

Universidade do Porto

FEUP Faculdade de Engenharia

ESTUDO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE E A SUA APLICAÇÃO PRÁTICA NA OPTIMIZAÇÃO E FABRICAÇÃO DE CARROÇARIAS DE AUTOCARRROS

André Filipe Sousa Ramos

Versão Final do relatório validada pelo Presidente do Júri

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob supervisão do Professor Catedrático Paulo Tavares de Castro e o Professor Pedro Moreira do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto

Julho 2010

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
Biblioteca
Nº
CDU 621(043) RAMa EST
Data 12/04/2011

Resumo

Actualmente e cada vez mais as empresas portuguesas com presença em mercados internacionais enfrentam grande competitividade de outras empresas concorrentes e grandes adversidades devido às conjunturas económicas característica do tempo decorrente.

Para se apresentar bons resultados e estar na frente da concorrência, a empresa necessita de estar munida de meios importantes para o sucesso. Os principais meios para atingir o sucesso com que a empresa deve contar são a boa capacidade técnica de desenvolvimento e execução, óptimas capacidades de gerir pessoas e bens e mais recentemente, ferramentas avançadas de simulação que permitem um melhor desenvolvimento do produto num menor espaço de tempo.

Este trabalho pretende demonstrar que possuir tais ferramentas por si só não significa o sucesso certo, é essencial saber utiliza-las da melhor forma e desenvolver métodos de utilização para tirar máximo partido das funcionalidades e potencialidades que estas ferramentas avançadas possuem.

Este trabalho, desenvolvido em contexto profissional e com aplicação prática dos resultados e do conhecimento adquirido, está dividido em dois grandes assuntos que pretendem dar o seu contributo, quer para o melhoramento do produto, quer para tornar a empresa Caetanobus tecnologicamente mais avançada.

Por um lado será possível compreender como foi estudada e desenvolvida a aplicação de ferramentas avançadas de simulação às metodologias utilizadas na optimização estrutural de modelos de autocarros, e ainda melhorar essas metodologias.

Por outro lado, também será apresentado o desenvolvimento de novas técnicas de fabricação de autocarros que podem revolucionar o actual estado da arte, catapultando a empresa para a vanguarda da tecnologia de fabricação de autocarros.

Abstract

Nowadays more and more Portuguese companies with presence in international markets face major competitiveness against other competitors and even the economic characteristic of the time elapsed.

To deliver good results and be ahead of competition, the company needs to be provided with important tools for success. The principal means to achieve the success that the company must have are good technical skills for developing and produce, optimal capacity to manage people and goods, and more recently, advanced simulation tools that allow a better development of the product in a shorter time.

This paper aims to demonstrate that having such tools by itself does not mean guarantee success, it's essential to know to use them optimally and develop usability methods to take maximum advantage of the features and capabilities that these tools provide.

This work was conducted in a professional context with a practical application of results and knowledge acquired an it is divided into two major subjects that intend to contribute to improve the product and to make the company Caetanobus more technologically advanced.

On one hand you will be able understand how it was studied and developed the application of advanced simulation tools to the methodologies used in structural optimization models of buses, and even how these methodologies were themselves improved.

On the other hand, will also comprehend the development of new manufacturing techniques of buses that can revolutionize the current state of the art, catapulting the company to the forefront of technology for manufacturing buses.

Agradecimentos

Ao apresentar este trabalho, não posso deixar de expressar a minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma contribuíram para a realização e para o sucesso deste trabalho.

Gostaria de agradecer ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pelo seu representante o Professor Catedrático Paulo Tavares de Castro e à empresa Caetanobus, através dos Eng.º Nuno Rodrigues, que em conjunto permitiram a realização deste trabalho de académico em contexto profissional. Onde, por um lado foi possível receber apoio cientifico e por outro disponibilidade profissional e meios para a realização do mesmo.

Ao meu orientador científico e colega Eng.º Mário Dias Filipe Fernandes, a quem ficarei para sempre agradecido pela forma como me cativou e orientou, não só na realização deste trabalho, como também nas minhas actividades profissionais que conjugam com os temas apresentados. Não posso deixar de agradecer os vastos ensinamentos técnicos que me transmitiu, bem como todo o empeno e rigor com que me ensinou a encarar a actividade profissional.

Ao Eng.º Pedro Moreira pelo acompanhamento dos trabalhos apresentados e disponibilidade para discutir os vários assuntos relacionados.

Ao Eng.º Miguel Figueiredo do Laboratório de Ensaios Tecnológicos que prestou uma ajuda essencial na realização de ensaios e discussão dos resultados.

Agradeço também aos restantes intervenientes, como o colega Rui Garrido pela disponibilidade em discutir assuntos relacionados e a todos os colegas colaboradores do departamento de Engenharia da Caetanobus pelo seu apoio em várias tarefas.

Resta-me agradecer, em termos pessoais, ao apoio e incentivo para a realização deste trabalho, por parte da família e amigos. E por fim mas não menos importante, agradeço especialmente à Teresa, pelo apoio e "novamente" pela compreensão das largas horas subtraídas à sua companhia.

Índice de Conteúdos

Capítulo I – Introdução 1
1.1 Generalidades 1
1.2 Motivação e contexto do trabalho 1
1.3 Objectivos gerais 2
1.4 Objectivos específicos e organização do texto 3
1.5 Meios tecnológicos 5
1.6 Cronologia do trabalho de Mestrado 5
1.7 A empresa CaetanoBus 6
1.7.1 Descrição da empresa 6
1.7.2 Actualidade 7
Capítulo II - Evolução da metodologia de cálculo estrutural de autocarros, recorrendo à ferramenta ANSYS 9
2.1 Introdução e objectivos 9
2.2 Metodologias de análise do comportamento estrutural de autocarros 10
2.2.1 Análise global da estrutura completa de um modelo 10
2.2.2 Análise Local 11
2.2.3 Descrição da metodologia inicial utilizando StressLab 12
2.2.4 Estudos para o desenvolvimento de metodologias utilizando ANSYS 13
2.2.4.1 Utilização da plataforma ANSYS mais indicada 15
2.2.5 Actual metodologia utilizando ANSYS 22
2.3 Síntese 28
Capítulo III - Passagem de informação StressLab-ANSYS e verificação dos resultados 29
3.1 Introdução e objectivos 29
3.2 Passagem de Informação StressLab-ANSYS 30
3.3 Comparação dos resultados obtidos por ANSYS com StressLab 33
3.4 Conclusões 45
Capítulo IV - Optimização estrutural de um mini-autocarro recorrendo a ANSYS 47
4.1 Introdução e motivação para a escolha do trabalho 47
4.2 Definição dos objectivos e descrição do trabalho 49
4.3 Aplicação da metodologia de análise 50
4.3.1 Modelação do chassis Toyota e considerações de pré-processamento 50
4.3.2 Modelação da carroçaria e considerações de Pré-Processamento 54
4.3.3 Validação do modelo numérico global de simulação 55
4.3.4 Definição dos casos de estudo para o processo de Optimização Estrutural 57
4.4 Análise de resultados 58
4.4.1 Apresentação dos resultados e identificação de zona críticas 58
4.4.2 Propostas de optimização estrutural e consequente verificação 73
4.5 Discussão dos resultados e conclusões 79
Capitulo V - Estudo da aplicabilidade da tecnologia "sandwich" como elemento estrutural de tejadilho de autocarro 81
5.1 Introdução 81
5.2 Descrição de objectivos 82
5.3 Identificação do caso de estudo 83
5.4 Identificação da solução construtiva integral do tejadilho 85
5.5 Identificação da situação a testar 89
5.6 Concepção do ensaio 92

5.7 Apresentação dos Resultados 94
5.8 Comparação dos Resultados 102
5.9 Conclusões 104
5.10 Indicações para trabalhos subsequentes 105
Capitulo VI – Conclusões gerais 107
6.1 Síntese do trabalho desenvolvido 107
6.2 Conclusões 108
6.3 Experiência do autor 109
Referências e Bibliografia 111
Anexos 113

Lista de figuras

FIGURA 1 – INSTALAÇÕES GERAIS DA CAETANOBUS 6
FIGURA 2 - NÍVEL NOMINAL DE TENSÃO EM ELEMENTOS (ANSYS) 10
FIGURA 3 - ANÁLISE LOCAL DE LIGAÇÃO ENTRE ELEMENTOS (COSMOS) 11
FIGURA 4 – METODOLOGIA INICIAL DE CÁLCULO DE ESTRUTURAS DE AUTOCARROS, RECORRENDO A STRESSLAB 12
FIGURA 5 - AMBIENTE DA PLATAFORMA ANSYS APDL 13
FIGURA 6 - AMBIENTE DA PLATAFORMA ANSYS WORKBENCH 13
FIGURA 7 - BIBLIOTECA DE FORMAS EM ANSYS APDL 15
FIGURA 8 - TABELA DE REFERÊNCIA DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE PERFIS RESISTENTES 16
FIGURA 9 - EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS EM SOLIDWORKS 16
FIGURA 10 - EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS EM ANSYS APDL 17
FIGURA 11 - EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS EM SOLIDWORKS 18
FIGURA 12 - EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS EM ANSYS APDL 18
FIGURA 13 - EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS EM ANSYS APDL 19
FIGURA 14 - CASO DE ESTUDO COMPORTAMENTO À TORÇÃO 20
FIGURA 15 - EXEMPLO DE UMA CONSTRUÇÃO GEOMÉTRICA DO MODELO DE LINHAS SOBRE O MODELO CAD .. 22
FIGURA 16 - EXEMPLO DE UM PERFIL RESISTENTE COMPOSTO (NÃO NORMALIZADO) 23
FIGURA 17 - EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM PERFIL COMPOSTO 23
FIGURA 18 - EXEMPLO DE UM PERFIL RESISTENTE COMPOSTO (NÃO NORMALIZADO) 24
FIGURA 19 - EXEMPLO DA MODELAÇÃO DE UM PERFIL RESISTENTE COMPOSTO (NÃO NORMALIZADO) EM ANSYS 24
FIGURA 20 - ANÁLISE GRÁFICA NOS NÍVEIS DE TENSÃO 26
FIGURA 21 – PORMENOR DA ANÁLISE GRÁFICA NOS NÍVEIS DE TENSÃO 26
FIGURA 22 – ADAPTAÇÃO AO ANSYS DA METODOLOGIA DE ANÁLISE ESTRUTURAL DE AUTOCARROS 27
FIGURA 23 - MODELO CAD 3D URBANO CCFL-VOLVO 29
FIGURA 24 - DIAGRAMA DEMONSTRATIVO DO PROCESSO DE PASSAGEM DE INFORMAÇÃO STRESSLAB-ANSYS 30
FIGURA 25 - DIAGRAMA DE DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE PASSAGEM DE INFORMAÇÃO STRESSLAB-ANSYS 31
FIGURA 26 - MODELO DE SIMULAÇÃO STRESSLAB 32
FIGURA 27 - MODELO DE SIMULAÇÃO ANSYS 32
FIGURA 28 - COMPARAÇÃO STRESSLAB-ANSYS DA DEFORMAÇÃO ESTRUTURAL DA ESTRUTURA RESISTENTE EM 4 APOIOS 36
FIGURA 29 - COMPARAÇÃO STRESSLAB-ANSYS DA DEFORMAÇÃO ESTRUTURAL EM TORÇÃO ESQUERDA 37
FIGURA 30 - COMPARAÇÃO STRESSLAB-ANSYS DA DEFORMAÇÃO ESTRUTURAL EM TORÇÃO DIREITA 38
FIGURA 31 - DISTRIBUIÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO NA ESTRUTURA RESISTENTE G1 PARA O CASO DE 4 APOIOS 39
FIGURA 32 - DISTRIBUIÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO NA ESTRUTURA RESISTENTE G1 PARA O CASO DE 3 APOIOS FD 40
FIGURA 33 - COMPARAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO NA ESTRUTURA RESISTENTE G1 PARA TORÇÃO 3AFD 40
FIGURA 34 - DISTRIBUIÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO NA ESTRUTURA RESISTENTE G1 PARA O CASO DE 3 APOIOS FE 42
FIGURA 35 - COMPARAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO NA ESTRUTURA RESISTENTE G1 PARA TORÇÃO 3AFD 42
FIGURA 36 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS STRESSLAB-ANSYS DA CURVA CARACTERÍSTICA 43
FIGURA 37 - MODELO MINI-TURISMO OPTIMO 2K 47
FIGURA 38 - MODELO MINI-TURISMO OPTIMO 2K NA VERSÃO "LOW ENTRY" 48
FIGURA 39 - PESAGEM CHASSIS TOYOTA 50

FIGURA 40 - MODELO GEOMÉTRICO DO CHASSIS TOYOTA 50
FIGURA 41 - ELEMENTOS DOS SINOBLOCOS 51
FIGURA 42 - MODELAÇÃO SINOBLOCOS EM ANSYS (ELEMENTOS FINITOS REPRESENTATIVOS) 51
FIGURA 43 - ELEMENTO FINITO DE REPRESENTAÇÃO DOS SINOBLOCOS [3] 52
FIGURA 44 - MODELO FINAL DE SIMULAÇÃO DO CHASSIS TOYOTA 52
FIGURA 45 - CHASSIS TOYOTA EM 4 APOIOS 53
FIGURA 46 - CHASSIS TOYOTA EM TORÇÃO 53
FIGURA 47 - MODELO DE SIMULAÇÃO DA CARROÇARIA COM ELEMENTOS FINITOS TIPO "BEAM" 54
FIGURA 48 - MODELO DE SIMULAÇÃO DA CARROÇARIA COMPLETO ELEMENTOS FINITOS TIPO "BEAM" E "SHELL 54
FIGURA 49 - MODELO NUMÉRICO DE SIMULAÇÃO FINAL (CHASSIS+CARROÇARIA) 55
FIGURA 50 - EXEMPLO APLICAÇÃO CASO DE ESTUDO 3) 57
FIGURA 51 - TENSÃO NOMINAL NOS ELEMENTOS PARA CASO DE ESTUDO 3) 58
FIGURA 52 - NÍVEIS DE TENSÃO NA ZONA DE LIGAÇÃO ESTRADO-CHASSIS PARA CASO 3) 59
FIGURA 53 - REPRESENTAÇÃO 3D ZONA DE LIGAÇÃO ESTRADO-CHASSIS 59
FIGURA 54 - NÍVEIS DE TENSÃO NA ZONA DE LIGAÇÃO ESTRADO-CHASSIS PARA CASO 3) 59
FIGURA 55 - PORMENOR DO NÍVEL DE TENSÃO NA ZONA DE LIGAÇÃO ESTRADO-CHASSIS PARA CASO 3) 60
FIGURA 56 - REPRESENTAÇÃO NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS DA LIGAÇÃO 60
FIGURA 57 - PORMENOR DA REPRESENTAÇÃO 3D ZONA DE LIGAÇÃO ESTRADO-CHASSIS 61
FIGURA 58 - PORMENOR DA REPRESENTAÇÃO 3D ZONA DE LIGAÇÃO ESTRADO-CHASSIS 61
FIGURA 59 - NÍVEIS DE TENSÃO DA ZONA TRASEIRA PARA CASO 3) 62
FIGURA 60 - ZONA TRASEIRA DO VEÍCULO SUJEITA A ESFORÇOS ELEVADOS 62
FIGURA 61 -PORMENOR DA ZONA TRASEIRA DO VEÍCULO SUJEITA A ESFORÇOS ELEVADOS 63
FIGURA 62 -MODELO 3D DO VEÍCULO 63
FIGURA 63 - PORMENOR DA ZONA TRASEIRA DO VEÍCULO 63
FIGURA 64 - DEFORMAÇÃO RELATIVA DO ESTRADO 64
FIGURA 65 - NÍVEIS DE TENSÃO NA ESTRUTURA RESISTENTE E CHASSIS PARA CASO 4) 65
FIGURA 66 - NÍVEIS DE TENSÃO NA ZONA DA COXIA PARA CASO 4) 66
FIGURA 67 - IDENTIFICAÇÃO DO ELEMENTO COM ELEVADO NÍVEL DE TENSÃO NA ZONA DA COXIA 66
FIGURA 68 - NÍVEIS DE TENSÃO NA ZONA TRASEIRA PARA CASO 4) 67
FIGURA 69 - NÍVEIS DE TENSÃO NOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO AO PAINEL LATERAL NA ZONA TRASEIRA PARA CASO 4) 67
FIGURA 70 - NÍVEIS DE TENSÃO NA ZONA DAS PORTAS PARA CASO 4) 68
FIGURA 71 - NÍVEIS DE TENSÃO NA ESTRUTURA RESISTENTE E CHASSIS PARA CASO 5) 69
FIGURA 72 - NÍVEIS DE TENSÃO NA ZONA DA COXIA PARA CASO 5) 70
FIGURA 73 - NÍVEIS DE TENSÃO NA ZONA TRASEIRA PARA CASO 5) 70
FIGURA 74 - NÍVEIS DE TENSÃO DOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO AO ESTRADO NA ZONA TRASEIRA PARA CASO 5). 71
FIGURA 75 - NÍVEIS DE TENSÃO DOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO AO PAINEL LATERAL NA ZONA TRASEIRA PARA CASO 5) 71
FIGURA 76 - NÍVEIS DE TENSÃO NA ZONA DAS PORTAS PARA CASO 5) 72
FIGURA 77 - MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS DE OPTIMIZAÇÃO NA PLATAFORMA INFERIOR 73
FIGURA 78 - MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS DE OPTIMIZAÇÃO NA ZONA DO ESTRADO TRASEIRO 74
FIGURA 79 - MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS DE OPTIMIZAÇÃO NA LIGAÇÃO DO ESTRADO TRASEIRO AO PAINEL LATERAL 74

FIGURA 80 - MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS DE OPTIMIZAÇÃO NA ZONA DE LIGAÇÃO AO ESTRADO INFERIOR 75
FIGURA 81 - COLOCAÇÃO DE REFORÇOS 75
FIGURA 82 - DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO 75
FIGURA 83 - RESULTADOS PARA CASO DE ESTUDO 4) APÓS MODIFICAÇÕES DE OPTIMIZAÇÃO 76
FIGURA 84 - RESULTADOS PARA CASO DE ESTUDO 5) APÓS MODIFICAÇÕES DE OPTIMIZAÇÃO 76
FIGURA 85 - RESULTADOS NOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO PARA CASO DE ESTUDO 5) APÓS MODIFICAÇÕES DE OPTIMIZAÇÃO 77
FIGURA 86 - RESULTADOS NOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO PARA CASO DE ESTUDO 5) APÓS MODIFICAÇÕES DE OPTIMIZAÇÃO 77
FIGURA 87 - RESULTADOS NOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO PARA CASO DE ESTUDO 5) APÓS MODIFICAÇÕES DE OPTIMIZAÇÃO 78
FIGURA 88 - RESULTADOS NA ZONA DAS PORTAS PARA CASO DE ESTUDO 5) APÓS MODIFICAÇÕES DE OPTIMIZAÇÃO 78
FIGURA 89 - SECÇÃO TÍPICA DE UM MODELO AUTOCARRO DE TURISMO 83
FIGURA 90 - PORMENOR DA SECÇÃO TÍPICA DE UM MODELO AUTOCARRO DE TURISMO 83
FIGURA 91 - PORMENOR DA ESTRUTURA TÍPICA DO TEJADILHO DE UM MODELO AUTOCARRO DE TURISMO 84
FIGURA 92 - PORMENOR DA LIGAÇÃO PILAR-TEJADILHO DE UM MODELO AUTOCARRO DE TURISMO 84
FIGURA 93 - SOLUÇÃO CONSTRUTIVA INICIAL PARA TEJADILHO 85
FIGURA 94 - PORMENOR DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA INICIAL PARA TEJADILHO 86
FIGURA 95 – DIMENSÕES GERAIS DOS PROVETES 86
FIGURA 96 - DEFORMAÇÃO DA SUPER-ESTRUTURA EM CASO DE CAPOTAMENTO [5] 89
FIGURA 97 - ESPAÇO RESIDUAL DE SOBREVIVÊNCIA [10] 90
FIGURA 98 - DEFORMAÇÃO TÍPICA DO PÓRTICO DE RESISTÊNCIA [11] 90
FIGURA 99 - APLICAÇÃO DE MOMENTO DE FLEXÃO E DEFORMAÇÃO CARACTERÍSTICA 91
FIGURA 100 - MONTAGEM PARA ENSAIO 92
FIGURA 101 - PORMENOR DA MONTAGEM PARA ENSAIO 92
FIGURA 102 - PORMENOR DA FIXAÇÃO DA SOLUÇÃO PARA ENSAIO 93
FIGURA 103 - PORMENOR DA FIXAÇÃO DA SOLUÇÃO PARA ENSAIO 93
FIGURA 104 - DEFORMAÇÃO DA PLACA 1 APÓS ENSAIO 94
FIGURA 105 - GRÁFICO DO RESULTADO DO ENSAIO PLACA 1 95
FIGURA 106 - DEFORMAÇÃO DA PLACA 2 APÓS ENSAIO 96
FIGURA 107 - GRÁFICO DO RESULTADO ENSAIO PLACA 2 97
FIGURA 108 - DEFORMAÇÃO DA PLACA 3 APÓS ENSAIO 98
FIGURA 109 - GRÁFICO DO RESULTADO DO ENSAIO PLACA 3 99
FIGURA 110 - DEFORMAÇÃO DA PLACA 4 APÓS ENSAIO 100
FIGURA 111 - GRÁFICO DO RESULTADO DO ENSAIO PLACA 4 101
FIGURA 112 - GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA OS VÁRIOS PROVETES 102
FIGURA 113 - GRÁFICO DO ENSAIO PARA O TUBO DE AÇO UTILIZADO NA ACTUAL SOLUÇÃO CONSTRUTIVA DO TEJADILHO 103
FIGURA 114 - MODIFICAÇÕES PARA MELHORAR O COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA 104
FIGURA 115 - CURVATURA CARACTERÍSTICA DO TEJADILHO DE UM MODELO DE TURISMO 105
FIGURA 116 - CONFIGURAÇÃO DO PRÓXIMO PROVETE A ENSAIAR 106

Lista de tabelas

TABELA 1 - CRONOGRAMA DAS ACTIVIDADES 5
TABELA 2 - MODELOS ACTUALMENTE PRODUZIDOS NA CAETANOBUS 8
TABELA 3 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS 17
TABELA 4 - RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DA IT 21
TABELA 5 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS STRESSLAB-ANSYS 33
TABELA 6 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS STRESSLAB-ANSYS 33
TABELA 7 - GRUPOS DE ELEMENTOS NO MODELO NUMÉRICO 34
TABELA 8 - COMPARAÇÃO STRESSLAB-ANSYS DO PESO E CENTRO DE GRAVIDADE DA ESTRUTURA RESISTENTE 35
TABELA 9 - COMPARAÇÃO STRESSLAB-ANSYS DE PESO DE COMPONENTES 35
TABELA 10 - COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE TENSÃO VM NA ESTRUTURA RESISTENTE G1 PARA TORÇÃO 3AFD 41
TABELA 11 - COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE TENSÃO VM NA ESTRUTURA RESISTENTE G1 PARA TORÇÃO 3AFE 43
TABELA 12 - COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE TENSÃO VM NA ESTRUTURA RESISTENTE G1 44
TABELA 13 - VALIDAÇÃO MODELO SIMULAÇÃO CHASSIS 53
TABELA 14 - CASOS DE ESTUDO PARA VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO GLOBAL 55
TABELA 15 - VALIDAÇÃO MODELO GLOBAL DE SIMULAÇÃO PARA CASO DE ESTUDO 1) 56
TABELA 16- VALIDAÇÃO MODELO GLOBAL DE SIMULAÇÃO PARA CASO DE ESTUDO 2) 56
TABELA 17 - CASOS DE ESTUDO PARA O PROCESSO DE OPTIMIZAÇÃO 57
TABELA 18 - PLACAS MODELO PARA TESTAR (COMBINAÇÃO DE MATERIAIS) 87
TABELA 19 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS EM ESTUDO 88

Glossário

Ferramentas de Simulação
Consiste em empregar técnicas matemáticas em computadores com o propósito de imitar um processo ou operação do mundo real. Desta forma, para ser realizada uma simulação, é necessário construir um modelo computacional que corresponda à situação real que se deseja simular.

MEF – Método dos Elementos Finitos
É uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais

VM – von mises
Designação comummente utilizada no dimensionamento de estruturas metálicas e que se refere a um critério de resistência de um determinado material.

EF – Elementos Finitos

FEUP- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Elementos de "Beam" ou "Viga"
Tipo de elemento Finito unidimensional

Elementos de "Shell" ou "Casca"
Tipo de elemento Finito bidimensional

Elementos "Solid"
Tipo de elemento Finito tridimensional

Ferramentas CAE
Ferramenta de Auxilio à Engenharia.

Ferramentas CAD
Ferramenta de Auxilio ao desenho.

C.G. - Centro de Gravidade

4A – Caso de estudo considerado no cálculo estrutural de autocarros que corresponde à situação do modelo numérico apoiado em 4 apoios, os 4 rodados de um veículo.

3AFD – Caso de estudo considerado no cálculo estrutural de autocarros que corresponde à situação do modelo numérico apoiado em 3 apoios, os 2 rodados traseiros e o rodado frontal direito de um veículo.

3AFE – Caso de estudo considerado no cálculo estrutural de autocarros que corresponde à situação do modelo numérico apoiado em 3 apoios, os 2 rodados traseiros e o rodado frontal esquerdo de um veículo.

Capítulo I – Introdução

1.1 Generalidades

Tendo em conta a grande competitividade dos mercados actuais, muitas são as grandes empresas que apostam cada vez mais em tecnologias de simulação avançadas no auxílio ao desenvolvimento dos seus produtos e pessoal tecnicamente capaz de tirar máximo partido destas ferramentas que possibilitam a optimização do produto a vários níveis. Neste contexto, a simulação virtual assume um papel bastante importante no processo de desenvolvimento do produto.

Para alcançar um projecto melhor, mais rápido, mais barato e inovar o próprio processo de desenvolvimento de produto, é fundamental contar com ferramentas que permita que as pessoas qualificadas tomem as decisões correctas e validem seus projectos desde o início do seu desenvolvimento. A *Simulação Virtual* está actualmente acessível e utilizável por engenheiros e projectistas da indústria, que são, na verdade a linha de frente de trabalho.

Utilizar a simulação significa ter acesso a produtos melhores, mais rápidos, mais baratos e lançados mais rapidamente no mercado. O recurso à simulação em projectos ajuda as empresas a chegar mais rápido ao mercado e isso acontece porque os erros de projecto são identificados precocemente, permitindo aos responsáveis pelo desenvolvimento de produto alterar o curso, encontrar o caminho para realizar correcções e, finalmente, obter produtos menos custosos e que funcionam melhor.

1.2 Motivação e contexto do trabalho

Este trabalho de Mestrado Integrado surge por dois principais motivos, o primeiro está relacionado com a vontade de dar continuidade ao trabalho de Projecto de fim de Curso desenvolvido anteriormente pelo autor [1], usufruindo dos novos conhecimentos entretanto adquiridos na actividade profissional que permitiram aperfeiçoar as metodologias de cálculo de estruturas de carroçarias de autocarros com base em ferramentas de cálculo pelo Método dos Elemento Finitos.

O segundo está relacionado com a vontade do autor em explanar a evolução de metodologias de abordagem ao cálculo de estruturas complexas que foram desenvolvidas em contexto real de trabalho, dentro do departamento de Engenharia da CaetanoBus.

O trabalho de Mestrado Integrado descrito de seguida só foi possível de realizar devido à excelente possibilidade que o departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia proporcionou, através do seu director. É um trabalho se propõe a demonstrar metodologias de análise de estruturas de autocarros por ferramentas de simulação avançadas e com base em métodos estudados e desenvolvidos dentro do departamento de Engenharia da CaetanoBus. De uma forma geral podemos definir este trabalho como sendo de investigação num contexto prático e profissional.

1.3 Objectivos gerais

Os objectivos gerais a que se propõe este trabalho de Mestrado são de descrever métodos de resolução de problemas típicos de Engenharia, com grande conteúdo de investigação, que foram surgindo ao longo do carreira profissional o autor enquanto Engenheiro a desempenhar funções técnicas no Departamento de Engenharia da CaetanoBus.

A resolução de alguns problemas conta com conhecimento base adquirido pelo autor enquanto finalista da Licenciatura mas como a evolução tecnológica é uma preocupação da empresa, novos desafios de Engenharia surgiram ao longo do tempo e um dos principais objectivos deste trabalho é de dar continuação ao anterior trabalho, demonstrando que os conhecimentos adquiridos em contexto académico são essenciais para o bom desempenho profissional dos jovens Engenheiros formados pela Faculdade de Engenharia.

Por outro lado, este trabalho pretende demonstrar a preocupação da empresa CaetanoBus em recorrer às mais recentes tecnologias e ferramentas avançadas de desenvolvimento do produto para ser uma empresa competitiva nos mercados internacionais. Assim, outro importante objectivos é dar a conhecer um pouco a forma de trabalhar e desenvolver métodos de abordagem a problemas de Engenharia em contexto real e prático de trabalho industrial. Utilizando para isso conhecimento de ferramentas avançadas de simulação, experiencia profissional e a consulta e o acompanhamento técnico por parte de Engenheiros experientes.

É importante referir que este trabalho foi possível de ser realizado também pela boa vontade da empresa CaetanoBus em disponibilizar tempo e meios que possibilitaram a sua realização. Esta oportunidade surge devido à preocupação da empresa em dar a oportunidade aos seus quadros técnicos de aumentarem o seu conhecimento e grau académico para melhor contribuírem para o potencial tecnológico da empresa e formação interna de funcionários. Por esta razão, este trabalho será descrito de uma forma simples e directa porque um dos objectivos é ser disponibilizado dentro da empresa para consulta interna.

Por fim, o principal objectivo do autor é de apresentar métodos de análise de estruturas complexas que não estarão limitados na aplicação ao projecto de carroçarias de autocarros e poderão ser considerados em outras situações que em se debatam com os mesmos problemas e objectivos finais.

1.4 Objectivos específicos e organização do texto

Uma vez descritos os objectivos gerais é importante referir os objectivos específicos que este trabalho pretende atingir e sua organização geral. Como esta Tese de Dissertação se estendeu por um período considerável (aproximadamente 9 meses), vários assuntos foram possíveis de ser abordados, estudados e agora descritos neste presente relatório.

Para além do capítulo introdutório, o presente trabalho está dividido em 5 principais capítulos, cujo conteúdo é o seguinte:

II. Evolução da metodologia de cálculo de estruturas de modelos de autocarros, por MEF recorrendo à ferramenta ANSYS

Nesta parte do trabalho serão demonstrados métodos gerais de abordagem ao problema do cálculo de estruturas resistentes de autocarros, onde também será relembrado o método anteriormente utilizado. Será apresentado trabalho de investigação sobre usabilidade, apreciações, vantagens e potencialidades do novo programa de simulação ANSYS. Por fim será apresentada a adaptação da metodologia de análise estrutural ao programa ANSYS.

III. Passagem de informação StressLab-ANSYS e verificação dos resultados

A salvaguarda de informação já existente no anterior programa de simulação é crucial para a empresa e este capítulo apresenta o resultado do trabalho de investigação que produziu um método para passagem de informação entre programas de simulação.

A partir desta tarefa foi possível comparar resultados entre programa de simulação e compreender até que ponto é possível concluir se os resultados produzidos por programas diferentes são idênticos. O objectivo é validar o novo programa ANSYS e realizar uma espécie de "calibração" do programa para conhecer pontos de referência a partir do qual o processo de optimização deve intervir.

IV. Optimização estrutural de um mini-autocarro recorrendo a ANSYS

Este tema é dedicado à aplicação do método de estudo de estruturas complexas, recorrendo ao programa ANSYS, descrito no capítulo 1. Será apresentado um caso de estudo real e pretende-se aplicar todo o conhecimento de investigação sobre potencialidades do programa. Alguns novos desafios emergiram deste trabalho que contribuíram para o aumento do conhecimento da aplicação das ferramentas do ANSYS com elevado potencial.

O objectivo deste trabalho torna-o bastante importante porque é um caso de estudo cujos resultados geraram soluções com aplicação prática e imediata.

V. Estudo da aplicabilidade da tecnologia "sandwich" como elemento estrutural de tejadilho de autocarros

Este capítulo representa a preocupação da empresa em ser tecnologicamente avançada e pretende apresentar parte de um trabalho de investigação para o desenvolvimento de um novo método de fabricação de carroçarias de autocarros. Este capítulo tem uma forte componente experimental e de análise de resultados.

VI. Conclusões gerais

Serão enunciadas conclusões específicas no final de cada tema para reter o que mais importante foi possível concluir e no desfecho deste trabalho serão apresentadas conclusões gerais do trabalho que permitiram ao autor evoluir como aluno de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica e a experiência que também permitiu ao autor evoluir como técnico de uma grande empresa.

Oportunidades de melhoria e novos temas emergentes

Tal como em todos os trabalhos complexos de Engenharia ligados à investigação, existe sempre oportunidades de melhoria que não podem ser aplicadas devido a vários factores. Por outro lado, a partir de trabalhos complexos podem surgir temas bastante interessantes que não servem directamente o objectivo inicial proposto.

Relembrando que este trabalho foi realizado em contexto industrial, convém transmitir que os temas anteriormente propostos com elevado conteúdo de investigação académica foram escolhidos porque serviam objectivos e necessidades do departamento de Engenharia no qual o autor está inserido profissionalmente. Por esta razão, alguns temas poderiam ter sido abordados para além do objectivo inicial porque continham matéria e conteúdo suficiente mas as necessidades de resposta ao desenvolvimento de projectos em curso no departamento prevaleceram.

Contudo, este trabalho também pretende ser uma porta aberta a oportunidades de melhoria e o ponto de partida para outros trabalhos que podem ramificar a partir desta Tese de Dissertação. Por isso, para alguns temas serão enunciados oportunidades de melhoria e temas interessantes em abordar que enriqueciam o trabalho desenvolvido.

Organização do texto

Porque se pretende que o presente trabalho seja direccionado para a sua posterior utilização e consulta em contexto industrial, este é apresentado de uma forma simples e objectiva. Qualquer interesse por aprofundar questões específicas, enunciadas neste trabalho, pode ser realizado por consulta dos anexos ou referências.

1.5 Meios tecnológicos

Para o desenvolvimento dos objectivos propostos foi importante a formação adquirida durante a Licenciatura mas também o acréscimo de conhecimento proporcionada pela empresa em programas de cálculo específicos com base no MEF, tais como:

- ✓ Softwares (CAD) de projecto: Solidworks
- ✓ Software (CAE) e cálculo por Método Elementos Finitos: StressLab e ANSYS

1.6 Cronologia do trabalho de Mestrado

Todas as actividades enunciadas de seguida realizaram-se no período compreendido entre Setembro de 2009 e Junho de 2010 e enquadram-se nos objectivos propostos inicialmente.

Tabela 1 - Cronograma das Actividades

Actividades Desenvolvidas	**Ano**	**2009**				**2010**						
	Mês	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
Definição dos temas a abordar												
II. Evolução da Metodologia de Cálculo de Estruturas de modelos de Autocarros, por E.F. recorrendo à ferramenta ANSYS												
III. Passagem de informação StressLab-ANSYS e verificação dos resultados												
IV. Optimização estrutural de um mini-autocarro recorrendo a ANSYS												
V. Estudo da aplicabilidade da tecnologia "sandwich" como elemento estrutural de tejadilho de autocarros												
Reunião de acompanhamento												
Elaboração de relatório de Mestrado												

1.7 A empresa CaetanoBus

1.7.1 Descrição da empresa

As origens da CaetanoBus remontam a 1946, ano em que Salvador Fernandes Caetano fundou uma inovadora fábrica de carroçarias para autocarros, a primeira em Portugal a fabricar, por exemplo, estruturas totalmente metálicas, em 1955. Estes foram os primeiros passos de um percurso empresarial de sucesso, hoje concretizado no Grupo Salvador Caetano, e no seio do qual nasceu a CaetanoBus em 2002, em parceria com a Daimler-Chrysler.

A empresa conta com a larga experiência adquirida ao longo de 50 anos de actividade e com o elevado potencial humano dos seus cerca de 600 colaboradores a operar na Divisão Fabril de Gaia.

A fábrica ocupa uma área total de 150 000 m^2, sendo 50 000 m^2 cobertos, os quais na sua maioria dizem respeito à área de montagem. Esta área dispõe de 5 naves principais, sendo duas de montagem que se repartem por uma de montagem de modelos em produção e outra para desenvolvimento de protótipos, uma de pintura, uma de acabamentos e finalmente uma de retoques finais para entrega de clientes. Existem ainda os armazéns de peças, materiais, tintas e dos comerciais pós-vendas. Como se pode observar na figura 1, as instalações gerais da CaetanoBus estão perfeitamente integradas no panorama urbanístico circundante.



Figura 1 – Instalações gerais da CaetanoBus

A CaetanoBus produz carroçarias montadas em chassis de várias marcas e com diferentes especificações, consoante as exigências dos clientes. Os seus principais e consolidados produtos destinam-se a serviços de Turismo, transporte Interurbano, Urbano e serviço de aeroportos. A maior parte da produção destina-se à exportação salientando-se os mercados Alemão, Inglês e Espanhol. Sendo esta empresa uma referencia, a nível nacional no sector de actividade no qual se enquadra.

Enquanto criador e fabricante de carroçarias e autocarros, a CaetanoBus aposta na relação qualidade-preço, de forma a satisfazer totalmente os clientes e os utilizadores dos seus produtos. Para tal, investe na melhoria contínua da produção, numa eficiente utilização dos recursos e no recurso a ferramentas avançadas de auxílio ao projecto.

1.7.2 Actualidade

Em Janeiro de 2010 terminou a participação alemã no capital da empresa, tendo o Grupo Salvador Caetano adquirido a totalidade das acções na posse da Daimler (26% do capital social da empresa).

A CaetanoBus é hoje em dia o maior e mais bem equipado fabricante de carroçarias em Portugal. A marca CAETANO ultrapassou há muito os limites das nossas fronteiras, sendo hoje reconhecida nos seus mercados como uma referência, quer pelo design e qualidade, quer pela fiabilidade dos seus produtos (ver site oficial em www.caetanobus.pt).

Actualmente, a CaetanoBus encontra-se a produzir carroçarias de autocarros de turismo (com mais de que um modelo), circulação suburbana, circulação interurbana e circulação em aeroportos, com destino aos mercados referidos e nacional mas a curto prazo, irá iniciar a produção de novos modelos que por um lado pretendem cobrir um nicho de mercado e por outro representar o avanço da tecnologia na fabricação de novos autocarros com preocupação ambiental. A tabela 2 ilustra os modelos actualmente produzidos pela CaetanoBus.

Tabela 2 - Modelos actualmente produzidos na CaetanoBus

Serviço	Modelo	
Turismo	CT650 Caetano Turismo	
	CI200 Caetano Intercity	
Urbano	CB512 City Gold	
	Single Decker	
	CB518 City Gold	
	Double Decker	
Aeroporto	Cobus	
Mini-Turismo	CS700 OPTIMO	

Capítulo II - Evolução da metodologia de cálculo estrutural de autocarros, recorrendo à ferramenta ANSYS

2.1 Introdução e objectivos

Como um dos capítulos centrais do presente trabalho de mestrado, pretende-se apresentar a evolução dos métodos de análise de cálculo de estruturas de autocarros, desde do trabalho de fim de curso anteriormente realizado pelo autor [1].

