

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA  
DE FABRICACIÓN

**TESIS DOCTORAL**

**OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE  
EDIFICIOS METÁLICOS EN BASE A ALGORITMOS  
GENÉTICOS.**

**DIRECTORES:**

*Dr. Antonio Bello García*

*Dr. Juan José Del Coz Díaz*

**AUTOR:**

*María Belén Prendes Gero*

GIJÓN 2002

## **RECONOCIMIENTOS**

*En primer lugar, quisiera expresar mi más profunda gratitud a los Doctores:*

*D. Antonio Bello García y Don Juan José Del Coz Díaz, sin cuya cooperación, apoyo y valiosa ayuda, no habría sido posible la realización de este trabajo.*

*Al Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación de la Universidad de Oviedo, por haberme facilitado todos los medios necesarios para el desarrollo de la misma.*

*Por último, quiero agradecer a mi familia, la paciencia que han demostrado durante los últimos años.*

## **RESUMEN.**

### **Introducción.**

En los tiempos antiguos el diseño estructural consistía simplemente en repetir lo que se había hecho en el pasado, con muy poco conocimiento del comportamiento del material o de la teoría estructural. El éxito o el fracaso se determinaban simplemente según que el edificio o el puente soportara la carga real o se colapsara por sus efectos.

Gradualmente, a través de los siglos de experiencia, evolucionó el arte de dimensionar los elementos estructurales, se establecieron reglas empíricas, se consiguieron progresos en las técnicas de estructuras que permitieron que el diseño estructural pasara de ser un arte a una ciencia aplicada.

Durante los últimos 40 años se ha prestado una atención cada vez mayor a la evaluación de las propiedades inelásticas de los materiales y al cálculo directo de la resistencia última de cada miembro. Lo que ha llevado al diseño por “*factor de carga*”.

En la década de 1980 los métodos estructurales de diseño pasaron por cambios muy rápidos a medida que en más y más especificaciones se hizo un mayor hincapié en el diseño por factor de carga también denominado diseño por “*estados límites*”.

En este tiempo se incrementó la utilización de ordenadores en el diseño de las estructuras, en su análisis, en la producción de planos de diseño detallados, etc.

El empleo de ordenadores ha permitido que estos análisis sean más precisos, reales y eficaces y la velocidad con que analizan las diferentes soluciones consigue diseños más económicos que en el pasado.

El siguiente paso es el desarrollo de una técnica que sustituya al diseño convencional, obteniendo un diseño completo de la estructura. Esta técnica se conoce como “*optimización estructural*” y lo que pretende es obtener soluciones extremas que satisfagan los criterios de diseño prescritos de una forma racional, sin recaer en la

intuición o habilidad del diseñador, englobar el proceso de selección de los elementos estructurales y comprobar que los criterios de diseño se cumplan.

Debido a las limitaciones de fabricación, los elementos estructurales no son variables continuas sino discretas, lo que ha llevado al desarrollo de técnicas de optimización discretas.

El análisis de estas técnicas permite definir a los algoritmos genéticos como una técnica de optimización robusta y eficaz, adecuada a problemas metálicos tridimensionales.

## **Objetivos.**

En este trabajo se pretende:

- Analizar los algoritmos genéticos así como los operadores y los parámetros que los definen, con el fin de diseñar y desarrollar un nuevo algoritmo genético, denominado “*elitista*”, capaz de obtener el peso mínimo de la estructura bajo restricciones ambientales de tensión y coeficientes de seguridad marcados por la Normativa considerada.
- Desarrollar un nuevo operador de cruce denominado “*cruce por un fenotipo*” que intercambie secciones ya existentes y no cree nuevas secciones.
- Desarrollar un nuevo operador de selección denominado “*aptitud*” que elimine los peores individuos de cada generación.
- Modificar y ajustar los parámetros que definen el algoritmo genético elitista.
- Comparar el operador de cruce desarrollado con el “*cruce por un punto*” y el “*cruce por dos puntos*”.
- Comparar los resultados obtenidos empleando distintas Normativas de seguridad.

- Aplicar el algoritmo genético elitista a estructuras metálicas en dos y tres dimensiones y comparar los resultados obtenidos con dicho algoritmo con los obtenidos empleando el programa de cálculo de estructuras convencional CYPE.
- Verificar los resultados obtenidos con el módulo CIVILFEM del programa de cálculo por elementos finitos ANSYS.

## **Plan de trabajo.**

El trabajo se desarrollará estructurado en las siguientes etapas:

- Recopilación bibliográfica (estado del arte) y seguimiento de los materiales y métodos utilizados en la construcción de estructuras metálicas, haciendo especial hincapié en la evolución del diseño convencional hacia la optimización estructural.
- Análisis de la optimización estructural y estudio de las diferentes técnicas de optimización, con el fin de establecer aquella más adecuada aplicada a estructuras metálicas tridimensionales.
- Investigación de los algoritmos genéticos con el objetivo de conocer los operadores y los parámetros que lo definen.
- Desarrollo de un algoritmo genético robusto y fiable que se adapte al estudio de estructuras metálicas con nuevos operadores de cruce y selección.
- Por último, desarrollo de un entorno gráfico para la modificación y el ajuste de los parámetros y operadores que definen el algoritmo genético. La implementación informática se desarrollará en lenguaje C++, tratando de realizar módulos lo más portables posibles entre diferentes sistemas operativos (Windows, UNÍS, MAC).

---

---

# ÍNDICES

---

---

## ÍNDICE GENERAL.

<i>ÍNDICE DE MATERIAS.....</i>	<i>ii</i>
<i>ÍNDICE DE ANEXOS.....</i>	<i>v</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS. ....</i>	<i>vii</i>
<i>ÍNDICE DE FOTOS.....</i>	<i>xvi</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS.....</i>	<i>xviii</i>

# ÍNDICE DE MATERIAS.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.

<i>1.1</i>	<i>Desarrollo histórico en el proceso constructivo.....</i>	<i>1</i>
<i>1.2</i>	<i>Importancia de la estructura en el diseño de edificios. ....</i>	<i>14</i>
<i>1.3</i>	<i>La necesidad de optimización. ....</i>	<i>19</i>

## CAPÍTULO 2. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.

<i>2.1</i>	<i>Introducción. ....</i>	<i>22</i>
<i>2.2</i>	<i>Formulación del problema de optimización.....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.1</i>	<i>Variables de diseño. ....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Restricciones. ....</i>	<i>23</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Función objetivo.....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Formulación estándar.....</i>	<i>24</i>
<i>2.3</i>	<i>Características de los problemas de optimización discretos. ....</i>	<i>25</i>
<i>2.4</i>	<i>Técnicas de optimización estructural. ....</i>	<i>26</i>

## CAPÍTULO 3. ALGORITMOS GENÉTICOS.

<i>3.1</i>	<i>Introducción. ....</i>	<i>30</i>
<i>3.2</i>	<i>Codificación de las variables de diseño.....</i>	<i>32</i>
<i>3.3</i>	<i>Anatomía de un algoritmo genético simple.....</i>	<i>34</i>
<i>3.3.1</i>	<i>Composición de la población.....</i>	<i>38</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Gestión de restricciones.....</i>	<i>38</i>
<i>3.3.3</i>	<i>Criterios de convergencia.....</i>	<i>39</i>

## CAPÍTULO 4. ALGORITMO GENÉTICO ELITISTA.

<i>4.1</i>	<i>Introducción. ....</i>	<i>42</i>
<i>4.2</i>	<i>Algoritmo genético elitista. ....</i>	<i>43</i>

4.2.1	<i>Operador de cruce por un fenotipo.....</i>	43
4.2.2	<i>Operador reproductor aptitud.....</i>	44
4.2.3	<i>Composición de la población.....</i>	46
4.2.4	<i>Codificación de las variables de diseño.....</i>	48
4.2.5	<i>Función objetivo modificada.....</i>	50
4.2.6	<i>Flujo del algoritmo genético elitista.....</i>	54
<b>4.3</b>	<b><i>Ajuste inicial de los parámetros del algoritmo genético elitista.....</i></b>	<b>55</b>
4.3.1	<i>Tamaño de la población.....</i>	59
4.3.2	<i>Probabilidad de mutación.....</i>	64
4.3.3	<i>Probabilidad de cruce.....</i>	67
4.3.4	<i>Probabilidad de élite.....</i>	71
<b>4.4</b>	<b><i>Validación del operador de cruce.....</i></b>	<b>75</b>
<b>4.5</b>	<b><i>Comparación de normativas.....</i></b>	<b>79</b>
<b>4.6</b>	<b><i>Contraste de resultados.....</i></b>	<b>82</b>
<b>4.7</b>	<b><i>Verificación de resultados.....</i></b>	<b>85</b>
<b>4.8</b>	<b><i>Análisis y discusión de los resultados.....</i></b>	<b>88</b>

## **CAPÍTULO 5. ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES.**

<b>5.1</b>	<b><i>Introducción.....</i></b>	<b>91</b>
<b>5.2</b>	<b><i>Primera estructura analizada.....</i></b>	<b>91</b>
5.2.1	<i>Optimización estructural. Programa GADEMO.....</i>	95
5.2.2	<i>Verificación de resultados.....</i>	98
5.2.3	<i>Redimensionamiento de barras. Programa CYPE.....</i>	101
5.2.4	<i>Comparación de resultados.....</i>	103
<b>5.3</b>	<b><i>Segunda estructura analizada.....</i></b>	<b>105</b>
5.3.1	<i>Optimización estructural. Programa GADEMO.....</i>	108
5.3.2	<i>Verificación de resultados.....</i>	110
5.3.3	<i>Redimensionamiento de barras. Programa CYPE.....</i>	113
5.3.4	<i>Comparación de resultados.....</i>	115

5.4 *Conclusiones*..... 115

**CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO.**

6.1 *Conclusiones*..... 118

6.2 *Líneas futuras de desarrollo.* ..... 120

## ÍNDICE DE ANEXOS.

### ANEXO I. PROGRAMA ESCAL3D.

<b>I.1</b>	<b>Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>I.2</b>	<b>Generalidades.</b>	<b>2</b>
<b>I.3</b>	<b>Descripción del programa.</b>	<b>8</b>
<b>I.4</b>	<b>Módulo E3DPRE.</b>	<b>9</b>
<b>I.5</b>	<b>Módulo SECCIÓN.</b>	<b>10</b>
<b>I.6</b>	<b>Módulo SOLVE.</b>	<b>11</b>
I.6.1	Análisis estático.	12
I.6.1.1	Gradiente biconjugado.	14
I.6.1.2	Gradiente conjugado cuadrado.	16
I.6.1.3	Gradiente biconjugado estabilizado.	16
I.6.1.4	Iteración de Chebyshev.	17
I.6.1.5	Iteración de Richardson.	18
I.6.1.6	Método de residuo casi-mínimo.	18
I.6.2	Análisis dinámico.	20
I.6.2.1	Combinación Cuadrática Completa	21
I.6.2.2	Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados.	22
<b>I.7</b>	<b>Módulo COMESC.</b>	<b>22</b>
I.7.1	Comprobación de los estados tensionales.	22
I.7.2	Comprobación de inestabilidad según la norma MV-103.	24
I.7.3	Comprobación de inestabilidades según el Eurocódigo3.	26
I.7.4	Norma Americana AISC-LRFD.	28
I.7.5	Norma Francesa CM-66.	30

### ANEXO II. PROGRAMA GADEMO.

<b>II.1</b>	<b>Introducción.</b>	<b>1</b>
-------------	----------------------	----------

<b>II.2</b>	<b>Generalidades.....</b>	<b>1</b>
<b>II.3</b>	<b>Descripción del programa.....</b>	<b>6</b>
<b>II.4</b>	<b>Módulo de LECTURA DE BASE DE DATOS. ....</b>	<b>6</b>
<b>II.5</b>	<b>Módulo INICIO.....</b>	<b>7</b>
<b>II.6</b>	<b>Módulo INTERMEDIO.....</b>	<b>7</b>
<b>II.7</b>	<b>Módulo de LECTURA DE PESO.....</b>	<b>11</b>
<b>II.8</b>	<b>Módulo GADEMO. ....</b>	<b>12</b>
<b>II.9</b>	<b>Librería GALIB.....</b>	<b>14</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS.

### CAPÍTULO 2. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.

<i>fig. 2.1. Representación gráfica de un problema no lineal.</i> .....	25
---	----

### CAPÍTULO 3. ALGORITMOS GENÉTICOS.

<i>fig. 3.1. Representación binaria de los cromosomas de un individuo de la población.</i> .....	33
<i>fig. 3.2. Flujo de un algoritmo genético simple.</i> .....	34
<i>fig. 3.3. Probabilidad de selección.</i> .....	35
<i>fig. 3.4. Cruce por un punto para cadenas binarias.</i> .....	36
<i>fig. 3.5. Cruce por dos puntos para cadenas binarias.</i> .....	37
<i>fig. 3.6. Mutación sobre cadenas binarias.</i> .....	37
<i>fig. 3.7. Creación de nuevas poblaciones.</i> .....	38

### CAPÍTULO 4. ALGORITMO GENÉTICO ELITISTA.

<i>fig. 4.1. Cruce por un fenotipo para cadenas binarias.</i> .....	43
<i>fig. 4.2. Composición de nuevas poblaciones.</i> .....	48
<i>fig. 4.3. Coeficiente de penalización lineal.</i> .....	53
<i>fig. 4.4. Coeficiente de penalización exponencial.</i> .....	53
<i>fig. 4.5. Coeficiente de penalización aplicado.</i> .....	53
<i>fig. 4.6. Flujo del algoritmo genético elitista.</i> .....	54
<i>fig. 4.7. Estructura articulada bidimensional de 10 barras.</i> .....	55
<i>fig. 4.8. Entorno gráfico del programa ESCAL3D.</i> .....	56
<i>fig. 4.9. Representación binaria de los cromosomas de un individuo de la población.</i> .....	57
<i>fig. 4.10. Efecto del <math>N_p</math> sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función. <math>P_e = 30\%</math>, <math>P_c = 70\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i> .....	59
<i>fig. 4.11. Efecto del <math>N_p</math> sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función. <math>P_e = 50\%</math>, <math>P_c = 50\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i> .....	59

<i>fig. 4.12. Efecto del <math>N_p</math> sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función. <math>P_e = 50\%</math>, <math>P_c = 50\%</math> y <math>P_{mut} = 1\%</math>.</i>	59
<i>fig. 4.13. Efecto del <math>N_p</math> y <math>P_{mut}</math> sobre el peso medio. <math>P_e = 50\%</math>, <math>P_c = 50\%</math>.</i>	60
<i>fig. 4.14. Efecto del <math>N_p</math> y <math>P_{mut}</math> sobre el número medio de evaluaciones de función. <math>P_e = 50\%</math>, <math>P_c = 50\%</math>.</i>	60
<i>fig. 4.15. Efecto del <math>N_p</math> sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio. <math>P_e = 30\%</math>, <math>P_c = 70\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i>	61
<i>fig. 4.16. Efecto del <math>N_p</math> sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio. <math>P_e = 50\%</math>, <math>P_c = 50\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i>	61
<i>fig. 4.17. Efecto del <math>N_p</math> sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio. <math>P_e = 50\%</math>, <math>P_c = 50\%</math> y <math>P_{mut} = 1\%</math>.</i>	61
<i>fig. 4.18. Efecto del <math>N_p</math> sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función. <math>P_e = 30\%</math>, <math>P_c = 70\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i>	62
<i>fig. 4.19. Efecto del <math>N_p</math> sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función. <math>P_e = 50\%</math>, <math>P_c = 50\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i>	62
<i>fig. 4.20. Efecto del <math>N_p</math> sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función. <math>P_e = 50\%</math>, <math>P_c = 50\%</math> y <math>P_{mut} = 1\%</math>.</i>	62
<i>fig. 4.21. Efecto del <math>N_p</math> sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función. <math>P_e = 30\%</math>, <math>P_c = 70\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i>	63
<i>fig. 4.22. Efecto del <math>N_p</math> sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función. <math>P_e = 50\%</math>, <math>P_c = 50\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i>	63
<i>fig. 4.23. Efecto del <math>N_p</math> sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función. <math>P_e = 50\%</math>, <math>P_c = 50\%</math> y <math>P_{mut} = 1\%</math>.</i>	63

<i>fig. 4.24. Efecto de la <math>P_{mut}</math> sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math>, <math>P_c = 70\%</math>.....</i>	<i>64</i>
<i>fig. 4.25. Efecto de la <math>P_{mut}</math> sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 30\%</math>, <math>P_c = 50\%</math>.....</i>	<i>64</i>
<i>fig. 4.26. Efecto de la <math>P_{mut}</math> sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math> y <math>P_c = 70\%</math>.....</i>	<i>65</i>
<i>fig. 4.27. Efecto de la <math>P_{mut}</math> sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 30\%</math> y <math>P_c = 50\%</math>.....</i>	<i>65</i>
<i>fig. 4.28. Efecto de la <math>P_{mut}</math> sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math> y <math>P_c = 70\%</math>.....</i>	<i>66</i>
<i>fig. 4.29. Efecto de la <math>P_{mut}</math> sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 30\%</math> y <math>P_c = 50\%</math>.....</i>	<i>66</i>
<i>fig. 4.30. Efecto de la <math>P_{mut}</math> sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math> y <math>P_c = 70\%</math>.....</i>	<i>66</i>
<i>fig. 4.31. Efecto de la <math>P_{mut}</math> sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 30\%</math> y <math>P_c = 50\%</math>.....</i>	<i>66</i>
<i>fig. 4.32. Efecto de la <math>P_c</math> sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math>, <math>P_{mut} = 1\%</math>.....</i>	<i>67</i>
<i>fig. 4.33. Efecto de la <math>P_c</math> sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math>, <math>P_{mut} = 2\%</math>.....</i>	<i>67</i>
<i>fig. 4.34. Efecto de la <math>P_c</math> sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math> y <math>P_{mut} = 1\%</math>.....</i>	<i>68</i>
<i>fig. 4.35. Efecto de la <math>P_c</math> sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math> y <math>P_{mut} = 2\%</math>.....</i>	<i>68</i>
<i>fig. 4.36. Efecto de la <math>P_c</math> sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math> y <math>P_{mut} = 1\%</math>.....</i>	<i>68</i>

<i>fig. 4.37. Efecto de la <math>P_c</math> sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math> y <math>P_{mut} = 2\%</math>.....</i>	68
<i>fig. 4.38. Efecto de la <math>P_c</math> sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math> y <math>P_{mut} = 1\%</math>.....</i>	69
<i>fig. 4.39. Efecto de la <math>P_c</math> sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_e = 10\%</math> y <math>P_{mut} = 2\%</math>.....</i>	69
<i>fig. 4.40. Efecto de las <math>P_c</math> y <math>P_{mut}</math> sobre el peso medio.....</i>	70
<i>fig. 4.41. Efecto de las <math>P_c</math> y <math>P_{mut}</math> sobre el peso medio de las barras.....</i>	70
<i>fig. 4.42. Efecto de las <math>P_c</math> y <math>P_{mut}</math> sobre el coeficiente máximo.....</i>	70
<i>fig. 4.43. Efecto de las <math>P_c</math> y <math>P_{mut}</math> sobre el número medio de evaluaciones.....</i>	70
<i>fig. 4.44. Efecto de la <math>P_e</math> sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_c = 100\%-P_e</math>, <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.....</i>	71
<i>fig. 4.45. Efecto de la <math>P_e</math> sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_c = 100\%-P_e</math>, <math>P_{mut} = 2\%</math>.....</i>	71
<i>fig. 4.46. Efecto de la <math>P_e</math> sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio. <math>N_p = 20</math>, <math>P_c = 100\%-P_e</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.....</i>	72
<i>fig. 4.47. Efecto de la <math>P_e</math> sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio. <math>N_p = 20</math>, <math>P_c = 100\%-P_e</math> y <math>P_{mut} = 2\%</math>.....</i>	72
<i>fig. 4.48. Efecto de la <math>P_e</math> sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_c = 100\%-P_e</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.....</i>	72
<i>fig. 4.49. Efecto de la <math>P_e</math> sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_c = 100\%-P_e</math> y <math>P_{mut} = 2\%</math>.....</i>	72
<i>fig. 4.50. Efecto de la <math>P_e</math> sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función. <math>N_p = 20</math>, <math>P_c = 100\%-P_e</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.....</i>	73

fig. 4.51. Efecto de la $P_e$ sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función. $N_p = 20$ , $P_c = 100\% - P_e$ y $P_{mut} = 2\%$ .	73
fig. 4.52. Efecto de las $P_e$ y $P_{mut}$ sobre el peso medio.	74
fig. 4.53. Efecto de las $P_e$ y $P_{mut}$ sobre el peso medio de las barras.	74
fig. 4.54. Efecto de las $P_e$ y $P_{mut}$ sobre el número medio de evaluaciones.	74
fig. 4.55. Efecto de las $P_e$ y $P_{mut}$ sobre el número medio de generaciones.	74
fig. 4.56. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio. $P_e = 30\%$ , $P_c = 70\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	77
fig. 4.57. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio. $P_e = 50\%$ , $P_c = 50\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	77
fig. 4.58. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio de los coeficientes. $P_e = 30\%$ , $P_c = 70\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	77
fig. 4.59. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio de los coeficientes. $P_e = 50\%$ , $P_c = 50\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	77
fig. 4.60. Efecto del tipo de cruce sobre el valor medio del coeficiente máximo. $P_e = 30\%$ , $P_c = 70\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	78
fig. 4.61. Efecto del tipo de cruce sobre el valor medio del coeficiente máximo. $P_e = 50\%$ , $P_c = 50\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	78
fig. 4.62. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio de las barras. $P_e = 30\%$ , $P_c = 70\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	78
fig. 4.63. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio de las barras. $P_e = 50\%$ , $P_c = 50\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	78
fig. 4.64. Efecto del tipo de cruce sobre el valor medio del número de evaluaciones efectuadas. $P_e = 30\%$ , $P_c = 70\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	78
fig. 4.65. Efecto del tipo de cruce sobre el valor medio del número de evaluaciones efectuadas. $P_e = 50\%$ , $P_c = 50\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	78
fig. 4.66. Efecto del tipo de normativa sobre el peso medio. $P_e = 30\%$ , $P_c = 70\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	80
fig. 4.67. Efecto del tipo de normativa sobre el peso medio de los coeficientes. $P_e = 30\%$ , $P_c = 70\%$ y $P_{mut} = 0,5\%$ .	80

<i>fig. 4.68. Efecto del tipo de normativa sobre el valor medio del coeficiente máximo. <math>P_e = 30\%</math>, <math>P_c = 70\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i>	81
<i>fig. 4.69. Efecto del tipo de normativa sobre el peso medio de las barras. <math>P_e = 30\%</math>, <math>P_c = 70\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i>	81
<i>fig. 4.70. Efecto del tipo de normativa sobre el valor medio del número de evaluaciones efectuadas. <math>P_e = 30\%</math>, <math>P_c = 70\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i>	82
<i>fig. 4.71. Efecto del tipo de normativa sobre el valor medio del número de generaciones efectuadas. <math>P_e = 30\%</math>, <math>P_c = 70\%</math> y <math>P_{mut} = 0,5\%</math>.</i>	82
<i>fig. 4.72. Asignación de perfiles en el programa CYPE.</i>	83
<i>fig. 4.73. Comprobación de barras tras el redimensionamiento.</i>	84
<i>fig. 4.74. Verificación de los perfiles de optimización con el programa ESCAL3D.</i>	86
<i>fig. 4.75. Comprobación a tensión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.</i>	86
<i>fig. 4.76. Comprobación a compresión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.</i>	87
<i>fig. 4.77. Comprobación a pandeo de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.</i>	87

## **CAPÍTULO 5. ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES.**

<i>fig. 5.1. Estructura de pórticos tridimensional (cotas en cm).</i>	92
<i>fig. 5.2. Agrupación de barras en la estructura de pórticos tridimensional.</i>	93
<i>fig. 5.3. Población inicial generada al azar, de la primera evolución de la estructura de pórticos.</i>	96
<i>fig. 5.4. Individuo óptimo de la primera evolución realizada para la estructura de pórticos.</i>	97
<i>fig. 5.5. Coeficientes de seguridad del mejor individuo óptimo según el programa ESCAL3D.</i>	99
<i>fig. 5.6. Comprobación a tensión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.</i>	100
<i>fig. 5.7. Comprobación a compresión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.</i>	100

<i>fig. 5.8. Comprobación a pandeo de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.</i>	101
<i>fig. 5.9. Comprobación de las secciones iniciales según el programa CYPE.</i>	102
<i>fig. 5.10. Comprobación de las barras de la estructura redimensionada según el programa CYPE.</i>	103
<i>fig. 5.11. Edificio metálico analizado (cotas en cm).</i>	105
<i>fig. 5.12. Secciones iniciales en el edificio metálico.</i>	106
<i>fig. 5. 13. Población inicial generada al azar de la tercera evolución del edificio metálico.</i>	108
<i>fig. 5. 14. Individuo óptimo de la tercera evolución del edificio metálico.</i>	108
<i>fig. 5.15. Coeficientes de seguridad del mejor individuo óptimo según el programa ESCAL3D.</i>	111
<i>fig. 5.16. Comprobación a tensión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.</i>	111
<i>fig. 5.17. Comprobación a compresión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.</i>	112
<i>fig. 5.18. Comprobación a pandeo de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.</i>	112
<i>fig. 5.19. Comprobación de las secciones iniciales según el programa CYPE.</i>	113
<i>fig. 5.20. Comprobación de las barras de la estructura redimensionada según el programa CYPE.</i>	114

## **ANEXO I. PROGRAMA ESCAL3D.**

<i>fig. I.1. Fichero de entrada.</i>	2
<i>fig. I.2. Generación de la estructura por coordenadas.</i>	3
<i>fig. I.3. Asignación de propiedades a las vigas.</i>	3
<i>fig. I.4. Lista de perfiles.</i>	4
<i>fig. I.5. Visualización de la estructura en modo alambre.</i>	5
<i>fig. I.6. Visualización de la estructura en modo transparente.</i>	5
<i>fig. I.7. Visualización de la estructura en modo sólido.</i>	6
<i>fig. I.8. Combinación de hipótesis de carga.</i>	6

<i>fig. I.9. Deformada para una combinación de hipótesis de carga.....</i>	<i>7</i>
<i>fig. I.10. Coeficiente de seguridad máximo para la norma MV-103 y la hipótesis de sobrecarga. ....</i>	<i>7</i>
<i>fig. I.11. Estructura del programa ESCAL3D.....</i>	<i>8</i>
<i>fig. I.12. Diagrama de flujo del programa ESCAL3D. ....</i>	<i>9</i>
<i>fig. I.13. Fichero de datos. ....</i>	<i>10</i>
<i>fig. I.14. Interface gráfica del módulo SECCIÓN.....</i>	<i>11</i>
<i>fig. I.15. Pantalla de resultados. ....</i>	<i>12</i>
<i>fig. I.16. Acciones positivas sobre la estructura modelizada.....</i>	<i>12</i>
<i>fig. I.17. Definición del análisis estático.....</i>	<i>13</i>
<i>fig. I.18. Tipos de nudos en la estructura.....</i>	<i>13</i>
<i>fig. I.19. Pseudocódigo del método de gradiente biconjugado. ....</i>	<i>15</i>
<i>fig. I.20. Pseudocódigo del método de gradiente conjugado cuadrado.....</i>	<i>16</i>
<i>fig. I.21. Pseudocódigo del método de gradiente biconjugado estabilizado. ....</i>	<i>17</i>
<i>fig. I.22. Pseudocódigo de la iteración de Chebyshev. ....</i>	<i>18</i>
<i>fig. I.23. Pseudocódigo del método de residuo casi-mínimo. ....</i>	<i>19</i>
<i>fig. I.24. Definición del análisis dinámico. ....</i>	<i>20</i>
<i>fig. I.25. Valores máximos para los coeficientes de inestabilidad según la norma MV-103. ....</i>	<i>24</i>
<i>fig. I.26. Valores máximos para los coeficientes de inestabilidad según el Eurocódigo3.....</i>	<i>26</i>
<i>fig. I.27. Valores máximos para los coeficientes de inestabilidad según la norma AISC-LRFD. ....</i>	<i>28</i>
<i>fig. I.28. Valores máximos para los coeficientes de inestabilidad según la norma CM-66.....</i>	<i>30</i>

## **ANEXO II. PROGRAMA GADEMO.**

<i>fig. II.1. Parámetros de evolución.....</i>	<i>2</i>
<i>fig. II.2. Algoritmos genéticos. ....</i>	<i>2</i>
<i>fig. II.3. Operadores de selección. ....</i>	<i>2</i>
<i>fig. II.4. Operadores de cruce. ....</i>	<i>2</i>
<i>fig. II.5. Normativas de seguridad. ....</i>	<i>2</i>

<i>fig. II.6. Función objetivo.....</i>	<i>3</i>
<i>fig. II.7. Representación binaria.....</i>	<i>3</i>
<i>fig. II.8. Pantalla de evolución.....</i>	<i>3</i>
<i>fig. II.9. Barra de herramientas de evolución.....</i>	<i>3</i>
<i>fig. II.10. Población inicial.....</i>	<i>4</i>
<i>fig. II.11. Evolución paso a paso.....</i>	<i>4</i>
<i>fig. II.12. Evolución continuada.....</i>	<i>5</i>
<i>fig. II.13. Pantalla de resultados.....</i>	<i>5</i>
<i>fig. II.14. Diagrama de flujo del programa GADEMO.....</i>	<i>6</i>
<i>fig. II.15. Fichero de datos (optimo.ini).....</i>	<i>7</i>
<i>fig. II.16. Fichero intermedio (optimo.int).....</i>	<i>8</i>
<i>fig. II.17. Fichero de entrada inicial del predimensionamiento (inicio.inp).....</i>	<i>8</i>
<i>fig. II.18. Fichero de entrada del predimensionamiento (optimo.inp).....</i>	<i>9</i>
<i>fig. II.19. Fichero de salida inicial del predimensionamiento (inicio.sal).....</i>	<i>9</i>
<i>fig. II.20. Fichero de salida del predimensionamiento (optimo.sal).....</i>	<i>10</i>
<i>fig. II.21. Fichero de vigas (optimo.vig).....</i>	<i>10</i>
<i>fig. II.22. Fichero de salida del módulo LECTURA DE PESO (optimo.pes).....</i>	<i>11</i>
<i>fig. II.23. Histórico de pesos (optimo.fin).....</i>	<i>13</i>
<i>fig. II.24. Fichero de resultados (optimo.sol).....</i>	<i>13</i>

## ÍNDICE DE FOTOS.

### CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.

<i>foto 1.1. Puente de Hierro en Coalbrookdale (1773-1779). T. M. Pritchard.</i>	3
<i>foto 1.2. Estructura tubular del Puente Britannia.</i>	3
<i>foto 1.3. Puente Britannia tras la reconstrucción.</i>	3
<i>foto 1.4. Puente Eads.</i>	4
<i>foto 1.5. Viaducto de Ormaiztegi (1864). Lavalley.</i>	4
<i>foto 1.6. St. Anne (1770-1772).</i>	5
<i>foto 1.7. Grande Galerie del Louvre.</i>	5
<i>foto 1.8. Palacio de Cristal (1850-1851). Joseph Paxton.</i>	5
<i>foto 1.9. Palais des Machines (1886-1889). Ferdinand Dutert.</i>	6
<i>foto 1.10. Torre Eiffel (1887-1889). Gustave Eiffel &amp; Cie.</i>	6
<i>foto 1.11. Empire State Building</i>	6
<i>foto 1.12. Palacio de Cristal (1887). Velázquez Bosco.</i>	7
<i>foto 1.13. Estación de Atocha Madrid.</i>	7
<i>foto 1.14. Laing Stores (1849). James Bogardus.</i>	7
<i>foto 1.15. Pabellón alemán en la Exposición de Barcelona (1929). Ludwig Mies van der Rohe. Reconstrucción: Cristian Cirici, Fernando Ramos, Ignasi de Solà-Morales (1986).</i>	8
<i>foto 1.16. Nueva Galería Nacional Berlín</i>	8
<i>foto 1.17. Dispensario Central Antituberculosis. Barcelona (1933-1938). Josep Lluís Sert. Restauración (1982).</i>	8
<i>foto 1.18. Pabellón España Exposición de París (1937). Josep Lluís Sert.</i>	8
<i>foto 1.19. Estadio San Mamés (1913). Remodelado en 1952 por Carlos de Miguel y Antonio Domínguez.</i>	9
<i>foto 1.20. Palacio de deportes de Madrid.</i>	9
<i>foto 1.21. Edificio BBV (1978-1981). Sáenz de Oiza.</i>	10
<i>foto 1.22. Torre Castelar (1972-1986). Rafael de la Hoz.</i>	10
<i>foto 1.23. Torre Picasso (1986-1989). Minoru Yamasaki.</i>	10
<i>foto 1.24. Torre Mapfre (1991). Bruce J. Graham.</i>	10

<i>foto 1.25. Palau Sant Jordi de Barcelona.....</i>	<i>10</i>
<i>foto 1.26. Palacio de los deportes de Badalona (1992). Esteve Bonell y Francesc Rius.....</i>	<i>10</i>
<i>foto 1.27. Pabellón de Finlandia. MONARK (Juha Jääskeläinen, Juha Kaakko, Petri Rouhiainen, Matti Sanaksenaho y Jari Tirkkonen). .....</i>	<i>11</i>
<i>foto 1.28. Pabellón Británico. Nicholas Grimshaw. ....</i>	<i>11</i>
<i>foto 1.29. Pabellón de la Navegación y la torre de Schindler. ....</i>	<i>11</i>
<i>foto 1.30. Pabellón americano. ....</i>	<i>11</i>
<i>foto 1.31. Puente de la Barqueta (1989-1992). Juan J. Arenas y Marcos J. Pantaleón. ....</i>	<i>12</i>
<i>foto 1.32. Puente Alamillo (1989–1992). Santiago Calatrava.....</i>	<i>12</i>
<i>foto 1.33. Museo Guggenheim Bilbao (1993–1997). Frank O. Gehry. ....</i>	<i>12</i>
<i>foto 1.34. Nave de hormigón. ....</i>	<i>15</i>
<i>foto 1.35. Nave metálica.....</i>	<i>15</i>
<i>foto 1.36. Montaje de nave metálica. ....</i>	<i>16</i>
<i>foto 1.37. Unión atornillada.....</i>	<i>16</i>
<i>foto 1.38. Nave hangar.....</i>	<i>16</i>
<i>foto 1.39. Edificio metálico de paredes curvas. ....</i>	<i>17</i>
<i>foto 1.40. Nave industrial de cubierta oval.....</i>	<i>17</i>
<i>foto 1.41. Colocación de fachada sobre nave industrial. ....</i>	<i>17</i>

## ÍNDICE DE TABLAS.

### CAPÍTULO 3. ALGORITMOS GENÉTICOS.

<i>Tabla 3.1. Codificación de la serie comercial IPE.</i> .....	32
---	----

### CAPÍTULO 4. ALGORITMO GENÉTICO ELITISTA.

<i>Tabla 4.1. Cálculo de la probabilidad de rechazo.</i> .....	46
<i>Tabla 4.2. Codificación extendida de la serie comercial IPE con longitudes de cadena de 5 bits.</i> .....	49
<i>Tabla 4.3. Combinaciones estudiadas para el ajuste de los parámetros del AG elitista.</i> .....	58
<i>Tabla 4.4. Combinaciones analizadas del efecto de <math>N_p</math> sobre el AG elitista.</i> .....	59
<i>Tabla 4.5. Combinaciones analizadas del efecto de <math>P_{mut}</math> sobre el AG elitista.</i> .....	64
<i>Tabla 4.6. Combinaciones analizadas del efecto de <math>P_c</math> sobre el AG elitista</i> .....	67
<i>Tabla 4.7. Combinaciones analizadas del efecto de <math>P_e</math> sobre el AG elitista.</i> .....	71
<i>Tabla 4.8. Combinaciones estudiadas para la validación del operador de cruce por un fenotipo.</i> .....	75
<i>Tabla 4.9. Combinaciones analizadas para la validación del operador de cruce por un fenotipo.</i> .....	76
<i>Tabla 4.10. Combinaciones estudiadas para la comparación de normativas.</i> .....	79
<i>Tabla 4.11. Tabla de comparación de resultados.</i> .....	85

### CAPÍTULO 5. ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES.

<i>Tabla 5.1. Peso de la nieve en cubierta.</i> .....	94
<i>Tabla 5.2. Carga de viento.</i> .....	95
<i>Tabla 5.3. Combinación analizada.</i> .....	96
<i>Tabla 5.4. Resultados de las cinco evoluciones.</i> .....	97
<i>Tabla 5.5. Secciones de los individuos óptimos.</i> .....	98
<i>Tabla 5.6. Peso de la estructura redimensionada según el programa CYPE.</i> .....	103
<i>Tabla 5.7. Comparación de los resultados obtenidos con los programas GADEMO y CYPE.</i> .....	104

<i>Tabla 5.8. Carga de viento.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 5.9. Sobrecarga de uso. ....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 5.10. Resultados de las cinco evoluciones.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 5.11. Secciones de los individuos óptimos.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 5.12. Peso de la estructura redimensionada según el programa CYPE.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 5.13. Comparación de los resultados obtenidos con los programas GADEMO y CYPE.....</i>	<i>115</i>

---

---

# CAPÍTULO 1

---

---

**INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.**

## **1.1 Desarrollo histórico en el proceso constructivo.**

En los tiempos antiguos el diseño estructural consistía simplemente en repetir lo que se había hecho en el pasado, con muy poco conocimiento del comportamiento del material o de la teoría estructural. El éxito o el fracaso se determinaban simplemente según que el edificio o el puente soportara la carga real o se colapsara por sus efectos. En aquella época la experiencia era el único maestro; en la actualidad todavía es un elemento importante de un buen diseño.

Gradualmente, a través de los siglos de experiencia, evolucionó el arte de dimensionar los elementos estructurales, estableciendo reglas empíricas. Se dice que las columnas de los templos griegos tienen dimensiones relacionadas con la esbeltez de una pierna femenina. Los grandes constructores del Renacimiento no conocían los análisis de esfuerzos y sin embargo lograron estructuras que requirieron algo más que el empirismo. Eran artistas, arquitectos, ingenieros y constructores a la vez y los domos de sus catedrales se yerguen en la actualidad como testimonio de que pudieron diseñar de forma intuitiva magníficas estructuras que en nuestros días no se intentarían sin la utilización de complejos procedimientos fundamentados en los análisis matemáticos.

Las estructuras del pasado y del presente, y las predicciones concernientes a las estructuras del futuro, están condicionadas de modo directo por el desarrollo y la disponibilidad comercial de materiales de ingeniería estructural. Algunos de estos materiales, como la piedra, ladrillos, madera y cuerdas se han utilizado desde el principio de la historia escrita.

Las primeras construcciones que realizó el hombre, cuando su evolución social lo sacó de las cavernas, fueron recintos formados con muros de piedra y cubiertos con troncos y ramajes. Su primera función era la protección frente a los agentes exteriores, el frío y la lluvia principalmente.

La necesidad de obtener mayores espacios comunicados entre sí, en construcciones de carácter religioso o social, lleva a la apertura de huecos en los muros

por medio de arcos, que con las columnas, vigas de madera y contrafuertes son los primeros sistemas estructurales utilizados por el hombre.

Con la evolución de los mismos se llega en algunos casos a reducir el papel de los muros a meros elementos de separación o cerramiento, confiando la misión resistente a los otros sistemas que adquieren entidad propia, como estructura de la construcción. De esta forma las columnas de bloques de piedra, labradas con precisión, son características dominantes de los templos egipcios, griegos y romanos. Los acueductos y puentes de Roma fueron arcos de piedra que, como las columnas, transmiten esfuerzos de compresión principalmente. La Edad de Piedra de las estructuras continuó hasta la primera parte del siglo XIX cuando la mayor parte de los arcos y domos aún se construían de mampostería y se mantenían fijos con contrafuertes de piedra.

Además de la piedra, fue la madera el único material apto para ser utilizado como elemento estructural, principalmente en elementos en que la resistencia a flexión o tracción era necesaria, con la consiguiente limitación de luces que este material imponía. Esta restricción y el hecho de ser la madera un material poco duradero bajo la acción de múltiples agentes exteriores, condujeron al hombre a la incesante búsqueda de otros materiales de mayor resistencia y durabilidad, que fructificaron en tiempos relativamente recientes con la aparición de las estructuras de hierro y acero y posteriormente las de hormigón armado.

El desarrollo comercial del hierro proporcionó el primero de los metales estructurales que abrirían un mundo totalmente nuevo al ingeniero. El hierro se comienza a utilizar, como elemento estructural, a finales del siglo XVIII en la construcción de puentes. Posteriormente, durante el siglo XIX, se utiliza en edificación como producto alternativo a la piedra y a la madera.

Si no tenemos en cuenta algunas imperfecciones anteriores, puede afirmarse que el primer puente que se construyó por completo de hierro colado se encuentra en Coalbrookdale en Inglaterra (foto 0.1).



foto 0.1. Puente de Hierro en Coalbrookdale (1773-1779). T. M. Pritchard.

Pero, en los puentes, duró poco tiempo el uso de hierro colado, que falla con una fractura frágil en tensión. La producción comercial de perfiles de hierro forjado en 1783 produjo cambios rápidos, al hacer disponible un producto con una calidad adicional de tenacidad que se caracteriza por una capacidad de soportar deformaciones largas a tensión en el rango inelástico sin fallar. Por otra parte, el hierro forjado se podía formar en placas planas que podían doblarse y unirse con remaches, lo que hizo posible la locomotora de vapor la cual, a su vez, creó una demanda de puentes metálicos de claros largos. Entre los primeros puentes de hierro forjado más notables se encuentra el Britannia Bridge a través de los Menai Straits del Irish Sea. Inicialmente construido por Robert Stephenson y abierto al público en 1850 (foto 0.2), fue reconstruido en el año 1970 tras sufrir un incendio. En la actualidad presenta una vía simple de ferrocarril en su parte inferior y una carretera en la parte superior (foto 0.3).



foto 0.2. Estructura tubular del Puente Britannia.    foto 0.3. Puente Britannia tras la reconstrucción.

El desarrollo del convertidor Bessemer en 1856 y del horno de hogar abierto en 1867 introdujo el acero estructural y éste es el material que se ha utilizado en la mayoría

de los puentes, así como en muchos edificios, durante los últimos 100 años. El primer puente importante que se construyó totalmente con acero estructural fue el famoso Eads Bridge (foto 0.4) diseñado por el ingeniero Captain Eads, a través del Mississippi en St. Louis, terminado en 1874, con arcos tubulares de acero.



foto 0.4. Puente Eads.

En España son numerosos los puentes de hierro construidos en el siglo XIX diseminados por toda la geografía nacional. Ejemplos de ellos son los puentes de Belmonte (Asturias) hoy ya derribado y Ormaiztegui (Guipúzcoa) (foto 0.5).



foto 0.5. Viaducto de Ormaiztegui (1864). Lavalley.

Respecto al empleo del hierro en la edificación, ya en 1770 se utilizan en Liverpool elementos de hierro para soportar las galerías de St. Anne (foto 0.6), y en 1781, Soufflot coloca una cubierta de hierro sobre el vestíbulo de la escalera de acceso a la Grande Galerie del Louvre (foto 0.7). En 1797 se construye en Shrewsbury la fábrica Benyons, Marshall & Bage, con pilares, vigas y montantes de fundición de hierro.



foto 0.6. St. Anne (1770-1772).



foto 0.7. Grande Galerie del Louvre.

Estas realizaciones tímidas no ponían todavía de manifiesto las grandes posibilidades de los materiales férricos para la construcción.

No es hasta el siglo XIX, y en sus últimas décadas, cuando se realizan grandes y espectaculares construcciones combinando el vidrio y el hierro. Invernaderos, pabellones para exposiciones, estaciones de ferrocarril y grandes naves industriales, muestran como la adopción del hierro permite ganar a este tipo de construcciones en diafanidad y amplitud de luces.

El palacio de exposiciones es el verdadero edificio emblemático del progreso en este siglo. De entre todos ellos destacan dos, distanciados en el tiempo como corresponde a las dos Exposiciones Universales que representaron: el Palacio de Cristal de Joseph Paxton (foto 0.8) para la 1ª Exposición Universal de Londres de 1851, y el Palais des Machines (foto 0.9) para la Exposición Universal de París de 1889.



foto 0.8. Palacio de Cristal (1850-1851). Joseph Paxton.



foto 0.9. Palais des Machines (1886-1889). Ferdinand Dutert.

El Palacio de Cristal (foto 0.8) significó el punto de partida para toda una serie de edificios similares construidos en otras capitales europeas, caracterizados por el nuevo espacio arquitectónico abierto y luminoso que la ligereza de la estructura y el cerramiento de vidrio permitían. La concepción del sistema estructural con elementos repetitivos tanto en vigas como en columnas, permitió una verdadera obra maestra de la estandarización, posibilitando la fabricación en serie de todos estos elementos metálicos tan sólo en tres meses, lo que juntamente con su montaje en otros tres, resultó una hazaña insólita e inaudita para aquellos tiempos.

Le Palais des Machines (foto 0.9) de la exposición de 1889 era un edificio notable, aunque su celebridad fue oscurecida por la famosa Torre Eiffel (foto 0.10), verdadero monumento a la construcción metálica y que fue la estructura más alta del mundo hasta la construcción del Empire State Building en Nueva York (foto 0.11).



foto 0.10. Torre Eiffel (1887-1889). Gustave Eiffel & Cie.



foto 0.11. Empire State Building (1930-1931). Shreve, Lamb & Harmon Associates.

En nuestro país magníficos ejemplos del alto nivel alcanzado por la arquitectura en acero son el Palacio de Cristal del Parque del Retiro (foto 0.12) y la gran nave de la Estación de Atocha en Madrid inaugurada en 1851, y reconstruida en hierro en 1892 según el diseño de Alberto de Palacio (foto 0.13). Posteriormente ha sido ampliada y remodelada por el arquitecto Rafael Moneo.



foto 0.12. Palacio de Cristal (1887). Velázquez Bosco.



foto 0.13. Estación de Atocha Madrid.

Dentro del siglo XIX y en la década de los 40, se construyeron con estructura de acero varios edificios en Inglaterra; uno de los primeros fue un pequeño edificio de Watling Street en Londres. En 1849, James Bogardus construyó los almacenes Laing en Nueva York (foto 0.14), un edificio de cuatro plantas con pilares y dinteles vistos en fachada de hierro fundido.



foto 0.14. Laing Stores (1849). James Bogardus.

En las décadas de 1880 y 1890, en Norteamérica, los edificios de gran altura para oficinas, de estructura de acero, empiezan a invadir las grandes ciudades americanas, convirtiéndose en símbolo e imagen de la nueva potencia mundial.

El Movimiento moderno adopta el acero como uno de sus materiales más apreciados. En dicho movimiento destaca Mies van der Rohe, el cual lo convierte en su material normal de trabajo, que le permite conseguir plantas diáfnas y susceptibles de adaptarse a diferentes funciones con su simple subdivisión por medio de mamparas como el Pabellón alemán de la Exposición de Barcelona de 1929 (foto 0.15) o la Nueva Galería Nacional de Berlín (foto 0.16). Dentro de este Movimiento Moderno cabe destacar en nuestro país el Dispensario Central Antituberculoso construido en Barcelona en 1935 (foto 0.17) y el pabellón de España de la Exposición de París de 1937 (foto 0.18), ambos diseñados por Josep Lluís Sert.



foto 0.15. Pabellón alemán en la Exposición de Barcelona (1929). Ludwig Mies van der Rohe. Reconstrucción: Cristian Cirici, Fernando Ramos, Ignasi de Solà-Morales (1986).



foto 0.16. Nueva Galería Nacional Berlín (1965-1968). Ludwig Mies van der Rohe.



foto 0.17. Dispensario Central Antituberculosis. Barcelona (1933-1938). Josep Lluís Sert. Restauración (1982).



foto 0.18. Pabellón España Exposición de París (1937). Josep Lluís Sert.

En las últimas décadas la Arquitectura presenta una gran diversidad de procedimientos constructivos. Sin embargo se manifiesta una tendencia clara, por motivos indudablemente económicos, hacia la prefabricación en taller y el posterior ensamblaje en obra. Este procedimiento fue iniciado por Paxton en el siglo XIX, y posteriormente desarrollado al máximo en la construcción de los grandes rascacielos.

La estandarización del diseño estructural es de la mayor importancia en las estructuras de edificios funcionales como son los destinados a oficinas, y naves industriales, por la reducción de costes y la rapidez de la ejecución. Similares beneficios se consiguen en los grandes edificios singulares con la repetición del módulo estructural.

En nuestros días la estructura de acero es adoptada casi indiscutiblemente en construcciones que requieren grandes espacios diáfanos, como estadios, pabellones, naves industriales o aeropuertos, siendo su solución más habitual estructuras unidimensionales como pórticos de gran luz.

La ausencia de productos laminados de acero tras la Guerra Civil, abrió, en nuestro país, un amplio paréntesis en el uso de acero en la edificación. Muestras de su retorno a la arquitectura son, la cubierta del estadio San Mamés (1952) (foto 0.19) y el Palacio de los Deportes de Madrid (1960) (foto 0.20) donde un incendio declarado en Junio de 2001 provocó el hundimiento de la techumbre del edificio. El proyecto de recuperación lo lleva a cabo el arquitecto Enrique Hermoso.



foto 0.19. Estadio San Mamés (1913).  
Remodelado en 1952 por Carlos de Miguel y  
Antonio Domínguez.



foto 0.20. Palacio de deportes de Madrid  
(1958-1960). Ignacio Mazar.

