	5	-12,972	45,233
10000	4	-10,706	40,005

20-40	
a	b
-21,642	57,723
-17,288	48,197
-14,567	41,762
-13,673	38,654
-11,434	33,815

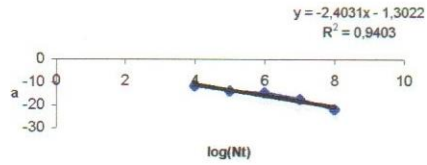
10-20	
a	b
-18,275	39,745
-17,017	36,593
-14,946	32,695
-12,406	28,367
-11,764	26,779

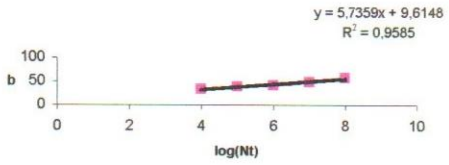
40-80



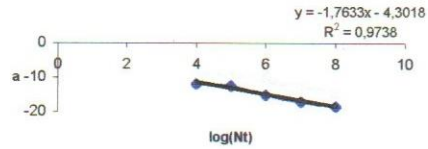


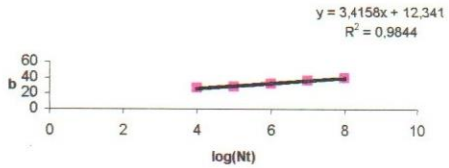
20-40



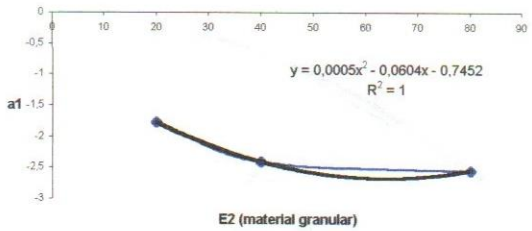


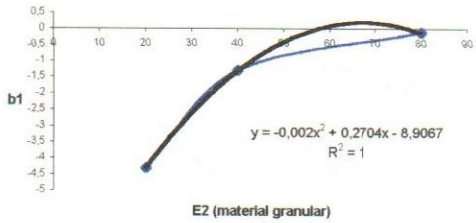
10-20

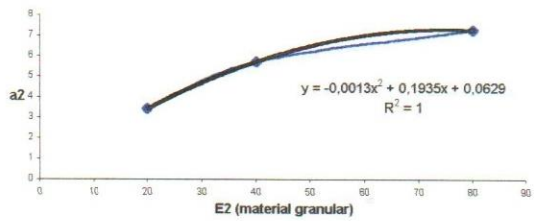


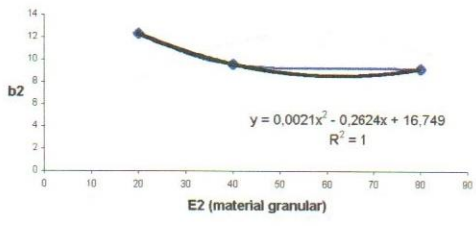


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-2,5477	-0,1188	7,2778	9,207
40	-2,4031	-1,3022	5,7359	9,6148
20	-1,7633	-4,3018	3,4158	12,341









((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

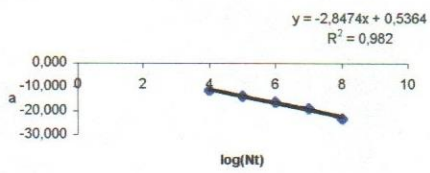
	a1	b1	a2	b2
.1	0,0005	-0,002	-0,0013	0,0021
.2	-0,0604	0,2704	0,1935	-0,2624
.3	-0,7452	-8,9067	0,0629	16,749

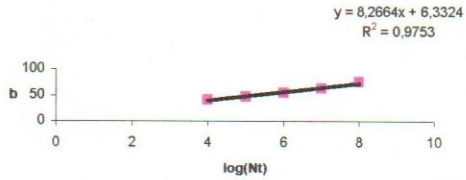
Nt		40-80	
		a	b
100000000	8	-22,993	74,949
10000000	7	-18,791	62,391
1000000	6	-16,021	54,027
100000	5	-13,567	46,949
10000	4	-11,368	41,338

20-40	
a	b
-22,844	60,862
-18,841	51,371
-16,216	44,979
-14,437	40,252
-12,329	35,496

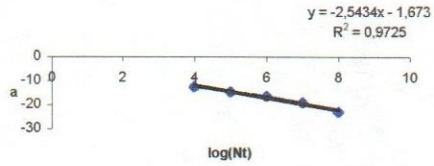
10-20	
a	b
-21,235	44,457
-17,93	38,429
-16,179	34,825
-13,984	30,813
-11,197	26,26

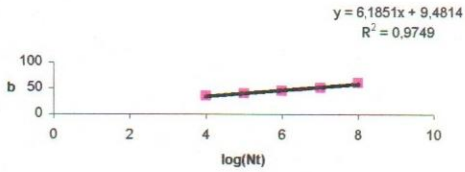
40-80



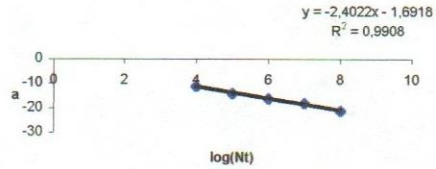


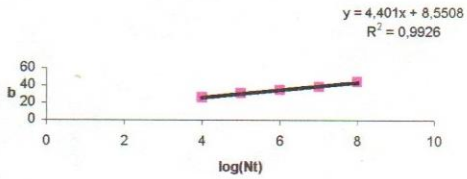
20-40



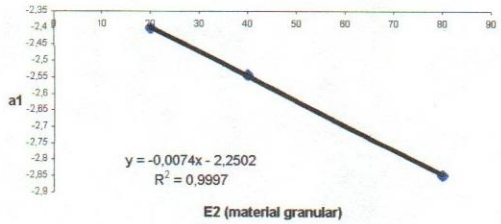


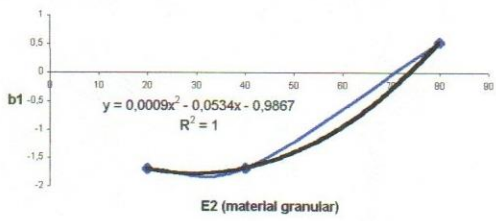
10-20

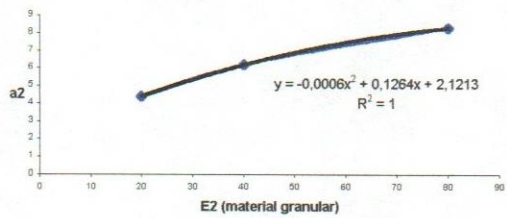


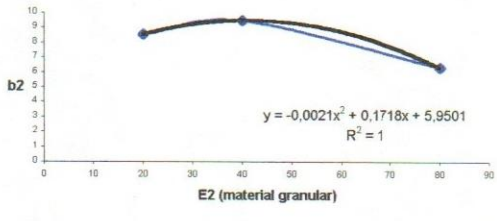


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-2,8474	0,5364	8,2664	6,332
40	-2,5434	-1,673	6,1851	9,4814
20	-2,4022	-1,6918	4,401	8,5508









((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	0	0,0009	-0,0006	-0,0021
.2	-0,0074	-0,0534	0,1264	0,1718
.3	-2,2502	-0,9867	2,1213	5,9501

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	46	49	50	52	38	41	42	43
	20-40	32	36	36	38	25	28	28	30
	10-20	22	22	22	24	15	15	14	16
10^7	40-80	42	44	45	47	35	37	38	39
	20-40	30	32	33	35	23	25	25	27
	10-20	21	20	20	22	14	13	13	14
10^6	40-80	37	39	40	41	31	33	33	34
	20-40	27	29	29	31	21	23	23	24
	10-20	19	18	18	20	13	12	12	13
10^5	40-80	33	33	35	35	28	29	29	30
	20-40	25	25	26	27	20	20	20	21
	10-20	17	17	16	18	12	11	11	12
10^4	40-80	29	28	29	29	25	25	25	25
	20-40	23	22	22	23	18	17	18	18
	10-20	16	15	14	15	11	10	10	11

C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3.75			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
-1	-2	-2	-3	-2	-1	0	-2
-2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1
0	-1	-2	-1	1	-1	-2	0
0	0	0	1	0	0	1	1
-1	0	0	1	-2	-1	-1	0
2	-1	-1	0	1	-1	-1	-1
1	2	1	1	1	1	1	1
0	1	0	1	-1	0	0	0
1	-1	0	0	1	-1	-1	0
0	-1	1	0	0	1	0	1
0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1
0	0	-1	0	0	-1	-1	0
-1	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-2
-1	-1	-2	-1	-2	-2	-2	-2
0	-1	-2	-1	0	-1	-1	0

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	33	35	36	37	25	28	27	28
	20-40	20	22	22	23	12	14	13	14
	10-20								
10^7	40-80	30	32	32	33	23	25	25	25
	20-40	18	20	20	21	12	13	12	13
	10-20								
10^6	40-80	27	29	29	29	21	23	23	23
	20-40	17	18	18	19	11	12	11	12
	10-20								
10^5	40-80	24	25	25	26	19	20	20	20
	20-40	16	16	16	17	11	11	11	11
	10-20								
10^4	40-80	22	22	22	22	18	18	18	17
	20-40	15	14	14	15	10	10	10	10
	10-20								

C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7.5			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
1	2	3	1	0	1	0	0
0	0	0	0	-2	-1	-2	-1
2	3	3	3	0	1	1	0
-1	0	0	1	-1	0	-1	-1
2	3	3	2	0	1	1	1
0	0	0	1	-1	0	-1	-1
1	2	1	2	0	1	1	0
0	0	0	1	0	0	0	-1
0	0	0	0	-1	-1	-1	-2
0	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1

Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
		Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	19	22	22	22	11	14	13	13
	20-40								
	10-20								
10^7	40-80	18	20	20	20	11	14	12	12
	20-40								
	10-20								
10^6	40-80	17	19	18	18	11	13	12	11
	20-40								
	10-20								
10^5	40-80	16	17	16	16	11	12	11	11
	20-40								
	10-20								
10^4	40-80	15	15	15	14		11		
	20-40								
	10-20								

C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)	Pen50(S1)	Pen100(S1)	Pen50(S2)	Pen100(S2)
1	2	2	1	-2	1	-1	-1
1	2	2	2	-1	2	0	-1
1	3	2	2	0	2	0	-1
1	2	1	1	0	1	0	0
0	0	0	-1		0		

Valores de H2 Obtenidos de las Ecuaciones para 28ºC

Desvición entre Valores Obtenidos de las Ecuaciones y Valores de las Cartas HN de Shell

Pen50

S1F1

TMAA 28°C

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-2.2339 * \log(N_t) - 1.2962) * \ln(C.B.R_{sr}) + 6.2293 * \log(N_t) + 13.371$
40	$H_2 = (-1.7284 * \log(N_t) - 4.6304) * \ln(C.B.R_{sr}) + 4.1813 * \log(N_t) + 16.998$
20	$H_2 = (-1.4059 * \log(N_t) - 5.9852) * \ln(C.B.R_{sr}) + 2.6883 * \log(N_t) + 15.484$
$H_2 = ((-0.0136 * E_2 - 1.1532) * \log(N_t) + 0.0789 * E_2 - 7.6523) * \ln(C.B.R_{sr}) + (0.0579 * E_2 + 1.6643) * \log(N_t) - 0.0028 * E_2^{\,2} + 0.2421 * E_2 + 11.752$	

S2F2

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-2.5424 * \log(N_t) - 0.6272) * \ln(C.B.R_{sr}) + 7.2709 * \log(N_t) + 10.309$
40	$H_2 = (-2.3246 * \log(N_t) - 2.2898) * \ln(C.B.R_{sr}) + 5.5839 * \log(N_t) + 11.44$
20	$H_2 = (-2.2764 * \log(N_t) - 1.238) * \ln(C.B.R_{sr}) + 4.086 * \log(N_t) + 8.3336$
$H_2 = ((-0.00005 * E_2^{\,2} + 0.0006 * E_2 - 2.2687) * \log(N_t) + 1.6 * 10^{-3} * E_2^{\,2} - 0.1467 * E_2 + 1.0692) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.0005 * E_2^{\,2} + 0.1076 * E_2 + 2.1518) * \log(N_t) - 0.0031 * E_2^{\,2} + 0.3389 * E_2 + 1.5586$	

Pen100

S1F1

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-2.5477 * \log(N_t) - 0.1188) * \ln(C.B.R_{sr}) + 7.2778 * \log(N_t) + 9.2068$
40	$H_2 = (-2.4031 * \log(N_t) - 1.3022) * \ln(C.B.R_{sr}) + 5.7359 * \log(N_t) + 9.6148$
20	$H_2 = (-1.7633 * \log(N_t) - 4.3018) * \ln(C.B.R_{sr}) + 3.4158 * \log(N_t) + 12.341$
$H_2 = ((0.0005 * E_2^{\,2} - 0.0604 * E_2 - 0.7452) * \log(N_t) - 0.002 * E_2^{\,2} + 0.2704 * E_2 - 8.9067) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.0013 * E_2^{\,2} + 0.1935 * E_2 + 0.0629) * \log(N_t) + 0.0021 * E_2^{\,2} - 0.2624 * E_2 + 15.8798$	

S2F2

C.B.R.	Fórmula
80	$H_2 = (-2.8474 * \log(N_t) + 0.5364) * \ln(C.B.R_{sr}) + 8.2664 * \log(N_t) + 6.3324$
40	$H_2 = (-2.5434 * \log(N_t) - 1.673) * \ln(C.B.R_{sr}) + 6.1851 * \log(N_t) + 9.4814$
20	$H_2 = (-2.4022 * \log(N_t) - 1.6918) * \ln(C.B.R_{sr}) + 4.401 * \log(N_t) + 8.5508$
$H_2 = ((-0.0074 * E_2 - 2.2502) * \log(N_t) + 9 * 10^{-4} * E_2^{\,2} - 0.0534 * E_2 - 0.9867) * \ln(C.B.R_{sr}) + (-0.0006 * E_2^{\,2} + 0.1264 * E_2 + 2.1213) * \log(N_t) - 0.0021 * E_2^{\,2} + 0.1718 * E_2 + 5.4098$	

CAPITULO V

GENERAL.