Esta evolução surge a partir de um grande trabalho de investigação e de adaptabilidade a um novo programa de cálculo por MEF que foi necessário fazer por motivos de extinção do anterior programa que a CaetanoBus utilizava.

Devido ao elevado investimento que uma mudança de software CAE representa, todo o processo teve de ser bem estudado e planeado desde da escolha do programa até a formação necessária para começar a utilizar, passando pela definição da metodologia de análise que depende do funcionamento do programa escolhido.

Foi precisamente devido à necessidade de estudar a adaptação da metodologia inicial de abordagem ao problema de análise estrutural de carroçarias de autocarros utilizando um novo programa de cálculo por EF que o autor considerou importante a sua exposição, uma vez que várias implicações e novas considerações na abordagem surgiram. Isto acontece numa altura em que o autor já havia realizado uma série de cálculos de autocarros (modelos diferentes) e todo o seu conhecimento e competência claramente evoluíram desde do seu trabalho de fim de curso.

Para além de apresentar a importância do estudo de uma metodologia adaptada a um novo programa de cálculo e todo o aumento de conhecimento na análise estrutural (novas considerações e potencialidades) o autor pretende que este capítulo tenha uma projecção mais alargada porque ao longo do tempo de utilização do novo e avançado programa de cálculo por EF constatou-se que poucas entidades utilizavam metodologias idênticas e não estavam sensibilizados para as suas potencialidades. Assim, pretende-se demonstrar que esta metodologia não estará limitada na aplicação do projecto de carroçarias de autocarros e poderá ser considerada em outras situações que se debatam com os mesmos problemas.

2.2 Metodologias de análise do comportamento estrutural de autocarros

Em primeiro lugar será conveniente apresentar os conceitos gerais na abordagem ao problema da análise estrutural de autocarros. Estes conceitos têm como suporte o conhecimento adquirido no trabalho de fim de curso que serve de base à experiência profissional adquiriria ao longo do tempo, pela realização de vários modelos de cálculo por Elementos Finitos.

A abordagem à análise estrutural de autocarros é um verdadeiro problema de Engenharia na medida em que todas as considerações iniciais tomadas são sustentadas por conceitos e raciocínios de forma a viabilizar os resultados finais obtidos.

A experiência neste tipo de trabalho é fundamental para sustentar as considerações tomadas e ajuda bastante na análise de resultados. É precisamente na análise de resultados que reside grande parte do trabalho de Engenheiro porque não os basta obter e tomar decisões, é necessário avaliar e criticar os resultados para que as decisões se revelem úteis e vantajosas.

Geralmente, a análise estrutural de um modelo de autocarro é realizada em duas fases:

2.2.1 Análise global da estrutura completa de um modelo

É o estudo que possibilita avaliar o comportamento global da estrutura permitindo a optimização (redução de elementos críticos e de peso) e compreensão do comportamento típico de cada modelo de autocarro e que poderá servir de base à elaboração de novos projectos.

Os modelos numéricos utilizam malhas de elementos finitos com elementos do tipo "Viga" e "Cascas" porque se pretende reduzido tempo de cálculo (tendo em conta que o modelo numérico é bastante complexo) e rápida obtenção de resultados após modificação e verificação de várias soluções construtivas.

A figura 2 ilustra como este tipo de análise permite avaliar os níveis de tensão nominais dos elementos da estrutura considerando que todas as ligações entre perfis são rígidas. Assim, os resultados obtidos apresentam os níveis de tensão dos elementos mas não necessariamente o que acontece na ligação entre eles.

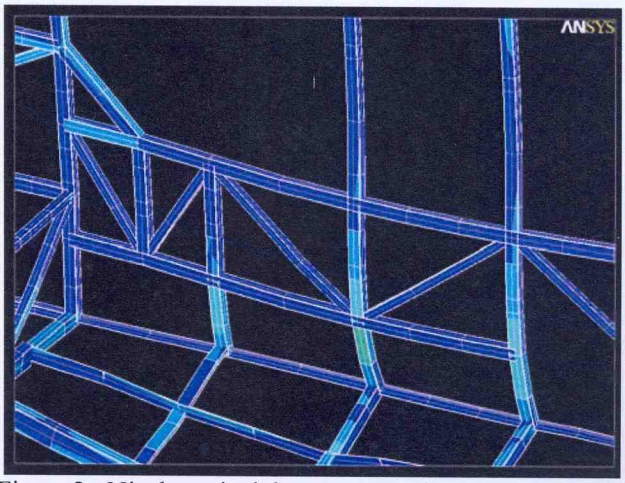


Figura 2 - Nível nominal de tensão em elementos (ANSYS)

2.2.2 Análise Local

É uma avaliação localizada que se realiza quando se pretende estudar pormenorizadamente as ligações entre elementos da estrutura e a sua optimização (redução de concentração de tensão). Esta análise utiliza como inputs dados da análise global.

Neste tipo de análise, recorre-se a modelos de E.F. com elementos do tipo "Solid" porque se pretende um elevado grau de detalhe nos resultados (ver exemplo da figura 3) e os modelos numéricos não são muito complexos, pelo que não compromete o tempo de cálculo, tendo em conta as capacidades actuais de hardware da CaetanoBus.

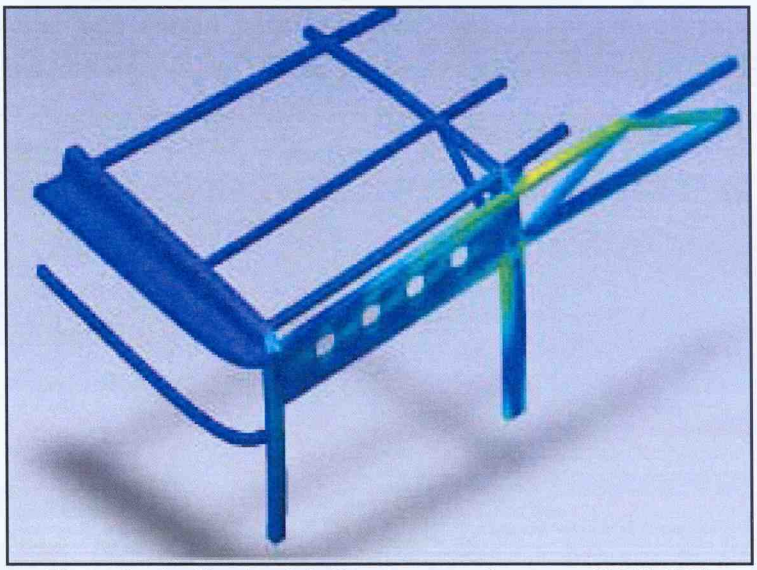


Figura 3 - Análise local de ligação entre elementos (COSMOS)

Tal como referido anteriormente, desde longa data, cálculo estrutural na CaetanoBus tem sido realizado com recurso ao software StressLab. Mas porque este programa foi descontinuado, foi necessário escolher uma alternativa.

Depois de um elaborado processo de escolha, o novo programa de cálculo por E.F. elegido foi o ANSYS [A]. Esta escolha foi baseada num estudo que fez parte de um trabalho de estágio de fim de curso [2] elaborado por um estagiário da FEUP cuja orientação e acompanhamento foi prestado pelo autor do presente trabalho.

Neste trabalho podem ser observadas as principais características necessárias para a análise estrutural que o programa necessitaria de permitir e as razões que levaram à sua escolha em detrimento de outras opções.

Com a entrada de um novo programa de cálculo por elementos finitos existiu a necessidade de adaptar a metodologia de abordagem dependendo da forma de utilização do novo programa de cálculo.

Em seguida o autor relembra a metodologia inicialmente utilizada, com recurso a StressLab e as diferenças para a adaptação à utilização do novo programa, com as vantagens, implicações e novas potencialidades que o novo programa possibilita e ainda o desenvolvimento do conhecimento adquirido.

Também são apresentados uma série de estudos complementares que ajudaram a melhor compreender a utilização da nova ferramenta ANSYS e que contribuíram bastante para o desenvolvimento da metodologia actualmente utilizada.

2.2.3 Descrição da metodologia inicial utilizando StressLab

Para melhor compreender o que mudou e que novos conceitos e potencialidades surgiram com a entrada do novo programa de cálculo será importante relembrar a metodologia inicial. Na figura 4 apresenta-se um esquema que pretende explanar de forma sucinta e global a metodologia de análise de estruturas de autocarros, independentemente do tipo de autocarro em questão (urbanos, turismos ou citadinos).

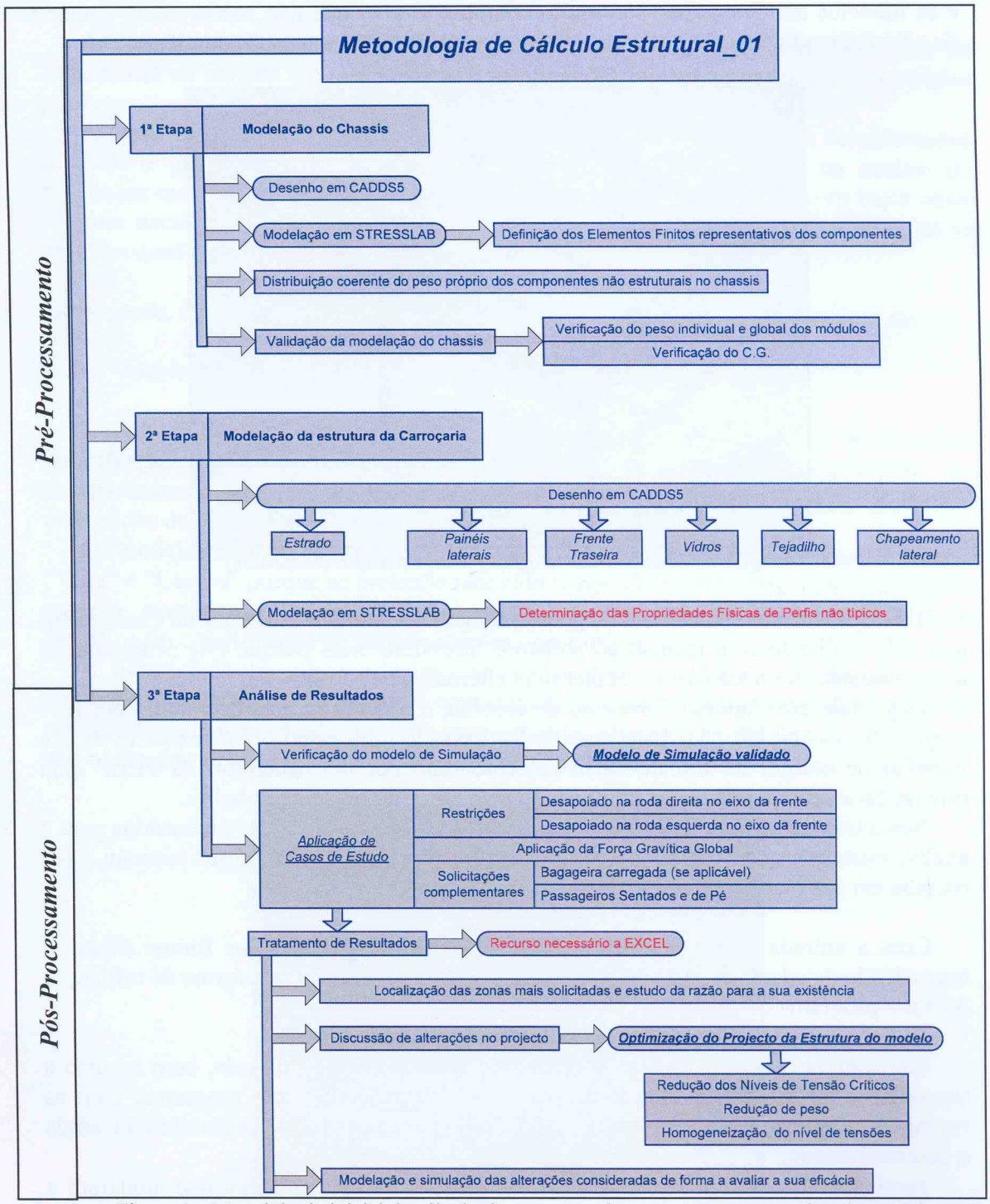


Figura 4 – Metodologia inicial de cálculo de estruturas de autocarros, recorrendo a StressLab

2.2.4 Estudos para o desenvolvimento de metodologias utilizando ANSYS

Como referido anteriormente, a actual metodologia de análise estrutural de carroçarias de autocarros é realizada com recurso à nova ferramenta CAE, ANSYS.

O programa ANSYS é constituído por duas plataformas de análise: ANSYS WorkBench (figura 6) e ANSYS APDL (figura 5). Ambas permitem a construção geométrica do modelo e todos os processos necessários para o pré e pós processamento do modelo numérico.

Porém, por ser mais antiga, a plataforma ANSYS APDL é a mais completa e a que oferece maiores potencialidades e funcionalidades [A]. ANSYS WorkBench é uma plataforma recente que surgiu para facilitar o uso do programa (tornar mais "user friendly") e ainda se encontra num processo de passagem de funcionalidades.

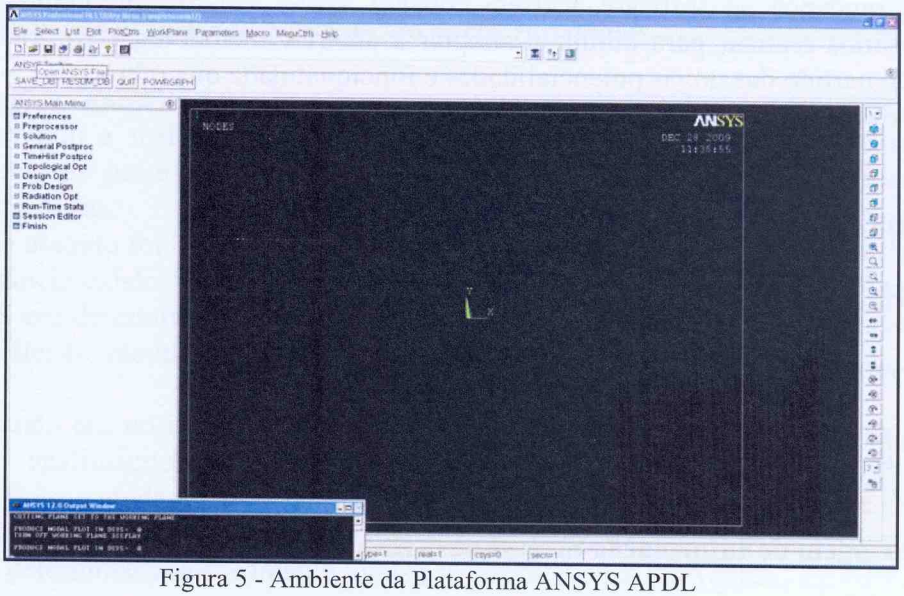


Figura 5 - Ambiente da Plataforma ANSYS APDL

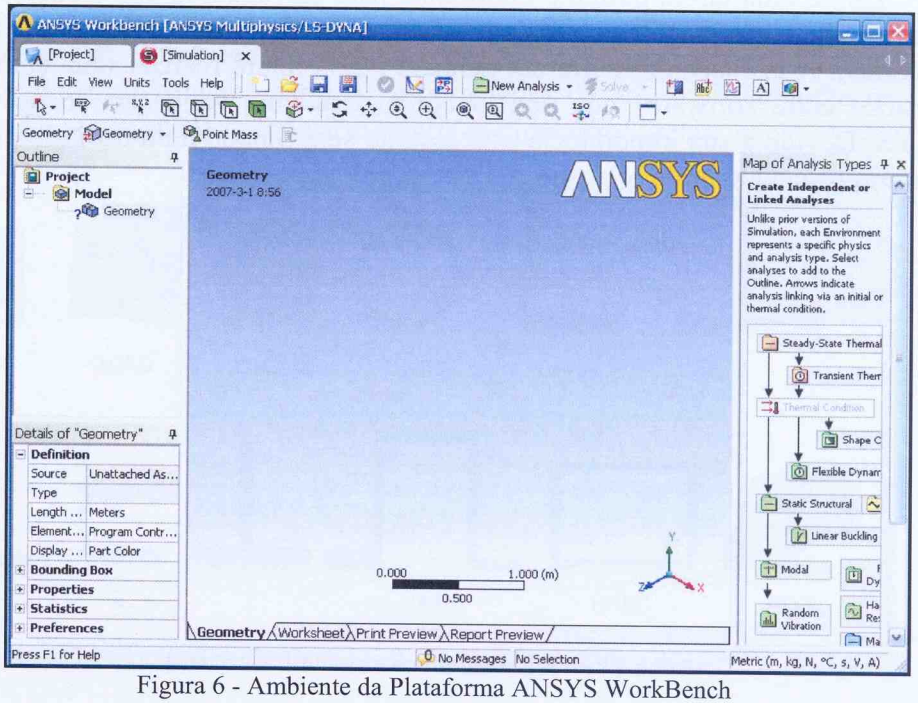


Figura 6 - Ambiente da Plataforma ANSYS WorkBench

A primeira dúvida na utilização do programa foi qual a plataforma do ANSYS mais indicada para realizar o cálculo estrutural de um modelo de autocarro. A experiência do autor no manuseamento de programas de cálculo por Elementos Finitos (StressLab) pendia para a necessidade de utilizar a plataforma ANSYS APDL.

Esta ideia inicial, que mais tarde se veio a confirmar, advém do facto dos programas mais complicados de se utilizar são de facto os que apresentam maiores vantagens porque o utilizador controla melhor o pré e pós processamento do modelo numérico. Este facto pode ser confirmado por utilizadores experientes em programas como StressLab, AutoCad e outros, nos quais existe uma grande interacção entre o programa e o utilizador.

A mudança de software acarreta consigo vários estudos importantes que foram necessários realizar para definir e adoptar a anterior metodologia ao novo programa, tirando partido das novas potencialidades e funcionalidade que oferece.

De seguida apresentam-se alguns dos mais importantes:

A: Utilização da plataforma ANSYS mais indicada

Importação da geometria CAD

Determinação das propriedades físicas dos perfis resistentes

Cálculo da propriedade física Inércia à Torção - It

B: Passagem de Informação StressLab-ANSYS

Esta é uma tarefa bastante importante para salvaguarda dos modelos de cálculo já realizados pelo autor no anterior programa StressLab (cerca de 8 modelos numéricos). A execução desta tarefa também possibilitará realizar uma comparação de resultados entre softwares que poderá conduzir a uma validação do novo software ANSYS. Devido à sua importância este assunto será tratado num capítulo próprio mais à frente apresentado neste relatório.

2.2.4.1 Utilização da plataforma ANSYS mais indicada

Importação da geometria CAD

A primeira fase da construção de um modelo numérico passa pela elaboração do modelo geométrico que serve de base para a definição da malha de Elementos Finitos. Tomando partido da definição CAD (em SolidWorks) dos modelos de autocarros projectados pela CaetanoBus existiu a necessidade primária de testar a importação directa para as plataformas do programa ANSYS. Foram realizados vários testes e ensaios para garantir a correcta passagem de toda a informação CAD.

A conclusão deste trabalho foi que apenas é possível a passagem integral de informação CAD de forma segura para a plataforma ANSYS APDL.

Determinação das propriedades físicas dos perfis resistentes

Uma das questões mais importante na utilização de um programa de cálculo por E.F. (recorrendo a malhas com elementos de viga) é a sua capacidade de calcular correctamente as propriedades físicas características de cada elemento resistente na estrutura a analisar.

Este assunto foi bastante relevante na decisão da escolha do programa e devido à sua importância existiu um estudo preliminar com o objectivo confirmar a capacidade do ANSYS em determinar correctamente as propriedades físicas mais relevantes (área, inércias de flexão, módulos de resistência, constante de distorção, etc.).

Quando era utilizado o anterior programa de cálculo StressLab, era necessário determinar analiticamente todas as propriedades relevantes para cada elemento resistente. Com a ajuda de tabelas o trabalho era facilitado mas existia sempre cerca de 30% de elementos que não constam das tabelas normalizadas e para estes elementos era necessário determinar analiticamente todas a as propriedades relevantes.

Com a utilização do ANSYS APDL, deixa de ser necessário calcular paralelamente estas propriedades porque o programa possui uma ferramenta bastante prática que determina internamente as propriedades de um vasto conjunto de formas (ver figura 7), sendo apenas necessário referir as dimensões gerais.

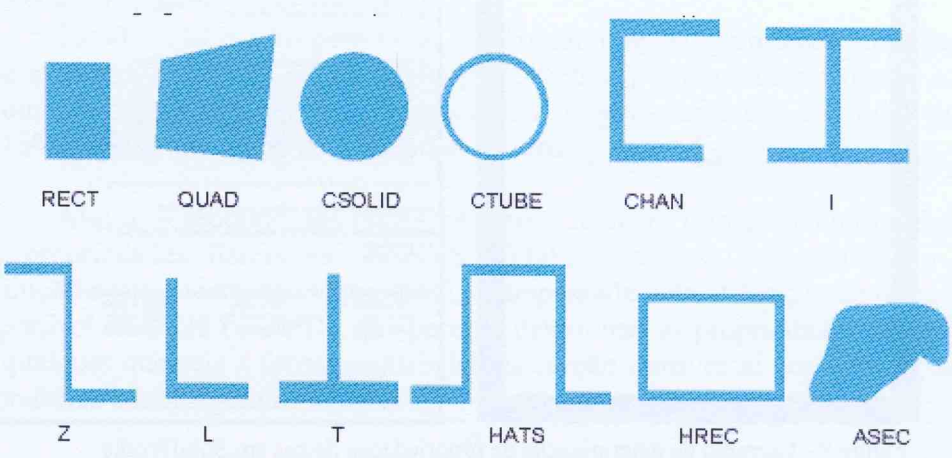


Figura 7 - Biblioteca de formas em ANSYS APDL

A avaliação da correcta determinação das propriedades físicas em ANSYS APDL foi realizada por comparação dos resultados obtidos com a ferramenta própria para o efeito disponibilizada pelo programa CAD SolidWorks (ver figura 9), e também por comparação de valores de tabelas internas de fornecedores de perfis normalizados (figura 8). Para este estudo utilizou-se o exemplo do perfil PFO-60x50x3, vulgarmente utilizado nas estruturas de autocarros.

Seitenlängen h | b Nennmaß		Grenzabmaße h + b	Wanddicke s Nennmaß	Grenzabmaße	Rundung r	DIN 2395-3	EN 10210-2	Gewicht G kg/m	Querschnitt A cm²	Statische Werte für b Biegung Achse x-x J_x cm⁴	W_x cm³	i_x cm	Biegung Achse y-y J_y cm⁴	W_y cm³	i_y cm	Verdrehung J_t cm⁴	W_t cm³
60	35	±1% f	3,0	-10% g	4,5		x	4,07	5,19	23,6	7,87	2,13	10,03	5,73	1,39	23,2	9,6
							x										
	40	±0,35	1,5	±10%	2,6	x		2,25	2,86	14,5	4,82	2,25	7,75	3,88	1,65	15,9	6,75
			2,0		3,5	x		2,95	3,75	18,6	6,19	2,22	9,90	4,95	1,62	20,6	8,79
			3,0		5,3	x		4,28	5,45	25,7	8,57	2,17	13,6	6,80	1,58	29,1	12,6
		±1% f		-10% g	4,5		x	4,31	5,49	26,1	8,68	2,18	13,7	6,86	1,58	29,2	11,2
		±0,35	5,0		10	x		6,31	8,04	33,4	11,1	2,04	17,7	8,86	1,48	43,8	18,8
	50	±0,4	2,0		3,5	x		3,26	4,15	21,9	7,31	2,30	16,6	6,62	2,00	29,7	11,1
			3,0	±10%	5,3	x		4,75	6,05	30,6	10,2	2,25	23,0	9,21	1,95	42,3	16,0
			4,0		7	x		6,14	7,82	37,9	12,6	2,20	28,4	11,4	1,91	53,4	20,4
	60	±0,5	1,5		2,6	AE		2,72	3,46	19,6	6,5	2,38	-	-	-	30,0	10,3
			3,0		5,3	x	-	5,22	6,65	35,5	11,8	2,31	-	-	-	56,8	19,4
		±1% f	5,0	-10% g	7,5		x	8,3	10,57	52,4	13,3	2,23	-	-	-	86,4	25,7

Figura 8 - Tabela de referência de propriedades físicas de perfis resistentes

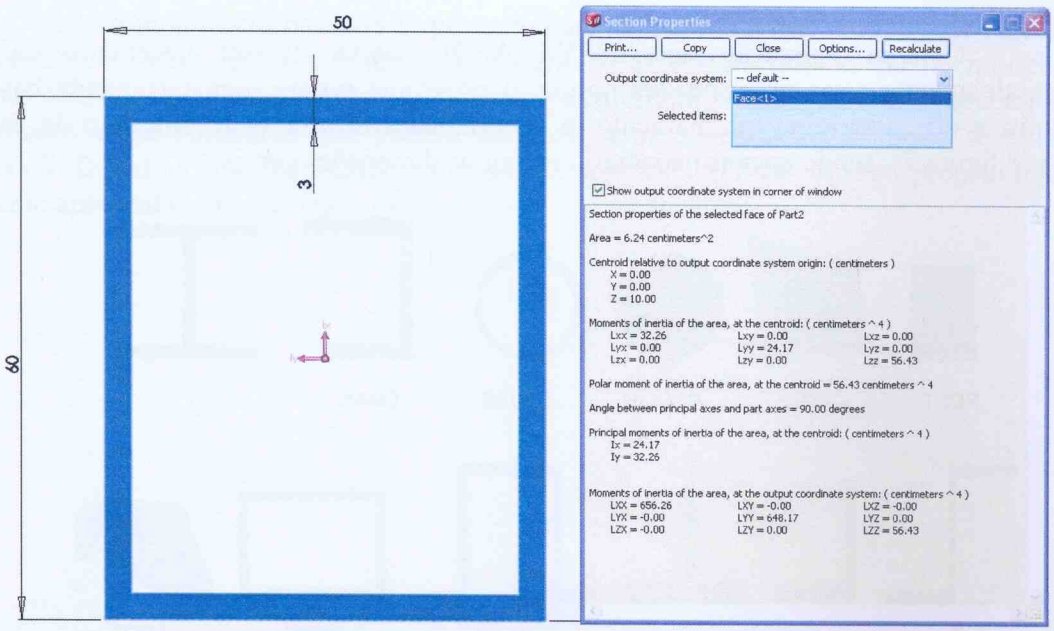


Figura 9 - Exemplo de determinação de propriedades físicas em SolidWorks

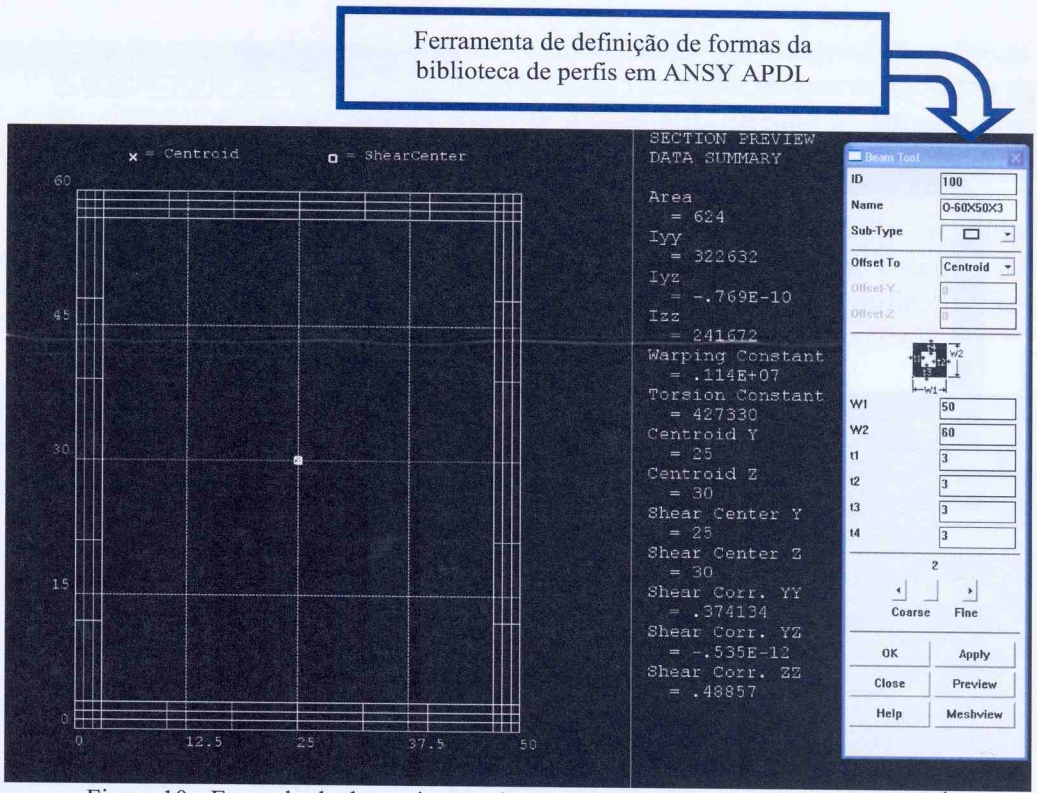


Figura 10 - Exemplo de determinação de propriedades físicas em ANSYS APDL[1]

A comparação de resultados pode ser analisada na tabela 3 seguinte:

Tabela 3 - Comparação de resultados de determinação de propriedades físicas

	SolidWorks	ANSYS APDL	Tabela normativa de referência	Variação
Área	6,24	6,24	6,05	+ 3%
Iyy	32,26	32,26	30,6	+ 5%
Izz	24,17	24,17	23	+ 5%
It	-	42,73	42,3	+ 1%

É nesta situação que nos deparamos com um pormenor bastante relevante. As áreas e inércias determinadas pelos programas (SolidWorks e ANSYS APDL) são consideravelmente superiores ao valor de tabela. Este pormenor deve-se ao facto dos programas inicialmente não considerarem os cantos redondos dos perfis tubulares reais (feitos a partir da dobragem de chapa).

Estudos elaborados pelo autor confirmam que este pormenor é relevante porque uma estrutura complexa e constituída por diversos perfis tubulares (como a carroçaria de um autocarro) pode ser mais pesada (cerca de 3% - ver anexo 1) e mais rígida (cerca de 15%), comprometendo os resultados obtidos.

Assim, o redondo dos perfis tubulares deve ser tido em conta na determinação das propriedades físicas em ANSYS APDL. Porém, a ferramenta não permite a definição deste pormenor. A questão foi ultrapassada pela utilização de outra ferramenta disponível em ANSYS APDL que permite determinar as propriedades físicas relevantes de qualquer que seja a forma geométrica da secção transversal por introdução da forma geométrica e malhagem da secção.

[1] Medidas em mm

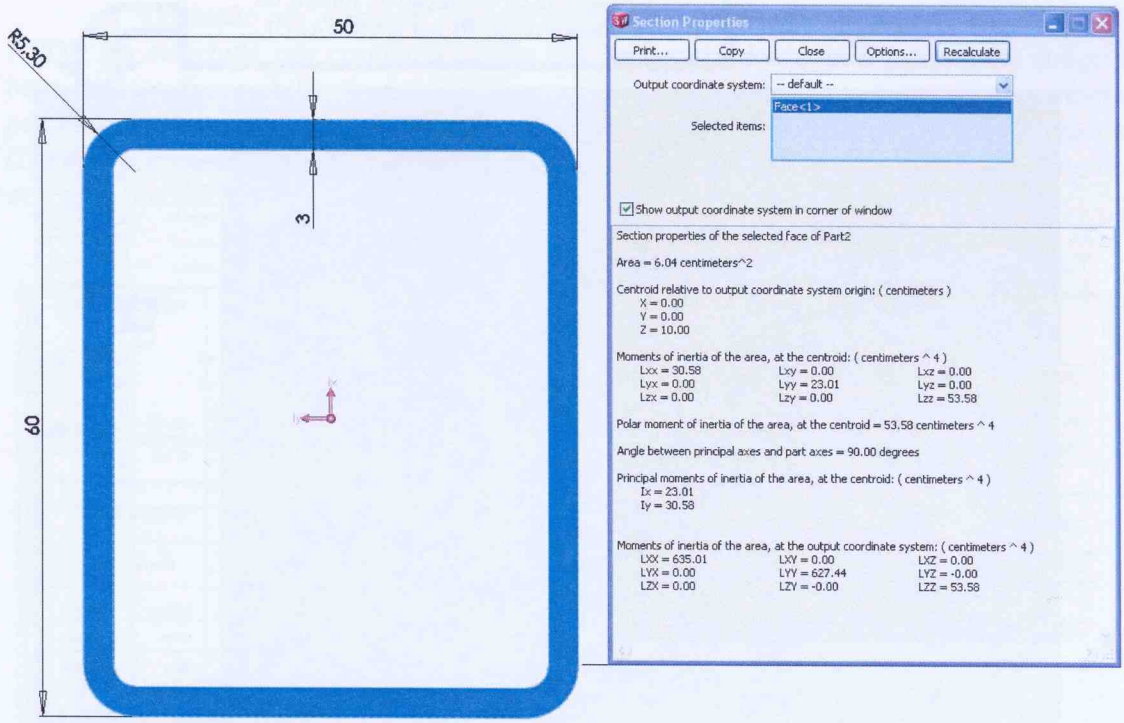


Figura 11 - Exemplo de determinação de propriedades físicas em SolidWorks

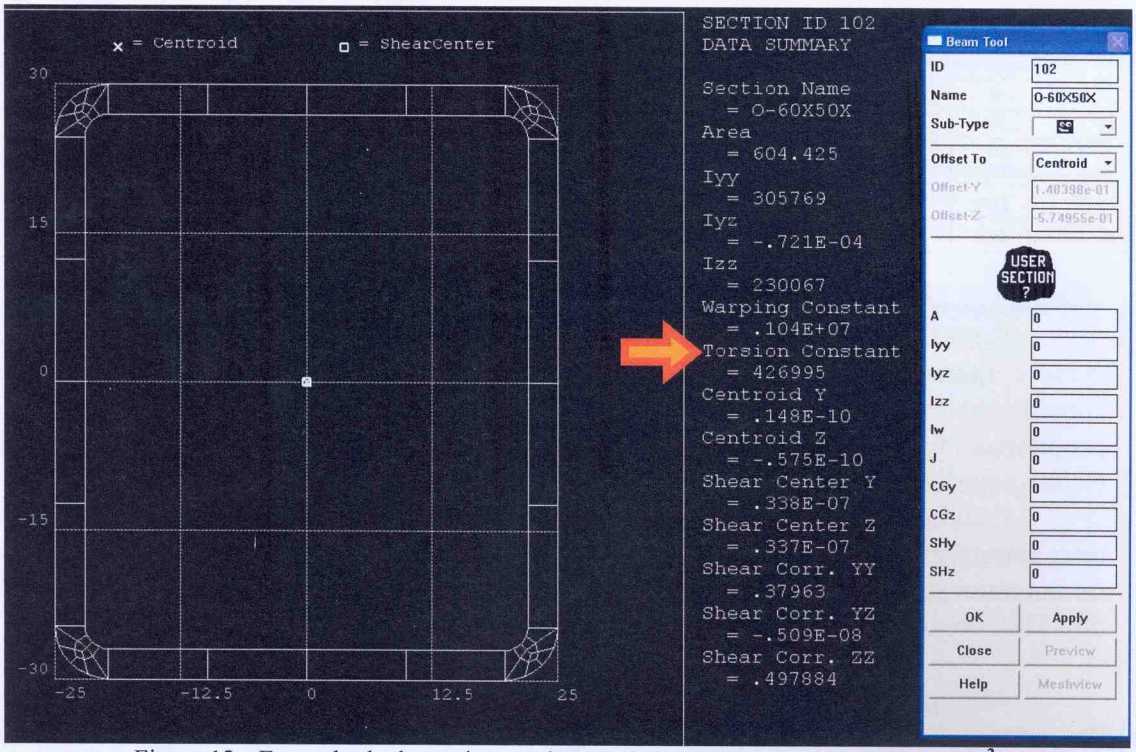


Figura 12 - Exemplo de determinação de propriedades físicas em ANSYS APDL[2]

Observações:

A análise das figuras anteriores permite verificar que os resultados obtidos por esta via são bastante satisfatórios.

[2] Medidas em mm

Esta possibilidade de determinar correctamente as propriedades físicas de qualquer secção transversal revelou-se uma enorme vantagem porque assim deixa de ser necessário determinar analiticamente como se procedia recorrendo ao antigo programa de cálculo StressLab.

Mesmo em secções transversais abertas (como o exemplo seguinte) a propriedade de Inércia à Torção é determinada correctamente, tal como podemos verificar neste exemplo, no qual a abertura da secção faz diminuir significativamente a resistência à torção do perfil tubular considerado para estudo (PFO-60x50x3).

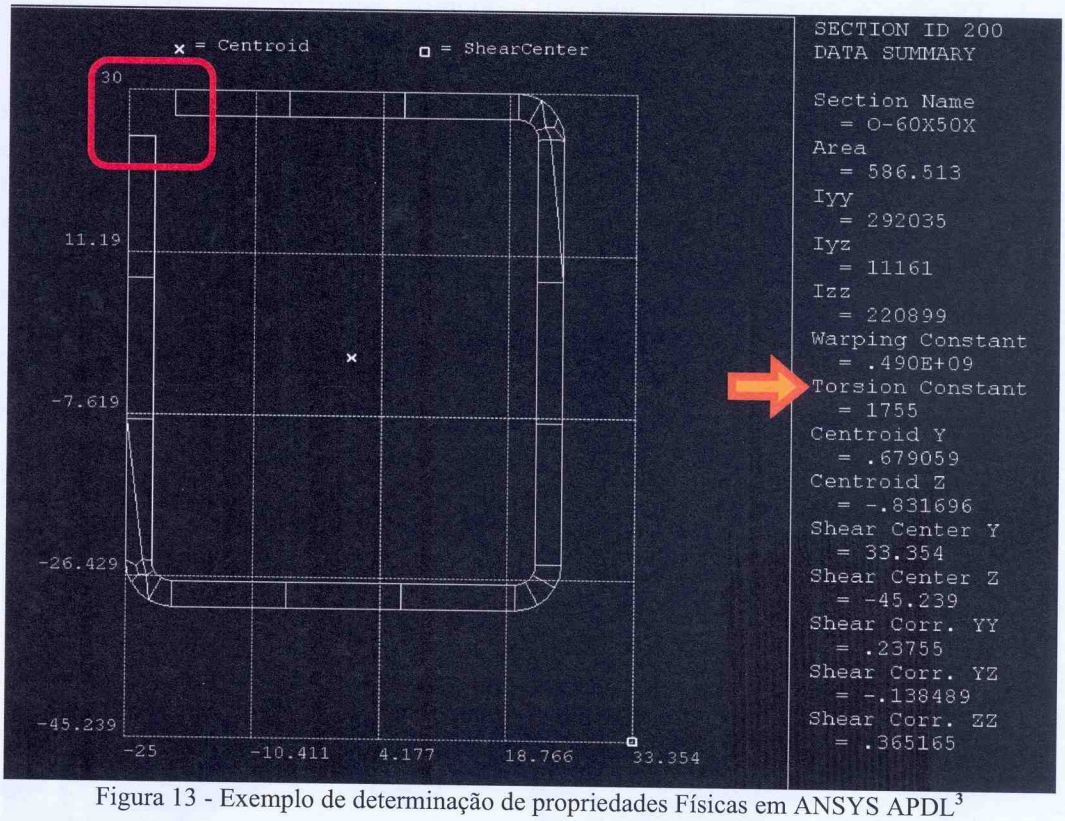


Figura 13 - Exemplo de determinação de propriedades Físicas em ANSYS APDL[3]

Esta possibilidade está relacionada com o próprio procedimento interno de cálculo do programa porque este cria para cada secção transversal uma malha interna e a partir desta determina as propriedades físicas. Este é um procedimento bastante avançado porque dispensa a necessidade de definir os pontos de cálculo de tensões porque estes apenas dependem do grau de definição da malha que é controlado pelo utilizador

[3] Medidas em mm

Cálculo de Tensões de Torção – Inércia à Torção It

Esta propriedade física dos perfis resistentes assume grande importância no cálculo de estruturas de autocarros. Tal como no cálculo estrutural de automóveis a torção do veículo é a situação mais desfavorável, também no caso dos autocarros a resistência à torção do veículo é a mais importante de analisar [1]. Por esta razão a correcta determinação da Inércia à torção e a sua consideração para cálculos de resistência mereceu um estudo próprio para analisar os resultados reportados pelo novo programa ANSYS.