En los últimos veinte años se ha incrementado hasta límites insospechados el uso estructural del acero en la edificación, sobre todo en los edificios de gran altura, siendo de destacar en Madrid el edificio del BBV en la Castellana (foto 0.21), que combina la estructura de acero con la de hormigón, la Torre Castelar (foto 0.22) y la Torre Picasso (foto 0.23) y en Barcelona la Torre Mapfre (foto 0.24).



foto 0.21. Edificio BBV (1978-1981). Sáenz de Oiza.



foto 0.22. Torre Castelar (1972-1986). Rafael de la Hoz.



foto 0.23. Torre Picasso (1986-1989). Minoru Yamasaki.



foto 0.24. Torre Mapfre (1991). Bruce J. Graham.

El año olímpico (1992), fue ocasión para demostrar las grandes posibilidades del acero en la realización de grandes plantas diáfanas, como el Palau Sant Jordi de Barcelona (foto 0.25) o el Palacio de los Deportes de Badalona (foto 0.26).



foto 0.25. Palau Sant Jordi de Barcelona (1985-1990). Arata Isozaki. (Cubierta Mamoru Kawaguchi).



foto 0.26. Palacio de los deportes de Badalona (1992). Esteve Bonell y Francesc Rius.

En el mismo año la Exposición Universal de Sevilla constituyó un gran escaparate mundial de la construcción tanto para España como para los distintos países participantes, y fue demostración excepcional de la riqueza tecnológica del acero y su adaptabilidad a tan diversas soluciones estructurales como se mostraron en los distintos

pabellones (foto 0.27-foto 0.30) o en los bellísimos puentes sobre el Guadalquivir (foto 0.31-foto 0.32). Fuera del ámbito de la exposición, uno de los más claros ejemplos de las virtudes del acero como elemento estructural es el edificio del Museo Guggenheim en Bilbao (foto 0.33) diseñado por el arquitecto Frank O. Gehry (1997) en él que se conjugan materiales como el acero, la piedra, el titanio o el agua creando una estructura espectacular adaptada a los imaginativos volúmenes que conforman el conjunto.



foto 0.27. Pabellón de Finlandia. MONARK (Juha Jääskeläinen, Juha Kaakko, Petri Rouhiainen, Matti Sanaksenaho y Jari Tirkkonen).



foto 0.28. Pabellón Británico. Nicholas Grimshaw.



foto 0.29. Pabellón de la Navegación y la torre de Schindler.



foto 0.30. Pabellón americano.



foto 0.31. Puente de la Barqueta (1989-1992).  
Juan J. Arenas y Marcos J. Pantaleón.



foto 0.32. Puente Alamillo (1989-1992).  
Santiago Calatrava.



foto 0.33. Museo Guggenheim Bilbao (1993-1997). Frank O. Gehry.

En paralelo con el desarrollo del hierro y del acero como materiales de ingeniería, se presentaron progresos en las técnicas de pruebas de materiales y de análisis de estructuras que permitieron la transición del diseño estructural de un arte a una ciencia aplicada. Hooke (1660) demostró que la carga y la deformación son proporcionales, y Bernoulli (1705) introdujo el concepto de que la resistencia de una viga en flexión es proporcional a la curvatura de la viga. Bernoulli transmitió este concepto a Euler, que en 1744 determinó la curva elástica de una columna esbelta sujeta a carga de compresión.

Entre los progresos importantes de finales del siglo XIX se encuentran:

- La manufactura de instrumentos mecánicos para medir deformaciones que hicieron posible la determinación del módulo elástico que relaciona el esfuerzo con la deformación.

- Teorías correctas para el análisis de esfuerzos y deformaciones que se producen por la flexión o la torsión de un miembro estructural.
- La extensión de la teoría del pandeo de columnas al pandeo de placas y al pandeo torsional-lateral de vigas.

Los avances anteriores hicieron posible el desarrollo de especificaciones de ingeniería desarrolladas en torno al método de esfuerzos permisibles de selección de miembros estructurales. En 1905 se desarrolló la primera especificación general para puentes ferroviarios de acero y en 1931 la primera especificación para puentes carreteros. En 1923 el American Institute for Steel Construction (AISC) emitió su primera especificación general para construcción de edificios.

En cada una de estas especificaciones, el criterio para una resistencia aceptable de diseño es como sigue: *“los esfuerzos máximos calculados, suponiendo un comportamiento elástico hasta las cargas máximas esperadas, se mantiene menor que un esfuerzo permisible especificado”*.

Se intenta que el esfuerzo permisible sea menor que el esfuerzo calculado en la falla en la medida de un factor de seguridad. Desgraciadamente, el esfuerzo elástico máximo calculado en la carga de falla es muy variable. Una columna esbelta o una viga sin soporte lateral pueden fallar a una fracción del esfuerzo del punto de fluencia, pero una columna muy corta alcanzará el punto de fluencia antes de fallar. Un miembro cargado a tensión estática puede desarrollar la resistencia última de tensión del material, pero el mismo miembro, cargado y descargado en forma repetitiva durante miles de ciclos, puede fallar debido a la fatiga a una fracción del punto de fluencia.

Es evidente que el criterio verdadero de aceptabilidad es la resistencia no el esfuerzo y de esta forma, basándose en la experiencia y en los análisis de resistencia, se han tenido que ajustar los esfuerzos permisibles especificados en una zona muy amplia para proporcionar un índice razonablemente uniforme de la resistencia estructural.

Durante los últimos 40 años se ha prestado una atención creciente a la evaluación de las propiedades inelásticas de los materiales y al cálculo directo de la resistencia última de cada miembro. Esta información es útil para mejorar el

procedimiento de esfuerzos permisibles, pero también permite evitar el cálculo de los esfuerzos al utilizarse la resistencia calculada del miembro como una base directa del diseño. De esto ha resultado un diseño por *factor de carga*. Las cargas de servicio máximas anticipadas se multiplican por un factor de carga para obtener la resistencia requerida, que debe ser menor que la resistencia calculada directamente. Filosóficamente, este es un procedimiento más realista, directo y natural. El enfoque de factor de carga se ha utilizado durante muchos años en el diseño de aeronaves y la Parte 2 del AISCS, introducida en 1961, lo permite actualmente como alternativa aceptable a los procedimientos de esfuerzos permisibles del diseño de marcos continuos de estructuras de edificios. Aunque la tendencia actual de diseño es hacer menos hincapié en el cálculo de los esfuerzos, esos cálculos aún son esenciales en el diseño de partes de máquinas y elementos estructurales que deben soportar muchas repeticiones de carga.

En la década de 1980 los métodos estructurales de diseño pasaron por cambios muy rápidos a medida que en más y más especificaciones se hizo mayor hincapié en el diseño por factor de carga (también llamado diseño por *estados límites*). En este procedimiento se utilizan distintos factores de carga para las cargas muerta, viva, de viento y nieve y factores de resistencia que multiplican a las resistencias calculadas de las vigas, columnas, conectores y otros elementos, para tomar en cuenta las diversas incertidumbres inherentes en la predicción de cargas y resistencias. Por otra parte, los factores de carga y resistencia se determinan con medios probabilísticos a partir de datos estadísticos relativos a las cargas y resistencias.

En este tiempo también se incrementó la utilización de ordenadores en todos los aspectos de diseño, incluyendo la distribución general, el análisis y la producción de planos de diseño detallados.

## **1.2 Importancia de la estructura en el diseño de edificios.**

Si bien los ejemplos más claros y espectaculares de la utilización del acero como elemento estructural lo constituyen edificios singulares y puentes emblemáticos como los mencionados previamente, el acero es el elemento por excelencia en la ejecución de naves o edificios industriales. En este tipo de edificios y a causa de sus peculiares

características que vienen siempre impuestas por el proceso de fabricación, la solución estructural que se adopte tiene una gran importancia, hasta el punto de que con frecuencia influye en las características esenciales del edificio y, por tanto, en su sistema constructivo, e incluso en su apariencia o aspecto físico.

En general, cuando en una construcción se trata de cubrir luces que no sean muy grandes, no existe ningún problema estructural. Pero no así en la cobertura de espacios con grandes luces, razón por la que la estructura requiere un diseño detallado, desde la cimentación, hasta el propio entramado metálico de pilares, vigas y correas.

Como es natural, y para proyectar correctamente un edificio, no se puede pensar únicamente en términos de estructura, puesto que hay muchas otras consideraciones que harán que la solución elegida sea la correcta. No obstante, y a la hora de proyectar el edificio, el primer problema con el que nos enfrentaríamos, en una forma general, sería el de considerar la importancia de la estructura. Dentro de ello, la primera fase consiste en elegir el material con que se habría de construir; y dentro de los disponibles nos encontramos con las soluciones de estructuras de hormigón (foto 0.34) y estructuras metálicas en general (foto 0.35), así como también soluciones de estructura mixta.



foto 0.34. Nave de hormigón.



foto 0.35. Nave metálica.

Evidentemente y en la mayoría de los casos en las construcciones industriales, las soluciones de estructura metálica presentan ventajas sobre el hormigón, a causa principalmente, de las características propias del acero como material de construcción, que conducen a estructuras capaces de cubrir mayores luces con una ligereza y coste menor que en estructuras de otro tipo lo que lleva a que la mayor parte de los edificios industriales se realizan con estructura metálica. De entre las múltiples ventajas de las estructuras de acero cabe destacar:

*Prefabricación.* La posibilidad de prefabricación de los elementos que componen la estructura, permite solapar los plazos de ejecución de las infraestructuras con los de prefabricación en taller, acortando el plazo global (foto 0.36). Además, la realización del máximo trabajo en taller, ejecutando en él todas las soldaduras necesarias y dejando todos los elementos dispuestos para su ensamblaje en obra mediante uniones atornilladas (foto 0.37), garantiza un estricto control de calidad, reduciendo en gran medida el posible fallo humano y el eventual efecto negativo del frío, el viento y la lluvia en las operaciones de soldadura.



foto 0.36. Montaje de nave metálica.



foto 0.37. Unión atornillada.

*Gran resistencia – grandes luces.* La capacidad resistente del acero permite su utilización en estructuras de grandes luces para la consecución de plantas diáfanas, resultando más ligeras y esbeltas que las que se consiguen con otros materiales (foto 0.38). Debido a ello, los elementos auxiliares de montaje necesarios, que pueden llegar a ser determinantes en edificios de gran altura o de difícil acceso, resultan más económicos.



foto 0.38. Nave hangar.

*Secciones reducidas.* Debido a su ligereza y a las reducidas secciones necesarias para un mismo edificio frente a otros materiales, el aprovechamiento del espacio es máximo, posibilitando además el ocultamiento de la estructura en fachadas, tabiquerías, forjados, consiguiendo espacios limpios.

*Adaptabilidad.* Las estructuras de acero pueden adaptarse a cualquier solución estructural deseada por el proyectista, por medio de entramados rígidos o articulados (foto 0.39) y (foto 0.40).



foto 0.39. Edificio metálico de paredes curvas.



foto 0.40. Nave industrial de cubierta oval.

*Ensamblaje con otros elementos.* Una gran ventaja es la sencillez que presenta el ensamblaje de elementos no estructurales y la calidad de su ejecución, fundamentalmente de los elementos que conforman la piel del edificio, como son los materiales de fachada (foto 0.41) y las carpinterías.



foto 0.41. Colocación de fachada sobre nave industrial.

*Reducción de costes.* Los factores económicos que pueden resultar determinantes en la elección del tipo de material estructural, ayudan también a decidirse por el acero. A la similitud de precios que presentan las estructuras de acero con las de otros materiales constructivos, hay que añadir un factor fundamental: la rapidez de

ejecución de las estructuras de acero que garantizada por un correcto plan de obra, conlleva un ahorro en los costes financieros de la construcción. Igualmente, su mayor ligereza estructural implica una disminución en el coste de las cimentaciones.

Un punto muy importante para la reducción de costes estriba en la necesaria estandarización de los sistemas constructivos para la producción de elementos en serie. En las naves industriales se ha conseguido una gran aproximación a este ideal, y se ha comenzado a aplicar esta experiencia en los edificios de altura.

*Facilidad de reformas.* En último lugar cabe citar que la estructura de acero admite reformas posteriores a la construcción del edificio, realizables con relativa sencillez. También debe anotarse que el acero es un material reciclable, conservando, por tanto, siempre cierto valor, y que no genera residuos contaminantes.

Una vez seleccionado el material, se han de plantear las condiciones funcionales que constituyen el planteamiento del problema, distinguiendo entre las absolutamente necesarias y las que han de cumplirse con el mayor grado posible; por último, hay que considerar aquellas que sólo señalan una simple conveniencia supletoria al problema fundamental y que deben, en caso necesario, sacrificarse a las anteriores.

En muchos casos estas condiciones establecen por sí solas unos volúmenes bien delimitados y unas posiciones e intensidades de las cargas.

Posteriormente se han de introducir las limitaciones, orientaciones, condiciones y conveniencias que imponen las distintas exigencias del material, del fenómeno tensional en sus líneas fundamentales, del terreno, del proceso de ejecución, de la estética, las construcciones colindantes, etc.

Establecido todo esto será necesario manejarlo conjunta y rápidamente a lo largo del proceso creador; pronto aparecerán los inconvenientes del plan funcional en relación con las exigencias resistentes de la estructura que lo resuelve.

Frecuentemente se ve que la estructura resulta forzada o demasiado complicada y que estos defectos se solucionarían mucho mejor si tal o cual elemento o condición funcional fuese modificada. Si el plan o programa de necesidades y conveniencias se ha

hecho sin pensar al mismo tiempo en la estructura, es lógico que esto suceda; y si en algún caso particular no sucede, es por simple casualidad.

Hay, pues, que buscar y evaluar todas las posibilidades capaces de aminorar los problemas planteados, o incluso de anularlos. Así se llega a cambiar de ubicación una construcción cuando el terreno donde se proyectaba presenta grandes dificultades, o se reducen las cargas de nieve dando mayor pendiente a las cubiertas; o se disminuyen los empujes de viento sobre los hangares dando la oportuna forma a su superficie envolvente, ya que más vale disminuir estas cargas y empujes, con los que se ha de luchar, que tratar de soportarlos en toda su magnitud.

Aún prescindiendo de otras razones, siempre hay una exigencia económica, un mínimo posible de coste que se debe buscar; y no se puede cejar en ese empeño mientras no se tenga la seguridad de haber agotado las posibilidades y haberlo sopesado todo con sus pros y sus contras.

### **1.3 La necesidad de optimización.**

Como anteriormente se ha comprobado, se puede tener dificultades a la hora de diseñar utilizando un diseño convencional.

- La habilidad y la experiencia del diseñador podrían llevar a diseños completamente distintos.
- La complejidad de la estructura tratada conlleva una dificultad creciente en los reanálisis y los rediseños consecutivos.
- La dificultad en considerar todos los posibles casos de carga.
- El pretendido uso de la estructura podría alejar al diseño de un modelo económico.
- Las alternativas en el diseño y las técnicas de análisis, podrían confundir al diseñador en escoger la técnica apropiada.

Una mejora en el diseño convencional ha sido el empleo de ordenadores. Esto ha permitido que los análisis sean más precisos, reales y eficaces. Además, la velocidad

con que se analizan las diferentes soluciones consigue diseños más económicos que en el pasado.

El siguiente paso es el desarrollo de una técnica que sustituya al diseño convencional, obteniendo un diseño completo de la estructura. Esta técnica se conoce como *optimización estructural* y lo que pretende es obtener soluciones extremas que satisfagan los criterios de diseño prescritos de una forma racional, sin recaer en la intuición o habilidad del diseñador y englobar el proceso de selección de los elementos estructurales y la comprobación de que los criterios de diseño se cumplen.

---

---

# CAPÍTULO 2

---

---

**OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.**

## 2.1 Introducción.

En los problemas de optimización estructural se busca generalmente minimizar el peso de la estructura bajo ciertas restricciones ambientales de tensión y desplazamientos. Debido a la ejecución práctica de las estructuras, los elementos estructurales se dividen en grupos con las mismas variables de diseño (áreas de inercia, momentos resistentes, secciones laterales). Esta agrupación de elementos resulta un compromiso entre el uso de más material y la necesidad de simetría y uniformidad debido a consideraciones prácticas. Además, se ha de considerar que debido a las limitaciones de fabricación, las variables de diseño no son continuas sino discretas.

Debido a ello, desde finales de la década de 1960 y comienzos de la siguiente, ha ido creciendo el interés hacia los problemas de optimización de variables discretas. De cualquier modo, en ese tiempo todavía estaban en proceso de desarrollo los problemas de programación no lineal de variables continuas. En los años 1970 y 1980 se produjo un mayor esfuerzo en el desarrollo y en la evaluación de dichos algoritmos discretos. El estudio en esta área aún continúa para desarrollar mejores métodos, especialmente para problemas a gran escala. En años recientes, el enfoque se ha dirigido hacia aplicaciones de problemas prácticos que naturalmente usan variables discretas.

## 2.2 Formulación del problema de optimización.

El problema de optimización se formula en términos de parámetros y restricciones [29]. Los parámetros seleccionados para describir el diseño de una estructura se conocen como *variables de diseño*, mientras que las restricciones se conocen como *condiciones límite*.

### 2.2.1 Variables de diseño.

La noción de optimización de una estructura implica el cambio de ciertos elementos de diseño que se denominan *variables*, por lo tanto, se pueden definir las variables de diseño como los parámetros que controlan la geometría de la estructura a optimizar. Dichas variables pueden ser tanto continuas como discretas. Una variable

continua es la que toma un valor dentro del rango de variación en una región. Una variable discreta es la que toma sólo valores puntuales, generalmente de una lista de valores permisibles por catálogo. De cualquier modo, estas variables de diseño pueden ser expresadas mediante la expresión [2.1].

$$\begin{aligned} x &= (x_1^T, x_2^T, x_3^T, \dots, x_j^T) \quad j=1,2,3,\dots,J \\ x_{i,j} &\in D_j \\ D_j &= (d_{j,1}, d_{j,2}, \dots, d_{j,\lambda}) \end{aligned} \quad [2.1]$$

Donde:

El vector de las variables de diseño  $x$  se divide en  $J$  sub-vectores  $x_j$ .

Los componentes de estos sub-vectores  $x_{i,j}$  toman valores de un catálogo  $D_j$ .

$i$  es el número de variables de diseño en cada sub-vector.

$\lambda$  es el número de secciones en cada catálogo.

### 2.2.2 Restricciones.

Los límites, que toman los valores de las variables de diseño, son conocidos como *restricciones* cuya expresión se refleja en la ecuación [2.2].

$$\frac{G_s(x)}{\tilde{G}_s(x)} \leq 1 \quad s = 1,2,\dots,s^s \quad [2.2]$$

Donde:

$G_s(x)$  es el valor calculado de la restricción.

$\tilde{G}_s(x)$  es el valor limitado de la restricción.

$s^s$  es el número de funciones de desigualdad.

En el problema de optimización, no todas las restricciones son función de un término sino que pueden ser de varios términos [2.3].

$$\frac{G_{s,1}(x)}{\tilde{G}_{s,1}(x)} + \frac{G_{s,2}(x)}{\tilde{G}_{s,2}(x)} + \dots + \frac{G_{s,ss}(x)}{\tilde{G}_{s,ss}(x)} \leq 1 \quad [2.3]$$

Siendo:

$ss$  es el número de términos en la función de restricción.

### 2.2.3 Función objetivo.

A la función usada como medida de efectividad del diseño se la denomina *función objetivo*, *función mérito* o *función coste*. Esta función puede ser formulada a partir de un objetivo simple  $f_1(x)$  o a partir de objetivos múltiples [2.4].

$$F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)\} \quad [2.4]$$

La optimización con más de un objetivo se denomina *optimización multicriterio* y es el caso más general de la optimización estructural donde el peso, los desplazamientos, las tensiones, las cargas o alguna combinación de ellos, se puede usar como función objetivo. Existen diferentes formas de reducir el número de funciones:

- Generando una función compuesta que reemplace a todos los objetivos.
- Seleccionando una función objetivo que analice el peso total de la estructura y que considere los límites impuestos (tensiones en cada miembro, desplazamientos en los nodos, cargas críticas).
- Creando un rango de diseños potenciales donde se encuentren los objetivos.

### 2.2.4 Formulación estándar.

La formulación del problema de optimización puede ser matemáticamente expresada según la expresión [2.5].

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimizar} & F(x) \\
 \text{Restricciones} & \frac{G_s(x)}{\tilde{G}_s(x)} \leq 1 \quad s = 1, 2, \dots, s^s \\
 & x = (x_1^T, x_2^T, \dots, x_j^T) \quad j = 1, 2, \dots, J \\
 & x_{i,j} \in D_j \\
 & D_j = (d_{j,1}, d_{j,2}, \dots, d_{j,\lambda})
 \end{array} \quad [2.5]$$

Un problema no lineal puede representarse gráficamente como muestra la (fig. 0.1), donde una función no lineal  $F(x)$  presenta dos variables de diseño  $x_1$  y  $x_2$  y tres restricciones no lineales  $G_1(x)$ ,  $G_2(x)$ ,  $G_3(x)$ .

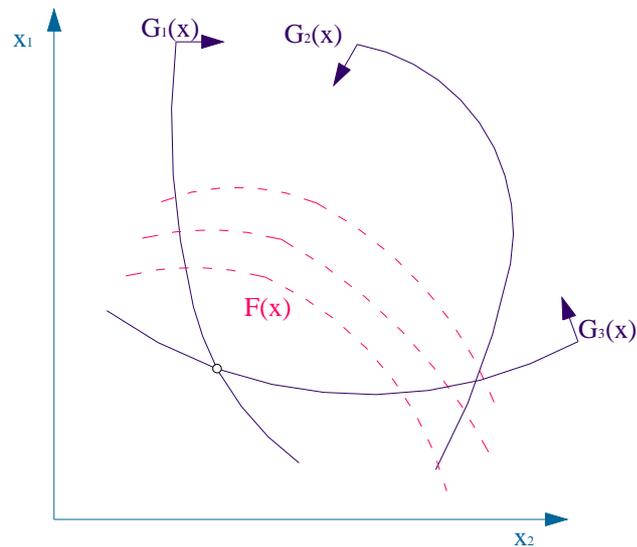


fig. 0.1. Representación gráfica de un problema no lineal.

### 2.3 Características de los problemas de optimización discretos.

Las principales características de los problemas de optimización discretos no lineales son:

- Alguna de las restricciones de desigualdad puede no estar activa en el punto óptimo porque la superficie de la restricción no pase a través de los puntos discretos, es decir, sólo se podría encontrar un punto cercano al límite de restricción.
- No hay un criterio simple para terminar el proceso iterativo. Además el óptimo local no está asegurado a menos que se realice un estudio exhaustivo.
- El tamaño de discretización y la naturaleza de los valores discretos puede gobernar el comportamiento de algunos algoritmos, así como la solución final del problema.

- El problema de diseño es altamente no lineal debido a la naturaleza de las variables de diseño.
- Las restricciones tienen diferentes formulaciones para diferentes miembros de la estructura.
- El esfuerzo computacional necesario para obtener resultados satisfactorios se incrementa con la complejidad del problema estudiado.

## 2.4 Técnicas de optimización estructural.

La mayor parte del tiempo consumido en un proceso de optimización se debe a la fase de *análisis sensitivo* (análisis de los impulsos respuesta por perturbaciones en las variables de diseño) [36]. Por esta razón, se han desarrollado varias técnicas para el cálculo eficiente de las sensibilidades en un problema de optimización. Las aproximaciones semi-analíticas y las diferencias finitas son las técnicas de análisis de respuesta más usadas. Desde el punto de vista algorítmico la técnica semi-analítica resulta un problema con solución típicamente lineal con múltiples lados, en el que la matriz de rigidez es la misma, mientras que la técnica de diferencias finitas produce un problema de reanálisis en el que la rigidez de la matriz se modifica debido a las perturbaciones de las variables de diseño.

Por otro lado la aplicación de métodos de *optimización por combinaciones* basados en conocimientos probabilísticos, tales como estrategias evolutivas [34], no necesitan información de gradiente y además evitan el desarrollo del costoso paso del análisis sensitivo. Durante las tres últimas décadas ha habido un crecimiento interesante en los sistemas de resolución de problemas con algoritmos basados en los procesos naturales [52]. Entre los algoritmos más conocidos de este tipo se encuentran la programación genética, los algoritmos genéticos, las estrategias evolutivas, y las redes neuronales. Tanto las estrategias evolutivas como los algoritmos genéticos imitan la evolución biológica y combinan el concepto de supervivencia de los más aptos, con operadores evolutivos para formar un mecanismo de búsqueda robusto. Los métodos de programación genética tienen el inconveniente de que el número de veces que el

problema debe de ser resuelto se incrementa exponencialmente con el número de variables, lo que hace que sea excesivamente costoso desde un punto de vista computacional; además, pueden quedar atascados en óptimos locales.

Los métodos *de programación matemática*, tales como programación cuadrática secuencial, son los más usados para solucionar problemas de optimización de programación no lineal. Estos métodos linealizan las funciones originales, para usar sus derivadas respecto a las variables de diseño en puntos obtenidos en el proceso de optimización y así construir un modelo aproximado al problema inicial. Presentan un radio de convergencia local satisfactorio, pero no pueden asegurar que se pueda encontrar el óptimo global. Por otro lado, las técnicas de optimización combinatoria, como las estrategias evolutivas, son en general más robustas y presentan un mejor comportamiento global que los métodos de programación matemática. Además, estos pueden sufrir de un radio de convergencia lento hacia el óptimo global, provocando un esfuerzo computacional en cálculos de gradiente muy grande.

Otra importante técnica que sigue los procesos naturales, y en particular las funciones del cerebro humano, son las *redes neuronales artificiales* que simulan la estructura de las redes neuronales del cerebro humano [35]. La principal ventaja de una red neuronal bien entrenada es que requiere un esfuerzo computacional bajo para producir una solución aproximada aceptable. Tales aproximaciones son adecuadas en situaciones donde los sistemas de análisis son grandes en tiempo y se requiere una estimación rápida, pero necesitan un periodo de entrenamiento grande y suministran resultados aproximados.

Se puede afirmar que los métodos de análisis probabilístico son computacionalmente eficientes y entre ellos las metodologías más robustas, encontrando el óptimo global, son los algoritmos genéticos y las estrategias evolutivas. Estas últimas presentan el inconveniente de la gran cantidad de teoría probabilística y estadística aplicada que es necesario usar, así como el hecho de que no existe una función analítica objetiva para la solución de estos problemas, por lo que no presentan un determinado método de optimización aplicable en cada caso, teniendo que recurrir a la propia intuición del ingeniero.

Por todo ello la técnica de optimización estructural seleccionada es el algoritmo genético (AG) cuyas características son:

- No es necesaria información previa acerca de la función objetivo o de las funciones de restricción.
- Es posible trabajar con estructuras complejas bajo diferentes condiciones de carga y restricciones.
- Se pueden emplear secciones de catálogos normalizados.
- Capacidad de ajustar más de una solución.
- Permite aplicar la experiencia del ingeniero al problema de optimización, como el número de variables de diseño o la relación de las variables de diseño con los miembros estructurales.

---

---

# CAPÍTULO 3

---

---

**ALGORITMOS GENÉTICOS.**

### 3.1 Introducción.

El famoso naturalista Charles Darwin definió la selección natural en su libro (Darwin, 1929) como la preservación de las diferencias y variaciones individuales favorables y la destrucción de las malas [18]. En la naturaleza, los individuos tienen que adaptarse a su medio ambiente en orden a sobrevivir en un proceso llamado *evolución*, en el que aquellas características que hacen a un individuo más adecuado para competir son preservadas cuando se reproduce, y aquellas características que lo hacen más débil se eliminan. Tales características son controladas por unidades llamadas *genes*, que forman grupos conocidos como *cromosomas*. En consecuencia, tras sucesivas generaciones no solamente los individuos más aptos sobreviven, sino también sus genes que son transmitidos a sus descendientes durante el proceso de recombinación sexual que se denomina *cruce*.

A finales de los años 1960, John H. Holland [21] se interesó en la aplicación de la selección natural en un aprendizaje de maquinaria. De los estudios realizados dedujo:

- La evolución es un proceso que opera sobre cromosomas más que sobre los seres vivos que ellos codifican.
- La selección natural es la relación entre los cromosomas y los cambios de sus estructuras decodificadas, de tal manera que los cromosomas que codifican estructuras satisfactorias se reproducen más frecuentemente que aquellos que no lo hacen.
- El proceso de reproducción es el punto en el que se produce la evolución.
- Las mutaciones pueden provocar que los cromosomas de los hijos biológicos sean diferentes de los de sus padres.
- Los procesos de recombinación pueden crear cromosomas diferentes en los hijos por combinación de los cromosomas de sus padres.

- La evolución biológica no tiene memoria. Los conocimientos necesarios para producir individuos adecuados en un determinado ambiente se contienen en el conjunto de los genes, en el conjunto de los cromosomas de los actuales individuos y en la estructura de los decodificadores de cromosomas.

Siguiendo estos principios desarrolló una técnica conocida como *planes reproductivos*, posteriormente denominada *algoritmos genéticos* (AG) [19], que permitía a los programas de ordenadores mimetizar el proceso de la evolución.

La principal virtud de los algoritmos genéticos es su robustez y el balance entre eficiencia y eficacia para sobrevivir en ambientes muy diferentes.

Se basan en los mecanismos de selección natural y en la *supervivencia de los más aptos*, y al contrario que muchos algoritmos de programación matemática no requieren de la evaluación de gradientes sobre la función objetivo y sus restricciones.

Trabajan sobre un código de las variables de diseño (la representación en cadenas binarias es uno de los códigos utilizados), lo que les permite extenderse a un espacio de diseño de variables enteras, discretas o mixtas.

Se dirigen desde varios puntos en el espacio de diseño a un conjunto de puntos de diseño, consiguiendo una mayor eficacia en la búsqueda del óptimo global.

Trabajan sobre las funciones directamente y no requieren de las derivadas, lo que produce convergencias más lentas pero evita caer en óptimos locales.

Usan reglas de transición probabilística, lo que es una ventaja importante ya que no es una variante de aproximación al azar.

Se puede decir que los algoritmos genéticos son implícitamente procesos de enumeración. Se permite la reproducción y el cruce entre individuos que representan una población en una generación, con el fin de obtener individuos más aptos. Se obtiene así una combinación de las características más deseables de los miembros de la población en los genes de los descendientes resultando más aptos que sus padres. Por lo

tanto, se puede decir que las sucesivas generaciones producen mejores valores de la función objetivo.

### 3.2 Codificación de las variables de diseño.

La codificación de las soluciones puede variar de un problema a otro y de un algoritmo genético a otro.

En los problemas de optimización estructural se tiende a usar como variables de diseño la sección de los elementos estructurales representada mediante cadenas de bits denominadas fenotipos. Estas cadenas se unen entre sí constituyendo los cromosomas que representan un *conjunto de diseño, estructura a modificar o individuo de la población* [27].

Cada cadena de bits representa una posición en la tabla de catálogos comerciales de secciones. Su longitud se evalúa mediante la expresión ([3.1]).

$$\lambda = 2^n \quad [3.1]$$

Donde:

$\lambda$  es el número de secciones del catálogo comercial.

$n$  es el número de bits.

Dado el catálogo comercial de la serie IPE [44] con 18 secciones distintas, el número de bits necesario para codificar dicha serie será de 5 como se muestra en la Tabla 3.1.

Número	Sección	Rep. binaria	Número	Sección	Rep. binaria
0	IPE-80	00000	9	IPE-270	01001
1	IPE-100	00001	10	IPE-300	01010
2	IPE-120	00010	11	IPE-320	01011
3	IPE-140	00011	12	IPE-360	01100
4	IPE-160	00100	13	IPE-400	01101
5	IPE-180	00101	14	IPE-450	01110
6	IPE-200	00110	15	IPE-500	01111
7	IPE-220	00111	16	IPE-550	10000
8	IPE-240	01000	17	IPE-600	10001

Tabla 3.1. Codificación de la serie comercial IPE.

Si se aplica esta serie para definir las variables de un pórtico simple un individuo de la población será codificado según la (fig. 3.1) cuya lectura es:

El individuo uno está formado por dos fenotipos cuya posición en la tabla del catálogo comercial de la serie IPE será la octava y la tercera, respectivamente, de lo que se deduce que la primera variable tiene por sección la IPE-220 y la segunda la IPE-120.

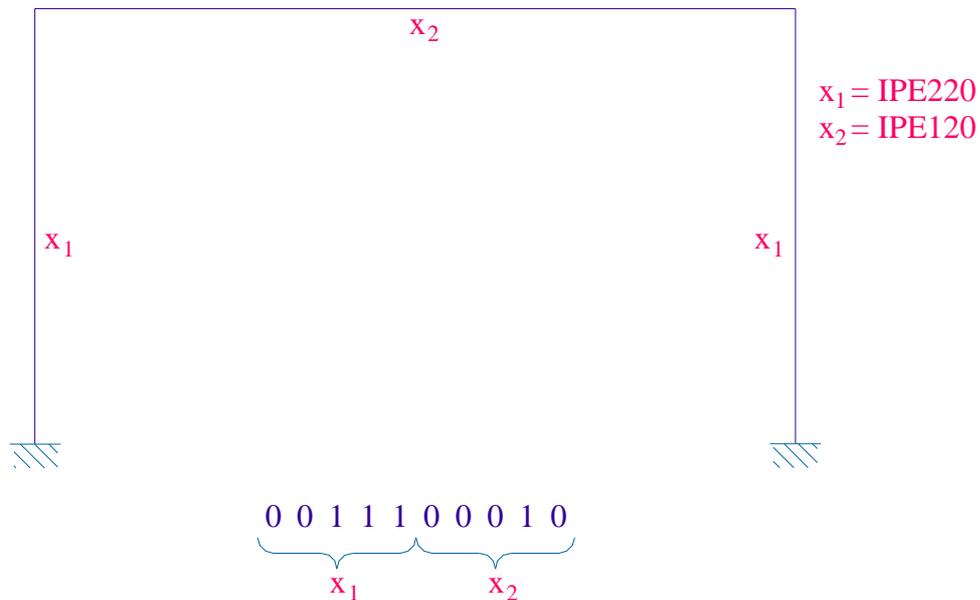


fig. 3.1. Representación binaria de los cromosomas de un individuo de la población.

Las cadenas de bits presentan varias ventajas por encima de otras codificaciones:

- Son simples de crear y manipular.
- Son tratables teóricamente y esa simplicidad hace que sea más fácil implementar teoremas.
- Con estas cadenas se pueden aplicar puntos de cruce y operadores de mutación a un gran número de problemas.

### 3.3 Anatomía de un algoritmo genético simple.

Un algoritmo genético simple (fig. 3.2), presenta inicialmente un conjunto de diseños creados al azar [6]. De este conjunto surgirán diseños nuevos y mejores a partir de los miembros o individuos más aptos. El proceso entero es similar a una población natural de entidades biológicas, donde generaciones sucesivas son concebidas, nacidas y desarrolladas hasta que están preparadas para reproducirse.

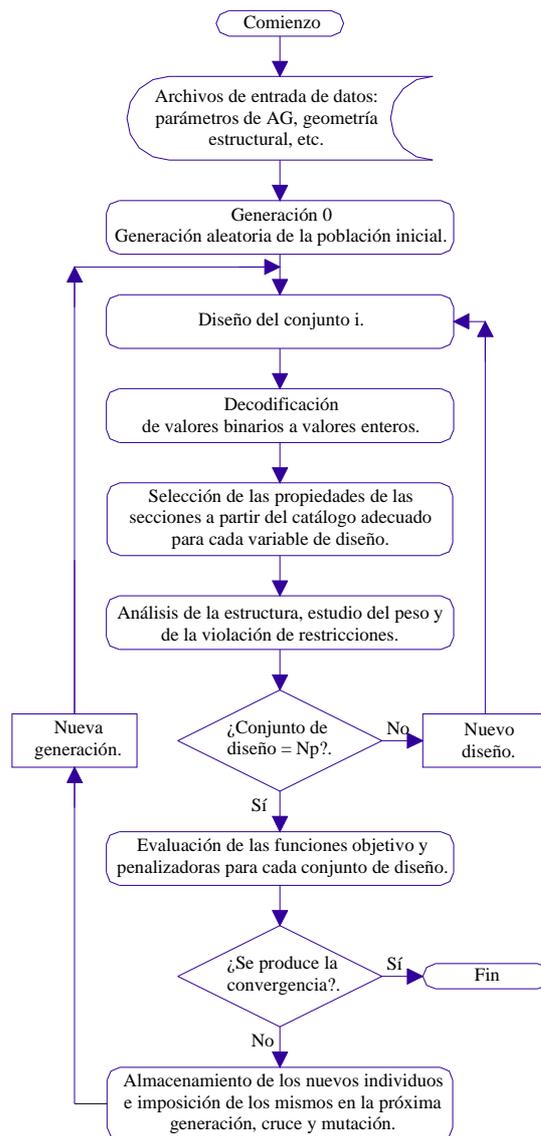


fig. 3.2. Flujo de un algoritmo genético simple.

Las operaciones básicas del algoritmo genético son:

- Reproducción.
- Cruce.
- Mutación.

En la *reproducción*, un individuo se copia en la nueva población de acuerdo a su aptitud. Esta aptitud se define según un valor de la función objetivo de tal manera, que las cadenas más aptas, aquellas con valores de la función objetivo más altos, reciben números más altos de descendientes.

El operador reproductor, también denominado selector, se puede implementar de múltiples formas aunque quizás la más fácil es crear una ruleta tarada, donde cada individuo de la población tiene asignado un punto de la ruleta de peso proporcional a su calidad (fig. 3.3). De esta forma las cadenas de mayor ajuste tendrán un número mayor de descendientes.

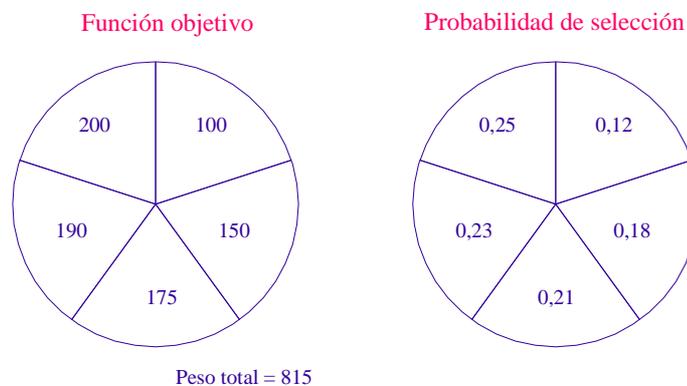


fig. 3.3. Probabilidad de selección.

La probabilidad de selección ( $P_i^{sel}$ ) vendrá dada por la expresión [3.2]:

$$P_i^{sel} = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^{N_p} F_j} \quad [3.2]$$

Donde:

$F_i$  es el valor de la función objetivo del individuo  $i$ -ésimo

$N_p$  es el número de individuos de la población y se conoce como tamaño de la población.

El cruce permite que aquellos miembros que han sido seleccionados intercambien características entre ellos mismos.

Entre las posibles formas de realizar el cruce destacan:

- Cruce por un punto.
- Cruce por dos puntos.

El cruce por un punto es el más simple y usado en los algoritmos genéticos. En él se selecciona una posición del cromosoma y se crea, por barrido de todos los caracteres entre la posición seleccionada y la longitud total del cromosoma, dos nuevas cadenas denominadas hijos (fig. 3.4).

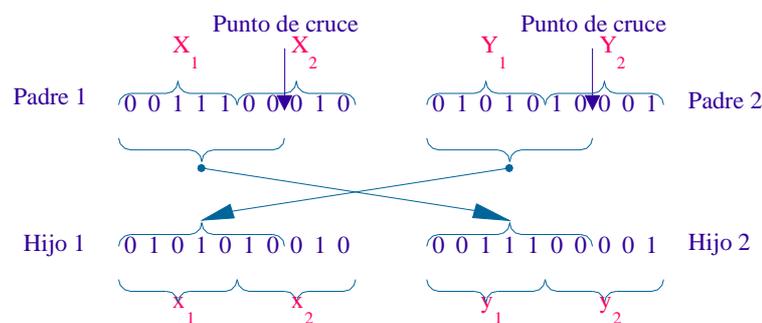


fig. 3.4. Cruce por un punto para cadenas binarias.

En el cruce por dos puntos se seleccionan dos posiciones del cromosoma, creando por barrido de los caracteres entre las dos posiciones seleccionadas, las nuevas cadenas denominadas hijos (fig. 3.5).

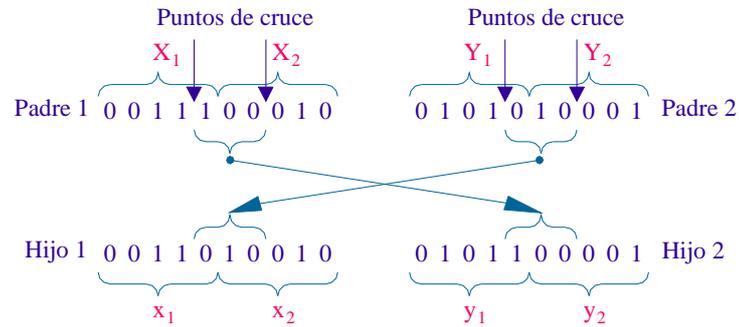


fig. 3.5. Cruce por dos puntos para cadenas binarias.

La *mutación* es el tercer paso realizado en un algoritmo genético simple con el fin de salvar al proceso, de una pérdida prematura de material genético adecuado. En términos de cadenas binarias, este paso corresponde a la selección de unos pocos miembros de la población, determinación de localizaciones al azar en sus cadenas y cambio del 0 por el 1 en dichas localizaciones y/o viceversa.

Un ejemplo de mutación se refleja en la fig. 3.6.

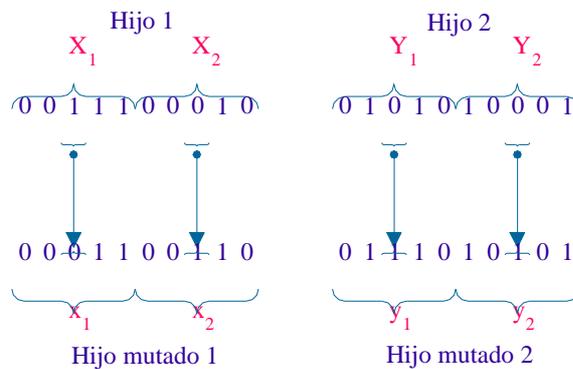


fig. 3.6. Mutación sobre cadenas binarias.

Las operaciones (reproducción, mutación y cruce) se repiten a lo largo de varias generaciones hasta que no se produzcan más aumentos en la mejora de aptitud. El miembro con mayor nivel de aptitud es el diseño óptimo.

### 3.3.1 Composición de la población.

Un algoritmo genético simple crea en cada generación una población enteramente nueva (fig. 3.7). Para ello selecciona dos individuos de la población actual, denominados padre y madre. Estos individuos cruzan su información genética, siguiendo el esquema de cruce seleccionado y mutan, obteniendo dos nuevas cadenas denominadas hermano y hermana. Por último se evalúan las nuevas cadenas mediante la función objetivo y se comprueban los criterios de convergencia.

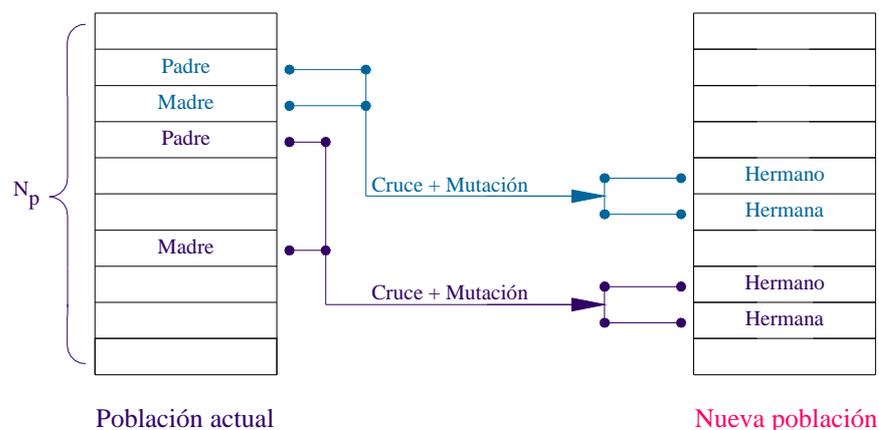


fig. 3.7. Creación de nuevas poblaciones.

### 3.3.2 Gestión de restricciones

Las restricciones se pueden clasificar en dos tipos: explícitas e implícitas. Las restricciones explícitas se analizan sin un sistema de simulación. El coste es un claro ejemplo de restricción explícita. Por el contrario, las restricciones implícitas requieren análisis y comprobaciones de los diseños como puede ser la asignación de áreas a las secciones.

Existen varios métodos de ajuste de las restricciones:

- Usando operadores especializados en viabilidad.
- Usando, solamente, soluciones viables.
- Penalizando las soluciones que violan una o más restricciones.

Los operadores especializados trabajan solamente con restricciones explícitas, y son útiles para problemas de coste. El segundo y tercer método se pueden usar con restricciones implícitas o explícitas, o combinación de ambas. En el segundo se eliminan los diseños de la población que violan una o más restricciones lo que puede resultar ineficaz en problemas grandes con pocas soluciones viables frente a las soluciones inviables. El método más adecuado es, por lo tanto, la penalización de los miembros de una población que tengan una o más violaciones aunque existen dificultades al aplicar las funciones de penalización debido a que suelen ser problemas dependientes.

En general, los problemas abarcados con algoritmos genéticos son del tipo de optimización restringida, y por ello el problema de optimización debe ser convertido en problemas no restringidos. En este caso la penalización se basa en el método de transformación representado en la ecuación [3.3].

$$\text{Minimizar } \bar{F}(x,r) = F(x) + \bar{P}(r, G(x), H(x)) \quad [3.3]$$

Donde:

$\bar{F}(x,r)$  es la función objetivo modificada.

$F(x)$  es la función objetivo.

$\bar{P}(r, G(x), H(x))$  es el término de penalización función del coeficiente de penalización  $r$  y de las funciones de restricción  $G(x)$  y  $H(x)$ .

El método queda definido mediante los parámetros de penalización y las funciones de restricción además de las reglas que actualizan los parámetros de penalización.

### 3.3.3 Criterios de convergencia.

Los criterios de convergencia deciden cuando se termina el proceso de optimización. Entre los múltiples criterios que existen destacan:

1. El diseño más apto no se ha modificado en las últimas 30 generaciones, o el porcentaje de la diferencia entre el diseño más apto ( $F^{ac}$ ) de la generación

actual y el diseño de la generación 30 veces anterior ( $F^{ac-30}$ ) es menor que un valor dado  $C^{ac}$  [3.4].

$$\frac{F^{ac} - F^{ac-30}}{F^{ac}} \leq C^{ac} \quad [3.4]$$

2. El porcentaje de la diferencia entre el ajuste medio de la población actual  $F^{med}$  y el ajuste del mejor diseño  $F^{ac}$  es menor que un valor dado  $C^{med}$  [3.5].

$$\frac{F^{ac} - F^{med}}{F^{ac}} \leq C^{med} \quad [3.5]$$

3. Se permite un número de generaciones fijo [3.6].

$$gen^{max} = 150 \quad [3.6]$$

---

---

# CAPÍTULO 4

---

---

**ALGORITMO GENÉTICO ELITISTA.**

## 4.1 Introducción.

El primer objetivo de los investigadores en el campo de los algoritmos genéticos fue la búsqueda de un algoritmo robusto y eficaz, además de rápido. En los últimos tiempos, se han usado diferentes parámetros incluso para el mismo problema y se han desarrollado nuevas formas para los operadores de cruce, mutación y selección que aumenten la velocidad de los algoritmos genéticos ya que, como se ha comprobado, la modificación de los parámetros y operadores que los definen pueden impactar fuertemente sobre el funcionamiento de dicho algoritmo.

Con este objetivo se ha implementado un nuevo operador de cruce denominado *cruce por un fenotipo*, un nuevo operador de selección o reproducción denominado *aptitud* y una nueva forma de componer la población. Además se ha modificado la codificación de las variables de diseño para que todas ellas tengan la misma probabilidad de selección inicial, y se ha definido una función objetivo modificada que, aplicada a estructuras metálicas, minimice el peso de la estructura bajo las restricciones de los coeficientes de seguridad (Estados Límites Últimos). El resultado es un nuevo algoritmo genético denominado *elitista*.

En este capítulo:

- Se describe el algoritmo genético desarrollado.
- Se ajustan los parámetros de dicho algoritmo a la resolución de diversos problemas.
- Se valida el operador de cruce.
- Se estudian los resultados obtenidos, en el proceso de optimización, empleando diferentes normativas de seguridad, nacionales e internacionales.
- Se verifican los resultados con el programa ESCAL3D [10] y con el módulo CIVILFEM [16] del programa de cálculo por elementos finitos ANSYS [1].
- Se comparan los resultados obtenidos con la técnica desarrollada y los obtenidos con el programa de cálculo de estructuras CYPE.
- Se analizan y discuten los resultados.

## 4.2 Algoritmo genético elitista.

### 4.2.1 Operador de cruce *por un fenotipo*.

El operador de cruce intercambia información genética entre dos individuos denominados padres, obteniendo dos nuevos individuos denominados hijos. Esta información genética, en la optimización estructural, son las variables de diseño que definen un individuo, codificadas mediante cadenas de bits.

Por el contrario, el operador de mutación provoca alteraciones en las cadenas de bits, obteniendo nuevas variables de diseño e impidiendo la pérdida prematura de material genético adecuado.

En el cruce por un punto y en el cruce por dos puntos se produce el intercambio de bits y no de variables de diseño. Esto provoca que aquellas variables que soportan el punto o puntos de cruce se vean modificadas y no simplemente intercambiadas, mezclando así la finalidad del cruce y la mutación y aumentando las alteraciones que la probabilidad de mutación provoca sobre las cadenas de bits.

Con el fin de intercambiar únicamente variables de diseño se ha implementado un nuevo operador de cruce denominado *por un fenotipo*. En él, el punto de cruce se sitúa de forma aleatoria entre dos fenotipos o variables de diseño, creando por barrido de todos los caracteres entre la posición seleccionada y la longitud total del cromosoma, dos nuevas cadenas denominadas hijos (fig. 4.1).