Nt	>18 S1 (40-80)	R^2	>18 S2 (40-80)	R^2
10^8	-18,718Ln(x) + 62,42	0,990	-21,01Ln(x) + 68,574	0,987
10^7	-16,8Ln(x) + 55,945	0,998	-17,853Ln(x) + 59,352	0,993
10^6	-13,869Ln(x) + 48,3	0,996	-15,241Ln(x) + 51,619	0,996
10^5	-12,403Ln(x) + 43,977	0,994	-12,817Ln(x) + 44,892	0,991
10^4	-11,185Ln(x) + 40,465	0,987	-11,779Ln(x) + 41,636	0,988
	(20-40)		(20-40)	
10^8	-18,375Ln(x) + 49,93	0,999	-21,153Ln(x) + 56,502	0,999
10^7	-16,448Ln(x) + 45,356	0,998	-17,523Ln(x) + 47,932	0,996
10^6	-13,893Ln(x) + 39,861	0,996	-15,596Ln(x) + 43,358	0,999
10^5	-12,818Ln(x) + 36,786	1,000	-13,893Ln(x) + 38,861	0,996
10^4	-11,966Ln(x) + 34,787	0,996	-11,966Ln(x) + 34,787	0,996
	(10-20)		(10-20)	
10^8	-17,264Ln(x) + 36,819	1,000	-19,73Ln(x) + 41,079	1,000
10^7	-14,798Ln(x) + 32,559	1,000	-17,264Ln(x) + 36,819	1,000
10^6	-14,798Ln(x) + 31,559	1,000	-12,332Ln(x) + 29,299	1,000
10^5	-14,798Ln(x) + 30,559	1,000	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000
10^4	-12,332Ln(x) + 27,299	1,000	-12,332Ln(x) + 27,299	1,000
	<18 S1 (40-80)	R^2	<18 S2 (40-80)	R^2
10^8	-15,467Ln(x) + 53,529	0,995	-16,933Ln(x) + 57,852	0,992
10^7	-14,095Ln(x) + 48,876	0,994	-14,828Ln(x) + 51,704	0,996
10^6	-13,043Ln(x) + 45,802	0,995	-13,682Ln(x) + 47,294	0,991
10^5	-11,502Ln(x) + 41,782	0,997	-11,671Ln(x) + 42,149	0,991
10^4	-11,126Ln(x) + 39,769	0,961	-11,482Ln(x) + 40,55	0,988
	(20-40)		(20-40)	
10^8	-15,819Ln(x) + 43,935	0,992	-16,671Ln(x) + 46,433	0,996
10^7	-13,893Ln(x) + 39,861	0,996	-14,745Ln(x) + 41,86	0,996
10^6	-13,041Ln(x) + 37,363	0,990	-13,041Ln(x) + 38,363	0,990
10^5	-12,189Ln(x) + 35,364	0,988	-12,189Ln(x) + 35,364	0,988
10^4	-10,485Ln(x) + 31,867	0,971	-11,337Ln(x) + 33,366	0,978
	(10-20)		(10-20)	
10^8	-14,798Ln(x) + 32,559	1,000	-14,798Ln(x) + 33,559	1,000
10^7	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000	-12,332Ln(x) + 29,299	1,000
10^6	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000	-12,332Ln(x) + 28,299	1,000
10^5	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000	-12,332Ln(x) + 27,299	1,000
10^4	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000	-9,8652Ln(x) + 24,039	1,000

		12ºC.								4ºC.							
		C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75				C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
Nt	C.B.R. c.g	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	40	40	44	45	34	34	36	37	38	39	41	42	33	34	35	35
	20-40	29	29	32	32	24	24	26	26	28	28	30	30	23	23	24	24
	10-20	19	19	20	20	13	13	14	14	18	18	19	19	12	12	13	13
10^7	40-80	37	37	39	38	31	31	33	33	35	36	38	38	30	30	32	32
	20-40	27	27	28	28	22	22	23	23	26	26	28	28	21	21	22	22
	10-20	17	17	18	18	12	12	13	13	17	17	18	18	12	12	12	12
10^6	40-80	34	34	35	35	29	29	30	30	33	34	34	34	28	28	29	29
	20-40	25	25	26	26	21	21	22	22	24	24	26	26	20	20	21	21
	10-20	17	17	17	17	12	12	12	12	16	16	17	17	11	11	12	12
10^5	40-80	31	31	32	32	27	27	27	27	31	32	32	32	27	27	27	27
	20-40	24	24	24	24	20	20	20	20	23	23	24	24	19	19	20	20
	10-20	15	15	16	16	11	11	11	11	15	15	16	16	11	11	11	11
10^4	40-80	28	28	30	30	26	26	26	26	29	29	29	29	25	25	25	25
	20-40	22	22	23	23	19	19	19	19	22	22	22	22	18	18	19	19
	10-20	15	15	15	15	11	11	11	11	14	14	15	15	11	11	11	11
		C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5				C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
Nt	C.B.R. c.g	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	28	28	29	30	23	23	24	24	27	27	28	28	22	22	23	23
	20-40	18	18	19	19	12	12	13	13	18	18	18	18	12	12	13	13
	10-20																
10^7	40-80	25	25	27	27	21	21	22	22	25	25	26	26	21	21	21	21
	20-40	17	17	18	18	12	12	12	12	17	17	17	17	11	11	12	12
	10-20																
10^6	40-80	24	24	24	24	20	20	20	20	23	23	24	24	19	19	20	20
	20-40	16	16	17	17	11	11	12	12	16	16	16	16	11	11	11	11
	10-20																
10^5	40-80	23	23	22	22	19	19	19	19	22	22	22	22	19	19	19	19
	20-40	15	15	15	15	11	11	11	11	15	15	15	15	11	11	11	11
	10-20																
10^4	40-80	21	21	21	21	19	19	18	18	20	20	20	20	18	18	18	18
	20-40	14	14	14	14	11	11	11	11	14	14	14	14	10	10	10	10
	10-20																
		C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15				C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
Nt	C.B.R. c.g	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	17	17	18	18	12	12	13	13	17	17	17	17	12	12	12	12
	20-40																
	10-20																
10^7	40-80	16	16	17	17	11	11	12	12	16	16	16	16	11	11	11	11
	20-40																
	10-20																
10^6	40-80	15	15	15	15	11	11	11	11	15	15	15	15	11	11	11	11
	20-40																
	10-20																
10^5	40-80	15	15	15	15	11	11	11	11	14	14	14	14			10	10
	20-40																
	10-20																
10^4	40-80	13	13	14	14			10	10	13	13	13	13				
	20-40																
	10-20																

Valores de H2 Obtenidos de las Cartas HN de Shell para las Condiciones de Temperatura de Venezuela

		28°C.								20°C.							
		C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75				C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)
10^8	40-80	47	49	52	54	40	41	42	44	42	44	47	49	35	37	39	40
	20-40	34	36	38	39	27	28	29	30	30	32	34	35	25	25	27	28
	10-20	22	23	24	25	14	15	16	16	19	20	21	22	13	14	14	15
10^7	40-80	42	43	45	46	35	36	37	38	38	39	41	42	32	33	34	35
	20-40	31	32	33	34	25	26	26	27	28	29	30	31	23	23	24	24
	10-20	19	20	21	22	13	14	14	14	18	19	19	20	12	13	13	13
10^6	40-80	36	37	39	40	31	31	32	33	35	36	36	37	30	30	30	31
	20-40	27	28	29	30	22	23	23	24	25	26	27	28	21	22	22	22
	10-20	18	19	18	19	12	13	13	13	17	18	18	18	12	12	12	12
10^5	40-80	33	34	34	35	28	28	29	29	32	32	33	33	27	28	28	28
	20-40	25	26	26	27	21	21	21	22	24	24	25	25	20	20	20	21
	10-20	17	17	17	18	12	12	12	12	16	17	17	17	11	11	11	12
10^4	40-80	30	30	31	31	26	26	26	27	30	30	30	30	26	26	26	26
	20-40	24	24	24	24	20	19	20	20	23	23	23	23	19	19	19	19
	10-20	16	16	16	16	11	11	11	11	15	16	16	16	11	11	11	11
		C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5				C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)
10^8	40-80	32	33	33	35	25	26	27	27	28	29	30	31	23	24	25	25
	20-40	20	21	22	23	14	14	15	15	19	20	20	21	13	13	13	14
	10-20																
10^7	40-80	28	29	29	30	23	23	24	24	26	27	27	28	21	22	22	23
	20-40	19	20	20	20	13	13	13	14	17	18	18	19	12	12	12	13
	10-20																
10^6	40-80	25	26	26	27	21	21	22	22	24	24	25	25	20	20	21	21
	20-40	17	18	18	18	12	12	12	12	16	17	17	17	11	11	12	12
	10-20																
10^5	40-80	23	23	24	24	19	19	19	20	23	23	22	23	19	19	19	19
	20-40	16	16	16	16	11	11	11	11	15	16	15	15	11	11	11	11
	10-20																
10^4	40-80	22	22	22	22	19	19	19	19	21	21	21	21	19	19	19	19
	20-40	15	15	15	15	11	11	11	11	14	15	14	15	11	11	11	11
	10-20																
		C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15				C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S1)	Pen70(S1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)
10^8	40-80	18	19	20	21	13	13	14	14	17	18	18	19	12	12	13	13
	20-40																
	10-20																
10^7	40-80	17	18	18	18	12	12	12	13	16	17	17	17	11	12	12	12
	20-40																
	10-20																
10^6	40-80	16	16	16	16	11	11	12	12	16	16	15	16	11	11	11	11
	20-40																
	10-20																
10^5	40-80	15	15	15	15	11	11	11	11	15	15	14	15	11	11	11	11
	20-40																
	10-20																
10^4	40-80	15	15	15	15					13	13	13	14	11	11	11	11
	20-40																
	10-20																

Valores de H2 Obtenidos de las Cartas HN de Shell para las Condiciones de Temperatura de Venezuela

		>18°C.				<18°C.			
		C.B.R.sr = 2,5		C.B.R.sr = 3,75		C.B.R.sr = 2,5		C.B.R.sr = 3,75	
Nt	C.B.R. c.g	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
10^8	40-80	46	51	38	41	39	43	34	36
	20-40	33	37	26	29	29	31	24	25
	10-20	21	23	14	15	19	20	13	14
10^7	40-80	41	44	34	36	36	38	31	33
	20-40	30	32	24	25	27	28	22	23
	10-20	19	21	13	14	17	18	12	13
10^6	40-80	36	38	30	32	34	35	29	30
	20-40	27	29	22	23	25	26	21	22
	10-20	18	18	12	13	17	17	12	12
10^5	40-80	33	34	28	28	31	32	27	27
	20-40	25	26	20	21	24	24	20	20
	10-20	17	17	11	12	15	16	11	11
10^4	40-80	30	31	26	26	29	30	26	26
	20-40	24	24	19	19	22	23	19	19
	10-20	16	16	11	11	15	15	11	11
		C.B.R.sr = 5		C.B.R.sr =7,5		C.B.R.sr = 5		C.B.R.sr =7,5	
Nt	C.B.R. c.g	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
10^8	40-80	31	32	25	26	28	29	23	24
	20-40	20	22	13	14	18	19	12	13
	10-20								
10^7	40-80	28	29	22	23	25	27	21	22
	20-40	19	19	12	13	17	18	12	12
	10-20								
10^6	40-80	25	26	21	21	24	24	20	20
	20-40	17	18	12	12	16	17	11	12
	10-20								
10^5	40-80	23	23	19	19	23	22	19	19
	20-40	16	16	11	11	15	15	11	11
	10-20								
10^4	40-80	22	22	19	19	21	21	19	18
	20-40	15	15	11	11	14	14	11	11
	10-20								
		C.B.R.sr = 10		C.B.R.sr = 15		C.B.R.sr = 10		C.B.R.sr = 15	
Nt	C.B.R. c.g	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
10^8	40-80	18	20	13	13	17	18	12	13
	20-40								
	10-20								
10^7	40-80	17	18	12	12	16	17	11	12
	20-40								
	10-20								
10^6	40-80	16	16	11	11	15	15	11	11
	20-40								
	10-20								
10^5	40-80	15	15	11	11	15	15		11
	20-40								
	10-20								
10^4	40-80	14	14			13	14		
	20-40								
	10-20								

Valores de H2 Ponderados Obtenidos de Shell para las Condiciones de Temperatura en Venezuela

		>18°C.				<18°C.			
		C.B.R.sr = 2.5		C.B.R.sr = 3.75		C.B.R.sr = 2.5		C.B.R.sr = 3.75	
Nt	C.B.R. c.g	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
10^8	40-80	46	49	38	41	38	44	32	37
	20-40	33	37	25	28	29	32	23	26
	10-20	21	23	14	15	19	21	13	16
10^7	40-80	42	44	35	37	36	41	30	34
	20-40	30	33	24	26	28	30	22	24
	10-20	20	21	13	14	18	20	13	15
10^6	40-80	38	39	31	32	33	37	28	31
	20-40	28	30	22	23	26	28	21	23
	10-20	18	19	12	13	17	19	12	14
10^5	40-80	34	34	28	28	31	34	26	28
	20-40	26	26	20	21	24	26	19	21
	10-20	17	17	12	12	16	18	12	13
10^4	40-80	30	29	25	24	29	30	25	25
	20-40	23	23	19	18	23	24	18	20
	10-20	16	15	11	11	15	17	11	12
		C.B.R.sr = 5		C.B.R.sr =7,5		C.B.R.sr = 5		C.B.R.sr =7,5	
Nt	C.B.R. c.g	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
10^8	40-80	32	34	24	26	27	31	21	24
	20-40	20	22	13	14	19	21	12	14
	10-20								
10^7	40-80	30	31	22	23	26	29	20	22
	20-40	19	20	12	13	18	20	12	13
	10-20								
10^6	40-80	27	28	21	21	25	26	19	20
	20-40	18	19	11	12	17	19	12	13
	10-20								
10^5	40-80	24	24	19	19	23	24	18	18
	20-40	16	17	11	11	16	18	11	12
	10-20								
10^4	40-80	22	21	17	16	22	21	17	16
	20-40	15	15	10	10	15	17	11	12
	10-20								
		C.B.R.sr = 10		C.B.R.sr = 15		C.B.R.sr = 10		C.B.R.sr = 15	
Nt	C.B.R. c.g	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
10^8	40-80	19	19	11	11	17	18	11	10
	20-40								
	10-20								
10^7	40-80	17	18	10	10	16	17	11	10
	20-40								
	10-20								
10^6	40-80	16	16	10	9	16	15	11	9
	20-40								
	10-20								
10^5	40-80	15	15	9	9	15	14	10	9
	20-40								
	10-20								
10^4	40-80	14	13			14	13		
	20-40								
	10-20								