Quanto à correcta determinação, podemos verificar no estudo apresentado anteriormente que a plataforma ANSYS APDL calcula correctamente.

Para estudar a correcta utilização em cálculos de resistência desta propriedade no ANSYS procedeu-se a um exemplo que o evidencia. O caso de estudo foi um perfil restringido numa das extremidade e na outra é aplicado, numa primeira fase apenas uma força vertical e numa segunda fase, é aplicado um momento torsor em simultâneo com a força vertical (ver figura 14).

Desta forma é possível analisar a influência nos resultados da aplicação do momento torsor por comparação dos resultados com a primeira situação. Se os resultados não se alterarem na segunda situação com a aplicação do momento então é porque o programa em análise não considera a influência do momento torsor e consequentemente não calcula correctamente a propriedade física Inércia à Torção.

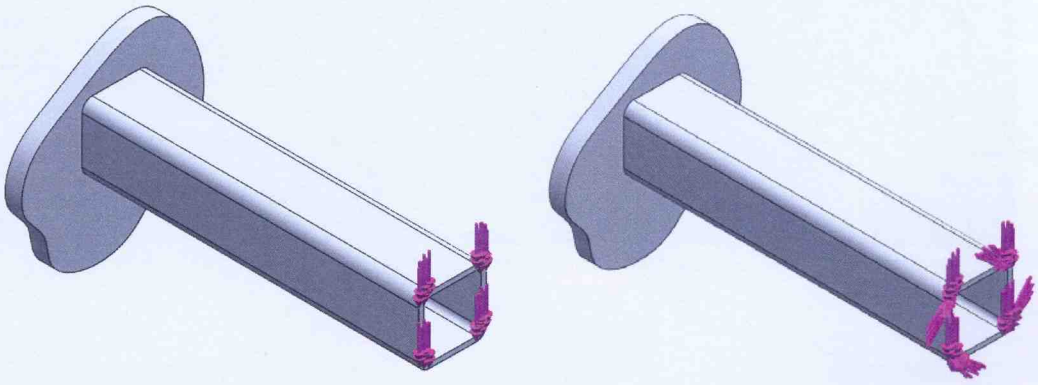


Figura 14 - Caso de estudo comportamento à torção

Para comparar resultados procedeu-se numa primeira fase ao cálculo utilizando Elementos Finitos Sólidos para obter um valor mais preciso para mais tarde comparar com os resultados obtidos com Elementos Finitos do tipo Viga. Os resultados dos programas de cálculo podem ser consultados separadamente no anexo (2).

Os resultados podem ser analisados na tabela 4:

Tabela 4 - Resultados da determinação da It

Tipo de Malha	Tipo de Solicitação	Resultados Comparados	COSMOS	ANSYS WB	ANSYS APDL
Elementos Sólidos	F	Tensão (MPa)	36	34	35
		Uy (mm)	**0,52**	**0,55**	**0,55**
	F+Mt	Tensão (MPa)	375	289	291
		Uy (mm)	**0,75**	**0,8**	**0,8**
Elementos Viga	F	Tensão (MPa)	32	29	30
		Uy (mm)	**0,51**	**0,51**	**0,51**
	F+Mt	Tensão (MPa)	32	29	80
		Uy (mm)	**0,51**	**0,51**	**0,76**

Analisando os dados podemos verificar que:

- Utilizando malha de elementos sólidos, todos os programas apresentam resultados idênticos para as mesmas solicitações. Tal como se esperava a adição de um momento torsor à força vertical provocou um aumento de tensão e um deslocamento vertical máximo superior.
- Numa primeira fase em que se aplica apenas uma força vertical e é utilizado malha com Elementos de Viga, todos os programas apresentam resultados idênticos.
- Quando aplicado simultaneamente a força vertical e o momento torsor com elementos de viga, apenas a plataforma ANSYS APDL apresenta resultados correctos porque o momento torsor é tido em conta.
- Em termos de valores de tensão e como utilizamos elementos de viga, o valor apresentado é nominal, ao contrário da utilização de elementos sólidos em que o valor da tensão é devido a concentração de tensão.

Assim, podemos concluir que a plataforma do ANSYS mais indicada para o cálculo estrutural, tendo em conta a correcta determinação da propriedade inércia à torção (*It*) é a plataforma ANSYS APDL.

2.2.5 Actual metodologia utilizando ANSYS

A introdução de um novo software de cálculo acarreta consigo vários importantes trabalhos que foram necessários concluir para definir e adoptar a metodologia ao novo programa, tirando partido das novas potencialidades que apresenta.

Todos os estudos apresentados anteriormente permitiram concluir que existe maior vantagem e potencialidades em utilizar a plataforma ANSYS APDL e conduziram a um aumento de capacidade de utilização do novo programa.

✓ **Construção geométrica do modelo**

Na anterior metodologia, esta importante e demorosa etapa era realizada de raiz na plataforma CAD do programa de análise - StressLab. O modelo geométrico era desenhado, através de linhas que iriam servir de base à definição dos elementos, com base na consulta geométrica do modelo 3D. Este processo, que consumia grande parte do tempo do estudo (cerca de 60%) revela-se bastante demoroso, o que alargava o tempo de análise e não tirava partido da definição 3D do projecto.

Com a introdução do ANSYS, a fase de construção do modelo foi simplificada porque o modelo geométrico passou a ser integralmente desenhado no software CAD Solidworks sobre o modelo 3D definido em projecto e posteriormente importado directamente para ANSYS para o pré-processamento. Assim o tempo desta etapa foi substancialmente reduzido.

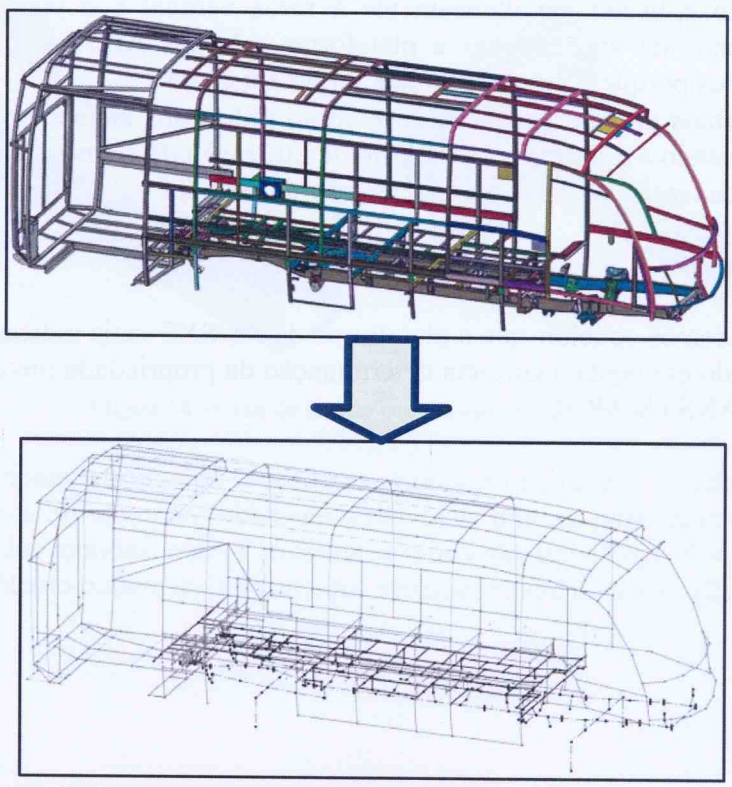


Figura 15 - Exemplo de uma construção geométrica do modelo de linhas sobre o modelo CAD

✓ Pré-Processamento do modelo de cálculo

Uma vez definido o modelo geométrico a próxima etapa é a definição das propriedades físicas e materiais.

No que diz respeito às propriedades físicas, a utilização do ANSYS APDL facilita bastante porque, tal como foi explicado na secção 2.2.2. não será necessário determinar analiticamente as propriedades mais relevantes para cada tipo de perfil resistente porque o programa calcula internamente, ao contrário do anterior StressLab que exigia a execução desta tarefa que despendia bastante tempo.

Mesmo em secções não normalizadas (que não constam de tabelas de perfis standard), como o caso de perfis compostos – ver figura 16, ANSYS APDL calcula correctamente todas as propriedades relevantes (ver figura 17).

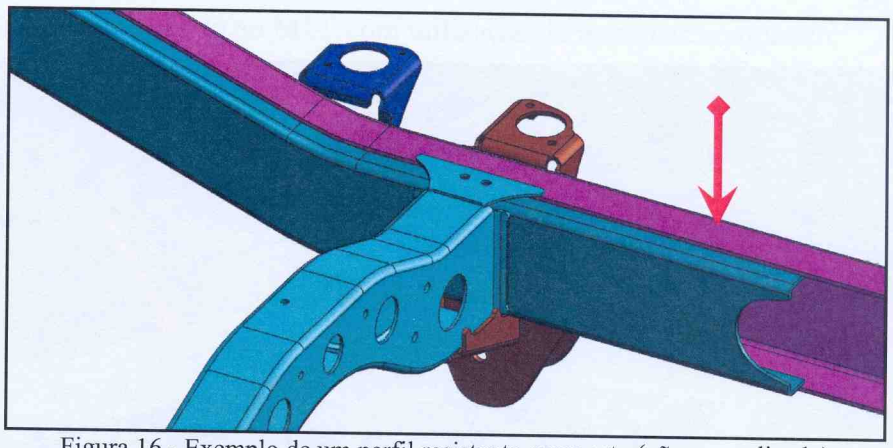


Figura 16 - Exemplo de um perfil resistente composto (não normalizado)

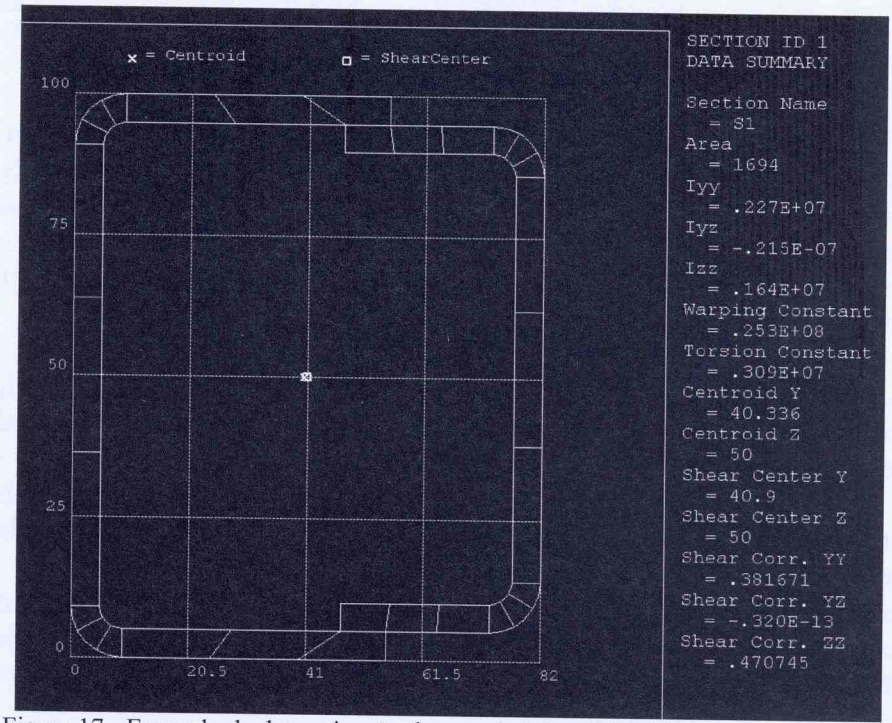


Figura 17 - Exemplo de determinação de propriedades físicas de um perfil composto

Outra situação que o programa StressLab não permitia era a definição de elementos viga com variação de secção, esta situação é correctamente definida em ANSYS APDL – ver exemplo apresentado nas figuras 18 e 19.

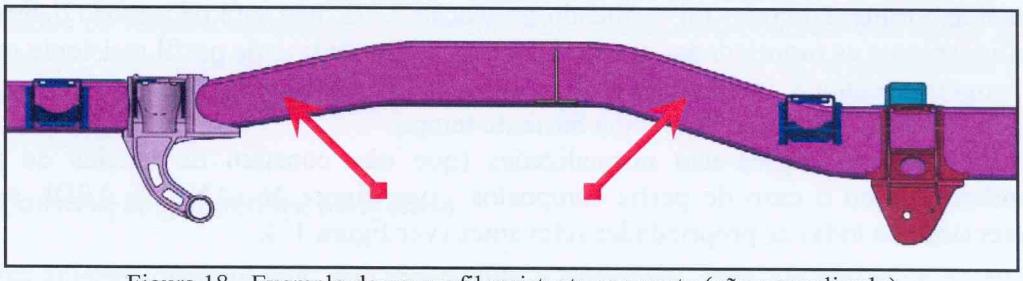


Figura 18 - Exemplo de um perfil resistente composto (não normalizado)

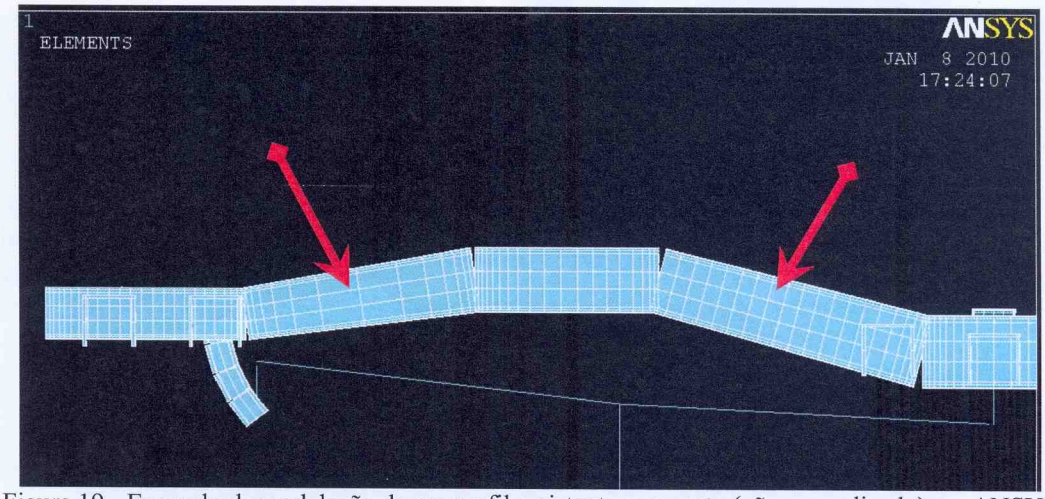


Figura 19 - Exemplo da modelação de um perfil resistente composto (não normalizado) em ANSYS

Definidas as propriedades físicas e materiais, o próximo passo será a definição dos elementos, atribuindo a cada linha (do modelo geométrico) a secção transversal e o tipo de material para assim obter a modelação da estrutura resistente. Após a definição da estrutura resistente, será necessário definir todos os outros elementos que constituem a carroçaria de um modelo numérico de um autocarro (vidros, revestimentos e chapeamentos) – ver metodologia.

A última tarefa do pré-processamento diz respeito à aplicação das restrições e das solicitações mais gravosas para o comportamento estrutural do autocarro. Tal como foi estudado e justificado no trabalho que serve de base a esta tese [1], a pior solicitação passível de acontecer durante o tempo útil de serviço de um autocarro é a subida de um passeio o que provoca o deslocamento vertical de apenas uma das rodas relativamente ao plano formado pelas outras. Esta situação é representada através da simulação numérica por aplicação da força gravítica estando uma roda do eixo frontal desapoiada (uma de cada vez). A somar à força gravítica e para tornar mais desfavorável e ao mesmo tempo mais próximo da realidade, é aplicado o peso dos passageiros sentados e de pé na zona que ocupam no veículo.

✓ **Definição do Cálculo**

Todos os cálculos realizados com o anterior programa StressLab eram no regime Linear Estático e apenas permitiam pequenos deslocamentos.

A utilização do ANSYS permite, para além do tipo de cálculo referido anteriormente, a realização de cálculos no regime Linear Estáticos com grandes deslocamentos. Porém, esta potencialidade ainda não foi completamente explorada.

Existem também uma série de potencialidades que o ANSYS permite mas que exigem trabalho de investigação. Esta tarefa justifica plenamente uma **oportunidade de melhoria** por representar um desenvolvimento de capacidades de utilização do programa e potenciar o conhecimento na análise de estruturas complexas em vários domínios.

Exemplos de temas a explorar em ANSYS APDL importantes de referir:

- ✓ Cálculo recorrendo ao MEF com utilização de materiais compósito;
- ✓ Combinar, no mesmo modelo numérico, elementos Beam/Shell/Solid de forma a incorporar e tirar partido da análise de resultados no mesmo cálculo, os dois domínios de análise referidos na secção 2.2;
- ✓ Explorar a ferramenta de construção de programas internos.

✓ Pós-Processamento do modelo de cálculo – Análise de resultados

É também nesta importante etapa que a utilização do ANSYS se revela bastante vantajosa uma vez que o pós-processamento é claramente superior relativamente à utilização do StressLab. Ao contrário do StressLab, toda a análise de resultados é realizada dentro do software ANSYS, sem necessidade de exportar dados para processamento.

Os resultados podem ser consultados sob a forma de tabelas ou representação gráfica (ver figura 20) e é nesta última possibilidade que reside a maior vantagem relativamente ao StressLab que anteriormente não possibilitava.

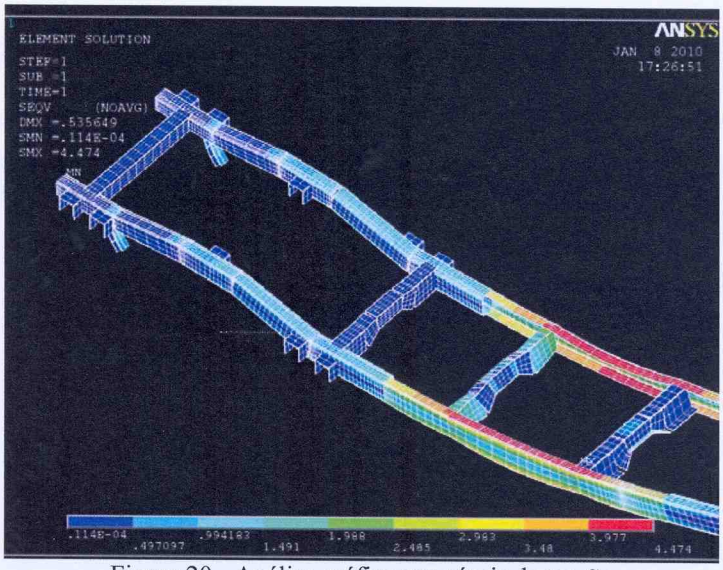


Figura 20 - Análise gráfica nos níveis de tensão

A vantagem na utilização do ANSYS na análise de resultados, relativamente ao StressLab, reside na possibilidade definir a divisão do elemento "Beam", aumentando a precisão dos resultados, aproximando a um modelo de elementos "Solid" (teoricamente) como se pode ser observado na figura 21.

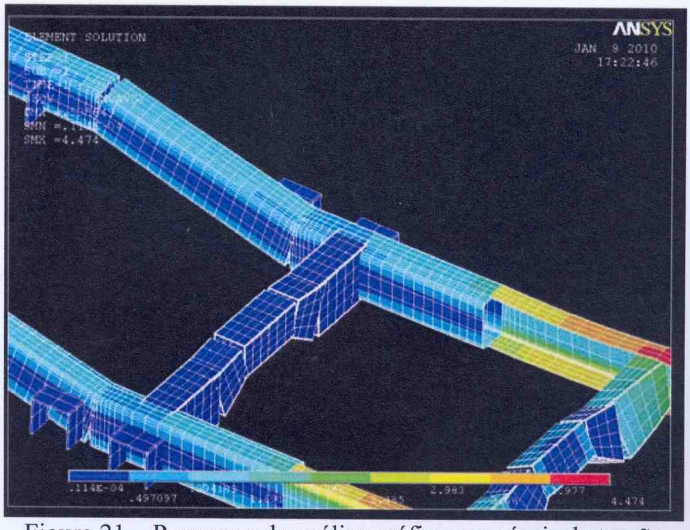


Figura 21 – Pormenor da análise gráfica nos níveis de tensão

De seguida, na figura 22 é apresentada de uma forma sucinta a adaptação da metodologia de abordagem ao problema da análise estrutural de carroçarias de autocarros, recorrendo à utilização do novo programa de cálculo ANSYS, onde também são realçadas as etapas que sofreram evolução e melhoramento.

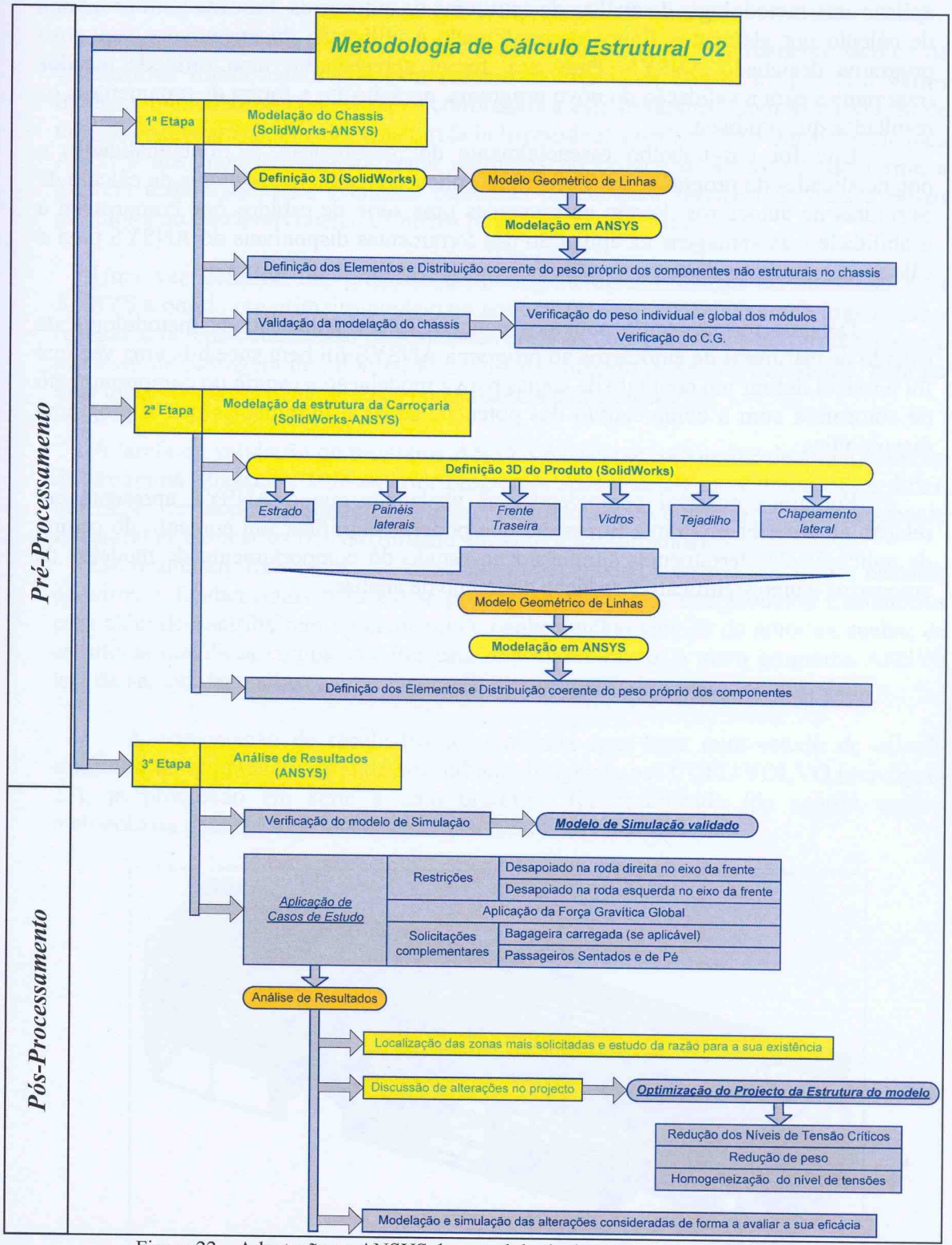


Figura 22 – Adaptação ao ANSYS da metodologia de análise estrutural de autocarros

2.3 Síntese

O capítulo apresentado é bastante importante porque é a base para os trabalhos dos capítulos seguintes apresentados. O objectivo foi demonstrar como foi possível aplicar uma metodologia de análise de estruturas de autocarros, baseada num programa de cálculo por elementos finitos descontinuado à utilização de um novo e vantajoso programa designado ANSYS. Para isto, foram apresentados uma série de estudos importantes para a validação do novo programa, para avaliar a forma de tratamento e os resultados que produzia.

Este foi um trabalho essencialmente de investigação de funcionalidades e potencialidades do programa ANSYS para a aplicação a uma metodologia de cálculo de estruturas de autocarros. Foram apresentadas uma série de estudos que comprovam a usabilidade e as vantagens na aplicação das ferramentas disponíveis do ANSYS para o cálculo de estruturas de autocarros.

De uma forma segura podemos concluir que a aplicação da metodologia de cálculo de estruturas de autocarros ao programa ANSYS foi bem sucedida uma vez que foi possível definir um conjunto de etapas para a modelação e estudo do comportamento de autocarros com a compreensão das potencialidades e ferramentas que o programa disponibiliza.

Foi ainda possível compreender as vantagens que o ANSYS apresenta em relação ao anterior programa StressLab que poderão significar um aumento do campo de aplicação das ferramentas simulação no estudo do comportamento de modelos de autocarros e uma significativa redução do tempo de análise.

Capítulo III - Passagem de informação StressLab-ANSYS e verificação dos resultados

3.1 Introdução e objectivos

Durante vários anos os cálculos estruturais realizados no departamento técnico da CaetanoBus foram elaborados com recurso à ferramenta StressLab, por isso vários modelos numéricos encontravam-se confinados a este programa. Com a introdução de um novo software de cálculo, uma tarefa indispensável a realizar foi a transferência para ANSYS dos modelos anteriormente definidos no programa StressLab, de forma a estarem disponíveis para eventuais consultas ou até para servirem de base a novos cálculos e ao desenvolvimento de novos projectos de autocarros.

Uma vez definido um processo de passagem de informação de StressLab para ANSYS e obtido um primeiro modelo no novo programa, a próxima tarefa importante a realizar será uma comparação de resultados entre os dois programas de forma a testar o processo de passagem de informação e validar o próprio programa de cálculo, para ter uma ideia bem definida do grau de concordância entre softwares.

A tarefa de validação do programa ANSYS é bastante importante devido à extinção do programa StressLab. Este anterior programa, apesar de algumas limitações e difícil utilização, revelou-se bastante útil e fiável na optimização e estudo do comportamento estrutural de autocarros típicos (turismo, urbanos e interurbanos).

Os resultados fornecidos ao longo de vários modelos de cálculo foram bastante certeiros e fundamentais para evitar problemas estruturais nos produtos CaetanoBus para além de contribuírem no aumento de conhecimento técnico do autor na análise de estruturas metálicas complexas. Por esta importante razão, o novo programa ANSYS terá de ser validado através de comparação de resultados do programa StressLab.

A comparação de resultados foi realizada com base num estudo de cálculo estrutural de um modelo de autocarro urbano designado por CCFL-VOLVO (ver figura 23), já produzido em serie e cujo protótipo foi optimizado (de acordo com a metodologia descrita anteriormente secção 2.2.1) em StressLab.

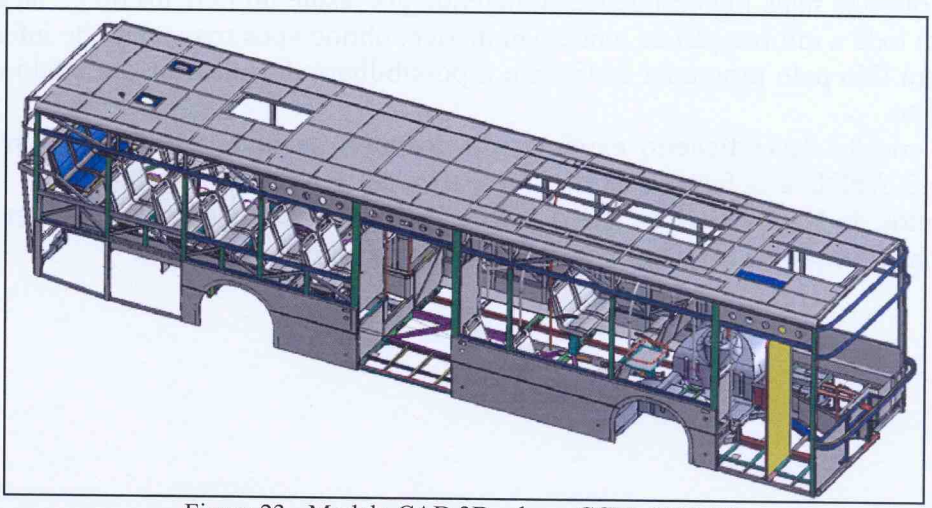


Figura 23 - Modelo CAD 3D urbano CCFL-VOLVO

3.2 Passagem de Informação StressLab-ANSYS

Esta tarefa revelou-se bastante difícil no inicio porque o StressLab, sendo um software bastante antigo, a conexão directa com outros programas era inexistente e a exportação directa de dados era limitada.

Para concretizar esta tarefa foi necessário estudar a forma típica de introdução de dados que o novo programa ANSYS reconhecia, para trabalhar os dados provenientes do anterior programa. Assim foi possível desenvolver um processo que permitisse a passagem de informação do anterior programa de cálculo, StressLab para ANSYS.



Figura 24 - Diagrama demonstrativo do processo de passagem de informação StressLab-ANSYS

A informação que cada modelo de cálculo continha e que era necessário tratar e assegurar a sua correcta passagem para ANSYS era composta por:

- Definição de propriedades materiais e físicas;
- Localização geométrica de nós;
- Definição elementos (conectividade de nós e propriedades materiais e físicas);
- Definição de casos de carga;
- Definição de restrições;

Como a exportação não pode ser directa é necessário criar um ficheiro de dados (um para cada modelo de cálculo de autocarro) para tratar toda a informação descrita anteriormente. Uma vez organizada e relacionada entre si, esta informação dá origem a um ficheiro que tem de ser tratado através de um programa (devido ao elevado grau de complexidade e quantidade de informação) para obter a informação necessária e organizada da forma que o programa ANSYS aceita para poder introduzir e obter o mesmo modelo de StressLab em ANSYS.

A questão mais importante desta metodologia reside no ficheiro típico de input que contém toda a informação do modelo numérico, obtido após tratamento de informação e que será lido pelo programa ANSYS e o possibilitará de construir o modelo numérico completo.

A criação deste ficheiro exigiu muito trabalho de investigação sob a plataforma ANSYS APDL e a forma como o programa define um ficheiro típico de malha de elementos de Viga e Cascas com a definição de propriedades físicas e materiais, para além da definição de cargas aplicas e restrições no modelo numérico.

De seguida apresenta-se um "workflow" resumido do processo de passagem:

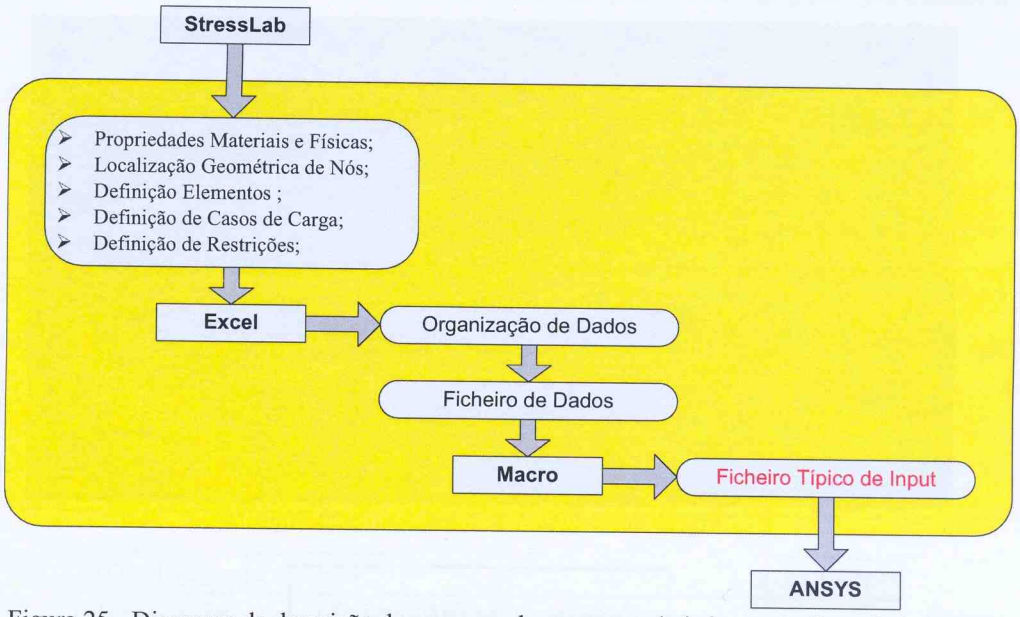


Figura 25 - Diagrama de descrição do processo de passagem de informação StressLab-ANSYS

No anexo 3 pode ser observado parte da informação organizada e a forma do ficheiro típico de input de dados.

Este método apresentado, para além de permitir transferir para ANSYS todos os modelos numéricos que serviram de base para o estudo estrutural de vários modelos de autocarros em StressLab, permitiu simultaneamente desenvolver capacidades de utilização do programa ANSYS na sua plataforma APDL que mais tarde se revelaram bastante úteis no desenvolvimento da metodologia para análise estrutural de novo modelos (figura 22 secção 2.2.3).

As figuras 26 e 27 apresentam o aspecto gráfico do modelo numérico de elementos finitos em StressLab e ANSYS, respectivamente.

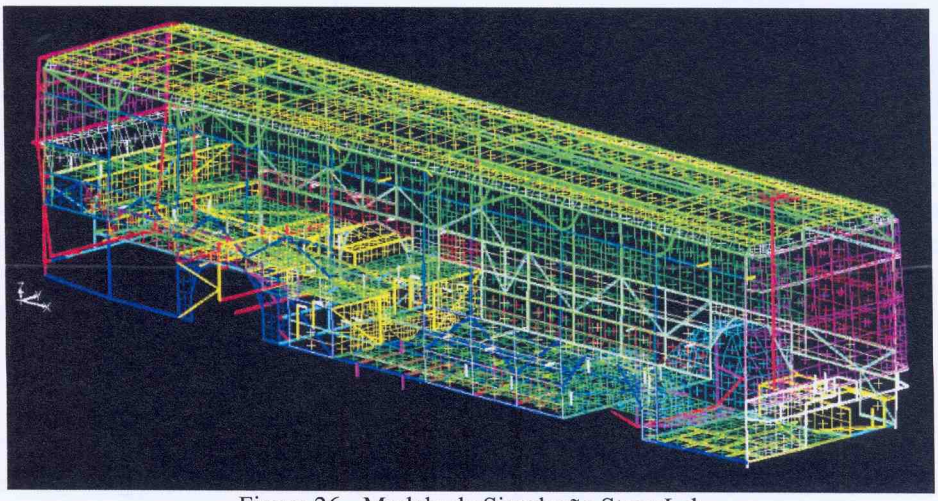


Figura 26 - Modelo de Simulação StressLab

Passagem de informação StressLab -> ANSYS

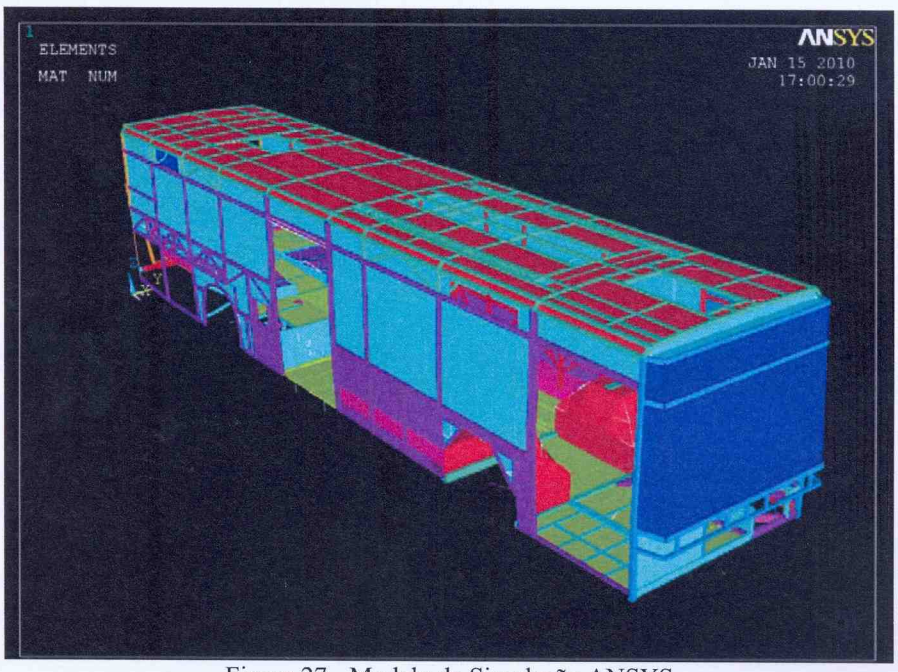


Figura 27 - Modelo de Simulação ANSYS

A validação do processo de passagem de informação e a comparação de resultados dos modelos de simulação obtidos pelos programas StressLab e ANSYS irá ser realizada com base em:

- ✓ Peso total e descarga por eixo dos modelos numéricos (ver tabela 5 e 6 – estudo A);
- ✓ Centro de gravidade da estrutura resistente (ver tabela 8- estudo A);
- ✓ Deformação estrutural global (ver figuras 28, 29 e 30 – estudo B);
- ✓ Níveis de tensão (estudo C).