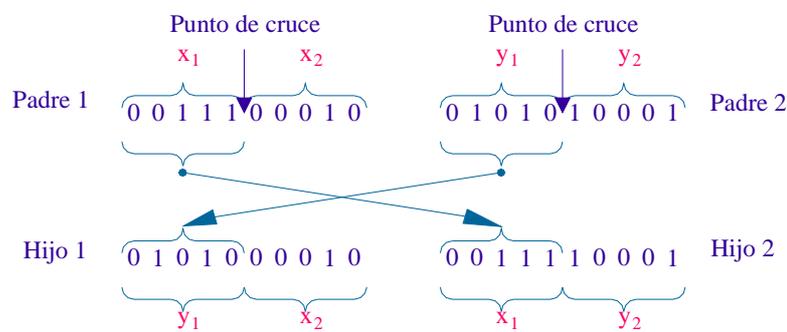


fig. 4.1. Cruce por un fenotipo para cadenas binarias.

### 4.2.2 Operador reproductor *aptitud*.

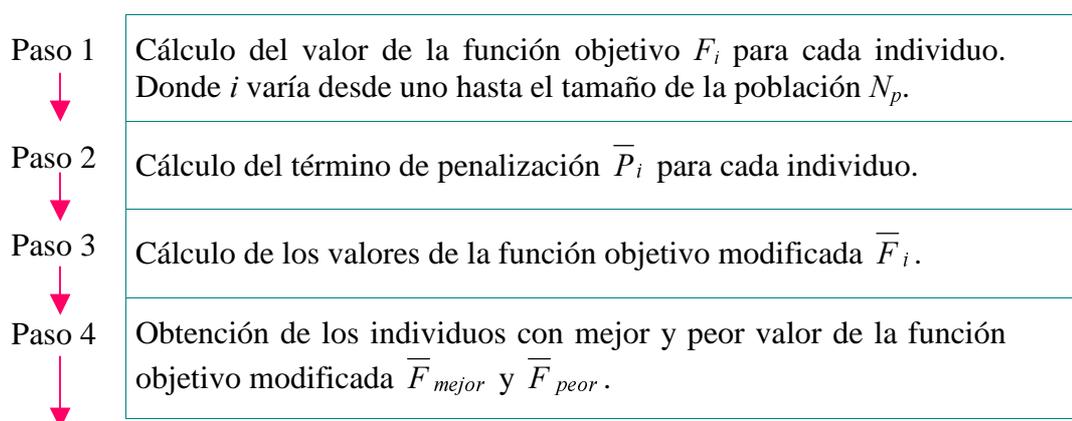
En general, un operador reproductor permite que todos los individuos de una población puedan ser seleccionados para formar parte de la nueva población, independientemente de que el valor de la función objetivo correspondiente esté muy alejado o no del valor medio.

Considerando esta desviación de los valores de la función objetivo se ha implementado un nuevo operador reproductor denominado *aptitud*, el cual define una nueva función a partir de la función objetivo modificada, denominada *función de aptitud*.

Una vez obtenido el valor de la función de aptitud o aptitud de todos los individuos, se eliminan aquellos cuyo valor sea inferior a la media. Se define entonces, para los individuos supervivientes, una *probabilidad de rechazo*. El valor de esta probabilidad será inverso a la aptitud, es decir, a mayor aptitud de un individuo superviviente, menor probabilidad de rechazo.

De esta manera, la nueva población se crea a partir de los mejores individuos de la población anterior, aumentando la velocidad del algoritmo genético en la búsqueda del individuo óptimo para esa evolución.

La representación esquemática del operador reproductor es:



Paso 5	Evaluación de la función aptitud $FF_i$ para todos los individuos mediante la expresión:
	$FF_i = \bar{F}_{mejor} + \bar{F}_{peor} - \bar{F}_i \quad [4.1]$
Paso 6	Almacenamiento de la población ordenada de mayor a menor aptitud.
Paso 7	Cálculo del valor de la aptitud media $FF_{media}$ .
	$FF_{media} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} FF_i}{N_p} \quad [4.2]$
Paso 8	Muerte de los individuos con valores de aptitud $FF_i$ inferiores a la aptitud media $FF_{media}$ .
Paso 9	Obtención del peor y del mejor valor ( $\bar{F}_{mejor}^{nueva}$ y $\bar{F}_{peor}^{nueva}$ ) de la función objetivo modificada en la población superviviente $N_{sup}$ .
Paso 10	Definición de la nueva función de aptitud $FF_i^{nueva}$ para los individuos supervivientes $N_{sup}$ .
	$FF_i^{nueva} = \bar{F}_{mejor}^{nueva} + \bar{F}_{peor}^{nueva} - \bar{F}_i \quad [4.3]$
Paso 11	Cálculo de la función aptitud acumulada $FF_i^{acum}$ .
	$FF_i^{acum} = FF_i^{nueva} + FF_{i-1}^{nueva} \quad [4.4]$
Paso 12	Obtención del peor valor de la función aptitud acumulada $FF_{peor}^{acum}$ .
Paso 13	Cálculo de la probabilidad de rechazo $P_i^{rec}$ de los individuos supervivientes.
	$P_i^{rec} = \frac{FF_i^{acum}}{FF_{peor}^{acum}} \quad [4.5]$

En la (Tabla 4.1) se representa un ejemplo del cálculo de la probabilidad de rechazo siguiendo el esquema del operador reproductor aptitud.

Se ha considerado una población inicial con cinco individuos cuyos valores de la función objetivo modificada son 15, 22, 31, 1006 y 1007. Tras la aplicación del operador reproductor la población superviviente consta de tres individuos con una probabilidad de rechazo respectivamente de 0,4428; 0,7857 y 1.

Individuo	$\bar{F}_i$	$FF_i$ [4.1]	Muerte	$\bar{F}_i^{nueva}$	$FF_i^{nueva}$ [4.3]	$FF_i^{acum}$ [4.4]	$P_i^{rec}$ [4.5]
1	15	15+1007-15=1007	1007>605,8	15	15+31-15=31	31	$\frac{31}{70} = 0,4428$
2	22	15+1007-22=1000	1000>605,8	22	15+31-22=24	24+31=55	$\frac{55}{70} = 0,7857$
3	31	15+1007-31=991	991>605,8	31	15+31-31=15	15+55=70	$\frac{70}{70} = 1,0000$
4	1006	15+1007-1006=16	16<605,8				
5	1007	15+1007-1007=15	15<605,8				
$N_p = 5$	$\bar{F}_{mejor} = 15$	$\sum_{i=1}^5 FF_i = 3029$	$N_{sup} = 3$	$\bar{F}_{mejor}^{nueva} = 15$		$FF_{peor}^{acum} = 70$	
	$\bar{F}_{peor} = 1007$	$FF_{media} = 605,8$		$\bar{F}_{peor}^e = 31$			

Tabla 4.1. Cálculo de la probabilidad de rechazo.

### 4.2.3 Composición de la población.

En un algoritmo genético simple el mejor individuo de la población actual puede fracasar en producir descendientes para la próxima generación. Para evitar esto se desarrolló la estrategia elitista [19] que copia el mejor individuo de la población actual en la nueva población, consiguiendo con ello un aumento de la velocidad en la obtención del individuo óptimo en una evolución completa del proceso de optimización [28].

La estrategia elitista implementada no guarda un único elemento, sino un porcentaje de los mejores individuos de la población según la probabilidad élite. Al conjunto de individuos seleccionados se denomina *élite*.

Así, la nueva población estará formada por tres tipos de individuos (fig. 4.2):

### 1.- Individuos élite.

El número de estos individuos  $N_e$  se obtiene multiplicando la probabilidad élite  $P_e$  por el tamaño de la población  $N_p$  [4.6].

$$N_e = P_e \cdot N_p \quad [4.6]$$

Se obtienen copiando los mejores individuos de la población actual sin que sufran mutación.

### 2.- Individuos de cruce.

El número de estos individuos  $N_c$  se obtiene multiplicando la probabilidad de cruce  $P_c$  por el tamaño de la población  $N_p$  [4.7].

$$N_c = P_c \cdot N_p \quad [4.7]$$

Se obtienen seleccionando los individuos de acuerdo con su probabilidad de rechazo y mutándolos en función de la probabilidad de mutación. El número de dígitos binarios que se modifican  $N_b$  será función de la probabilidad de mutación y de la longitud de la cadena de un individuo  $\lambda_i$  [4.8]:

$$N_b = \lambda_i \cdot P_{mut} \quad [4.8]$$

### 3.- Individuos aleatorios.

El número de estos individuos  $N_a$  será cero cuando la suma de la probabilidad élite y la probabilidad de cruce sea uno, ya que en este caso toda la población estará formada por individuos élite y de cruce. En caso contrario el número de individuos aleatorios será el número de individuos que resten para completar el tamaño de la población una vez obtenidos los individuos élite y los de cruce [4.9].

$$N_a = \begin{cases} N_p - (N_e + N_c) & \text{si } P_c + P_e < 1 \\ 0 & \text{si } P_c + P_e = 1 \end{cases} \quad [4.9]$$

Se obtienen seleccionando los individuos en la parte superviviente en función de su probabilidad de rechazo y mutándolos en función de la probabilidad de mutación.

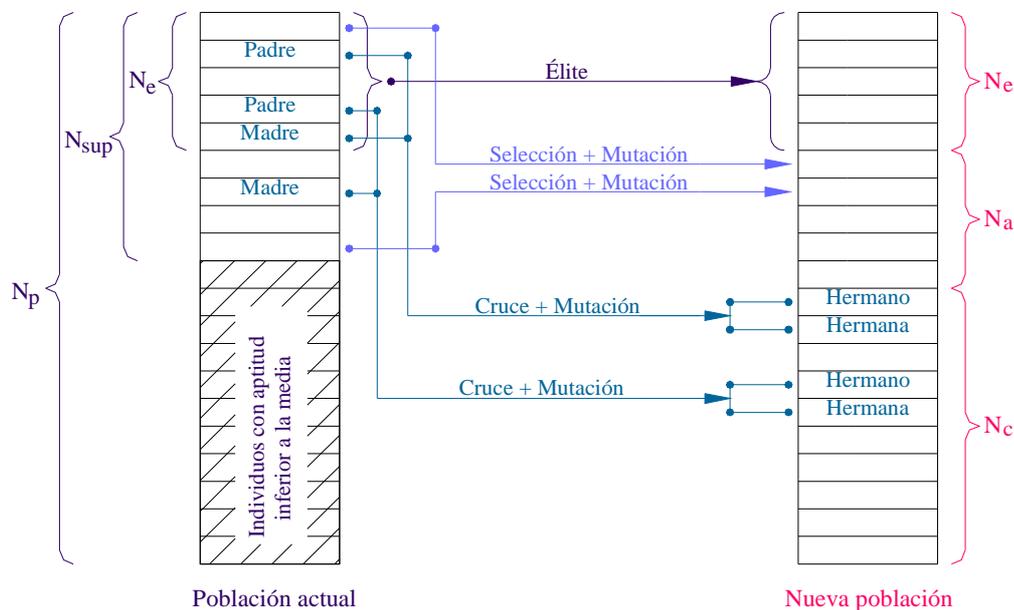


fig. 4.2. Composición de nuevas poblaciones.

#### 4.2.4 Codificación de las variables de diseño.

Como se ha visto en el capítulo anterior, un algoritmo genético simple parte inicialmente de un conjunto de diseños creados al azar y codificados mediante la unión de cadenas de bits, denominadas fenotipos, que representan una posición en el catálogo comercial considerado.

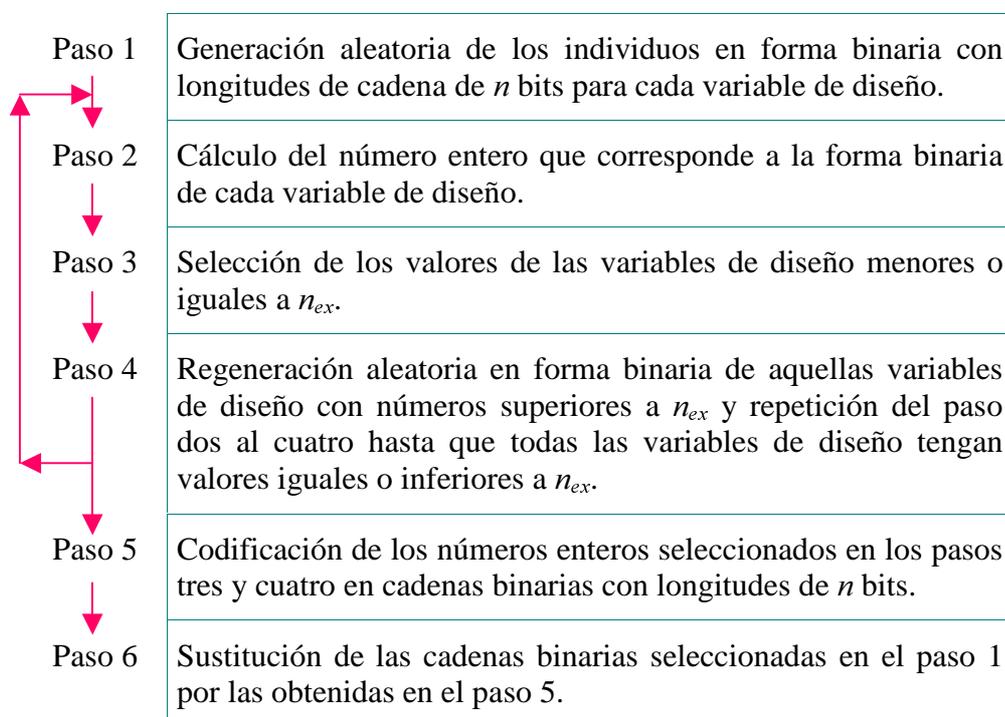
En el caso de la codificación del catálogo comercial de la serie IPE (laminado) se necesitan 5 bits, lo que produce 32 posibles variables de diseño frente a las 18 existentes.

Las posiciones vacías se pueden rellenar reasignando los primeros 14 valores del catálogo comercial pero ya no existiría una probabilidad de selección inicial similar para los valores discretos del espacio de diseño (Tabla 4.2).

Número	Sección	Rep. binaria	Número	Sección	Rep. binaria
0	IPE-80	00000	16	IPE-550	10000
1	IPE-100	00001	17	IPE-600	10001
2	IPE-120	00010	18	IPE-80	10010
3	IPE-140	00011	19	IPE-100	10011
4	IPE-160	00100	20	IPE-120	10100
5	IPE-180	00101	21	IPE-140	10101
6	IPE-200	00110	22	IPE-160	10110
7	IPE-220	00111	23	IPE-180	10111
8	IPE-240	01000	24	IPE-200	11000
9	IPE-270	01001	25	IPE-220	11001
10	IPE-300	01010	26	IPE-240	11010
11	IPE-320	01011	27	IPE-270	11011
12	IPE-360	01100	28	IPE-300	11100
13	IPE-400	01101	29	IPE-320	11101
14	IPE-450	01110	30	IPE-360	11110
15	IPE-500	01111	31	IPE-400	11111

Tabla 4.2. Codificación extendida de la serie comercial IPE con longitudes de cadena de 5 bits.

La solución implementada para longitudes de cadena de  $n$  bits con  $n_{pos}$  secciones posibles frente a las  $n_{ex}$  secciones existentes en el catálogo es:



#### 4.2.5 Función objetivo modificada.

El problema planteado es la obtención de estructuras metálicas de peso mínimo que cumplan las restricciones de seguridad marcadas por la normativa considerada, lo que matemáticamente se puede expresar como [4.10]:

$$\begin{array}{ll} \text{función objetivo a minimizar} & F(x) = \rho \cdot \sum_{s=1}^{n_{bar}} x_s \cdot L_s \\ \text{restricciones} & G_s(x) \leq 1 \quad H_s(x) \leq 1 \quad \dots \quad T_s(x) \leq 1 \end{array} \quad [4.10]$$

Siendo la función objetivo  $F(x)$ , el peso de la estructura analizada definido a partir de la densidad del material  $\rho$ , el área de la sección  $x_s$  y la longitud  $L_s$  de las  $n_{bar}$  barras que componen la estructura; y las restricciones los valores límite que pueden alcanzar los coeficientes de seguridad calculados en cada barra  $G_s(x)$ ,  $H_s(x)$ , ...,  $T_s(x)$ .

Como se vio en el capítulo anterior, la función objetivo modificada transforma problemas de optimización restringidos [4.10] en problemas de optimización no restringidos, sumando a la función objetivo un término de penalización donde se engloban las restricciones afectadas por un coeficiente de penalización  $r_i$ .

Aplicando esta transformación, el problema vendrá dado por la expresión [4.11]:

$$\bar{F}(x, r) = F(x) + \sum_{s=1}^{n_{bar}} [r_1 \cdot G_s(x) + r_2 \cdot H_s(x) + \dots + r_{n_c} \cdot T_s(x)] \quad [4.11]$$

Donde  $n_c$  es el número de coeficientes de seguridad marcados por la normativa considerada.

De los dos términos que definen la función objetivo modificada, el más fácil de obtener es el peso ya que se define directamente a partir de los datos geométricos de la estructura, de las características del material asignado a las barras y de las propiedades de las secciones asignadas a las mismas.

Por el contrario para obtener el segundo término es necesario definir el coeficiente de penalización y realizar un análisis de la estructura, que permita conocer

los esfuerzos y momentos que definen los coeficientes de seguridad y por lo tanto, las restricciones del problema.

El análisis de la estructura se realiza mediante el programa de análisis estático y dinámico de estructuras espaciales denominado *ESCAL3D*, y la comprobación de las barras o cálculo de los coeficientes de seguridad mediante el módulo *COMESC*, ambos diseñados conjuntamente por las Áreas de Ingeniería de la Construcción, Proyectos de Ingeniería y Expresión Gráfica de la Universidad de Oviedo.

Para la definición del coeficiente de penalización es necesario indicar que una barra es segura cuando los coeficientes de seguridad calculados en ella son iguales o inferiores a uno [4]. Además, si el coeficiente es muy inferior a la unidad la barra se considera sobredimensionada, es decir, existe otra sección de menor área que asignada a dicha barra proporciona coeficientes más próximos a la unidad disminuyendo el peso de la estructura.

Por el contrario, si el coeficiente de seguridad calculado es superior a la unidad, la barra no es capaz de soportar los esfuerzos y momentos en ella calculados, por lo que es necesario buscar otra sección cuyas propiedades resistentes sean capaces de soportar dichos esfuerzos y momentos obteniendo de esta forma una estructura segura.

Siguiendo el concepto de *estructura segura*, se puede definir el coeficiente de penalización como el valor que multiplicado por el coeficiente de seguridad calculado en una barra, aumente dicho coeficiente si éste es distinto de uno y lo mantenga constante si es igual a uno. La suma de los coeficientes penalizados de todas las barras que forman la estructura, será el término de penalización de la función objetivo modificada.

Por lo tanto se puede decir que el término de penalización aumenta el peso de aquellas estructuras que tienen barras que no cumplen alguno de los coeficientes de seguridad o barras sobredimensionadas, alejándolas del peso mínimo buscado.

Inicialmente se asignó al coeficiente de penalización el valor de 1000 para coeficientes de seguridad inferiores o superiores a uno y de 1 para coeficientes iguales a uno [4.12].

$$r(c) = \begin{cases} c & \text{si } c=0 \text{ ó } c=1 \\ c \cdot 1000 & \text{si } c \neq 0 \text{ y } c \neq 1 \end{cases} \quad c = G_s(x) \quad [4.12]$$

Como se observa en la (fig. 4.3) este primer ajuste no diferencia entre la penalización que se realiza sobre las estructuras que contienen barras con coeficientes próximos a la unidad y la que se realiza sobre las estructuras cuyas barras presentan coeficientes alejados de ella.

Por otro lado, los coeficientes inferiores a la unidad son menos penalizados que los superiores, provocando estructuras óptimas sobredimensionadas.

En un intento de penalizar más a los coeficientes alejados de la unidad, favoreciendo la búsqueda del peso mínimo en zonas próximas ella, se asignó al coeficiente de penalización una distribución exponencial [4.13].

$$r(c) = \begin{cases} 0 & \text{si } c = 0 \\ e^{2-c} & \text{si } 0 < c < 1 \\ 1 & \text{si } c = 1 \\ e^c & \text{si } c > 1 \end{cases} \quad c = G_s(x) \quad [4.13]$$

Aunque la distribución exponencial sí penaliza más fuertemente aquellos individuos con coeficientes de seguridad alejados de la unidad, afecta de la misma manera a valores inferiores a uno que a valores superiores, es decir, no distingue entre estructuras sobredimensionadas y estructuras no válidas (fig. 4.4). Esto puede llevar a que estructuras sobredimensionadas con coeficientes muy inferiores a la unidad pero con peso de la estructura muy grande, tengan valores de la función objetivo modificada similares a estructuras menos pesadas pero con coeficientes de seguridad superiores a la unidad.

Además, el crecimiento de una distribución exponencial es tan rápido que valores de coeficientes superiores a la unidad pueden producir coeficientes de penalización excesivamente grandes desde un punto de vista computacional.

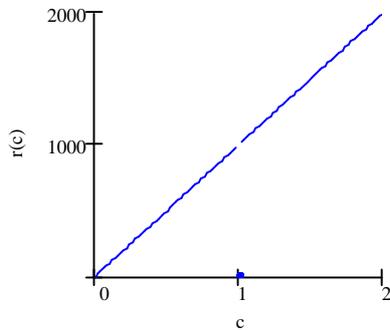


fig. 4.3. Coeficiente de penalización lineal.

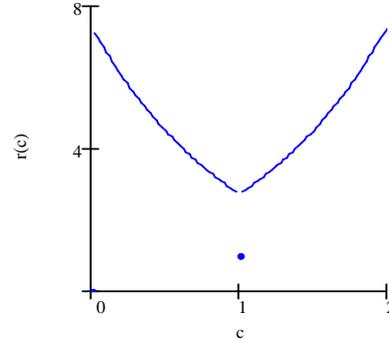


fig. 4.4. Coeficiente de penalización exponencial.

Por todo ello se realizan dos tipos de ajuste del coeficiente de penalización, en función de que el coeficiente de seguridad calculado sea inferior o no a la unidad [4.14]. En el primer caso se sigue una distribución exponencial favoreciendo así a los individuos con coeficientes próximos a la unidad. En el segundo caso se sigue una distribución lineal con valores de penalización muy superiores a los anteriores para evitar la igualdad de peso entre estructuras sobredimensionadas y estructuras no válidas (fig. 4.5).

$$r(c) = \begin{cases} 0 & \text{si } c = 0 \\ e^{2-c} \cdot 10 & \text{si } 0 < c < 1 \\ 1 & \text{si } c = 1 \\ c \cdot 1000 & \text{si } c > 1 \end{cases} \quad c = G_s(x) \quad [4.14]$$

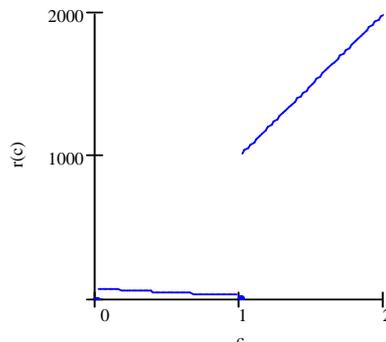


fig. 4.5. Coeficiente de penalización aplicado.

4.2.6 Flujo del algoritmo genético elitista.

El algoritmo genético elitista se puede representar esquemáticamente como sigue:

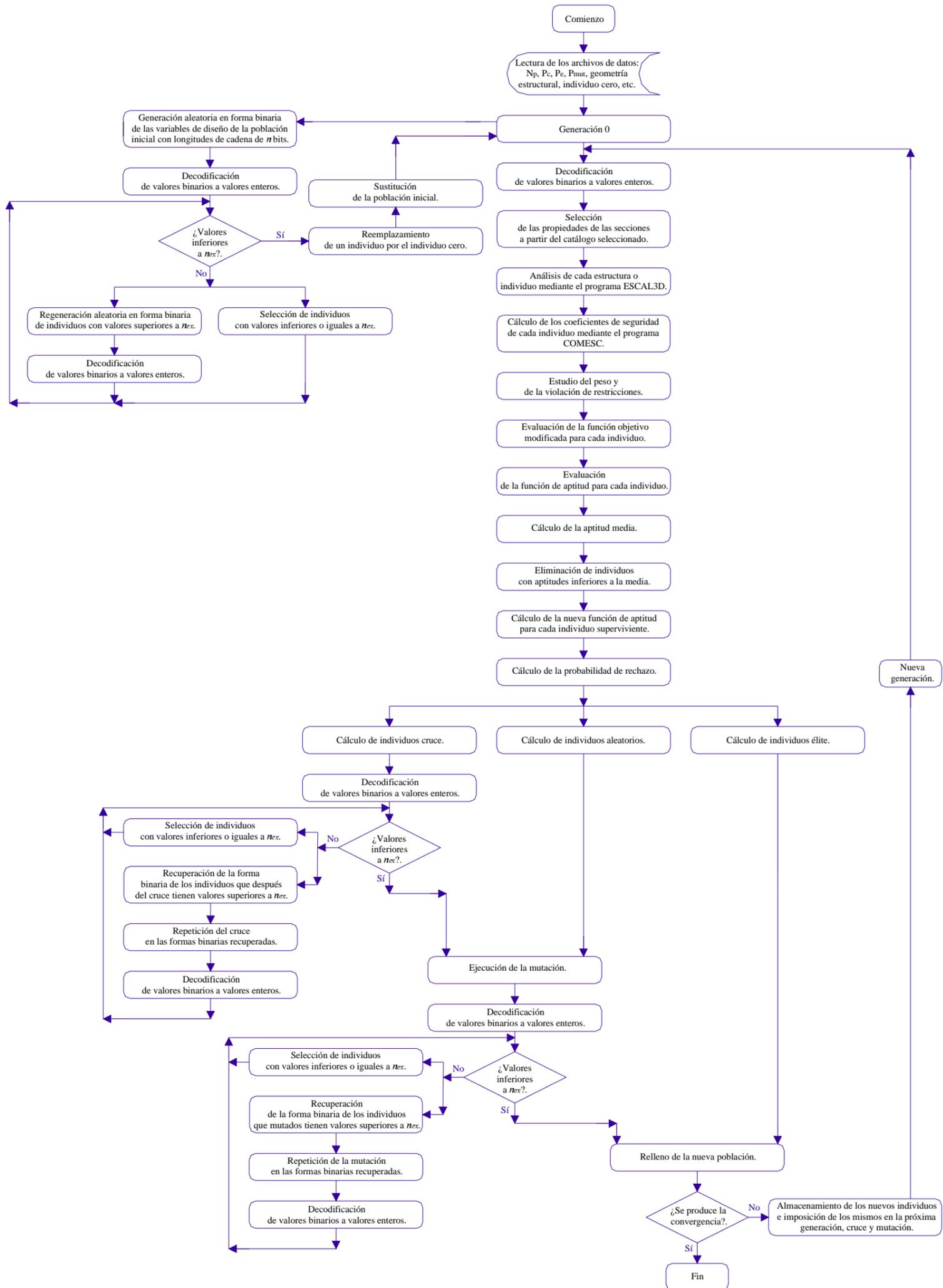


fig. 4.6. Flujo del algoritmo genético elitista.

### 4.3 Ajuste inicial de los parámetros del algoritmo genético elitista.

El ajuste inicial de los parámetros del algoritmo genético elitista intenta encontrar aquellos valores o intervalos de los parámetros, en los cuales el algoritmo funciona mejor [28].

Este ajuste se ha realizado sobre una estructura articulada bidimensional compuesta por 10 barras (fig. 4.7). Esta estructura, de uso frecuente en la construcción de edificios industriales, es una estructura pequeña donde el cálculo de esfuerzos y de coeficientes de seguridad se puede abordar manualmente, lo que permite un análisis rápido de los resultados obtenidos

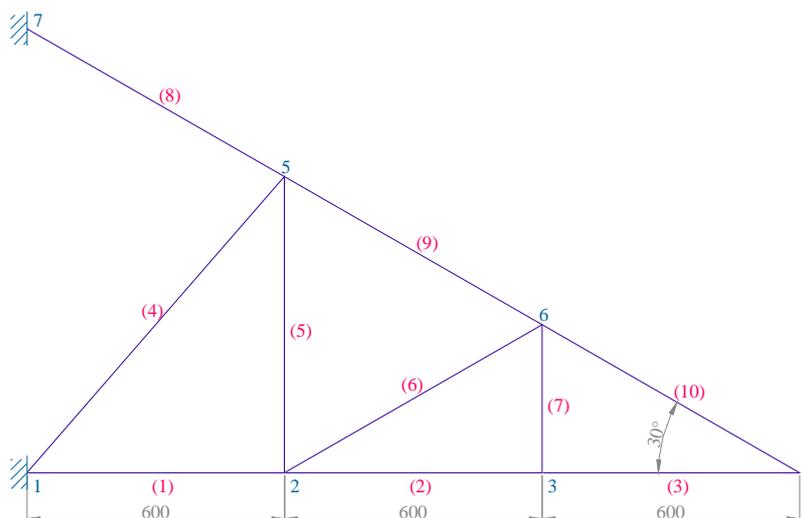


fig. 4.7. Estructura articulada bidimensional de 10 barras.

Las diez barras se han agrupado en cinco tipos de secciones distintas considerando la forma de trabajar de cada barra y su ubicación en la estructura (fig. 4.9). Perfiles HEA en barras sometidas a flexiones elevadas, perfiles IPN en secciones sometidas a compresión y perfiles IPE en el resto.

El material asignado a dichas barras, acero A-42, se ha seleccionado siguiendo la norma española NBE-EA-95 de Estructuras de Acero en la Edificación [32].

La estructura se introduce gráficamente en el programa ESCAL3D asignando el material y las secciones a las distintas barras que configuran la celosía (fig. 4.8).

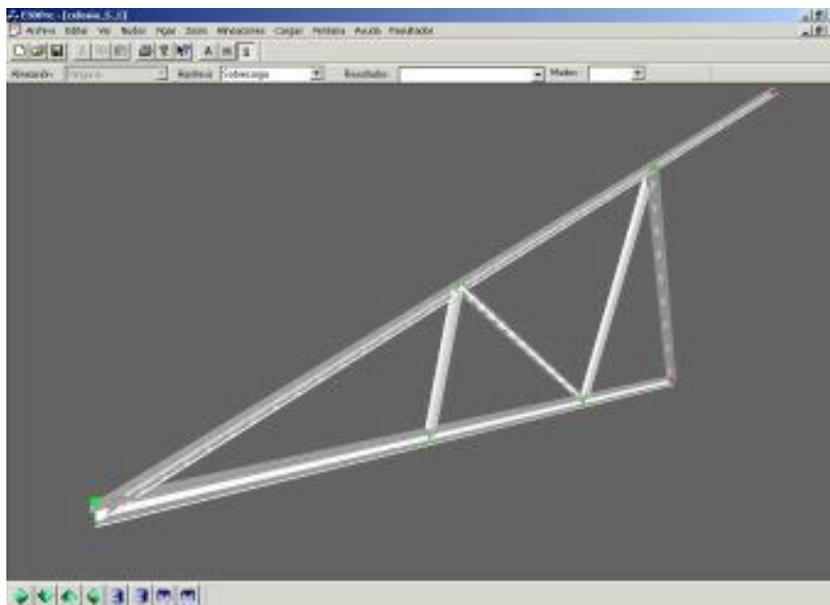


fig. 4.8. Entorno gráfico del programa ESCAL3D.

Se consideran dos hipótesis simples: el peso propio de la estructura y una sobrecarga formada por tres cargas puntuales aplicadas en el punto 2, 3 y 4 de 40 toneladas cada una.

Así mismo se considera una combinación de las hipótesis simples donde el peso propio multiplicado por el coeficiente 1,33 se suma a las sobrecargas multiplicadas por el coeficiente 1,5, según los coeficientes de ponderación de la norma NBE-EA-95.

Un primer análisis de la estructura con el programa ESCAL3D proporciona los archivos necesarios para iniciar la optimización. A lo largo de ésta, la estructura de cada individuo se analiza con el programa ESCAL3D y sus coeficientes de seguridad, según la norma española MV-103, se evalúan mediante el módulo COMESC.

La generación aleatoria de las variables de diseño de los individuos que componen una población, se realiza entre un conjunto de 2835 secciones distintas, lo que produce cadenas en forma binaria de 12 bits (fig. 4.9).

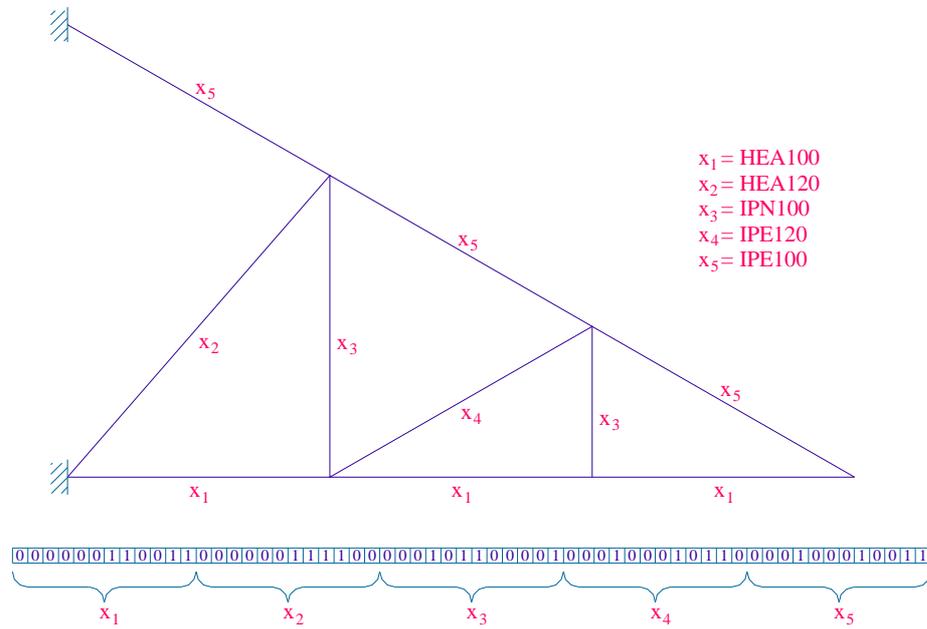


fig. 4.9. Representación binaria de los cromosomas de un individuo de la población.

La posibilidad de poder seleccionar una sección entre 2835 tipos distintos, dará lugar a una estructura con poco peso y con coeficientes de seguridad muy próximos a uno. Pero también dará lugar a estructuras inviables desde un punto de vista constructivo, al mezclar secciones de fácil montaje o unión, con otras secciones de difícil unión como pueden ser los perfiles en L.

Esto se ve compensado con la obtención de numerosos diseños diferentes y viables entre los que el diseñador puede seleccionar el más económico o el más fácil de ejecutar y por la utilización de secciones que a priori son rechazadas y que sin embargo desde un punto de vista resistente podrían ser utilizadas.

Para el ajuste de los parámetros ( $N_p$ ,  $P_e$ ,  $P_c$ ,  $P_{mut}$ ) y el análisis de su impacto sobre el algoritmo se ejecutan para cada combinación de parámetros cinco evoluciones completas del proceso de optimización.

Las combinaciones estudiadas son (Tabla 4.3):

<i>Normativa</i>	MV-103	<i>Cruce</i>	Por un fenotipo
<i>Parámetros del AG</i>			
$N_p$	$P_{mut}$ (%)	$P_e$ (%)	$P_c$ (%)
20	0,1	0	100
	0,5	10	50 - 60 - 70 - 80 - 90
40	1	30	50 - 60 - 70
60	2	50	50
100	3	70	30
140	4	90	10

Tabla 4.3. Combinaciones estudiadas para el ajuste de los parámetros del AG elitista.

El efecto de cada parámetro en la ejecución del algoritmo, se representa mediante gráficas, donde dichos parámetros se enfrentan a:

- El valor medio, de las cinco evoluciones realizadas, de la función objetivo modificada (*peso medio*).
- El valor medio del peso de las barras que forman la estructura (*peso medio de las barras o peso de barras*).
- El valor medio del peso de los coeficientes de seguridad (*peso medio de los coeficientes o peso de coeficientes*).
- El valor medio del número de generaciones efectuadas en cada evolución (*generaciones*).
- El valor medio del número de evaluaciones de la función objetivo realizadas (*evaluaciones de función*).
- El valor medio del coeficiente máximo para toda la estructura y todas las hipótesis y combinaciones de carga analizadas (*coeficiente máximo*).

### 4.3.1 Tamaño de la población.

El efecto del tamaño de la población sobre el comportamiento del algoritmo genético elitista se analiza sobre tres combinaciones de parámetros:

	$P_e$ (%)	$P_c$ (%)	$P_{mut}$ (%)
Combinación 1	30	70	0,5
Combinación 2	50	50	0,5
Combinación 3	50	50	1

Tabla 4.4. Combinaciones analizadas del efecto de  $N_p$  sobre el AG elitista.

En la (fig. 4.10), (fig. 4.11) y (fig. 4.12) se representa el peso medio o valor medio de la función objetivo modificada, frente al número medio de las evaluaciones de función para las tres combinaciones analizadas.

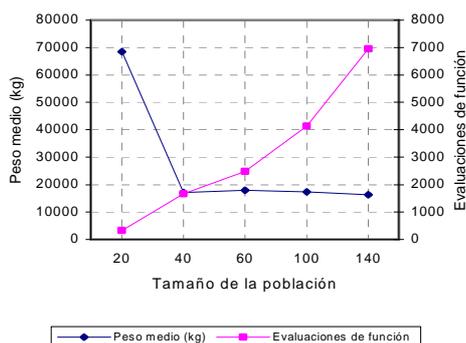


fig. 4.10. Efecto del  $N_p$  sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función.  $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

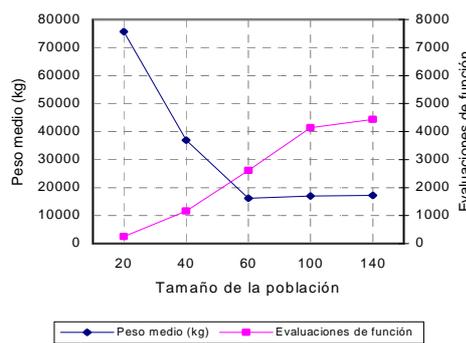


fig. 4.11. Efecto del  $N_p$  sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función.  $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

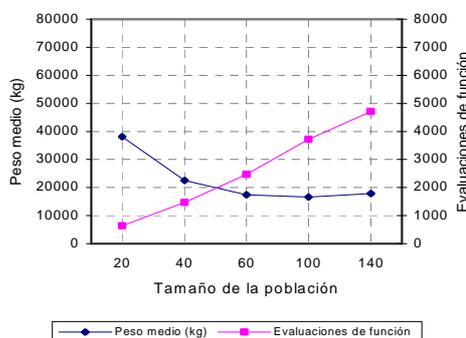


fig. 4.12. Efecto del  $N_p$  sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función.  $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 1\%$ .

En la combinación 1 (fig. 4.10) un aumento en el tamaño de la población provoca inicialmente un descenso brusco en el peso medio para continuar con un descenso suave pero constante para poblaciones superiores a 40 individuos. Por el contrario el número de evaluaciones aumenta significativamente con el tamaño de la población hasta llegar a números próximos a 7000 para tamaños de población de 140 individuos. La pequeña mejora en el peso medio para este tamaño de población no compensa el número de evaluaciones que hay que realizar, por lo que el intervalo de trabajo se sitúa, en un primer análisis, en poblaciones entre 40 y 100 individuos.

En la combinación 2 (fig. 4.11) se reduce el intervalo óptimo a tamaños de población entre 60 y 100 individuos, ya que el peso medio obtenido para tamaños de población de 40 individuos sigue siendo muy elevado y no es hasta alcanzar tamaños de población de 60 individuos cuando el peso medio se estabiliza aumentando ligeramente para poblaciones de 140 individuos.

La tercera combinación estudiada (fig. 4.12) confirma el intervalo anteriormente indicado. En este caso, un pequeño aumento en la probabilidad de mutación respecto a la combinación 2, produce un menor peso medio para poblaciones de 20 y 40 individuos igualando los resultados para poblaciones superiores a 60 individuos (fig. 4.13) mientras que el número medio de las evaluaciones de función efectuadas es muy similar en ambas combinaciones (fig. 4.14).

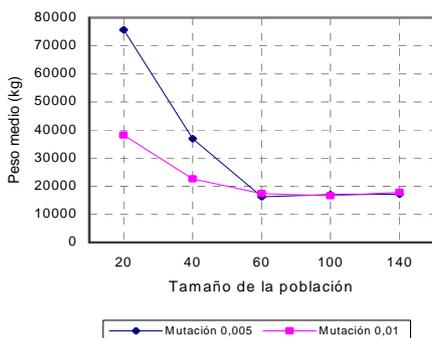


fig. 4.13. Efecto del  $N_p$  y  $P_{mut}$  sobre el peso medio.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$ .

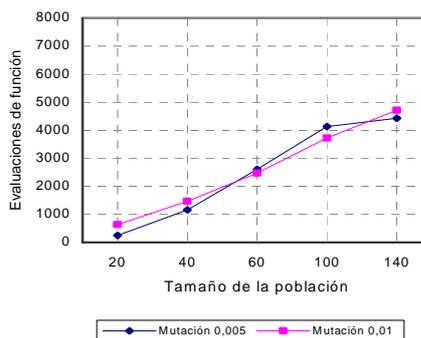


fig. 4.14. Efecto del  $N_p$  y  $P_{mut}$  sobre el número medio de evaluaciones de función.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$ .

En la (fig. 4.15), (fig. 4.16) y (fig. 4.17) se representan los valores del peso medio de las barras que forman la estructura, el peso medio de los coeficientes o valor medio del término de penalización y el peso medio para las distintas combinaciones estudiadas. Se observa que la evolución del peso medio de los coeficientes es similar a la del peso medio pero desplazada de ésta un intervalo de valor el peso medio de las barras, el cual disminuye lentamente con el aumento del tamaño de la población y permanece casi constante para poblaciones con más de 60 individuos.

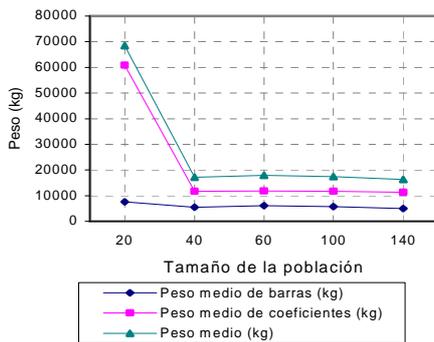


fig. 4.15. Efecto del  $N_p$  sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

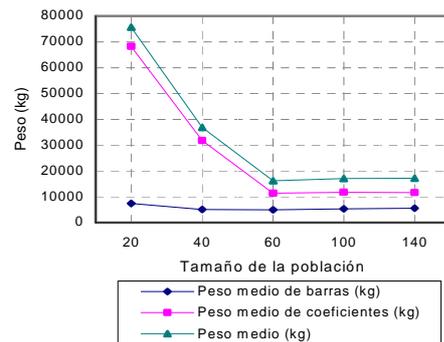


fig. 4.16. Efecto del  $N_p$  sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

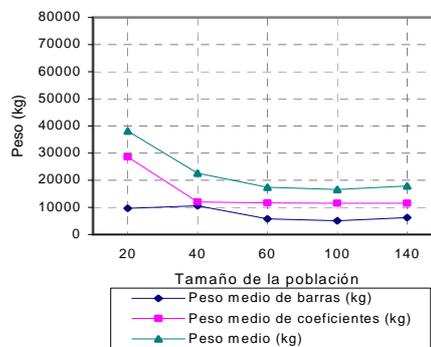


fig. 4.17. Efecto del  $N_p$  sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 1\%$ .

La función objetivo modificada y por lo tanto el término de penalización se ha implementado siguiendo el concepto de estructura segura no sobredimensionada, caracterizada por barras con coeficientes de seguridad próximos a uno y nunca superiores. Por lo tanto, el coeficiente de seguridad mayor en toda la estructura o coeficiente máximo permitirá conocer si la estructura óptima obtenida es viable o no.

En la (fig. 4.18), (fig. 4.19) y (fig. 4.20) se representa el coeficiente máximo medio para las combinaciones analizadas frente al número medio de evaluaciones efectuadas. El comportamiento del coeficiente máximo es similar al comportamiento del peso medio, es decir el valor del coeficiente máximo disminuye rápidamente con el aumento del tamaño de la población pasando de valores muy superiores a uno hasta valores cercanos a la unidad en poblaciones de 40 individuos. Continúa descendiendo suavemente hasta poblaciones de 60 individuos y es a partir de aquí cuando el valor del coeficiente máximo apenas varía situándose en valores próximos a uno pero sin superarlo. Por el contrario el valor medio de las evaluaciones crece con el tamaño de la población sin que para valores de población superiores a 100 individuos este aumento se vea reflejado en una mejora del coeficiente máximo.

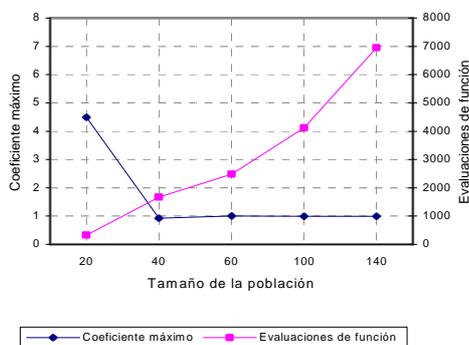


fig. 4.18. Efecto del  $N_p$  sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

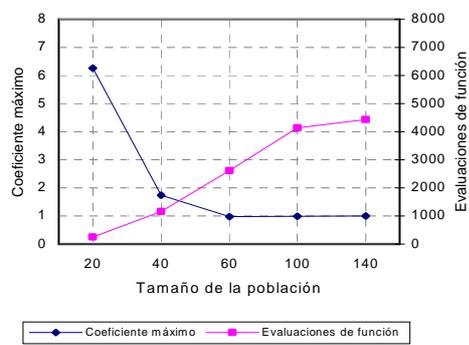


fig. 4.19. Efecto del  $N_p$  sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

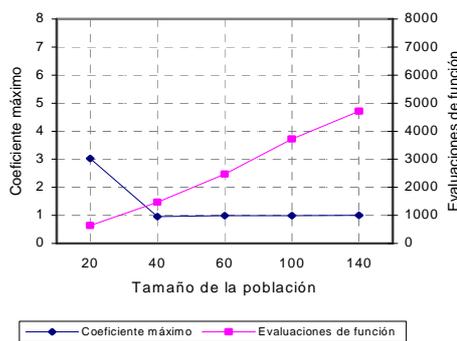


fig. 4.20. Efecto del  $N_p$  sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 1\%$ .

En la (fig. 4.21), (fig. 4.22) y (fig. 4.23) se representa el valor medio de las generaciones frente al valor medio de las evaluaciones de función. En todas ellas se observa un crecimiento del valor medio de las generaciones a medida que aumenta el tamaño de la población, hasta alcanzar un valor máximo para poblaciones de 60 individuos. En este punto, un aumento en el tamaño de la población produce una disminución suave del número medio de generaciones. Por el contrario el número medio de las evaluaciones aumenta con el tamaño de la población independientemente de las generaciones efectuadas. De este hecho se deduce que el consumo, desde un punto de vista computacional, lo marca el número medio de evaluaciones y no el de generaciones.

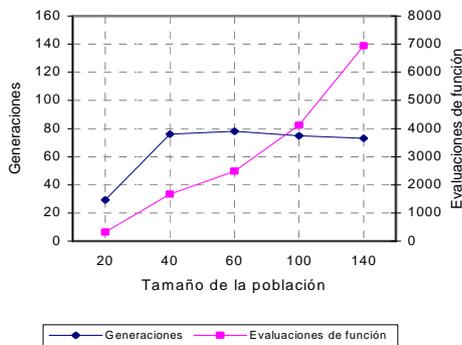


fig. 4.21. Efecto del  $N_p$  sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

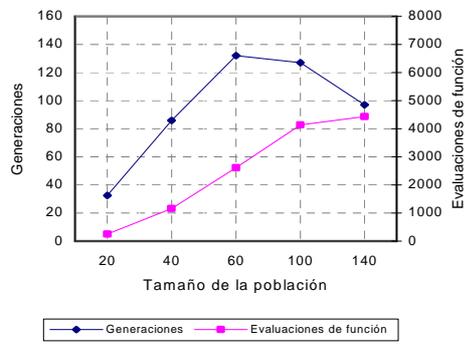


fig. 4.22. Efecto del  $N_p$  sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

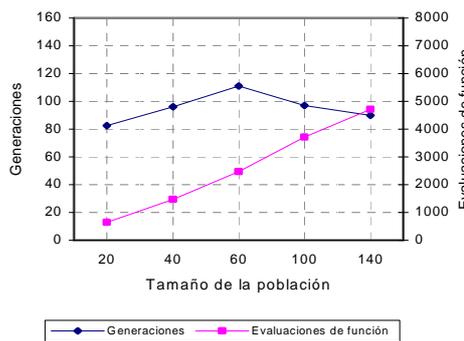


fig. 4.23. Efecto del  $N_p$  sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 1\%$ .

Por lo tanto, se puede concluir que un aumento en el tamaño de la población, mejora el comportamiento del algoritmo genético elitista, hasta alcanzar poblaciones de 140 individuos, donde el número de evaluaciones de función efectuadas en el proceso de optimización, no compensa la pequeña mejora conseguida. Por ello, se establece un intervalo de actuación entre 60 y 100 individuos.

### 4.3.2 Probabilidad de mutación.

El efecto de la probabilidad de mutación sobre el comportamiento del algoritmo genético se analiza sobre dos combinaciones de parámetros:

	$N_p$	$P_e$ (%)	$P_c$ (%)
Combinación 1	20	10	70
Combinación 2	20	30	50

Tabla 4.5. Combinaciones analizadas del efecto de  $P_{mut}$  sobre el AG elitista.