Valores de H2 Obtenidos de las Ecuaciones para las Condiciones de Temperatrura en Venezuela

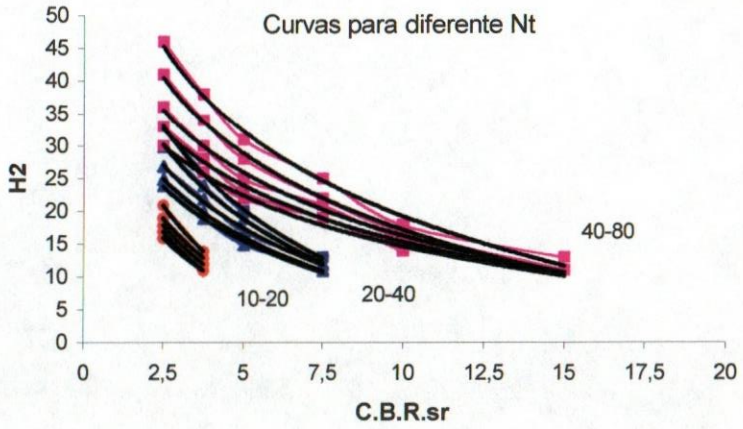
		S1								S2							
		4ºC.		12ºC.		4ºC.		12ºC.		4ºC.		12ºC.		4ºC.		12ºC.	
		C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75				C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
Nt	C.B.R. c.g	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	0	-1	-2	-2	-1	-2	-2	-2	3	2	0	-1	2	2	1	0
	20-40	1	1	0	0	0	0	-1	-1	2	2	0	0	2	2	0	0
	10-20	1	1	0	0	1	1	0	0	2	2	1	1	3	3	2	2
10^7	40-80	1	0	-1	-1	0	0	-1	-1	3	3	2	3	2	2	1	1
	20-40	2	2	1	1	1	1	0	0	2	2	2	2	2	2	1	1
	10-20	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2
10^6	40-80	0	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	3	3	2	2	2	2	1	1
	20-40	2	2	1	1	1	1	0	0	2	2	2	2	2	2	1	1
	10-20	1	1	0	0	1	1	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2
10^5	40-80	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	2	2	2	2	1	1	1	1
	20-40	1	1	0	0	0	0	-1	-1	2	2	2	2	1	1	1	1
	10-20	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
10^4	40-80	0	0	1	1	0	0	-1	-1	1	1	0	0	0	0	-1	-1
	20-40	1	1	1	1	0	0	-1	-1	2	2	1	1	1	1	1	1
	10-20	1	1	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	1	1	1	1
		C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5				C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
Nt	C.B.R. c.g	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	0	0	-1	-1	-1	-1	-2	-2	3	3	2	1	1	1	0	0
	20-40	1	1	1	1	0	0	0	0	3	3	2	2	1	1	1	1
	10-20																
10^7	40-80	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	3	3	2	2	1	1	0	0
	20-40	1	1	1	1	1	1	0	0	3	3	2	2	1	1	1	1
	10-20																
10^6	40-80	2	2	1	1	0	0	-1	-1	2	2	2	2	0	0	0	0
	20-40	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	2	2	2	2	1	1
	10-20																
10^5	40-80	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	2	2	2	2	-1	-1	-1	-1
	20-40	1	1	1	1	0	0	0	0	3	3	3	3	1	1	1	1
	10-20																
10^4	40-80	2	2	1	1	-1	-1	-2	-2	1	1	0	0	-2	-2	-2	-2
	20-40	1	1	1	1	1	1	0	0	3	3	3	3	2	2	1	1
	10-20																
		C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15				C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
Nt	C.B.R. c.g	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S1)	Pen100(S1)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S2)	Pen100(S2)	Pen70(S2)	Pen100(S2)
10^8	40-80	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	1	1	0	0	-2	-2	-3	-3
	20-40																
	10-20																
10^7	40-80	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	-1	-1	-2	-2
	20-40																
	10-20																
10^6	40-80	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2
	20-40																
	10-20																
10^5	40-80	1	1	0	0			-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-2	-2
	20-40																
	10-20																
10^4	40-80	1	1	1	1					0	0	-1	-1			-2	-2
	20-40																
	10-20																

Desviación entre Valores Obtenidos de las Ecuaciones y Valores ponderados de las Cartas HN de Shell para las Condiciones de Temperatura en Venezuela

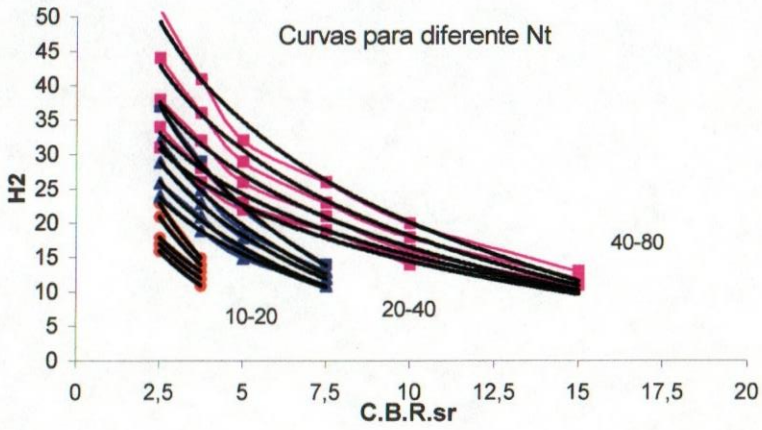
		S1								S2							
		20ºC.		28ºC.		20ºC.		28ºC.		20ºC.		28ºC.		20ºC.		28ºC.	
		C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75				C.B.R.sr = 2,5				C.B.R.sr = 3,75			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S2)	Pen70(S2)
10^8	40-80	4	2	-1	-3	3	1	-2	-3	2	0	-3	-5	2	1	-1	-3
	20-40	3	1	-1	-3	0	0	-2	-3	3	2	-1	-2	1	0	-1	-2
	10-20	2	1	-1	-2	1	0	0	-1	2	1	-1	-2	1	0	-1	-1
10^7	40-80	4	3	0	-1	3	2	0	-1	3	2	-1	-2	3	2	0	-1
	20-40	2	1	-1	-2	1	1	-1	-2	3	2	0	-1	2	2	0	-1
	10-20	2	1	1	0	1	0	0	-1	2	1	0	-1	1	1	0	0
10^6	40-80	3	2	2	1	1	1	1	0	3	2	0	-1	2	1	0	-1
	20-40	3	2	1	0	1	0	0	-1	3	2	1	0	1	1	0	-1
	10-20	1	0	0	-1	0	0	0	-1	1	1	1	0	1	1	0	0
10^5	40-80	2	2	1	0	1	0	0	0	1	1	0	-1	0	0	-1	-1
	20-40	2	2	1	0	0	0	-1	-1	1	1	0	-1	1	0	0	-1
	10-20	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
10^4	40-80	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-3
	20-40	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-2	-2
	10-20	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0
		C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5				C.B.R.sr = 5				C.B.R.sr =7,5			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S2)	Pen70(S2)
10^8	40-80	4	3	0	-1	1	0	-1	-2	4	3	1	-1	1	1	-1	-1
	20-40	1	0	0	-1	0	0	-1	-1	2	1	0	-1	1	0	-1	-1
	10-20			0	0												
10^7	40-80	4	3	2	1	1	0	-1	-1	4	3	2	1	1	0	-1	-1
	20-40	2	1	0	-1	0	0	-1	-1	2	1	0	0	1	0	0	-1
	10-20			0	0												
10^6	40-80	3	3	2	1	1	1	0	0	3	3	2	1	0	0	-1	-1
	20-40	2	1	1	0	0	0	-1	-1	2	2	1	1	0	0	0	0
	10-20																
10^5	40-80	1	1	1	1	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	-1
	20-40	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	1	0	0	0	0
	10-20			0	0												
10^4	40-80	1	1	0	0	-2	-2	-2	-2	0	0	-1	-1	-3	-3	-3	-3
	20-40	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1
	10-20																
		C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15				C.B.R.sr = 10				C.B.R.sr = 15			
Nt	C.B.R. c.g	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S1F1)	Pen70(S1F1)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S2)	Pen70(S2)	Pen50(S2)	Pen70(S2)
10^8	40-80	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-3
	20-40																
	10-20																
10^7	40-80	1	0	0	-1	-1	-2	-2	-1	1	1	0	0	-2	-2	-2	-3
	20-40																
	10-20																
10^6	40-80	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	1	0	0	0	-2	-2	-3	-3
	20-40																
	10-20																
10^5	40-80	0	0	0	0	-2	-2	-2	0	1	0	0	0	-2	-2	-2	-2
	20-40																
	10-20																
10^4	40-80	1	1	-1	-1	-2	-2			0	-1	-2	-2	-3	-3		
	20-40																
	10-20																

T.M.A.A. ≥18ºC

>18ºC.-S1							
Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.=2,5	C.B.R.=3,75	C.B.R.=5	C.B.R.=7,5	C.B.R.=10	C.B.R.=15
10^8	40-80	46	38	31	25	18	13
	20-40	33	26	20	13		
	10-20	21	14				
10^7	40-80	41	34	28	22	17	11
	20-40	30	24	19	12		
	10-20	19	13				
10^6	40-80	36	30	25	21	16	11
	20-40	27	22	17	12		
	10-20	18	12				
10^5	40-80	33	28	23	19	15	11
	20-40	25	20	16	11		
	10-20	17	11				
10^4	40-80	30	26	22	19	14	
	20-40	24	19	15	11		
	10-20	16	11				

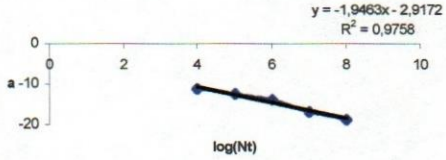


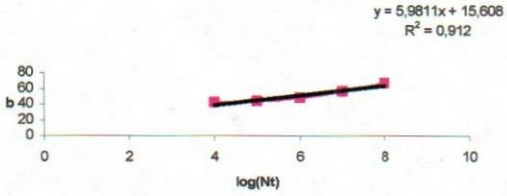
>18ºC.-S2							
Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.=2,5	C.B.R.=3,75	C.B.R.=5	C.B.R.=7,5	C.B.R.=10	C.B.R.=15
10^8	40-80	51	41	32	26	20	13
	20-40	37	29	22	14		
	10-20	23	15				
10^7	40-80	44	36	29	23	18	12
	20-40	32	25	19	13		
	10-20	21	14				
10^6	40-80	38	32	26	21	16	11
	20-40	29	23	18	12		
	10-20	18	13				
10^5	40-80	34	28	23	19	15	11
	20-40	26	21	16	11		
	10-20	17	12				
10^4	40-80	31	26	22	19	14	
	20-40	24	19	15	11		
	10-20	16	11				



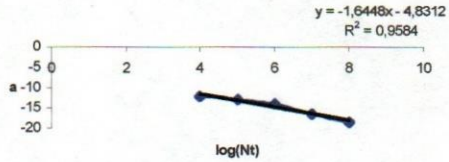
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-18,718	66,587	-18,375	49,930	-17,264	36,819
10000000	7	-16,8	55,945	-16,448	45,356	-14,798	32,559
1000000	6	-13,869	48,300	-13,893	39,861	-14,798	31,559
100000	5	-12,403	43,977	-12,818	36,786	-14,798	30,559
10000	4	-11,185	42,665	-11,966	34,787	-12,332	27,299

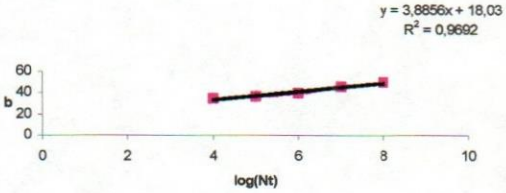
40-80



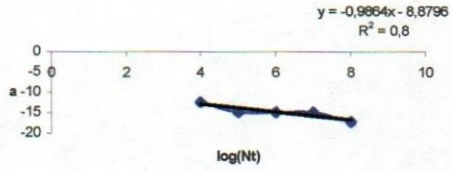


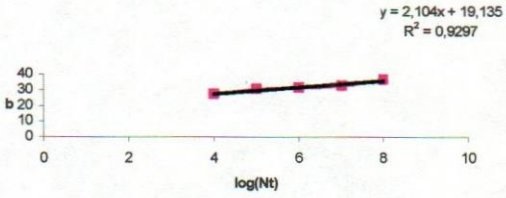
20-40



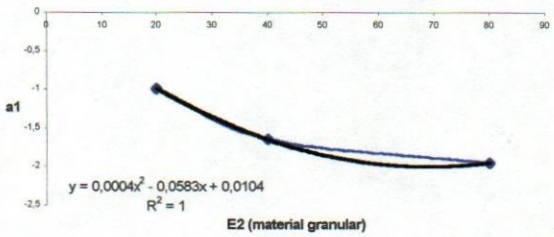


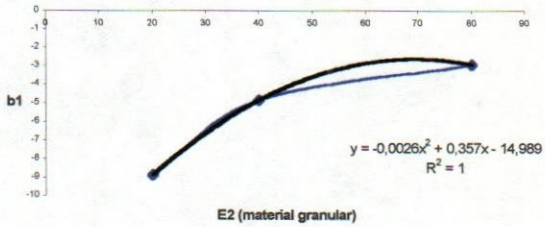
10-20

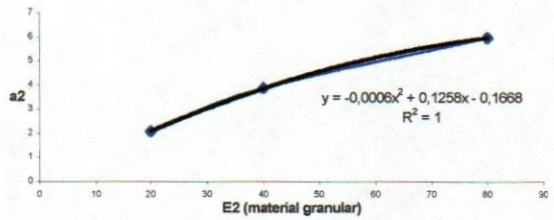


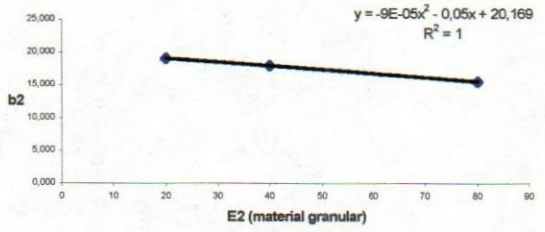


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,9463	-2,9172	5,9811	15,608
40	-1,6448	-4,8312	3,8856	18,03
20	-0,9864	-8,8796	2,104	19,135