3.3 Comparação dos resultados obtidos por ANSYS com StressLab

A. Peso global e descarga por eixo para validação do modelo numérico

Tabela 5 - Comparação de resultados StressLab-ANSYS

	Peso Tara + Motorista						
	STRESSLAB			ANSYS			
Eixo	Roda	Peso (kg)	% Peso total	Peso (N)		Peso (kg)	% Peso total
Traseiro	T.D.[4]	3987	66	39488	78092	7969	65
	T.E.[5]	3884	7871	38604			
Frente	F.D.[6]	1952	34	19812	41319	4216	35
	F.E.[7]	2132	4084	21507			
TOTAL (kg)		11955				12185	
Diferença (kg)			+ 230				

Tabela 6 - Comparação de resultados StressLab-ANSYS

	Peso Bruto Validação						
	STRESSLAB			ANSYS			
Eixo	Roda	Peso (kg)	% Peso total	Peso (N)		Peso (kg)	% Peso total
Traseiro	T.D.	5868	65	57832	115267	11762	65
	T.E.	5793	11661	57435			
Frente	F.D.	3006	35	30261	62122	6339	35
	F.E.	3200	6206	31861			
TOTAL (kg)		17867				18101	
Diferença (kg)			+ 234				

Analisando os dados obtidos para o peso global e descarga por eixo verifica-se que o modelo numérico obtido em ANSYS apresenta valores superiores ao modelo de StressLab. Após várias verificações de que a informação de StressLab foi correctamente transferida para ANSYS foi necessário realizar uma análise individual para encontrar a razão para o problema observado. Recordando a metodologia de pré-processamento, o modelo numérico é constituído por 2 principais grupos de elementos:

- ✓ ***Grupo 1***: representa a estrutura resistente do modelo de autocarro e é formado essencialmente por elemento do tipo "Beam";
- ✓ ***Grupo 2***: representa todo o resto da carroçaria e contem a estrutura do chassis.

[4] T.D. : Roda no eixo traseiro do lado direito
[5] T.E. : Roda no eixo traseiro do lado esquerdo
[6] F.D. : Roda no eixo dianteiro do lado direito
[7] F.E. : Roda no eixo dianteiro do lado esquerdo

Esta divisão dos elementos por grupos é realizada devido ao facto de mesmo representando ao máximo todos os elementos e componentes que constituem um autocarro, existem sempre componentes que não são possíveis de representar no modelo de elementos finitos (ver referência [1] para mais pormenor). Como o peso próprio global do autocarro é a solicitação principal no cálculo de optimização, todo o peso dos componentes tem que ser representado. Assumindo que é a estrutura resistente (G1) que suporta este peso que não foi possível de representar, faz todo sentido distribuir este peso pelo mesmo, aplicando um factor multiplicativo.

Assim, podemos agrupar os elementos que constituem o modelo numérico de elementos finitos de um modelo de autocarro em dois grupos definidos na tabela 7.

Tabela 7 - Grupos de elementos no modelo numérico

G1 Estrutura Resistente	**Alongamento Central**
	Estrado Complementar
	Painel Direito
	Painel Esquerdo
	Tejadilho
	Frente
	Traseira
G2 Outros Componentes	**Alongamento-Chapas**
	Estrado Chapas
	Paineis Laterais-Chapas
	Tejadilho-Chapas
	Frente-Chapas
	Traseira-Chapas
	Roda-Pé
	Revestimento Tejadilho
	Sanca
	Chapeamento Lateral
	Chassis (Baterias Incl.)
	Bancos (Motorista Incl.)
	Pavimento
	Plataforma Acesso
	Deposito (FUEL Incl.)
	Vidros
	Portas
	AC

A tabela 8 permite verificar que a transferência de informação do programa StressLab para ANSYS da estrutura resistente foi bem conseguida porque a sua posição geométrica é bastante idêntica. Quanto ao peso da estrutura resistente, o mesmo já não acontece porque verifica-se uma diferença já significativa.

Tabela 8 - Comparação StressLab-ANSYS do peso e centro de gravidade da estrutura resistente

G1		STRESSLAB	ANSYS	Diferença (mm)	Diferença (kg)
C.G.[8] mm	x	5764	5765	1	
	y	1280	1278	-2	
	z	1478	1479	1	
Peso (kg)		1868	1933		65

A tabela 9 permite verificar que, em termos proporcionais, o grupo G1 é o que influência mais o erro referente ao peso distribuído. Além disso, no grupo G2 é a modelação do chassis que representa a maior influência para o erro deste grupo.

Tabela 9 - Comparação StressLab-ANSYS de peso de componentes

	StressLab	ANSYS	Diferença (kg)	Diferença (%)
G1	1868	1933	65	3%
G2	8061	8143	82	1%
G2 - Chassis	5305	5385	80	1%
Peso Total Distribuído	9929	10077	148	1%

Tendo em conta que os elementos finitos do grupo G1 (estrutura resistente) e do chassis (que pertence ao grupo G2) são maioritariamente do tipo "Beam" e as considerações sobre o cálculo das propriedades físicas realizadas pelo ANSYS (descritas na secção 2.2.2 – Estudo da determinação das propriedades físicas dos perfis resistentes) podemos concluir que a diferença superior de peso registado no modelo ANSYS, transferido do modelo de StressLab, está directamente relacionada com o facto do programa ANSYS considerar cantos rectos no cálculo das propriedades físicas introduzidas recorrendo às ferramentas disponibilizadas pelo programa.

Estudos paralelos sobre o cálculo das áreas determinadas pelas ferramentas disponibilizadas pelo ANSYS dos perfis mais utilizados numa estrutura de um autocarro demonstraram que a variação média é cerca de 3%, valor que corresponde à diferença registada para o grupo G1. (ver anexo 4)

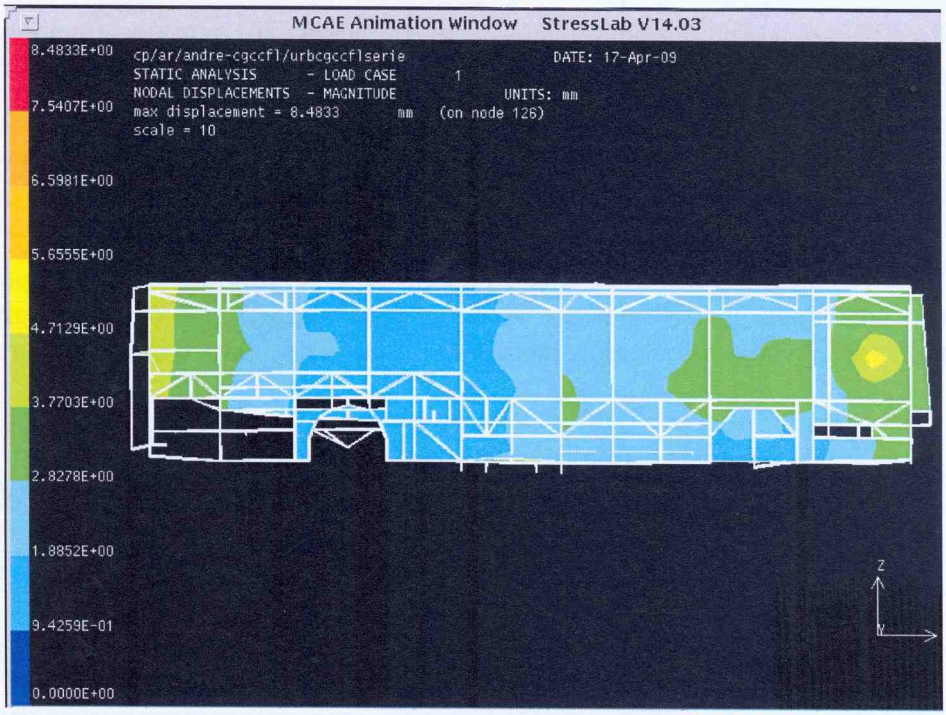
[8] C.G. : Centro de Gravidade

B. Deslocamentos nodais da estrutura resistente

Outro resultado importante de comparar entre programas é a deformação característica e os valores obtidos em cada situação (ver figuras 28, 29 e 30).

Deslocamentos nodais da Estrutura (mm)
Situação: Veículo apoiado nos 4 rodados

StressLab



ANSYS

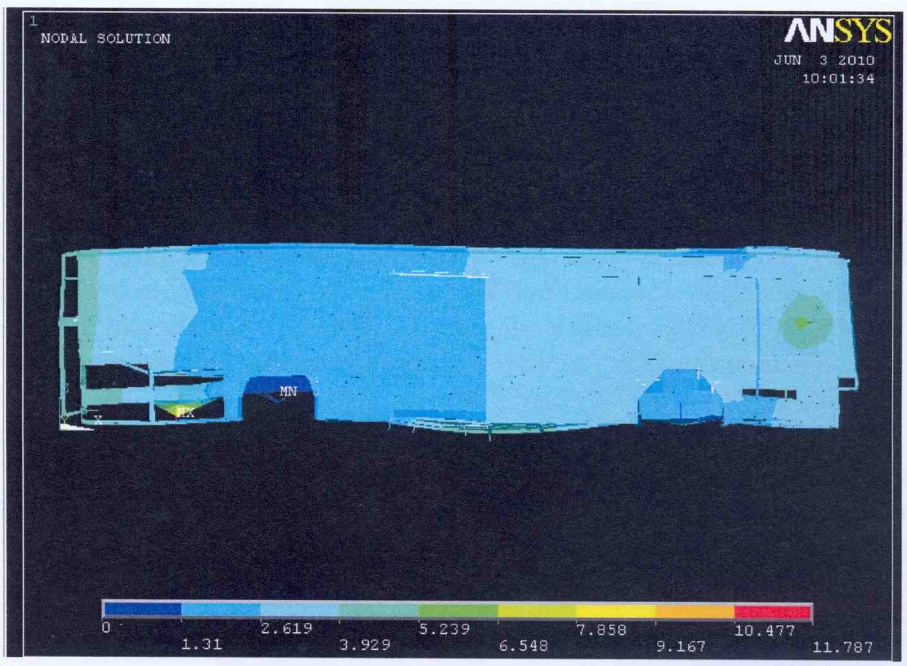
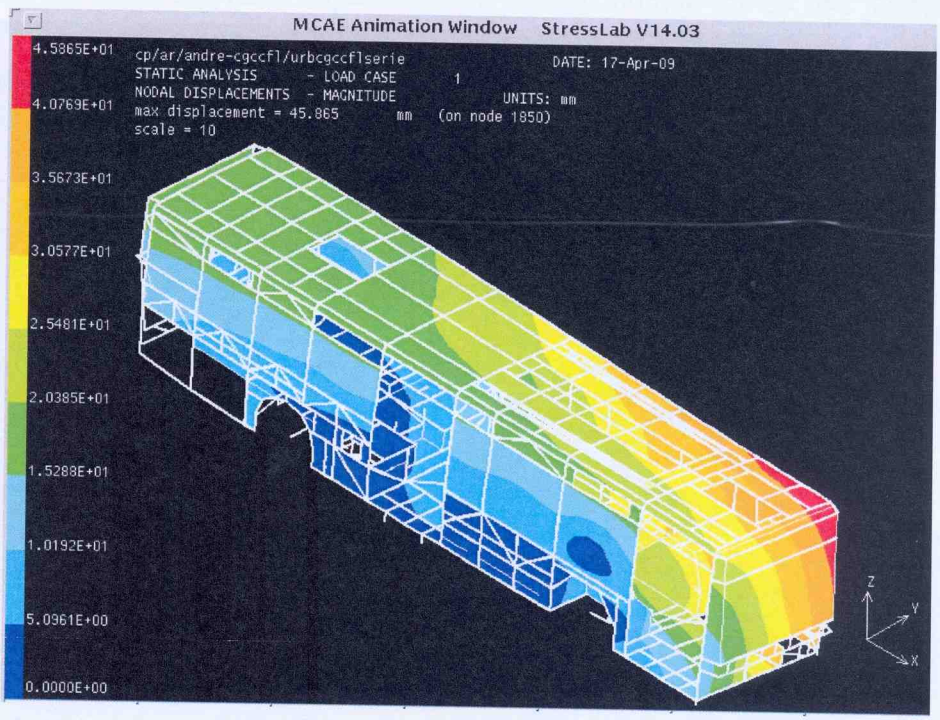


Figura 28 - Comparação StressLab-ANSYS da deformação estrutural da estrutura resistente em 4 apoios

Deslocamentos nodais da Estrutura (mm)
Situação: Torção do veículo em 3 apoios Frente Direita

StressLab



ANSYS

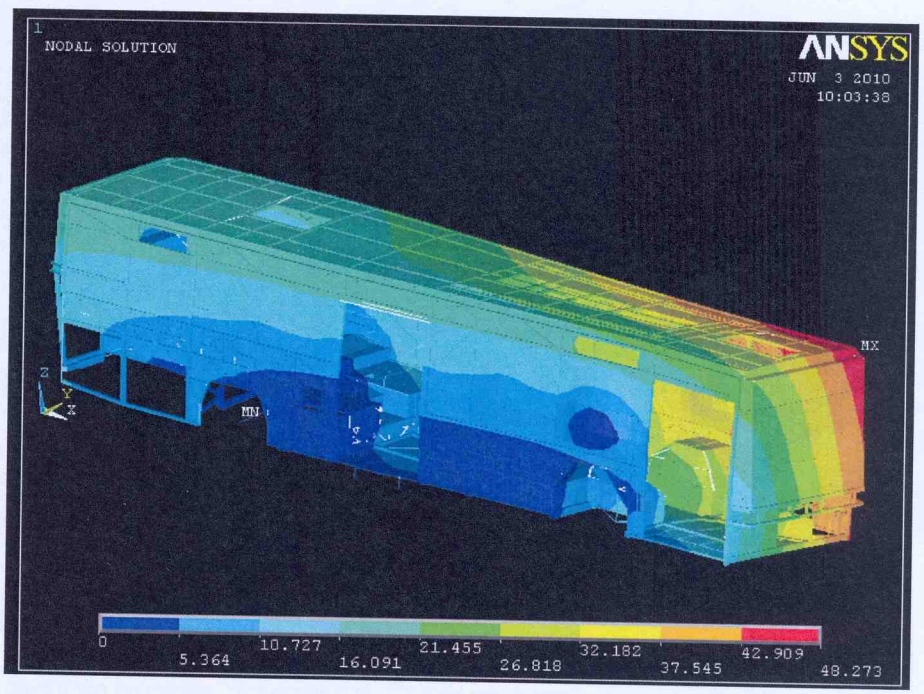
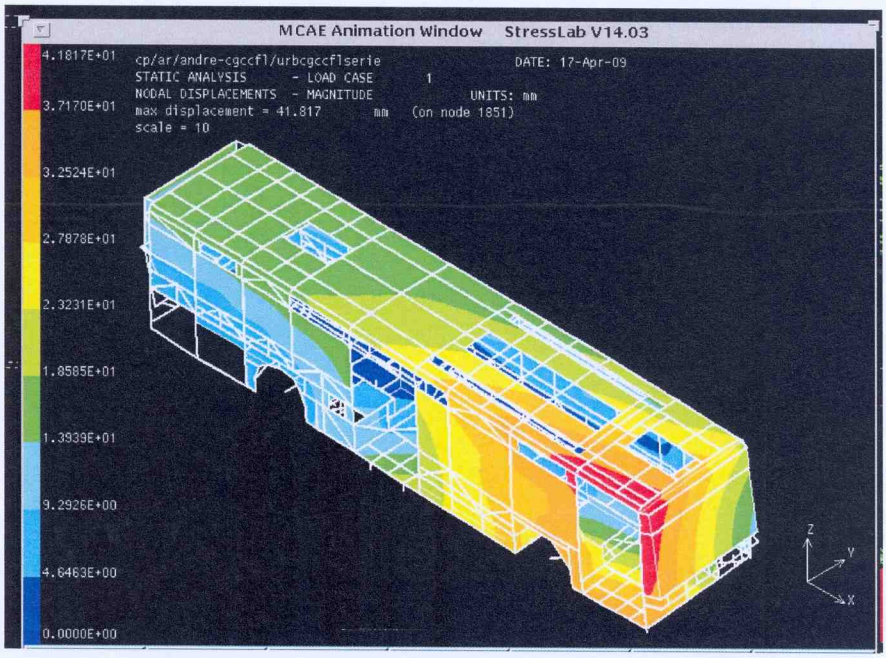


Figura 29 - Comparação StressLab-ansys da deformação estrutural em torção esquerda

Deslocamentos nodais da Estrutura (mm)
Situação: Torção do veículo em 3 apoios Frente Esquerda

StressLab



ANSYS

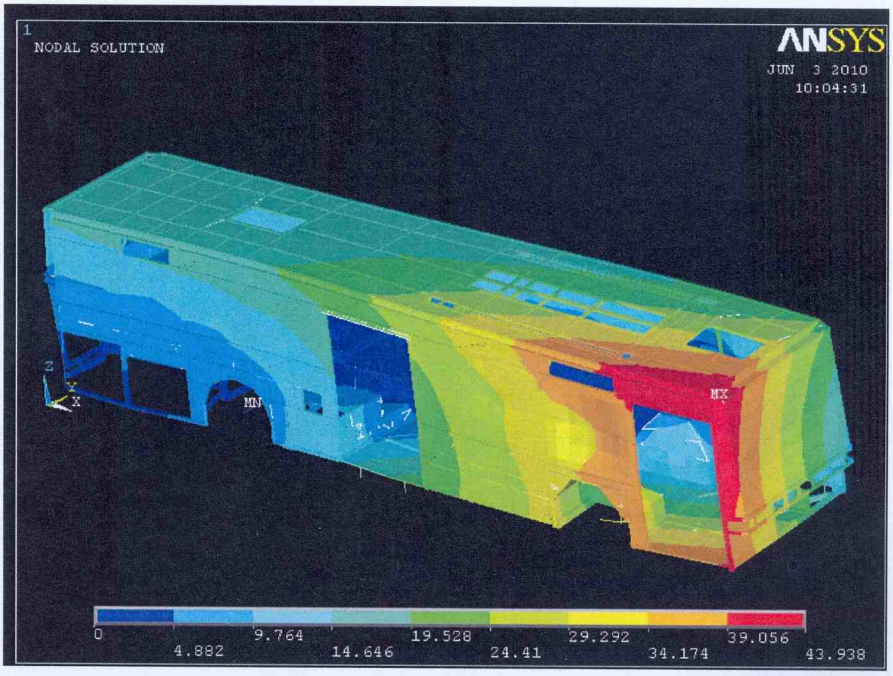


Figura 30 - Comparação StressLab-ANSYS da deformação estrutural em torção direita

Observações gerais: verifica-se que existe um grau de concordância bastante significativo entre os resultados obtidos em StressLab e ANSYS para a deformação estrutural. Com estes dados podemos constatar que a passagem de informação entre programas foi bem sucedida. Por outro lado, é possível verificar que ambos os programas reportam resultados idênticos para as deformações.

C. *Distribuição dos níveis de tensão*

Estes são os resultados mais importantes de analisar porque são os que permitem trabalhar no processo de optimização estrutural. O grande objectivo desta análise é determinar o grau de concordância entre os níveis de tensão reportados pelos programas e afinar o processo de optimização para o ANSYS com base no historial de cálculos de optimização realizados em StressLab.

Na análise de resultados no pós-processamento, o ANSYS revela-se bastante vantajoso em relação ao StressLab, por permitir obter representações gráficas imediatas da distribuição dos níveis de tensão (ver figura 29) e calcular de forma directa os resultados para as tensões equivalentes de Von Mises, tarefas que não eram possíveis de realizar com o StressLab da mesma forma rápida e eficiente.

Assim, a comparação de resultados de níveis de tensão entre os dois softwares será realizada por gráficos porque o StressLab não permite obter imagens representativas dos níveis de tensão dos elementos.

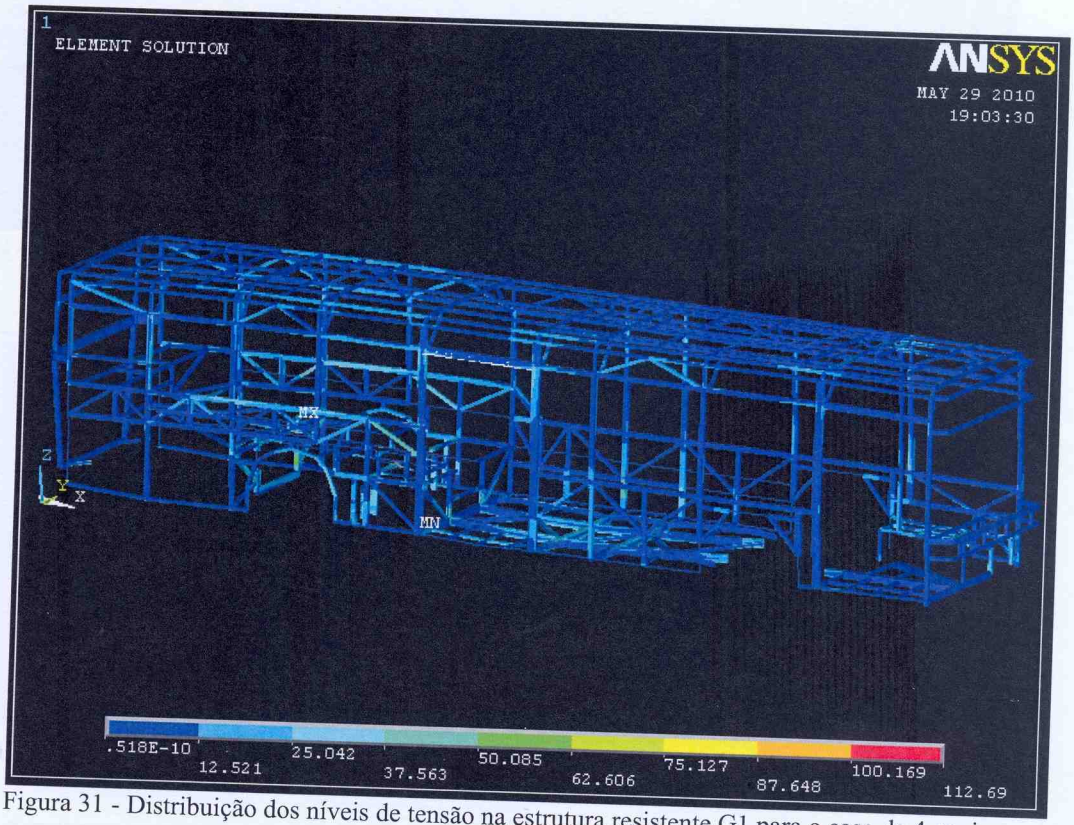


Figura 31 - Distribuição dos níveis de tensão na estrutura resistente G1 para o caso de 4 apoios

Para facilitar a comparação de resultados apenas serão considerados os casos de torção do veículo do veículo por serem os mais gravosos.

Veículo em torção esquerda quando apoiado na roda frente direita

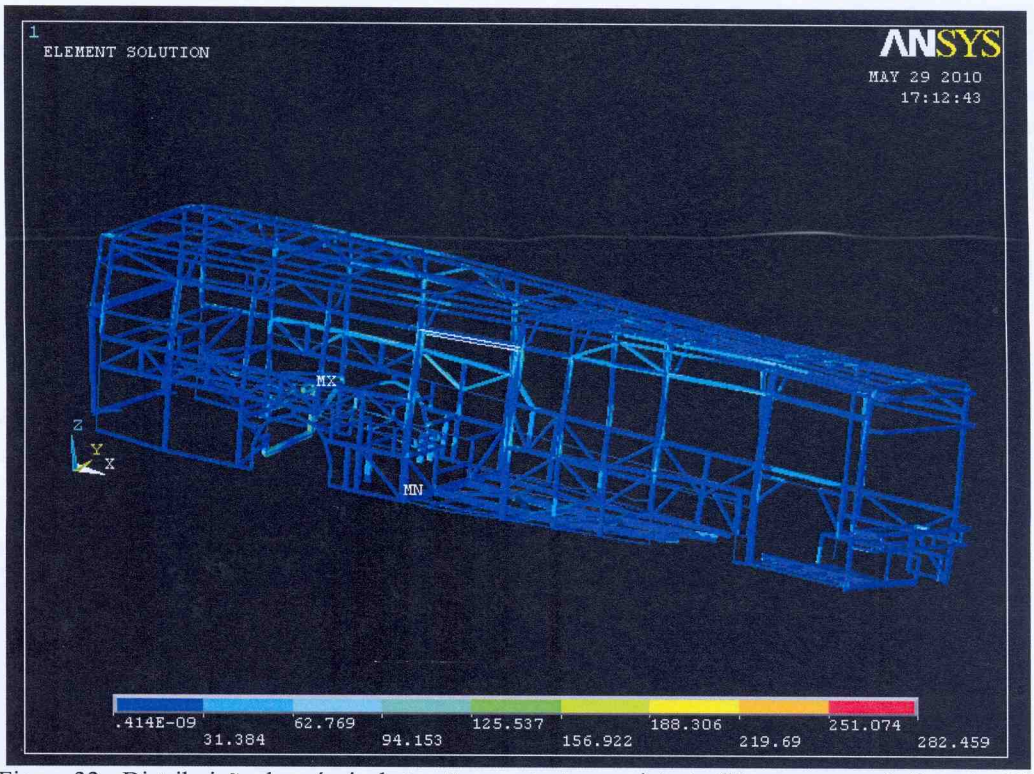


Figura 32 - Distribuição dos níveis de tensão na estrutura resistente G1 para o caso de 3 apoios FD

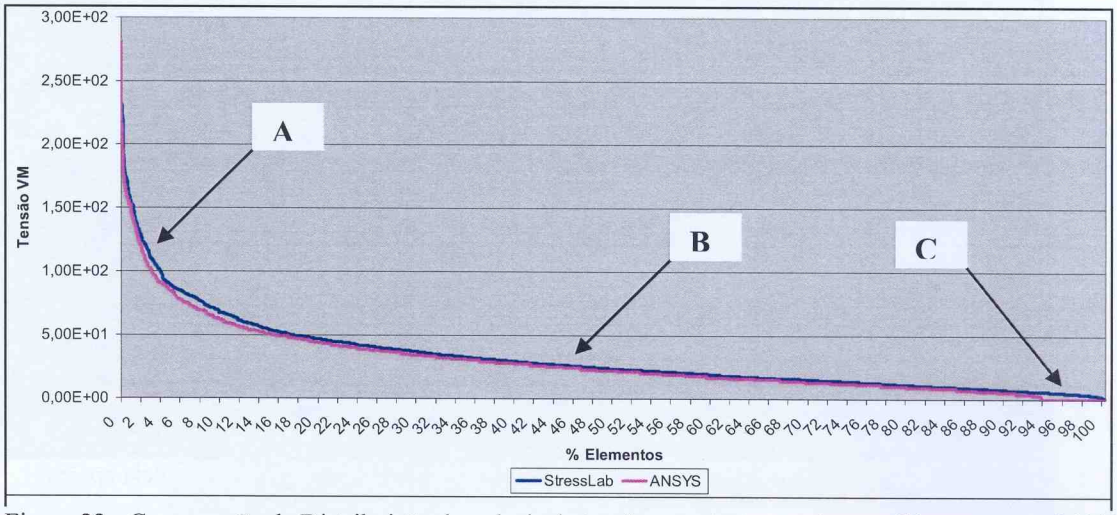


Figura 33 - Comparação da Distribuição dos níveis de tensão na estrutura resistente G1 para torção 3AFD

Observações gerais: pela análise das figuras 32 e 33 verifica-se um certo grau de concordância entre os resultados globais das curvas características nas zonas iniciais e finais do gráfico (zona A e B). No entanto é necessário comparar a tensão obtida por cada programa para cada elemento de forma individual. Por outro lado, verifica-se que certa de 4% dos elementos definidos em ANSYS não está a reportar resultados para os níveis de tensão (zona C)

Analisando a tabela 10 que mostra os níveis de tensão mais elevados obtidos por cada programa e para cada elemento é possível verificar algumas situações irregulares. Verifica-se que apesar do valor máximo ser coincidente entre os programas, não é registado no mesmo elemento (StressLab, elemento 216; ANSYS, elemento 353), o que significa que a zona mais crítica não se verifica em ambos os modelos numéricos.

Também é possível verificar que apesar de alguns elementos apresentarem níveis de tensão aproximados em ambos os programas (elemento 5084), existem elementos que apresentam valores bastante diferentes (elemento 216) e ainda elementos que aparecem como um dos mais críticos em um dos programas e no outro não.

Tabela 10 - Comparação dos níveis máximos de tensão VM na estrutura resistente G1 para torção 3AFD

Níveis máximos de Tensão VM (MPa)			
Situação: Torção 3 Apoios FD			
Stresslab		**ANSYS**	
Nº Elem.	Tensão	**Nº Elem.**	Tensão
216	***282***	***353***	***282***
353	***232***	***216***	***217***
5084	230	**3066**	216
248	223	**273**	196
3109	217	**5084**	195
273	203	**3077**	178
534	196	**3094**	176
3246	187	**3091**	175
229	182	**535**	169
1335	175	**3095**	167

Veículo em torção direita quando apoiado na roda frente esquerda

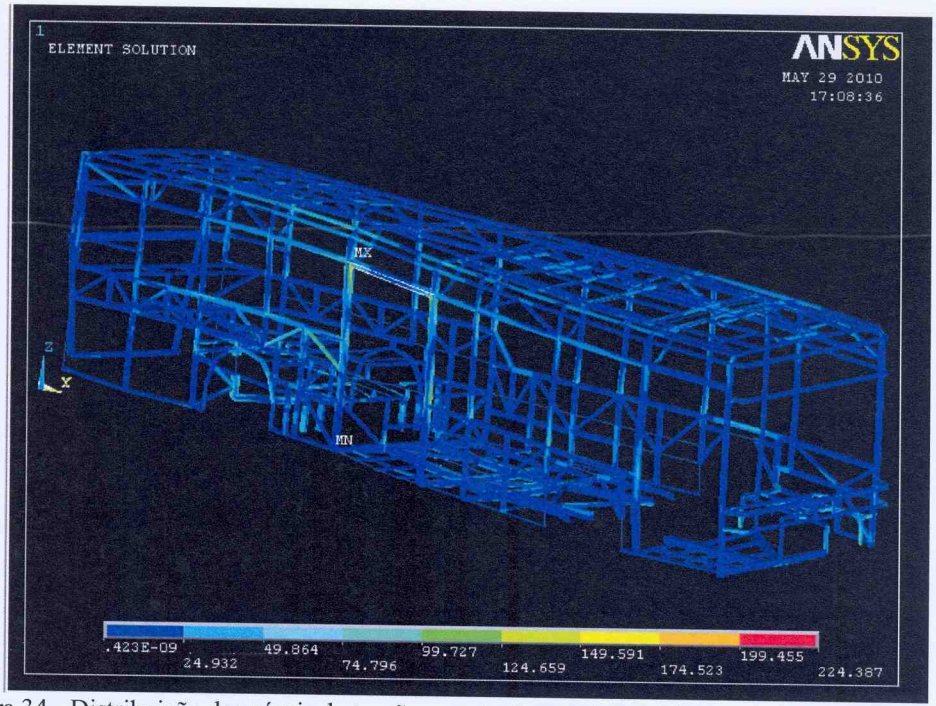


Figura 34 - Distribuição dos níveis de tensão na estrutura resistente G1 para o caso de 3 apoios FE

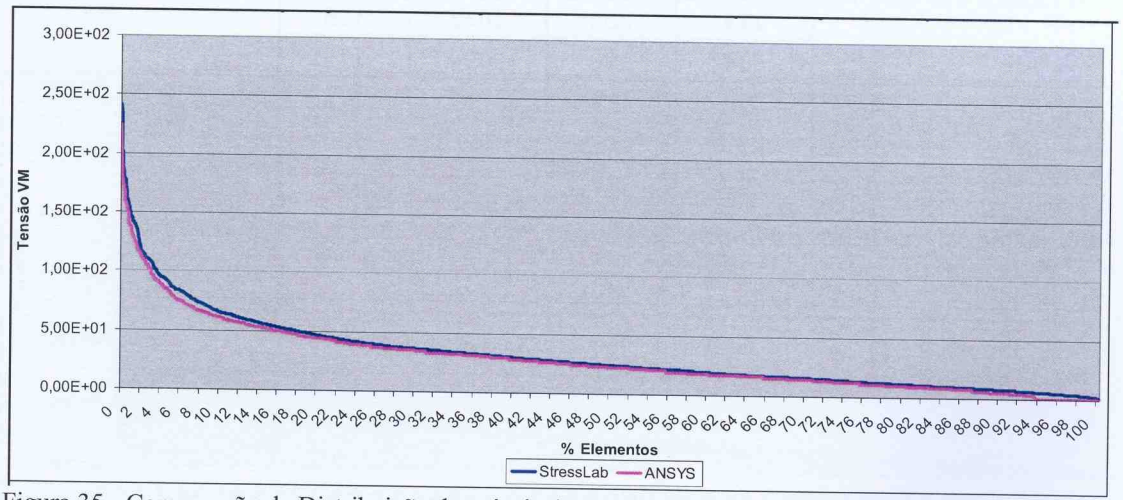


Figura 35 - Comparação da Distribuição dos níveis de tensão na estrutura resistente G1 para torção 3AFD

Observações gerais: nesta situação de torção quando apoiado no rodado esquerdo da frente os resultados obtidos seguem as mesmas observações anteriores. Existem zonas onde há um grau de concordâncias mas outras zonas que necessitam de ser observadas mais pormenorizadamente.

Tabela 11 - Comparação dos níveis máximos de tensão VM na estrutura resistente G1 para torção 3AFE

Níveis máximos de Tensão VM (MPa)			
Situação: Torção 3 Apoios FE			
Stresslab		ANSYS	
Nº Elem.	Tensão	Nº Elem.	Tensão
229	***241***	***1115***	***224***
1115	***241***	**346**	222
254	233	**1152**	183
5083	203	**3066**	178
346	200	**3091**	177
1152	193	**1114**	176
1114	188	**3075**	174
3112	184	**3094**	172
3245	180	***229***	***169***
3075	179	**279**	168

Novamente, tal como acontece nos resultados anteriores para a torção quando apoiado no rodado direito da frente, existe uma incoerência nos resultados obtidos. Por um lado existem elementos com um bom grau de concordância (elemento 1115) mas por outro existem elementos que apresentam irregularidades nos resultados.

Resumindo os resultados obtidos, é possível obter a curva característica do modelo numérico para cada programa de análise. A curva característica do modelo numérico é a combinação de todos os resultados obtidos para cada caso de estudo (considerando veiculo com carga máxima em 4 apoios, 3 apoios frente direita e 3 apoios frente esquerda) para determinar qual o maior nível de tensão que cada elemento pode atingir, relacionado com o caso de estudo.

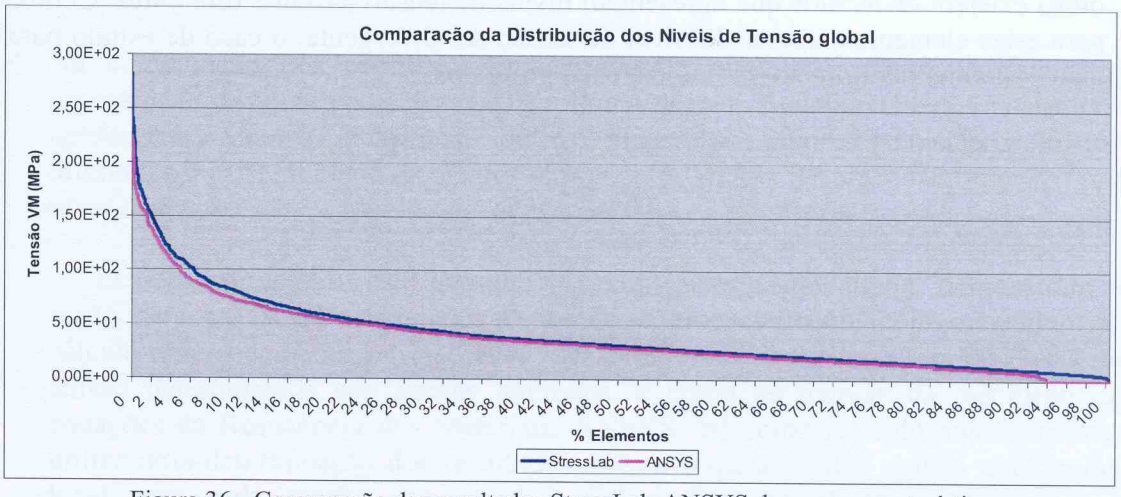


Figura 36 - Comparação dos resultados StressLab-ANSYS da curva característica

A análise das curvas características dos resultados obtidos de cada programa permite confirmar as mesmas observações relatadas anteriormente para cada caso de estudo individual. Por um lado, existe uma zona de concordância dos resultados mas por outro existem zonas que apresentam diferença nos resultados ou até mesmo ausência dos mesmos, o que implica uma análise mais pormenorizada dos níveis de tensão registados para cada elemento nos dois programas em comparação.

Níveis máximos de Tensão VM (MPa)					
Stresslab			ANSYS		
Nº Elem.	Tensão	Caso de torção	Nº Elem.	Tensão	Caso de torção
216	282	AD	353	282	AD
229	241	AE	1115	224	AE
1115	241	AE	346	222	AE
254	233	AE	216	217	AD
353	232	AD	3066	216	AD
5084	230	AD	273	196	AD
248	223	AD	5084	195	AD
3109	217	AD	1152	183	AE
273	203	AD	3077	178	AD
5083	203	AE	3091	177	AE
346	200	AE	3094	176	AD

Tabela 12 - Comparação dos níveis máximos de tensão VM na estrutura resistente G1

Com esta análise final é possível verificar que a concordância dos resultados obtidos para os níveis de tensão por StressLab e ANSYS não é inteiramente confirmada. Se por um lado existem elementos que apresentam um bom grau de concordância, por outro existem elementos que apresentam níveis de tensão bastante diferentes. Contudo, para estes elementos, apesar do nível de tensão ser divergente, o caso de estudo para o qual o valor é máximo é o mesmo em cada programa.

3.4 Conclusões

O presente estudo é bastante complexo mas com várias potencialidades para aprender métodos de análise com o novo programa ANSYS, tirando partido das suas vantagens quer no processo de preparação do modelo, quer na análise dos resultados.

Para potencializar este processo de estudo, existiu uma grande vantagem na comparação dos resultados obtidos anteriormente em StressLab porque sendo este o programa largamente utilizado pelo autor em processos de optimização, existe um historial de valores de referência que devem ser transportados para ANSYS.

De uma forma global, a anterior análise de resultados permitiu concluir:

- ✓ Apesar de os resultados não serem todos completamente confirmados, o processo de transferência de informação de StressLab para ANSYS pode ser considerado como bem sucedido. As diferenças de resultados são intrínsecas aos programas de cálculo, considerações e métodos que só dependem dos mesmos.

  Este facto é sustentado na comparação dos resultados em termos de massa, onde é possível concluir que a representação geométrica foi bem conseguida porque o centro de gravidade e descarga por eixo foram coincidentes mas o peso global apresenta uma diferença considerável que pode ser explicada pelo facto do ANSYS considerar cantos rectos na secção transversal de cada perfil para a determinação das propriedades físicas.