En la (fig. 4.24) y (fig. 4.25) se representa el peso medio o valor medio de la función objetivo modificada, frente al número medio de las evaluaciones de función.

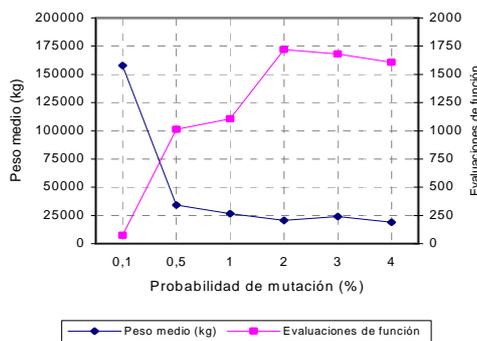


fig. 4.24. Efecto de la  $P_{mut}$  sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20, P_e = 10\%, P_c = 70\%$ .

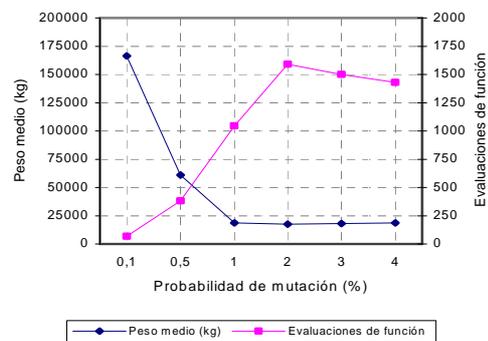


fig. 4.25. Efecto de la  $P_{mut}$  sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20, P_e = 30\%, P_c = 50\%$ .

En ambas, un aumento de la probabilidad de mutación provoca inicialmente un descenso importante en el valor del peso medio, hasta alcanzar probabilidades de mutación del 1%. A partir de aquí el valor del peso medio permanece casi constante

disminuyendo ligeramente con probabilidades de mutación del 2% y aumentando para valores del 3%. Por otro lado, un aumento de la probabilidad de mutación provoca un aumento en el número de evaluaciones efectuadas hasta alcanzar valores máximos con probabilidades del 2%. Se deduce que no es hasta probabilidades de mutación del 1% cuando el peso medio tiende a estabilizarse coincidiendo su valor mínimo con el máximo número de evaluaciones.

La comparación entre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio (fig. 4.26), (fig. 4.27), demuestra que el peso de los coeficientes sigue una evolución similar al peso medio. Por el contrario, el peso de las barras permanece casi constante disminuyendo ligeramente para probabilidades de mutación entre el 1% y el 3% y aumentando para probabilidades del 4%. Se establece así un primer rango de trabajo que sitúa la probabilidad de mutación entre valores del 1% y el 3%.

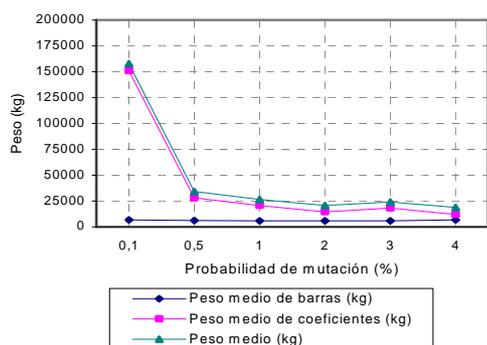


fig. 4.26. Efecto de la  $P_{mut}$  sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio.  $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$  y  $P_c = 70\%$ .

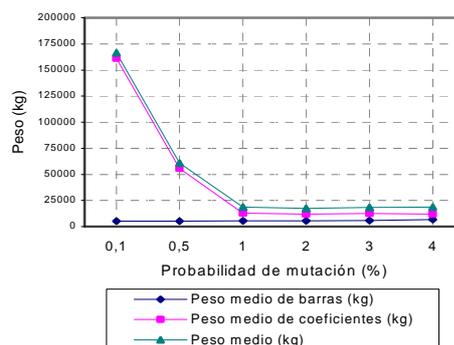


fig. 4.27. Efecto de la  $P_{mut}$  sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio.  $N_p = 20$ ,  $P_e = 30\%$  y  $P_c = 50\%$ .

El comportamiento del coeficiente máximo coincide con el del peso medio y el del peso medio de los coeficientes, (fig. 4.28) y (fig. 4.29). Es decir, no es hasta probabilidades de mutación del 1% cuando el coeficiente máximo se aproxima a valores unitarios disminuyendo para valores del 4%, lo que provoca la obtención de estructuras sobredimensionadas y confirma el intervalo anteriormente establecido.

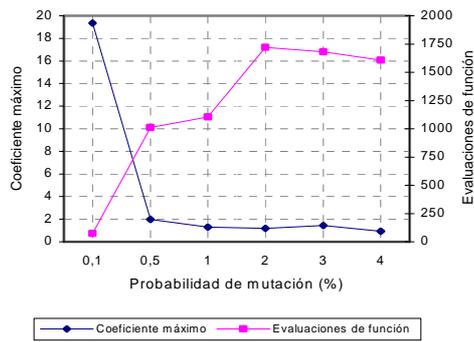


fig. 4.28. Efecto de la  $P_{mut}$  sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$  y  $P_c = 70\%$ .

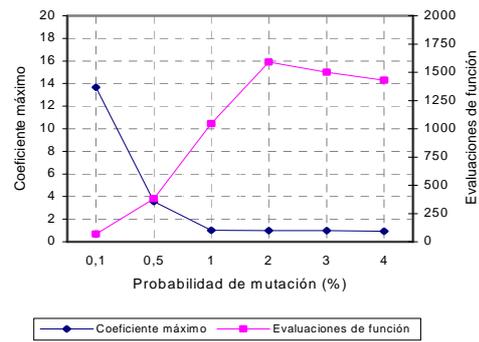


fig. 4.29. Efecto de la  $P_{mut}$  sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 30\%$  y  $P_c = 50\%$ .

Por último en la (fig. 4.30) y (fig. 4.31), se estudia el valor medio de las generaciones efectuadas frente el número medio de evaluaciones de función. Ambos valores aumentan con la probabilidad de mutación hasta alcanzar máximos en probabilidades del 2% y disminuyen para valores superiores.

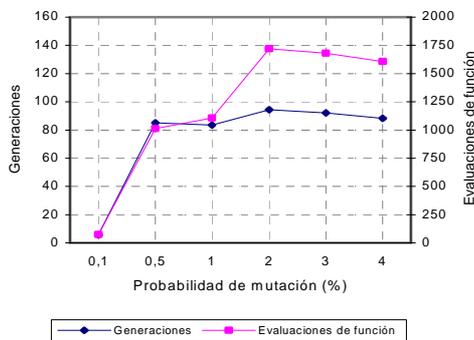


fig. 4.30. Efecto de la  $P_{mut}$  sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$  y  $P_c = 70\%$ .

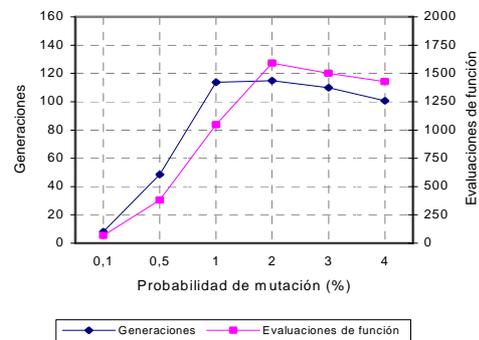


fig. 4.31. Efecto de la  $P_{mut}$  sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 30\%$  y  $P_c = 50\%$ .

De este análisis se puede concluir, que el comportamiento del algoritmo genético elitista mejora para una probabilidad de mutación entre el 1% y el 3%. En este intervalo se obtienen estructuras con peso medios bajos y coeficientes máximos próximos a uno, mientras que el número medio de evaluaciones de función no es excesivo.

### 4.3.3 Probabilidad de cruce.

El efecto de la probabilidad de cruce sobre el comportamiento del algoritmo genético se analiza sobre dos combinaciones de parámetros:

	$N_p$	$P_e$ (%)	$P_{mut}$ (%)
Combinación 1	20	10	1
Combinación 2	20	10	2

Tabla 4.6. Combinaciones analizadas del efecto de  $P_c$  sobre el AG elitista

Del análisis del peso medio frente al número de evaluaciones (fig. 4.32) y (fig. 4.33), se deduce que un incremento en la probabilidad de cruce disminuye el peso medio hasta alcanzar un mínimo para probabilidades del 80%, produciéndose a partir de aquí un incremento del peso medio.

Por el contrario, el número de evaluaciones aumenta o disminuye en función no sólo de la probabilidad de cruce sino también de la probabilidad de mutación, lo mismo que el valor medio del número de generaciones (fig. 4.34) y (fig. 4.35), cuya evolución es similar al número de evaluaciones efectuadas.

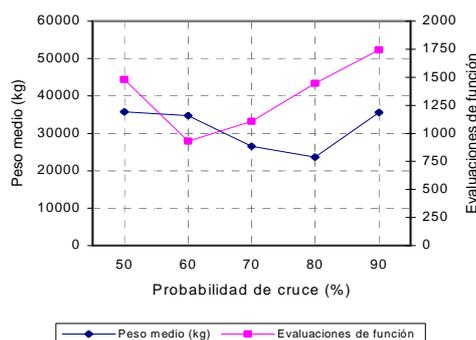


fig. 4.32. Efecto de la  $P_c$  sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$ ,  $P_{mut} = 1\%$ .

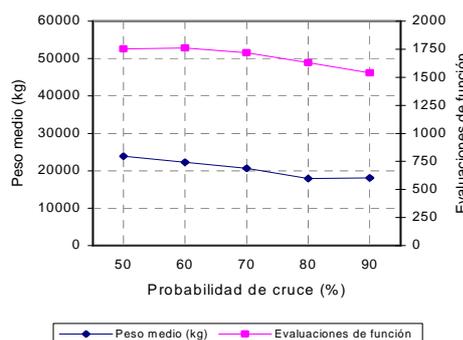


fig. 4.33. Efecto de la  $P_c$  sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$ ,  $P_{mut} = 2\%$ .

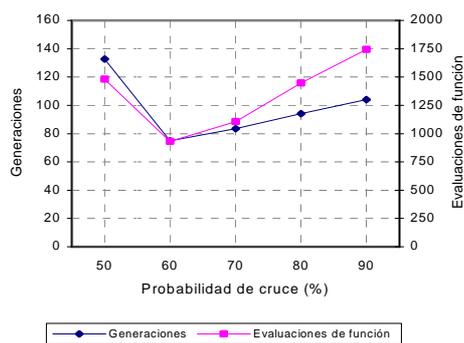


fig. 4.34. Efecto de la  $P_c$  sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$  y  $P_{mut} = 1\%$ .

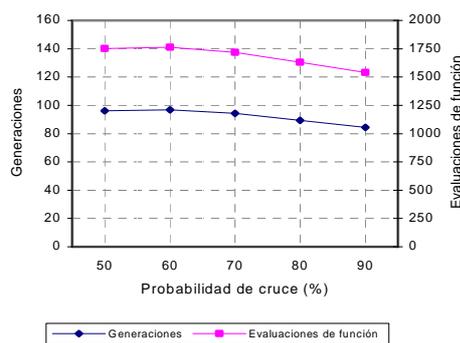


fig. 4.35. Efecto de la  $P_c$  sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$  y  $P_{mut} = 2\%$ .

El comportamiento del peso medio de los coeficientes (fig. 4.36) y (fig. 4.37) es similar al del peso medio como se ha visto en apartados anteriores. En este caso y al igual que sucede con el valor del peso medio su valor disminuye hasta alcanzar mínimos para probabilidades de cruce del 80%. Por el contrario el peso medio de las barras aumenta incluso para valores superiores a dicha probabilidad.

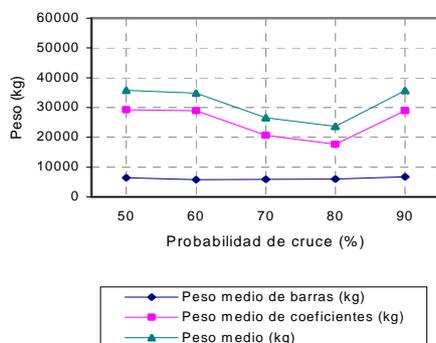


fig. 4.36. Efecto de la  $P_c$  sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$  y  $P_{mut} = 1\%$ .

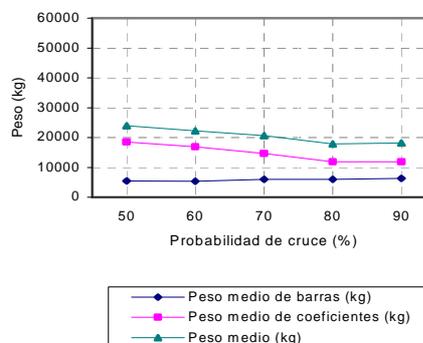


fig. 4.37. Efecto de la  $P_c$  sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$  y  $P_{mut} = 2\%$ .

Esta disminución en el peso de los coeficientes se refleja en el valor del coeficiente máximo (fig. 4.38) y (fig. 4.39) el cual disminuye alcanzando valores próximos a uno para probabilidades de cruce del 80%. En este punto su comportamiento es variable en función de la probabilidad de mutación, es decir, su valor aumentará o

disminuirá, produciendo en el primer caso estructuras menos seguras y en el segundo estructuras sobredimensionadas.

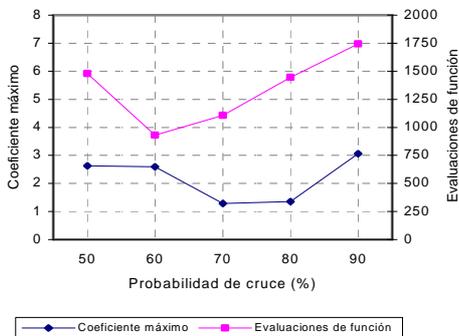


fig. 4.38. Efecto de la  $P_c$  sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$  y  $P_{mut} = 1\%$ .

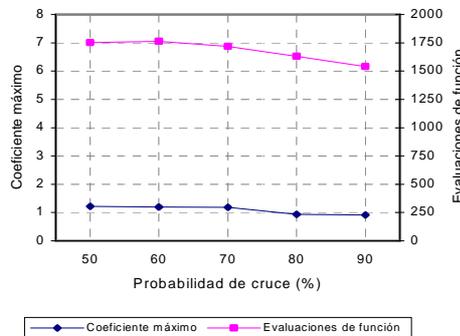


fig. 4.39. Efecto de la  $P_c$  sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_e = 10\%$  y  $P_{mut} = 2\%$ .

De todo ello se deduce que un aumento en la probabilidad de cruce hasta valores del 80% favorece la obtención de estructuras ligeramente más pesadas pero seguras y también que un valor mayor de la probabilidad de mutación mejora los resultados obtenidos con probabilidades de cruce bajas, siendo menos determinante en la mejora de resultados la probabilidad de cruce, como se observa en las (fig. 4.40), (fig. 4.41), (fig. 4.42) y (fig. 4.43).

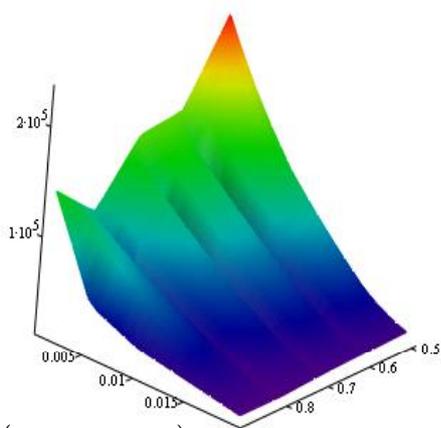
En la (fig. 4.40) se estudia la variación del peso medio con la probabilidad de cruce y la probabilidad de mutación. Se observa que a igualdad de probabilidad de cruce los peores valores del peso medio se establecen para valores de la probabilidad de mutación bajos, mientras que las curvas descritas van siendo más suaves a medida que aumenta la probabilidad de cruce.

De la misma manera a igualdad de probabilidad de mutación los peores valores del peso medio se obtienen para valores de probabilidad de cruce bajos, pero en este caso la curva descrita se suaviza tanto que apenas influye la variación de la probabilidad de cruce para valores altos de mutación.

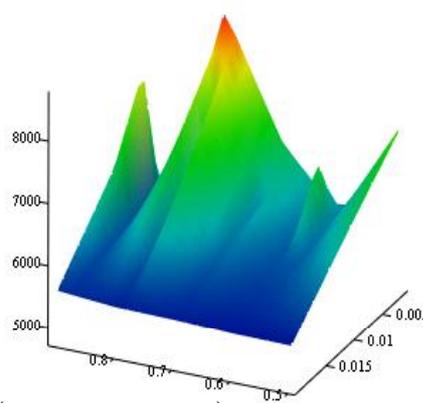
Al igual que sucede con el peso medio, una probabilidad de mutación entorno al 2% mejora los valores obtenidos en el peso medio de las barras (fig. 4.41) y el

coeficiente máximo (fig. 4.42) siendo menos determinante el valor de la probabilidad de cruce.

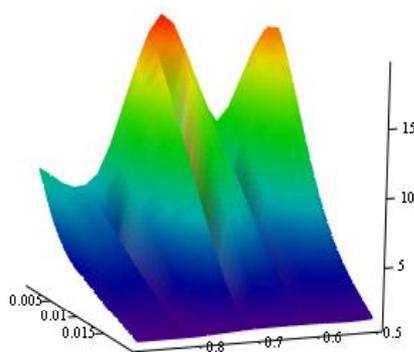
Por el contrario el valor del número medio de evaluaciones efectuadas aumenta con el incremento de la probabilidad de cruce y mutación sobrepasando las 1500 evaluaciones para valores de la probabilidad de cruce del 90% y de la probabilidad de mutación del 1% (fig. 4.43).



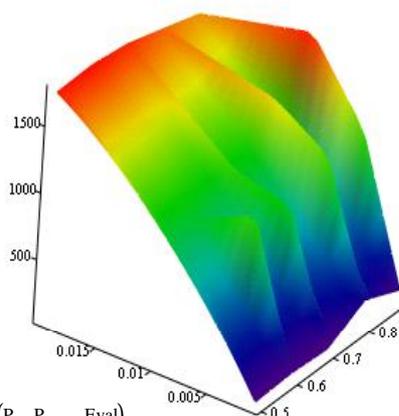
( $P_c, P_{mut}, \text{Peso medio}$ )  
fig. 4.40. Efecto de las  $P_c$  y  $P_{mut}$  sobre el peso medio.



( $P_c, P_{mut}, \text{Peso mediobarras}$ )  
fig. 4.41. Efecto de las  $P_c$  y  $P_{mut}$  sobre el peso medio de las barras.



( $P_c, P_{mut}, \text{Coef max}$ )  
fig. 4.42. Efecto de las  $P_c$  y  $P_{mut}$  sobre el coeficiente máximo



( $P_c, P_{mut}, \text{Eval}$ )  
fig. 4.43. Efecto de las  $P_c$  y  $P_{mut}$  sobre el número medio de evaluaciones.

Se puede concluir, que un aumento en la probabilidad de cruce hasta el 80% mejora el comportamiento del algoritmo genético elitista, la cual se verá beneficiada con probabilidades de mutación entre el 1% y el 3%.

### 4.3.4 Probabilidad de élite.

El efecto de la probabilidad de élite sobre el comportamiento del algoritmo genético se analiza sobre dos combinaciones de parámetros:

	$N_p$	$P_c$ (%)	$P_{mut}$ (%)
Combinación 1	20	100- $P_e$	0,5
Combinación 2	20	100- $P_e$	2

Tabla 4.7. Combinaciones analizadas del efecto de  $P_e$  sobre el AG elitista.

En la (fig. 4.44) y (fig. 4.45) se representa la variación del peso medio frente al número medio de evaluaciones efectuadas. Mientras el primero disminuye para probabilidades de élite entre el 0% y el 10% y aumenta para probabilidades superiores, el segundo decrece con el aumento de la probabilidad lo que parece razonable teniendo en cuenta que a mayor probabilidad de élite mayor es el número de individuos que se conservan de una generación a otra y que no han de ser evaluados de nuevo.

El aumento del peso medio será más pronunciado cuanto menor sea el valor de la probabilidad de mutación ya que la variación de su valor es muy pequeña para probabilidades del 2% (fig. 4.45) y además estos valores están muy por debajo de los valores obtenidos para mutaciones inferiores (fig. 4.44).

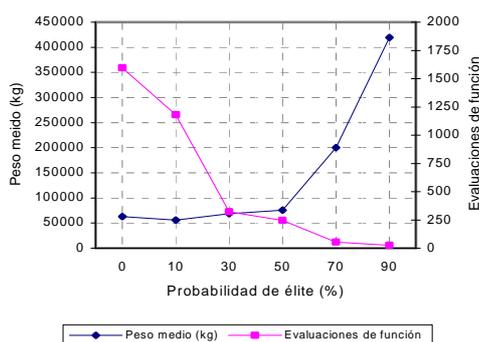


fig. 4.44. Efecto de la  $P_e$  sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20, P_c = 100\% - P_e, P_{mut} = 0,5\%$ .

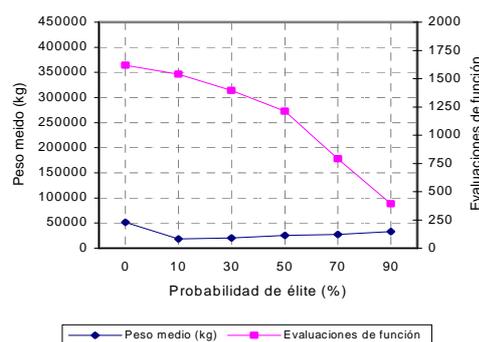


fig. 4.45. Efecto de la  $P_e$  sobre el peso medio y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20, P_c = 100\% - P_e, P_{mut} = 2\%$ .

El efecto de la probabilidad de mutación también se observa en el peso medio de los coeficientes (fig. 4.46) y (fig. 4.47), permaneciendo su distribución casi paralela a la

distribución del peso medio. Por el contrario el efecto de la mutación es casi imperceptible en el peso medio de las barras ya que su valor apenas mejora con el aumento de la probabilidad de mutación. Un aumento de la probabilidad de élite puede llegar a provocar un descenso en el peso medio de las barras (fig. 4.46), al contrario de lo que sucede con el peso medio de los coeficientes lo que origina estructuras menos pesadas pero inseguras.

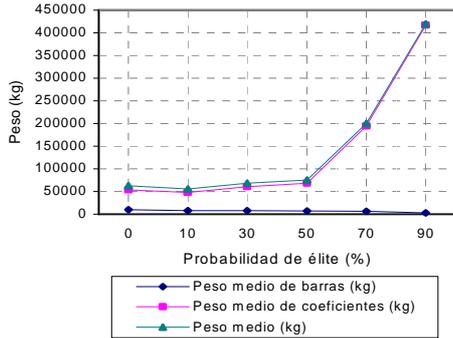


fig. 4.46. Efecto de la  $P_e$  sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio.  
 $N_p = 20$ ,  $P_c = 100\% - P_e$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

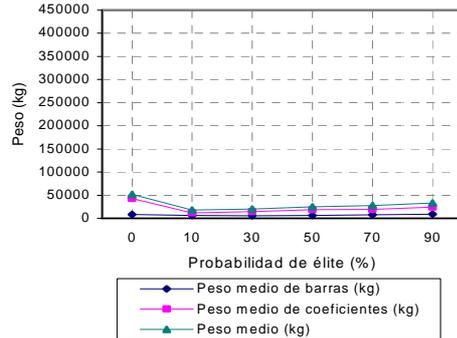


fig. 4.47. Efecto de la  $P_e$  sobre el peso medio de las barras, el peso medio de los coeficientes y el peso medio.  
 $N_p = 20$ ,  $P_c = 100\% - P_e$  y  $P_{mut} = 2\%$ .

Todo ello lleva a establecer un rango de trabajo que sitúa la probabilidad de élite entre el 10% y el 30%.

Este intervalo se confirma en el estudio del coeficiente máximo (fig. 4.48) y (fig. 4.49), el cual presenta mínimos para probabilidades de élite entre el 10% y el 30%.

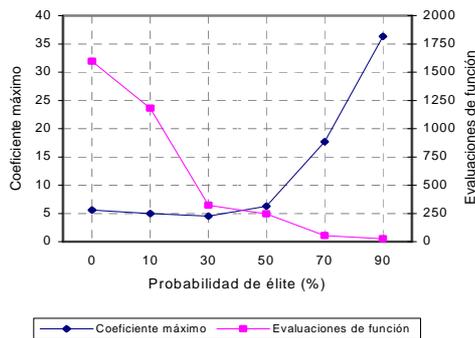


fig. 4.48. Efecto de la  $P_e$  sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_c = 100\% - P_e$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

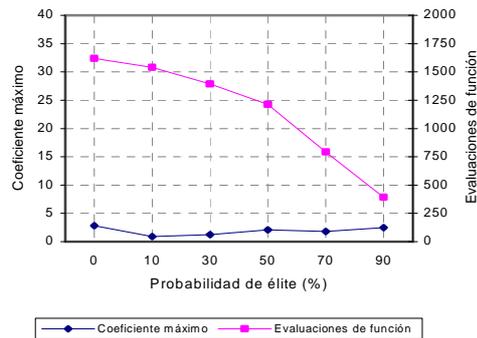


fig. 4.49. Efecto de la  $P_e$  sobre el valor medio del coeficiente máximo y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_c = 100\% - P_e$  y  $P_{mut} = 2\%$ .

Por último se estudia el número medio de generaciones frente al número medio de evaluaciones efectuadas (fig. 4.50) y (fig. 4.51). Si bien el número de evaluaciones disminuye con el aumento de la probabilidad de élite, el número de generaciones aumenta o disminuye por el efecto de la probabilidad de mutación. Valores bajos de la probabilidad de mutación provocan disminuciones en el número de generaciones mientras que valores altos provocan aumentos motivados por la existencia de mayores cambios en los individuos no pertenecientes a la élite que retrasan la convergencia y por lo tanto aumenta el número de generaciones.

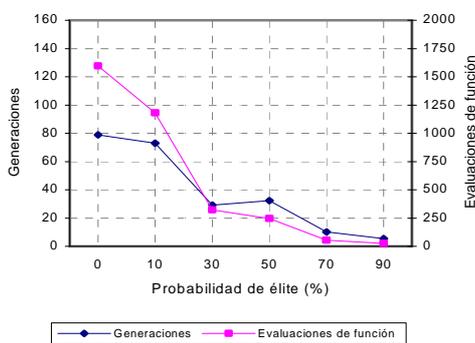


fig. 4.50. Efecto de la  $P_e$  sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_c = 100\% - P_e$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

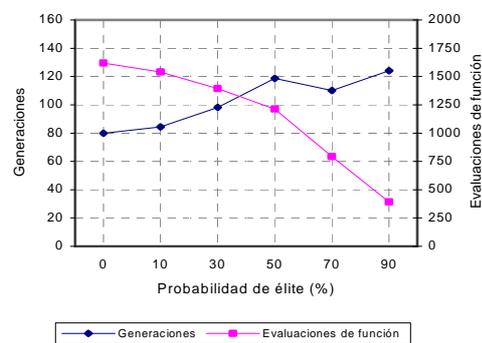


fig. 4.51. Efecto de la  $P_e$  sobre el valor medio de las generaciones y el número medio de evaluaciones de función.  
 $N_p = 20$ ,  $P_c = 100\% - P_e$  y  $P_{mut} = 2\%$ .

El efecto de la variación de la probabilidad de élite junto con la variación de la probabilidad de mutación en el valor del peso medio, del peso medio de las barras, del número medio de evaluaciones y del número medio de generaciones se analiza en la (fig. 4.52), (fig. 4.53), (fig. 4.54) y (fig. 4.55) respectivamente.

En el primer caso (fig. 4.52), el máximo del peso medio se sitúa en zonas de probabilidad de mutación bajas y probabilidad de élite altas, mientras que a medida que crece la probabilidad de mutación, la variación de la probabilidad élite es menos determinante. Lo mismo sucede para probabilidades de élite del 20%, donde el peso medio varía muy poco con las variaciones de la probabilidad de mutación.

En la (fig. 4.53) el peso medio de las barras disminuye con valores de la probabilidad de mutación bajos y de la probabilidad de élite altos coincidiendo con el máximo del peso medio. Por otro lado para probabilidades de élite entorno al 20% un

aumento en la probabilidad de mutación apenas varía el valor del peso medio de las barras.

El estudio de la (fig. 4.54) y (fig. 4.55), número medio de evaluaciones y número medio de generaciones, demuestra que ambas tienen máximos en probabilidades de mutación altas pero mientras el primero lo hace en probabilidades de élite bajas el segundo lo hace en las altas. Es más, a igualdad de probabilidad de mutación, las evaluaciones disminuyen al aumentar la probabilidad de élite mientras que las generaciones disminuyen al disminuir la probabilidad de élite.

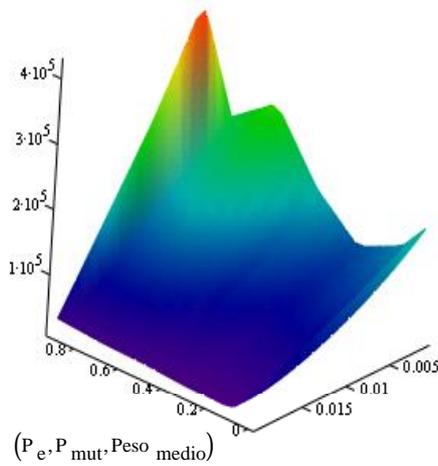


fig. 4.52. Efecto de las  $P_e$  y  $P_{mut}$  sobre el peso medio.

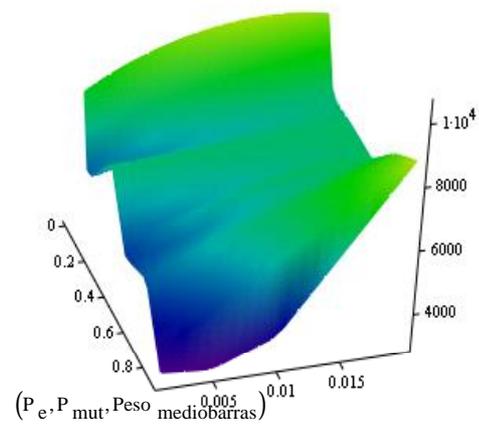


fig. 4.53. Efecto de las  $P_e$  y  $P_{mut}$  sobre el peso medio de las barras.

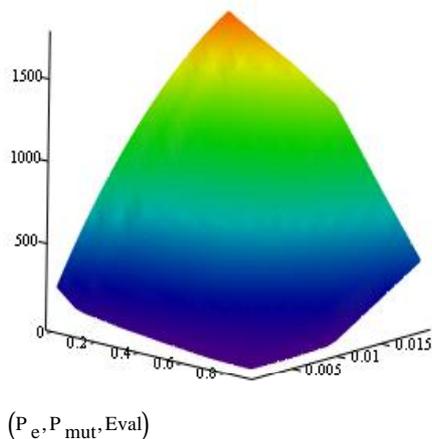


fig. 4.54. Efecto de las  $P_e$  y  $P_{mut}$  sobre el número medio de evaluaciones.

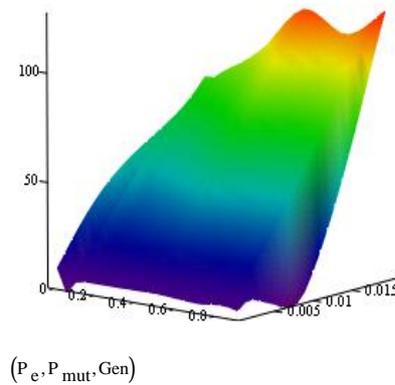


fig. 4.55. Efecto de las  $P_e$  y  $P_{mut}$  sobre el número medio de generaciones.

Los estudios realizados permiten establecer un rango de trabajo de la probabilidad de élite entre el 10% y el 30%. En este intervalo, se obtienen estructuras con coeficientes máximos próximos a la unidad y pesos medios bajos. Estos resultados se verán favorecidos con probabilidades de mutación entre el 1% y el 3%.

#### 4.4 Validación del operador de cruce.

La validación del operador de *cruce por un fenotipo* se realiza sobre la estructura del apartado anterior (fig. 4.7). Las combinaciones estudiadas se reflejan en la Tabla 4.8.

En estas combinaciones se establecen unos valores aleatorios de los parámetros; independientes de los aconsejados en el apartado anterior. Esto se debe a que dichos intervalos se establecieron para el cruce por un fenotipo y no tienen por que coincidir con los intervalos adecuados para el cruce por un punto y el cruce por dos puntos.

<i>Normativa</i>		MV-103		
<i>Tipo de cruce</i>	<i>Parámetros del AG</i>			
	$N_p$	$P_{mut}$ (%)	$P_e$ (%)	$P_c$ (%)
Por un fenotipo	20	0,5 1	10	50 - 70
	40		30	50 - 70
Por un punto	60			
Por dos puntos	100		50	50
	140			

Tabla 4.8. Combinaciones estudiadas para la validación del operador de cruce por un fenotipo.

Los resultados obtenidos se analizan sobre dos combinaciones de parámetros.

	$P_e$	$P_c$ (%)	$P_{mut}$ (%)
Combinación 1	30	70	0,5
Combinación 2	50	50	0,5

Tabla 4.9. Combinaciones analizadas para la validación del operador de cruce por un fenotipo.

En la (fig. 4.56) y (fig. 4.57) se representa la variación del peso medio con el aumento del tamaño de la población para los tres tipos de cruce estudiados. En tamaños de población pequeños el peso medio depende del tipo de cruce efectuado; mientras en la primera combinación es el cruce por dos puntos el que representa valores inferiores del peso medio, en la segunda es el cruce por un punto; en cambio, el cruce por un fenotipo se mantiene con valores intermedios para ambas combinaciones. En tamaños de población grandes apenas es posible diferenciar los resultados obtenidos con un cruce u otro. Luego se puede decir que el cruce por un fenotipo es más estable frente a la variación de la probabilidad élite y de la probabilidad de cruce.

Esto es debido fundamentalmente a que el cruce por un punto y por dos puntos aumentan el efecto provocado por la mutación al provocar cambios dentro de los fenotipos y no entre ellos como hace el cruce por un fenotipo.

En tamaños de población pequeños una probabilidad de élite baja hace que el número de individuos sobre los que se realiza el cruce y la mutación sea alto, provocando numerosos cambios en la población, potenciados sobre todo por el cruce por dos puntos. Los cambios se realizan sobre tal número de individuos que alguno de ellos es capaz de mejorar el peso mínimo de la población obtenido por el cruce por un fenotipo y el cruce por un punto.

Por el contrario, al aumentar la probabilidad de élite, el número de individuos en los que se realiza el cruce y la mutación disminuye, hasta tal punto que los cambios potenciados por el cruce por dos puntos no son capaces de obtener pesos inferiores a los obtenidos con el cruce por un fenotipo, y el cruce por un punto.

Para tamaños de población grandes y valores de la probabilidad de élite intermedios, el número de individuos sobre los que se realiza el cruce y la mutación es lo suficientemente grande como para que no influya el tipo de cruce efectuado.

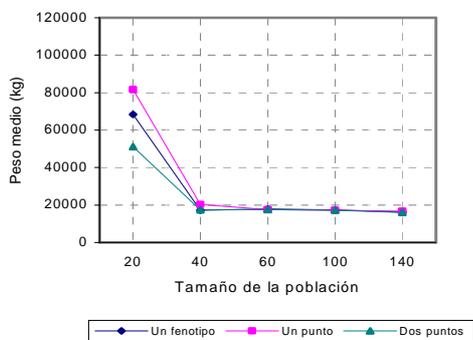


fig. 4.56. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

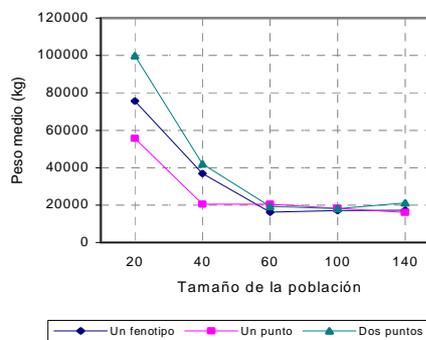


fig. 4.57. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

El peso medio de los coeficientes (fig. 4.58) y (fig. 4.59) y el valor medio del coeficiente máximo (fig. 4.60) y (fig. 4.61) se comportan de manera similar al peso medio, mientras que el peso medio de las barras (fig. 4.62) y (fig. 4.63) apenas varía para un tipo de cruce u otro, disminuyendo en todos ellos muy suavemente con el aumento del tamaño de la población.

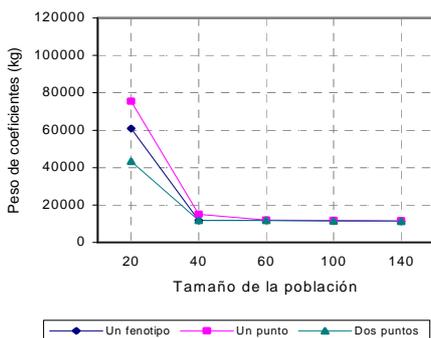


fig. 4.58. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio de los coeficientes.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

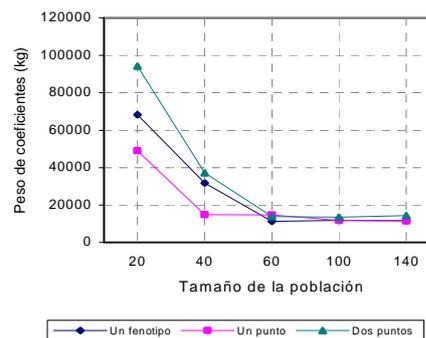


fig. 4.59. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio de los coeficientes.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

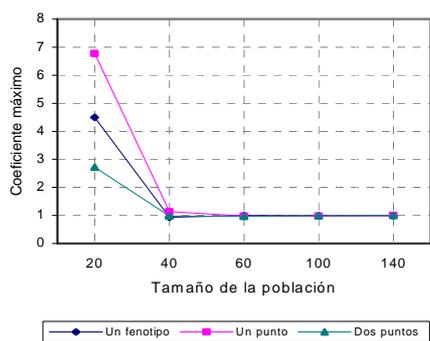


fig. 4.60. Efecto del tipo de cruce sobre el valor medio del coeficiente máximo.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

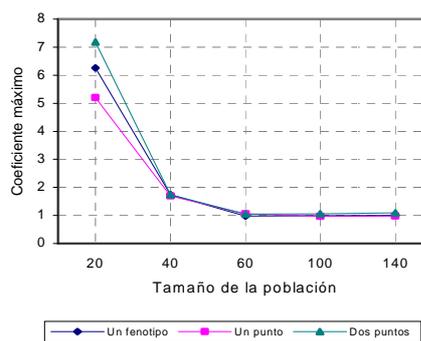


fig. 4.61. Efecto del tipo de cruce sobre el valor medio del coeficiente máximo.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

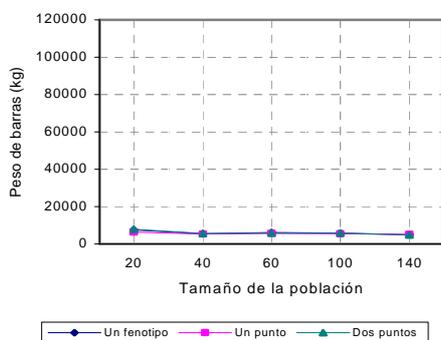


fig. 4.62. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio de las barras.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

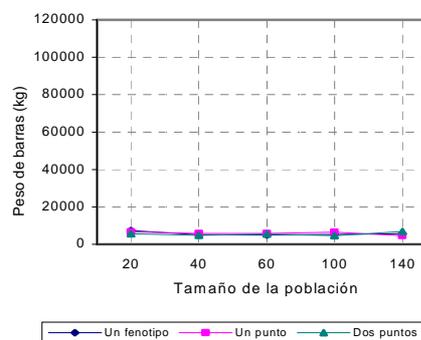


fig. 4.63. Efecto del tipo de cruce sobre el peso medio de las barras.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

El número medio de evaluaciones se estudia en la (fig. 4.64) y (fig. 4.65). Los resultados son similares en las dos combinaciones, en ambas el cruce por un fenotipo presenta el menor número de evaluaciones mientras que el cruce por dos puntos presenta el mayor.

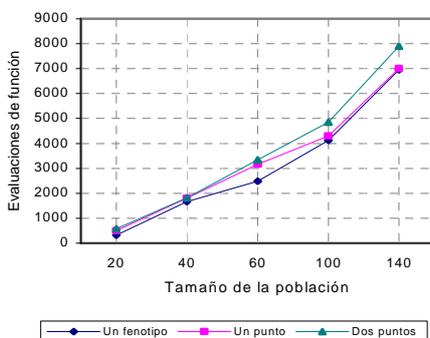


fig. 4.64. Efecto del tipo de cruce sobre el valor medio del número de evaluaciones efectuadas.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

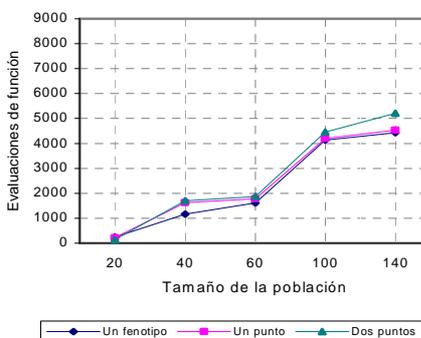


fig. 4.65. Efecto del tipo de cruce sobre el valor medio del número de evaluaciones efectuadas.  
 $P_e = 50\%$ ,  $P_c = 50\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

La representación gráfica tiene la misma forma para los distintos tipos de cruce, luego se puede decir, que el ajuste de los valores de los parámetros realizados en el apartado anterior es válido tanto para el cruce por un fenotipo, como para el cruce por un punto o por dos puntos.

Por último se puede concluir, que para tamaños de población superiores a 60 individuos, ninguno de los operadores de cruce tiene un efecto considerable en los resultados obtenidos. Por el contrario, para poblaciones inferiores los resultados dependen de los valores de los parámetros. En este caso, el cruce por un fenotipo es más estable frente al cruce por un punto y por dos puntos. Además, realiza un menor número de evaluaciones de función tanto para poblaciones superiores a 60 individuos como inferiores, lo que conlleva un menor gasto computacional y una convergencia más rápida.

#### 4.5 Comparación de normativas.

Se han comparado los resultados obtenidos con tres normativas de seguridad diferentes: norma española MV-103, norma europea Eurocódigo3, norma americana AISC-LRFD, empleando la estructura de los apartados anteriores (fig. 4.7).

Para este análisis se ha utilizado la combinación de parámetros reflejada en la Tabla 4.10:

<i>Cruce</i>		Por un fenotipo		
<i>Normativa</i>	<i>Parámetros del AG</i>			
	$N_p$	$P_{mut}$ (%)	$P_e$ (%)	$P_c$ (%)
MV-103	20	0,5	30	70
Eurocódigo3	40			
60				
AISC-LRFD	100			

Tabla 4.10. Combinaciones estudiadas para la comparación de normativas.

La variación del peso medio (fig. 4.66) y del peso medio de los coeficientes (fig. 4.67) con el aumento del tamaño de la población para las tres normas estudiadas, indica un fuerte descenso de dichos valores hasta alcanzar tamaños de población de 40 individuos. Punto en el cual tanto el valor del peso medio como del peso medio de los coeficientes apenas difiere para las tres normativas de seguridad.

A partir de aquí, un aumento en el tamaño de la población mejora los resultados obtenidos con la norma española y europea disminuyendo ligeramente tanto el peso medio como el peso medio de los coeficientes. Los valores obtenidos con la norma europea son siempre superiores a los valores obtenidos con la norma española hasta alcanzar tamaños de población de 100 individuos donde los resultados obtenidos apenas varían de una norma a otra. Por el contrario el aumento del tamaño de la población incrementa los valores obtenidos con la norma americana siendo superiores a los obtenidos con las otras normas.

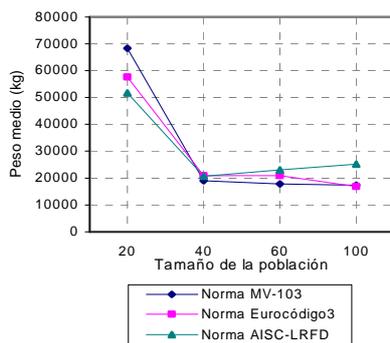


fig. 4.66. Efecto del tipo de normativa sobre el peso medio.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

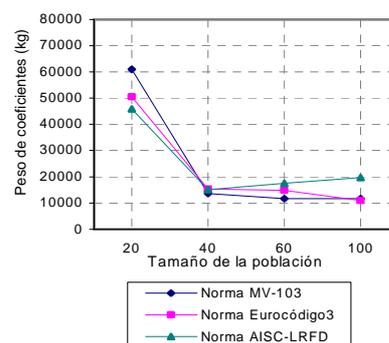


fig. 4.67. Efecto del tipo de normativa sobre el peso medio de los coeficientes.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

Estos comportamientos también se reflejan en el valor del coeficiente máximo (fig. 4.68). Mientras que en intervalos de población de 40 a 100 individuos la norma española presenta valores próximos a la unidad, la norma europea presenta dichos valores en tamaños de población de 40 y 100 individuos empeorando para poblaciones de 60 individuos, por su lado la norma americana se sitúa en valores superiores a la unidad en dicho intervalo.

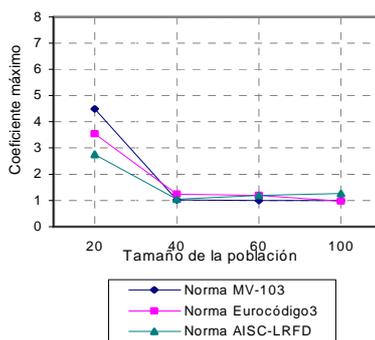


fig. 4.68. Efecto del tipo de normativa sobre el valor medio del coeficiente máximo.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

La variación del peso medio de las barras se refleja en la (fig. 4.69). Tanto su evolución como su valor es similar en las tres normativas estudiadas reflejando un ligero descenso con el tamaño de la población.

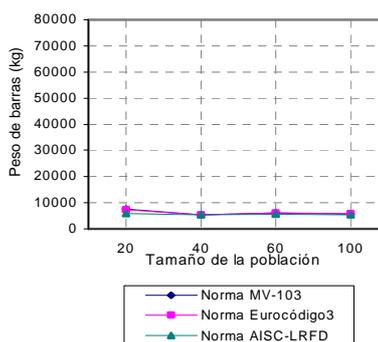


fig. 4.69. Efecto del tipo de normativa sobre el peso medio de las barras.  
 $P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

En la (fig. 4.70) y (fig. 4.71) se estudian los valores medios de las evaluaciones de función y de las generaciones efectuadas respectivamente. Mientras que las primeras aumentan con el incremento del tamaño de la población, las segundas aumentan hasta alcanzar máximos para 40 y 60 individuos descendiendo con tamaños de población superiores. En ambos casos los valores obtenidos con la norma americana son superiores a los obtenidos con la norma europea y española lo que significa un mayor consumo desde un punto de vista computacional. Por el contrario, los valores obtenidos con la norma española son inferiores al resto excepto para tamaños de población de 100 individuos donde el menor consumo lo presenta la norma europea.

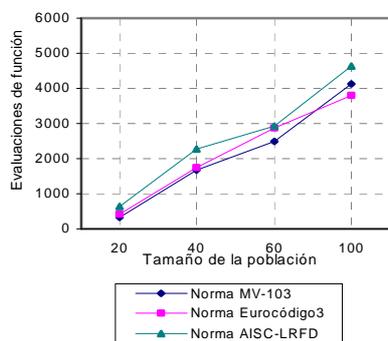


fig. 4.70. Efecto del tipo de normativa sobre el valor medio del número de evaluaciones efectuadas.

$P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

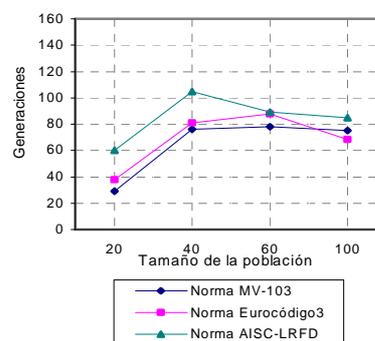


fig. 4.71. Efecto del tipo de normativa sobre el valor medio del número de generaciones efectuadas.

$P_e = 30\%$ ,  $P_c = 70\%$  y  $P_{mut} = 0,5\%$ .

De este análisis se puede concluir que la norma española presenta mejores resultados de optimización para tamaños de población entre 40 y 60 individuos mientras que para tamaños de población superiores, el mejor comportamiento lo presenta la norma europea. Por otro lado cabe destacar que el estudio se ha realizado con secciones españolas, lo que puede provocar variaciones en el comportamiento de la normativa europea y sobre todo de la americana.

#### 4.6 Contraste de resultados.

Se han comparado los resultados obtenidos en la optimización estructural con los obtenidos en el redimensionamiento del módulo de estructuras metálicas del programa CYPE.

Se introduce la celosía de diez barras (fig. 4.7) en el programa CYPE, asignando a las barras las secciones dadas por el usuario (fig. 4.72). Una vez definidos los datos necesarios para el cálculo, como son los tipos de perfil, el tipo de material, la descripción de los nudos y las cargas aplicadas, se calcula la estructura y se comprueban las barras con la normativa MV-103.