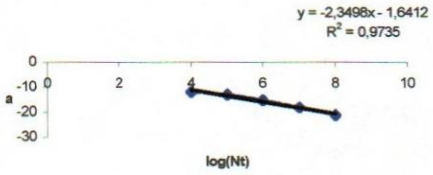
((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

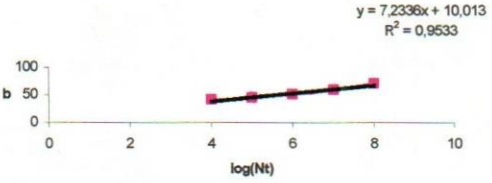
	a1	b1	a2	b2
.1	0,0004	-0,0026	-0,0006	-0,00009
.2	-0,0583	0,357	0,1258	-0,05
.3	0,0104	-14,989	-0,1668	20,169

TMAA>18°C-S1

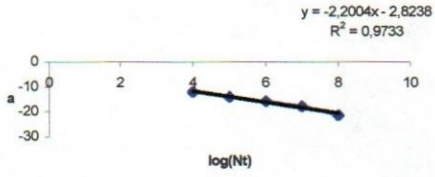
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-21,01	70,574	-21,153	57,252	-19,73	41,079
10000000	7	-17,853	59,352	-17,523	47,932	-17,264	36,819
1000000	6	-15,241	50,619	-15,596	43,358	-12,332	29,299
100000	5	-12,817	44,892	-13,893	38,861	-12,332	28,299
10000	4	-11,779	41,636	-11,966	34,787	-12,332	27,299

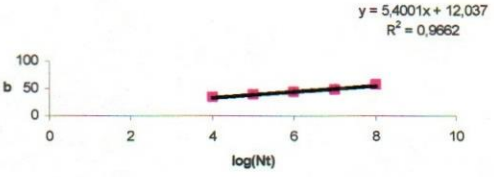
40-80



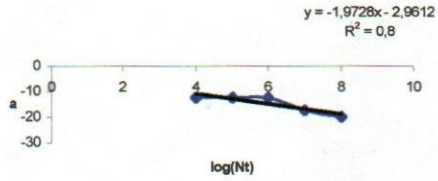


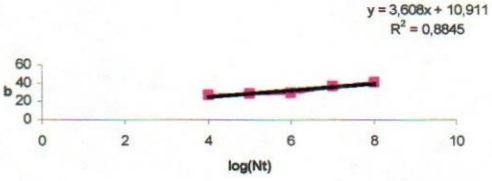
20-40



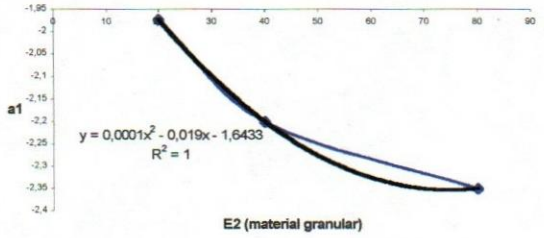


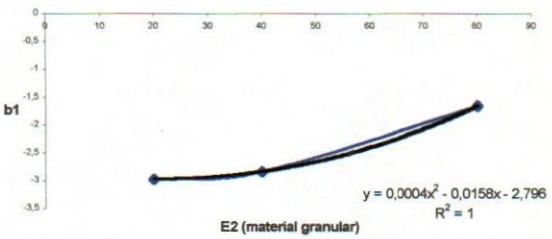
10-20

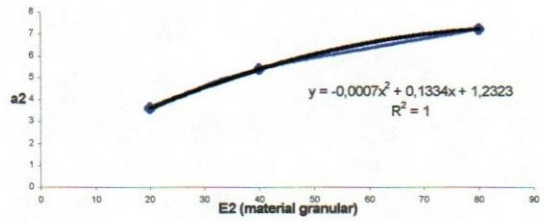


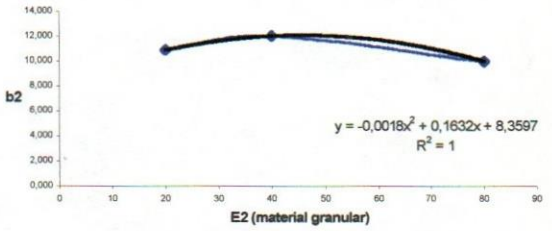


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-2,3498	-1,6412	7,2336	10,013
40	-2,2004	-2,8238	5,4001	12,037
20	-1,9728	-2,9612	3,608	10,911









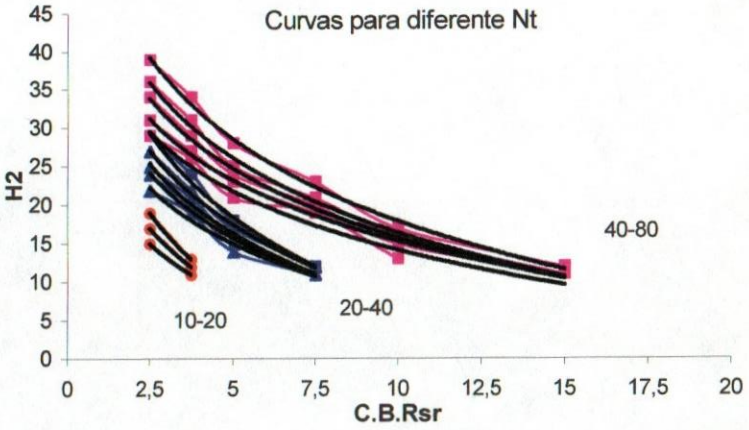
((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	0,0001	0,0004	-0,0007	-0,0018
.2	-0,019	-0,0158	0,1334	0,1632
.3	-1,6433	-2,796	1,2323	8,3597

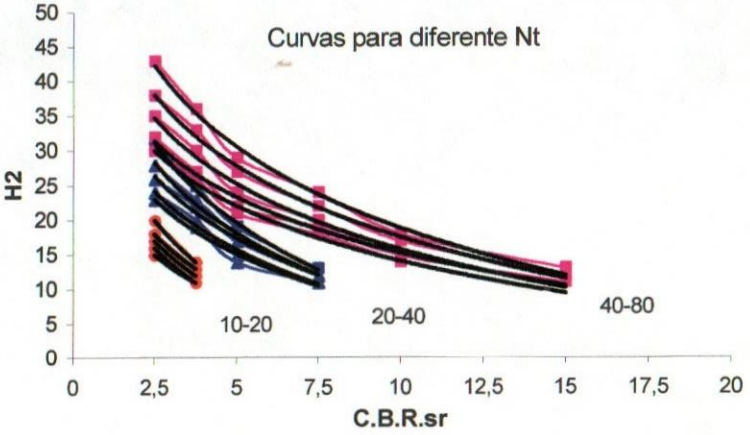
TMAA>18ºC-S2

T.M.A.A. <18ºC

>18ºC.-S1							
Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.=2,5	C.B.R.=3,75	C.B.R.=5	C.B.R.=7,5	C.B.R.=10	C.B.R.=15
10^8	40-80	39	34	28	23	17	12
	20-40	29	24	18	12		
	10-20	19	13				
10^7	40-80	36	31	25	21	16	11
	20-40	27	22	17	12		
	10-20	17	12				
10^6	40-80	34	29	24	20	15	11
	20-40	25	21	16	11		
	10-20	17	12				
10^5	40-80	31	27	23	19	15	
	20-40	24	20	15	11		
	10-20	15	11				
10^4	40-80	29	26	21	19	13	
	20-40	22	19	14	11		
	10-20	15	11				

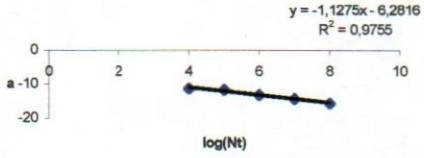


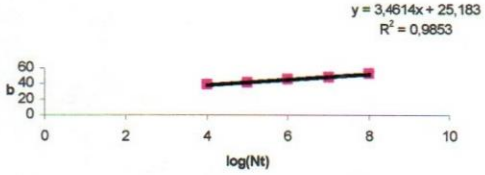
>18ºC.-S2							
Nt	C.B.R. c.g	C.B.R.=2,5	C.B.R.=3,75	C.B.R.=5	C.B.R.=7,5	C.B.R.=10	C.B.R.=15
10^8	40-80	43	36	29	24	18	13
	20-40	31	25	19	13		
	10-20	20	14				
10^7	40-80	38	33	27	22	17	12
	20-40	28	23	18	12		
	10-20	18	13				
10^6	40-80	35	30	24	20	15	11
	20-40	26	22	17	12		
	10-20	17	12				
10^5	40-80	32	27	22	19	15	11
	20-40	24	20	15	11		
	10-20	16	11				
10^4	40-80	30	26	21	18	14	
	20-40	23	19	14	11		
	10-20	15	11				



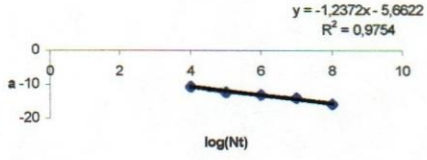
Nt	Log(Nt)	40-80		20-40		10-20	
		a	b	a	b	a	b
100000000	8	-15,467	53,529	-15,819	43,935	-14,798	32,559
10000000	7	-14,095	48,876	-13,893	39,861	-12,332	28,299
1000000	6	-13,043	45,802	-13,041	37,363	-12,332	28,299
100000	5	-11,502	41,782	-12,189	35,364	-9,8652	24,039
10000	4	-11,126	39,769	-10,485	31,867	-9,8652	24,039

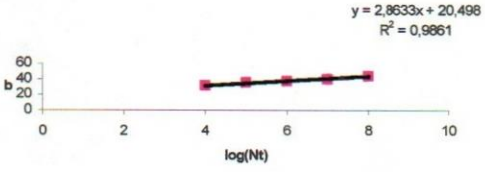
40-80



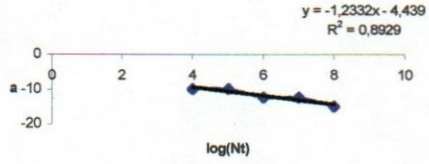


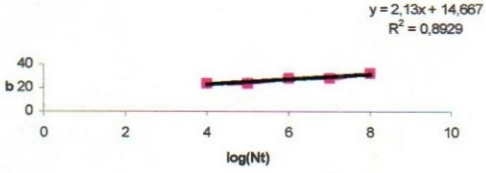
20-40



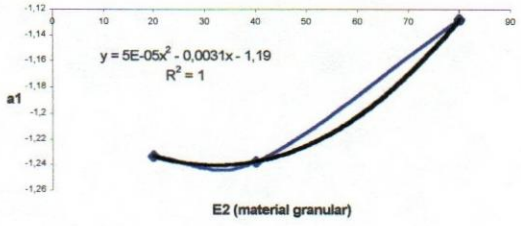


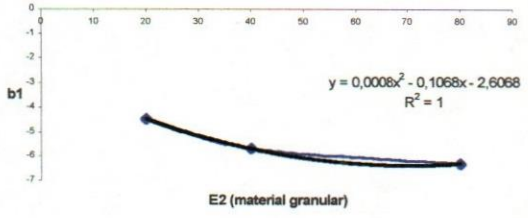
10-20

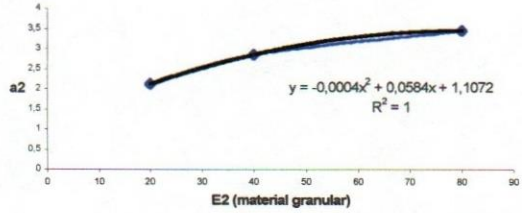


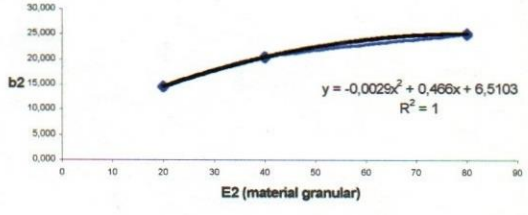


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,1275	-6,2816	3,4614	25,183
40	-1,2372	-5,6622	2,8633	20,498
20	-1,2332	-4,439	2,13	14,667









((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

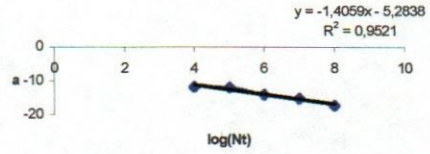
	a1	b1	a2	b2
.1	0,00005	0,0008	-0,0004	-0,0029
.2	-0,0031	-0,1068	0,0584	0,466
.3	-1,19	-2,6068	1,1072	6,5103

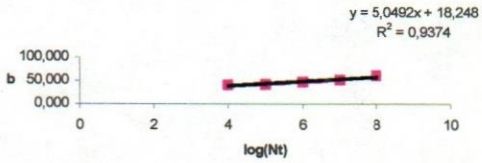
Nt	Log(Nt)	40-80	
		a	b
100000000	8	-16,933	61,019
10000000	7	-14,828	51,704
1000000	6	-13,682	47,294
100000	5	-11,671	42,149
10000	4	-11,482	40,550

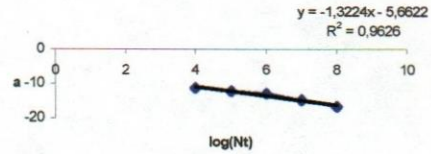
20-40	
a	b
-16,671	46,433
-14,745	41,86
-13,041	38,363
-12,189	35,364
-11,337	33,366