- ✓ Na comparação dos resultados em termos de deformações geométricas (deslocamentos nodais), é possível concluir que de uma forma global existe um elevado grau de concordância dos resultados para os 3 casos de estudo analisados (modelo numérico em 4 e 3 apoios alternadamente).

- ✓ Na comparação dos resultados em termos de níveis de tensão verifica-se a necessidade de uma avaliação mais profunda porque alguns elementos analisados apresentam valores próximos, outros elementos valores consideravelmente diferentes e existem ainda elementos em que o programa ANSYS não reporta o seu nível de tensão.

  Estudos paralelos a este trabalho [4], cujo autor acompanhou, demonstram a razão para os factos assinalados e prende-se essencialmente com o método de cálculo e considerações intrínsecas a cada programa. Com StressLab, os níveis de tensão determinados são apenas nominais, é como se trata-se da resolução de equações da Resistência dos Materiais. ANSYS, tal como referido anteriormente, utiliza uma determinação dos resultados mais avançada porque realiza uma malha local para cada secção transversal inicial e final do elemento "Beam" e a determinação dos níveis de tensão é mais refinada, poderá dizer-se que é próxima a uma resolução do tipo "Solid" que permite considerar concentração de tensão.

Tendo em conta as conclusões apresentadas, verifica-se que o estudo de comparação de resultados StressLab-ANSYS pode ser mais aprofundado. Para além de explicar as razões para a existência de diferenças nos valores dos níveis de tensão apresentados, poderia ser realizada uma ***"calibração do programa ANSYS"***.

Como referido anteriormente, existe um grande historial de estudos de optimização estrutural realizados com o anterior programa StressLab. Este historial permitiu determinar valores de referência de intervenção. Estes valores são característicos de cada tipo modelo de autocarro em estudo (turismo ou urbano conforme diferentes dimensões gerais). Como o novo programa ANSYS utiliza considerações diferentes de StressLab seria importante idealizar os novos valores de referência.

Isto implica Oportunidades de melhoria e desenvolvimento de trabalho de investigação que conduzirá ao aumento de conhecimentos na utilização da ferramenta ANSYS e exploração de novos conceitos que serviram de apoio à metodologia de análise de estruturas de carroçarias de autocarros.

As oportunidades de melhoria passam por:

- ✓ Verificar o método de determinação dos níveis de tensão de Von Mises pelo programa ANSYS e explicar as diferenças observadas;
- ✓ Realizar uma "calibração do programa ANSYS" para determinar os novos valores de referência para intervenção no processo de optimização;
- ✓ Transferir diversos modelos de cálculo do StressLab para eliminar outros possíveis problemas que poderão surgir nestes modelos numéricos.

Capítulo IV - Optimização estrutural de um mini-autocarro recorrendo a ANSYS

4.1 Introdução e motivação para a escolha do trabalho

Este capítulo centra-se no estudo de optimização de um modelo bastante particular e característico designado por *"OPTIMO" (ver figura 35)*. Este é um modelo que conta com uma presença no mercado nacional e internacional há vários anos e representa um produto bastante competitivo devido às várias versões disponíveis e qualidade de fabrico característico da CaetanoBus.

Este modelo é constituído por um chassis *TOYOTA,* fabricado exclusivamente para este modelo Caetano e permite várias configurações conforme as exigências do cliente e o serviço ao qual se destina. Actualmente a sua fabricação passou a ser realizada nas instalações da CaetanoBus em Vila Nova de Gaia.



Figura 37 - Modelo Mini-Turismo Optimo 2K

A comercialização deste modelo é realizada em várias configurações, para poder cobrir uma maior gama de possibilidades. Na figura 37 podemos observar a configuração inicial que serve de base a outras.

De todas as configurações possíveis que este modelo permite, foi escolhida a versão que permite acesso a pessoas com mobilidade reduzida e a maior lotação possível de forma a possibilitar o estudo de um modelo característico na versão teoricamente mais exigente para a estrutura resistente (ver figura 38).



Figura 38 - Modelo Mini-Turismo Optimo 2K na versão "low entry"

As principais motivações para a escolha deste modelo na versão referida foram:

- Não existia até à data nenhum cálculo estrutural deste modelo, portanto o seu estudo irá contribuir para o aumento de conhecimento técnico sobre o comportamento estrutural deste tipo particular de veículo;
- Modelo de pequenas dimensões e por isso mais prático e menos demoroso para testar a metodologia adaptada ao programa ANSYS;
- Este modelo na referida versão apresentou alguns problemas estruturais localizados e com base nos resultados finais do cálculo será possível analisar o grau de concordância dos resultados numéricos com a realidade verificada. Por outro lado também será possível testar soluções validas para o processo de optimização estrutural.

A configuração geral deste modelo e na versão referida pode ser observada no anexo 4.

4.2 Definição dos objectivos e descrição do trabalho

Seguindo uma metodologia organizada e com o objectivo de ser coerente, neste capítulo 5 será apresentado um estudo de *Optimização Estrutural* do modelo anteriormente referido, aplicando o conhecimento e estudo de investigação apresentado no capítulo anterior. É importante referir que o resultado deste trabalho teve uma aplicação prática imediata, após a sua conclusão uma vez que introduziu melhorias significativas na qualidade do produto.

Assim, podemos referir que tendo por base o trabalho de licenciatura do autor [1], este presente trabalho centra-se essencialmente nos seguintes objectivos:

- ✓ Consolidar conhecimentos anteriormente adquiridos e apresentar novos conhecimentos em modelação e estudo de estruturas resistentes de autocarros;
- ✓ Apresentar uma recente metodologia desenvolvida pelo autor com base na ferramenta ANSYS;
- ✓ Expor o resultado de algum trabalho de investigação de potencialidades de novas ferramentas do programa ANSYS e a sua aplicação na resolução de problemas práticos de Engenharia na Industria;
- ✓ Desenvolver acções de melhoria no desenvolvimento do produto.

O desenvolvimento global do trabalho consiste na construção de um modelo de simulação, suficientemente representativo do modelo real (OPTIMO 2K – "Low Entry"), aplicando uma metodologia recentemente desenvolvida e comprovada por estudos anteriormente apresentados. Esta metodologia será uma evolução de uma anteriormente apresentada [1] e que pretende tomar máximo partido das potencialidades e vantagens do novo programa de cálculo ANSYS.

Após validação do modelo de simulação, pretende-se efectuar um estudo que visa analisar o comportamento estrutural do veículo, quando sujeito a situações possíveis mas extremas, verificando zonas em estado crítico de tensão com o objecto de as tentar melhorar. Todas a modificações ao projecto sugeridas, com intenção de introduzir melhoramentos, serão estudadas e confirmadas, novamente por intermédio da simulação pelo MEF.

Este tarefa representou um grande trabalho de investigação e aprendizagem do software para permitir responder às necessidades do caso de estudo.

Para melhor entender o processo global de *Optimização Estrutural* que foi aplicado para o estudo deste modelo, com base nas ferramentas e potencialidade do programa ANSYS, convém relembrar o diagrama representado na figura 22 onde é apresentada a organização coerente das etapas da metodologia de análise.

4.3 Aplicação da metodologia de análise

4.3.1 Modelação do chassis Toyota e considerações de pré-processamento

A primeira etapa do processo de construção do modelo de simulação do mini-autocarro é a elaboração do modelo numérico representativo do chassis com todos os pormenores construtivos e a máxima representação possível da realidade para validação e confiança nos resultados que o modelo irá produzir. Como este é um componente externo à CaetanoBus é sempre um pouco difícil obter o máximo de informação possível para representação numérica. Na imagem 39 podemos observar uma pesagem do chassis para obter informação fiável.

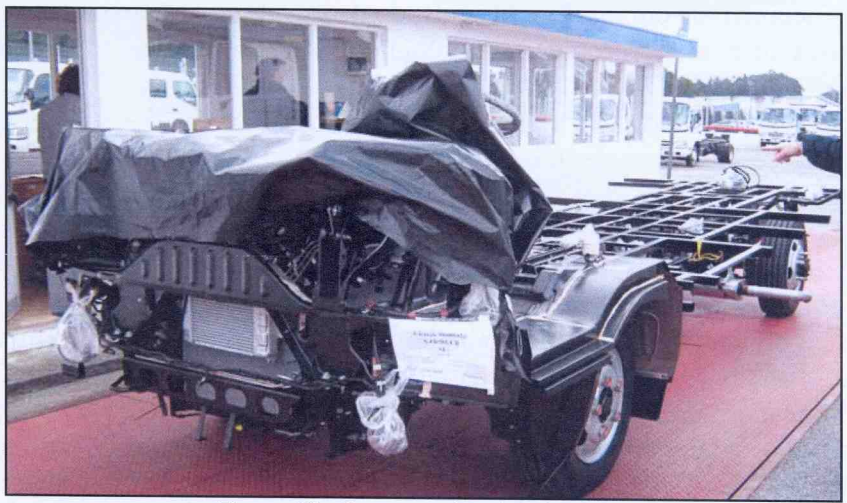


Figura 39 - Pesagem chassis TOYOTA

A construção geométrica do chassis foi realizada recorrendo ao programa CAD Solidworks, tirando partido da representação já existente em 3D (ver figura 40). Esta forma de realizar esta tarefa permite economizar bastante tempo na construção geométrica do chassis em relação à anterior que recorria ao programa CAD CADDS5, no qual era necessário construir o modelo geométrico de raiz.

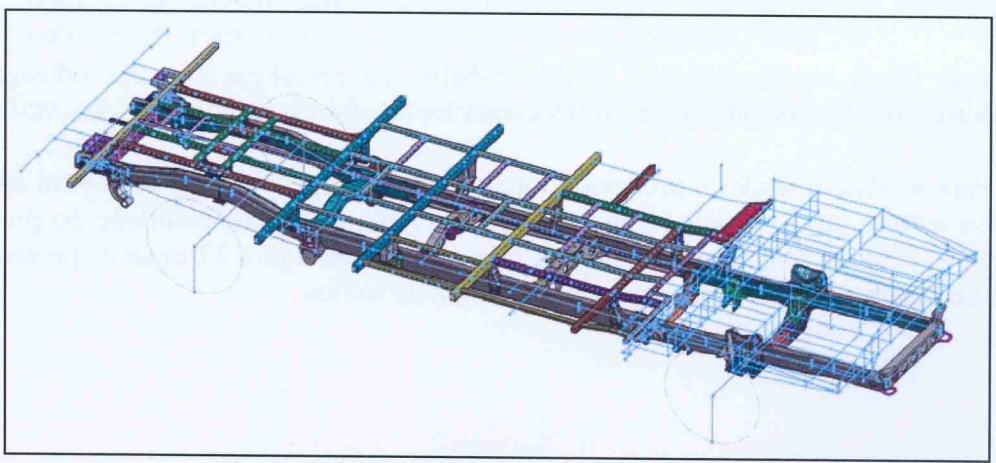


Figura 40 - Modelo geométrico do chassis TOYOTA

É durante o pré-processamento que são considerados aspectos construtivos do modelo de simulação bastante importantes para a análise crítica final dos resultados. É nesta fase que também surgem os problemas reais de Engenharia que necessitam de ser avaliados de forma racional.

Dos principais problemas de consideração na modelação do chassis é necessário realçar a modelação dos sinoblocos (ver figura 41). Estas peças de borracha que permitem acomodar deformação da estrutura (até 8 mm) são bastante importantes na análise de resultados e para a sua correcta modelação (ver figura 42) foi necessário investigar opções e comportamento de elementos no ANSYS.

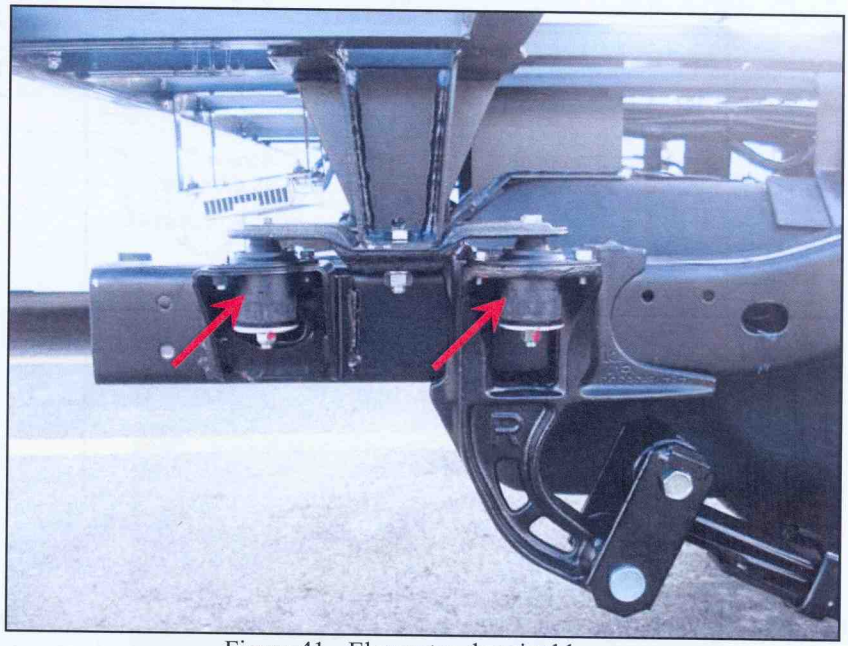


Figura 41 - Elementos dos sinoblocos

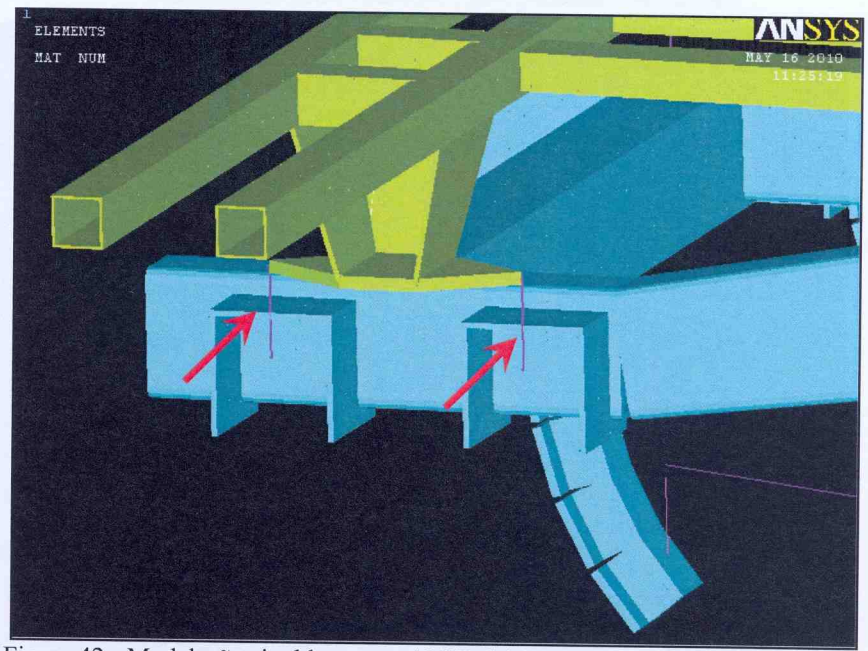


Figura 42 - Modelação sinoblocos em ANSYS (elementos finitos representativos)

Para ultrapassar esta dificuldade foi necessário recorrer ao manual do programa para encontrar e estudar o elemento finito que permitia representar de forma mais exacta o comportamento deste componente. Foram realizados estudos individuais para testar e avaliar o comportamento antes de incorporar no modelo global do chassis.

O elemento considerado (COMBIN14 - ver figura 43) tem a capacidade de combinar individualmente ou ao mesmo tempo comportamento de mola ou/com amortecedor [3]. Neste caso, na representação dos siniblocos foi inutilizada a funcionalidade de amortecedor e apenas considerada a função de mola. A constante de compressão da mola foi estimada pelo peso (da carroçaria) que cada sinobloco suporta na zona traseira do veículo e a deformação máxima verificada.

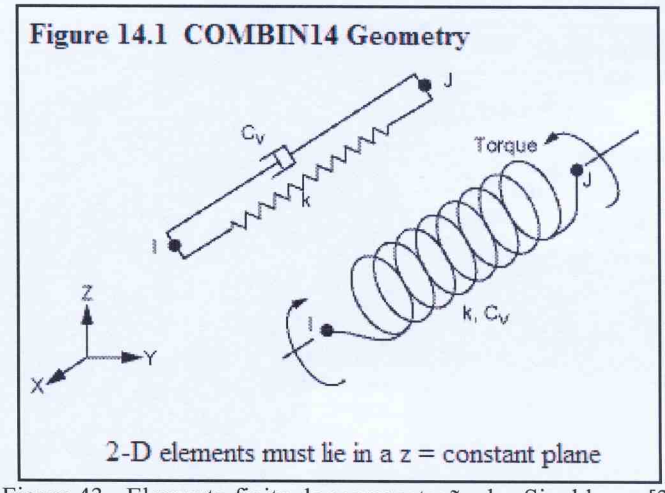


Figura 43 - Elemento finito de representação dos Sinoblocos [3]

Uma vez ultrapassadas algumas dificuldades de representação da realidade física do chassis no pré-processamento, foi obtido o modelo final de simulação do chassis que pode ser observado na figura 44.

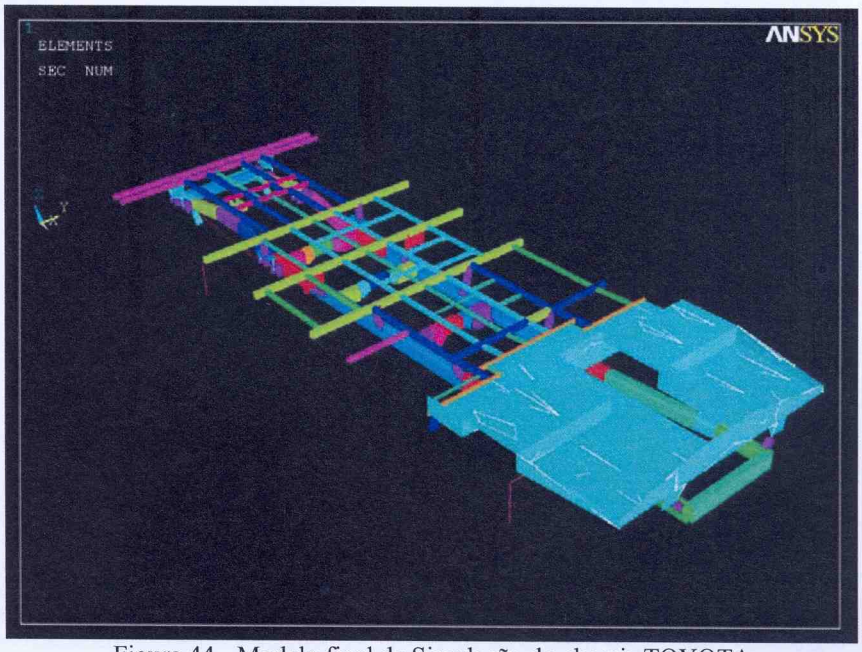


Figura 44 - Modelo final de Simulação do chassis TOYOTA

Ainda nesta etapa foi necessário validar o modelo final de simulação comparando os resultados do modelo numérico com os resultados reais da pesagem do chassis e ainda verificar se todos os elementos estão consistentemente ligados entre si.

A comparação de resultados numéricos com os dados reais obtidos por pesagem do chassis pode ser analisada na tabela 13.

Tabela 13 - Validação modelo simulação Chassis

Validação Modelo de Simulação do Chassis							
		ANSYS				PESAGEM FABRICA	
Eixo	Roda	Peso (N)		Peso (Kg)	% Peso total	Peso (Kg)	% Peso total
Traseiro	T.D.	3790	7353	750	36	750	36
	T.E.	3564					
Frente	F.D.	6798	13319	1359	64	1360	64
	F.E.	6521					
TOTAL (Kg)				2109		2110	
Diferença (Kg)					-1		

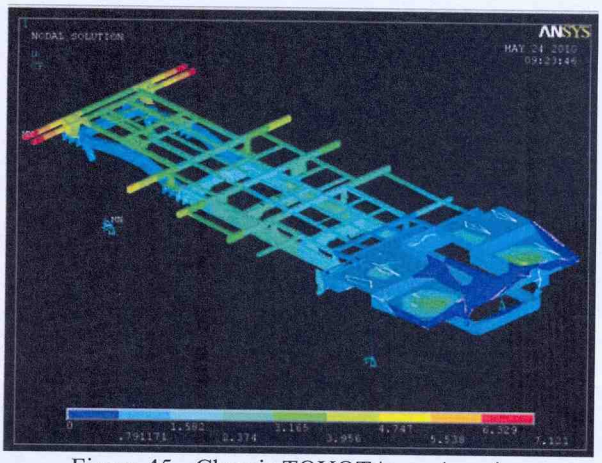


Figura 45 - Chassis TOYOTA em 4 apoios

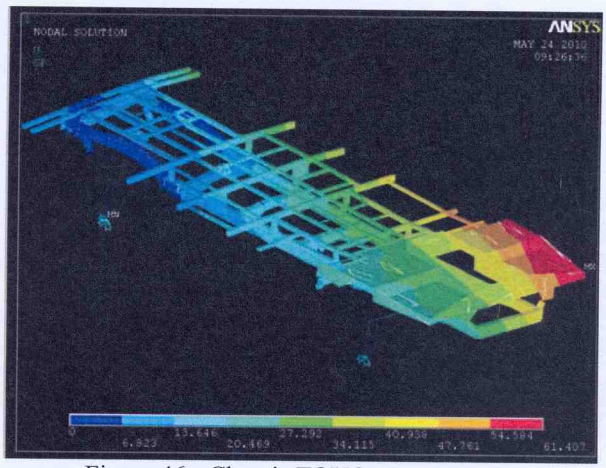


Figura 46 - Chassis TOYOTA em torção

Uma vez verificado o peso global, descarga por eixo e confirmado a conformidade do comportamento do modelo de simulação do chassis, podemos considera-lo como suficientemente representativo e portanto *validado*.

4.3.2 Modelação da carroçaria e considerações de Pré-Processamento

A construção geométrica da carroçaria foi realizada em SoildWorks com base no modelo 3D já existente, o que facilitou e encurtou o tempo necessário para realizar esta tarefa. As considerações na representação por elementos finitos contam com muita da experiência acumulada ao longo de vários modelos de cálculo realizados pelo autor durante a experiência profissional e o estudo de investigação das funcionalidades e potencialidades do programa ANSYS apresentadas anteriormente. Nas figuras 47 e 48 podemos observar a representação dos modelos numéricos da estrutura resistente isolada e da carroçaria (que inclui a estrutura resistente).

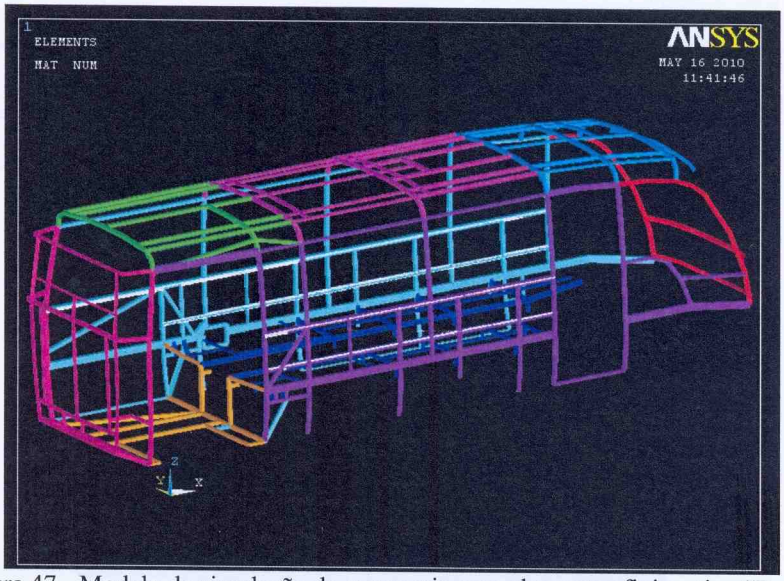


Figura 47 - Modelo de simulação da carroçaria com elementos finitos tipo "Beam"

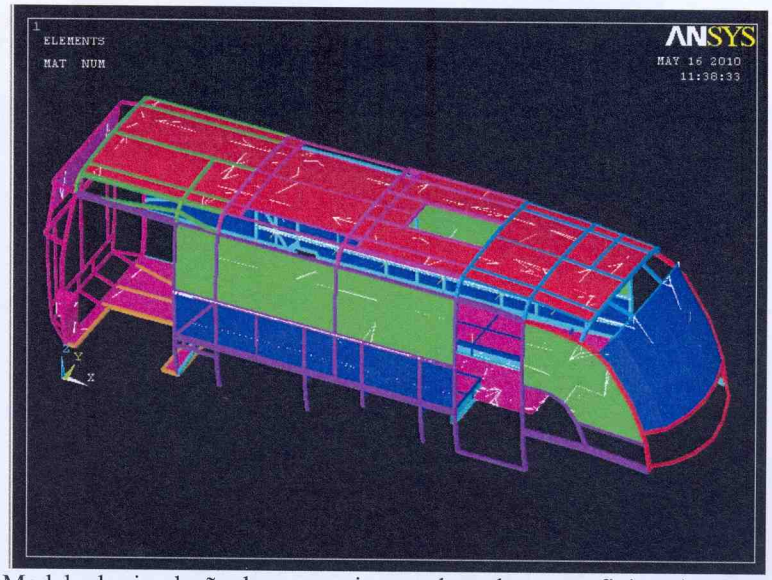


Figura 48 - Modelo de simulação da carroçaria completo elementos finitos tipo "Beam" e "Shell

A metodologia seguida para construir o modelo de simulação da carroçaria foi conforme apresentada na figura 22 da secção 2.2.2.

4.3.3 Validação do modelo numérico global de simulação

Uma vez finalizadas as etapas 1 e 2 do processo de construção do modelo de simulação (figura 22) entramos na etapa final de verificação e validação do modelo global de simulação. Esta é uma etapa bastante importante porque a sua correcta consideração está relacionada com a exactidão dos resultados obtidos e a confiança dos mesmos.

Tal como foi realizado com o modelo de simulação do chassis, o método de validação do modelo global consiste em por um lado, comparar os resultados de peso global e descarga por eixo e por outro verificar se todos os elementos estão consistentemente ligados entre si.

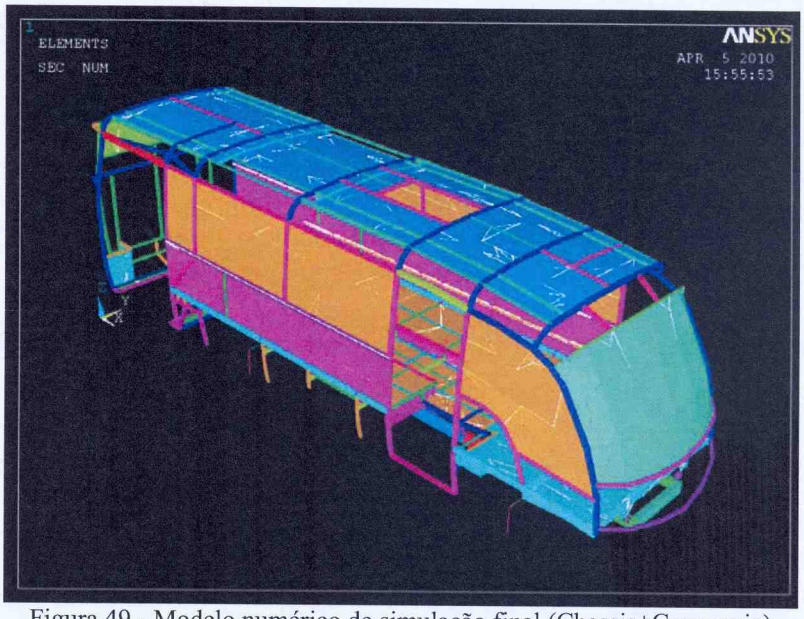


Figura 49 - Modelo numérico de simulação final (Chassis+Carroçaria)

Para retirar os resultados que permitem validar o modelo global de simulação é necessário definir os casos de estudo. Os valores a comparar são obtidos pelo desenho de homologação do modelo OPTIMO 2K "Low Entry" (4) onde são declarados todos os pesos característicos para efeitos legais.

Tabela 14 - Casos de estudo para validação do modelo de simulação global

Caso de Estudo	Restrição	Carga	Objectivo
1	4 Apoios	Tara do veículo	Validação modelo numérico por comparação com dados de pesagem
2	4 Apoios	Tara do veículo + 20 PAX sentadas + Cadeira de rodas	Validação modelo numérico por comparação com dados de pesagem e dados de homologação

Resultados obtidos

Os resultados obtidos são os seguintes:

Tabela 15 - Validação modelo global de simulação para caso de estudo 1)

Validação Modelo Global de Simulação – 1) Tara+Motorista								
		ANSYS				Pesagem		
Eixo	Roda	Peso (N)		Peso (kg)	% Peso total	Peso (Kg)	% Peso total	Diferença (kg)
Traseiro	T.D.	14308	28534	2912	58	2860	57	52
	T.E.	14226						
Frente	F.D.	10147	20469	2089	42	2140	43	-51
	F.E.	10322						
TOTAL (Kg)				5000		5000		
Diferença (Kg)					0			

Tabela 16- Validação modelo global de simulação para caso de estudo 2)

Validação Modelo Global de Simulação – 2) Peso Bruto								
		ANSYS				Ante-Projecto		
Eixo	Roda	Peso (N)		Peso (Kg)	% Peso total	Peso (Kg)	% Peso total	Diferença (kg)
Traseiro	T.D.	20495	41748	4260	64	4123	61	137
	T.E.	21253						
Frente	F.D.	11222	23620	2410	36	2588	39	-178
	F.E.	12398						
TOTAL (Kg)				6670		6711		
Diferença (Kg)					-41			

Analisando os resultados, apresentados nas tabelas 15 e 16, podemos verificar que para as situações consideradas os resultados do modelo de simulação são bastante próximos do modelo real. Na situação de peso bruto no qual é importante a posição dos passageiros sentados, alguma diferença na exacta posição dos mesmos influencia a descarga por eixo. Esta poderá ser a melhor justificação para a diferença assinalada porque o modelo em vazio (tara+motorista) corresponde com bastante exactidão ao modelo real e a colocação da cadeira de rodas (ocupante incluído) é pontual e portanto de representação bastante exacta.

Assim, podemos concluir que o modelo de simulação pode ser considerado validado e suficientemente representativo do modelo real e iniciar o processo de Optimização Estrutural com análise de resultados no pós-processamento.

4.3.4 Definição dos casos de estudo para o processo de Optimização Estrutural

Em todos os cálculos de optimização estrutural realizados pelo autor verificou-se que a pior situação para a estrutura resistente é sempre a torção do veículo, independentemente do tipo (veiculo urbano ou de turismo). Porém, existem algumas zonas que merecem alguma atenção quando o caso de estudo do veículo em 4 apoios é considerado.

Se um elemento da estrutura resistente apresenta tensões nominais elevadas em todos os casos de carga significa que a zona circundante do mesmo terá de ser avaliada mas pode existir a situação de um elemento apresentar tensões consideráveis apenas num caso de estudo específico, nesta situação significa que o elemento se encontra subdimensionado.

Para este processo de Optimização Estrutural é importante considerar situações extremas e possíveis de acontecer (ver tabela 17). Assim, em vez de considerar o passageiro de mobilidade reduzida, será considerado passageiros na área traseira do veículo por ser uma situação mais desfavorável (ver representação das forças aplicadas na. Figura 50)

Tabela 17 - Casos de estudo para o processo de optimização

Caso de Estudo	Restrição	Carga	Objectivo
3	4 Apoios	Tara do veículo + 20 PAX Sentadas + 10 PAX no Low Floor	Cálculo situação possível e extrema em serviço
4	3 Apoios Frente Dir.	Tara do veículo + 20 PAX Sentadas + 10 PAX no Low Floor	Cálculo situação possível e extrema em serviço
5	3 Apoios Frente Esq.	Tara do veículo + 20 PAX Sentadas + 10 PAX no Low Floor	Cálculo situação possível e extrema em serviço

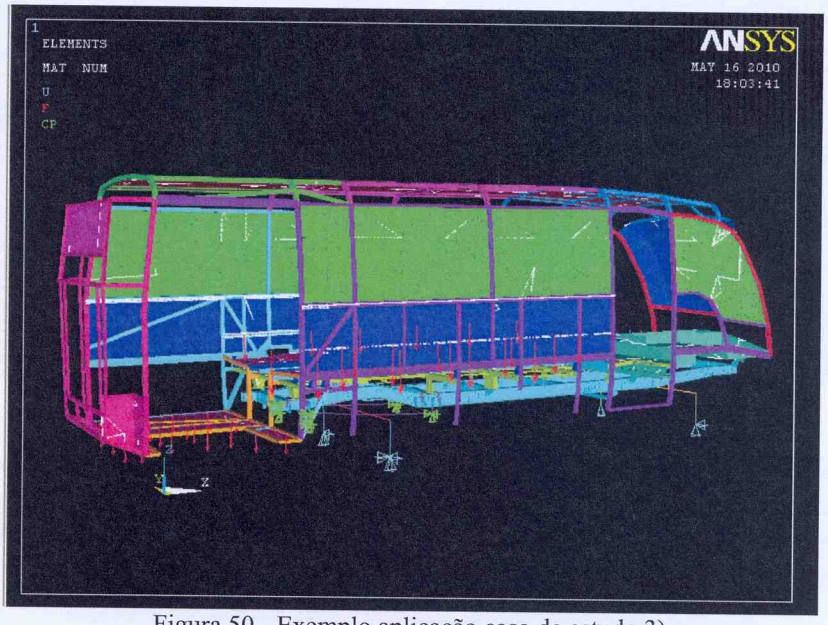


Figura 50 - Exemplo aplicação caso de estudo 3)

4.4 Análise de resultados

A experiência do autor na análise de estruturas de autocarros e no processo de optimização pelo desenvolvimento de soluções construtivas que melhorem o desempenho estrutural do veículo é bastante importante para a análise crítica dos resultados. Será esta experiencia que permitirá avaliar cada situação em termos de gravidade e permitir encontrar soluções para resolver.

4.4.1 Apresentação dos resultados e identificação de zona críticas

Relembrando que a malha de elementos finitos utilizada para a análise global da estrutura do autocarro é composta pela combinação de elementos do tipo "Beam" e "Shell", nesta análise de resultados será apenas considerado os elementos tipo "Beam" uma vez serem os elementos que apresentam maiores níveis de tensão.

Caso de estudo 3 – Situação extrema de serviço
Veiculo apoiado nos 4 rodados
20 Pessoas sentadas (lotação normal) e 10 pessoas no estrado "low entry"

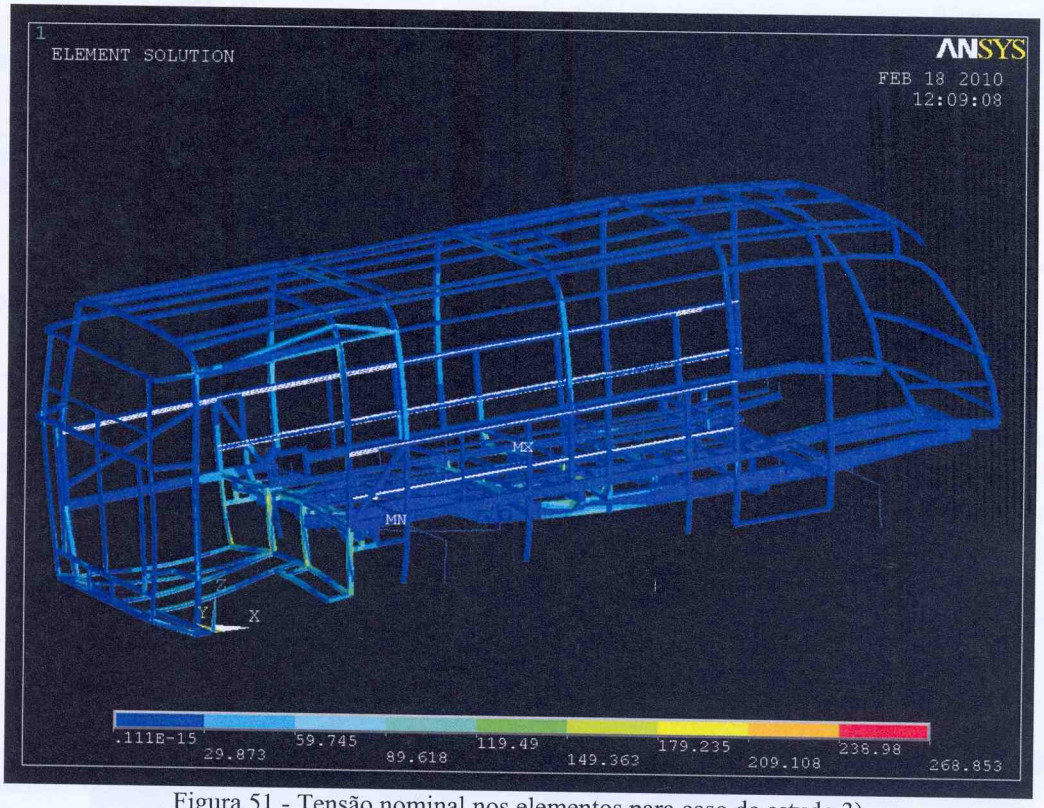


Figura 51 - Tensão nominal nos elementos para caso de estudo 3)

Observações gerais: observando a figura 51 é possível verificar que os valores máximos estão fora de limites aceitáveis porque ultrapassam valores máximos de tensão de cedência de qualquer aço de construção, portanto será necessário identificar as zonas críticas e analisar os esforços principais.