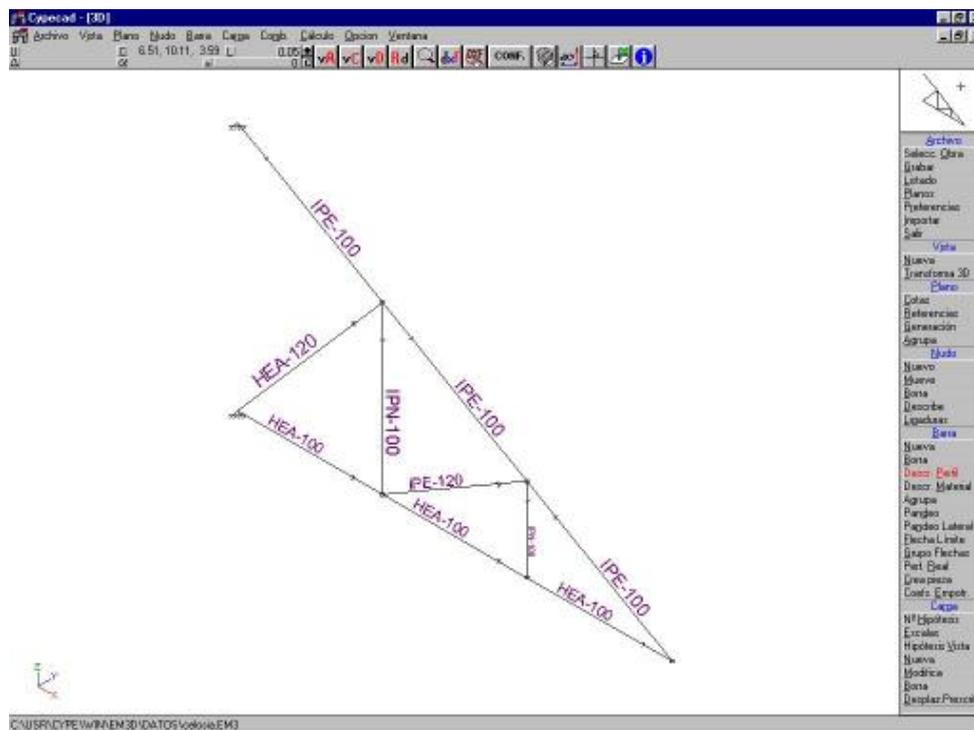


fig. 4.72. Asignación de perfiles en el programa CYPE.

La comprobación de las barras, con el programa CYPE, confirma el hecho de que ninguna de las secciones asignada por el usuario es válida, ya que no cumplen las comprobaciones de seguridad. Por lo tanto, el siguiente paso es el redimensionamiento de las barras de la estructura.

Esta redimensión óptima, cambia de la sección actual a la siguiente en la serie de perfil seleccionado, volviendo a calcular los esfuerzos y los coeficientes de seguridad. Si durante el proceso, el programa llegase al redimensionado máximo de una serie de perfiles, mandaría un mensaje y pediría confirmación para seguir con otra barra.

Después del redimensionado, no se aprecia ninguna barra en rojo lo que indica que se han encontrado secciones en las series de perfiles asignadas, capaces de soportar los esfuerzos existentes (fig. 4.73).

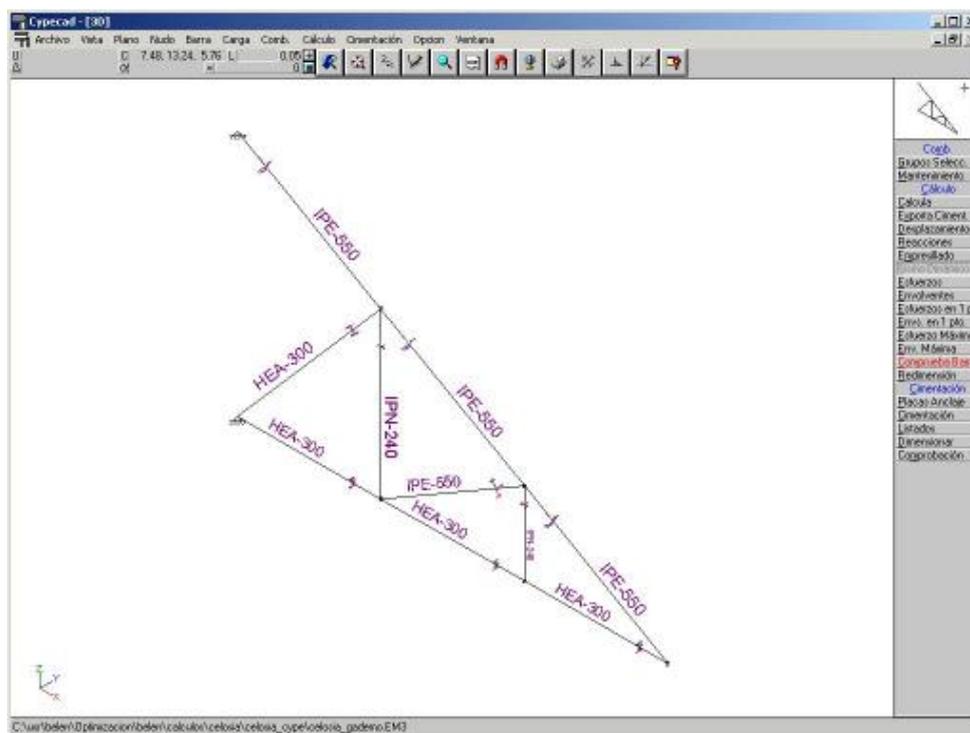


fig. 4.73. Comprobación de barras tras el redimensionamiento.

Estas secciones se pesan y se comparan con las del individuo de menor peso y coeficiente máximo próximo a la unidad, obtenido en la optimización estructural. Este individuo se obtuvo para un tamaño de población de 100 individuos, una probabilidad de élite del 30%, una probabilidad de cruce del 70%, una probabilidad de mutación del 1% y la normativa MV-103.

En la tabla de comparación de resultados (Tabla 4.11) se aprecia claramente como el peso de cada grupo obtenido mediante el programa GADEMO, es igual o inferior al obtenido con el programa CYPE, lo que lleva a una mejora de 469,91 kg, es decir, un 9,3% del peso total de la estructura.

Además se observa como el programa GADEMO, en su reasignación aleatoria de los perfiles, recurre a perfiles en L en aquellas barras cuyo trabajo es mínimo, y repite secciones en distintos grupos, lo que permitiría realizar grupos mayores dentro de un mismo individuo y reducir el tiempo de convergencia.

Número Grupo	Secciones GADEMO	Peso (kg)	Secciones CYPE	Peso (kg)
1	HEA300	1519,14	HEA300	1519,14
2	HEA300	773,50	HEA300	773,50
3	LSI150x15	345,08	IPN240	378,60
4	HEB220	488,49	IPE550	715,15
5	IPN400	1935,72	IPE550	2145,45
Peso total (kg)		5061,93		5531,84

Tabla 4.11. Tabla de comparación de resultados.

#### 4.7 Verificación de resultados.

Por último se ha calculado la estructura obtenida en la optimización, con el programa ESCAL3D (fig. 4.74) y con el módulo CIVILFEM del programa de cálculo por elementos finitos ANSYS (fig. 4.75), (fig. 4.76) y (fig. 4.77) verificando así que todas las secciones cumplen las comprobaciones de seguridad.

En la (fig. 4.74) se indican, los coeficientes de seguridad, obtenidos con el programa ESCAL3D, para la combinación de hipótesis simples que es la que produce los coeficientes más altos. Estos coeficientes se representan por colores que van desde el verde hasta el rojo para coeficientes próximos a uno.

El siguiente paso es comprobar que las secciones, asignadas a las barras de la estructura en el proceso de optimización, verifican las comprobaciones de seguridad del módulo CIVILFEM. Para ello, se definen los datos de la estructura como son el tipo de perfil, el tipo de material, la descripción de los nudos y las cargas aplicadas; se generan las mallas de los elementos lineales y se calcula la estructura. Una vez calculada se analizan las barras con el Eurocódigo3.

En la (fig. 4.75), (fig. 4.76) y (fig. 4.77) se representa la tensión en las barras, su compresión y pandeo respectivamente. El color de las barras varía entre el verde y el gris. En el primer caso, el coeficiente de seguridad es inferior a uno, puesto que en caso

contrario la barra estaría en rojo. En el segundo caso, el coeficiente de seguridad es cero, ya que la barra no está sometida a los esfuerzos que lo definen.

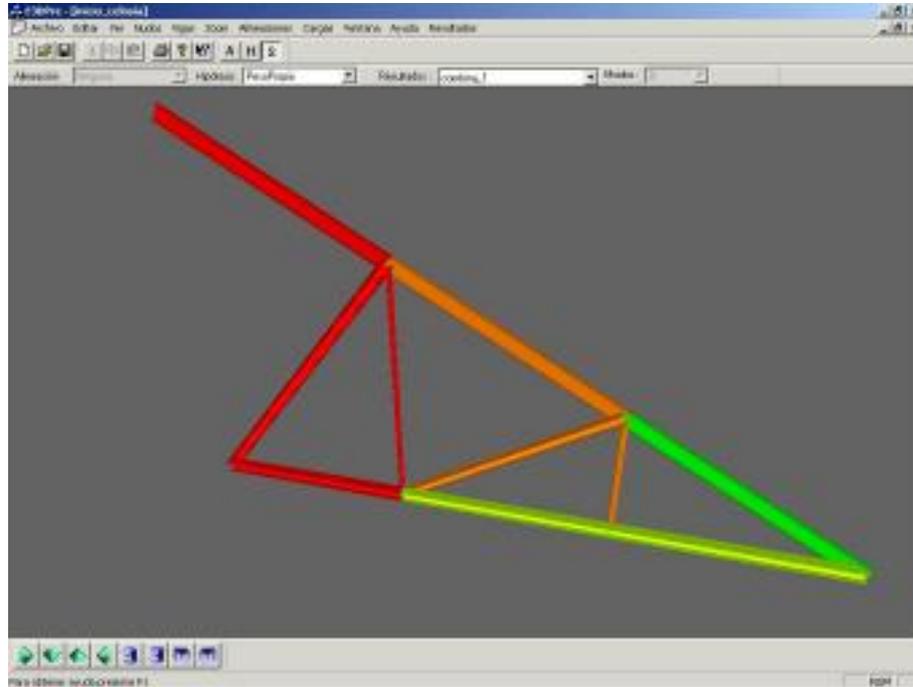


fig. 4.74. Verificación de los perfiles de optimización con el programa ESCAL3D.

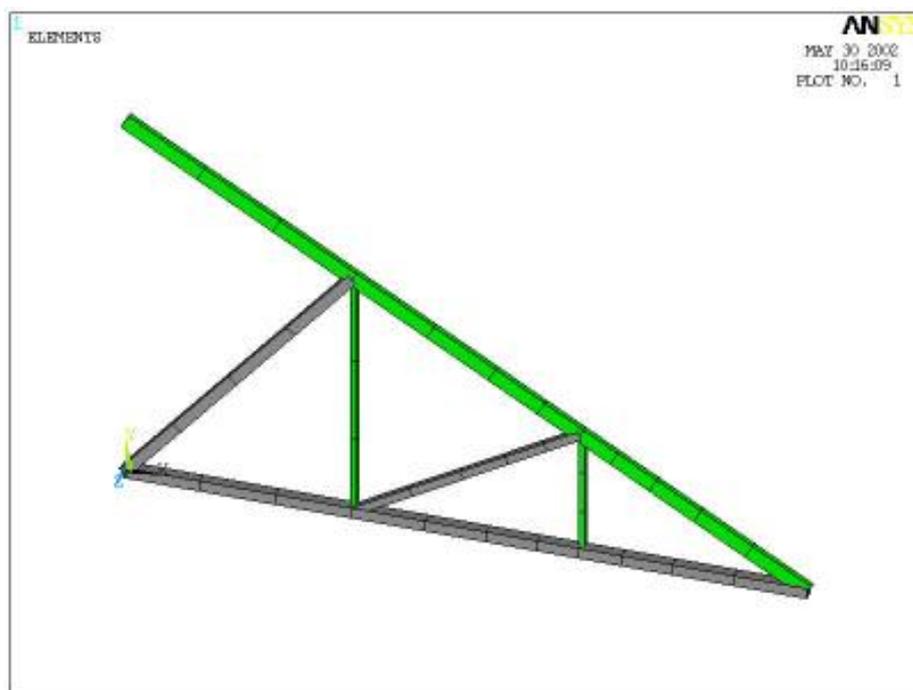


fig. 4.75. Comprobación a tensión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.

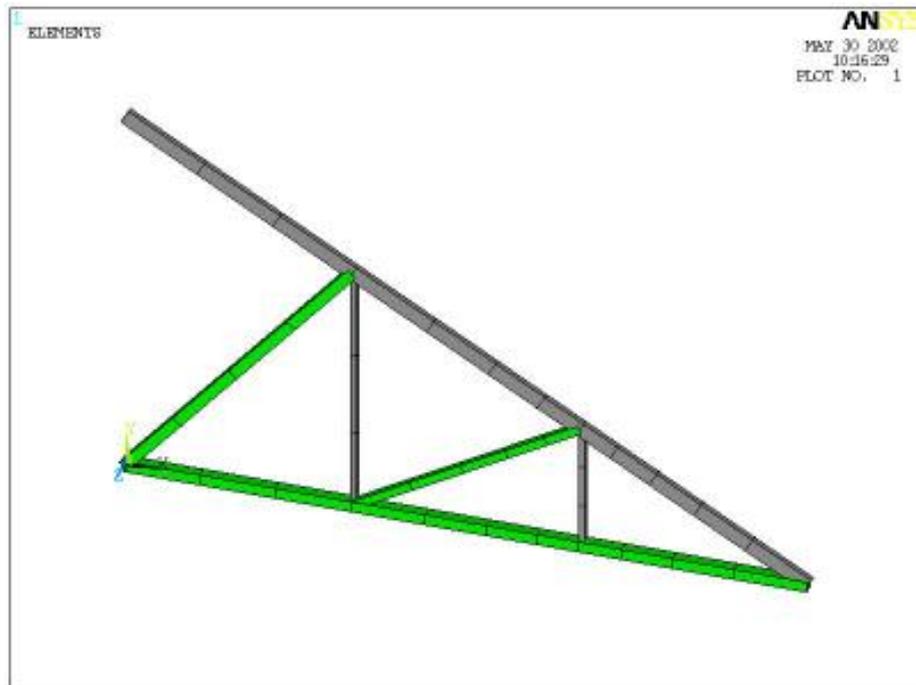


fig. 4.76. Comprobación a compresión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.

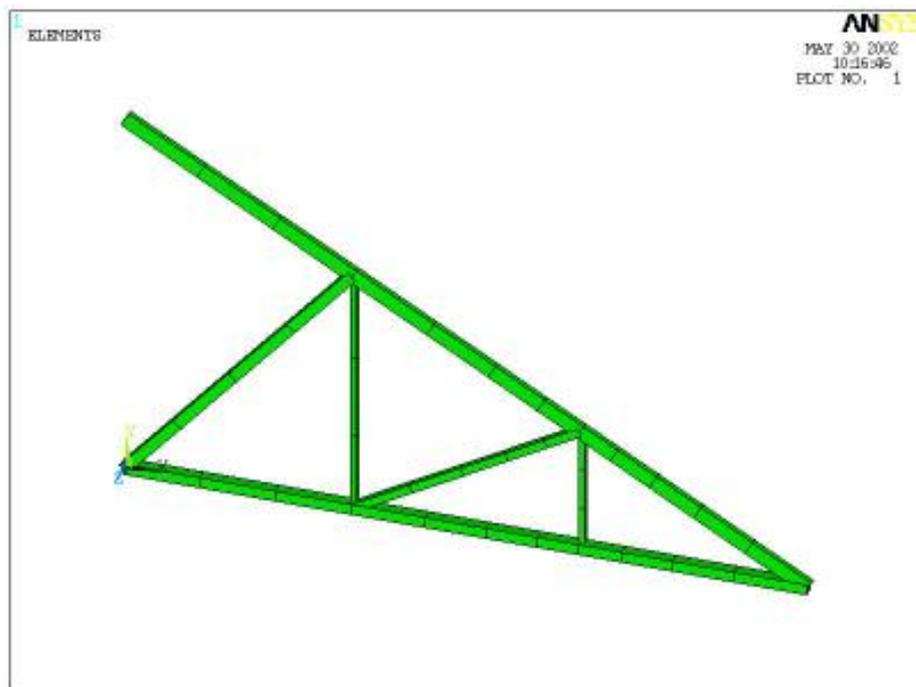


fig. 4.77. Comprobación a pandeo de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.

## 4.8 Análisis y discusión de los resultados.

Del estudio realizado se puede deducir lo siguiente:

- Un aumento en el tamaño de la población disminuye el peso medio y el coeficiente máximo de las mejores soluciones, pero aumenta el número medio de las evaluaciones de función efectuadas. En general, se obtiene una buena ejecución del algoritmo desarrollado para tamaños de población de 60 a 100 individuos.
- Una probabilidad de mutación entre el 1% y el 3%, produce pesos medios bajos y coeficientes máximos próximos a uno, para un número de evaluaciones de función razonable.
- Para una misma probabilidad de élite, un aumento de la probabilidad de cruce hasta valores del 80%, favorece la disminución del peso medio y la aproximación del coeficiente máximo a valores unitarios.
- Un valor de la probabilidad de élite entre el 10% y el 30%, da lugar a soluciones más ajustadas, dentro de un número medio de evaluaciones de función no muy alto.
- El uso de distintos operadores de cruce, apenas repercute en los resultados obtenidos para tamaños de población superiores a 60 individuos. Por el contrario, en poblaciones inferiores el resultado depende del valor de los parámetros del algoritmo. En este caso se presenta más estable el cruce por un fenotipo, frente al cruce por un punto y al cruce por dos puntos. Además, el número de evaluaciones de función es inferior en el cruce por un fenotipo tanto para poblaciones superiores a 60 individuos como para poblaciones inferiores.
- El uso de distintas normativas de seguridad con secciones vigentes en España, demuestra que la norma española produce mejores resultados de optimización para tamaños de población entre 40 y 60 individuos, mientras que para tamaños

de población superiores el mejor comportamiento lo presenta la norma europea frente a la española y la americana.

- La optimización llevada a cabo con el algoritmo genético elitista, produce soluciones seguras, menos sobredimensionadas que las obtenidas con el programa de cálculo CYPE.

El estudio se ha realizado sobre estructuras bidimensionales. El análisis del comportamiento del algoritmo genético elitista en problemas de optimización estructural tridimensionales se estudia en el capítulo siguiente.

---

---

# CAPÍTULO 5

---

---

**ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES.**

## 5.1 Introducción.

El estudio realizado en el capítulo 4 demuestra el buen comportamiento del algoritmo genético elitista cuando se aplica sobre estructuras bidimensionales sencillas. Además, define los intervalos de valores más adecuados para los distintos parámetros que lo caracterizan.

El siguiente paso es la aplicación de este algoritmo sobre estructuras más complejas en tres dimensiones, para conocer así su comportamiento en este tipo de estructuras, más cercanas a la realidad.

Con este fin, en este capítulo:

- Se aplica el algoritmo genético elitista sobre dos estructuras tridimensionales, empleando valores de los parámetros dentro de los intervalos obtenidos en el capítulo anterior.
- Se verifican los resultados del proceso de optimización con el programa ESCAL3D y con el módulo CIVILFEM del programa de cálculo por elementos finitos ANSYS.
- Se comparan los resultados del proceso de optimización con el redimensionamiento del programa CYPE.

## 5.2 Primera estructura analizada.

La primera estructura tridimensional analizada por el algoritmo genético elitista, consiste en una estructura de pórticos ubicada en la provincia de Zamora, típica de cualquier nave industrial (fig. 5.1), formada por dos pórticos separados entre sí 5 m y compuestos a su vez, por dos pórticos a un agua situados a ambos lados de un pórtico a dos aguas.

La estructura es simétrica respecto a un eje central, articulada (los apoyos se realizan mediante rótulas) y abierta, es decir, no presenta paredes laterales ni frontales, lo que permite el libre paso del viento. Sus luces de 5,5 m en los pórticos a un agua y de 12 m en el pórtico a dos aguas, hacen que sea necesario el empleo de correas de

arriostramiento en el techo a las que irán sujetas las cubiertas, pero se han eliminado buscando una mayor velocidad de cálculo.

Los dinteles se dividen en dos partes iguales, mediante el empleo de nudos en sus puntos medios, para conocer los desplazamientos en dichos nudos.

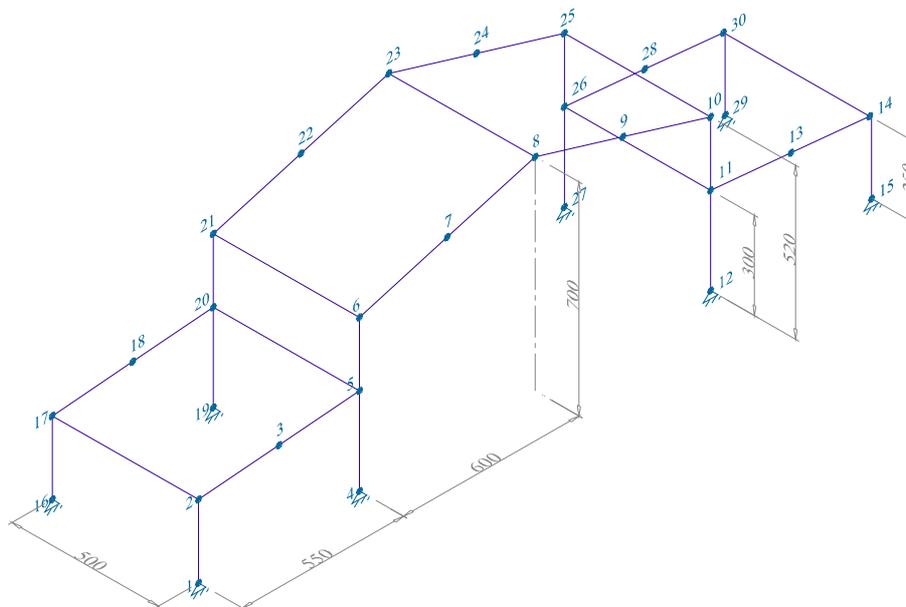


fig. 5.1. Estructura de pórticos tridimensional (cotas en cm).

La estructura consta de 30 nudos y 35 barras agrupadas en cinco tipos de secciones. Esta agrupación se realiza en función de las solicitaciones a las que se ven sometidas las barras y a su ubicación en la estructura, ya que al ser simétrica se iguala la parte derecha a la izquierda. Esto no sólo disminuye el tiempo del proceso de optimización, sino que también facilita la construcción y ejecución de la estructura al trabajar con un número reducido de secciones distintas entre sí y hacer la estructura lo más uniforme posible.

Las secciones asignadas son:

- Sección tipo HEA100 en pilares del pórtico a un agua.
- Sección tipo HEA140 en pilares del pórtico a dos aguas.
- Sección tipo IPE120 en dinteles del pórtico un agua.
- Sección tipo IPE160 en dinteles del pórtico a dos aguas.
- Sección tipo HEA120 en perfiles de unión entre pórticos (fig. 5.2).

Todas ellas realizadas con un acero A-42 según la norma española NBE-EA-95 de Estructuras de Acero en la Edificación.

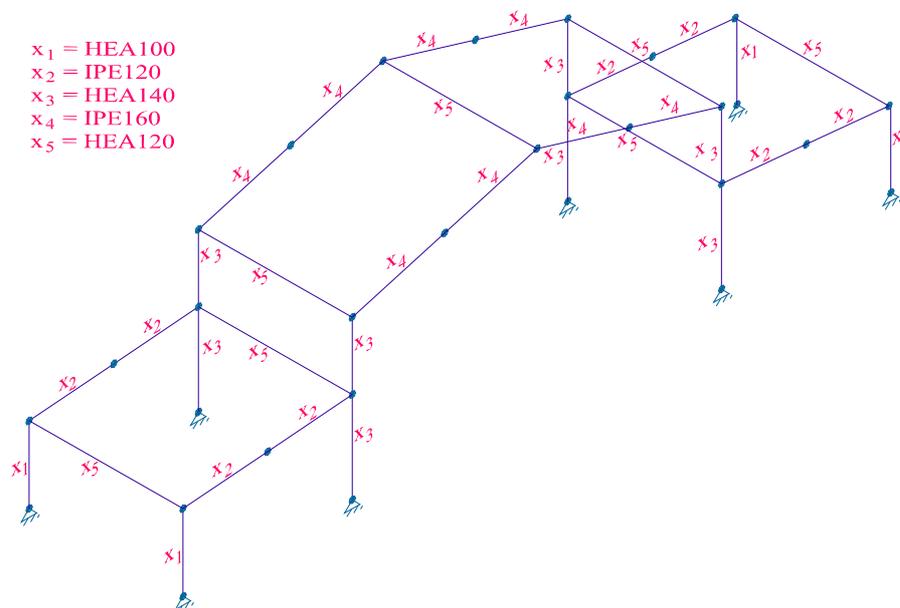


fig. 5.2. Agrupación de barras en la estructura de pórticos tridimensional.

Se consideran dos hipótesis simples: el peso propio de la estructura y una sobrecarga formada por la carga de nieve y la carga de viento, aplicadas ambas en los nudos de los dinteles como cargas puntuales y calculadas según la norma MV-103 de Acciones en la Edificación.

También se considera una combinación de las hipótesis simples donde el peso propio multiplicado por el coeficiente 1,33 se suma a la sobrecarga multiplicada por el coeficiente 1,5 según los coeficientes de ponderación de la norma NBE-EA-95.

- **Carga de nieve.**

El peso de la nieve ( $s$ ) que se puede acumular sobre cubiertas con inclinaciones inferiores a  $60^\circ$  viene dado por la expresión [5.1]:

$$s = p \cdot \cos \alpha \quad [5.1]$$

Donde  $\alpha$  es la inclinación de la cubierta y  $p$  es la sobrecarga de nieve en una superficie horizontal, de valor  $80 \text{ kp/m}^2$  para una estructura situada en Zamora a 650 m sobre el nivel del mar.

El peso de la de nieve será:

Pórtico un agua	$\alpha = 5,19^\circ$	$s = 79,7 \cdot \text{kp} / \text{m}^2$
Pórtico dos aguas	$\alpha = 16,69^\circ$	$s = 76,5 \cdot \text{kp} / \text{m}^2$

Tabla 5.1. Peso de la nieve en cubierta.

Que para una separación entre pórticos de 5 m y una longitud de dintel de 6,26 m en el pórtico a dos aguas y de 5,52 m en el pórtico a un agua da un valor de 1200 kp y 1100 kp respectivamente.

La mitad de estos valores se aplica en el centro de los dinteles y una cuarta parte en los nudos externos de los mismos.

- **Carga de viento.**

La sobrecarga unitaria ( $p$ ) debida al viento, viene dada por al expresión [5.2]:

$$p = c \cdot \omega \quad [5.2]$$

Donde  $\omega$  es la presión dinámica del viento de valor  $50 \text{ kp/m}^2$ , para una altura de estructura de 7 m y una situación topográfica normal y  $c$  es el coeficiente eólico que depende de la configuración de la construcción, de la posición del elemento y del ángulo de incidencia del viento en la superficie.

En el cálculo de la carga de viento y dado que la estructura es simétrica, se considera que el viento incide solamente de izquierda a derecha. En la (Tabla 5.2) se calcula la carga de viento en función de la separación entre pórticos, las longitudes y ángulos de inclinación de los dinteles y el coeficiente eólico. Repartida de igual forma que la carga de nieve, en los nudos de los dinteles.

Pórtico una agua	barlovento	$c = 0,4$	Carga vertical	$q_v \approx 276 \cdot kp$
			Carga horizontal	$q_v \approx 24 \cdot kp$
	sotavento	$c = 0,4$	Carga vertical	$q_v \approx -276 \cdot kp$
			Carga horizontal	$q_v \approx 24 \cdot kp$
Pórtico dos aguas	barlovento	$c = 0,8$	Carga vertical	$q_v \approx 600 \cdot kp$
			Carga horizontal	$q_v \approx 180 \cdot kp$
	sotavento	$c = 0$	Carga vertical	$q_v \approx 0 \cdot kp$
			Carga horizontal	$q_v \approx 0 \cdot kp$

Tabla 5.2. Carga de viento.

### 5.2.1 Optimización estructural. Programa GADEMO.

La estructura porticada (fig. 5.1) con las secciones asignadas por el usuario, se introduce en el programa ESCAL3D, para realizar un primer análisis de la misma y crear los ficheros de arranque del proceso de optimización. Una vez creados estos ficheros, se ejecuta el programa GADEMO y se asignan los valores a los parámetros y operadores que definen el algoritmo genético.

La generación aleatoria de las variables de diseño de los individuos que componen una población, se realiza entre un conjunto de 114 secciones distintas, lo que produce cadenas en forma binaria de 7 bits. Este conjunto de secciones está formado por las series de perfiles IPN, IPE, HEA, HEB y HEM.

El operador de cruce seleccionado es el cruce por un fenotipo y la normativa de seguridad la norma española MV-103.

La combinación de parámetros seleccionada se ajusta a los intervalos aconsejados en el capítulo anterior en el ajuste inicial de parámetros. En dicho capítulo se aconsejaba un tamaño de población entre 60 y 100 individuos, una probabilidad de

élite entre el 10% y el 30%, una probabilidad de mutación entre el 1% y el 3% y la mayor probabilidad de cruce posible siempre y cuando no supere el 80% y la suma de esta probabilidad y la probabilidad de élite no supere el 100%.

Dado que un número de individuos elevado, una probabilidad de mutación alta y una probabilidad de élite baja, dan lugar a un mayor número de evaluaciones de función y por lo tanto, una convergencia más lenta, se toma como tamaño de población y probabilidad de mutación, el menor valor de los intervalos aconsejados (60 individuos y 1% respectivamente) y para la probabilidad de élite el mayor valor (30%).

Por su parte, se aplica el mayor valor de la probabilidad de cruce que cumple las condiciones señaladas (70%) resultando la combinación de parámetros de la (Tabla 5.3).

$N_p$	$P_e$ (%)	$P_{mut}$ (%)	$P_c$ (%)
60	30	1	70

Tabla 5.3. Combinación analizada.

Una vez definidos todos los parámetros y operadores y generada la población inicial (fig. 5.3) se realizan cinco evoluciones completas del proceso de optimización. En la generación inicial o cero, se representan los individuos de la población en azul, a excepción del individuo de menor peso (suma del peso de los coeficientes de seguridad y el peso de sus barras) que se representa en rojo.

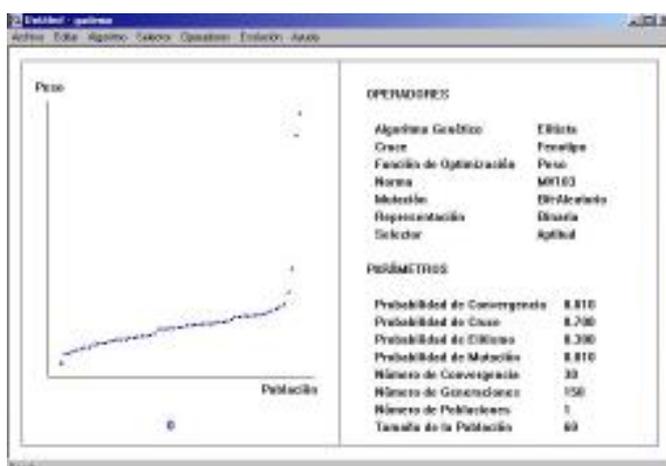


fig. 5.3. Población inicial generada al azar, de la primera evolución de la estructura de pórticos.

En cada evolución se obtiene un individuo óptimo, perteneciente a la generación en la que se produce la convergencia y cuyo peso es el menor de todos los individuos habidos a lo largo de las generaciones. Este individuo se representa en rojo, mientras que el resto de los individuos de la generación actual se representan en azul y los de las generaciones previas en verde (fig. 5.4).

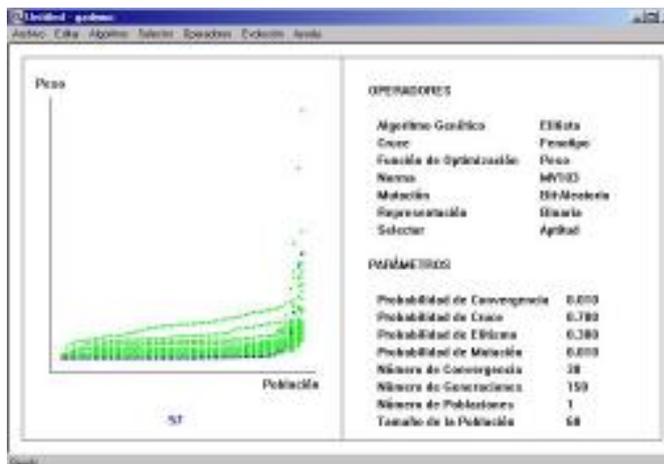


fig. 5.4. Individuo óptimo de la primera evolución realizada para la estructura de pórticos.

En la (Tabla 5.4) se representa el valor del peso del individuo óptimo, el peso de sus barras y de sus coeficientes de seguridad, el valor del coeficiente máximo, el número de generaciones y de evaluaciones efectuadas en cada evolución, así como los valores medios de las cinco evoluciones.

Evolución	Peso	Peso barras	Peso coeficientes	Coefficiente máximo	Generaciones	Evaluaciones
1	54518,44	1620,74	52897,70	0,98	57	1959
2	56453,11	1642,92	54810,9	0,90	28	968
3	54501,52	1507,73	52993,79	0,99	42	1443
4	54382,02	1580,70	52801,32	0,98	50	1724
5	55000,38	1575,93	53424,45	0,95	33	1111
Valores medios	54971,09	1585,60	53385,63	0,96	42	1441

Tabla 5.4. Resultados de las cinco evoluciones.

El mejor individuo óptimo corresponde al obtenido en la tercera evolución, que se caracteriza por un menor peso de barras y un mejor coeficiente máximo. Además, presenta valores medios del peso de coeficientes, del número de generaciones y del número de evaluaciones efectuadas.

En la (Tabla 5.5) se representan las secciones de los individuos óptimos obtenidos en las cinco evoluciones. En ella se aprecian secciones repetidas dentro de un mismo individuo pero en distintos grupos, lo que permitiría realizar grupos mayores dentro de un mismo individuo. También se observa la repetición de secciones para los mismos grupos, pero en distintos individuos, lo que indica que las estructuras con poco peso y coeficientes de seguridad próximos a uno, se mueven en un rango de secciones pequeño.

	Individuo 1	Individuo 2	Individuo 3	Individuo 4	Individuo 5
Grupo 1	HEA100	HEA100	HEA100	IPE100	HEA100
Grupo 2	IPE80	IPE80	IPE80	IPE80	IPE80
Grupo 3	HEA100	HEA120	HEA100	HEA100	HEA100
Grupo 4	IPE140	IPE160	IPE140	IPN140	IPE160
Grupo 5	HEA100	HEA100	HEA100	HEA120	HEA100

Tabla 5.5. Secciones de los individuos óptimos.

### 5.2.2 Verificación de resultados.

Una vez seleccionado el individuo óptimo mejor, se asigna el valor de sus secciones a la estructura generada en el programa ESCAL3D y a la generada con el módulo CIVILFEM, del programa de cálculo por elementos finitos ANSYS, para realizar una última comprobación de sus barras.

En la (fig. 5.5) se representan los valores de los coeficientes de seguridad obtenidos con el programa ESCAL3D para la combinación de cargas, la cual da lugar a los peores coeficientes. Estos coeficientes están representados por colores que van desde el azul oscuro para valores inferiores a 0,1 hasta el negro para coeficientes muy

próximos a 1, pasando por distintos azules, verdes, amarillos y rojos. En la figura, el valor de los coeficientes de seguridad aumenta desde valores cercanos a 0,1 en los pilares del pórtico a un agua izquierdo, hasta valores cercanos a uno en la parte superior del pilar derecho del pórtico a dos aguas y la zona del dintel a un agua derecho, más cercana a dicho pilar. Luego es en esta zona es donde se producen las mayores tensiones y en ella, las barras se encuentran dimensionadas al límite.

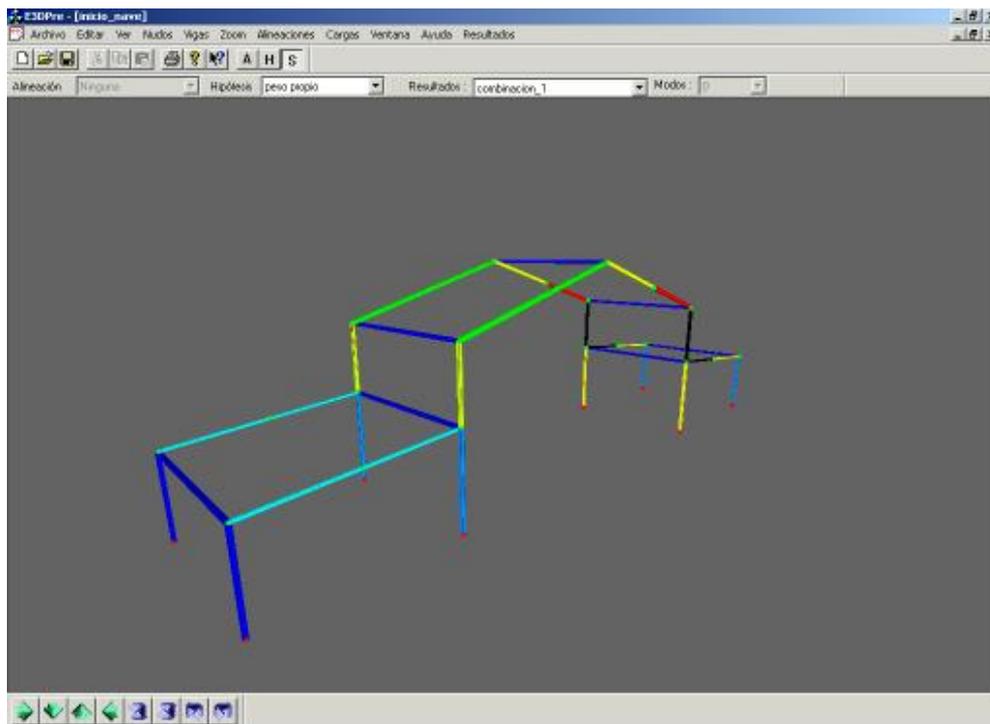


fig. 5.5. Coeficientes de seguridad del mejor individuo óptimo según el programa ESCAL3D.

El siguiente paso, es comprobar que las secciones asignadas a las barras de la estructura en el proceso de optimización, verifican las comprobaciones de seguridad del módulo CIVILFEM. Se definen los datos de la estructura como son el tipo de perfil, el tipo de material, la descripción de los nudos y las cargas aplicadas; se generan las mallas de los elementos lineales y se calcula la estructura. Una vez calculada se analizan las barras con el Eurocódigo3.

En la (fig. 5.6), (fig. 5.7) y (fig. 5.8) se representa la tensión en las barras, su compresión y pandeo respectivamente. El color de las barras varía entre el verde y el gris. En el primer caso, el coeficiente de seguridad es inferior a uno, puesto que en caso

contrario la barra estaría en rojo. En el segundo caso, el coeficiente de seguridad es cero, ya que la barra no está sometida a los esfuerzos que lo definen.

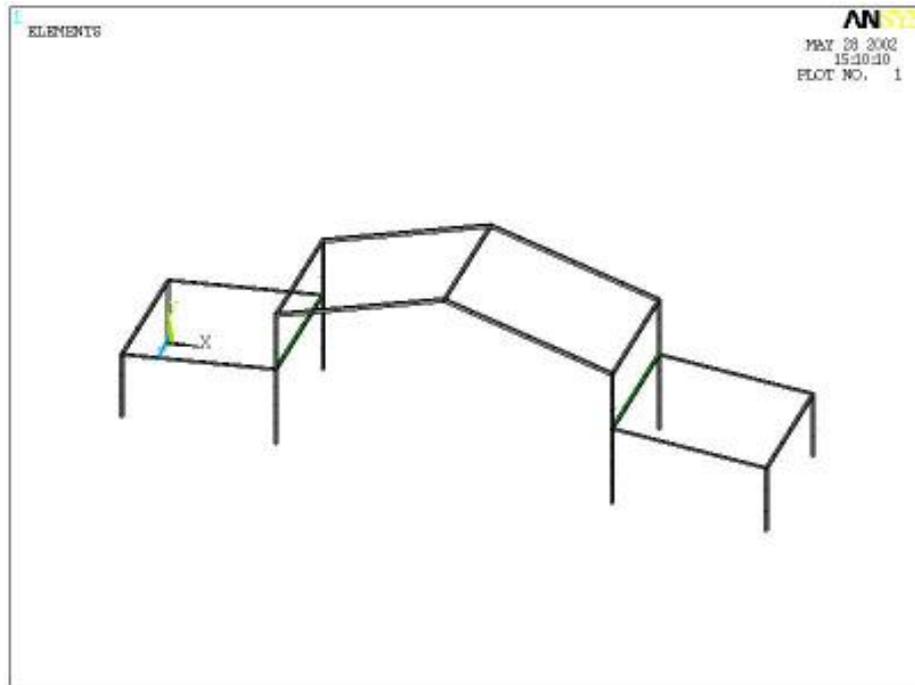


fig. 5.6. Comprobación a tensión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.

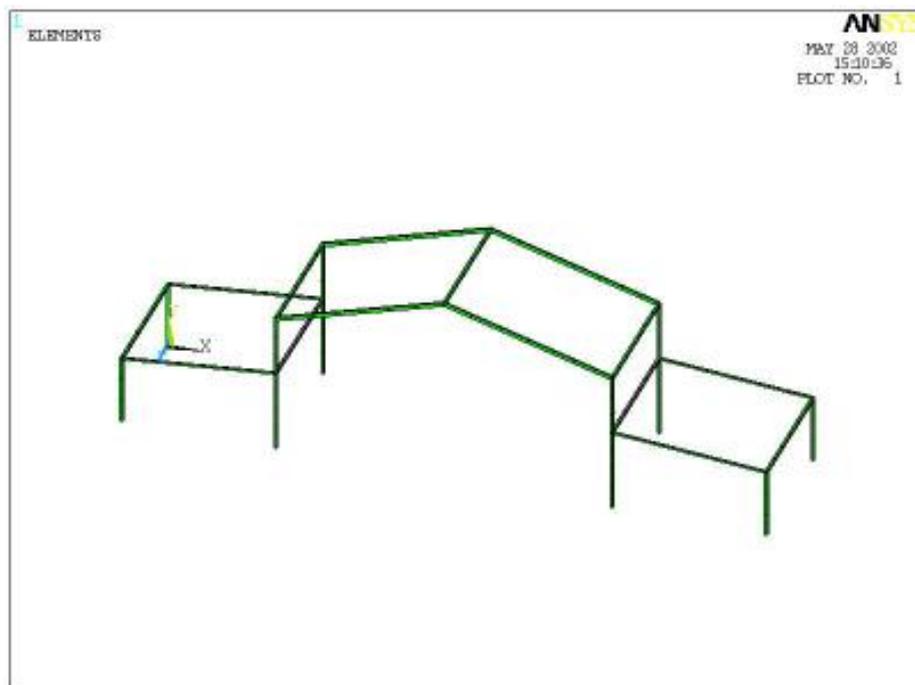


fig. 5.7. Comprobación a compresión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.

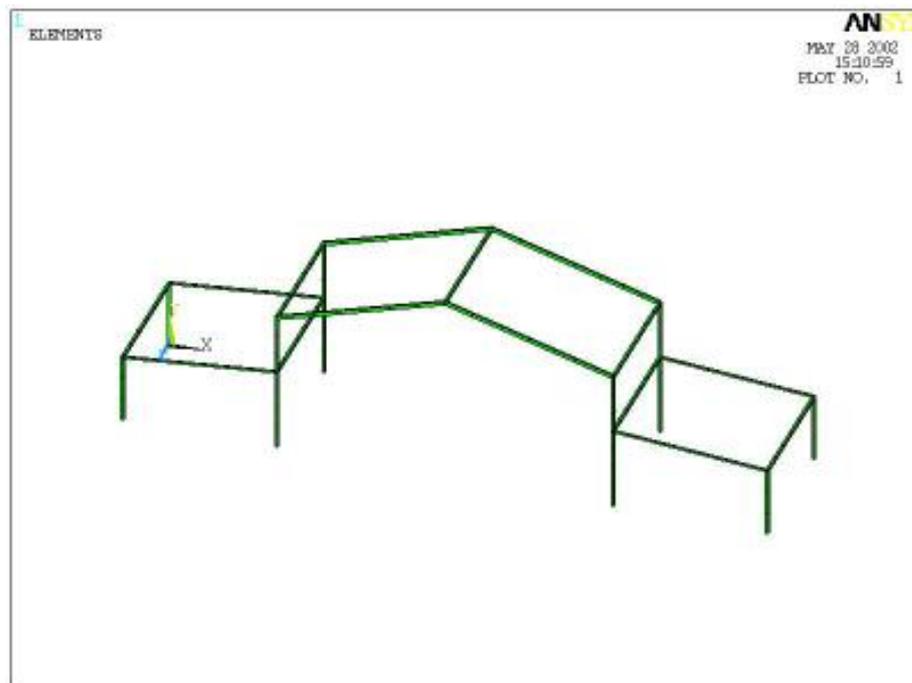


fig. 5.8. Comprobación a pandeo de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.

### 5.2.3 Redimensionamiento de barras. Programa CYPE.

Optimizada la estructura con el programa GADEMO, se analiza, comprueba y si es necesario se redimensiona la estructura porticada inicial (fig. 5.1) con el programa CYPE.

Para ello se introduce esta estructura en el programa, asignando el material y las secciones (fig. 5.2) a las barras y definiendo las hipótesis de carga y sus combinaciones.

Por último, se definen los apoyos y se calculan y comprueban las barras siguiendo la norma española MV 103.

Al realizar la comprobación de barras, unas pocas se ponen en rojo lo que indica que estas barras no cumplen alguno de los coeficientes de seguridad, o lo que es lo mismo, que alguno de los coeficientes de seguridad es superior a uno (fig. 5.9).

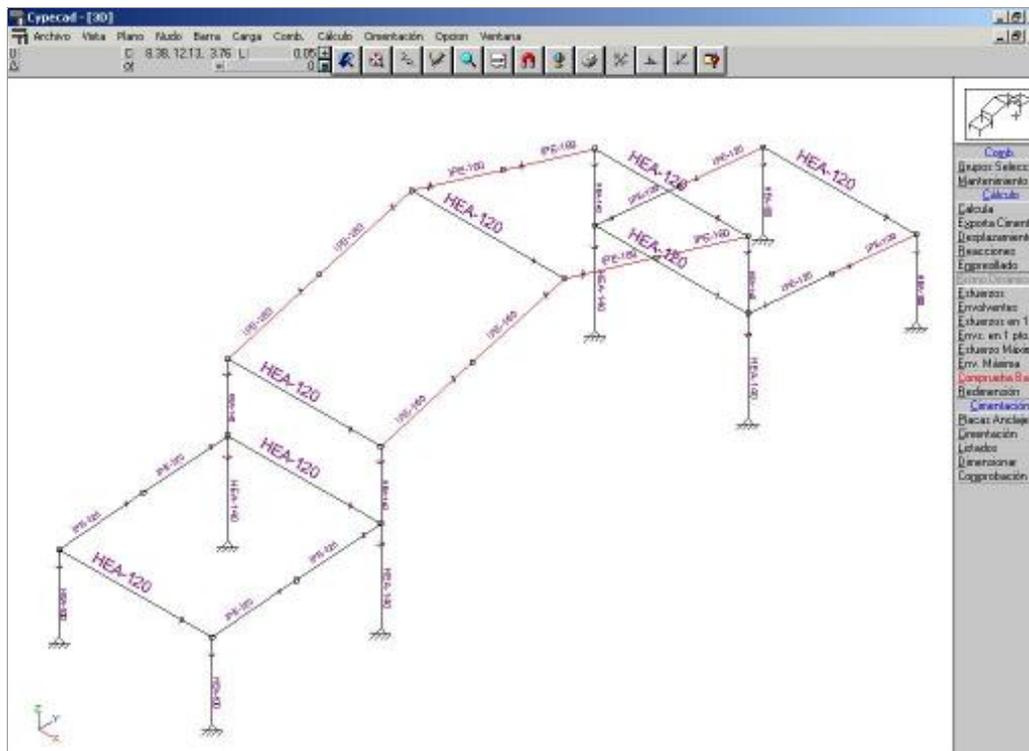


fig. 5.9. Comprobación de las secciones iniciales según el programa CYPE.

El siguiente paso es el redimensionamiento de la estructura, en el que se asignan a las barras que no cumplen las comprobaciones de seguridad, las secciones capaces de soportar las tensiones a las que se ven sometidas.

En este redimensionamiento, se aumentan los tamaños de las secciones, que no cumplen alguno de los coeficientes de seguridad, siguiendo el orden de la serie asignada inicialmente, se recalculan de nuevo los esfuerzos sobre la estructura y se comprueban los nuevos coeficientes.

Este proceso continúa hasta que todas las secciones verifican todas las comprobaciones de seguridad. La estructura obtenida se refleja en la (fig. 5.10) cuyo peso de barras se representa en la (Tabla 5.6).