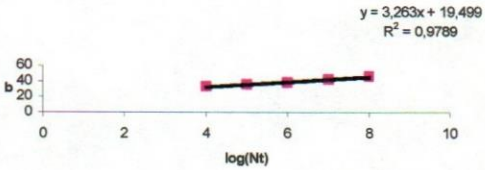
10-20	
a	b
-14,798	33,559
-12,332	29,299
-12,332	28,299
-12,332	27,299
-9,8652	24,039

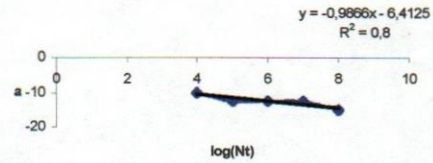
40-80

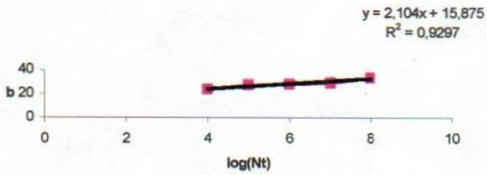




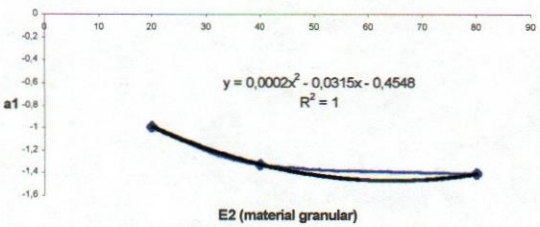


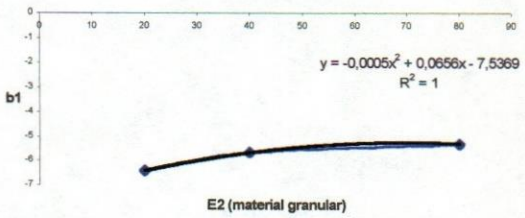


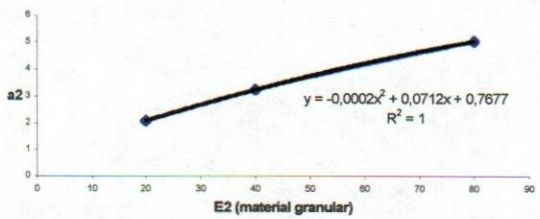


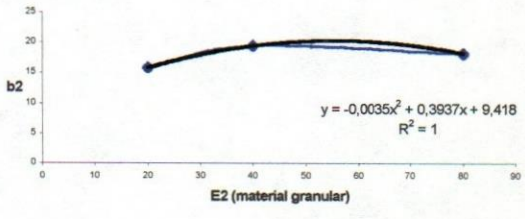


H2=(a1*log(Nt)+b1)*ln(C.B.R.)+a2*log(Nt)+b2				
C.B.R.	a1	b1	a2	b2
80	-1,4059	-5,2838	5,0492	18,248
40	-1,3224	-5,6622	3,263	19,499
20	-0,9866	-6,4125	2,104	15,875









((a11*E2^2+a12*E2+a13)*log(Nt)+(b11*E2^2+b12*E2+b 13))*ln(C.B.R.)+(a21*E2^2+a22*E2+a33)*log(Nt)+((b21*E2^2+b22*E2+b33)

	a1	b1	a2	b2
.1	0,0002	-0,0005	-0,0002	-0,0035
.2	-0,0315	0,0656	0,0712	0,3937
.3	-0,4548	-7,5369	0,7677	9,418

TMAA<18°C-S2

PROGRAMA MTC
Manual del Usuario

MANUAL DEL USUARIO PARA LA APLICACION DEL PROGRAMA "MTC "

1.- Introducción

La elaboración de este Manual representa una gran ayuda para el usuario, pues este no requerirá de avanzados conocimientos de computación ni de Estructuras de Pavimento, según sea el caso.

El enfoque es el de brindar un procedimiento general, en el cual se lleva al usuario de la mano mediante el desarrollo de un ejemplo, de lo que al final, el mismo habrá elaborado su primer diseño y alcanzado una rápida adaptación con el programa.

Es de destacar que el programa MTC surge como parte de un Trabajo Especial de Grado de la Universidad Católica Andrés Bello, y el mismo consiste en la Elaboración de Diseños de Estructuras de Pavimentos Flexibles según lo establecido por el Método M.T.C. 1982 y las mejoras propuestas al Método, en cuanto a limitar los espesores de los Materiales Granulares, que brindan aporte estructural, como bien sugiere dicho Trabajo Especial de Grado.

El programa MTC se ha Diseñado y Compilado mediante el uso del programa Visual Basic versión 5, el cual tiene la virtud de desarrollar aplicaciones bajo ambiente Windows independientes.

2.- Indice

1.- Introducción 1

2.- Indice 2

3.- Instalación 3

4.- Recomendaciones Previas (Convenios) 4

5.- Como usar el programa 5

5.1.- Opciones de Diseño 7

5.2.- Parámetros externos y Espesor Mínimo requerido por las Mezclas Asfálticas. 7

5.2.1.- Determinación de Nt. 8

5.2.1.1.- PDT 9

5.2.1.2.- Factor de Ajuste para Transito Desbalanceado (A). 10

5.2.1.3.- Factor Canal (C). 11

5.2.1.4.- Factor de Crecimiento de Tráfico (F). 11

5.2.2.- Determinación de la Temperatura. 13

5.2.3.- Determinación del Rta. 14

5.2.4.- Determinación del Espesor mínimo requerido por las Mezclas Asfálticas. 14

5.3.- Parámetros Estructurales. 15

5.3.1.- Determinación del Coeficiente Estructural de la Capa Asfáltica para Rodamiento 16

5.3.2.- Determinación del Coeficiente Estructural de la Capa Asfáltica para Base 17

5.3.3.- Determinación del Coeficiente Estructural de las Capas Granulares para Base y Subbase 18

3.- Instalación

Se disponen de dos Disquetes, los cuales deben estar debidamente identificados, uno como *Disquete 1* y el otro como *Disquete 2*. Se considera como requisito fundamental para la instalación del Programa, que el usuario posea *Windows 3.x* ó *Windows 9x*. El procedimiento de instalación consiste en:

1° Inserte el disquete identificado con el nombre Disquete 1 en la unidad para disquetes o unidad *A* (A:\)

2° Pulse el botón *Inicio*, localizado en la parte inferior izquierda de su pantalla, y pulse *Ejecutar*.

3° Escriba *A:\Setup.exe* en el campo Abrir, o presione *Examinar...* para buscar el archivo ejecutable en el disquete (*Setup.exe*).

4° Presione *Aceptar* y el Programa de Instalación aparecerá.

5° Siga los pasos que el Programa de Instalación le sugiera.

Al finalizar la instalación, usted encontrará en el menú de *Programas* el icono asociado con el Programa MTC.

4.- Recomendaciones Previas (Convenios)

A cerca del uso del Programa, resulta conveniente mencionar una serie de aspectos relativos a la interacción *Usuario – Programa.*

1) En cuanto a la introducción de datos, el Programa siempre advertirá acerca de la validación de la información suministrada en los siguientes casos: Si ésta resultase fuera del rango permitido para el valor en cuestión, si la ejecución de un cálculo o avance en el Programa carece de la información necesaria para su ejecución, cuando el avance de ventana en ventana se quiera realizar sin llenar todas las casillas de datos.

2) La introducción de caracteres (a ,b ,c ... ¿, @, &, %, ... etc.) en las casillas de datos puede originar trastornos en la ejecución del Programa.

3) El Programa tiene la capacidad de permitir al usuario avanzar o retroceder durante su ejecución, con lo que el usuario podría manejar varias alternativas en cuanto a la determinación de variables y características del diseño. También existe la posibilidad de *Omitir* una ventana sin que esto produzca algún problema.

4) En la mayoría de las ventanas de calculo se dispone de un botón *Calcular*, el cual amplía el aspecto a considerar para su determinación.

5) Una forma alternativa de desplazamiento por las casillas de datos es mediante la pulsación de la tecla "Tabulador" (*TAB*). Pulsaciones sucesivas desplazan el enfoque por todas las casillas y botones de la ventana.

6) Los números con decimales se introducen usando coma (,) en al caso de versiones de Windows en Español y punto (.) para versiones de en Ingles.

De forma que el usuario pueda orientarse, en cuanto al rango de valores de cada variable, se presenta la *Tabla 1* para tal fin.

VARIABLE	Mínimo	Máximo
Nt (c.e.)	10.000	100.000.000
C.B.R. sr (%)	2,5	20
Temperatura (°C)	0	28
C.B.R. para Base Granular (°C)	60 / 80	100
C.B.R. para Subbase Granular (°C)	20	60
Estabilidad Marshall (Lbs.) de Concreto Asfáltico en Capas de Rodamiento	500	3000
Estabilidad Marshall (Lbs.) de Mezclas Asfálticas en Capas de Base	340	2000
Espesor Mínimo de Mezclas Asfálticas (cm.)	5	50
Coeficiente Estructural para Concreto Asfáltico en Capas de Rodamiento (a_1)	0,201	0,450
Coeficiente Estructural para Mezclas Asfálticas en Capas de Base (a_1)	0,139	0,380
Coeficiente Estructural para Materiales Granulares para Base y Subbase (a_1)	0,09	0,141
Espesor Mínimo de Material Granular a Colocar (cm.)	10	-

Tabla 1

5.- Cómo usar el programa

La forma más conveniente que hemos encontrado para orientar a toda la diversidad de usuarios posibles, es simplemente mediante la elaboración de un Diseño hipotético de una tramo de vía en estudio, el cual servirá a la vez de ejemplo.

Transito :

Pendiente longitudinal (P) = 4 %

Fecha de Puesta en servicio = 1er Trimestre del año 1999

PDT_{1994} = 2000 veh./día

Tasa de Crecimiento del Transito (r) = 5 %, fija hasta el año 2020

Periodo de Servicio (n) = 20 años

Porcentaje de Vehículos Pesados (%Vp) = 2 %

Factor Camión (Fc) = 2,75

El Transito se considera Balanceado y la vía posee dos canales por sentido.

Características de los Materiales:

Concreto Asfáltico Tipo IV (Densamente Gradado) de Estabilidad = 2000 Lbs.

Base Asfáltica en Caliente I (Densamente Gradada) de Estabilidad = 1200 Lbs.

C.B.R. de la Subrasante = 2,5 %

Grava Picada de C.B.R. = 50 %

Granzón de Mina de C.B.R. = 30 %

Características Climáticas:

Altitud de la vía = 900 m.s.n.m.

Modelo Estructural Sugerido:

Se sugiere el siguiente uso de los Materiales:

Rodamiento : Concreto Asfáltico Tipo IV

Base Asfáltica: Base Asfáltica en Caliente I

Subbase Granular 1 : Grava Picada

Subbase Granular 2 : Granzon de Mina

5.1.- Opciones de Diseño.

El Programa cuenta con cinco (5) Modelos Estructurales de Pavimento Flexible. Para el Diseño a desarrollar, seleccione el modelo que posea una Capa de Asfáltica para Rodamiento (RODAMIENTO), una Capa Asfáltica de Base (B. ASFALTICA) y dos Capas Granulares de Subbase (S.B. GRANULAR 1 y S.B. GRANULAR 2), tal y como se muestra en la *Figura 1.*

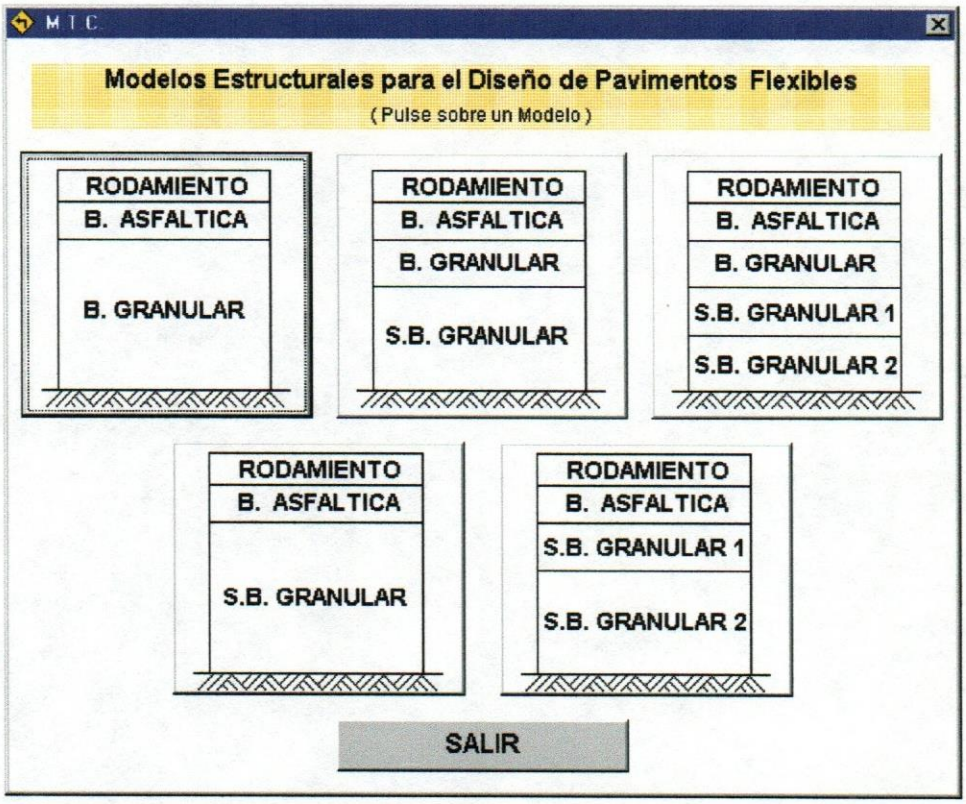


Figura 1

5.2.- Parámetros externos y Espesor Mínimo requerido por la Mezcla Asfáltica.

A continuación el Programa presenta la ventana correspondiente a la determinación de Parámetros externos y Espesor Mínimo requerido por la Mezcla Asfáltica (*Figura 2*).

Asígnele a la casilla correspondiente C.B.R.sr el valor de 2,5. Luego, para determinar el valor del Nt, presione el botón *Calcular*, que se encuentra junto a esta casilla.