Zonas críticas no caso de estudo 3)

Estrado com ligação ao chassis

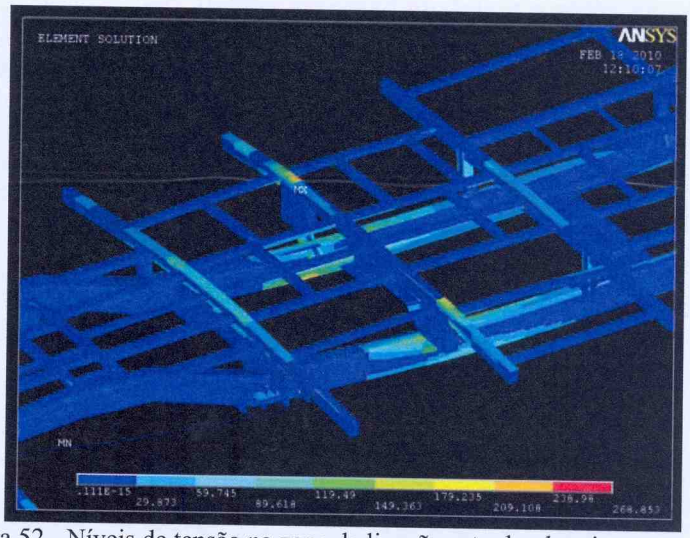


Figura 52 - Níveis de tensão na zona de ligação estrado-chassis para caso 3)

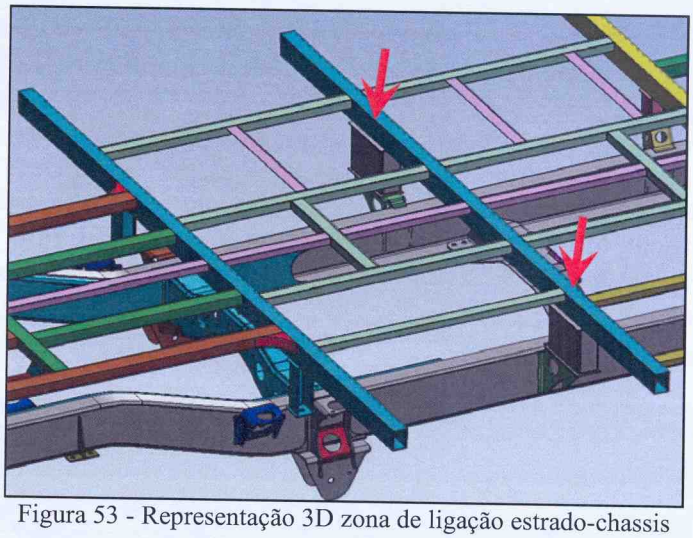


Figura 53 - Representação 3D zona de ligação estrado-chassis

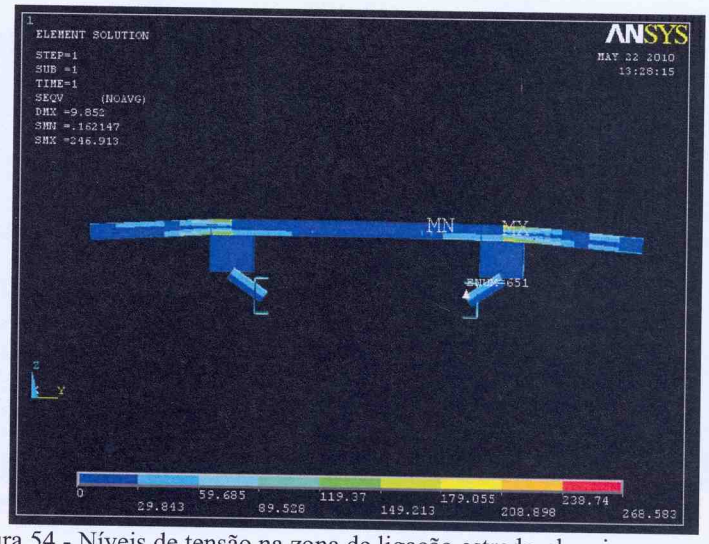


Figura 54 - Níveis de tensão na zona de ligação estrado-chassis para caso 3)

Uma análise pormenorizada da zona crítica e do nível de tensão que aparece concentrado e confinado a poucos elementos, permite perceber que este exemplo representa uma situação em que a modelação por elementos finitos não conseguiu caracterizar correctamente e realidade física do modelo real.

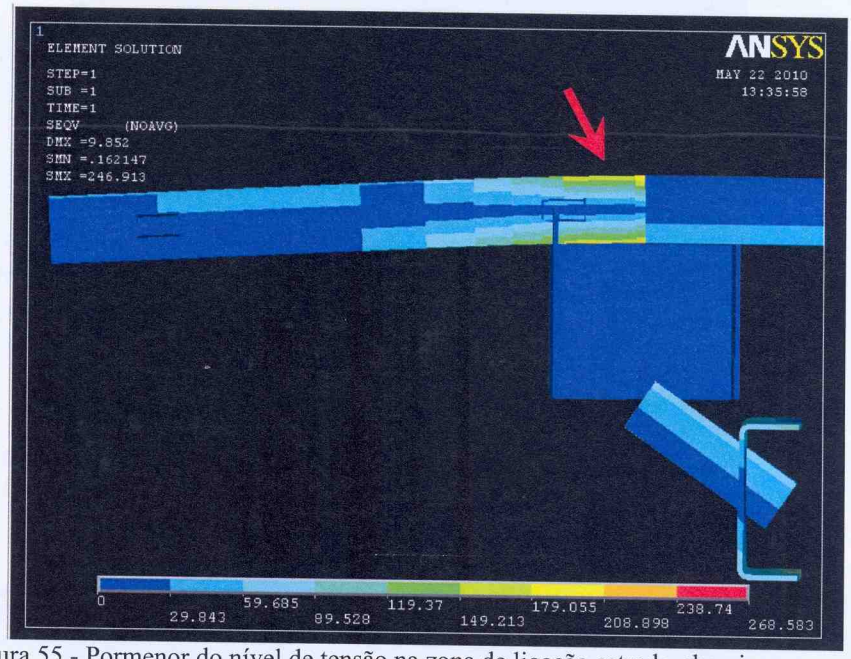


Figura 55 - Pormenor do nível de tensão na zona de ligação estrado-chassis para caso 3)

Neste caso particular a modelação por elementos do tipo "Beam" que representa o elemento vertical (com propriedades físicas de um perfil tipo U) não consegue representar a rigidez que a chapa de interposição introduz na ligação para o perfil transversal, resultando num esforço elevado nos elementos do perfil transversal que não são verdadeiros.

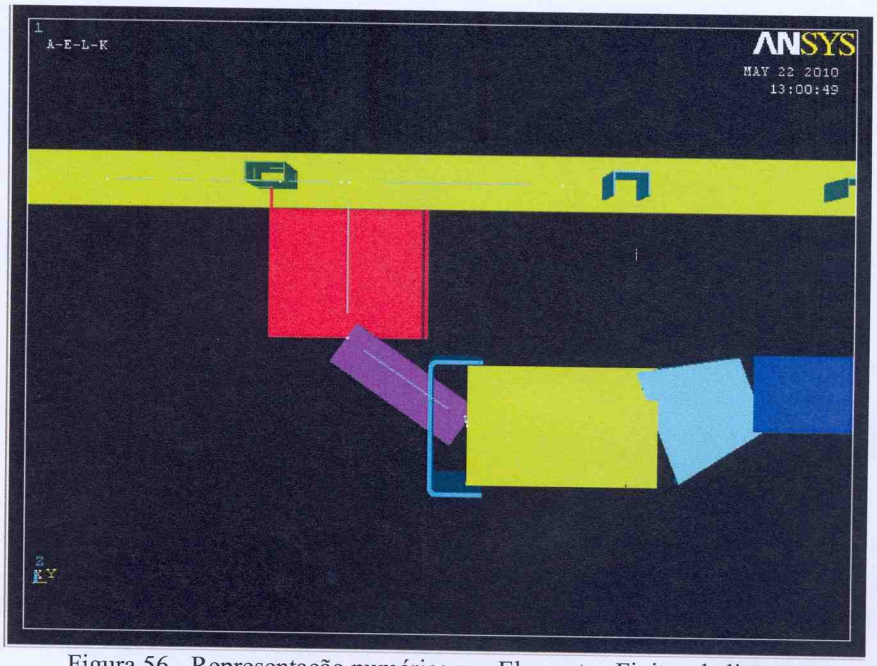


Figura 56 - Representação numérica por Elementos Finitos da ligação

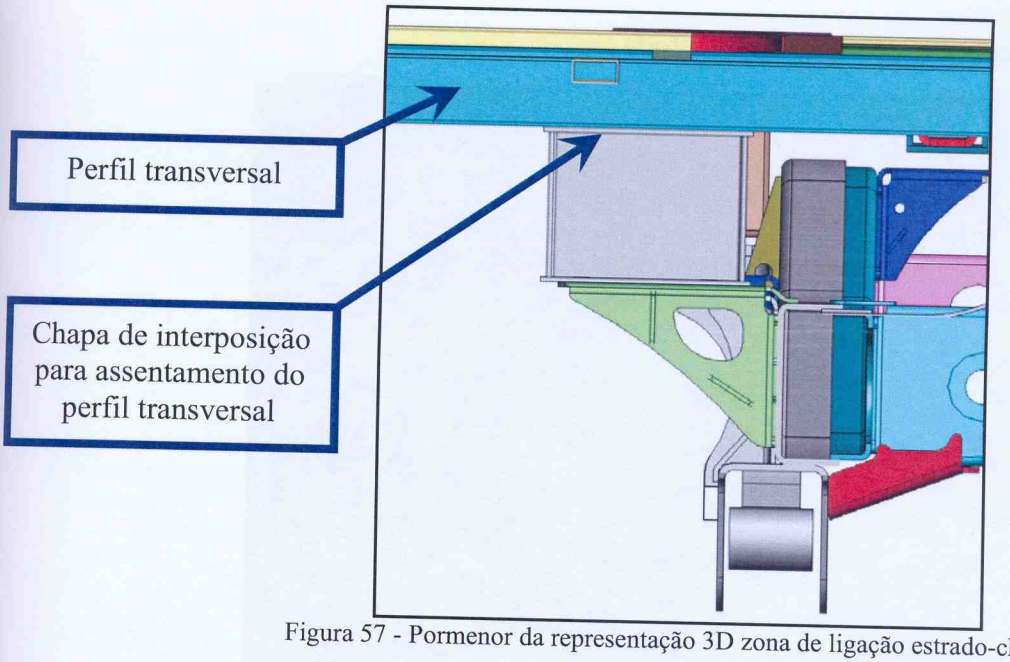


Figura 57 - Pormenor da representação 3D zona de ligação estrado-chassis

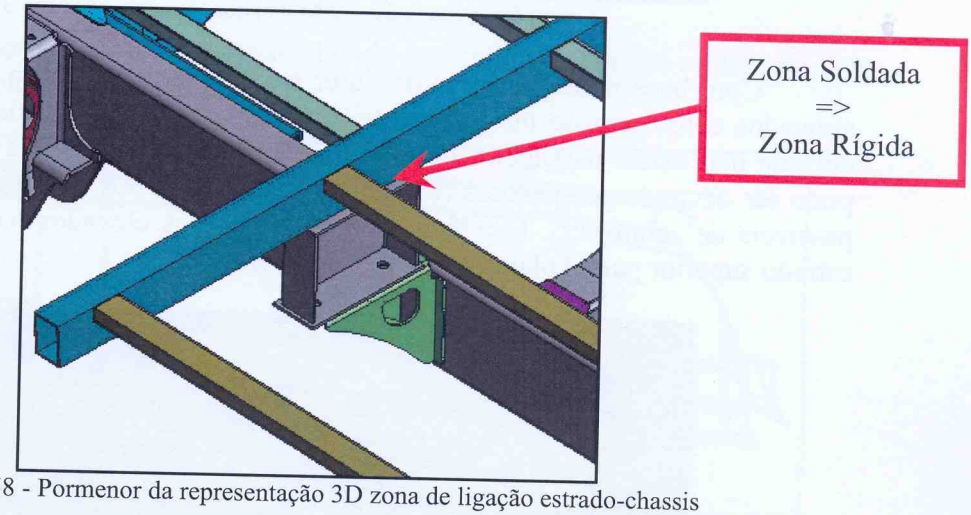


Figura 58 - Pormenor da representação 3D zona de ligação estrado-chassis

Uma vez que os esforços transmitidos aos elementos do perfil transversal são bastante superiores à realidade, nesta situação esta zona não foi considerada como crítica e por isso não foi realizada acções de correcção.

Eventualmente seria relevante realizar uma análise local desta zona em pormenor, recorrendo a outro tipo de malha (elementos tipo "solid") para confirmar que de facto os esforços não são elevados e portanto esta não seria uma zona considerada como crítica). O método mais correcto e vantajoso de analisar esta situação seria aproveitar como inputs para este cálculo pormenorizado as cargas provenientes do cálculo global.

Este é um exemplo da importância da análise crítica dos resultados porque uma confiança incontestável nos resultados do cálculo poderiam conduzir a alterações no projecto que não seriam vantajosas ou mesmo com consequências indesejáveis.

Estrado traseiro com ligação à zona de entrada

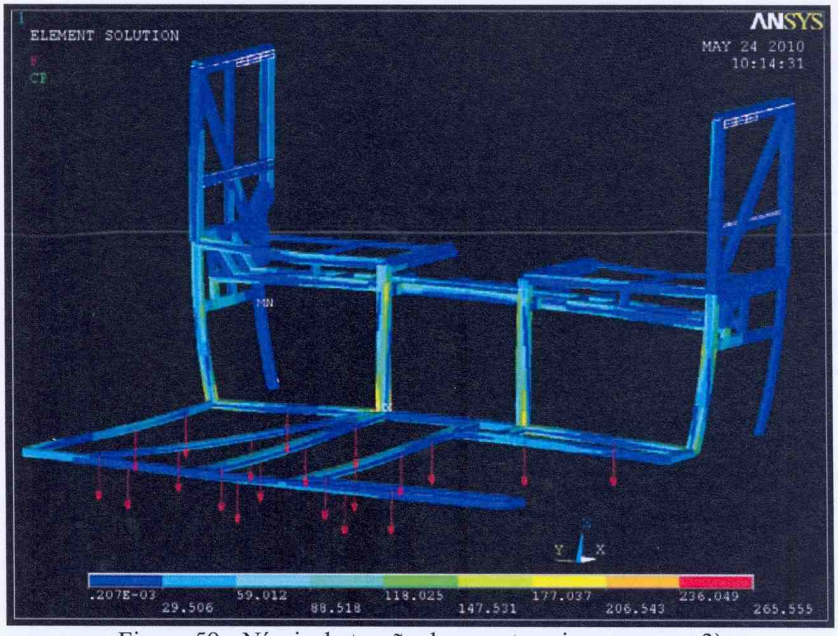


Figura 59 - Níveis de tensão da zona traseira para caso 3)

Com base na experiência do autor na análise da estrutura resistente e esforços aplicados considerou-se que a zona traseira do veículo era a mais crítica. Na situação em que não existe passageiro de mobilidade reduzida a área que lhe estava destinada pode ser ocupada por pessoas (consideração utilizada nos casos de estudo extremos e passíveis de acontecer). Este facto introduz esforços elevados na zona de ligação do estrado superior para a plataforma inferior de entrada.

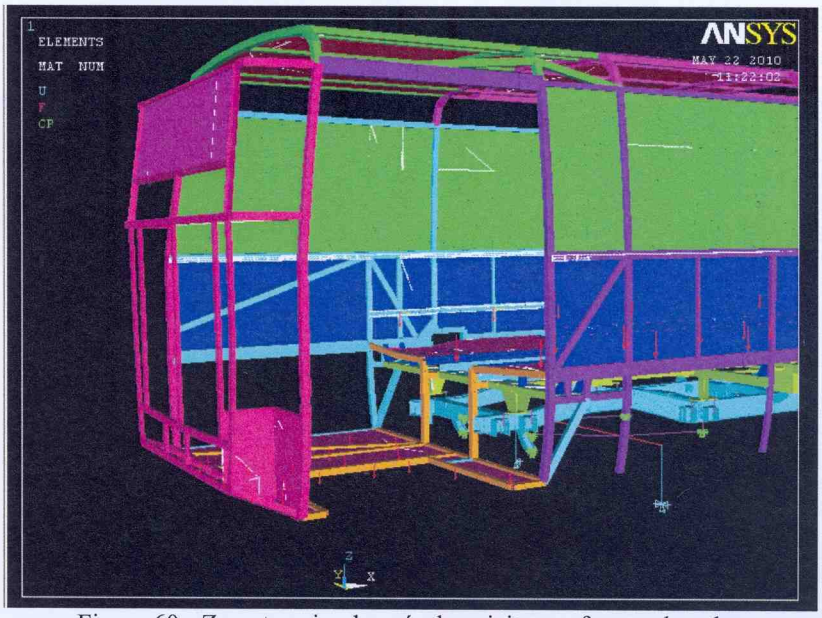


Figura 60 - Zona traseira do veículo sujeita a esforços elevados

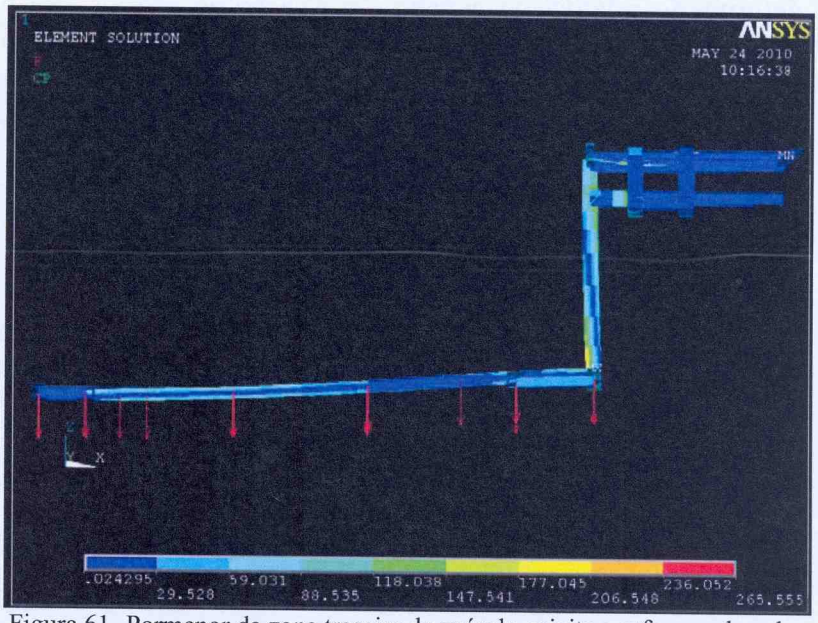


Figura 61 -Pormenor da zona traseira do veículo sujeita a esforços elevados

Esta situação agrava-se ainda mais devido aos ciclos dinâmicos a que esta zona do veículo está sujeita (ver figuras 62 e 63).

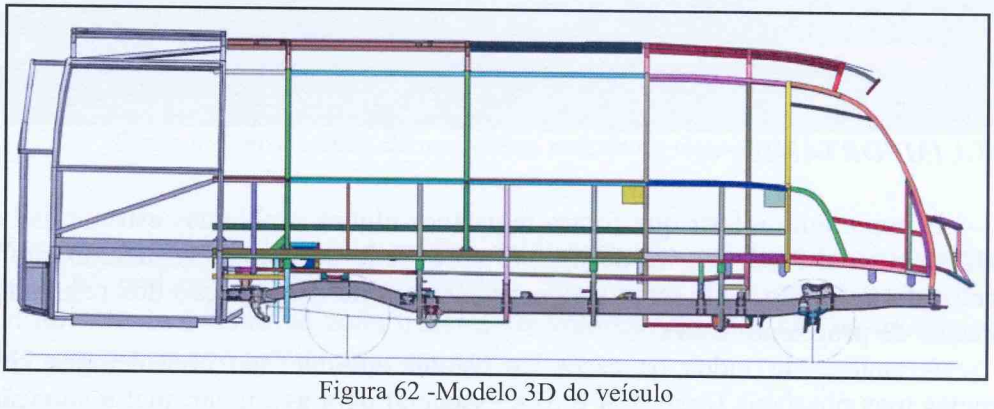


Figura 62 -Modelo 3D do veículo

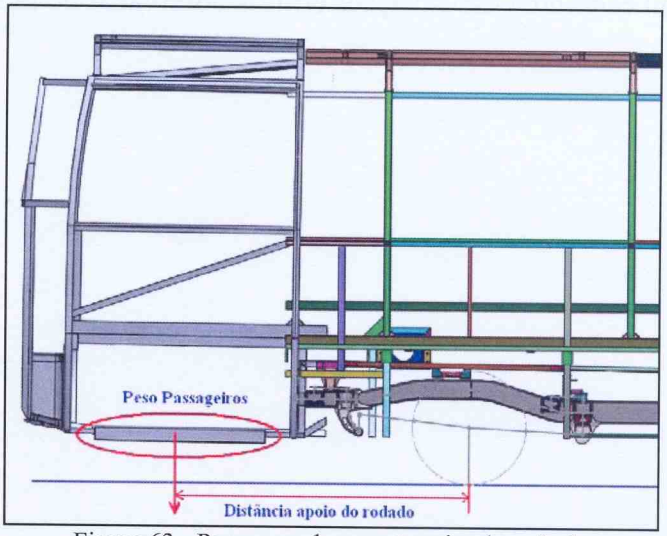


Figura 63 - Pormenor da zona traseira do veículo

Outra situação que pode ser observada na figura 64 e bastante importante de referir é a deformação relativa do estrado em relação ao chassis que permite que o estrado se deforme primeiro. Esta situação implica que a rigidez do chassis não contribua significativamente para ajudar a evitar a deformação do estrado.

Esta situação deve-se ao facto da ligação entre das longarinas do chassis ao estrado superior ser constituído por sinoblocos na zona traseira que permite uma deformação relativa do estrado. Este facto é o que relaciona os níveis de tensão do estrado na zona central com a zona traseira.

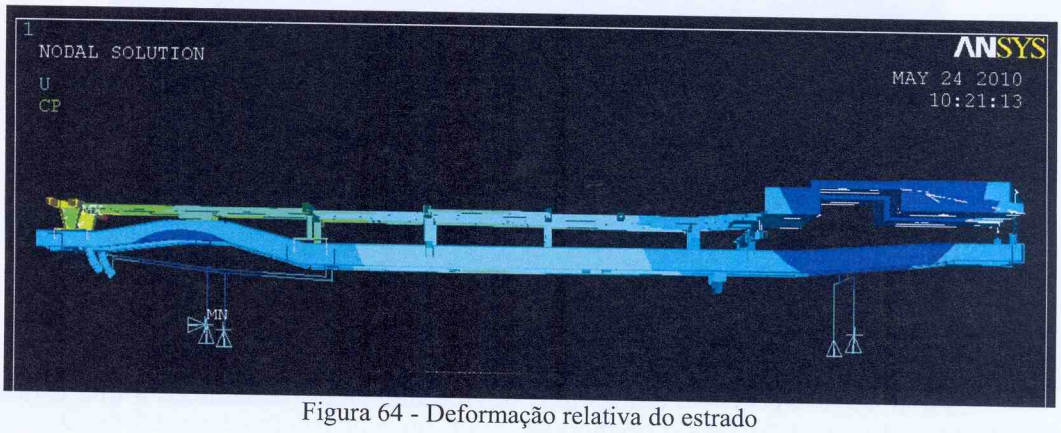


Figura 64 - Deformação relativa do estrado

NOTA IMPORTANTE:

É importante referir que foram registados alguns problemas estruturais bastante localizados nesta zona traseira de ligação ao estrado de entrada rebaixado, em alguns veículos desta versão. Este facto será ser vantajoso na comparação dos resultados para validação do programa ANSYS.

A análise de todos os casos de estudo em que são consideradas situações extremas mas possíveis (caso 3, 4 e 5) é essencial para averiguar qual a situação mais crítica e a possível causadora das situações críticas observadas no modelo real.

Caso de estudo 4 – Situação extrema de serviço

Roda frente direita apoiada; roda frente esquerda desapoiada => Torção do veículo
20 Pessoas sentadas e 10 pessoas no estrado "low floor"

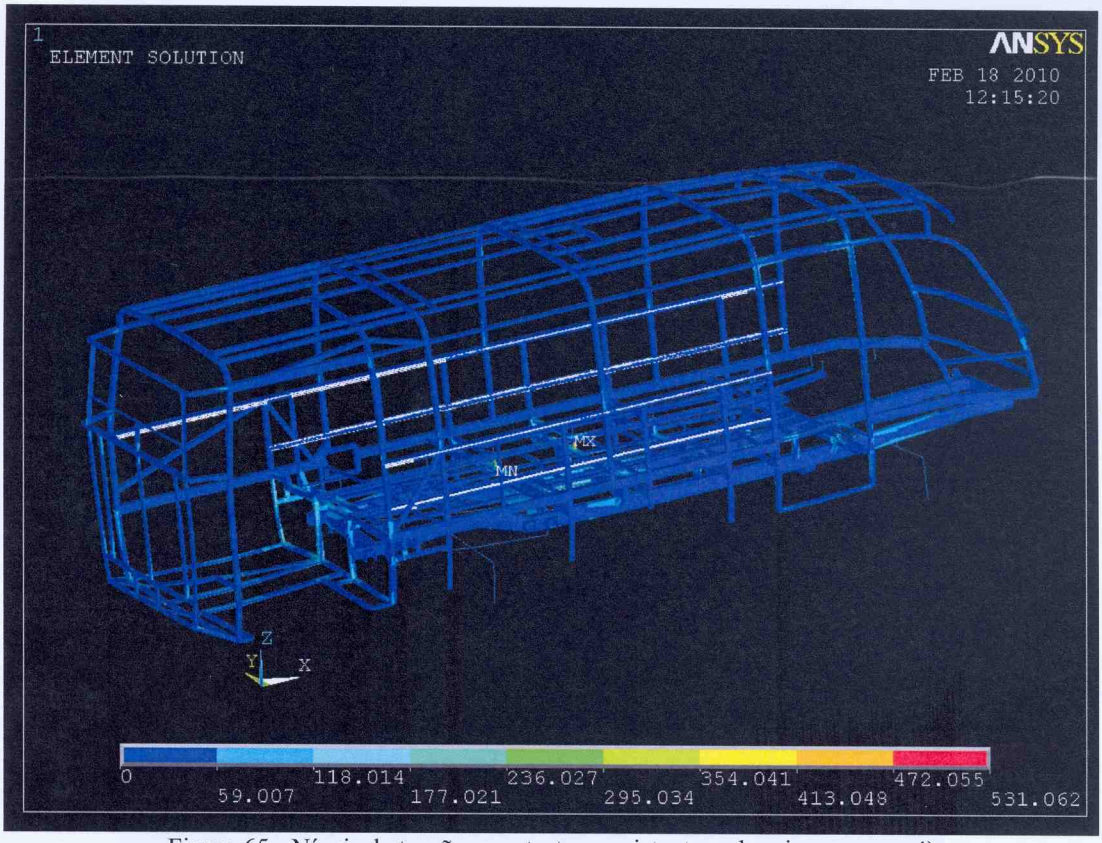


Figura 65 - Níveis de tensão na estrutura resistente e chassis para caso 4)

Observações gerais: Analisando o gráfico da distribuição global de tensão apresentado na figura 65 podemos verificar que existem duas zonas mais criticas: uma na zona central do veiculo e outra na zona traseira Os valores máximos são bastante elevados por isso será necessário avaliar as zonas críticas.

Zonas críticas no caso de estudo 4)

Na figura 66 é possível observar zonas críticas para este caso de estudo.

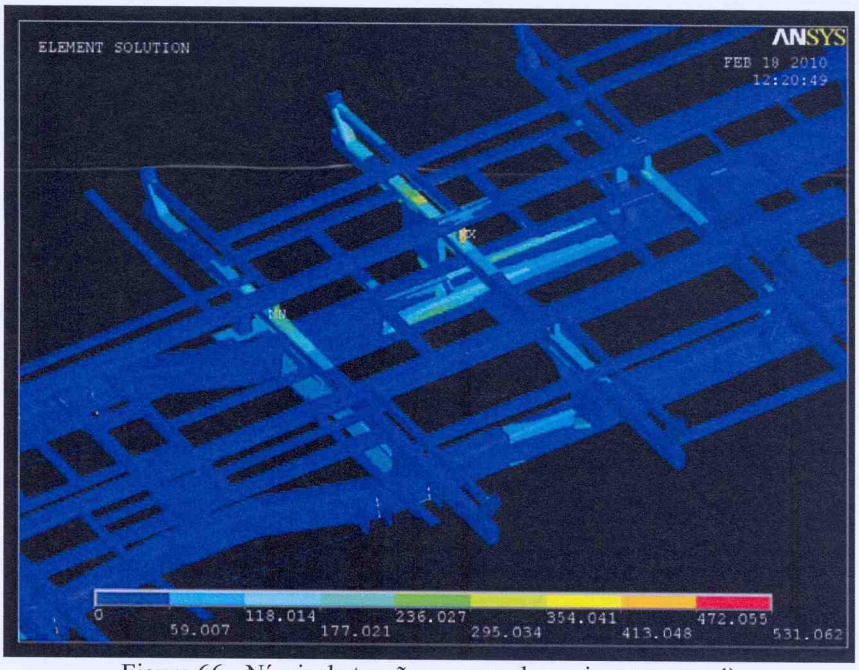


Figura 66 - Níveis de tensão na zona da coxia para caso 4)

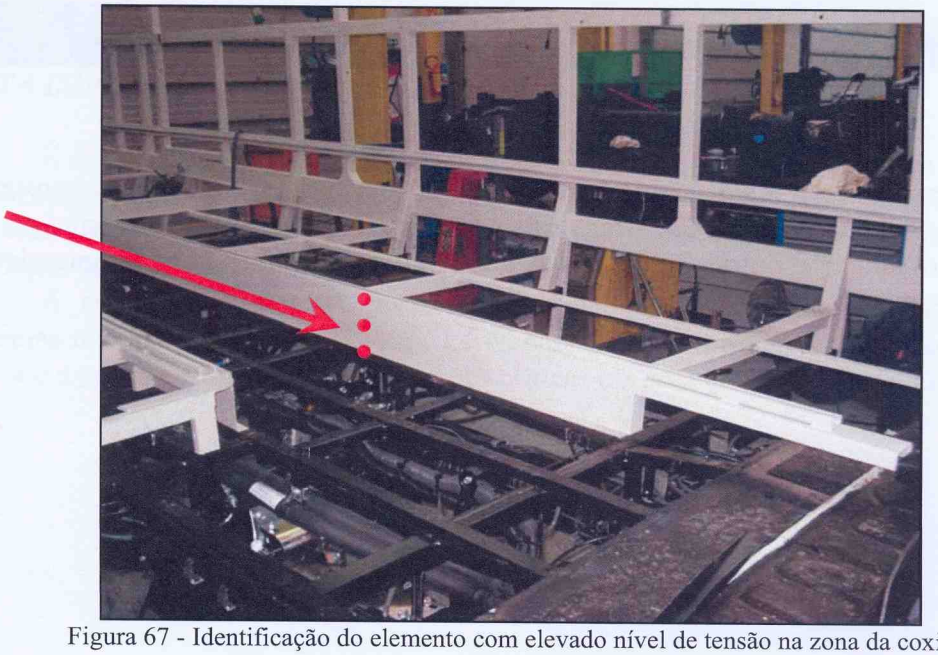


Figura 67 - Identificação do elemento com elevado nível de tensão na zona da coxia

O elemento que apresenta elevado nível de tensão e apresentado na figura 67 não é estruturalmente crítico. A razão para este elevado nível de tensão poderá estar também relacionada com a deformação relativa do estrado em relação ao chassis que acontece devido à utilização dos sinoblocos.

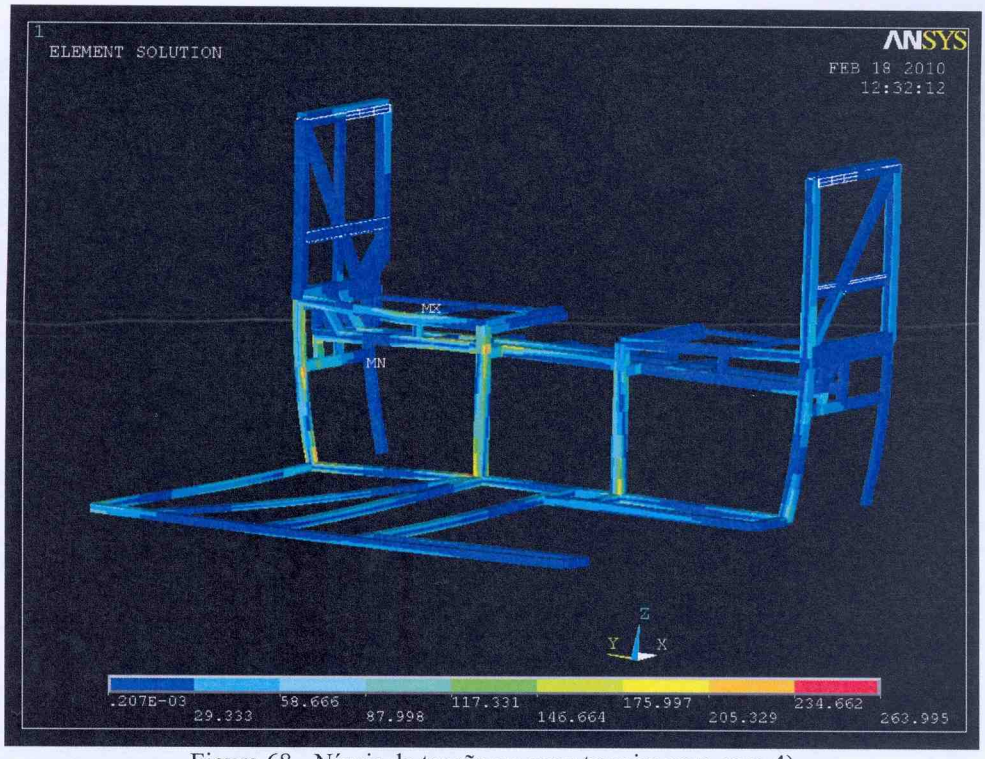


Figura 68 - Níveis de tensão na zona traseira para caso 4)

Os valores máximos nesta zona e apresentado na figura 68 e 69 já são bastante elevados e fora de limites aceitáveis. Nesta situação verificação um agravamento dos níveis de tensão em relação aos valores observados para o caso de estudo 3) essencialmente pelo facto do veículo estar sujeito a torção.

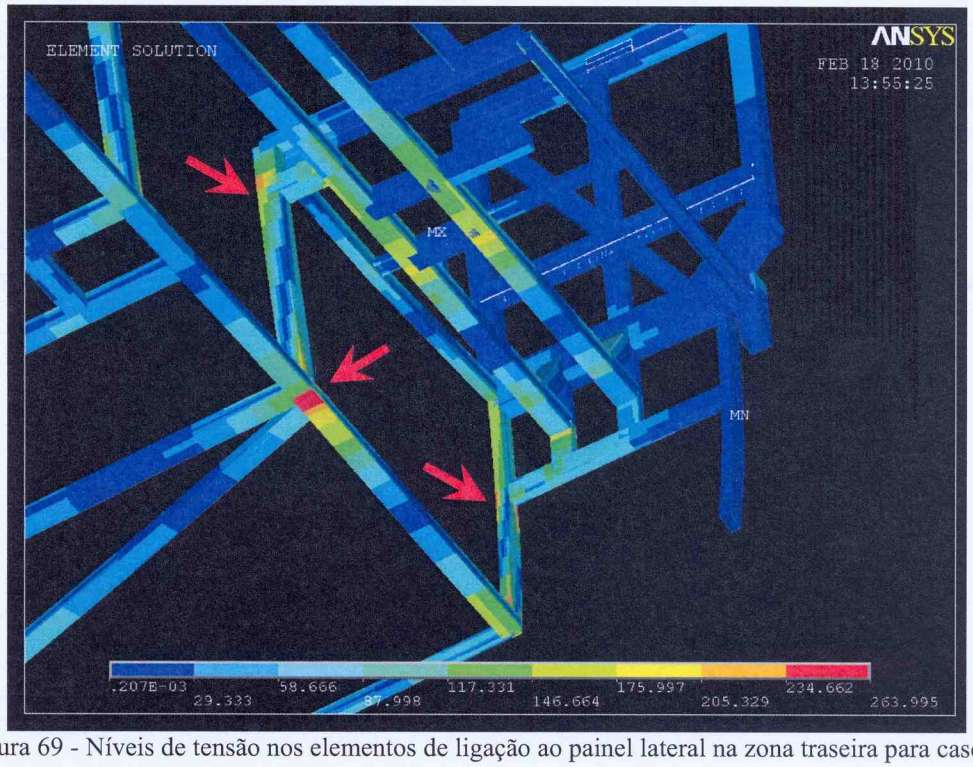


Figura 69 - Níveis de tensão nos elementos de ligação ao painel lateral na zona traseira para caso 4)

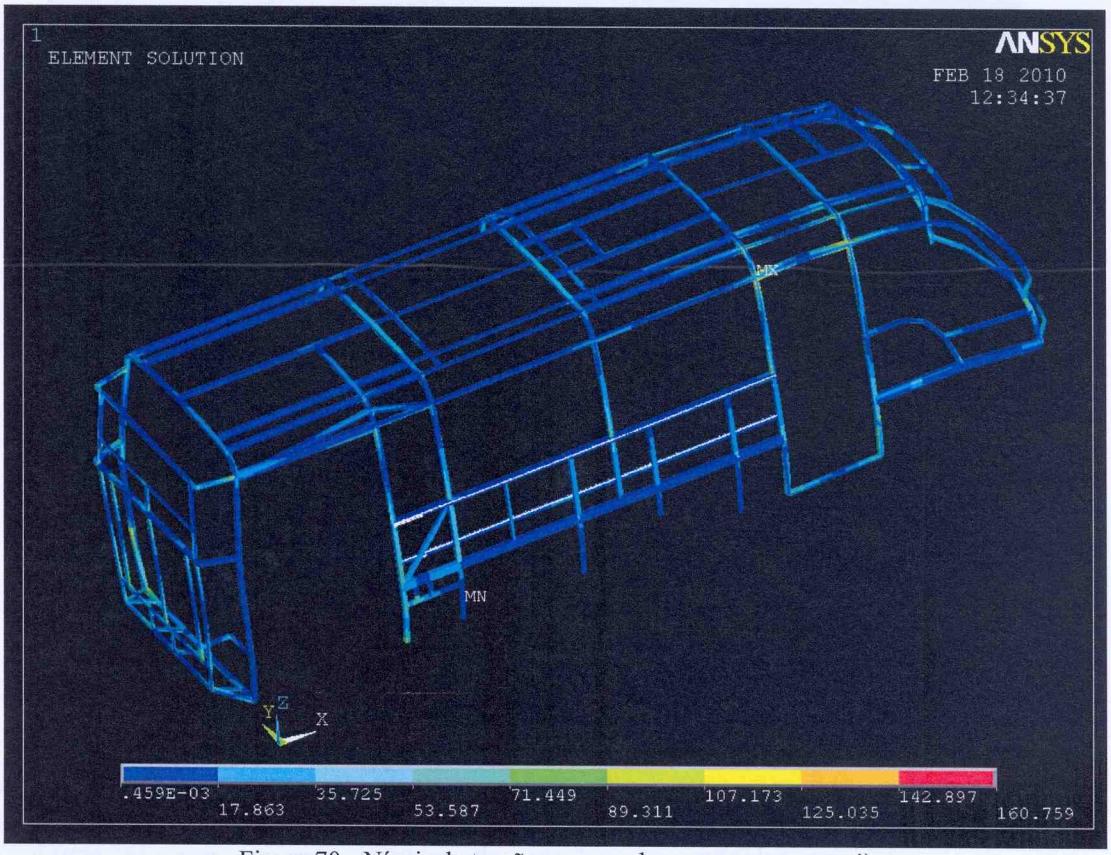


Figura 70 - Níveis de tensão na zona das portas para caso 4)

Como referido anteriormente, a análise estrutural do veículo conta com muita da experiencia do autor nesta tarefa e por este facto é necessário observar zonas já consideradas previamente como criticas. Exemplo deste método de abordagem são as zonas das portas porque geralmente são as zonas onde os esforços são mais elevados porque existe uma descontinuidade dos painéis laterais que funcionam como uma viga armada e seguram a deformação torsional do veículo.

Para este caso de estudo, os valores observados nesta zona são considerados como aceitáveis e portanto esta zona pode ser considerada como bem dimensionada (ver figura 70).