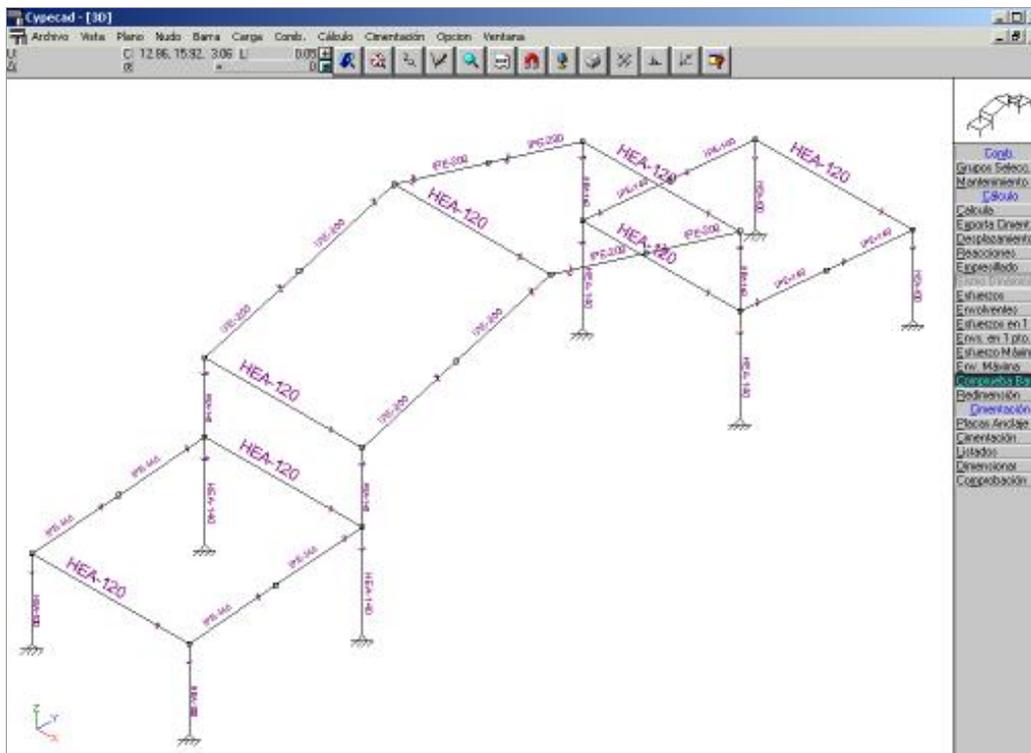


fig. 5.10. Comprobación de las barras de la estructura redimensionada según el programa CYPE.

	Sección	Peso (kg)
Grupo 1	HEA100	160,24
Grupo 2	IPE140	283,15
Grupo 3	HEA140	500,73
Grupo 4	IPE200	542,93
Grupo 5	HEA120	673,58
Peso total (kg)		2160,63

Tabla 5.6. Peso de la estructura redimensionada según el programa CYPE.

### 5.2.4 Comparación de resultados.

En la (Tabla 5.7) se compara el mejor individuo óptimo obtenido en el proceso de optimización del programa GADEMO, con la estructura obtenida en el redimensionamiento del programa CYPE.

Número Grupo	Secciones GADEMO	Peso (kg)	Secciones CYPE	Peso (kg)
1	HEA100	160,24	HEA100	160,24
2	IPE80	132,23	IPE140	283,15
3	HEA100	333,30	HEA140	500,73
4	IPE140	321,11	IPE200	542,93
5	HEA100	560,85	HEA120	673,58
Peso total (kg)		1507,73		2160,63

Tabla 5.7. Comparación de los resultados obtenidos con los programas GADEMO y CYPE.

En todos los grupos a excepción del primero, los pesos de las secciones asignadas a las barras con el programa GADEMO, son iguales o inferiores a los pesos de las secciones asignadas con el programa CYPE, lo que lleva a una mejora de 652,9 kg, es decir, un 43% del peso total de la estructura.

Esta gran diferencia de pesos se debe a que el programa GADEMO busca la combinación de secciones que con el menor peso, sea capaz de cumplir los coeficientes de seguridad. Para ello, modifica todas las secciones y no sólo las que no cumplen los coeficientes, ya que la alteración de una sección puede afectar al cumplimiento de los criterios de seguridad de otra.

En el programa CYPE sólo se modifican las secciones que no cumplen alguno de los criterios de seguridad, moviéndose únicamente en la serie asignada inicialmente. Esto reduce el número de combinaciones de secciones que cumplen los criterios de seguridad y hace que la estructura obtenida dependa de las secciones asignadas inicialmente, es decir, que dependa de la habilidad o experiencia del diseñador.

### 5.3 Segunda estructura analizada.

La segunda estructura tridimensional analizada es un edificio de tres plantas simétrico respecto a su pilar central, con una separación de 4 m entre plantas y de 6 m entre pilares, situado en la costa (fig. 5.11).

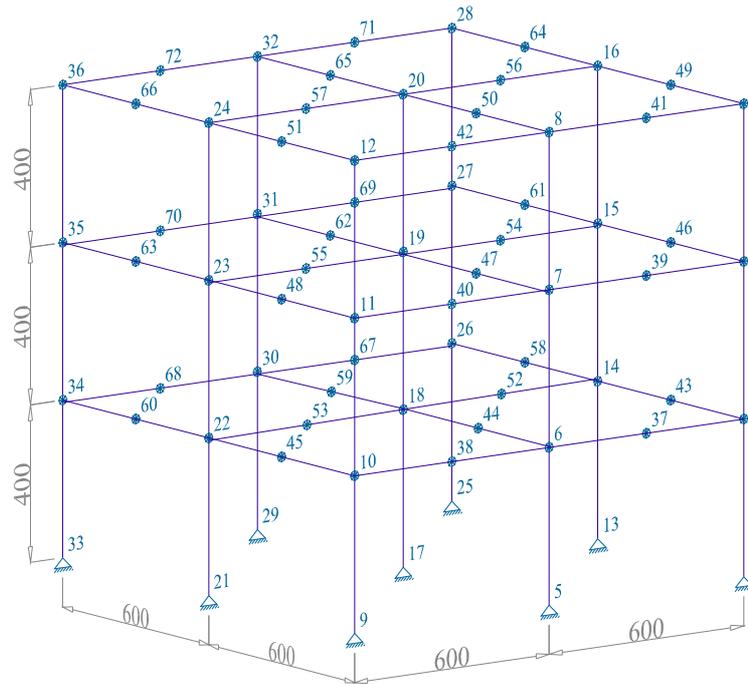


fig. 5.11. Edificio metálico analizado (cotas en cm).

Las vigas se dividen en dos partes iguales, para conocer los desplazamientos en los puntos medios, dando lugar a una estructura formada por 72 nudos y 99 barras. Las barras se agrupan en cuatro tipos de secciones en función de los esfuerzos que actúan sobre ellas y su ubicación en la estructura (ver apartado 5.2). Las secciones asignadas son:

- Sección tipo HEB220 en pilares de esquina.
- Sección tipo HEB260 en pilares medios.
- Sección tipo HEB300 en pilar central.
- Sección tipo HEA200 en vigas (fig. 5.12).

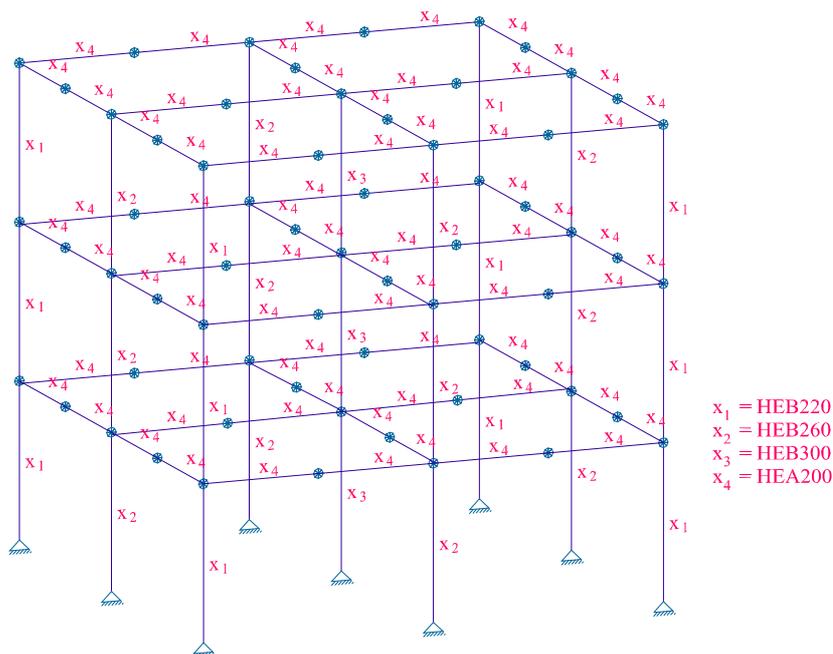


fig. 5.12. Secciones iniciales en el edificio metálico.

El material utilizado es el acero A-42 según la norma española NBE-EA-95 de Estructuras de Acero en la Edificación.

Se consideran dos hipótesis simples: el peso propio de la estructura y una sobrecarga formada por la carga de viento y por la sobrecarga de uso, calculadas según la norma NBE-EA-95 de Acciones en la Edificación.

También se considera una combinación de las hipótesis simples donde el peso propio multiplicado por el coeficiente 1,33 se suma a la sobrecarga multiplicada por el coeficiente 1,5 según los coeficientes de ponderación de la citada norma.

- **Carga de viento.**

En el cálculo de la carga de viento y dado que la estructura es simétrica, se considera que el viento solamente incide de izquierda a derecha.

La presión dinámica de  $100 \text{ kp/m}^2$ , al ser una construcción expuesta de 12 m de altura y el coeficiente eólico de 0,8 a barlovento y de 0,4 a sotavento provocan una

sobrecarga unitaria de  $80 \text{ kp/m}^2$  y  $40 \text{ kp/m}^2$  respectivamente, lo que da lugar al valor de la carga de viento reflejado en la (Tabla 5.8) aplicado en los nudos de los pilares.

Pilar de esquina	barlovento	$c = 0,8$	Planta superior	$q_v \approx 480 \cdot kp$
			Plantas intermedias	$q_v \approx 960 \cdot kp$
	sotavento	$c = 0,4$	Planta superior	$q_v \approx 240 \cdot kp$
			Plantas intermedias	$q_v \approx 480 \cdot kp$
Pilar intermedio	barlovento	$c = 0,8$	Planta superior	$q_v \approx 960 \cdot kp$
			Plantas intermedias	$q_v \approx 1920 \cdot kp$
	sotavento	$c = 0,4$	Planta superior	$q_v \approx 480 \cdot kp$
			Plantas intermedias	$q_v \approx 960 \cdot kp$

Tabla 5.8. Carga de viento.

- **Sobrecarga de uso.**

Se considera una sobrecarga de uso de  $250 \text{ kp/m}^2$  en la cubierta y de  $300 \text{ kp/m}^2$  en las plantas intermedias. En el primer caso, esta sobrecarga es la suma del peso de la cubierta  $100 \text{ kp/m}^2$  y de la sobrecarga definida en la norma NBE-EA-95 para cubiertas accesibles sólo privadamente. En el segundo caso es la sobrecarga definida en dicha norma en edificios de oficinas para acceso público en general y edificios docentes.

Esta sobrecarga da lugar a una carga distribuida aplicada en los pórticos, de valor (Tabla 5.9):

Cubierta	Pórticos externos	$s = 750 \cdot kp / m$
	Pórticos intermedios	$s = 1500 \cdot kp / m$
Plantas intermedias	Pórticos externos	$s = 900 \cdot kp / m$
	Pórticos intermedios	$s = 1800 \cdot kp / m$

Tabla 5.9. Sobrecarga de uso.

### 5.3.1 Optimización estructural. Programa GADEMO.

Al igual que se hizo para la estructura porticada, se introduce el edificio en el programa ESCAL3D para realizar un primer análisis que cree los ficheros de arranque del proceso de optimización.

Una vez creados estos ficheros, se ejecuta el programa GADEMO, empleando los mismos valores de parámetros y operadores del algoritmo genético elitista que en el ejemplo anterior y el mismo conjunto de secciones.

Se realizan cinco evoluciones completas del proceso de optimización, obteniendo para cada una, a partir de una población inicial generada al azar (fig. 5. 13), un individuo óptimo (fig. 5. 14).



fig. 5. 13. Población inicial generada al azar de la tercera evolución del edificio metálico.



fig. 5. 14. Individuo óptimo de la tercera evolución del edificio metálico.

En la (Tabla 5.10) se representa los resultados de las cinco evoluciones realizadas: el valor del peso del individuo óptimo, del peso de sus barras y sus coeficientes de seguridad, el valor de su coeficiente máximo y el número de generaciones y evaluaciones de función efectuadas para esa evolución, además de los valores medios de las cinco evoluciones.

Evolución	Peso	Peso barras	Peso coeficientes	Coficiente máximo	Generaciones	Evaluaciones
1	148753,11	18812,15	129940,95	0,95	43	1435
2	148691,15	18110,33	130580,72	0,92	69	2280
3	151142,38	19246,45	131895,92	0,97	39	1345
4	150604,08	17894,78	132709,30	0,98	52	1733
5	147276,17	17910,11	129366,05	0,98	42	1396
Valores medios	149293,36	18394,76	130898,59	0,96	49	1637,80

Tabla 5.10. Resultados de las cinco evoluciones.

El mejor individuo óptimo es el obtenido en la quinta evolución. Este individuo se caracteriza por tener el menor valor del peso de los coeficientes de seguridad, lo que unido a un valor pequeño en el peso de las barras da el valor más bajo del peso o valor de la función objetivo. Además, presenta un coeficiente máximo próximo a uno y un número de generaciones y de evaluaciones de función efectuadas pequeño.

En la (Tabla 5.11) se representan las secciones asignadas a cada grupo de barras de los individuos óptimos. Se observa que las secciones asignadas a las vigas (grupo 4) se repiten a lo largo de cuatro de las cinco evoluciones, mientras que las secciones asignadas a los pilares apenas se repiten en dos o tres. Esto se debe a que la carga de la estructura se reparte entre los pilares, por lo que sus secciones dependen fuertemente unas de otras. Es decir, si los pilares extremos (grupo 1) y medios (grupo 2) tienen secciones pequeñas, o lo que es lo mismo, tienen menos capacidad resistente, el pilar central (grupo 3) tendrá que soportar más carga y por lo tanto será mayor. Y viceversa, cuanto más carga soporten los pilares extremos y medios, menor será el pilar central.

	Individuo 1	Individuo 2	Individuo 3	Individuo 4	Individuo 5
Grupo 1	IPN320	IPN300	HEB220	HEA200	HEA300
Grupo 2	HEA260	IPE360	HEA260	HEA260	HEA240
Grupo 3	HEA240	HEM140	HEA240	HEA260	HEM140
Grupo 4	IPE360	IPE360	IPE360	IPE360	IPE330

Tabla 5.11. Secciones de los individuos óptimos.

### 5.3.2 Verificación de resultados.

Una vez seleccionado el individuo óptimo, se asignan sus secciones a las barras de la estructura generada con el programa ESCAL3D, y a la generada con el módulo CIVILFEM, del programa de cálculo por elementos finitos ANSYS, para analizar y comprobar los coeficientes de seguridad.

En la (fig. 5.15) se representan los valores de dichos coeficientes con el programa ESCAL3D, para la combinación de cargas, la cual da lugar a los peores coeficientes. Estos se representan por colores que van desde el azul oscuro para valores inferiores al 0,1 hasta el negro para coeficientes muy próximos a 1. En este caso, los valores más altos y debido a la distribución de cargas considerada, se encuentran en la planta baja del edificio y en su zona derecha, tanto para las barras de las vigas como para las de los pilares.

Al igual que en el caso anterior, para la comprobación de las secciones asignadas a las barras con el módulo CIVILFEM, se definen los datos de la estructura como son el tipo de perfil, el tipo de material, la descripción de los nudos y las cargas aplicadas; se generan las mallas de los elementos lineales y se calcula la estructura. Una vez calculada se analizan las barras con el Eurocódigo3.

La tensión en las barras, compresión y pandeo se representan en la (fig. 5.16), (fig. 5.17) y (fig. 5.18) respectivamente. En todas ellas, el color de las barras varía entre el verde y el gris. En el primer caso, el coeficiente de seguridad es inferior a uno, puesto

que en caso contrario la barra estaría en rojo. En el segundo caso, el coeficiente de seguridad es cero, ya que la barra no está sometida a los esfuerzos que lo definen.

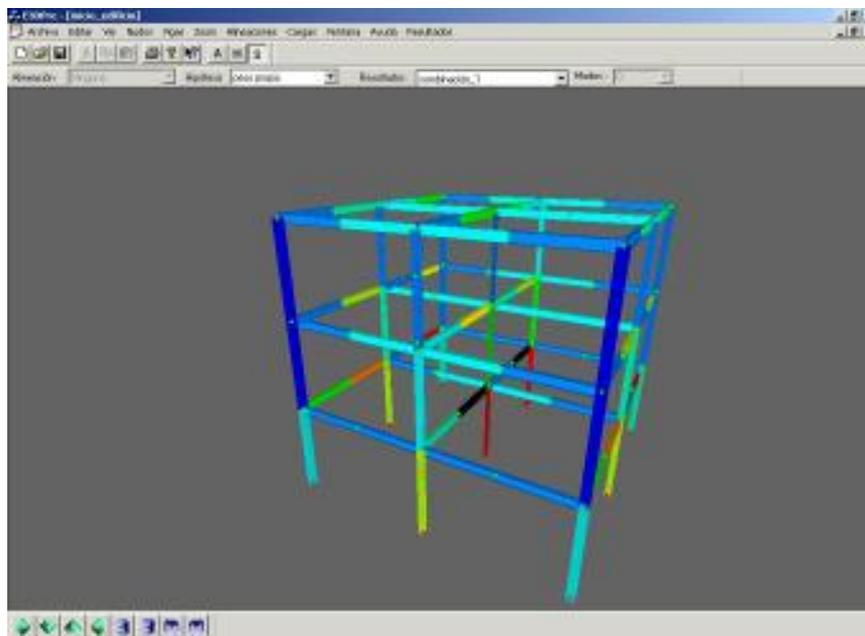


fig. 5.15. Coeficientes de seguridad del mejor individuo óptimo según el programa ESCAL3D.



fig. 5.16. Comprobación a tensión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.



fig. 5.17. Comprobación a compresión de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.



fig. 5.18. Comprobación a pandeo de los perfiles de optimización con el módulo CIVILFEM.





### 5.3.4 Comparación de resultados.

En la (Tabla 5.13) se compara el mejor individuo óptimo obtenido en el proceso de optimización del programa GADEMO, con la estructura obtenida en el redimensionamiento del programa CYPE.

Número Grupo	Secciones GADEMO	Peso (kg)	Secciones CYPE	Peso (kg)
1	HEA300	4051,01	HEB220	3384,38
2	HEA240	2787,87	HEB260	4344,43
3	HEM140	771,65	HEB300	1365,61
4	IPE330	10299,58	HEA220	10574,44
Peso total (kg)		17910,11		19668,86

Tabla 5.13. Comparación de los resultados obtenidos con los programas GADEMO y CYPE.

En todos los grupos a excepción del primero, los pesos de las secciones asignadas a las barras con el programa GADEMO, son inferiores a los pesos de las secciones asignadas con el programa CYPE, lo que lleva a una mejora de 1758,75 kg, es decir, casi un 10% del peso total de la estructura.

De la misma manera que en el primer ejemplo analizado, la gran diferencia de pesos se debe a que el programa GADEMO busca la combinación de secciones que con el menor peso, es capaz de cumplir los coeficientes de seguridad, mientras que el programa CYPE sólo modifica las secciones que no cumplen alguno de los criterios de seguridad, moviéndose únicamente en la serie asignada inicialmente.

## 5.4 Conclusiones.

De los estudios realizados se puede decir que:

- La optimización estructural llevada a cabo con el algoritmo genético elitista sobre estructuras tridimensionales, obtiene estructuras seguras muy poco sobredimensionadas, que en ocasiones presentan secciones a priori rechazadas y que sin embargo, desde un punto de vista resistente podrían ser válidas.

- Las distintas combinaciones de secciones obtenidas para una misma estructura, permiten seleccionar aquella más adecuada constructivamente o aquella cuyas secciones sean más fáciles de obtener.
- Los pesos obtenidos con el programa GADEMO son inferiores a los obtenidos con programas de estructuras convencionales como el CYPE, debido fundamentalmente a la asignación aleatoria de secciones.
- El algoritmo genético elitista es adecuado para la optimización de estructuras tanto en dos como en tres dimensiones.

---

---

# **CAPÍTULO 6**

---

---

**CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE  
DESARROLLO.**

## 6.1 Conclusiones.

Las conclusiones obtenidas tras la realización de este trabajo se pueden resumir en los siguientes apartados:

- Los métodos de diseño convencionales de estructuras metálicas dependen de la habilidad y experiencia del diseñador, de la complejidad de la estructura y de las alternativas de diseño y técnicas de análisis existentes. Por el contrario, la optimización estructural y dentro de ésta, los algoritmos genéticos basados en la evolución natural, obtienen soluciones extremas que satisfacen los criterios de diseño prescritos de una forma racional y objetiva. No recaen en la intuición o habilidad del diseñador y engloban el proceso de selección de los elementos estructurales y la comprobación de los criterios de diseño.
- El algoritmo genético desarrollado y analizado, denominado *elitista*, es un método de optimización robusto y poco complejo matemáticamente, adecuado para los diseñadores. No necesita información previa de la función objetivo o de las funciones de restricción, y como se ha visto, puede trabajar con estructuras complejas bajo diferentes condiciones de carga y restricciones. Además, permite el empleo de secciones de catálogos comerciales como variables de diseño y es capaz de aplicar la experiencia del ingeniero seleccionando el número de variables de diseño y su relación con los miembros estructurales.
- El valor de los parámetros que definen el algoritmo genético elitista afecta considerablemente al comportamiento del mismo. Por ello, se han sugerido unos valores que aumenten su velocidad y obtengan mejores individuos óptimos.
- El algoritmo genético elitista basado en buscar aproximaciones, se ha mostrado, para problemas de optimización estructural, como una importante alternativa a los algoritmos basados en el gradiente. Además, presenta un amplio potencial para poder ser aplicado a múltiples problemas de optimización en ingeniería.

- Los problemas de optimización estructural, pueden provocar soluciones no realistas o no prácticas. Por ello, se debe de analizar cuidadosamente la selección de las variables de diseño y su relación con los miembros estructurales.
- El uso de un mayor número de variables de diseño para describir una estructura, así como un mayor número de posibles valores de las mismas, produce mejores resultados, aunque incrementa notablemente el tiempo de computación.
- El programa desarrollado, basado en el algoritmo genético elitista, se ha utilizado con variables de diseño discretas, pudiendo ser aplicado a problemas de variables discretas y continuas.
- La optimización llevada a cabo mediante el algoritmo genético elitista, produce soluciones seguras, menos sobredimensionadas que las obtenidas con el programa de cálculo CYPE, tanto para estructuras en dos como en tres dimensiones, debido fundamentalmente a la asignación aleatoria de secciones. Estas soluciones presentan secciones a priori rechazadas y que, sin embargo, desde un punto de vista resistente podrían ser válidas. Además, las distintas combinaciones de secciones obtenidas para una misma estructura, con diferencias entre ellas generalmente pequeñas, permiten seleccionar aquella constructivamente más adecuada o cuyas secciones sean más fáciles de obtener en el mercado.
- De las soluciones sugeridas en el diseño de optimización bi o tridimensional, se puede observar que secciones iguales se repiten en diferentes grupos de las estructuras, aunque inicialmente se hallan asignado a variables de diseño diferentes. Esto indica que puede ser beneficioso incluir grupos de miembros estructurales como un criterio adicional en la formulación del problema de optimización del diseño.
- El entorno gráfico implementado permite la modificación de parámetros y variables de diseño del algoritmo genético de forma fácil y rápida. Muestra, en

tiempo de ejecución, la distribución de los individuos a lo largo de las generaciones, resaltando el individuo óptimo. Refleja de forma gráfica, el estado de la optimización (convergencia y datos estadísticos de la población actual) y genera ficheros de texto donde se incluyen no sólo los resultados de la optimización, sino todos los individuos analizados en las distintas generaciones, permitiendo un conocimiento y análisis de la optimización realizada.

- Por último, se puede concluir que el algoritmo genético elitista es adecuado para la optimización de estructuras metálicas bi o tridimensionales.

## 6.2 Líneas futuras de desarrollo.

Como futuras líneas de investigación que continúen la presentada en este trabajo se pueden destacar las siguientes:

- Estudiar nuevos operadores de selección de variables, tales como operadores de selección aritméticos. De forma que se limiten los cambios de las secciones asignadas a pequeños intervalos con centro en la sección actual. Se produciría así, un barrido más intenso en el entorno de las secciones asignadas inicialmente por el usuario.
- Analizar el efecto sobre el algoritmo genético de la ordenación de la base de datos de las secciones, como por ejemplo por propiedades resistentes o geometría.
- Permitir al usuario la posibilidad de que cada variable de diseño, de forma individual, varíe entre un rango de secciones propio e independiente de los rangos asignados a las demás variables.
- Elaborar un entorno gráfico sencillo enlazado con el programa ESCAL3D, que permita la modificación de la función objetivo. De este modo se podrían considerar otros criterios de penalización, a parte de los coeficientes de seguridad considerados, como pueden ser las deformaciones en los nudos.

- Llevar a cabo un análisis económico de las estructuras en función del tipo de perfiles asignados a las barras, puesto que el coste de estas no sólo depende del peso de acero usado, sino de otros factores tales como la ejecución de las secciones, sus soldaduras, su forma de construcción y montaje.
- Aplicar técnicas de optimización estructural basadas en redes neuronales y estrategias evolutivas a los individuos óptimos obtenidos en el algoritmo genético elitista.
- Desarrollar un sistema experto que a partir de la solución optimizada, y siguiendo reglas empíricas propuestas por el diseñador, como fruto de su experiencia, permita analizar en detalle aspectos que no se pueden tener en cuenta en el análisis matricial/matemático del sistema, tales como el diseño de uniones, la homogeneidad de secciones, el pandeo de barras, la disponibilidad de perfiles.

---

---

# CAPÍTULO 7

---

---

**BIBLIOGRAFÍA.**

- 
- [1] **Ansys** “*Ansys Help and Documentation.*”.  
Swanson.  
Analysis S. I.P. Inc, 1999-2000-2001.
- 
- [2] **Álvarez, L. F.** “*Approximation model building for design optimization using genetic programming methodology*”.  
**Toropov, V. V.**  
**Hughes, D. C.**  
**Ashour, A. F.**  
AIAA Paper 98-4769.  
7<sup>th</sup> AIAA/USAF/NASA/ISSMO. Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, USA, 1998.  
Part1. Pag. 490-498.
- 
- [3] **Álvarez, L. F.** “*Design Optimization Based On Genetic Programming. Approximation model building for design optimization using the response surface methodology and genetic programming*”.  
Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Bradford, UK. 2000.
- 
- [4] **Argüelles Álvarez, R.** “*Estructuras de Acero. Cálculo, Norma Básica y Eurocódigo*”.  
**Argüelles Bustillo, R.**  
**Arriaga Martitegui, F.**  
**Atienza Reales, J. R.**  
Bellisco. Ediciones Técnicas y Científicas, Madrid, 1999.  
ISBN 84-930002-8-0.
- 
- [5] **Baeza Balam, J.** “*La forma geométrica de las zapatas aisladas para mejorar la eficiencia estructural de ciertas estructuras*”.  
**Burgos Santos, J. F.**  
**Prendes Gero M. B.**  
3º Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción.  
Santa Clara (Cuba), 1998.

- 
- [6] **Bartschi Wall, M.** “*A Genetic Algorithm for Resource-Constrained Scheduling*”.
- Thesis. Department of Mechanical Engineering.  
Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- 
- [7] **Bartschi Wall, M.** “*GALib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components*”.
- Department of Mechanical Engineering.  
Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- 
- [8] **Bello García, A.  
Ordieres Meré, J. B.  
González Nicieza, C.  
Menéndez Díaz, A.** “*Generalization of the influence function method in mining subsidence*”.
- Int. Journal of Surface Mining, Reclamation &  
Environment, 1996.
- Pag 195-202.
- 
- [9] **Bello García, A.  
Ordieres Meré, J. B.  
González Nicieza, C.  
Menéndez Díaz, A.** “*Parameter Optimization in Influence Functions in Mining Subsidence*”.
- Int. Journal of Rock Mechanics and Mining  
Sciences, 1997.
- Vol 34, Pag 1125-1131.
- 
- [10] **Bello García, A.  
Ordieres Meré, J.  
Del Coz Díaz, J. J.  
Suárez Domínguez, F. J.  
Felgueroso Fernández, D.  
Álvarez Fernández, M.** “*Aprendizaje Interactivo mediante el programa de análisis estructural avanzado ESCAL3D*”.
- Journal of Constructional Steel Research.  
Editorial Elsavier Science, 1998.
- Vol 46, Pag 273-275.
- 
- [11] **Bello García, A.  
Álvarez Cabal, J. V.  
Roqueñí Gutiérrez, N.  
Vergara González, E.  
De Cos Juez, F. J.** “*Optimización del modelo de temperatura de un tren de chapa gruesa*”.
- Entemu, 1999.
- Vol 11, Pag 303-313.
-

- 
- [12] **Bello García, A.  
Ortega Fernández, F.  
Ordieres Meré J. B.  
Roqueñí Gutiérrez, N.**      “*Optimización de los tiempos de espera en ascensores mediante algoritmos de aprendizaje*”.
- Actas del XV Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos, 1999.
- Pag 499-504.
- 
- [13] **Bruce Eckel.**      “*Thinking in C++, 2<sup>nd</sup>. ed. Volume 1*”.
- Publicado por Prentice Hall Inc.
- ©2000. Bruce Eckel, MindView, Inc.
- Pearson Higher Education
- Upper Saddle River, New Jersey 07632.
- 
- [14] **Bruce Eckel.**      “*Thinking in C++, 2<sup>nd</sup>. ed. Volume 2. Standard Libraries & Advanced Topics, Revisión 3*”.
- Publicado por Prentice Hall Inc.
- © 1999. Bruce Eckel, MindView, Inc.
- Pearson Higher Education
- Upper Saddle River, New Jersey 07632.
- 
- [15] **Bruce, G. J.  
Lin, F. J.  
Galambos, T. V.**      “*Diseño Básico de Estructuras de acero*”.
- Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. México, 1988.
- ISBN 968-880-123-2.
- 
- [16] **CivilFem.**      “*CivilFem-Civil Engineering. Workbook*”.
- Ingeciber S.A. 2001.

- 
- [17] **Cudós Samblancat, V.  
Quintero Moreno, F.**      *“Estructuras Metálicas. La Pieza Aislada,  
Flexión, Torsión”*.  
  
Universidad Nacional de Educación a Distancia.  
Fundación Escuela de la Edificación. IMPRESA,  
Madrid, 1988.  
  
ISBN 84-86957-07-9.
- 
- [18] **Darwin, C.**      *“The Origin of species by Means of Natural  
Selection or the Preservation of Favored Races  
in the Struggle for life”*.  
  
The Book League of America, 1929.  
  
Originalmente publicado en 1859.
- 
- [19] **Davis, L.**      *“Handbook of Genetic Algorithms”*.  
  
Van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- 
- [20] **Heredia, R.**      *“Apuntes de Construcciones Metálicas”*.  
  
Volumen I, II, II.  
  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
Industriales de Madrid, 1975.
- 
- [21] **Holland, J. H.**      *“Adaptation in Natural and Artificial Systems”*.  
  
University of Michigan, Ann Arbor, 1975.
- 
- [22] **Holland, J. H.**      *“Adaptation in Natural and Artificial Systems.  
An Introductory Analysis with Applications to  
Biology, Control and Artificial Intelligence”*.  
  
MIT Press, 1992.
- 
- [23] **ITEA.**      *“Guía de diseño para edificios con estructura de  
acero”*. 1998.
-

- 
- [24] **Larburu Arrizabalaga, N.** *“Estructuras Metálicas de Acero. Cálculos fundamentales y Tablas Auxiliares”*.  
Paraninfo, 1983.  
ISBN 84-283-1283-4.
- 
- [25] **Leinecker, R. C. Archer, T.** *“La Biblia de Microsoft. Visual C++ 6.”*  
Anaya Multimedia, S. A. 1999.  
ISBN 84-415-0842-9.
- 
- [26] **Mahfouz, S. Y.** *“Stability of Steel Structure Frameworks”*.  
M. Sc. Thesis. Military Technical College, Cairo, Egypt, 1993.
- 
- [27] **Mahfouz, S. Y. Toropov, U. U. Wetsbrook, R. K.** *“Improvementes in the performance of a genetic algorithm: application to steelwork optimum design”*.  
Proceedings of 7<sup>th</sup> AIAA/USAF/NASA/ISSMO. Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, 1998.  
Pag. 2037-2045.
- 
- [28] **Mahfouz, S. Y. Toropov, U. U. Westbrook, R. K.** *“Modification, tuning and testing of a GA for structural optimization problems”*.  
Proceeding of 1<sup>st</sup> AMSO UK/ISSMO. Conference on Engineering Design Optimization, 1999.  
Toropov, U. (ed.).  
Pag. 271-278.

- 
- [29] **Mahfouz, S. Y.** *“Design Optimization of Structural Steelwork. Design Optimization of steel frame structures according to the British codes of practice using a genetic algorithm”*.  
Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Bradford, UK, 1999.
- 
- [30] **Menéndez Fernández, C.  
Bello García, A.  
Ortega Fernández, F.  
González Rodríguez, J.** *“Condition monitoring of hot rolling mill pre-sets using neural networks and statistical techniques”*.  
Trends in system analysis and control. Methods & Applications, 1998  
Pag 251-260.
- 
- [31] **Menéndez Fernández, C.  
Bello García, A.  
Ortega Fernández, F.  
Vallina Del Rosal, V.** *“Intelligent prediction of input gas temperature in a power plant”*.  
EUFIT 98.
- 
- [32] **Norma Básica NBE EA-95** *“Estructuras de Acero en Edificación. Norma Básica de la Edificación NBE EA-95”*.  
Madrid Vicente, Ediciones, 1996.  
ISBN 84-87440-86-X.
- 
- [33] **Papadrakakis, M.  
Tsompanakis, Y.  
Hilton, E.  
Siens, J.** *“Advanced Solution methods in topology optimization and shape sensitivity analysis”*.  
Engineering Computations, Vol. 13. Nº 5.  
Pag 57-90.  
© MCB University Press, 0264-4401, 1996.

- 
- [34] **Papadrakakis, M.  
Lagaros, N. D.  
Thierauf, G.  
Cai, J.**      *“Advanced Solution Methods in Structural Optimization Based on Evolution Strategies”*.  
Engineering Computations Journal, 15, 1998.  
Pag. 12-34.
- 
- [35] **Papadrakakis, M.  
Lagaros, N. D.  
Tsompanakis, Y.**      *“Structural optimization using Evolution Strategies and Neural Networks”*.  
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 156, 1998.  
Pag 309-333.
- 
- [36] **Papadrakakis, M.  
Lagaros, N. D.  
Tsompanakis, Y.**      *“Computationally efficient techniques for structural optimization”*.  
Computational Mechanics New Trends and Applications.  
E. Oñate y S.R. Idelsohn (ed.).  
© CIMNE, Barcelona, España, 1998.
- 
- [37] **Papadrakakis, M.  
Tsompanakis, Y.  
Lagatos, N.D.  
Hinton, E.  
Sienz, J.  
Thierauf, G.  
Cai, J.**      *“Innovative Computational Methods for Structural Optimization”*.  
1999.
- 
- [38] **Papadrakakis, M.  
Lagaros, N.D.  
Plevris, V.**      *“Optimum design of 3D Structures under static and dynamic loading”*.  
Computational Methods for Shell and Spatial Structures. IASS-IACM 2000.  
M. Papadrakakis, A. Samartin and E. Onate (ed.).  
© ISASR-NTUA, Atenas, Grecia, 2000.

- 
- [39] **Pozo Coronado, S.** “Curso de C++”.  
<http://c.conclase.net>. 2001.
- 
- [40] **Prendes Gero, M. B.** “Diseño y optimización de naves industriales”.  
**González Nicieza, C.**  
**Álvarez Fernández, M. I.** XV Congreso Nacional de Ingeniería de  
**Díaz Aguado, M. B.** Proyectos.  
León, 1999.
- 
- [41] **Prendes Gero, M. B.** “Diseño de secciones metálicas de pared  
**Menéndez Díaz, A.** delgada”.  
**Álvarez Vigil, A. E.** 4º Simposio Internacional de Estructuras,  
Geotecnia y Materiales de Construcción.  
Santa Clara (Cuba), 2000.
- 
- [42] **Prendes Gero, M. B.** “Entorno gráfico para la optimización de  
**Bello García, A.** estructuras metálicas en base a algoritmos  
**Del Coz Díaz, J. J.** genéticos”.  
XIV Congreso Internacional de Ingeniería  
Gráfica.  
Santander, 2002.
- 
- [43] **Prensa Técnica** “Cómo programar en Visual C++”.  
Biblioteca Técnica de programación.  
Prensa técnica. Septiembre 2000.  
ISBN 84-95398-32-X
- 
- [44] **Prontuario de** “Manuales sobre la Construcción con Acero. 2ª  
**ENSIDESA.** Edición”.  
Publicaciones ENSIDESA.  
ISBN 84-87405-06-1
-

- 
- [45] **Rivilla Lozano, F. J.**                    “*Programación con Visual C++*”.  
Level Data, S. A. 1997.
- 
- [46] **Rodríguez Borlado, R.**                “*Manual de Estructuras Metálicas de Edificios Urbanos*”.  
CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Madrid, 1997.  
ISBN 84-7790-280-1.
- 
- [47] **Rodríguez Martín, L. F.**                “*Curso de Estructuras Metálicas*”.  
Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1984.  
ISBN 84-85572-18-1.
- 
- [48] **Sphar, C.**                                 “*Aprenda Microsoft Visual C++ 6.0 Ya*”.  
McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U. 2001.  
ISBN 84-481-2421-9.
- 
- [49] **Toropov, V. V.**                             “*Application of genetic programming to the choice of a structure of multipoint approximations*”.  
ISSMO/NASA First Internet Conference on Approximations and Fast Reanalysis in Engineering Optimization.  
CR-ROM por ISSMO/NASA/AIAA, 1998.
- 
- [50] **Toropov, U. U.**                             “*Discrete Design Optimization of 3-Dimensional Steel Structures using a Genetic Algorithm*”.  
**Mahfouz, S. Y.**  
**Westbrook, R. K.**  
3<sup>rd</sup> World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Buffalo, NY, USA, 1999.
-

- 
- [51] **Toropov, V. V.**  
**van Keulen, F.**  
**Markine, V. L.**  
**Álvarez, L. F.**      *“Multipoint approximations based on response surface fitting: A summary of recent developments”*.  
  
Proceedings First ASMO UK/ISSMO  
Conference on Engineering Design  
Optimization, Ilkley, UK, 1999.  
  
Toropov, V.V. (ed.).  
  
Pag 371-380.
- 
- [52] **Tsompanakis, Y.**  
**Papadrakakis, M.**      *“Robust and efficient methods for reliability-based structural optimization”*.  
  
Computational Methods for Shell and Spatial  
Structures. IASS-IACM 2000.  
  
M. Papadrakakis, A. Samartin y E. Onate (ed.).  
  
© ISASR-NTUA, Atenas, Grecia, 2000.
- 
- [53] **Urrutia, G.**      *“Curso de C”*.  
  
© Gorka Urrutia, 1999-2001.  
  
cursoc@elrincondelc.com  
  
www.elrincondelc.com
- 
- [54] **Viejo, J. A.**      *“Cálculo de Elementos Metálicos”*.

---

---

# **ANEXO I**

---

---

**PROGRAMA ESCAL3D.**

## **I.1 Introducción.**

El predimensionamiento de una estructura consiste, esencialmente, en realizar un cálculo aproximado de la misma que permita estimar las secciones que son necesarias en cada uno de los elementos que la componen para que éstos resistan las solicitaciones a las que están sometidos.

En las estructuras de barras isostáticas es posible determinar las leyes de esfuerzos en cada barra a partir de las ecuaciones de equilibrio, por lo que la geometría de las secciones no influye en el cálculo y puede elegirse una vez concluido éste, a la luz de los esfuerzos máximos que se presentan, para que las tensiones sean inferiores a la resistencia del material utilizado.

Sin embargo, en las estructuras hiperestáticas no es posible seguir este mismo esquema de cálculo, ya que para resolverlas es preciso utilizar ecuaciones de comportamiento de las barras, en las que influyen las características de sus secciones. Es decir, para poder calcular los esfuerzos de la estructura que determinan la sección necesaria en cada barra, es preciso conocer ésta de antemano. La única forma de solventar esta paradoja es suponer inicialmente una determinada geometría en las secciones para, después, comprobar si las tensiones que se presentan son aceptables o no.

En estructuras complejas, con gran variedad de secciones diferentes, es muy probable que muchos de los valores adelantados no sean apropiados, bien por excesivos o bien por escasos, salvo que se elijan éstos con un criterio adecuado, basado en una estimación de los valores que van a alcanzar los esfuerzos en las distintas partes de la estructura. Para obtener esta estimación inicial de los esfuerzos es necesario realizar un predimensionamiento, o cálculo aproximado, de la estructura.

Debe quedar claro que los resultados del predimensionamiento no son definitivos, sino que tan sólo indican valores iniciales de área e inercia en las secciones que permiten realizar un cálculo en flexibilidad o rigidez de la estructura partiendo de unos resultados próximos a los reales.

Este predimensionamiento se ha realizado mediante el programa *ESCAL3D* diseñado conjuntamente por las Áreas de Ingeniería de la Construcción, Proyectos de Ingeniería y Expresión Gráfica de la Universidad de Oviedo.

## I.2 Generalidades.

Las características principales del programa son:

- Múltiples posibilidades en la modelización y generación de la estructura: entrada directa mediante ratón o por la creación de un fichero de entrada mediante cualquier editor de textos (fig. I.1) u hoja de cálculo o por indicación de la posición absoluta o relativa y en coordenadas cartesianas, polares o esféricas (fig. I.2).

```

Nodos 7
Nodo-000000-nodM 0.000000 0.000000 0.000000
Nodo-000001-nodM 500.000000 0.000000 0.000000
Nodo-000002-nodM 1200.000000 0.000000 0.000000
Nodo-000003-nodM 1800.000000 0.000000 0.000000
Nodo-000004-nodM 500.000000 592.820007 0.000000
Nodo-000005-nodM 1200.000000 346.410004 0.000000
Nodo-000006-nodM 0.000000 1039.229900 0.000000

Apoyos 2
Nodo-000000-nodM 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -100000.000000 0.000000
Nodo-000006-nodM 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -100000.000000 0.000000

Vigas 10
Viga-000000-agiV  Nodo-000000-nodM  Nodo-000001-nodM  HEA100  30.000000  A-42  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
Viga-000001-agiV  Nodo-000001-nodM  Nodo-000002-nodM  HEA100  30.000000  A-42  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
Viga-000002-agiV  Nodo-000002-nodM  Nodo-000003-nodM  HEA100  30.000000  A-42  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
Viga-000003-agiV  Nodo-000003-nodM  Nodo-000004-nodM  HEA120  30.000000  A-42  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
Viga-000004-agiV  Nodo-000004-nodM  Nodo-000005-nodM  IPN100  30.000000  A-42  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
Viga-000005-agiV  Nodo-000005-nodM  Nodo-000006-nodM  IPN120  30.000000  A-42  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
Viga-000006-agiV  Nodo-000006-nodM  Nodo-000005-nodM  IPN100  30.000000  A-42  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
Viga-000007-agiV  Nodo-000006-nodM  Nodo-000004-nodM  IPN100  30.000000  A-42  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
Viga-000008-agiV  Nodo-000004-nodM  Nodo-000005-nodM  IPN100  30.000000  A-42  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
Viga-000009-agiV  Nodo-000005-nodM  Nodo-000003-nodM  IPN100  30.000000  A-42  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000

Alineaciones 0

Hipotesis 2
FasePropio 1
FES0 0.000000 -1.000000 0.000000
Sobrecarga 3
Nodo-000001-nodM  HYF -40000.000000
Nodo-000002-nodM  HYF -40000.000000
Nodo-000003-nodM  HYF -40000.000000

HipDinamica 0

Combinaciones 1
combina_1 2
FasePropio 1.300000
Sobrecarga 1.500000

Estadico 1 0.000100 50 1111 valida.log
Unidades 0 0

```

fig. I.1. Fichero de entrada.

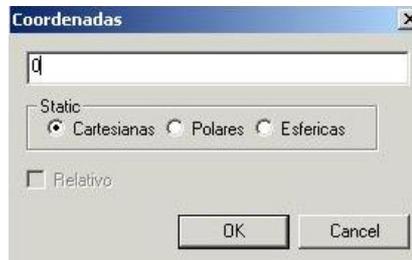


fig. I.2. Generación de la estructura por coordenadas.

- Definición de la estructura mediante *vigas* es decir, conjunto de elementos finitos unidimensionales que poseen la misma sección transversal, realizándose la asignación de propiedades, solicitaciones y conexiones sobre la viga, con el consiguiente abaratamiento en la creación de la estructura (fig. I.3).

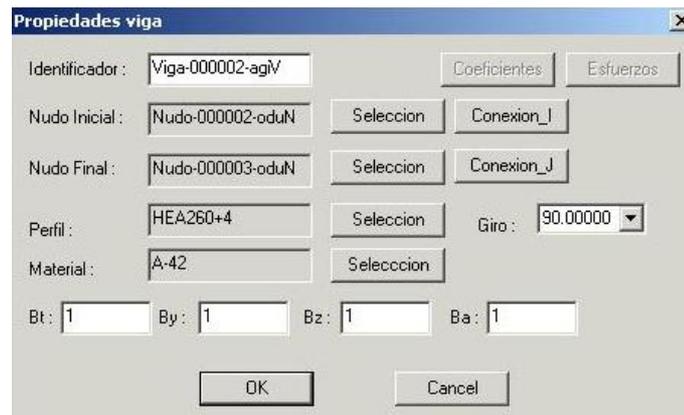


fig. I.3. Asignación de propiedades a las vigas.

- Posibilidad de vigas con diferentes conexiones en sus extremos.
- Solicitaciones debidas a todo tipo de fuerzas y momentos concentrados y distribuidos, esfuerzos térmicos, cargas volumétricas (peso propio), así como análisis dinámico mediante el método de espectro de respuesta.
- Biblioteca de perfiles laminados de catálogo (fig. I.4), con la posibilidad de actualización por parte del usuario.

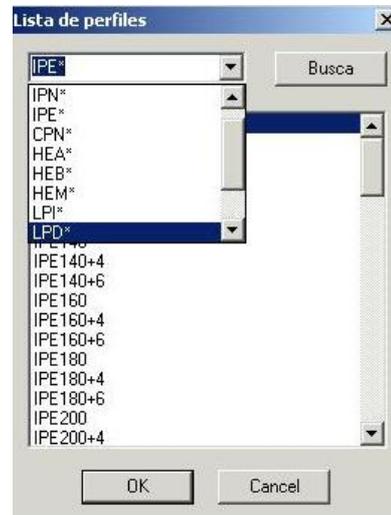


fig. I.4. Lista de perfiles.

- Generación de secciones especiales, abiertas, cerradas y con aletas mediante entorno gráfico (fig. I.15) y cálculo tanto de sus valores estáticos, como de los parámetros necesarios para el cálculo de tensiones y esfuerzos sobre la sección.
- Algoritmo para el almacenamiento y resolución del sistema de ecuaciones con optimización automática de la numeración de los nudos, y con diferentes métodos de solución.
- Teoría de primer orden: Los desplazamientos no influyen en la determinación de los esfuerzos.
- Barras del tipo viga recta, con posibilidad de deformación por cortante y alabeo, con nueve grados de libertad por nudo en el espacio (tres desplazamientos, tres giros y tres derivadas del giro debidas al alabeo).
- Visualización de la malla de elementos finitos (vigas y barras) que conforma la estructura, tanto en modo simple (líneas con indicación de las secciones) (fig. I.5), como en modo transparente (fig. I.6), o en modo sólido (fig. I.7).

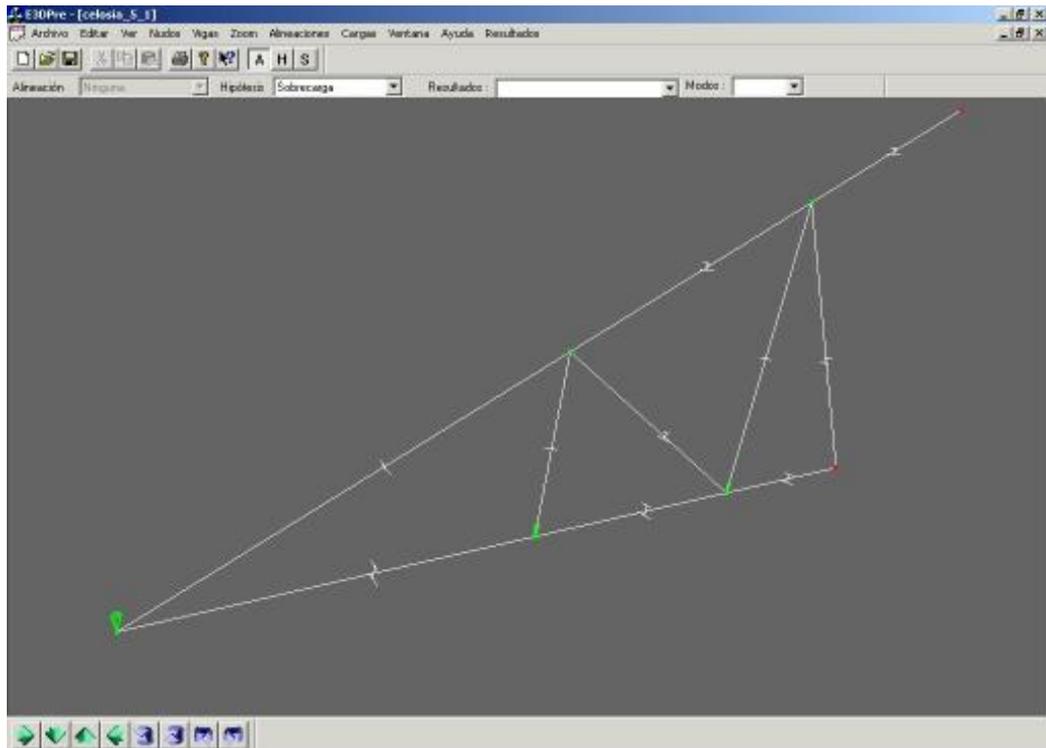


fig. I.5. Visualización de la estructura en modo alambre.