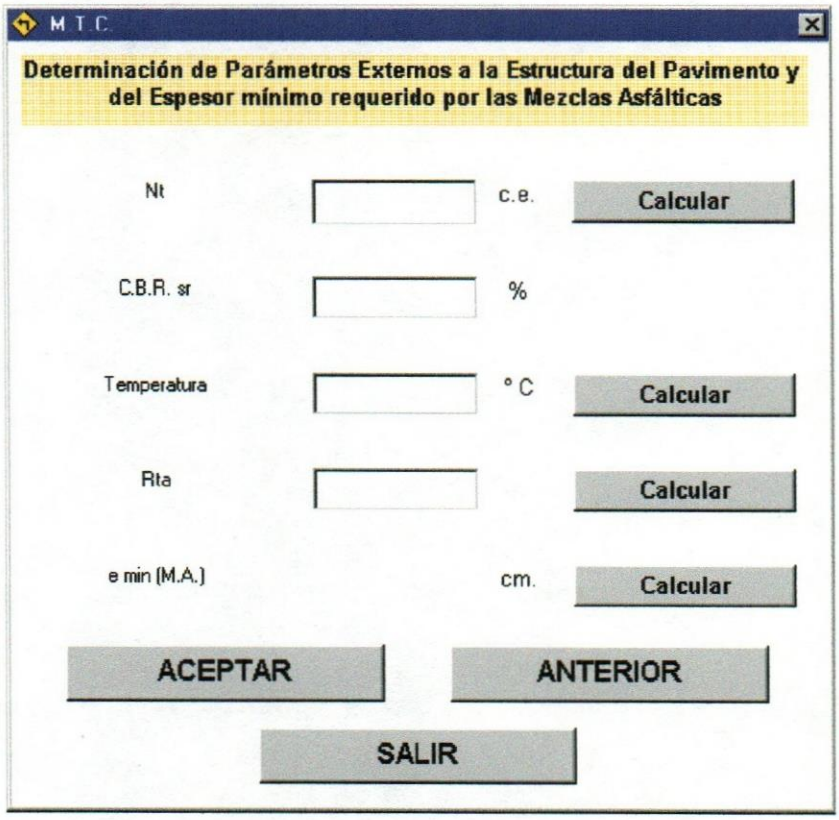


Figura 2

5.2.1.- Determinación de Nt.

Seguidamente se muestra la ventana correspondiente al calculo del Nt (*Figura 3*). En las casillas donde no exista un botón *Calcular*, se supone que el usuario conoce dicha información y deberá colocarla.; pero en las que dicho botón si exista, el usuario podrá, tanto colocar la información directamente, si esta es conocida, o calcularla pulsando el botón adecuado, según sea la variable a determinar. Introduzca la siguiente información en la casilla correspondiente:

Pendiente = 4

K = 365 (este es un valor predeterminado por el Programa)

%Vp = 20

Fc = 2,75

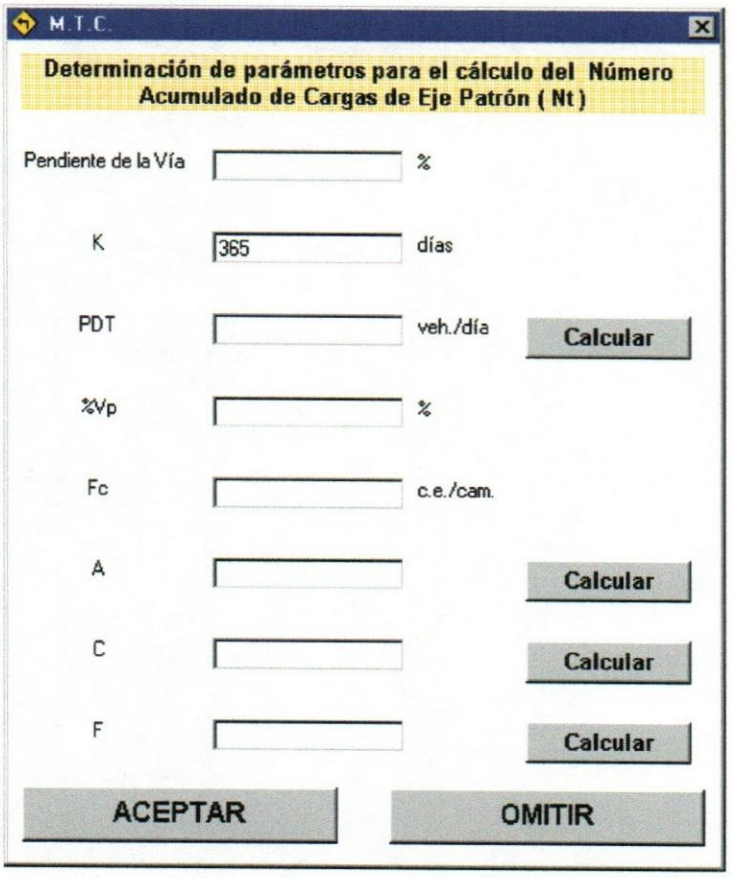


Figura 3

5.2.1.1.- Promedio Diario de Transito (PDT)

Para determinar el valor del PDT debe presionar el botón *Calcular*, el cual se encuentra junto a la casilla de datos asignada para esta variable, con lo que aparecerá, junto a la ventana anterior (*Figura 3*), la ventana destinada al calculo del PDT (*Figura 4*), en la que introducirá la siguiente información:

PDTo = 2000 (PDT_{1994})

r = 5

n = 5 (1er Trimestre del año 1999)

Si pulsa el botón *Calcular PDT*, el resultado se mostrará en color rojo en la parte inferior. Pulse *Aceptar* para concluir y regresar a la ventana anterior.

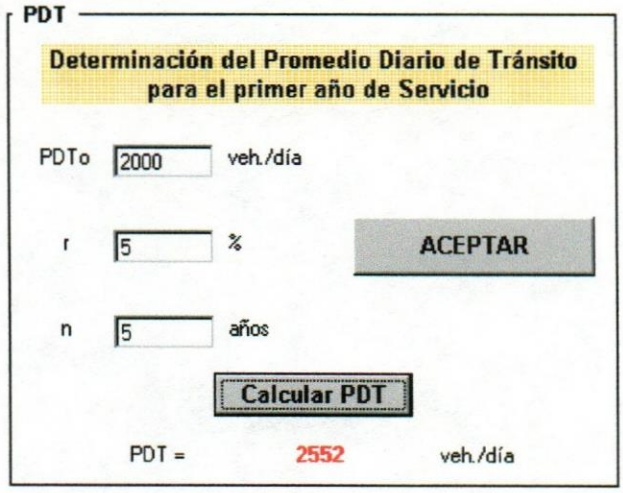


Figura 4

5.2.1.2.- Factor de Ajuste para Transito Desbalanceado (A)

Para determinar el valor A, debe presionar el botón *Calcular*, el cual se encuentra junto a la casilla de datos asignada para esta variable, con lo que aparecerá, la ventana destinada para la determinación de esta variable (*Figura 5*), en ella seleccione la opción *Balanceado*. Alternativamente, existe la opción de colocar un Factor a conveniencia del usuario mediante la selección de la opción *Otro*. Pulse Aceptar para concluir

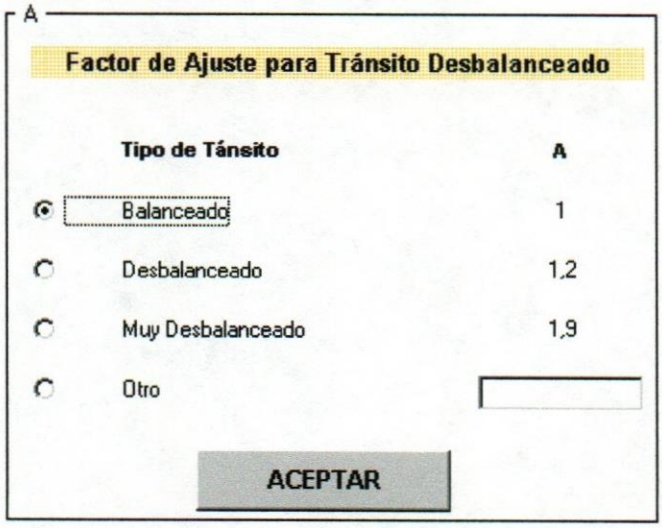


Figura 5

5.2.1.3.- Factor Canal (C)

Para determinar el valor C , debe presionar el botón *Calcular*, el cual se encuentra junto a la casilla de datos asignada para esta variable, con lo que aparecerá, la ventana destinada para la determinación de esta variable (*Figura 6*), en ella seleccione la opción de *2 Canales*. Alternativamente, existe la opción de colocar un Factor a conveniencia del usuario mediante la selección de la opción *Otro*. Pulse *Aceptar* para concluir.

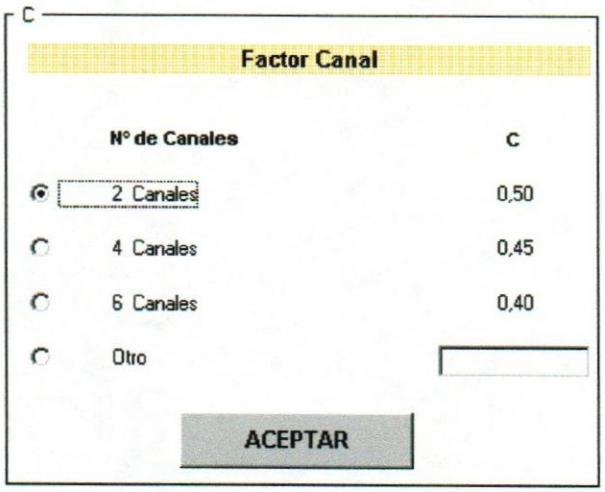


Figura 6

5.2.1.4.- Factor de Crecimiento de Transito (F)

Para determinar el valor F , debe presionar el botón *Calcular*, el cual se encuentra junto a la casilla de datos asignada para esta variable, con lo que aparecerá, la ventana destinada para la determinación de esta variable (*Figura 7*), en ella introducirá la siguiente información:

n = 20 (Proyección del Transito parta veinte años 1999 - 2019)
r = 5

Si pulsa el botón *Calcular F*, el resultado se mostrará en color rojo en la parte inferior. Pulse *Aceptar* para concluir.

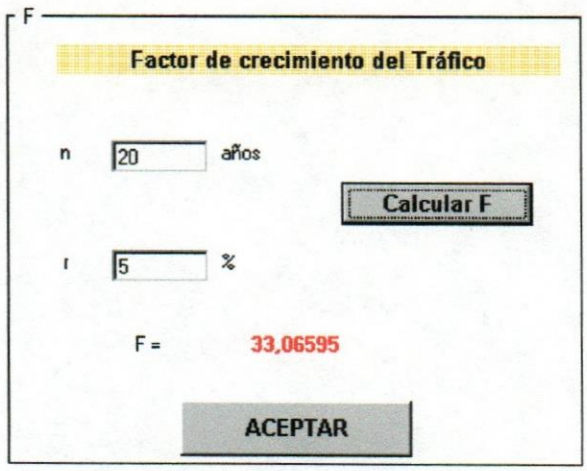


Figura 7

Al finalizar la introducción de datos, la ventana para el calculo del Nt deberá poseer la siguiente apariencia (*Figura 8*):

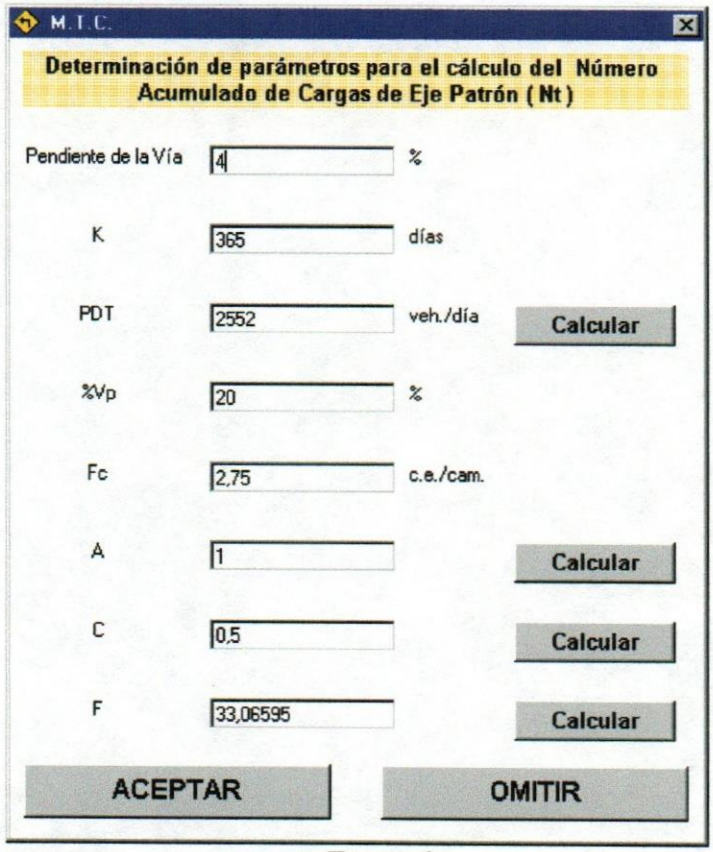


Figura 8

Pulse *Aceptar* para continuar, u *Omitir* para deshacer todo y regresar a la ventana anterior

5.2.2.- Determinación de la Temperatura.

El Programa presenta dos formas de fijar el valor de la Temperatura, una de estas depende del conocimiento de la Altitud donde se construirá la vía, y la otra, dependerá del criterio del usuario. Adicionalmente, se presenta un dibujo, el cual sirve de ayuda para seleccionar la Altitud, según el tipo de Clima, o la Temperatura, según la Altitud o tipo de Clima.

Asigne, a la casilla relativa a la Altitud, el valor 900 (*Figura 9*). Si pulsa el botón *Temperatura en ºC*, aparecerá el valor correspondiente de la Temperatura, para dicha Altitud, en color rojo.

Pulse Aceptar para continuar, u *Omitir* para deshacer todo y regresar a la ventana anterior.