Caso de estudo 5 – Situação extrema de serviço

Roda frente esquerda apoiada; roda frente direita desapoiada => Torção do veículo
20 Pessoas sentadas e 10 pessoas no estrado "low floor"

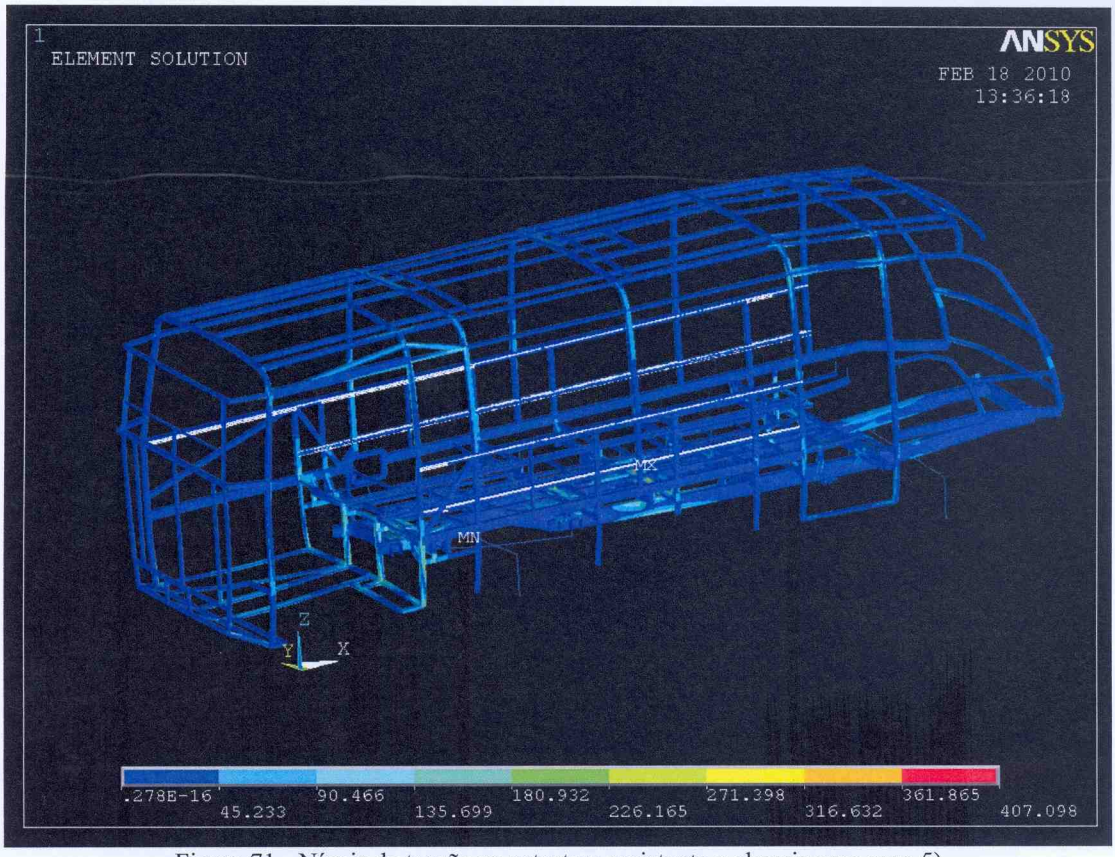


Figura 71 - Níveis de tensão na estrutura resistente e chassis para caso 5)

Observações gerais: Analisando o gráfico da distribuição global de tensão da figura 71 podemos verificar que existem três zonas mais criticas: uma na zona central do veículo, outra na zona traseira e as zonas das portas. Os valores máximos são bastante elevados e por isso será necessário avaliar as zonas críticas.

Zonas críticas no caso de estudo 5)

Na figura 72 é possível observar zonas críticas para este caso de estudo.

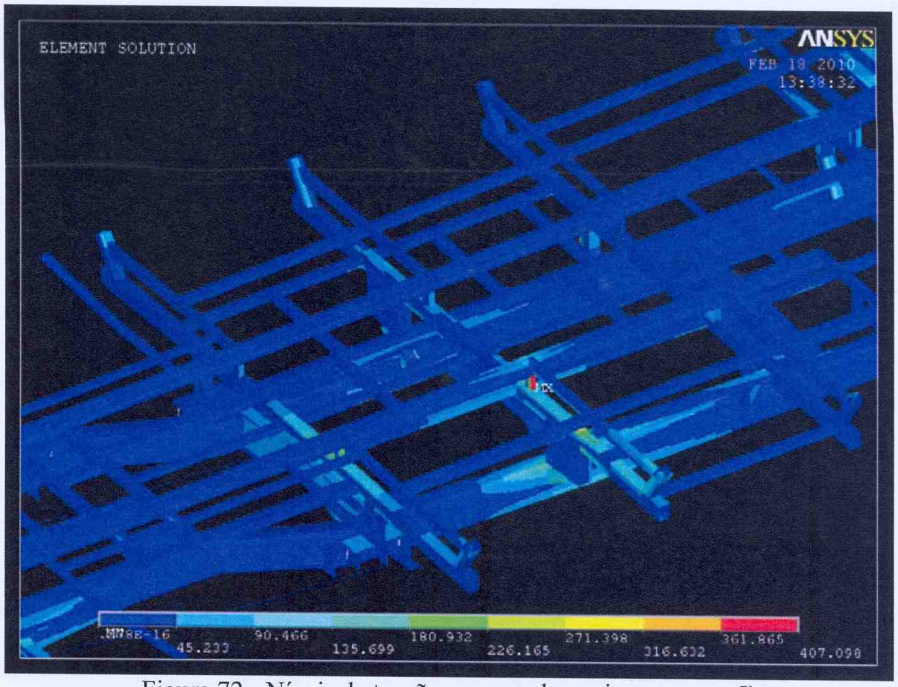


Figura 72 - Níveis de tensão na zona da coxia para caso 5)

Esta é a mesma zona referida no caso de estudo 4) e os níveis elevados de tensão verificam-se no elemento simétrico ao referido anteriormente. A análise deste elemento segue o mesmo raciocínio.



Figura 73 - Níveis de tensão na zona traseira para caso 5)

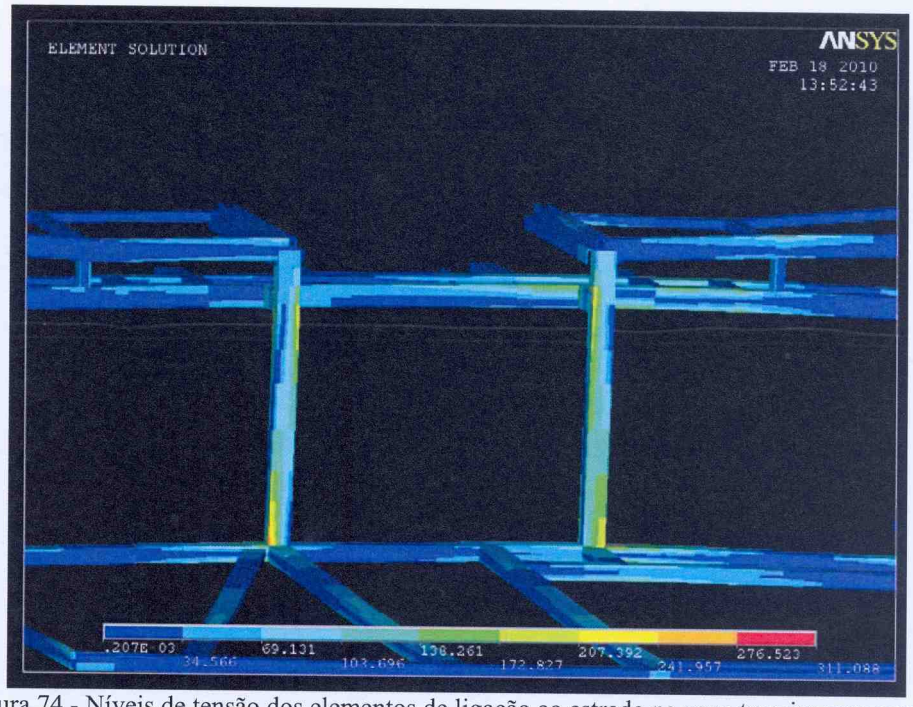


Figura 74 - Níveis de tensão dos elementos de ligação ao estrado na zona traseira para caso 5)

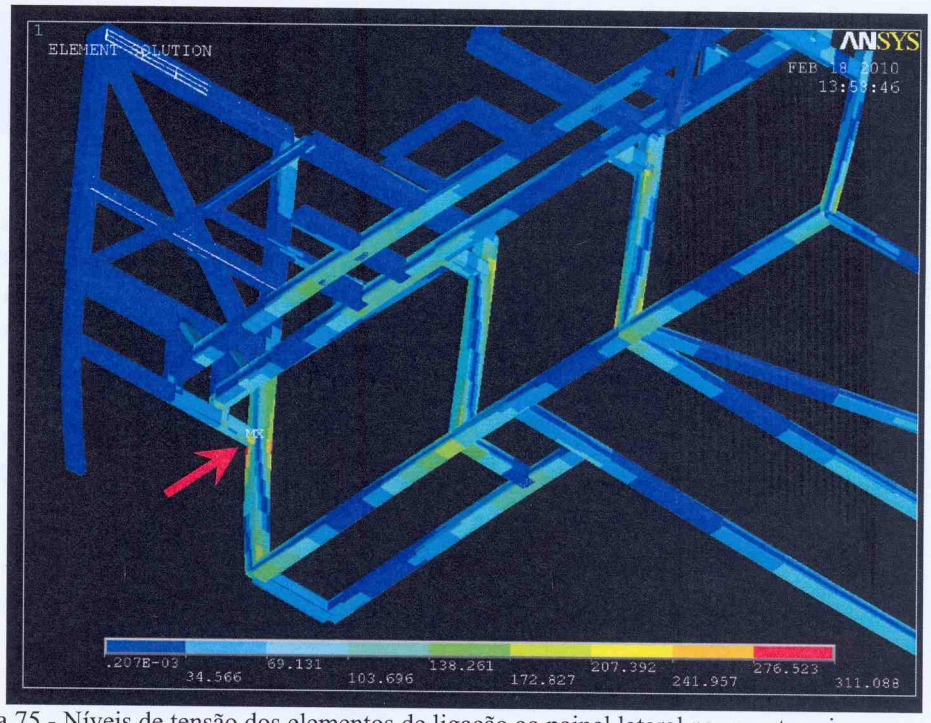


Figura 75 - Níveis de tensão dos elementos de ligação ao painel lateral na zona traseira para caso 5)

Novamente, esta situação verifica-se devido ao agravamento pelo facto do veículo estar em torção, do fenómeno explicado no caso de estudo 3) em que existe um esforço elevado devido à concentração de passageiros na zona de entrada rebaixada (ver figura 74 e 75).

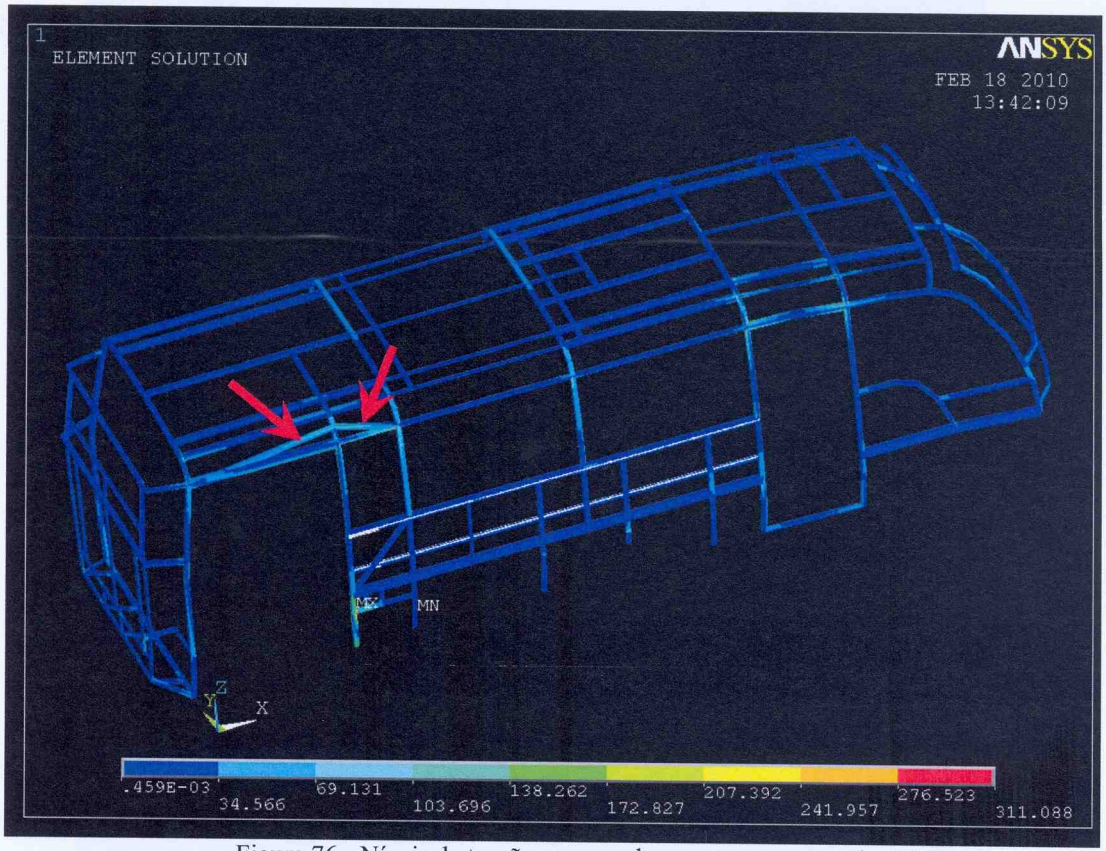


Figura 76 - Níveis de tensão na zona das portas para caso 5)

Analisando a distribuição de tensão neste caso de estudo podemos verificar que as zonas das portas apresentam níveis aceitáveis e a aplicação das diagonais na zona da padieira da porta traseira (ver figura 76) é vantajosa uma vez que apresentam esforços (o que significa que estão a funcionar e a sua existência é necessária e importante) e aliviam tensões nesta zona.

Os níveis elevados de tensão observados nesta imagem são devido aos elementos de ligação ao painel lateral, referidos anteriormente.

4.4.2 Propostas de optimização estrutural e consequente verificação

Uma vez conhecidas as zonas críticas no modelo e identificados os esforços principais que conduzem aos elevados níveis de tensão observados, o próximo passo é desenvolver soluções construtivas que resolvam estas situações de uma forma eficaz e com reduzidos inconvenientes construtivos. Esta tarefa conta com a experiencia do autor na análise crítica dos resultados do cálculo e conhecimento dos métodos construtivos da estrutura resistente dos produtos CaetanoBus.

Das zonas referidas como críticas, a mais importante será a zona traseira do veículo com entrada rebaixada na qual os elementos de ligação ao estrado superior e ligação aos painéis laterais estão subdimensionados e a necessitar elementos de reforço.

Logo à partida, os elementos estruturais desta plataforma rebaixada necessitam ser modificados para perfis mais resistentes.

A: Zona da plataforma de entrada

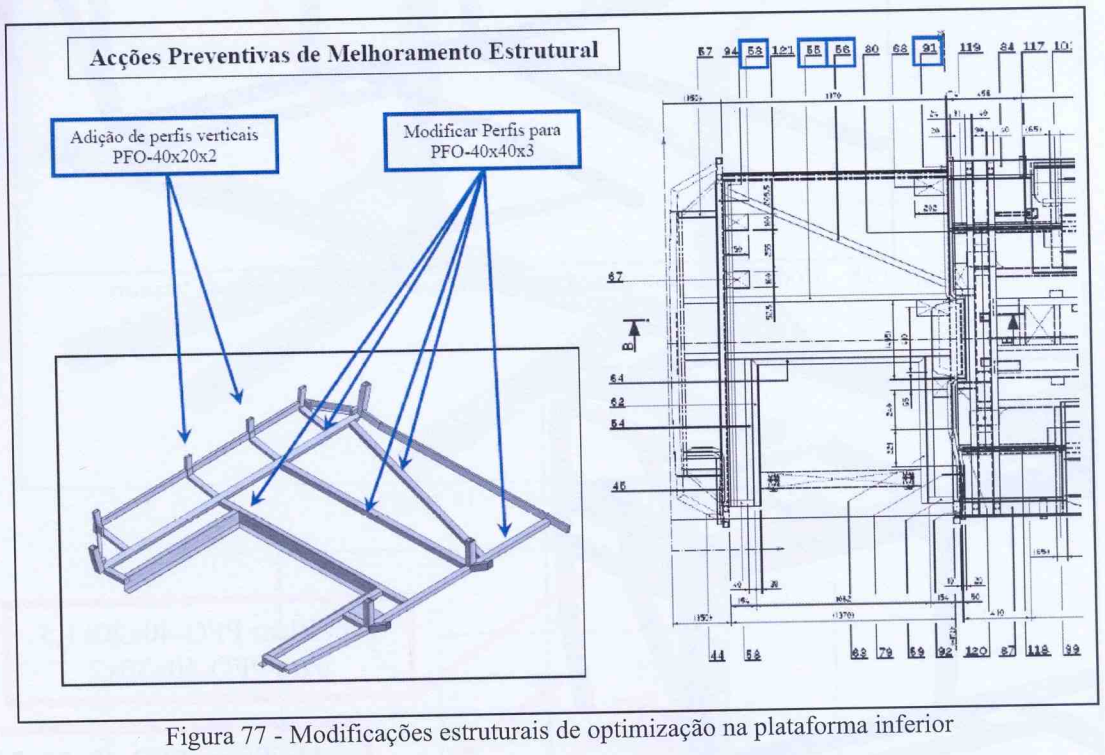


Figura 77 - Modificações estruturais de optimização na plataforma inferior

Pela análise da figura 77 podemos verificar que esta será uma modificação simples uma vez que não tem implicações construtivas que impedem a sua aplicação imediata no projecto.

De forma a aumentar a resistência estrutural da zona traseira do estrado (ligações da plataforma inferior com o estrado superior e nas ligações aos painéis laterais) e optimizar a utilização de perfis, outras modificações foram implementadas (ver figuras ilustrativas de 78 a 82 que são auto-explicativas das modificações)

B: Zona estrado traseiro:

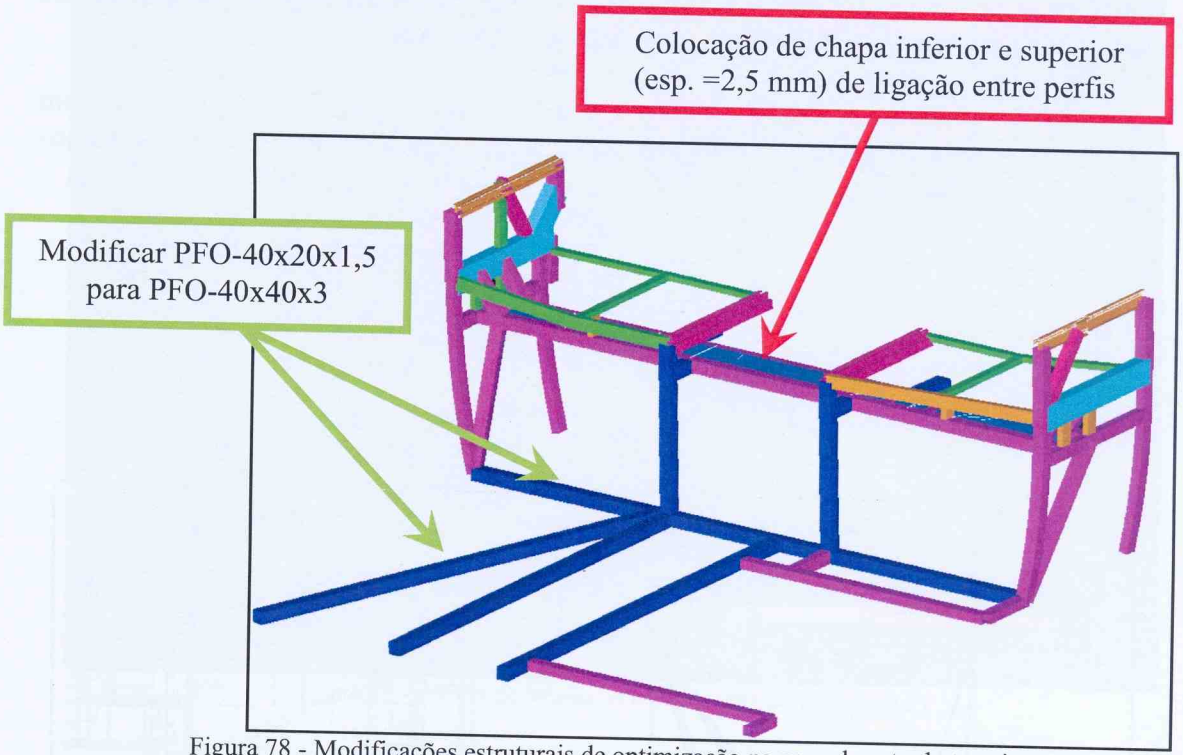


Figura 78 - Modificações estruturais de optimização na zona do estrado traseiro

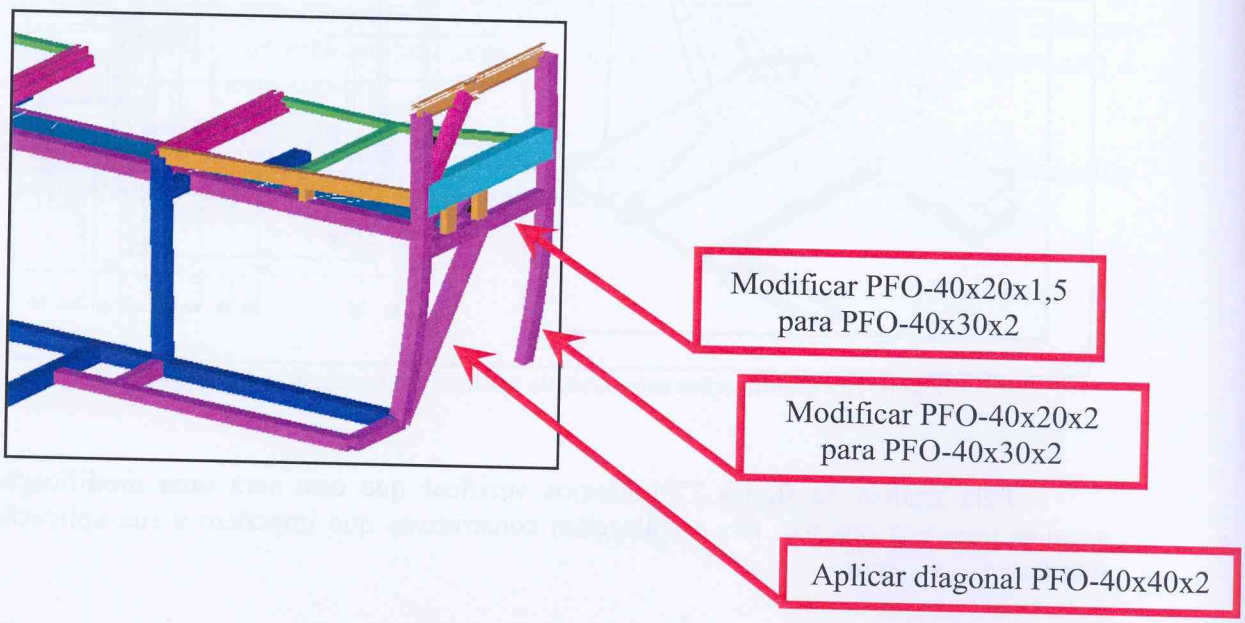


Figura 79 - Modificações estruturais de optimização na ligação do estrado traseiro ao painel lateral

NOTA: Ao painel esquerdo foi aplicada uma solução idêntica

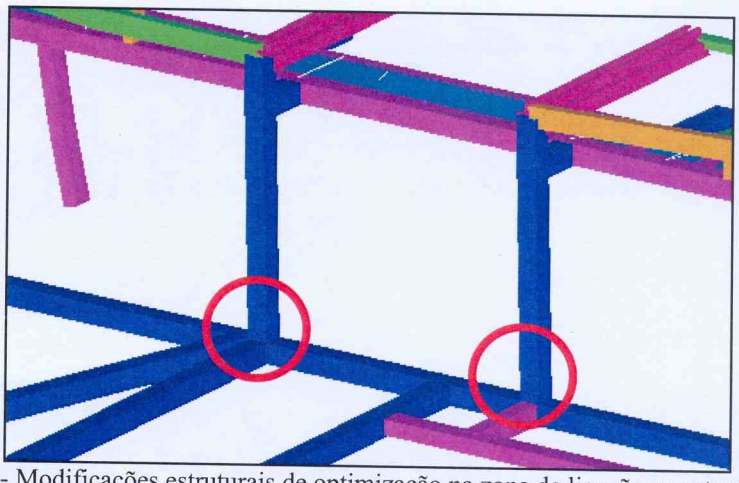


Figura 80 - Modificações estruturais de optimização na zona de ligação ao estrado inferior

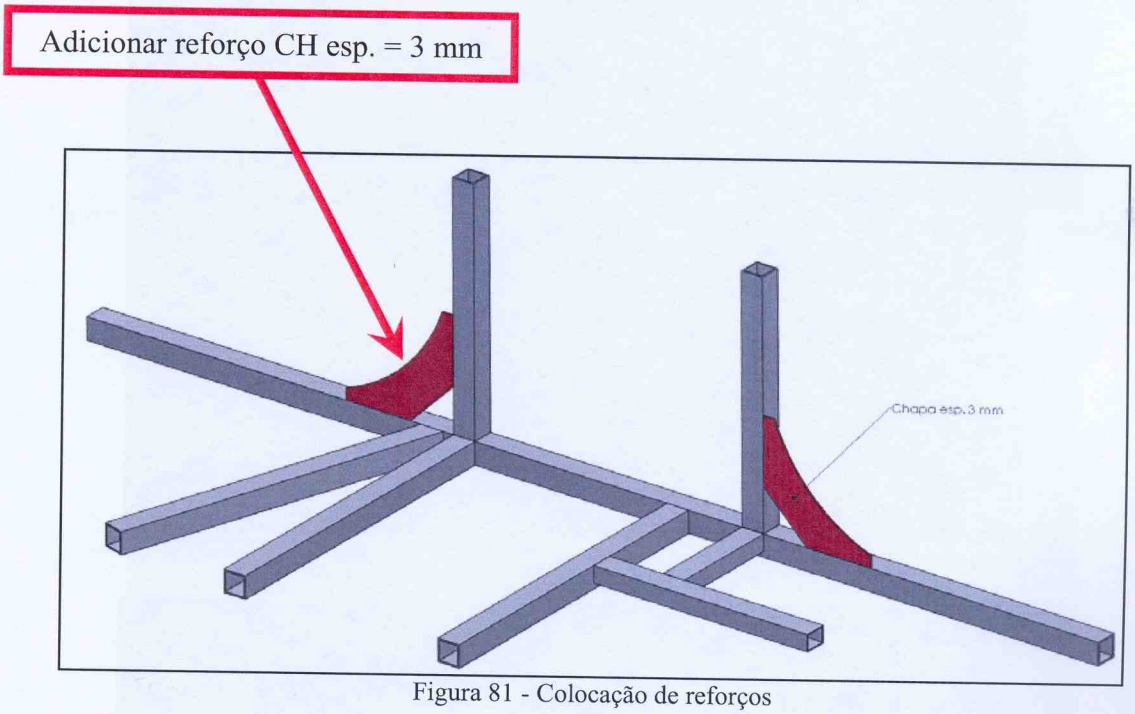


Figura 81 - Colocação de reforços

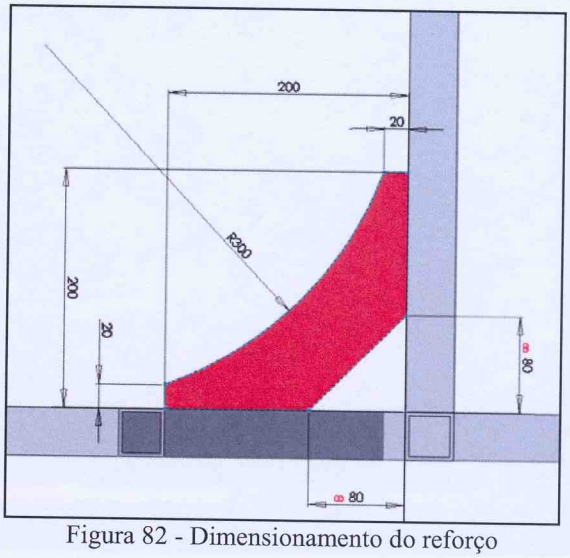


Figura 82 - Dimensionamento do reforço

Análise de resultados das modificações implementadas

Uma vez determinadas as soluções construtivas para a resolução dos pontos críticos, foi realizada uma confirmação dos resultados (ver figuras de 83 a 88). De seguida apresentam-se os resultados apenas para as situações de torção porque, tal como foi comprovado e referido anteriormente, esta é a situação mais desfavorável para o veículo.

Zona do estrado traseiro "low floor"

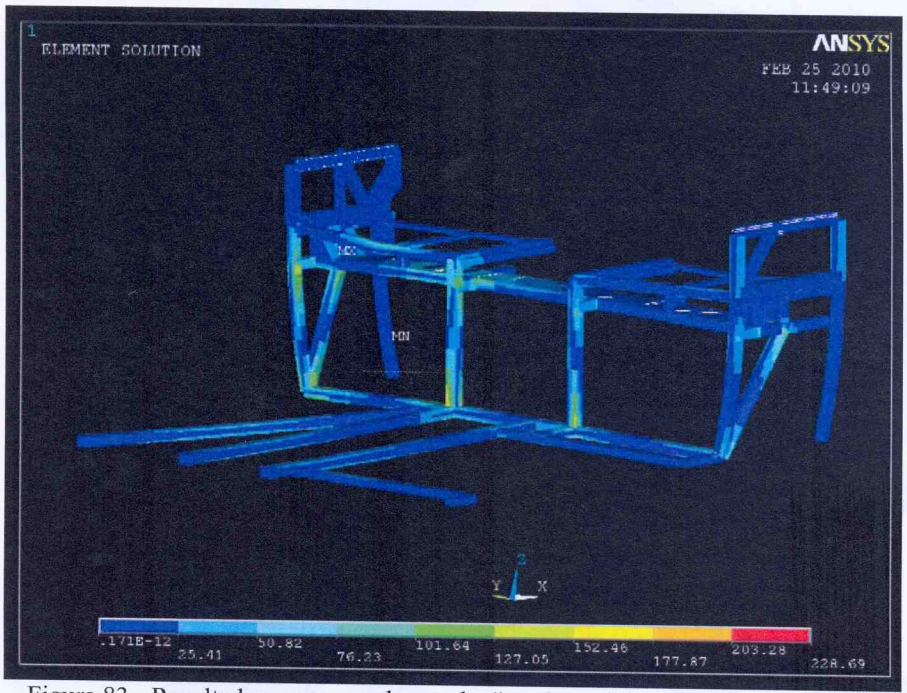


Figura 83 - Resultados para caso de estudo 4) após modificações de optimização

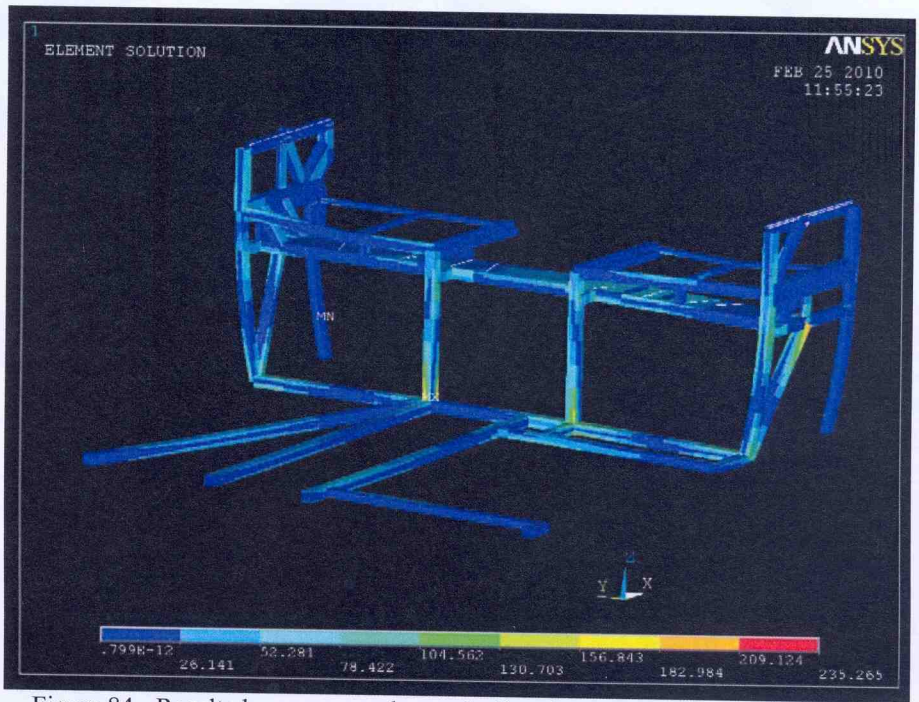


Figura 84 - Resultados para caso de estudo 5) após modificações de optimização

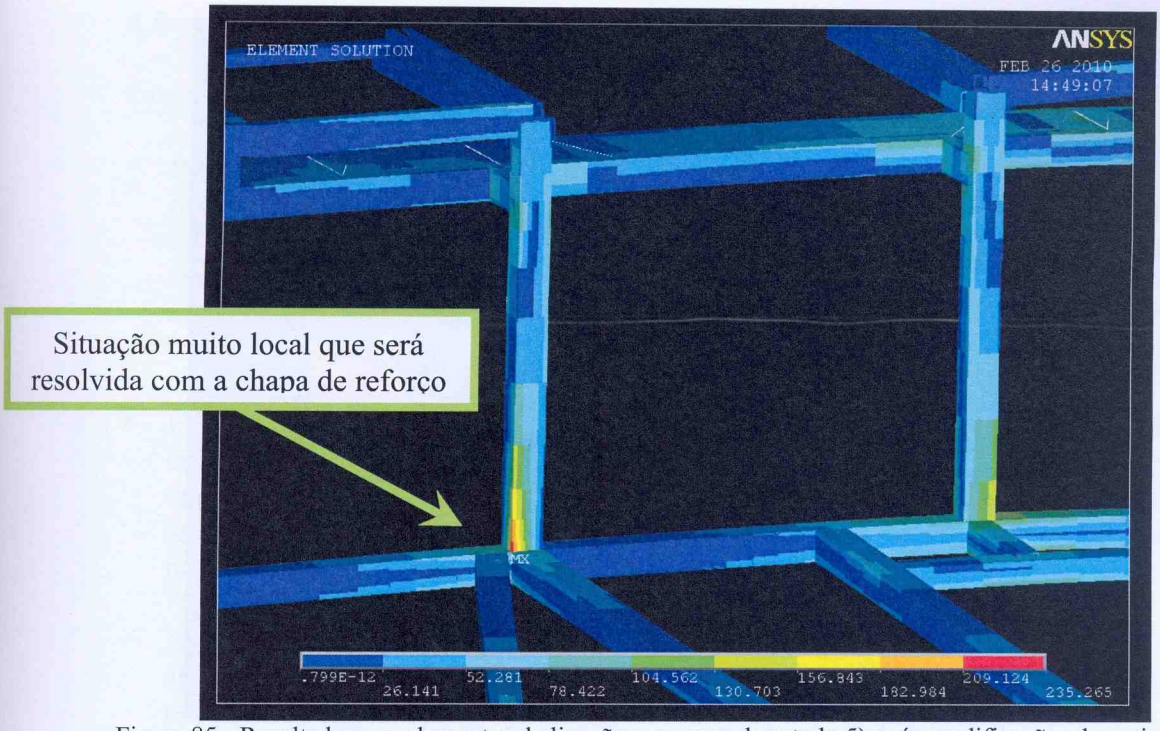


Figura 85 - Resultados nos elementos de ligação para caso de estudo 5) após modificações de optimização

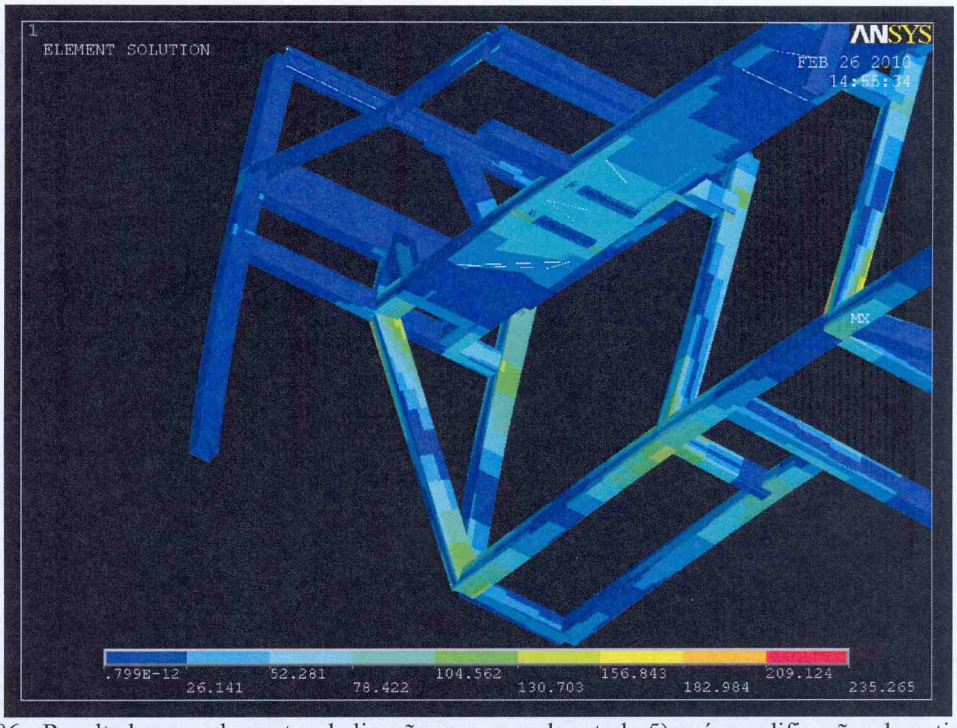


Figura 86 - Resultados nos elementos de ligação para caso de estudo 5) após modificações de optimização

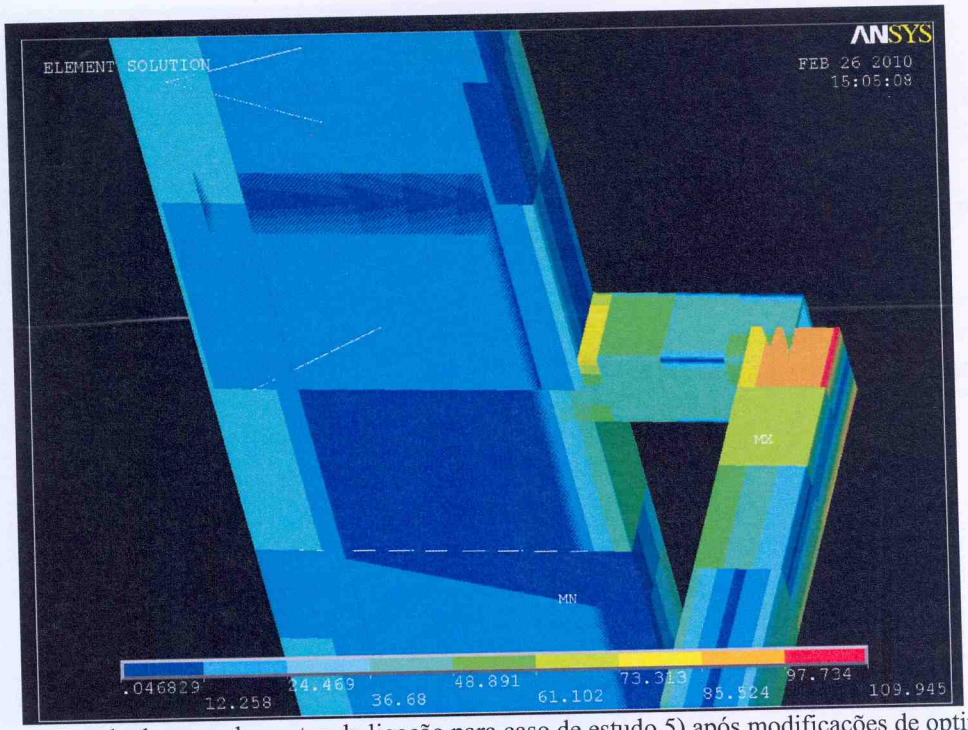


Figura 87 - Resultados nos elementos de ligação para caso de estudo 5) após modificações de optimização

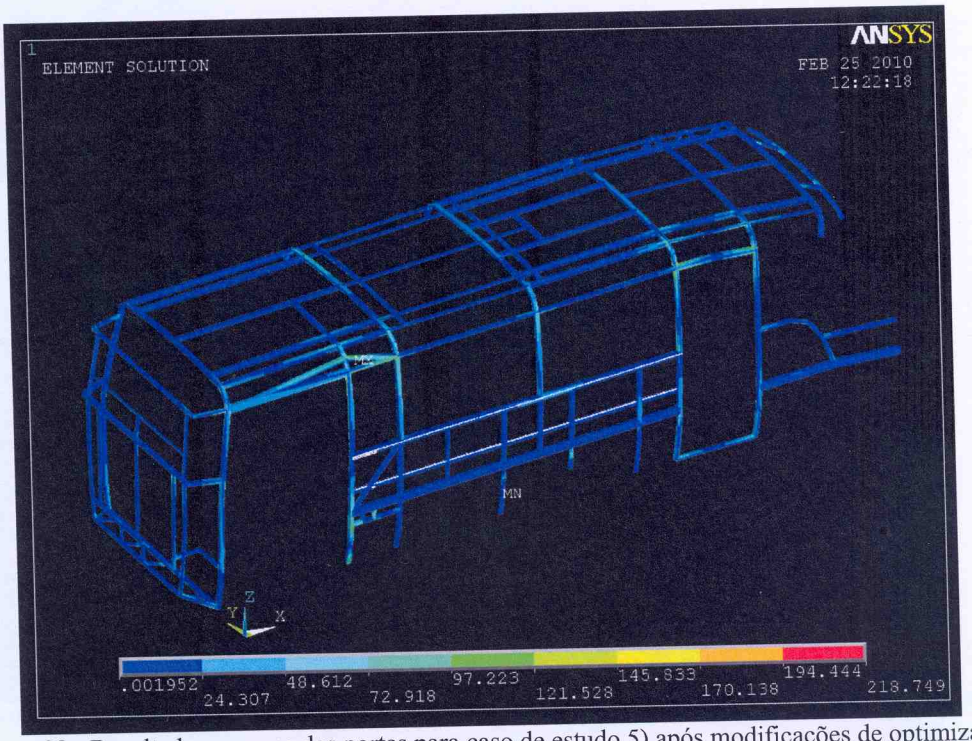


Figura 88 - Resultados na zona das portas para caso de estudo 5) após modificações de optimização

Confirma-se novamente que as zonas das portas (que normalmente são das mais críticas) estão bem dimensionadas porque existe uma distribuição equilibrada dos níveis de tensão.