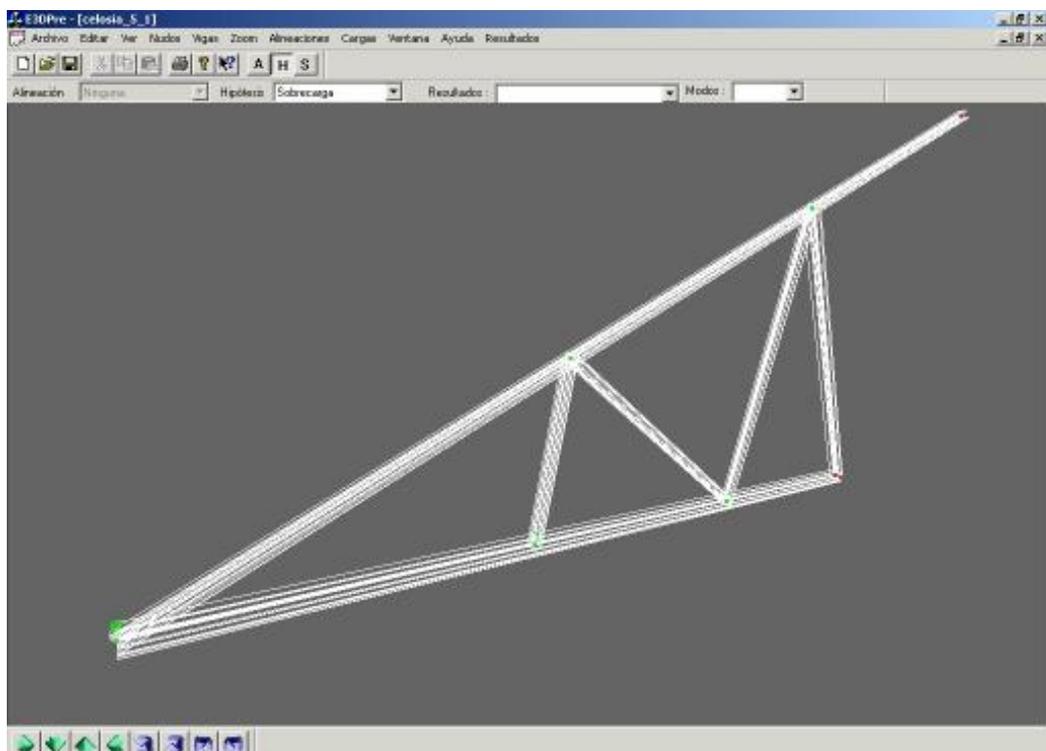


fig. I.6. Visualización de la estructura en modo transparente.

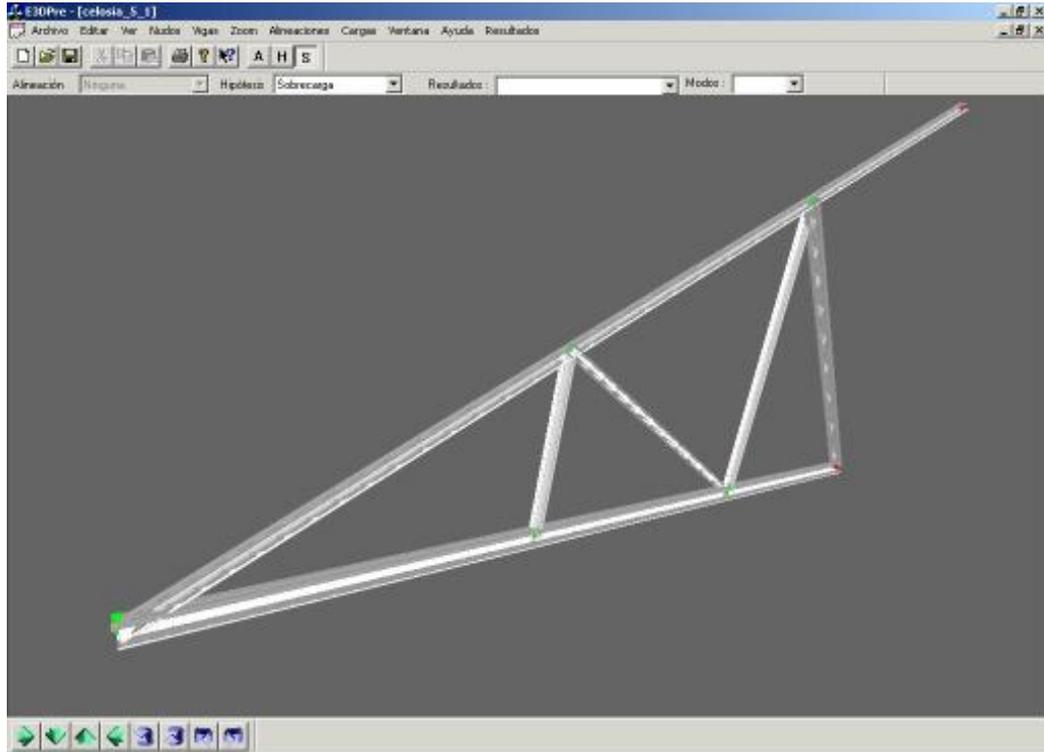


fig. I.7. Visualización de la estructura en modo sólido.

- Posibilidad de combinación de las hipótesis de carga mediante coeficientes de ponderación (fig. I.8), y generación de envolventes de esfuerzos.

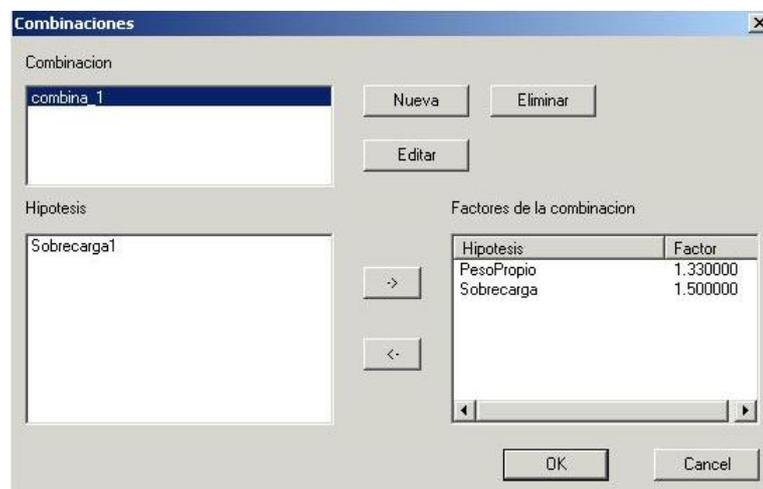


fig. I.8. Combinación de hipótesis de carga.

- Presentación de resultados de desplazamientos (fig. I.9), esfuerzos y coeficientes de seguridad (fig. I.10) para cada una de las hipótesis de carga, así como de sus combinaciones.

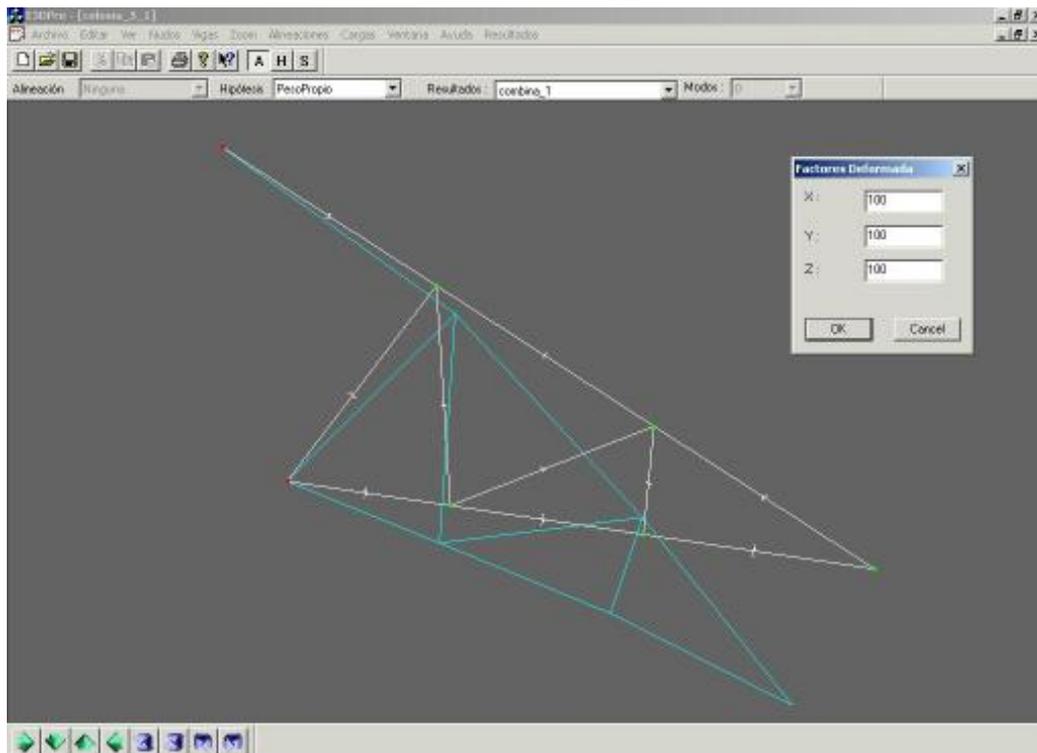


fig. I.9. Deformada para una combinación de hipótesis de carga.

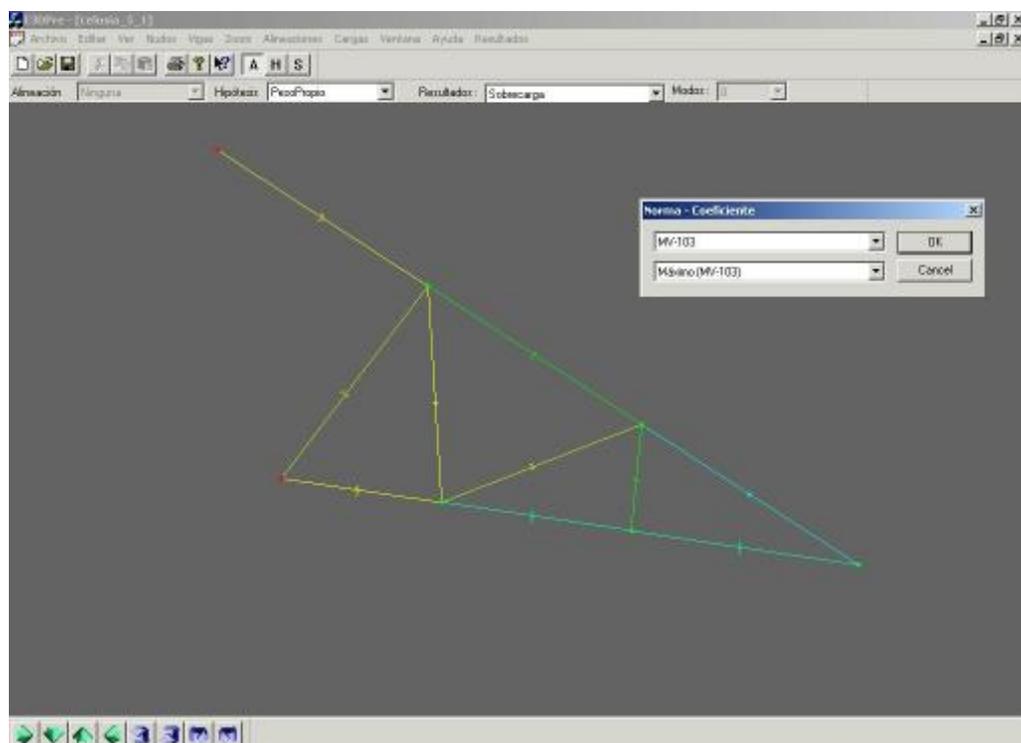


fig. I.10. Coeficiente de seguridad máximo para la norma MV-103 y la hipótesis de sobrecarga.

- Salida de desplazamientos máximos y mínimos en las combinaciones de carga, con indicación de los nudos en que acontecen.
- Análisis de esfuerzos envolventes, máximos y mínimos, con exclusión automática de hipótesis de carga no simultáneas.
- Generación de esfuerzos para análisis de conexiones.

### I.3 Descripción del programa.

El programa se ha desarrollado bajo la filosofía de los programas tradicionales de cálculo de estructuras por el método de los elementos finitos (FEM), tales como ANSYS<sup>®</sup>, ABAQUS<sup>®</sup>, COSMOS/M<sup>®</sup>, etc., en los cuales el proceso de ejecución consiste en la lectura de un fichero de entrada que contiene los datos de la estructura a analizar y en la generación de un fichero de salida que contiene los resultados del cálculo (fig. I.11).

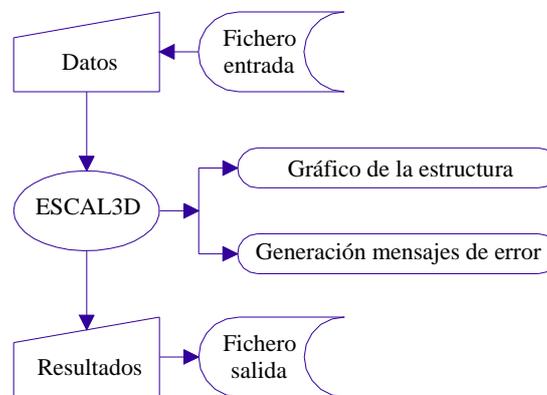


fig. I.11. Estructura del programa ESCAL3D.

El programa está formado por varios módulos (*E3DPRE*, *SECCIÓN*, *SOLVE*, *COMESC*) cuya conectividad e interactividad se refleja en la (fig. I.12).

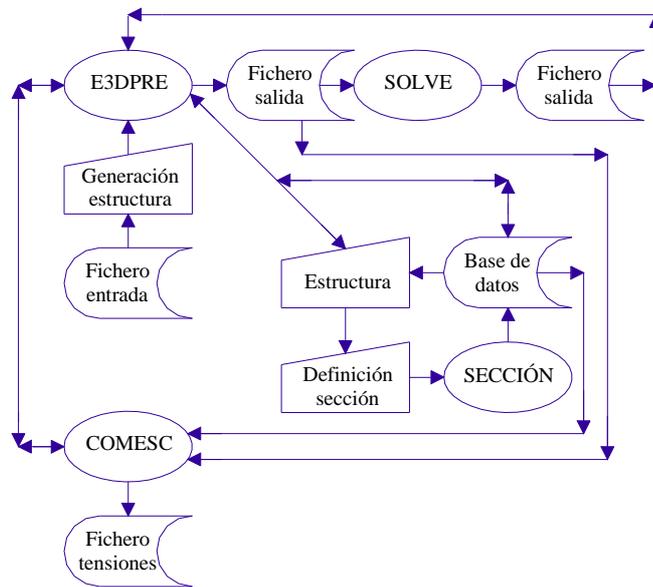


fig. I.12. Diagrama de flujo del programa ESCAL3D.

#### I.4 Módulo E3DPRE.

El módulo denominado *PREPROCESADOR* genera un fichero de datos (fig. I.13) con la descripción de la geometría, del material y de las solicitaciones (hipótesis de carga, combinaciones y envolventes) definiendo por completo la estructura que se va a calcular.

La geometría queda definida proporcionando las coordenadas de todos los nudos de la estructura, incluyendo los correspondientes a los apoyos, así como las conexiones de las barras sobre el conjunto de nudos, y las secciones de las mismas.

El material se define por su módulo elástico, su densidad y su coeficiente de dilatación, y puede ser diferente para distintos grupos de barras.

Las solicitaciones se definen mediante la indicación de las cargas que actúan sobre la estructura, en cada hipótesis de carga. Dichas cargas pueden estar aplicadas directamente sobre los nudos, o bien sobre las barras, o tratarse de cargas globales, tales como el peso propio de la estructura. Las combinaciones se introducen mediante la

aplicación de los oportunos coeficientes de mayoración a las hipótesis seleccionadas (fig. I.8).

```

TITULO Beta
COORDS 7
1 0.000000 0.000000 0.000000
2 600.000000 0.000000 0.000000
3 1200.000000 0.000000 0.000000
4 1800.000000 0.000000 0.000000
5 600.000000 692.820007 0.000000
6 1200.000000 346.410004 0.000000
7 0.000000 1039.229980 0.000000

MATERIAL 1
1 2100000.000000 0.007850 0.000012 0.300000

SECCION 5
HEA100 2.041300e+001 6.625000e+000 9.661000e+000 4.539000e+000 1.334260e+002 3.397060e+002 2.586029e+003
HEA120 2.451600e+001 8.020000e+000 1.163200e+001 5.449000e+000 2.305110e+002 5.912360e+002 6.4284153e+003
IPE100 1.074000e+001 4.121000e+000 2.261500e+001 1.625000e+000 1.213000e+001 1.709640e+002 2.405890e+002
IPE120 1.307200e+001 3.766000e+000 1.210000e+001 1.668000e+000 2.760600e+001 3.155060e+002 8.914690e+002
IPE100 1.014000e+001 3.017000e+000 9.342000e+000 1.075000e+000 1.586000e+001 1.682970e+002 3.521240e+002

MODO
1 100 100 100 100 100 100
FIN_MODO

COM.BA 10
1 1 2 HEA100 90.000000 1 1 1
2 2 3 HEA100 90.000000 1 1 1
3 3 4 HEA100 90.000000 1 1 1
4 1 5 HEA120 90.000000 1 1 1
5 2 5 IPE100 90.000000 1 1 1
6 2 6 IPE120 90.000000 1 1 1
7 3 6 IPE100 90.000000 1 1 1
8 7 5 IPE100 90.000000 1 1 1
9 5 6 IPE100 90.000000 1 1 1
10 6 4 IPE100 90.000000 1 1 1

APOYOS 2
1 1
7 2

ID_APOYOS
1 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -100000.000000 0.000000
2 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -100000.000000 0.000000
FIN_ID_APOYOS

HIPOTE 2
IIT.HIP PasaPasapio
GRAVEDAD 0.000000 -1.000000 0.000000
FESO
FIN.HIP
IIT.HIP Sabcecececece
PPY 2 -40000.000000
PPY 3 -40000.000000
PPY 4 -40000.000000
FIN.HIP

COMBIN 1
1 1.230000 2 1.500000

ESTATICO 2 0.000100 50 1111 salida.log

```

fig. I.13. Fichero de datos.

## I.5 Módulo SECCIÓN.

Este módulo consiste en un entorno gráfico (fig. I.14), que permite dibujar una sección personalizada o crear una nueva sección a partir de una ya existente, además posee plantillas con las que se puede crear rápidamente secciones predefinidas del tipo I, U, L, y tubos.

Las secciones se modelizan a partir de los nudos que definen los vértices de la sección uniendo dichos puntos con chapas rectangulares. Esta modelización simplifica, en gran medida, las rutinas de cálculo de las características estáticas de la sección, así

como los algoritmos previos a éstas y que definen los ciclos cerrados y el camino de recorrido de la sección, por otra parte, no supone ninguna limitación para la creación de todo tipo de secciones.

Las secciones predefinidas, permiten crear de una manera rápida y reduciendo la posibilidad de error los tipos de secciones más habituales. La creación de estas secciones se hace mediante cuadros de diálogo donde se muestra un dibujo esquemático de la sección, con cuadros de textos situados en las líneas de cota de las dimensiones necesarias para definir la sección.

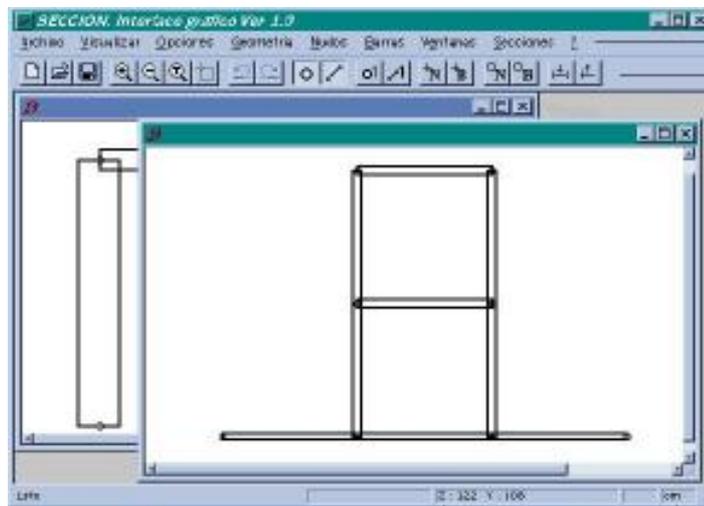


fig. I.14. Interface gráfica del módulo SECCIÓN.

## I.6 Módulo SOLVE.

El módulo SOLVE lee el fichero generado por el PREPROCESADOR, y proporciona un fichero con los datos de definición de la estructura, y los resultados en desplazamientos y esfuerzos para cada una de las hipótesis de carga y las combinaciones introducidas (fig. I.15).

Para la generación del fichero de salida se analizan tanto estática como dinámicamente las estructuras espaciales constituidas por barras rectas y solicitadas por los esfuerzos  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  y  $B_t$  (fig. I.16).

```

Resultados
==
==
Inicio del analisis del fichero C:\seccion\celoria_E_1.sai
11:13:02, Domingo 21 de Enero, 19101.

Fichero leído correctamente. Sin errores.

Validación de estructura hecha. Sin errores.

@@@ RESULTADOS DE LA RESOLUCION DEL SISTEMA: CALCULO ESTÁTICO. @@@

HIPOTESIS: 1: El metodo ES convergente.
El sistema ha sido resuelto mediante el metodo siguiente:
Gradiente Bicoujugado Estabilizado Precondicionado.

CARACTERISTICAS DEL METODO:
ERRORES PERMITIDO (en matricia 11 de la diferencia f-Hu): 9.99999747979716256e-08.
NUMERO DE ITERACIONES REALIZADO (algoritmo iterativo): 75.
4
  
```

fig. I.15. Pantalla de resultados.

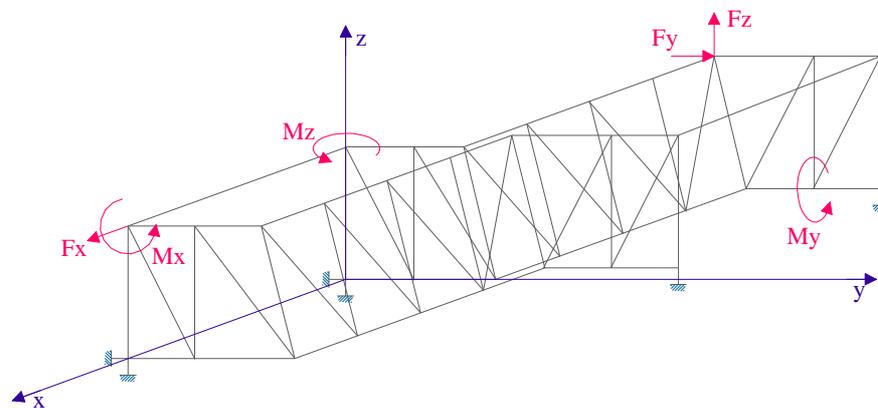


fig. I.16. Acciones positivas sobre la estructura modelizada.

### I.6.1 Análisis estático.

En el análisis estático (fig. I.17), se utiliza el método directo de la rigidez, planteando la ecuación [I.1].

$$A \cdot x = b \Leftrightarrow x = A^{-1} \cdot b \quad [I.1]$$

Donde:

$A$  es la matriz de rigidez función de la geometría del modelo.

$b$  es el vector de sollicitación del modelo.

$x$  es el vector de desplazamientos de los nudos.

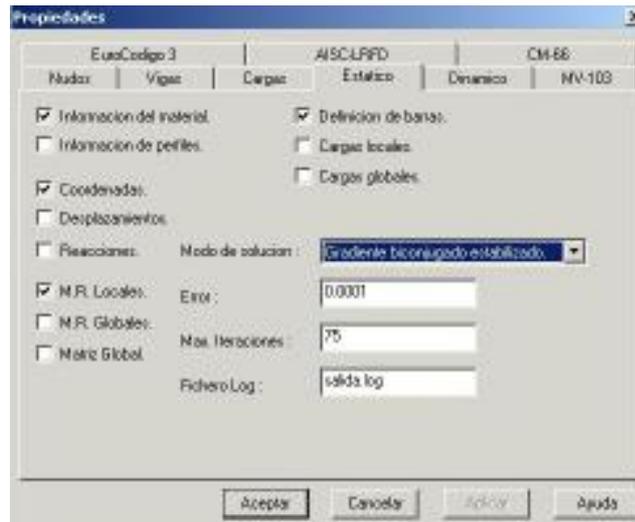


fig. I.17. Definición del análisis estático.

Para que la matriz  $A$  tenga solución (exista matriz inversa), debe verificarse que el modelo estructural sea estable tanto interior como exteriormente.

La estabilidad interior se consigue teniendo en cuenta que, en cualquier nudo interior de la estructura (fig. I.18), debe confluir, al menos, una viga empotrada. De éste modo, cualquier nudo interior es capaz de soportar un momento concentrado.

La estabilidad exterior se consigue coaccionando, al menos, seis grados de libertad de la estructura.

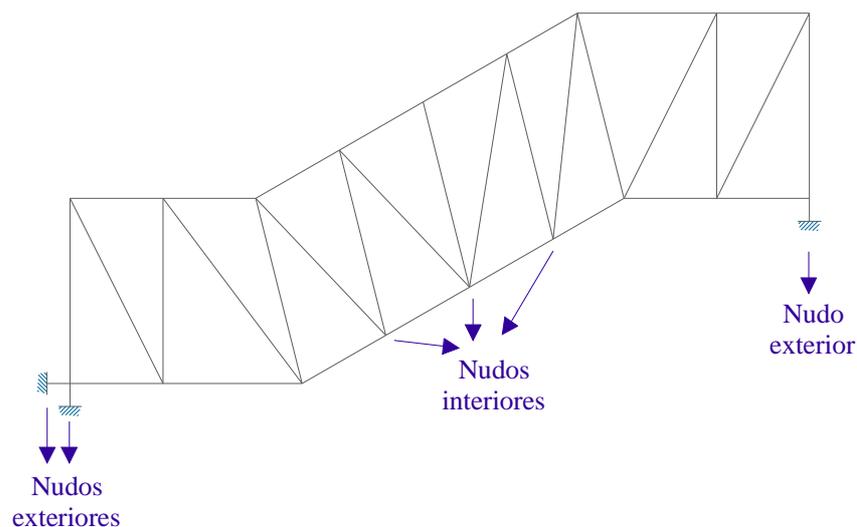


fig. I.18. Tipos de nudos en la estructura.

Para el proceso de resolución de ecuaciones se emplean varios procedimientos, todos ellos iterativos, de cara a conseguir una solución lo más exacta posible, independientemente del acondicionamiento estructural conseguido. Los procedimientos implementados son:

- Gradiente biconjugado.
- Gradiente conjugado cuadrado.
- Gradiente biconjugado estabilizado.
- Iteración de Chebyshev.
- Iteración de Richardson.
- Residuo cuasi-mínimo.

En todos ellos el sistema a resolver es el dado en la Ecuación [I.1]. Se admite que el método converge si el residuo normalizado [I.2] es menor que una tolerancia dada [I.3].

$$r = b - A \cdot x \quad [I.2]$$

$$\frac{|r|}{|b|} < tol \quad [I.3]$$

#### I.6.1.1 Gradiente biconjugado.

El método de gradiente conjugado no es apropiado para sistemas asimétricos, pues los vectores de residuos no pueden ser ortogonales en recurrencias cortas. Por ello en el método del gradiente biconjugado se reemplazan las secuencias ortogonales de residuos por dos secuencias mutuamente ortogonales.

La actualización de relaciones para los residuos se aumentan con relaciones que son similares pero basadas en  $A^T$  en lugar de  $A$ . Así pues actualizamos dos secuencias de residuos [I.4].

$$r^{(i)} = r^{(i-1)} - \alpha_i \cdot A \cdot p^{(i)} \quad \tilde{r}^{(i)} = \tilde{r}^{(i-1)} - \alpha_i \cdot A^T \cdot \tilde{p}^{(i)} \quad [I.4]$$

Y dos secuencias de direcciones de búsqueda [I.5].

$$p^{(i)} = r^{(i-1)} + \beta_{i-1} \cdot p^{(i-1)} \quad \tilde{p}^{(i)} = \tilde{r}^{(i-1)} + \beta_{i-1} \cdot \tilde{p}^{(i-1)} \quad [I.5]$$

Las relaciones [I.4] y [I.5] aseguran las relaciones bi-ortogonales [I.6].

$$\tilde{r}^{(i)T} \cdot r^{(j)} = \tilde{p}^{(i)T} \cdot A \cdot p^{(j)} = 0 \quad si \Leftrightarrow i \neq j \quad [I.6]$$

El estudio de su convergencia permite decir que para sistemas simétricos definidos positivos, el método obtiene los mismos resultados que el gradiente conjugado, pero con 0,5 veces el coste por iteración, mientras que para matrices asimétricas, en las fases del proceso donde hay reducción significativa de la norma residual, el método es comparable al método residual mínimo generalizado (en términos de número de iteraciones).

```

Compute  $r^{(0)} = b - Ax^{(0)}$  for some initial guess  $x^{(0)}$ .
Choose  $\tilde{r}^{(0)}$  (for example,  $\tilde{r}^{(0)} = r^{(0)}$ ).
for  $i = 1, 2, \dots$ 
  solve  $Mx^{(i-1)} = r^{(i-1)}$ 
  solve  $M^T \tilde{x}^{(i-1)} = \tilde{r}^{(i-1)}$ 
   $\rho_{i-1} = x^{(i-1)T} \tilde{r}^{(i-1)}$ 
  if  $\rho_{i-1} = 0$ , method fails
  if  $i = 1$ 
     $p^{(i)} = x^{(i-1)}$ 
     $\tilde{p}^{(i)} = \tilde{r}^{(i-1)}$ 
  else
     $\beta_{i-1} = \rho_{i-1} / \rho_{i-2}$ 
     $p^{(i)} = x^{(i-1)} + \beta_{i-1} p^{(i-1)}$ 
     $\tilde{p}^{(i)} = \tilde{r}^{(i-1)} + \beta_{i-1} \tilde{p}^{(i-1)}$ 
  endif
   $q^{(i)} = Ap^{(i)}$ 
   $\tilde{q}^{(i)} = A^T \tilde{p}^{(i)}$ 
   $\alpha_i = \rho_{i-1} / \tilde{p}^{(i)T} q^{(i)}$ 
   $x^{(i)} = x^{(i-1)} + \alpha_i p^{(i)}$ 
   $r^{(i)} = r^{(i-1)} - \alpha_i q^{(i)}$ 
   $\tilde{r}^{(i)} = \tilde{r}^{(i-1)} - \alpha_i \tilde{q}^{(i)}$ 
  check convergence; continue if necessary
end

```

fig. I.19. Pseudocódigo del método de gradiente biconjugado.

### 1.6.1.2 Gradiente conjugado cuadrado.

En el método del gradiente biconjugado, el vector de residuos se estima según la expresión [I.7].

$$r^{(i)} = P_i(A) \cdot r^{(0)} \quad [I.7]$$

El mismo polinomio satisface [I.8].

$$\tilde{r}^{(i)} = P_i(A^T) \cdot \tilde{r}^{(0)} \quad [I.8]$$

Esto sugiere que si  $P_i(A)$  reduce  $r^{(0)}$  a un vector mas pequeño  $r^{(i)}$ , puede ser ventajoso aplicar el operador de contracción dos veces y calcular  $P_i^2(A) \cdot r^{(0)}$  [I.9].

$$\rho_i = (\tilde{r}^{(i)}, r^{(i)}) = (P_i(A^T) \cdot \tilde{r}^{(0)}, P_i(A) \cdot r^{(0)}) = (\tilde{r}^{(0)}, P_i^2(A) \cdot r^{(0)}) \quad [I.9]$$

```

Compute  $r^{(0)} = b - Ax^{(0)}$  for some initial guess  $x^{(0)}$ 
Choose  $\tilde{r}$  (for example,  $\tilde{r} = r^{(0)}$ )
for  $i = 1, 2, \dots$ 
   $\rho_{i-1} = \tilde{r}^T r^{(i-1)}$ 
  if  $\rho_{i-1} = 0$  method fails
  if  $i = 1$ 
     $u^{(1)} = r^{(0)}$ 
     $p^{(1)} = u^{(1)}$ 
  else
     $\beta_{i-1} = \rho_{i-1} / \rho_{i-2}$ 
     $u^{(i)} = r^{(i-1)} + \beta_{i-1} u^{(i-1)}$ 
     $p^{(i)} = u^{(i)} + \beta_{i-1} (q^{(i-1)} + \beta_{i-1} p^{(i-1)})$ 
  endif
  solve  $M\hat{\beta} = p^{(i)}$ 
   $\hat{\beta} = A\hat{\beta}$ 
   $\alpha_i = \rho_{i-1} / \tilde{r}^T \hat{\beta}$ 
   $q^{(i)} = u^{(i)} - \alpha_i \hat{\beta}$ 
  solve  $M\hat{u} = u^{(i)} + q^{(i)}$ 
   $x^{(i)} = x^{(i-1)} + \alpha_i \hat{u}$ 
   $\hat{q} = A\hat{u}$ 
   $r^{(i)} = r^{(i-1)} - \alpha_i \hat{q}$ 
  check convergence; continue if necessary
end

```

fig. I.20. Pseudocódigo del método de gradiente conjugado cuadrado.

### 1.6.1.3 Gradiente biconjugado estabilizado.

El método de gradiente biconjugado estabilizado fue desarrollado para evitar la convergencia irregular del método del gradiente conjugado cuadrado, sustituyendo el

cálculo de la secuencia  $i \rightarrow P_i^2(A) \cdot r^{(0)}$  por  $i \rightarrow Q_i(A) \cdot P_i(A) \cdot r^{(0)}$  en la cual  $Q_i$  es el polinomio de  $i$ -ésimo grado que describe una actualización polinomial del paso de descenso.

La convergencia del gradiente biconjugado estabilizado es similar a la del gradiente conjugado cuadrado pero mientras en éste el operador de contracción se aplica dos veces, en el primero se realiza el producto del gradiente biconjugado aplicando repetidamente el método residual mínimo generalizado.

```

Compute  $r^{(0)} = b - Ax^{(0)}$  for some initial guess  $x^{(0)}$ 
Choose  $\bar{r}$  (for example,  $\bar{r} = r^{(0)}$ )
for  $i = 1, 2, \dots$ 
   $\rho_{i-1} = \bar{r}^T r^{(i-1)}$ 
  if  $\rho_{i-1} = 0$  method fails
  if  $i = 1$ 
     $p^{(i)} = r^{(i-1)}$ 
  else
     $\beta_{i-1} = (\rho_{i-1} / \rho_{i-2}) (\alpha_{i-1} / \omega_{i-1})$ 
     $p^{(i)} = r^{(i-1)} + \beta_{i-1} (p^{(i-1)} - \omega_{i-1} r^{(i-1)})$ 
  endif
  solve  $M\hat{\beta} = p^{(i)}$ 
   $v^{(i)} = A\hat{\beta}$ 
   $\alpha_i = \rho_{i-1} / \bar{r}^T v^{(i)}$ 
   $s = r^{(i-1)} - \alpha_i v^{(i)}$ 
  check norm of  $s$ ; if small enough: set  $x^{(i)} = x^{(i-1)} + \alpha_i \hat{\beta}$  and stop
  solve  $M\hat{a} = s$ 
   $t = A\hat{a}$ 
   $\omega_i = \hat{a}^T s / \hat{a}^T t$ 
   $x^{(i)} = x^{(i-1)} + \alpha_i \hat{\beta} + \omega_i \hat{a}$ 
   $r^{(i)} = s - \omega_i t$ 
  check convergence; continue if necessary
  for continuation it is necessary that  $\omega_i \neq 0$ 
end

```

fig. I.21. Pseudocódigo del método de gradiente biconjugado estabilizado.

#### 1.6.1.4 Iteración de Chebyshev.

El método de Chebyshev evita el cálculo de productos internos que en otros métodos no-estacionarios es imprescindible. Para algunas arquitecturas de memoria distribuidas, estos productos constituyen un cuello de botella en lo que a eficiencia se refiere. El precio pagado por evitar estos productos internos es que el método requiere conocer datos del espectro de la matriz  $A$ .

Mientras que la iteración de Chebyshev resulta apropiada para algunos sistemas lineales asimétricos, en los sistemas simétricos presenta la misma cota superior que para el método del gradiente conjugado pero si no se estiman bien las aproximaciones de los autovalores mínimo y máximo, se ralentiza la convergencia, pudiendo divergir.

```

Compute  $r^{(0)} = b - Ax^{(0)}$  for some initial guess  $x^{(0)}$ .
 $d = (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})/2$ ,  $c = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/2$ .
for  $i = 1, 2, \dots$ 
  solve  $Mz^{(i-1)} = r^{(i)}$ .
  if  $i = 1$ 
     $p^{(1)} = z^{(0)}$ 
     $\alpha_1 = 2/d$ 
  else
     $\beta_{i-1} = \alpha_{i-1}(c/2)^2$ 
     $\alpha_i = 1/(d - \beta_{i-1})$ 
     $p^{(i)} = z^{(i-1)} + \beta_{i-1}p^{(i-1)}$ .
  endif
   $x^{(i)} = x^{(i-1)} + \alpha_i p^{(i)}$ .
   $r^{(i)} = b - Ax^{(i)}$  ( $= r^{(i-1)} - \alpha_i Ap^{(i)}$ ).
  check convergence; continue if necessary
end

```

fig. I.22. Pseudocódigo de la iteración de Chebyshev.

### 1.6.1.5 Iteración de Richardson.

La iteración más simple empieza con la siguiente expresión [I.10].

$$H_{Rich}^{-1} = I \quad [I.10]$$

La llamada iteración de Richardson reducida a incrementos completos, puede ser expresada como se refleja en la ecuación [I.11].

$$x_{k+1} = x_k + H(b - A \cdot x_k) = x_k + H_{Rich}(H \cdot b - H \cdot A \cdot x_k) \quad [I.11]$$

Aplicada al conjunto de ecuaciones algebraicamente equivalentes con  $H$  conocida se obtiene la ecuación [I.12].

$$H \cdot A \cdot x_k = H \cdot b \quad [I.12]$$

Dado que con una adecuada selección de  $H$  la matriz del sistema posee un número de condiciones menor, se suele llamar a  $H$  *matriz preconditionadora* y al proceso de resolución *precondicionado*.

### 1.6.1.6 Método de residuo casi-mínimo.

El método del gradiente biconjugado muestra a menudo una convergencia irregular, esto es debido a que la descomposición implícita del sistema tri-diagonal

reducido no siempre es posible. Para evitar esto se recurre al método del residuo casi-mínimo. La idea principal es resolver el sistema tri-diagonal reducido por mínimos cuadrados, similar a la aproximación realizada en el método residual mínimo generalizado. Como las bases para construir el sistema para el subespacio de Krylov es bi-ortogonal, la solución obtenida se ve como una solución de residuos casi-mínimos, que explican el nombre del método.

Su convergencia es mucho más plana que en el método del gradiente biconjugado, ya que mientras en las fases de iteración del proceso el gradiente biconjugado realiza significantes progresos, el método de residuo casi-mínimo apenas varía sus aproximaciones, pero el uso de técnicas que evitan rupturas de control en el proceso de Lanczos, lo hacen más robusto que el método del gradiente biconjugado.

```

Compute  $r^{(0)} = b - Ax^{(0)}$  for some initial guess  $x^{(0)}$ 
 $\tilde{v}^{(1)} = r^{(0)}$ ; solve  $M_1 y = \tilde{v}^{(1)}$ ;  $\rho_1 = \|y\|_2$ 
Choose  $\tilde{w}^{(1)}$ , for example  $\tilde{w}^{(1)} = r^{(0)}$ 
solve  $M_2^T z = \tilde{w}^{(1)}$ ;  $\xi_1 = \|z\|_2$ 
 $\gamma_0 = 1$ ;  $\eta_0 = -1$ 
for  $i = 1, 2, \dots$ 
  if  $\rho_i = 0$  or  $\xi_i = 0$  method fails
   $\tilde{v}^{(i)} = \tilde{v}^{(i-1)} / \rho_i$ ;  $y = y / \rho_i$ 
   $\tilde{w}^{(i)} = \tilde{w}^{(i-1)} / \xi_i$ ;  $z = z / \xi_i$ 
   $\delta_i = z^T y$ ; if  $\delta_i = 0$  method fails
  solve  $M_2 y = y$ 
  solve  $M_1^T \tilde{x} = z$ 
  if  $i = 1$ 
     $p^{(1)} = \tilde{y}$ ;  $q^{(1)} = \tilde{x}$ 
  else
     $p^{(i)} = \tilde{y} - (\xi_i \delta_i / \epsilon_{i-1}) p^{(i-1)}$ 
     $q^{(i)} = \tilde{x} - (\rho_i \delta_i / \epsilon_{i-1}) q^{(i-1)}$ 
  endif
   $\tilde{p} = A p^{(i)}$ 
   $\epsilon_i = q^{(i)T} \tilde{p}$ ; if  $\epsilon_i = 0$  method fails
   $\beta_i = \epsilon_i / \delta_i$ ; if  $\beta_i = 0$  method fails
   $\tilde{v}^{(i+1)} = \tilde{p} - \beta_i \tilde{v}^{(i)}$ 
  solve  $M_1 y = \tilde{v}^{(i+1)}$ 
   $\rho_{i+1} = \|y\|_2$ 
   $\tilde{w}^{(i+1)} = A^T q^{(i)} - \beta_i \tilde{w}^{(i)}$ 
  solve  $M_2^T z = \tilde{w}^{(i+1)}$ 
   $\xi_{i+1} = \|z\|_2$ 
   $\theta_i = \rho_{i+1} / (\gamma_{i-1} |\beta_i|)$ ;  $\gamma_i = 1 / \sqrt{1 + \theta_i^2}$ ; if  $\gamma_i = 0$  method fails
   $\eta_i = -\eta_{i-1} \rho_i \gamma_i^2 / (\beta_i \gamma_{i-1}^2)$ 
  if  $i = 1$ 
     $d^{(1)} = \eta_1 p^{(1)}$ ;  $d^{(1)} = \eta_1 \tilde{p}$ 
  else
     $d^{(i)} = \eta_i p^{(i)} + (\theta_{i-1} \gamma_{i-1})^2 d^{(i-1)}$ 
     $d^{(i)} = \eta_i \tilde{p} + (\theta_{i-1} \gamma_{i-1})^2 d^{(i-1)}$ 
  endif
   $x^{(i)} = x^{(i-1)} + d^{(i)}$ 
   $r^{(i)} = r^{(i-1)} - d^{(i)}$ 
  check convergence; continue if necessary
end

```

fig. I.23. Pseudocódigo del método de residuo casi-mínimo.

## I.6.2 Análisis dinámico.

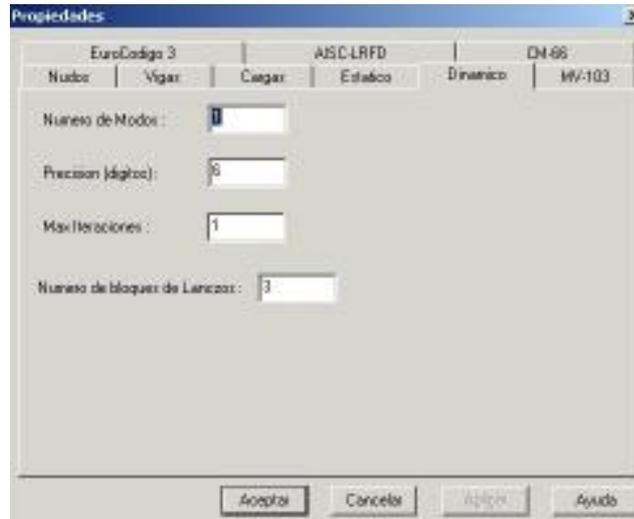


fig. I.24. Definición del análisis dinámico.

El análisis dinámico de la estructura se realiza mediante el método de *espectro de respuesta*.

Este tipo de análisis se utiliza para determinar los desplazamientos y las tensiones en modelos estructurales aplicando un espectro conocido (conjunto de valores función de la frecuencia) sobre los resultados de un análisis modal previo.

Para ello se determinan las frecuencias propias de oscilación de la estructura para los primeros modos propios, teniendo en cuenta las masas indicadas por el usuario convertidas en hipótesis de carga para facilitar la entrada de datos.

En definitiva, se trata de encontrar solución al sistema [I.13].

$$A \cdot \phi = \lambda \cdot M \cdot \phi \quad [\text{I.13}]$$

Donde  $\phi$  y  $\lambda$  son respectivamente, los vectores de los modos propios y de los cuadrados de frecuencias naturales de vibración ( $w$ ) y  $M$  es la matriz de masa del sistema.

El método se utiliza como sustituto de un análisis en el tiempo, en el que se describe el comportamiento de la estructura conforme se aplica la fuerza dinámica o

excitación. Los resultados que se obtienen son los máximos o combinaciones de ellos, de modo que se puede determinar, en un solo paso, el comportamiento estructural más desfavorable en terremotos, cargas dinámicas de viento, vibraciones de máquinas y motores, olas oceánicas, etc.

Dependiendo de las combinaciones citadas, los resultados pueden diferir significativamente. Las investigaciones y los estudios realizados hasta la fecha, así como las normas y códigos de diseño más avanzados apuntan hacia dos tipos:

- Algoritmo CQC (*combinación cuadrática completa*).
- Algoritmo SRSS (*raíz cuadrada de la suma de cuadrados*).

El primero se recomienda en estructuras con fuertes diferencias de simetría en sus dos planos perpendiculares, mientras que el segundo se emplea en estructuras de edificación simétricas.

### 1.6.2.1 Combinación Cuadrática Completa

La técnica de combinación cuadrática considera los efectos de amortiguamiento en combinación con los modos de respuesta [I.14].

$$u_{max} = \sqrt{\sum_{i=1}^{nf} \sum_{j=1}^{nf} u_{max}^i u_{max}^j \rho_{ij}} \quad [I.14]$$

Donde  $u$  es el vector de desplazamientos modales [I.15] y  $\rho_{ij}$  es el coeficiente de correlación de modos, función del factor de aceleración ( $\xi$ ) y del cociente entre frecuencias naturales ( $r$ ) [I.16].

$$u = \phi \cos wt \quad [I.15]$$

$$\rho_{ij} = \frac{8\xi^2(1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\xi^2 r(1+r)^2} \quad r = \frac{w_j}{w_i} \quad [I.16]$$

### 1.6.2.2 Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados

Es una aproximación más racional donde las respuestas modales se suman utilizando la raíz cuadrada de la suma de sus cuadrados [I.17].

$$u_{max} = \sqrt{\sum_{i=1}^{nf} \sum_{j=1}^{nf} u_{max}^i u_{max}^j} \quad [I.17]$$

## I.7 Módulo COMESC.

La aplicación COMESC, se encarga de la comprobación de las barras que forman las vigas de las estructuras espaciales, calculando unos coeficientes para cada tipo de comprobación tensional o de inestabilidad, siguiendo las indicaciones de distintas normas nacionales e internacionales.

### I.7.1 Comprobación de los estados tensionales.

La comprobación de los estados tensionales se realiza en los puntos inicial, final e intermedio de cada segmento rectangular que forma la sección de cada viga.

#### Cálculo de la tensión axial.

El cálculo de la tensión axial ( $\sigma$ ) se realiza según la expresión [I.18].

$$\sigma = \frac{N}{A_s} + \frac{1}{D} \cdot [M_y \cdot (-z \cdot I_z + y \cdot I_{yz}) - M_z \cdot (y \cdot I_y - z \cdot I_{yz})] + \frac{B_t \cdot \omega_n}{I_\omega} \quad [I.18]$$

Donde:

- $N$  Esfuerzo axial.
- $A_s$  Área de la sección.
- $D$  Constante de Inercia.
- $M_y$  Momento flector según el eje y.
- $M_z$  Momento flector según el eje z.
- $z$  Coordenada z del punto donde se realiza la comprobación.

- $y$     Coordenada y del punto donde se realiza la comprobación.  
 $I_z$     Momento de inercia según el eje z.  
 $I_y$     Momento de inercia según el eje y.  
 $I_{yz}$     Producto de inercia.  
 $B_t$     Bimomento.  
 $\omega_n$     Coordenada sectorial normalizada.  
 $I_\omega$     Módulo de alabeo.

### Cálculo de la tensión cortante.

La expresión utilizada en el cálculo de la tensión cortante es [I.19]:

$$\tau = \frac{1}{D \cdot t} \cdot [Q_y \cdot (-S_y \cdot I_{yz} + S_z \cdot I_z) - Q_z \cdot (S_z \cdot I_{yz} - S_y \cdot I_z)] + \frac{M_x \cdot W_t}{I_x} \quad [\text{I.19}]$$

Donde:

- $t$     Espesor de la sección en cada punto.  
 $Q_y$     Esfuerzo cortante y.  
 $Q_z$     Esfuerzo cortante z.  
 $S_y$     Momento estático según el eje y.  
 $S_z$     Momento estático según el eje z.  
 $I_x$     Inercia según el eje x.  
 $M_x$     Momento torsor.  
 $W_t$     Modulo torsor en el punto.

### Cálculo de la tensión de Von Mises.

Para obtener la tensión de Von Mises la expresión utilizada es [I.20].

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad [\text{I.20}]$$

Se busca la tensión máxima en cada barra, señalando, que el punto de la sección con máxima tensión axial, por ejemplo, no tiene por que coincidir con el punto donde la tensión de Von Mises es mayor. Por tanto es preciso calcular las tensiones máximas

independientemente y posteriormente obtener con ellas la tensión máxima de Von Mises.

### I.7.2 Comprobación de inestabilidad según la norma MV-103.



fig. I.25. Valores máximos para los coeficientes de inestabilidad según la norma MV-103.