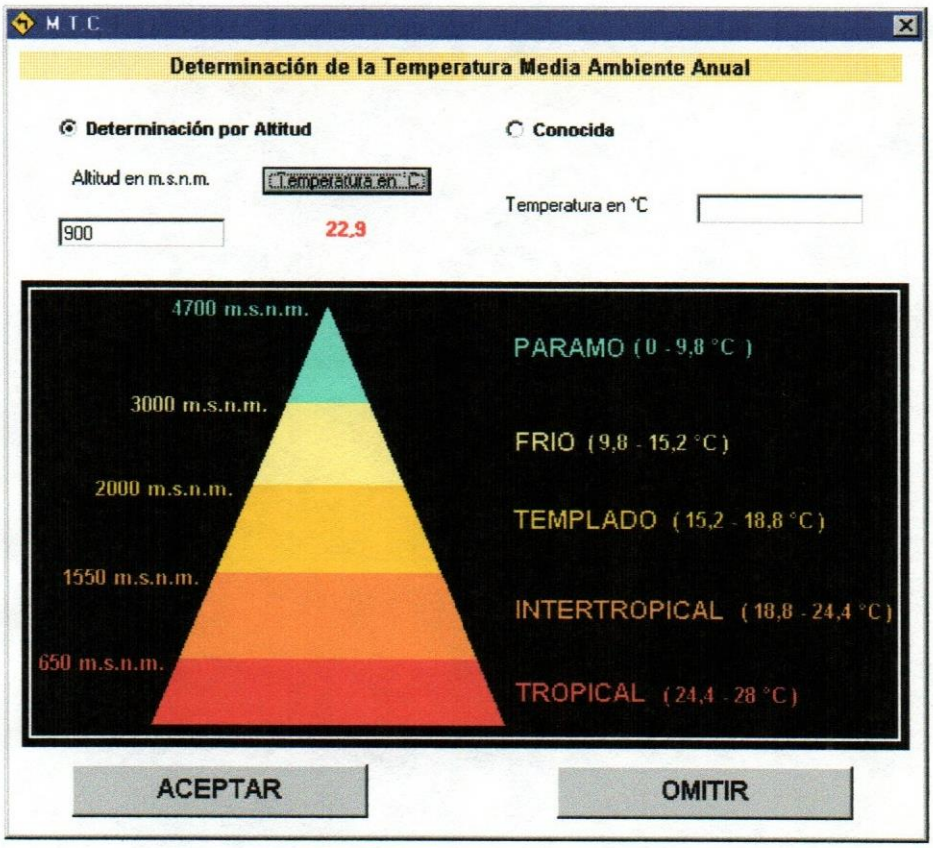


Figura 9

5.2.3.- Determinación del Rta.

Para su determinación, simplemente pulse el botón *Calcular* que se encuentra al lado de la casilla de datos. El valor del Rta está en función del valor de la Temperatura, así que, si éste no ha sido determinado, el Programa mostrará un mensaje de Atención.

5.2.4.- Determinación del Espesor mínimo requerido por las Mezclas Asfálticas.

Para la determinación de este parámetro, el usuario debe pulsar obligatoriamente el botón *Calcular*. Luego se presentará una ventana en la que se observan dos alternativas de Mezcla Asfáltica, seleccione la alternativa correspondiente a *Mezclas Asfálticas Densamente Gradadas* (*Figura 10*). Este parámetro depende del valor C.B.R. de la Subrasante y del Nt, así que se supone que éstos ya han sido introducidos o calculados. Si pulsa el botón *Calcular*, aparecerá el valor correspondiente al Espesor Mínimo en color rojo.

Pulse Aceptar para continuar, u *Omitir* para deshacer todo y regresar a la ventana anterior.

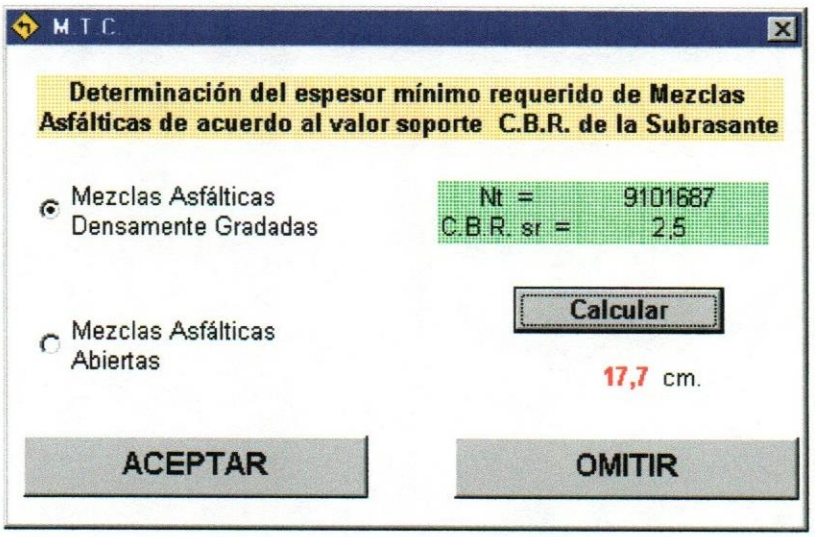


Figura 10

Al finalizar la introducción de valores, la ventana relativa a Parámetros Externos y Espesor Mínimo de Mezcla Asfáltica deberá poseer la siguiente apariencia (*Figura 11*):

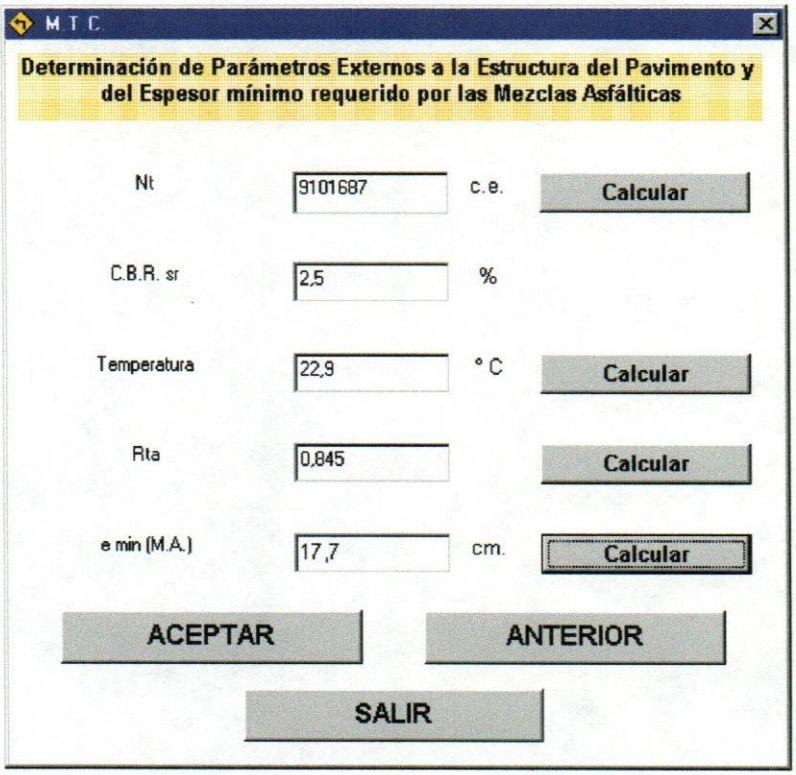


Figura 11

Pulse *Aceptar* para continuar, o *Anterior* para deshacer todo y regresar a la ventana anterior

5.3.- Parámetros Estructurales.

En conformidad con el Modelo Estructural seleccionado, el Programa presenta a continuación una ventana en la que se podrán colocar las propiedades de los Materiales Asfálticos y Granulares (Estabilidad Marshall y C.B.R.) como sus Coeficientes Estructurales (a1). Además, se cuenta con un botón de ayuda, el cual muestra, según el tipo de Material, el rango de valores disponibles que los caracteriza.

Esta ventana se muestra a continuación en la *Figura 12*:

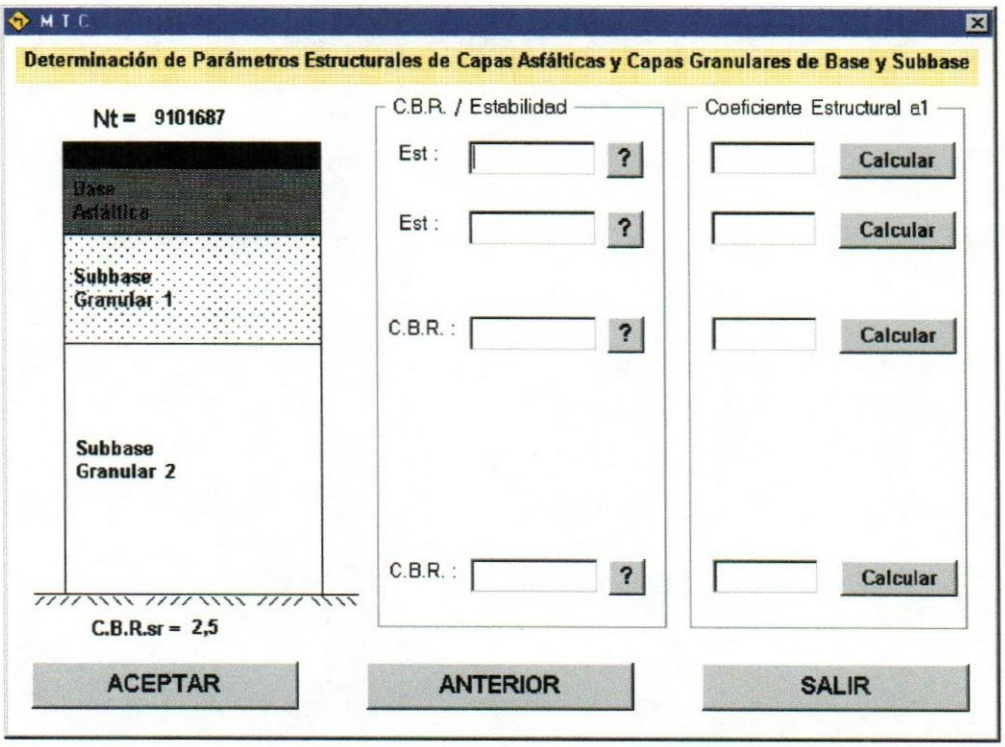


Figura 12

Introduzca los siguientes valores en las casillas de datos correspondientes valores :

Est = 2000 Rodamiento
Est = 1200 Base Asfáltica
C.B.R. = 50 Subbase Granular 1
C.B.R. = 30 Subbase Granular 2

5.3.1.- Determinación del Coeficiente Estructural de la Capa Asfáltica para Rodamiento

Si el usuario conoce el valor de "a1", solamente deberá escribirlo en la casilla (esto implica que conoce perfectamente las propiedades del material y si este esta densamente gradado o no); en caso contrario, pulse el botón *Calcular*, para abrir la ventana relativa al calculo de dicho coeficiente (*Figura 13*), y seleccione la opción *Mezcla Densamente Gradadas Tipo I a V*. Puede pulsar el botón *Calcular* para verificar el valor.

Pulse *Aceptar* para continuar , u Omitir para deshacer todo y regresar a la ventana anterior.

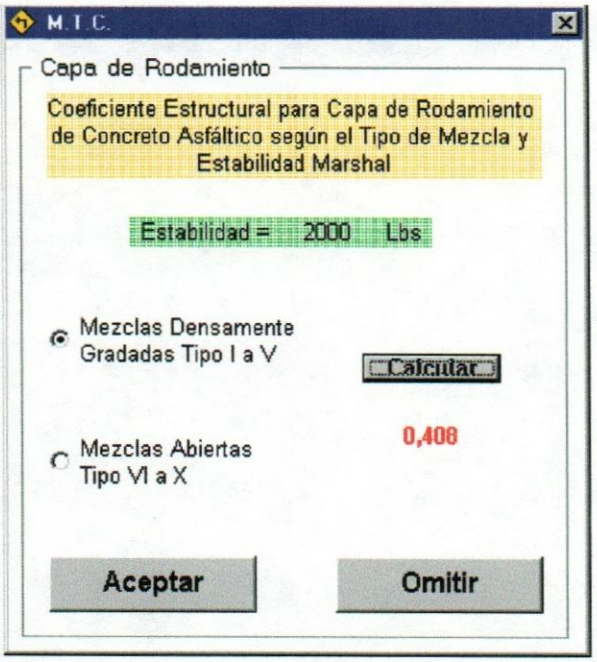


Figura 13

5.3.2.- Determinación del Coeficiente Estructural de la Capa Asfáltica para Base

Si el usuario conoce el valor de "a1", solamente deberá escribirlo en la casilla (esto implica que conoce perfectamente las propiedades del material y si este esta densamente gradado o no); en caso contrario, pulse el botón *Calcular*, para abrir la ventana relativa al calculo de dicho coeficiente (*Figura 14*), y seleccione la opción *Base Asfáltica en Caliente y Mezclas Abiertas de Concreto Asfáltico*. Puede pulsar el botón *Calcular* para verificar el valor.

Pulse *Aceptar* para continuar , u Omitir para deshacer todo y regresar a la ventana anterior

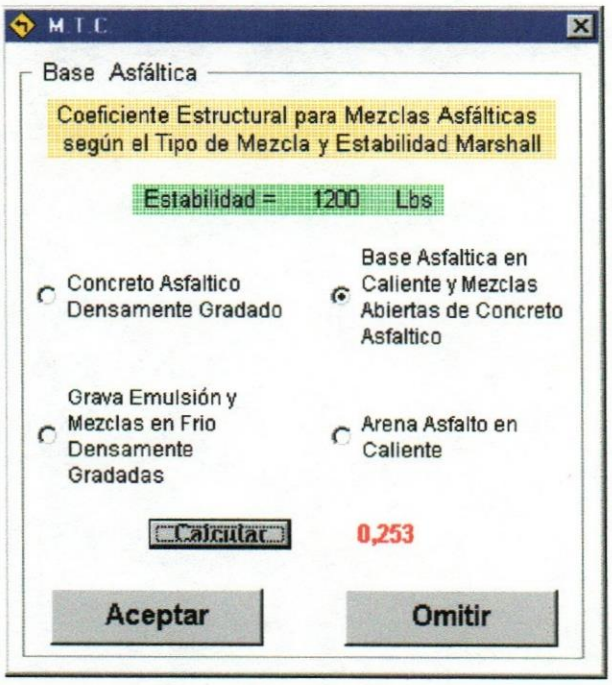


Figura 14

5.3.3.- Determinación del Coeficiente Estructural de las Capas Granulares para Base y Subbase

Si el usuario conoce el valor de "a1", solamente deberá escribirlo en la casilla (esto implica que conoce perfectamente las propiedades del material y cómo este ha sido Compactado); en caso contrario, pulse el botón *Calcular*, para abrir la ventana relativa al calculo de dicho coeficiente (*Figuras 15* y *16*), y seleccione la opción *Compactación Dinámica*, para los dos materiales de Subbase. Puede pulsar el botón *Calcular* para verificar el valor.