#### Comprobación de pandeo por compresión.

Una vez comprobado que la barra esta sometida a compresión se calcula la tensión por compresión según la expresión [I.21] cuyo valor debe ser inferior a la tensión de cálculo del acero ( $\sigma_e$ ).

$$\sigma = \frac{N}{A_s} \cdot \omega \quad [I.21]$$

En la cual  $\omega$  es el coeficiente de pandeo función de la longitud de pandeo de la viga y del radio de giro. En la ecuación [I.21]  $\omega$  toma el menor de los dos valores que tiene en función de la dirección en que se estudie dicho coeficiente.

#### Comprobación de pandeo por compresión más flexión.

Para esta comprobación es necesario únicamente calcular la tensión de comparación con la expresión [I.22].

$$\sigma = \frac{N}{A_s} \cdot \omega + 0.9 \cdot \left( \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \right) \quad [\text{I.22}]$$

Donde el coeficiente de pandeo toma el mayor valor de los dos posibles,  $W_x$  y  $W_y$  son los módulos resistentes de la sección y  $M_x$  y  $M_y$  son los momentos equivalentes cuyo valor será el máximo del momento en el centro de la viga y el dado por la expresión  $M_{eq} = \frac{M_{nudo1} + M_{nudo2}}{2}$  si los momentos extremos de la viga cambian de signo o por  $M_{eq} = \frac{M_{máximo}}{2}$  en caso contrario.

### Cálculo de pandeo por torsión.

El proceso seguido para el cálculo de esta inestabilidad es el siguiente:

Cálculo de los términos [I.23].

$$r = \sqrt{\frac{I_x + I_y}{A_s}} \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \gamma)} \quad [\text{I.23}]$$

Donde  $E$  es el módulo elástico del material,  $\gamma$  es el coeficiente de poisson y  $G$  es el módulo transversal.

Cálculo del radio de giro a torsión ( $i_\theta$ ) y de la esbeltez ( $\lambda_\theta$ ) [I.24].

$$i_\theta = \sqrt{\frac{\frac{I_\omega \cdot B_t^2}{r^2} + \frac{(L \cdot B_t)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot r^2 \cdot E}}{A_s}} \quad \lambda_\theta = \frac{L}{i_\theta} \quad [\text{I.24}]$$

Cálculo del coeficiente de pandeo a torsión ( $\omega_\theta$ ) a partir de la esbeltez.

Cálculo de la expresión de comparación [I.25].

$$\frac{N}{A_s} \cdot \omega_\theta \quad [\text{I.25}]$$

### Cálculo del pandeo por torsión más flexión.

El proceso seguido es:

Cálculo de los términos [I.26].

$$i_A = i_x^2 + i_y^2 + (Y_c^2 + Z_c^2) \qquad i_0 = i_x^2 + i_y^2 \qquad [I.26]$$

Cálculo de la esbeltez ( $\lambda_\theta$ ) según [I.27] donde  $i_\theta$  es el radio de giro [I.24].

$$\lambda_\theta = k \cdot \sqrt{\frac{i_\theta^2 + i_A^2}{2 \cdot i_\theta^2} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot i_\theta^2 \cdot i_0^2}{(i_\theta^2 + i_A^2)^2}} \right]} \qquad [I.27]$$

Cálculo del coeficiente de pandeo ( $\omega_\theta$ ) y del coeficiente por torsión según la expresión [I.25].

### I.7.3 Comprobación de inestabilidades según el Eurocódigo3.



fig. I.26. Valores máximos para los coeficientes de inestabilidad según el Eurocódigo3.

### Comprobación de pandeo por compresión.

Una vez comprobado que la viga está sometida a compresión se calcula el término [I.28].

$$\phi = \frac{1}{2} \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad [\text{I.28}]$$

Donde  $\bar{\lambda}$  es la esbeltez en el plano considerado obtenida con el radio de giro de la sección bruta y  $\alpha$  es el factor de imperfección propio de cada curva de pandeo a la que pertenezca la sección de la viga.

Conocido el término de la expresión [I.28] se comprueba la expresión [I.29].

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \quad [\text{I.29}]$$

Por último se comprueba que el esfuerzo no supere a la capacidad resistente del material [I.30].

$$N \leq \chi \cdot \frac{\sigma_e \cdot A_s}{\gamma_m} \quad [\text{I.30}]$$

### Comprobación de pandeo por compresión más flexión.

Para la comprobación de pandeo por compresión más flexión se calculan los términos [I.31].

$$M_{plx} = \zeta_x \cdot \sigma_e \quad \xi_x = 2 \cdot S_x \quad M_{ply} = \zeta_y \cdot \sigma_e \quad \xi_y = 2 \cdot S_y \quad [\text{I.31}]$$

Posteriormente se calculan los factores  $\beta$  de equivalencia que dependen las cargas de la viga para a continuación calcular los términos  $N_y$ ,  $N_z$  comprobando la condición impuesta por la siguiente expresión [I.32].

$$N_y = \bar{\lambda}_y \cdot (2 \cdot \beta_y - 4) \leq 0.9 \quad N_z = \bar{\lambda}_z \cdot (2 \cdot \beta_z - 4) \leq 0.9 \quad N_p = A_s \cdot \sigma_e \quad [\text{I.32}]$$

Donde las esbelteces usadas vienen dadas por la relación entre la esbeltez ( $\lambda$ ) y la esbeltez de Euler ( $\lambda_E$ ).

Con las expresiones [I.32] se calculan los términos  $K_y$ ,  $K_z$  indicadas en [I.33].

$$K_y = 1 - \frac{N_y \cdot \mu}{\bar{N}_y + N_p} \leq 1.5 \qquad K_z = 1 - \frac{N_z \cdot \mu}{\bar{N}_z + N_p} \leq 1.5 \qquad [\text{I.33}]$$

Una vez calculados todos los términos individuales se sustituyen en la ecuación [I.34].

$$\frac{N}{\bar{N} \cdot N_p} + \frac{K_y \cdot M_y}{M_{ply} \cdot y} + \frac{K_x \cdot M_x}{M_{plx} \cdot x} \leq 1 \qquad \text{Donde: } \bar{N} = \min(\bar{N}_x, \bar{N}_y) \qquad [\text{I.34}]$$

#### I.7.4 Norma Americana AISC-LRFD.



fig. I.27. Valores máximos para los coeficientes de inestabilidad según la norma AISC-LRFD.

#### Cálculo de pandeo por compresión.

En este caso la comprobación consiste en calcular la tensión permitida, para lo cual, previamente hay que calcular el término [I.35].

$$C_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{f_y}} \qquad [\text{I.35}]$$

En el cual  $f_y$  es el límite elástico del material.

Posteriormente se calcula la tensión admisible según la expresión [I.36].

$$F_a = \frac{1 - \left(\frac{Kl}{r}\right)^2}{2 \cdot C_c^2} \cdot f_y \quad [I.36]$$

$$\frac{5}{3} + \frac{3 \cdot \left(\frac{Kl}{r}\right) \cdot \left(\frac{Kl}{r}\right)^3}{8 \cdot C_c} - \frac{\left(\frac{Kl}{r}\right)^3}{8 \cdot C_c^3}$$

### Cálculo de pandeo por flexión más compresión.

Se comprueba que la relación entre la tensión axial de compresión ( $f_a$ ) y la tensión admisible a compresión ( $F_a$ ) es inferior a 0,15 y en caso afirmativo se calcula el coeficiente con la ecuación [I.37].

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \quad [I.37]$$

En caso contrario, el coeficiente se calcula con el siguiente procedimiento:

Se calcula el término  $C_m$  cuyo valor será:

1 si se cumple la desigualdad [I.38] en la que  $M_1$  y  $M_2$  son los momentos en el extremo de la viga y  $M_{medio}$  es el momento central y el coeficiente  $\beta$  que determina la longitud de pandeo de la viga en cada plano es mayor o igual a 1.

0,85 si se cumple la desigualdad [I.38] y el coeficiente  $\beta$  es menor que 1.

[I.39] si no se cumple la desigualdad [I.38].

$$0.9 \leq \frac{M_{medio}}{\frac{M_1 + M_2}{2}} \leq 1.1 \quad [I.38]$$

$$C_m = 0.6 - 0.4 \cdot \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \quad [I.39]$$

Una vez calculados todos los términos, se obtiene el coeficiente de comprobación dado por la expresión [I.40].

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} \cdot f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ex}}\right) \cdot F_{bx}} + \frac{C_{my} \cdot f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right) \cdot F_{by}} \quad [\text{I.40}]$$

### I.7.5 Norma Francesa CM-66.

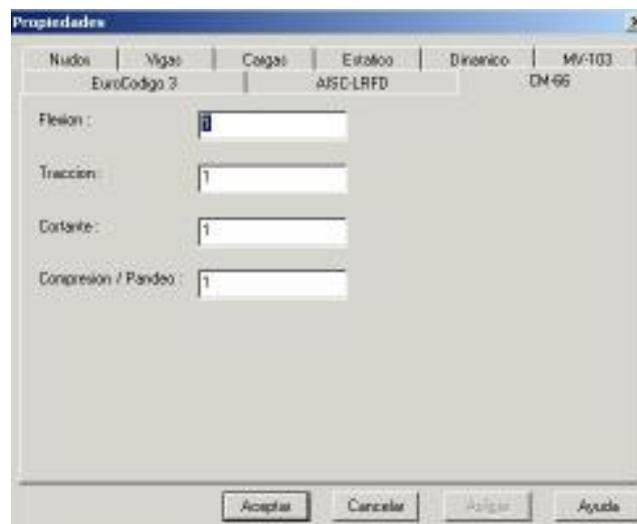


fig. I.28. Valores máximos para los coeficientes de inestabilidad según la norma CM-66

#### Cálculo del coeficiente de compresión simple.

El cálculo del coeficiente de compresión simple de esta norma se hace a través de la expresión [I.41].

$$\frac{k \cdot \sigma}{\sigma_e} \quad \text{Donde: } k = \left(0.5 + 0.65 \cdot \frac{\sigma_e}{\sigma_k}\right) + \sqrt{\left(0.5 + 0.65 \cdot \frac{\sigma_e}{\sigma_k}\right)^2 - \frac{\sigma_e}{\sigma_k}} \quad [\text{I.41}]$$

En la cual el término  $k$  es función de la tensión crítica de Euler ( $\sigma_k$ ) y de la tensión de cálculo del acero ( $\sigma_e$ ).

### Cálculo de los coeficientes de compresión más flexión simple.

Según esta norma es necesario calcular un coeficiente para la comprobación de compresión simple más flexión en el posible plano de pandeo.

El coeficiente se calcula con la expresión [I.42].

$$\frac{K_1 \cdot \sigma + K_f \cdot \sigma_f}{\sigma_e} \quad [\text{I.42}]$$

Donde  $\sigma$  es la tensión de compresión,  $\sigma_f$  es la tensión por flexión y los coeficientes  $K_1$  y  $K_f$  se obtienen según las expresiones [I.43].

$$K_1 = \frac{\mu - 1}{\mu - 1.3} \quad K_f = \frac{\mu + 0.25 - 1.72 \cdot \left(1 - \frac{A_M}{M_{medio} \cdot l}\right)^2}{\mu - 1.3} \quad \mu = \frac{\sigma_k}{\sigma} \quad [\text{I.43}]$$

En los que  $A_M$  es el área del diagrama de momentos y  $l$  es la longitud de la viga.

### Cálculo del coeficiente de flexión compuesta.

Este es un caso basado en la combinación del caso anterior, el coeficiente final será el mayor de los dos siguientes [I.44].

$$\frac{(\sigma \cdot K_{1y} + \sigma_{fy} \cdot K_{fy} + \sigma_{fx} \cdot K_{fx})}{\sigma_e} \quad \frac{(\sigma \cdot K_{1x} + \sigma_{fx} \cdot K_{fx} + \sigma_{fy} \cdot K_{fy})}{\sigma_e} \quad [\text{I.44}]$$

---

---

# **ANEXO II**

---

---

**PROGRAMA GADEMO.**

## II.1 Introducción.

Una vez realizado el predimensionamiento de una estructura, se ha de comprobar que las secciones inicialmente asignadas son capaces de resistir las solicitaciones a las que se ven sometidas. Esta comprobación se lleva a cabo mediante el cálculo de los coeficientes de seguridad marcados por la normativa seguida.

Las secciones incapaces de resistir las solicitaciones se sustituyen por otras con mayor capacidad resistente en un nuevo predimensionamiento y cálculo de los coeficientes de seguridad. Estos pasos se repiten hasta que todas las secciones sean correctas en el proceso denominado dimensionamiento.

En muchos programas de cálculo de estructuras esta reasignación de secciones se realiza de manera automática, pero siempre dentro de la serie inicialmente asignada por el usuario y de forma ascendente, lo que limita la búsqueda de secciones óptimas con poco peso.

Por el contrario, en la *optimización estructural* se persiguen soluciones extremas de peso mínimo capaces de satisfacer los criterios de diseño sin recaer en la habilidad del diseñador, englobando el proceso de selección de los elementos estructurales de forma automática y aleatoria y comprobando los criterios de diseño.

Siguiendo el concepto de optimización estructural, se ha desarrollado el programa GADEMO usando una librería de C++ de algoritmos genéticos denominada GALIB [7].

## II.2 Generalidades.

Las características principales del programa son:

- La posibilidad de modificar los parámetros desde archivo, sobre el código o directamente a través del entorno gráfico (fig. II.1).

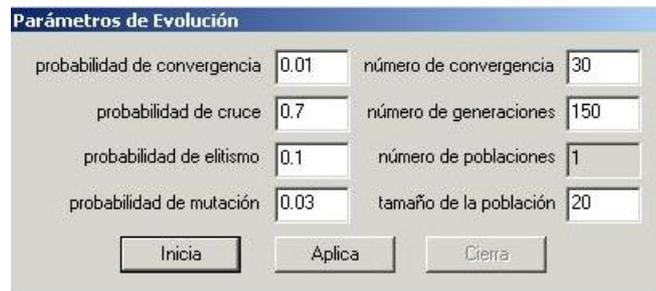


fig. II.1. Parámetros de evolución.

- La implementación de diferentes algoritmos genéticos (fig. II.2) (elitista, de estado-constante, de estado-constante-repartido, incremental, multitudinario y simple) y su posible selección a través del entorno gráfico.
- La implementación de diversos operadores de selección (fig. II.3) (de aptitud, determinista, estocástico, de rango, de ruleta, de torneo y uniforme) y su posible selección a través del entorno gráfico.

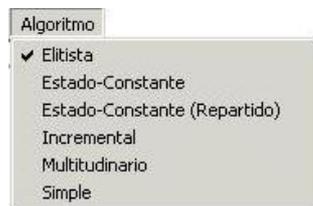


fig. II.2. Algoritmos genéticos.

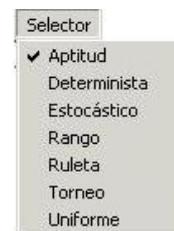


fig. II.3. Operadores de selección.

- La implementación de distintos operadores de cruce (fig. II.4) (por un punto, por dos puntos y por un fenotipo).

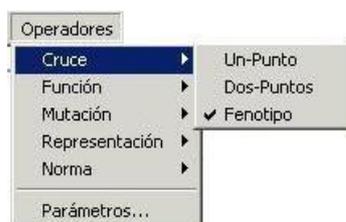


fig. II.4. Operadores de cruce.



fig. II.5. Normativas de seguridad.

- La posibilidad de emplear diferentes normativas de seguridad (fig. II.5) (norma española MV-103, norma europea eurocódigo3, norma americana AISC-LRFD, y norma francesa CM-66).
- Distintos métodos de terminación que incluye la convergencia y el número de generaciones.
- El registro de datos estadísticos como valores mínimos, máximos, medios y desviaciones típicas.
- La división en módulos independientes lo que permite modificar la función objetivo fácilmente, sin alterar el resto de la aplicación (fig. II.6).
- La representación de las variables de diseño en forma binaria (fig. II.7), lo que permite utilizar cualquier variable de diseño que se pueda ordenar.

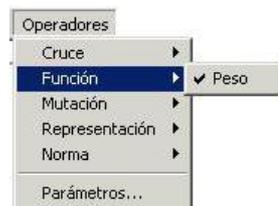


fig. II.6. Función objetivo.



fig. II.7. Representación binaria.

- Diferentes formas de evolución (fig. II.8), paso a paso parando tras cada generación (fig. II.11), a saltos parando cada 10 generaciones o de forma continuada hasta alcanzar la convergencia (fig. II.12).

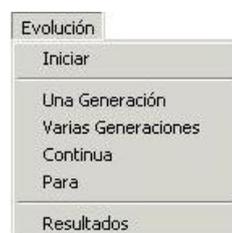


fig. II.8. Pantalla de evolución.



fig. II.9. Barra de herramientas de evolución.

- La visualización de la distribución de individuos en cada población, representando la población actual (azul) frente a poblaciones anteriores (verde); el individuo óptimo (rojo), y el número de generaciones efectuadas (fig. II.12).

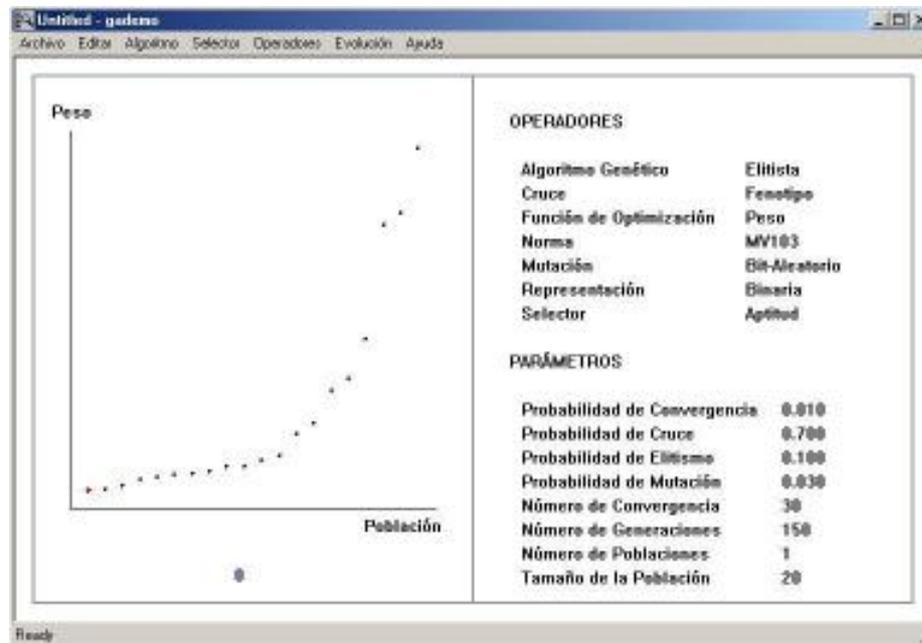


fig. II.10. Población inicial.

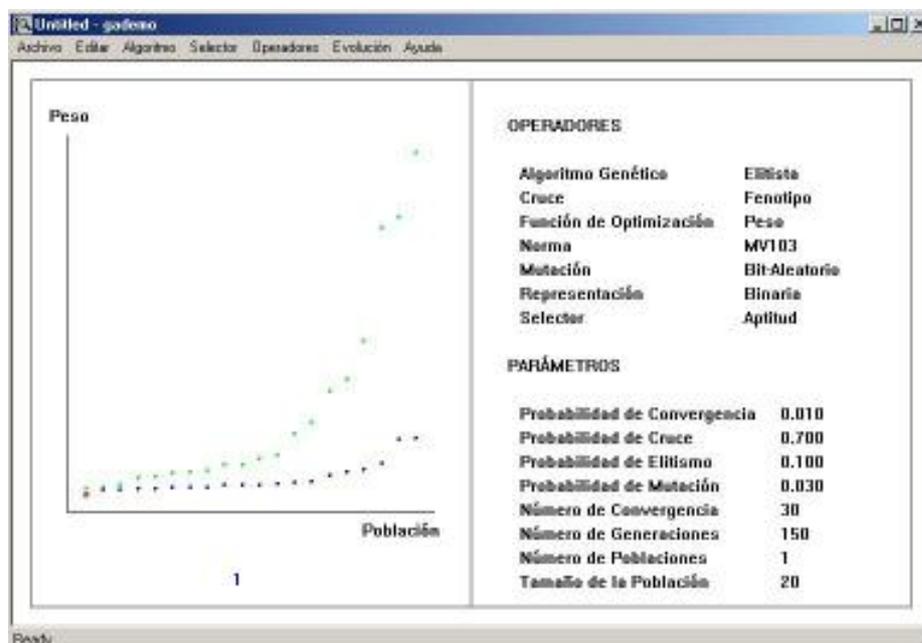


fig. II.11. Evolución paso a paso.

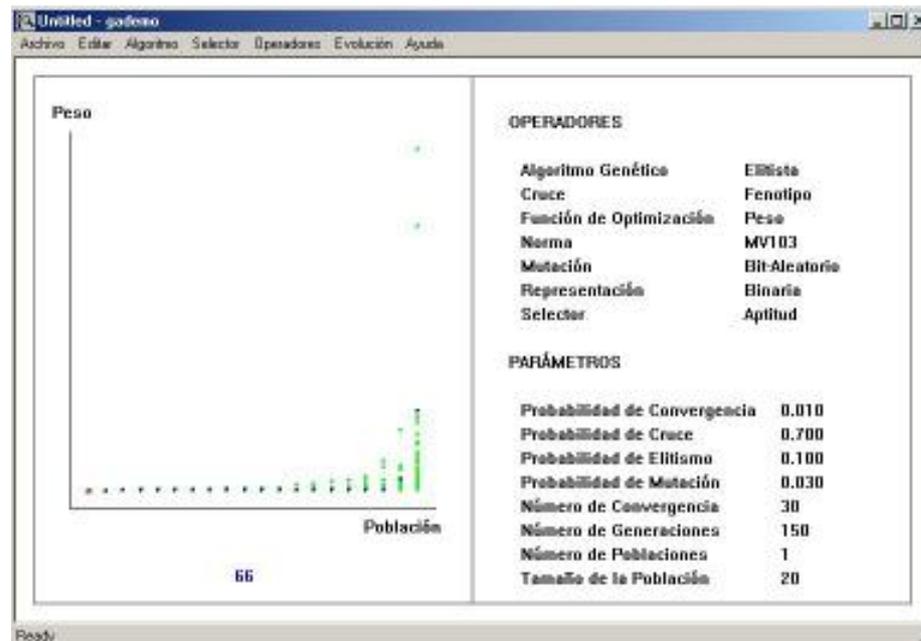


fig. II.12. Evolución continuada.

- La generación de la pantalla de resultados (fig. II.13), lo que permite conocer el estado del algoritmo genético en cada evolución, su convergencia, peso mínimo, peso medio, etc., así como los valores de los parámetros y variables empleados en ella.

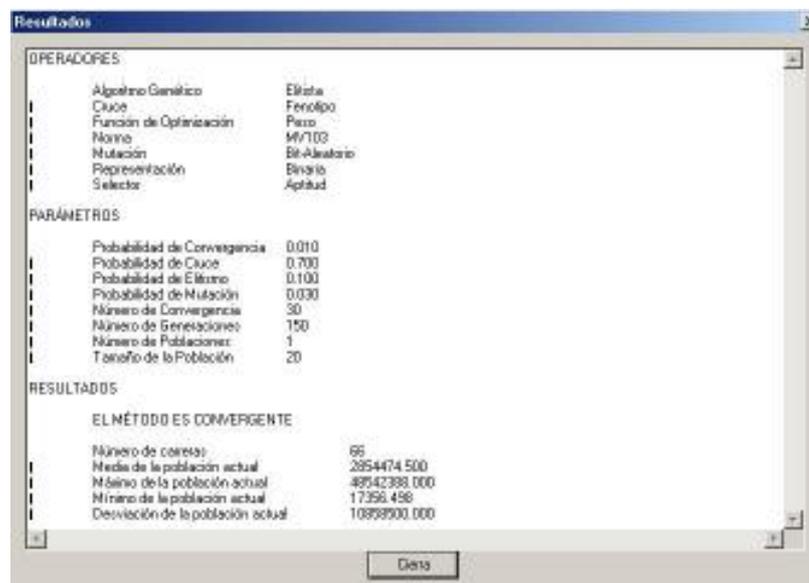


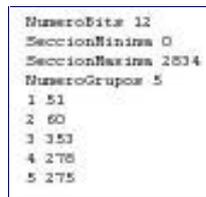
fig. II.13. Pantalla de resultados.



deduce la cadena binaria que las representa y que va de  $0$  a  $n$ , siendo  $n$  el número total de secciones existentes menos una.

## II.5 Módulo INICIO.

El módulo INICIO se ejecuta al activar el programa GADEMO, generando un fichero con los datos mínimos de la estructura necesarios en el proceso de optimización (fig. II.15).



```
NumeroBits 12
SeccionMinima 0
SeccionMaxima 2834
NumeroGrupos 5
1 51
2 60
3 353
4 278
5 275
```

fig. II.15. Fichero de datos (*optimo.ini*).

Para ello lee el fichero de salida generado en el predimensionamiento inicial por el módulo E3DPRE del programa ESCAL3D (fig. II.19) en el que se indica el número de barras que componen la estructura y la sección de las mismas.

El número de grupos se obtiene contabilizando el número de secciones distintas asignadas a las barras de la estructura.

El número identificativo de las secciones de cada grupo, así como el menor y mayor número identificativo (sección mínima y sección máxima) se deducen de la base de datos.

El número de bits se define como el mínimo necesario que permite representar el total de las secciones (véase capítulo 3).

## II.6 Módulo INTERMEDIO.

El módulo INTERMEDIO conecta el programa de optimización con el programa de predimensionamiento creando los ficheros necesarios para ello.

Una vez generadas las secciones que componen un individuo de la población, el programa GADEMO crea un fichero intermedio (fig. II.16) con el número de secciones que componen dicho individuo, el número identificativo de cada una y la normativa de seguridad seleccionada.

```

Normativa 1
NumeroVigas 5
511
381
2359
1953
445

```

fig. II.16. Fichero intermedio (*optimo.int*).

El módulo INTERMEDIO lee este fichero, sustituye el número identificativo de cada sección por su nombre y consulta sus propiedades estáticas, genera los ficheros de entrada (fig. II.18) y salida (fig. II.20) del predimensionamiento, sustituyendo en los ficheros iniciales las secciones existentes por las actuales (fig. II.17) y (fig. II.19), y crea el fichero de vigas (fig. II.21) que define las barras existentes en cada viga.

```

Módulo 7
Módulo-000000-edaW 0.000000 0.000000 0.000000
Módulo-000001-edaW 600.000000 0.000000 0.000000
Módulo-000002-edaW 1200.000000 0.000000 0.000000
Módulo-000003-edaW 1800.000000 0.000000 0.000000
Módulo-000004-edaW 600.000000 692.620007 0.000000
Módulo-000005-edaW 1200.000000 946.410004 0.000000
Módulo-000006-edaW 0.000000 1029.229990 0.000000

Apoyos 2
Módulo-000000-edaW 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -1.00000.000000 0.000000
Módulo-000006-edaW 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -1.00000.000000 0.000000

Vigas 10
Viga-000000-agiV Módulo-000000-edaW Módulo-000001-edaW REAL00 90.000000 A-4E 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000001-agiV Módulo-000001-edaW Módulo-000002-edaW REAL00 90.000000 A-4E 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000002-agiV Módulo-000002-edaW Módulo-000003-edaW REAL00 90.000000 A-4E 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000003-agiV Módulo-000003-edaW Módulo-000004-edaW REAL00 90.000000 A-4E 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000004-agiV Módulo-000004-edaW Módulo-000005-edaW IPEL00 90.000000 A-4E 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000005-agiV Módulo-000005-edaW Módulo-000006-edaW IPEL00 90.000000 A-4E 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000006-agiV Módulo-000006-edaW Módulo-000004-edaW IPEL00 90.000000 A-4E 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000007-agiV Módulo-000004-edaW Módulo-000005-edaW IPEL00 90.000000 A-4E 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000008-agiV Módulo-000005-edaW Módulo-000006-edaW IPEL00 90.000000 A-4E 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000009-agiV Módulo-000006-edaW Módulo-000003-edaW IPEL00 90.000000 A-4E 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000

Alineaciones 0

Hipotesis 2
PesoPropio 1
PIED 0.000000 -1.000000 0.000000
Sobrecarga 2
Módulo-000001-edaW MFV -40000.000000
Módulo-000002-edaW MFV -40000.000000
Módulo-000003-edaW MFV -40000.000000

HipDinamica 0

Combinaciones 1
combina_1 2
PesoPropio 1.500000
Sobrecarga 1.500000

Escritorio 1 0.000100 50 1111 salida.log
Unidades 0 0

```

fig. II.17. Fichero de entrada inicial del predimensionamiento (*inicio.inp*).

```

Nodos 7
Nudo-000000-cdm 0.000000 0.000000 0.000000
Nudo-000001-cdm 600.000000 0.000000 0.000000
Nudo-000002-cdm 1200.000000 0.000000 0.000000
Nudo-000003-cdm 1800.000000 0.000000 0.000000
Nudo-000004-cdm 600.000000 692.820007 0.000000
Nudo-000005-cdm 1200.000000 346.410004 0.000000
Nudo-000006-cdm 0.000000 1039.229980 0.000000

Apoyos 2
Nudo-000000-cdm 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -100000.000000 0.000000
Nudo-000006-cdm 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -100000.000000 0.000000

Vigas 10
Viga-000000-agtV Nudo-000000-cdm Nudo-000001-cdm 15D100x75x7 50.000000 A-42 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000001-agtV Nudo-000001-cdm Nudo-000002-cdm 15D100x75x7 50.000000 A-42 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000002-agtV Nudo-000002-cdm Nudo-000003-cdm 15D100x75x7 50.000000 A-42 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000003-agtV Nudo-000000-cdm Nudo-000004-cdm IPW230x4 50.000000 A-42 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000004-agtV Nudo-000001-cdm Nudo-000004-cdm 12D75x50x5x4 50.000000 A-42 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000005-agtV Nudo-000001-cdm Nudo-000005-cdm 12D30x20x4-4 50.000000 A-42 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000006-agtV Nudo-000002-cdm Nudo-000005-cdm 12D75x50x5x4 50.000000 A-42 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000007-agtV Nudo-000006-cdm Nudo-000004-cdm 15D100x200x15x6 50.000000 A-42 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000008-agtV Nudo-000004-cdm Nudo-000005-cdm 15D100x200x15x6 50.000000 A-42 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
Viga-000009-agtV Nudo-000005-cdm Nudo-000003-cdm 15D100x200x15x6 50.000000 A-42 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000

Alineaciones 0

Hipotesis 2
PesoPropio 1
PESO 0.000000 -1.000000 0.000000
Sobrecarga 3
Nudo-000001-cdm NPT -40000.000000
Nudo-000002-cdm NPT -40000.000000
Nudo-000003-cdm NPT -40000.000000

MapDinamica 0

Combinaciones 1
combina_1 2
PesoPropio 1.330000
Sobrecarga 1.500000

Estatico 1 0.000100 50 1111 salida.log
Unidades 0 0
    
```

fig. II.18. Fichero de entrada del predimensionamiento (*optimo.inp*).

```

TITULO Beta
COORDS 7
1 0.000000 0.000000 0.000000
2 600.000000 0.000000 0.000000
3 1200.000000 0.000000 0.000000
4 1800.000000 0.000000 0.000000
5 600.000000 692.820007 0.000000
6 1200.000000 346.410004 0.000000
7 0.000000 1039.229980 0.000000

MATERIAL 1
1 2100000.000000 0.007850 0.000012 0.300000

SECCION 5
HEAL100 2.041300e+001 6.625000e+000 9.661000e+000 4.539000e+000 1.234260e+002 3.397060e+002 2.526029e+003
HEAL120 2.451600e+001 8.020000e+000 1.163200e+001 5.449000e+000 2.305110e+002 5.912360e+002 6.484153e+003
IPE100 1.074000e+001 4.121000e+000 2.261300e+001 1.635000e+000 1.213000e+001 1.709640e+002 2.403390e+002
IPE120 1.207200e+001 2.766000e+000 1.210000e+001 1.668000e+000 2.760600e+001 3.155060e+002 6.914690e+002
IPE150 1.014000e+001 3.017000e+000 9.342000e+000 1.075000e+000 1.526000e+001 1.625970e+002 3.521240e+002

MODO
1 100 100 100 100 100 100
FIN_MODO

COM.BA 10
1 1 2 HEAL100 90.000000 1 1 1
2 2 3 HEAL100 90.000000 1 1 1
3 3 4 HEAL100 90.000000 1 1 1
4 1 5 HEAL120 90.000000 1 1 1
5 2 5 IPE100 90.000000 1 1 1
6 2 6 IPE120 90.000000 1 1 1
7 3 6 IPE100 90.000000 1 1 1
8 7 5 IPE100 90.000000 1 1 1
9 5 6 IPE100 90.000000 1 1 1
10 6 4 IPE100 90.000000 1 1 1

APOYO 2
1 1
7 2

ID_APOYO
1 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -100000.000000 0.000000
2 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -100000.000000 0.000000
FIN_ID_APOYO

HIPOTE 2
III.HIP PesoPropio
CRACKTAB 0.000000 -1.000000 0.000000
PESO
FIN.HIP
III.HIP Sobrecarga
PEY 2 -40000.000000
PEY 3 -40000.000000
PEY 4 -40000.000000
FIN.HIP

COMBIN 1
1 1.330000 2 1.500000

ESTATICO 2 0.000100 50 1111 salida.log
    
```

fig. II.19. Fichero de salida inicial del predimensionamiento (*inicio.sal*).

```

TITULO Beta
COORDS 7
1 0.000000 0.000000 0.000000
2 600.000000 0.000000 0.000000
3 1200.000000 0.000000 0.000000
4 1800.000000 0.000000 0.000000
5 600.000000 692.820000 0.000000
6 1200.000000 346.410000 0.000000
7 0.000000 1039.229999 0.000000

MATERIAL 1
1 2100000.000000 0.007250 0.000012 0.300000

SECCION 5
LP0100x75x7 11.637000 7.510000 6.416000 2.281000 29.726999 142.681000 0.011000
LP220x4 68.528997 18.272999 62.076000 52.382999 723.620821 8661.862291 90676.242188
LS075x50x5+4 10.759000 5.801000 4.619000 0.903000 58.258999 115.321999 389.915009
LS030x20x4-4 7.530000 72.223999 1.125000 0.759000 92.225998 2.254000 0.025000
LP0100x200x15+6 53.257999 26.959999 27.639000 39.766998 2739.812012 446.352997 19832.630839

MODO
1 100 100 100 100 100 100 100
FIM_MODO

CON.EA 10
1 1 2 LP0100x75x7 119.153343 1 1 1
2 2 3 LP0100x75x7 119.153343 1 1 1
3 2 4 LP0100x75x7 119.153343 1 1 1
4 1 5 LP220x4 90.000000 1 1 1
5 2 5 LS075x50x5+4 119.728326 1 1 1
6 2 6 LS030x20x4-4 89.018096 1 1 1
7 3 6 LS075x50x5+4 119.728326 1 1 1
8 7 5 LP0100x200x15+6 66.581535 1 1 1
9 5 6 LP0100x200x15+6 66.581535 1 1 1
10 6 4 LP0100x200x15+6 66.581535 p 1 1

APOYOS 2
1 1
7 2

Td_APOYOS
1 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -100000.000000 0.000000
2 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -100000.000000 0.000000
FIM_Td_APOYOS

HIPOTE 2
TIT.HIP PasaFecopia
GRAVEDAD 0.000000 -1.000000 0.000000
PESO
FIM.HIP
TIT.HIP Subestructura
FPY 2 -40000.000000
FPY 3 -40000.000000
FPY 4 -40000.000000
FIM.HIP

CASETIM 1
1 1.330000 2 1.500000

ESTATICO 2 0.000100 50 1111 salida.log
    
```

fig. II.20. Fichero de salida del predimensionamiento (*optimo.sal*).

```

10
Viga-000000-agIV
1
1
Viga-000001-agIV
1
2
Viga-000002-agIV
1
3
Viga-000003-agIV
1
4
Viga-000004-agIV
1
5
Viga-000005-agIV
1
6
Viga-000006-agIV
1
7
Viga-000007-agIV
1
8
Viga-000008-agIV
1
9
Viga-000009-agIV
1
10
    
```

fig. II.21. Fichero de vigas (*optimo.vig*).

## II.7 Módulo de LECTURA DE PESO.

Este módulo calcula el peso de la estructura para un individuo de la población y genera un fichero (fig. II.22) con los datos del peso de la estructura (suma del peso de las barras y del peso de los coeficientes), los datos del número de barras, su nombre y sus coeficientes de seguridad para la normativa considerada y para cada hipótesis.

PesoEstructura	940758.00								
PesoBarras	788.97								
PesoCoeficientes	339969.06								
NúmeroVigas	10								
Barra	Perfil								
1	HEA100								
2	HEA100								
3	HEA100								
4	HEA120								
5	IPRL00								
6	IPEL20								
7	IPRL00								
8	IPEL00								
9	IPEL00								
10	IPEL00								
NúmeroHipótesis	3								
Barra	Compresión	Tracción	Cortante	Flexión	Flexión	VorMises	PandeoComp	PandeoCompFlex	PandeoTorsión
	PandeoTorFlexX	PandeoTorFlexZ	Máximo						
8	0.000000	0.026544	0.003018	0.023635	0.049313	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.005134	0.000139	0.007727	0.011833	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.007502	0.000000	0.002725	0.026065	0.033761	0.269179	0.291153	0.010085	0.000000
5	0.000000	0.011382	0.000589	0.030143	0.042123	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.007997	0.000000	0.004776	0.022340	0.029084	0.113380	0.129250	0.003714	0.000000
3	0.001355	0.000000	0.005600	0.034100	0.037049	0.017377	0.032722	0.002206	0.000000
2	0.001391	0.000000	0.004808	0.030540	0.033344	0.017697	0.041051	0.002246	0.000000
1	0.005732	0.000000	0.006445	0.046506	0.053151	0.050948	0.071876	0.006467	0.000000
10	0.000000	0.005221	0.003220	0.047262	0.052666	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.014282	0.002415	0.062407	0.077822	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	6.211465	0.000858	0.059425	6.370891	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	1.490963	0.003878	0.215798	1.706770	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	1.222947	0.000000	0.000323	0.028176	1.251130	42.874874	42.891853	1.643904	0.000000
5	0.000000	2.223669	0.001762	0.098454	2.322117	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.862492	0.000000	0.001277	0.032740	0.896229	12.207132	12.221869	1.048326	0.000000
3	1.355610	0.000000	0.003752	0.121048	1.476669	12.050072	12.104545	1.529481	0.000000
2	1.257468	0.000000	0.000703	0.044816	1.402285	12.066588	12.096482	1.521577	0.000000
1	2.026061	0.000000	0.001242	0.047318	2.082380	18.098627	18.122765	2.297206	0.000000
10	0.000000	2.151552	0.001845	0.122902	2.285464	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	4.722795	0.002131	0.157968	4.890765	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	9.502501	0.005301	0.120652	9.621709	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	2.242352	0.015082	0.322974	2.575892	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	1.844400	0.000000	0.002956	0.072543	1.915507	66.170219	66.225014	2.479270	0.000000
5	0.000000	2.366440	0.001862	0.123163	2.492702	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	1.205874	0.000000	0.008267	0.061064	1.364102	18.612291	18.629771	1.586308	0.000000
3	2.026015	0.000000	0.012076	0.226925	2.262027	18.098219	18.200328	2.297154	0.000000
2	2.028850	0.000000	0.006709	0.095628	2.134503	18.122421	18.199222	2.300352	0.000000
1	3.061714	0.000000	0.006710	0.071235	3.132066	27.215702	27.269716	3.454410	0.000000
10	0.000000	4.734272	0.007182	0.262712	4.937998	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	7.118130	0.009228	0.211282	7.429482	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

fig. II.22. Fichero de salida del módulo LECTURA DE PESO (*optimo.pes*).

El peso de cada barra se obtiene multiplicando la densidad del material que la compone por su área y por su longitud.

Tanto el nombre de las secciones como las coordenadas de los puntos extremos de las barras y la densidad del material, se lee en el fichero de salida del

predimensionamiento (fig. II.20). De las primeras se deducen las áreas de las barras y de las segundas sus longitudes.

El peso de los coeficientes se obtiene multiplicando el valor de los coeficientes de seguridad de cada barra, para la normativa seleccionada, por el coeficiente de penalización correspondiente (ver función objetivo penalizada).

La normativa considerada se lee en el fichero intermedio (fig. II.16) creado por el módulo GADEMO, mientras que el valor de los coeficientes de seguridad se lee en el fichero de salida del módulo COMESC del programa ESCAL3D denominado fichero de tensiones.

## **II.8 Módulo GADEMO.**

El módulo GADEMO gestiona el entorno gráfico que permite la modificación de los parámetros y operadores que definen el algoritmo, la visualización del proceso de optimización y la creación de los ficheros de resultados. Además conecta los módulos que forman el programa de optimización y los relaciona con los módulos del programa ESCAL3D y con la librería GALIB.

Iniciada la optimización ejecuta el módulo INICIO y lee su fichero de salida (fig. II.15) conociendo así el número de bits, el número de grupos, el intervalo de secciones entre las que se puede actuar y el número identificativo de las secciones dadas por el usuario en el predimensionamiento.

Genera aleatoriamente los individuos de la población inicial a excepción de uno que será el del predimensionamiento.

Pesa cada individuo inicial. Para ello genera un fichero intermedio con los números identificativos de las secciones que componen dicho individuo, el número de grupos y la normativa considerada (fig. II.16), ejecuta los módulos INTERMEDIO, SOLVE, COMESC y LECTURA DE PESO y lee el fichero de peso de ese individuo que genera el módulo LECTURA DE PESO (fig. II.22).

Una vez pesados todos los individuos los ordena de menor a mayor peso, comprueba los métodos de terminación, recoge los datos estadísticos de la población actual y genera los ficheros de registro (históricos) de los pesos (fig. II.23) y de las barras y coeficientes (formado por todos los ficheros de peso generados a lo largo de la optimización), donde se irán reflejando para todos los individuos de la población sus pesos y las secciones y coeficientes de seguridad de sus barras respectivamente.

```

TamañoPoblación: 5
NúmeroGeneración: 0
PesoIndividuo: 1 340755.437500
PesoIndividuo: 2 1384045.625000
PesoIndividuo: 3 8165553.000000
PesoIndividuo: 4 12216479.000000
PesoIndividuo: 5 36561396.000000

NúmeroGeneración: 1
PesoIndividuo: 1 340755.437500
PesoIndividuo: 2 1384045.625000
PesoIndividuo: 3 1384045.625000
PesoIndividuo: 4 1384045.625000
PesoIndividuo: 5 1384045.625000

```

fig. II.23. Histórico de pesos (*optimo.fin*).

En el entorno gráfico se muestra entonces la situación de la población actual (fig. II.10), sus operadores y parámetros así como la gráfica de pesos. La activación de la pantalla de resultados permite conocer el estado de convergencia, los registros estadísticos y crea el fichero de resultados compuesto por los datos de la pantalla de resultados y de los históricos anteriormente descritos (fig. II.24).

```

OPERADORES
Algoritmo Genético      Elitista
Cruce                   Fenotipo
Función de Optimización Peso
Norma                   EVIOS
Mutación                Bit-Aleatorio
Representación          Binaria
Selector                Aptitud

PARÁMETROS
Probabilidad de Convergencia 0.010
Probabilidad de Cruce       0.700
Probabilidad de Elitismo    0.300
Probabilidad de Mutación    0.005
Número de Convergencia     30
Número de Generaciones     150
Número de Poblaciones      1
Tamaño de la Población     5

RESULTADOS
EL MÉTODO NO SE CONVERGENTE

Número de Carreras          0
Media de la población actual 3020598.500
Máximo de la población actual 8442476.000
Mínimo de la población actual 753267.813
Desviación de la población actual 3748789.000

HISTÓRICO

```

fig. II.24. Fichero de resultados (*optimo.sol*).

En el caso de no cumplirse la convergencia se selecciona el tipo de evolución a seguir: paso a paso, a saltos o continuada.

El módulo GADEMO genera entonces una nueva población a partir de la inicial, empleando el algoritmo seleccionado así como los operadores de cruce, mutación y selección indicados.

La nueva población, volverá a ser pesada y ordenada para así analizar su convergencia, registrar los nuevos datos estadísticos y escribir los nuevos pesos, secciones y coeficientes de seguridad en los históricos de pesos y de barras y coeficientes.

Si la evolución seleccionada es paso a paso el proceso para, visualizando en el entorno gráfico la población actual frente a la inicial (fig. II.11), las carreras efectuadas y los valores de los parámetros y operadores. Por el contrario, si la evolución es a saltos o de forma continuada, se creará una nueva población repitiendo el proceso de pesado, ordenación, análisis, registro, hasta que realice 10 generaciones (evolución a saltos) o hasta que se produzca la convergencia (evolución continuada), visualizando la población actual frente a todas las poblaciones anteriores, las generaciones efectuadas y los valores de los parámetros y operadores (fig. II.12).

## **II.9 Librería GALIB.**

En el desarrollo del programa de optimización GADEMO se ha usado una librería de C++ de algoritmos genéticos denominada GALIB, desarrollada por el Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Massachusetts. En ella se encuentran implementados diversos algoritmos o formas de crear las nuevas poblaciones y operadores de selección que se han incorporado al programa de optimización, sumándose al algoritmo elitista y al selector aptitud desarrollados y analizados en esta tesis.

Los algoritmos aportados por la librería GALIB son:

- Algoritmo simple.

- Algoritmo de estado-constante.
- Algoritmo de estado-constante-repartido.
- Algoritmo multitudinario.
- Algoritmo incremental.

#### **Algoritmo simple:**

En cada paso crea una población enteramente nueva a excepción de un único individuo que puede ser nuevo o no.

En su evolución coge dos individuos de la población inicial, los cruza y los muta generando dos individuos de la población nueva. Repite el proceso hasta generar todos los individuos de la nueva población. Entonces los pesa y los ordena. Por último compara el mejor individuo de la población nueva con el mejor individuo de la población inicial y se queda con el mejor.

#### **Algoritmo de estado-constante.**

En cada generación crea una población temporal (por defecto de dos individuos) que se añade a la ya existente, entonces los peores individuos se eliminan para obtener una población de tamaño inicial.

En su evolución selecciona los individuos de la población actual de dos en dos, los cruza y los muta y los incorpora a la población temporal. Una vez creada, la añade a la población principal; pesa y ordena a todos los individuos y elimina aquellos con mayor peso, hasta obtener una población nueva con el tamaño inicial.

#### **Algoritmo de estado-constante-repartido.**

Similar al anterior, se diferencia de éste porque una vez evaluados todos los individuos los escala en función de la diferencia que hay entre ellos, eliminando a los peores a partir de sus valores escalados.

La función de escalado viene dada por la expresión [II.1].

$$s(d(i, j)) = \begin{cases} 1 - \left[ \frac{d(i, j)}{\sigma} \right]^\alpha & d(i, j) < \sigma \\ 0 & d(i, j) \geq \sigma \end{cases} \quad [\text{II.1}]$$

Donde  $i$  y  $j$  son el tamaño de la población,  $d$  es la función distancia,  $\sigma$  es el valor de corte y  $\alpha$  controla la forma de la función de escalado con el valor de 1 para líneas rectas, menor que 1 para curvas cóncavas y mayor que 1 para curvas convexas.

La función distancia compara los individuos dos a dos devolviendo un cero si son iguales y un uno si son distintos. La forma de calcular esta distancia es comparar bit a bit cada individuo. Si dos bits son iguales suma un cero y si son distintos suma un uno. Por último devuelve el valor de esta suma dividido por el número total de bits que hay en cada cadena.

Una vez calculada la distancia de un individuo con todos los demás, se calculan los valores de la función de escalado de estas distancias. Se suman estos valores y el resultado se multiplica por el peso del individuo obteniendo el peso escalado.

Es decir, lo que se hace es coger cada individuo y multiplicarlo por la distancia o diferencia de este individuo con todos los demás.

#### **Algoritmo multitudinario.**

Este algoritmo coge al azar dos individuos de la población denominados padres, los cuales se cruzan para obtener un único individuo denominado hijo. Una vez mutado el hijo se compara con el padre que esté más cerca y se queda con el de menor peso.

#### **Algoritmo incremental.**

En cada generación se crean dos individuos que sustituirán a los peores individuos de la población actual.

En su evolución selecciona dos individuos de la población actual, los cruza y los muta, obteniendo dos nuevos individuos que sustituirán a los peores de la población. Una vez sustituidos se obtiene la población nueva.

Los operadores de selección aportados por la librería GALIB son:

- Selector de rango.
- Selector uniforme.
- Selector de la ruleta.
- Selector de torneo.
- Selector estocástico.
- Selector determinista.

**Selector de rango.**

Coge el mejor individuo de la población.

**Selector uniforme.**

Coge un individuo de la población al azar independientemente de que sea el mejor o el peor, ya que todos tienen la misma probabilidad de selección  $1/n$  siendo  $n$  el tamaño de la población.

**Selector de la ruleta.**

Analiza todos los miembros de la población y los tara en función de su peso. La probabilidad de ser seleccionado es proporcional a la puntuación de ajuste o tara.

**Selector de torneo.**

Usa la selección de la ruleta para coger dos individuos que compara entre sí quedándose con el mejor.

**Selector estocástico.**

Usa un proceso de selección en dos pasos. Primero calcula la representación esperada de cada individuo y después selecciona los individuos mediante una distribución uniforme.

**Selector determinista.**

Similar al anterior, varía la forma de obtener la representación esperada de cada individuo.

Tanto el selector estocástico como el determinista eliminan aquellos individuos más alejados de la media por arriba ya que consideran al óptimo dentro de los valores inferiores.

Los individuos eliminados se sustituyen por alguno de los individuos supervivientes, al azar en el caso estocástico y siguiendo un orden determinado en el caso determinista, en el que tienen preferencia los valores más bajos.