Pulse *Aceptar* para continuar , u Omitir para deshacer todo y regresar a la ventana anterior

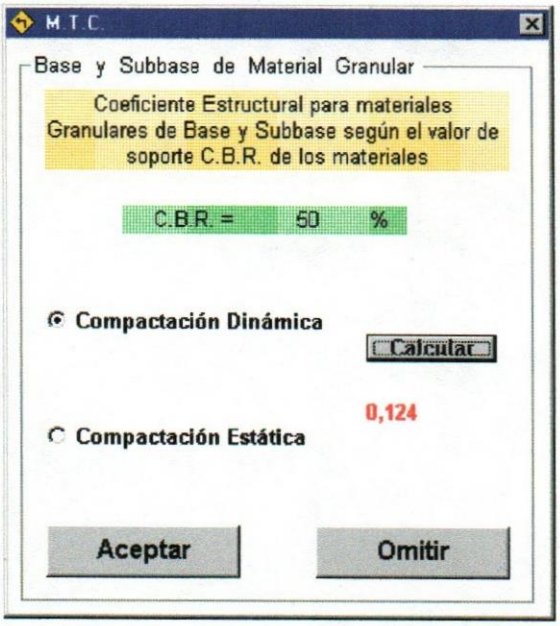


Figura 15

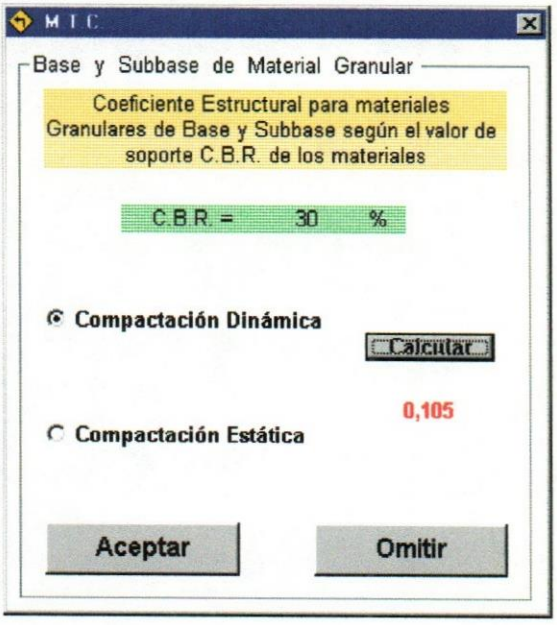


Figura 16

Los Botones de Ayuda (?) abrirán las siguientes ventanas: una para Materiales Asfálticos (Figura 17), y otra para Materiales Granulares (Figura 18).

Figura 17

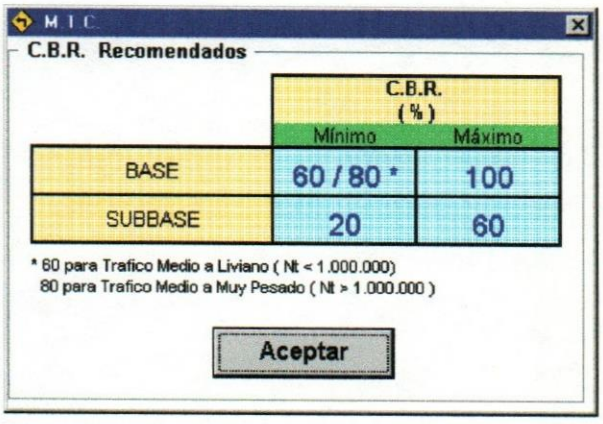


Figura 18

Al final, la ventana correspondiente a los Parámetros Estructurales de los Materiales deberá presentar la siguiente apariencia (Figura 19):

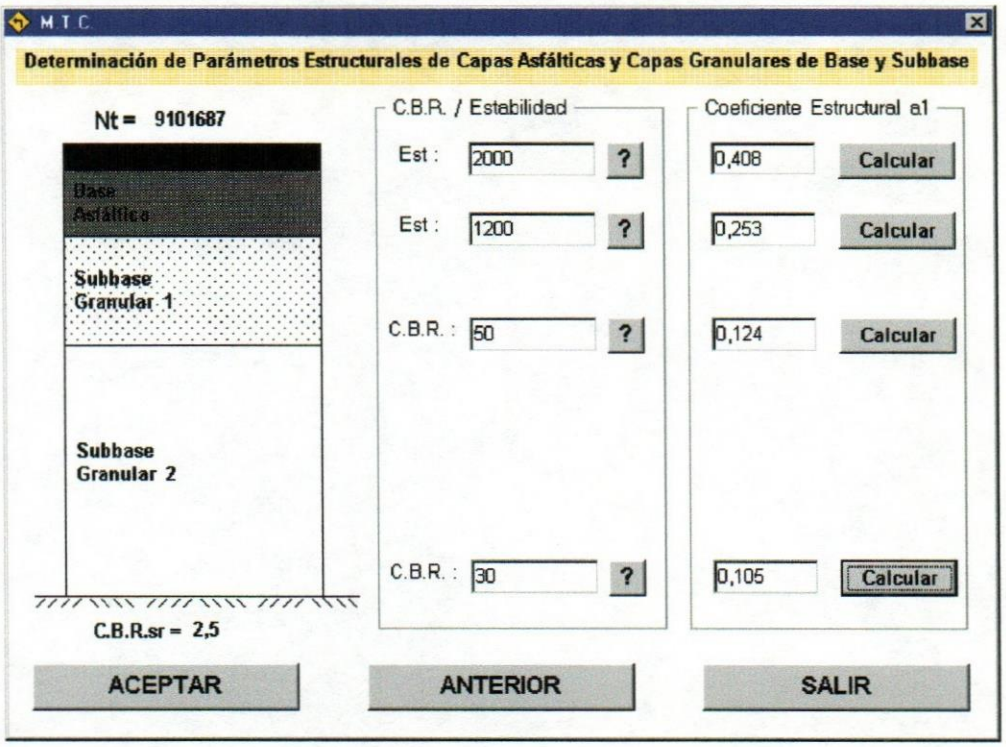


Figura 19

Pulse *Aceptar* para continuar, o *Anterior* para deshacer todo y regresar a la ventana anterior

A continuación se presentará una ventana pidiéndole al usuario que pulse *Aceptar* con la finalidad de procesar toda la información y posterior presentación de la última venta se Resultados Finales de Espesores requeridos (*Figura 20* y *21*). Pulse *Aceptar*.

Figura 20

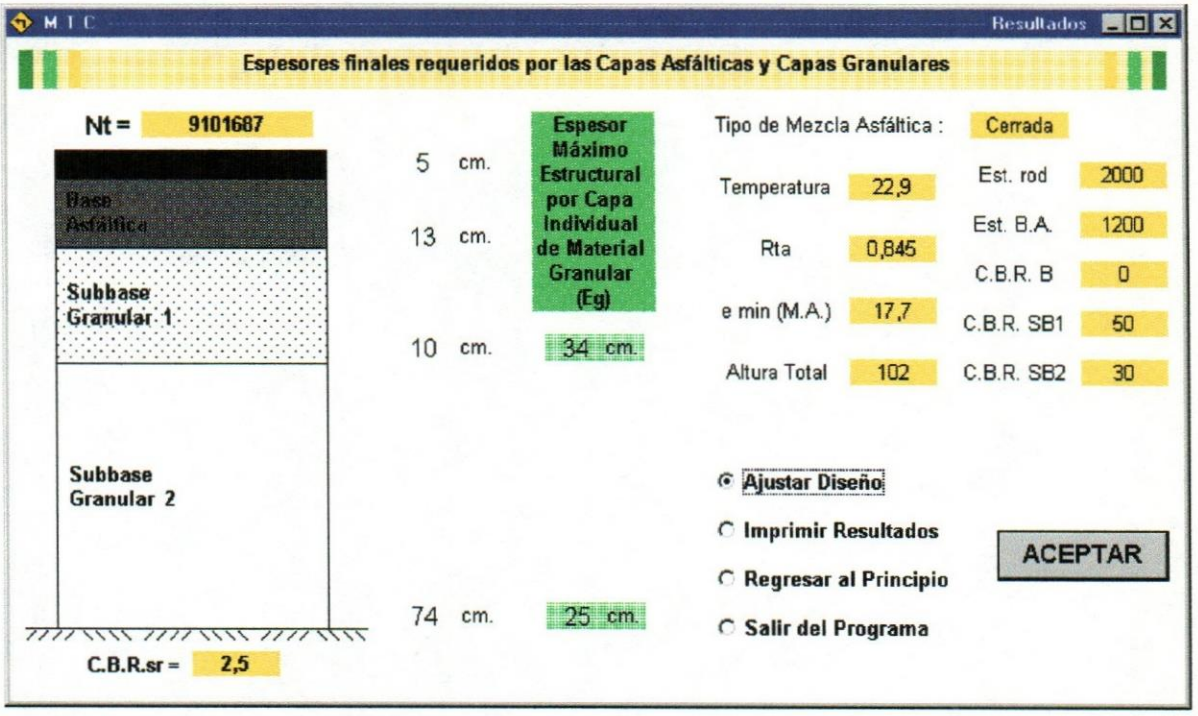


Figura 21

La ventana presenta un breve resumen de los cálculos más importantes realizados por el Programa, como los Espesores Requeridos de cada Material (Método M.T.C. 1982) y el Espesor Máximo Estructural, por Capa, de Material Granular.

El usuario ahora podrá:

- Ajustar el Diseño (Ajustando las los espesores de las Capas Granulares según el espesor asignado, a cada material, como estructural.)
- Imprimir los Resultados (Imprime la ventana tal y como esta se presenta).
- Regresar al Principio (*Figura 1*).
- Salir del Programa.

Ahora seleccione la opción *Ajustar Diseño* y pulse el botón *Aceptar*. En este momento el Programa realiza los cálculos relativos pertinentes, mostrando al final una ventana como la que se presenta la *Figura 22.*

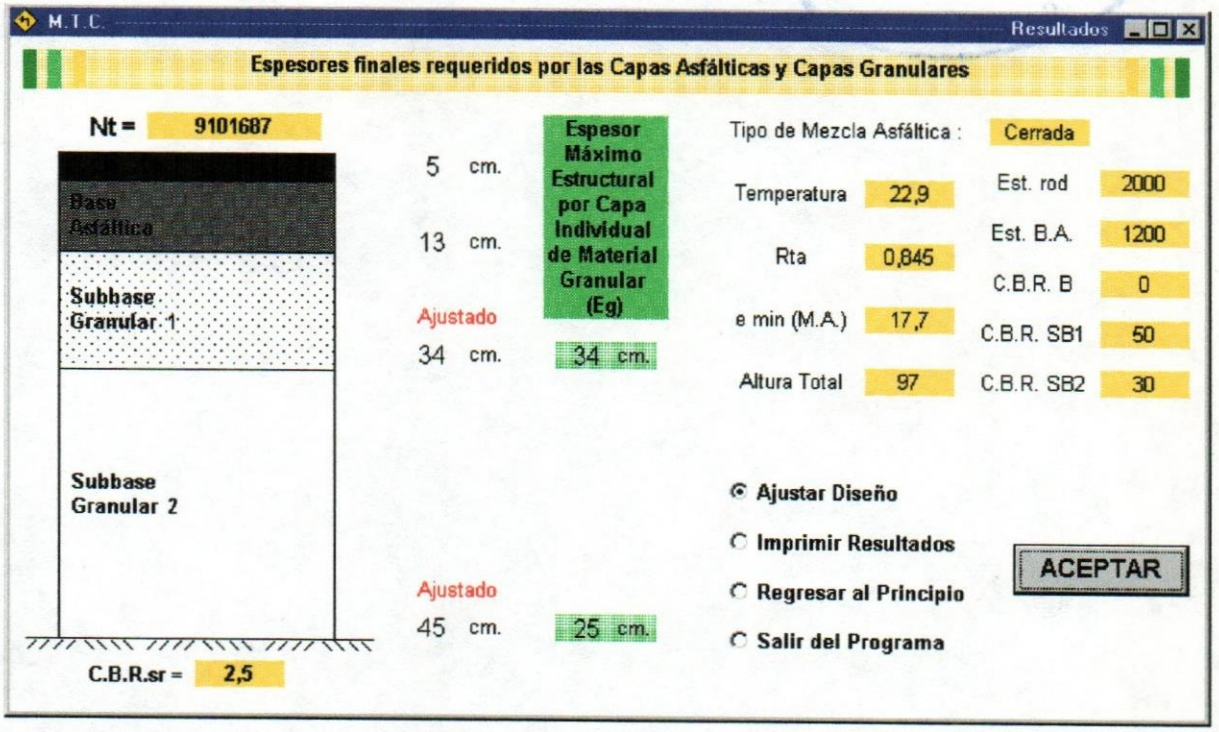


Figura 22

Nótese que el Programa muestra el mensaje *Ajustado*, encima del nuevo valor calculado. En algunos casos, el usuario podrá realizar sucesivos Ajustes del Diseño si repite el mismo procedimiento; en caso de que el diseño no pueda seguir siendo ajustado, el Programa mostrará un mensaje (Ver *Figura 23*).

Figura 23

Felicitaciones !!!, ahora usted ha realizado su primer diseño mediante el uso del Programa MTC.

Seleccione la opción *Salir del Programa* y pulse el botón *Aceptar*, y el Programa se cerrará por completo.