4.5 Discussão dos resultados e conclusões

Pela análise dos resultados apresentados podemos concluir:

- ✓ Para o estudo de optimização estrutural foram analisadas as situações mais extremas de serviço e possíveis de acontecer (caso de estudo 3, 4 e 5) que correspondem a um excesso de passageiros no estrado traseiro "low entry". Com esta análise verificou-se (à semelhança de outros cálculos numéricos realizados pelo autor ao longo da sua experiência profissional) que a situação mais desfavorável para um autocarro é a torção do veículo.

- ✓ Foram identificadas as zonas críticas do modelo, a razão para a sua gravidade e estudadas possíveis soluções de optimização. Foi demonstrado que a zona mais crítica deste modelo nesta específica versão era a zona traseira com entrada rebaixada e que a gravidade da situação estava relacionada com a falta de resistência para suportar o excesso de passageiros nesta zona.

- ✓ A utilização da ferramenta ANSYS revelou-se bastante proveitosa e em alguns aspectos, superior em relação à utilização da anterior (StressLab) na medida em que possibilitou implementar e melhorar métodos de modelação e de análise.
  O método de abordagem com recurso ao novo programa ANSYS está definido mas existem alguns aspectos que podem ser melhorados com o desenvolvimento de ferramentas auxiliares.

- ✓ A validade das considerações iniciais da modelação, a análise crítica dos resultados e a experiência no cálculo de estruturas complexas são essenciais para a utilização proveitosa dos resultados do cálculo por E.F. e a tomada de decisões na modificação do projecto para realizar acções de melhoria. Por vezes algumas simplificações da realidade física na fase de construção do modelo numérico conduzem a falta de rigor na representação da realidade;

- ✓ Os resultados obtidos foram bastante concordantes com algumas situações críticas observadas na prática. Este facto permite concluir que a metodologia aplicada e o uso da ferramenta ANSYS possibilitam obter resultados bastante vantajosos e úteis na análise do comportamento estrutural de autocarros.

- ✓ Os objectivos iniciais aos quais o autor se propôs a atingir foram alcançados com sucesso na medida em que foi realizado um estudo integral, segundo uma metodologia bem definida, de um modelo de autocarro específico recorrendo a metodologias desenvolvidas pelo próprio, com recurso a um novo programa de cálculo por Elementos Finitos (ANSYS) cujas potencialidades foram também investigadas e estudadas pelo autor.

Capitulo V - Estudo da aplicabilidade da tecnologia "sandwich" como elemento estrutural de tejadilho de autocarro

5.1 Introdução

Devido ao elevado grau de competitividade dos mercados internacionais onde a empresa CaetanoBus é uma forte concorrente, a inovação tecnológica é uma grande preocupação permanente. Sempre existiu uma vontade de inovar e tentar produzir melhor, de forma mais eficiente e mais rentável.

Esta determinação é reflectida nas várias fases do desenvolvimento do produto em que existe uma procura constante de novos materiais que apresentem vantagens em relação aos usualmente utilizados mas também é verificada nos métodos de fabrico, os quais pretendem ser cada vez mais eficientes. É esta preocupação latente, aliada à competência técnica que torna a CaetanoBus uma empresa de fabricação de carroçarias de autocarros bastante capaz de inovar e ser uma referência na sua actividade.

A capacidade de inovar está intrinsecamente relacionada com a capacidade técnica na medida em que uma solução com potencial só se torna exequível quando os seus objectivos finais são atingidos dentro dos limites e trâmites legais envolventes à finalidade à qual a solução se propõe.

Numa era em que as preocupações ambientais são enormes e cada vez mais a indústria automóvel preocupa-se em desenvolver soluções que reduzam as emissões de gases nocivos para a atmosfera, a CaetanoBus também se preocupou em desenvolver soluções que sirvam este objectivo. O seu contributo tem se verificado de várias formas, como exemplo mais recente, a CaetanoBus enunciou a fabricação de autocarros movidos a electricidade.

Existem também outros projectos em desenvolvimento no departamento de Engenharia que visam contribuir para este objectivo superior. O mais importante é a substituição da actual estrutura em aço do tejadilho por uma solução construtiva que reduza o seu peso específico e consequentemente o peso global de um veículo de turismo, o que se traduz em menos consumo de combustível.

O sucesso deste trabalho de investigação significará uma inovação no método de construção de carroçarias de autocarros mas não será fácil porque a nova solução deverá respeitar parâmetros de segurança bastante restritos e ao mesmo tempo requisitos de execução e económicos bem definidos.

Por ser um trabalho ainda em desenvolvimento, neste relatório será abordado apenas o estudo para a solução construtiva do tejadilho.

5.2 Descrição de objectivos

Objectivos gerais

Este capítulo propõe-se a estudar o desenvolvimento inicial de uma solução construtiva para substituir a estrutura integral de um tejadilho em aço de um autocarro de turismo que apresente simultaneamente as seguintes vantagens e requisitos:

- ✓ Seja uma solução que no final apresente uma redução significativa de peso, comparativamente com a solução já existente e tradicionalmente em aço. Para atingir este objectivo o conhecimento e procura de novos materiais foi essencial. Neste campo, os materiais compósitos apresentam uma enorme vantagem porque em termos de resistência aproximam-se bastante do aço (algumas vezes até superam) e apresentam baixo peso específico.

- ✓ A solução a desenvolver terá de apresentar claras vantagens, em termos construtivos, em relação à construção tradicional. As vantagens serão em termos de tempos de execução, complexidade de fabricação (implica necessidade de mão-de-obra qualificada) e necessidade de instalações fabris apropriadas.

- ✓ Existem requisito legal que a nova solução construtiva terá de salvaguardar. Para a aplicação final que se pretende desenvolver (veículos de turismo) existe a necessidade de cumprir o Regulamento R66 que define a resistência estrutural da super-estrutura do autocarro no caso de capotamento.

- ✓ A nova solução deverá ser estruturalmente benéfica para o comportamento global do veículo. O cumprimento deste requisito contará com a experiencia e conhecimento do comportamento estrutural de autocarros típicos, provenientes do cálculo estrutural com base no Método dos Elementos Finitos.

- ✓ Por fim, todos custos de fabricação e implementação da nova solução construtiva terão de representar uma grande vantagem para a sua aplicação.

Os requisitos anteriormente enunciados ainda são preliminares porque o projecto ainda está numa fase inicial e será necessário abordar cada um de forma particular para os aprofundar.

Como será possível compreender melhor mais à frente neste relatório, o projecto de desenvolvimento da nova solução construtiva para o tejadilho será realizada em 2 fases:

1. Desenvolvimento da solução integral para o tejadilho
2. Estudo da ligação entre os pilares laterais e a nova solução construtiva do tejadilho

O trabalho realizado pelo autor e apresentado neste relatório é limitado à primeira fase deste projecto.

Objectivos específicos

O trabalho do autor prende-se apenas com a solução construtiva do tejadilho. Este estudo terá como objectivo a identificação do melhor material a utilizar, da solução construtiva e a realização de ensaios práticos com comparação de resultados. Desta forma será possível avaliar qual a melhor solução a adoptar.

5.3 Identificação do caso de estudo

Para compreender melhor o objectivo desta parte do trabalho, será relevante apresentar a solução tradicional de construção do tejadilho em aço de um veículo de turismo (ver figuras 89 e 90). Desta forma será possível compreender mais objectivamente qual a zona que este estudo pretende analisar e separar o objecto de cada fase de estudo.

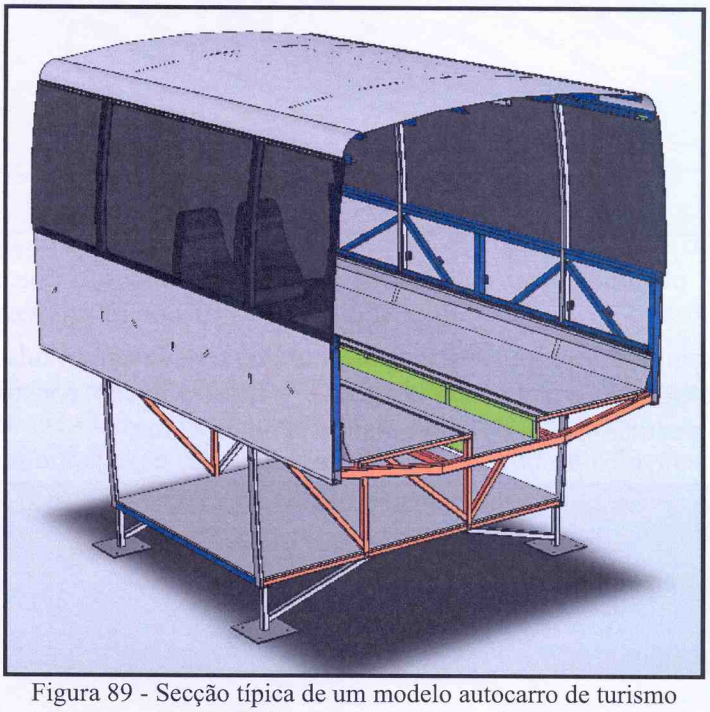


Figura 89 - Secção típica de um modelo autocarro de turismo

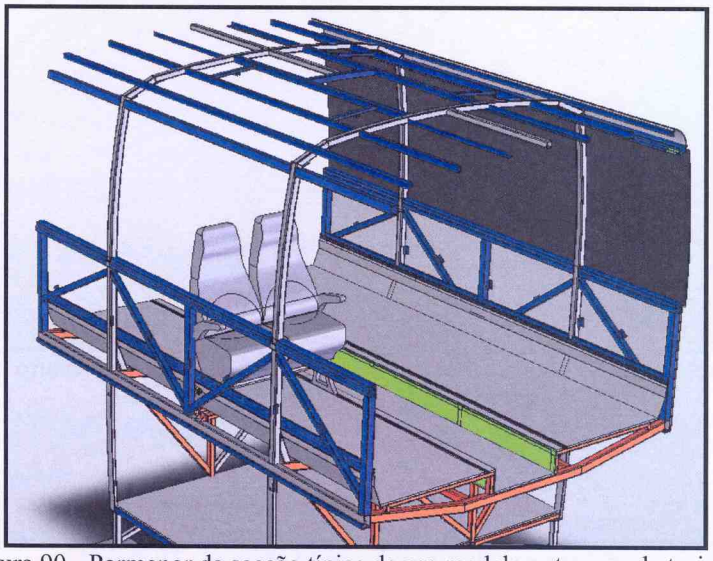


Figura 90 - Pormenor da secção típica de um modelo autocarro de turismo

Isolando a parte estrutural (ver figura 91), podemos analisar mais detalhadamente a estrutura típica de um tejadilho de um veículo de turismo e perceber melhor o caso de estudo.

Tal como enunciado anteriormente, a primeira fase diz respeito à substituição da estrutura em aço observada na figura seguinte por uma solução construtiva com as vantagens e requisitos enunciados.

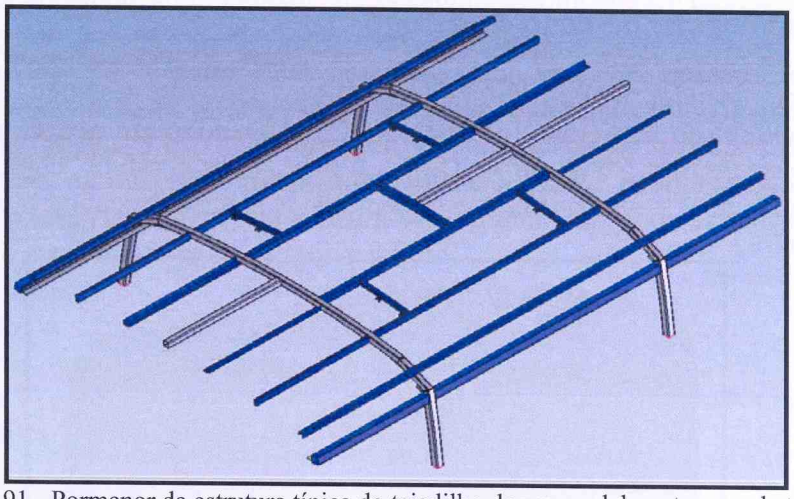


Figura 91 - Pormenor da estrutura típica do tejadilho de um modelo autocarro de turismo

Numa segunda fase, posterior a este estudo, será desenvolvida uma solução para a ligação entre pilar lateral (ver figura 92) e a nova solução construtiva do tejadilho respeitando as mesmas vantagens e requisitos já enunciados.

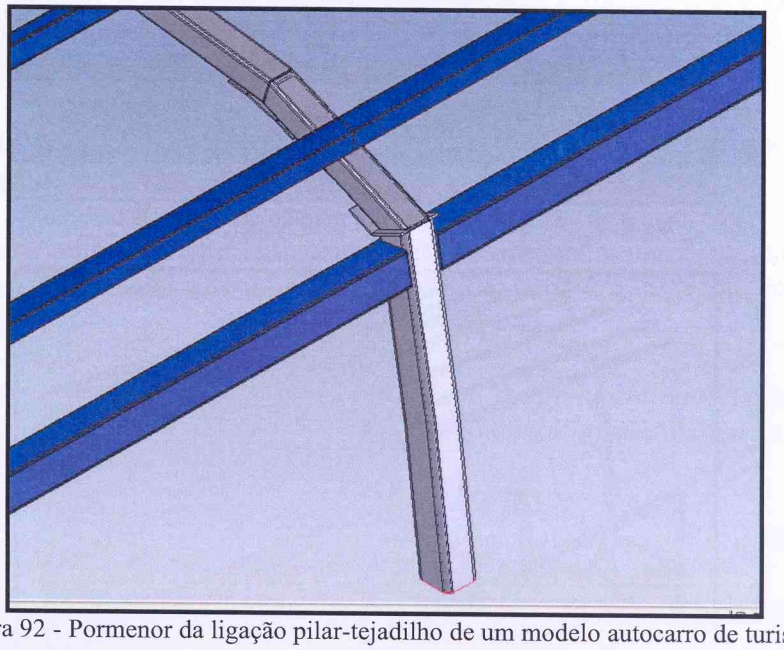


Figura 92 - Pormenor da ligação pilar-tejadilho de um modelo autocarro de turismo

5.4 Identificação da solução construtiva integral do tejadilho

A primeira etapa do desenvolvimento de uma nova solução construtiva é procurar soluções já existentes e estudar as suas vantagens e limitações para averiguar se a continuidade do seu estudo é viável. Foi nesta etapa que se verificou que outras entidades também se encontravam a desenvolver uma solução construtiva que cumprisse os requisitos gerais enunciados [5].

Porém, ainda não existe indícios comprovados por entidades de certificação que alguma conseguisse atingir com sucesso os requisitos mínimos de segurança para a fabricação de um tejadilho para autocarros de turismo. A maior razão está relacionada com o cumprimento do regulamento para a segurança passiva ao capotamento. Contudo a consulta de informação foi bastante útil para compreender em que ponto está a evolução do conceito e conhecer melhor as necessidades para o sucesso.

Solução construtiva

O vasto conhecimento de estruturas típicas de autocarros contribuiu bastante para a identificação de uma solução inicial de arranque ao desenvolvimento do trabalho. Foi de um estrutura de um veículo de 2 pisos que a solução inicial surgiu. A estrutura deste tipo de veículo é constituída por um piso intermédio que é fixado aos pilares laterais do veículo. Em parceria com o fornecedor desta solução já existente, foi desenvolvida uma solução construtiva para o tejadilho.

A identificação da solução construtiva e material a utilizar foi realizada em parceria com o fabricante ALCAN [B]. Recorrendo à experiencia da ALCAN no fabrico de componentes para autocarros em alumínio e na fabricação de soluções híbridas (junção de diferentes materiais) foi definido a solução inicial para o tejadilho. Na figura 91 pode ser observada a forma estudada e definida pelo departamento técnico da Caetanobus.

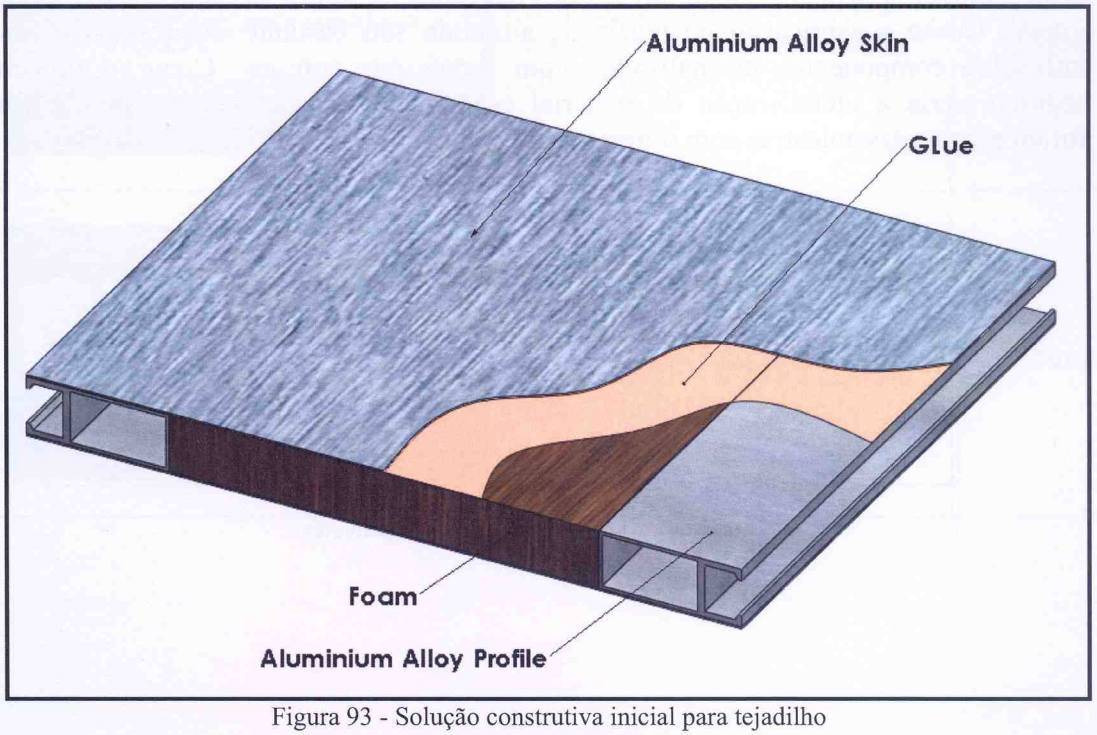


Figura 93 - Solução construtiva inicial para tejadilho

Na figura 94 pode ser analisada o pormenor do perfil de ligação definido pelos técnicos da Caetanobus para a solução construtiva.

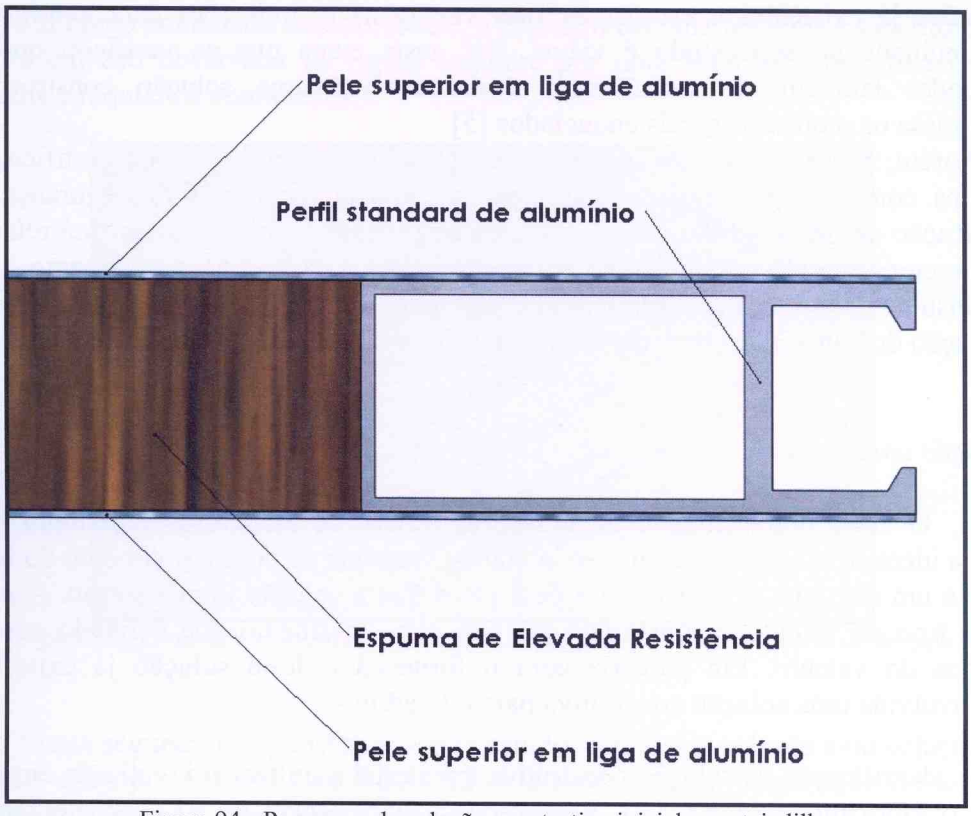


Figura 94 - Pormenor da solução construtiva inicial para tejadilho

A ALCAN, movida também por interesse comercial prontificou-se a disponibilizar amostras segundo dimensões definidas na figura 93, para testar a solução inicial. Como a fabricação de perfis de alumínio são bastante dispendiosos, foram utilizados componentes normalizados com dimensões comuns. Como o objectivo seguinte seria a identificação do material com o melhor comportamento estrutural, foram preparadas amostras com dimensões ideais para ensaiar na máquina disponível.



Figura 95 – Dimensões gerais dos provetes

Material a utilizar

A definição do material a utilizar não foi imediata. Como não se sabia qual o material mais apropriado para cumprir objectivos de resistência e como a ALCAN dispõe de maior conhecimento técnico na combinação de materiais, foram utilizadas propostas de algumas combinações feitas pelo fabricante e apresentadas na tabela 18.

Tabela 18 - Placas modelo para testar (combinação de materiais)

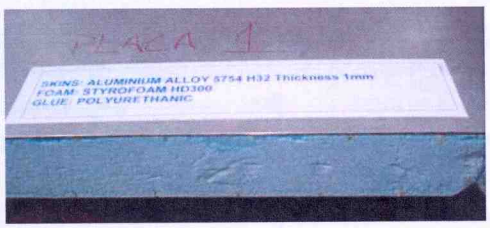
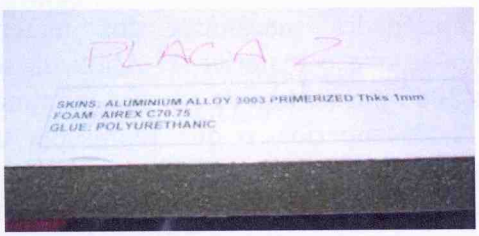
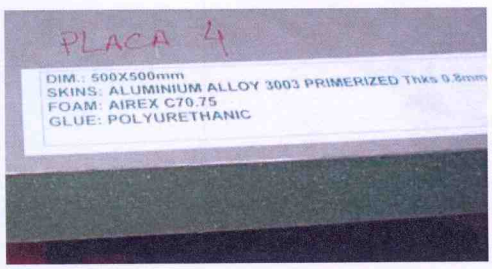
	Placa Modelo	Material	Espessura pele exterior
1		Aluminium Alloy: 5754 H32 Foam: STYROFOAM HD300 Glue: POLYURETHANIC	1mm
2		Aluminium Alloy: 3003 PRIMERIZED Foam: AIREX C70.75 Glue: POLYURETHANIC	1mm
3		Aluminium Alloy: 5754 H32 Foam: STYROFOAM HD300 Glue: POLYURETHANIC	0,8mm
4		Aluminium Alloy: 3003 PRIMERIZED Foam: AIREX C70.75 Glue: POLYURETHANIC	0,8mm

Tabela 19 - Propriedades Mecânicas dos materiais em estudo

Material Ligas de alumínio		
Propriedade	**Al alloy 3003 [8]**	**Al Alloy 5754 H32 [7]**
Density (kg/m3)	2730	2660
Coeficiente de Poisson	0,33	0,32
Modulus of Elasticity (GPa)	75	68
Proof Stress 0.2% (MPa)	125	185
Tensile Strength (MPa)	130	245
Shear Strength (MPa)	83	150

Material Espuma Estrutural		
Propriedade	**STYROFOAM HD300 [10]**	**AIREX C70.75 [9]**
Density (kg/m3)	45	80
Compressive strength (MPa)	0,7	1,3
Compressive modulus (MPa)	25	97
Tensile modulus (MPa)	25	66
Shear Modulus (MPa)	14	30

Observando os valores para as propriedades mecânicas dos materiais apresentados apresentadas na tabela 19, verifica-se que o material Al Alloy da serie 5000 apresenta propriedades superiores à serie 3000 em termos de tensões máximas e de corte mas por outro lado um densidade 2,5% superior, o que representa uma desvantagem em termos de peso especifico para solução que utilizar este material.

Por outro lado, também se verifica que o material AIREX C70.75 para a espuma estrutural apresenta valores consideravelmente superiores ao material HD300, quer em termos de resistência, quer em termos de densidade.

5.5 Identificação da situação a testar

Uma vez definida a solução construtiva e os materiais a utilizar é necessário testar a solução de acordo com o cumprimento dos requisitos legais a que a solução construtiva está obrigada a respeitar. No caso específico, como o objectivo final da solução é a sua utilização em autocarros de turismo, é necessário realizar os ensaios correspondentes à pior situação aos quais a solução será submetida em testes de segurança [D]. É o caso da resistência ao capotamento lateral, na qual a nova solução construtiva final terá de (no mínimo) ser tão fiável e resistente como a actual em aço (ver deformação estrutural típica no caso de capotamento de um autocarro ilustrado na figura 96).

A situação de capotamento lateral de autocarros de turismo em estruturas de aço está amplamente estudado e os parâmetros mínimos de segurança que devem ser respeitados estão bem definidos [6]. De uma forma simples, existe uma fórmula matemática que determina a capacidade de energia que a super-estrutura resistente do veículo deve respeitar para que a segurança dos passageiros esteja assegurada. Em termos genéricos a equação é a seguinte:

$$E = 0{,}75Mgh$$

Na qual:

E: Energia que a super-estrutura deve dissipar
M: Peso do veículo
g: Aceleração gravítica
h: Relação entre alturas do centro de gravidade do veículo em instantes específicos

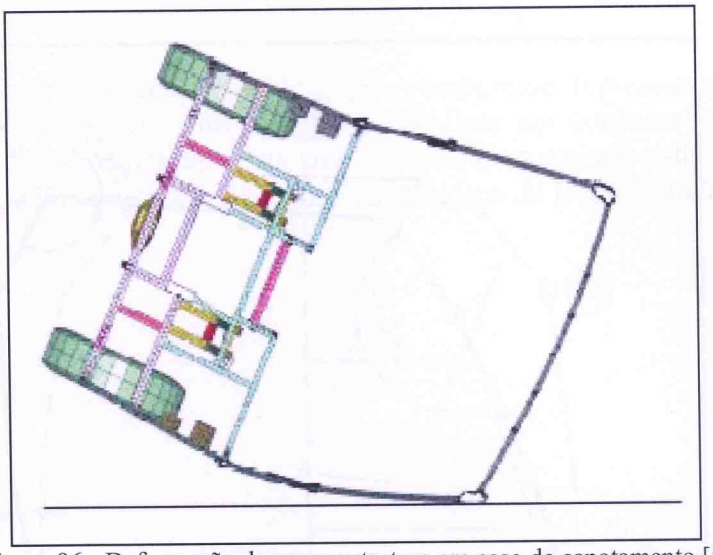


Figura 96 - Deformação da super-estrutura em caso de capotamento [5]

Em termos práticos, a nova solução do tejadilho (combinação de camadas finas de alumínio com espuma de elevada resistência) terá de apresentar um comportamento de resistência estrutural idêntico à solução actualmente em aço.

Analisando o pórtico resistente de um autocarro de turismo, podemos compreender a deformação típica na situação de capotamento lateral e ter noção da zona de sobrevivência dos passageiros que deve se manter intacta (ver figuras 95 e 96).

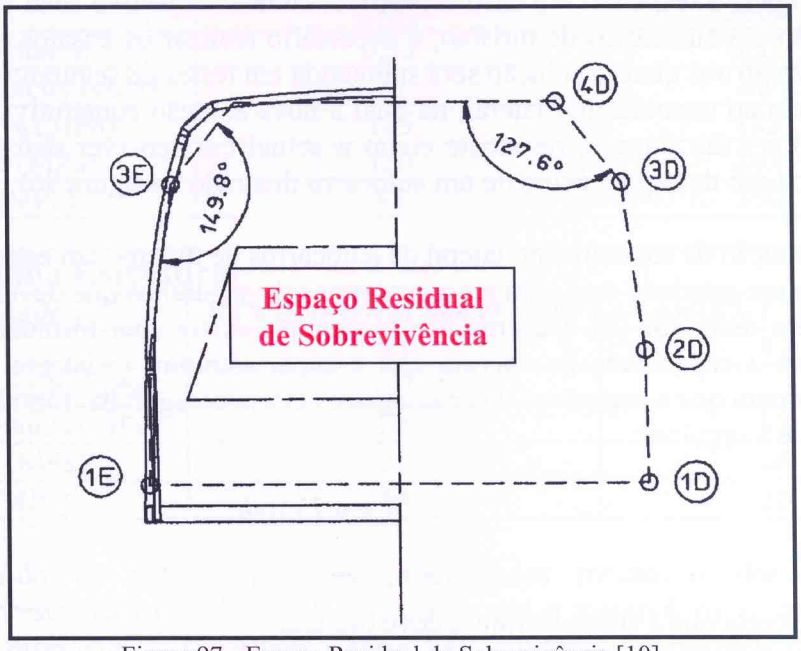


Figura 97 - Espaço Residual de Sobrevivência [10]

Nesta fase de desenvolvimento o objectivo é estudar a deformação estrutural na zona do tejadilho, a figura seguinte ajuda a melhor compreender a deformação típica.

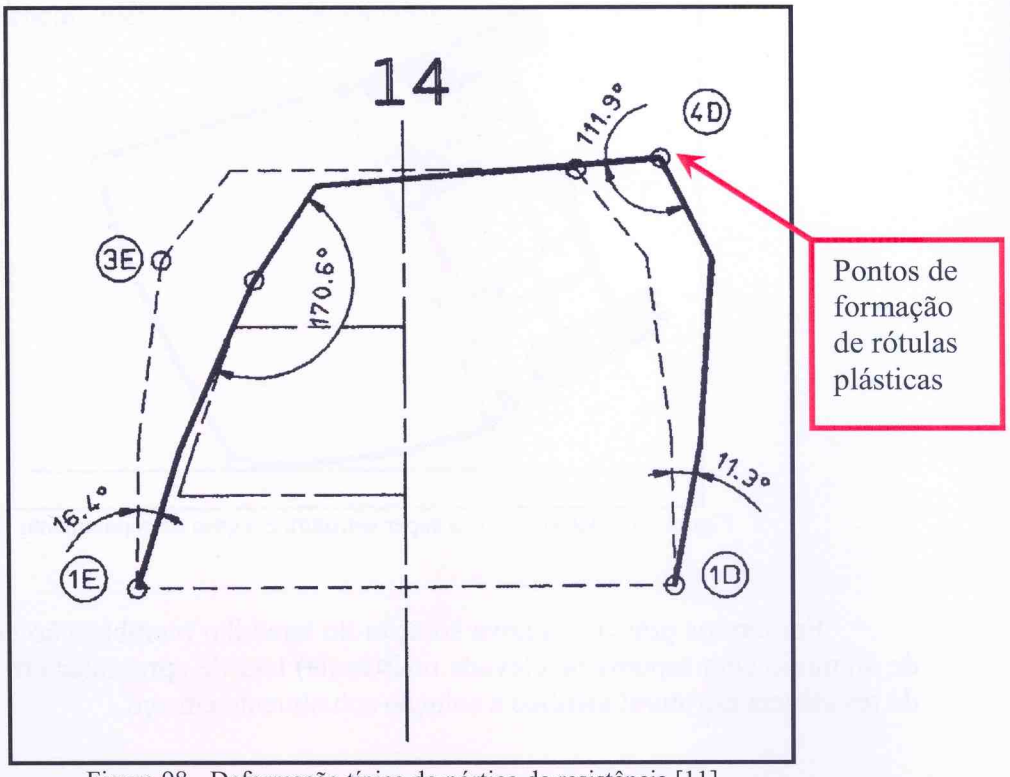


Figura 98 - Deformação típica do pórtico de resistência [11]

Assim, o primeiro ensaio a realizar sobre a solução construtiva inicial é de flexão (ver figura 99) para determinar quais os momentos máximos que os diferentes provetes conseguem atingir antes de se verificar o colapso.



Figura 99 - Aplicação de momento de flexão e deformação característica

Para realizar um ensaio prático que conseguisse representar a deformação pretendida sobre os provetes, foi necessário idealizar um conjunto de componentes, ligações e fixações. A realização desta tarefa contou com a ajuda e disponibilidades do pessoal técnico do Laboratório de Ensaios Tecnológicos do INEGI/FEUP.

5.6 Concepção do ensaio

Devido à impossibilidade de realizar os ensaios necessários para testar a solução construtiva do tejadilho nas instalações da CaetanoBus, os ensaios foram realizados nas instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Em parceria com os responsáveis do Laboratório de Ensaios Tecnológicos, foi desenvolvido um método de fixação, de aplicação de carga e de registo de dados do ensaio (ver figura 100 e 101).

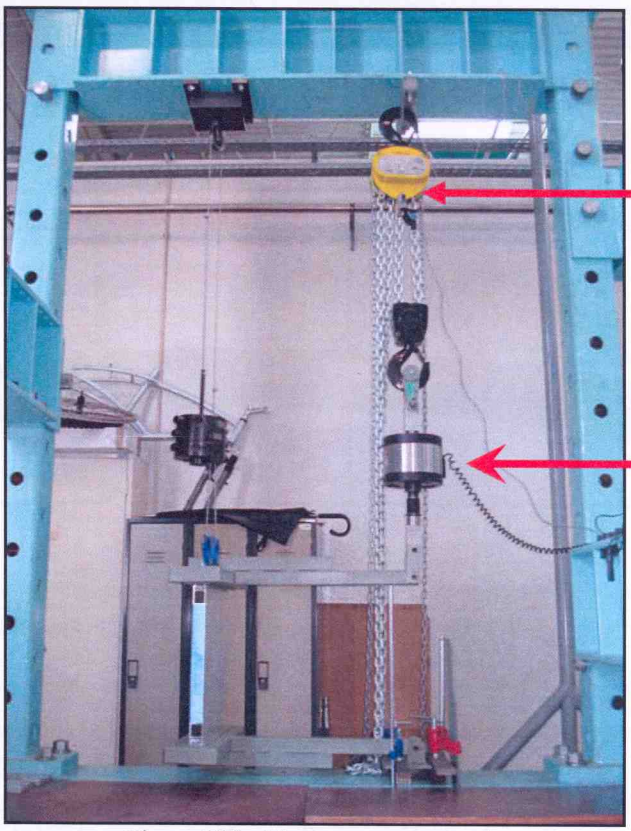


Figura 100 - Montagem para ensaio

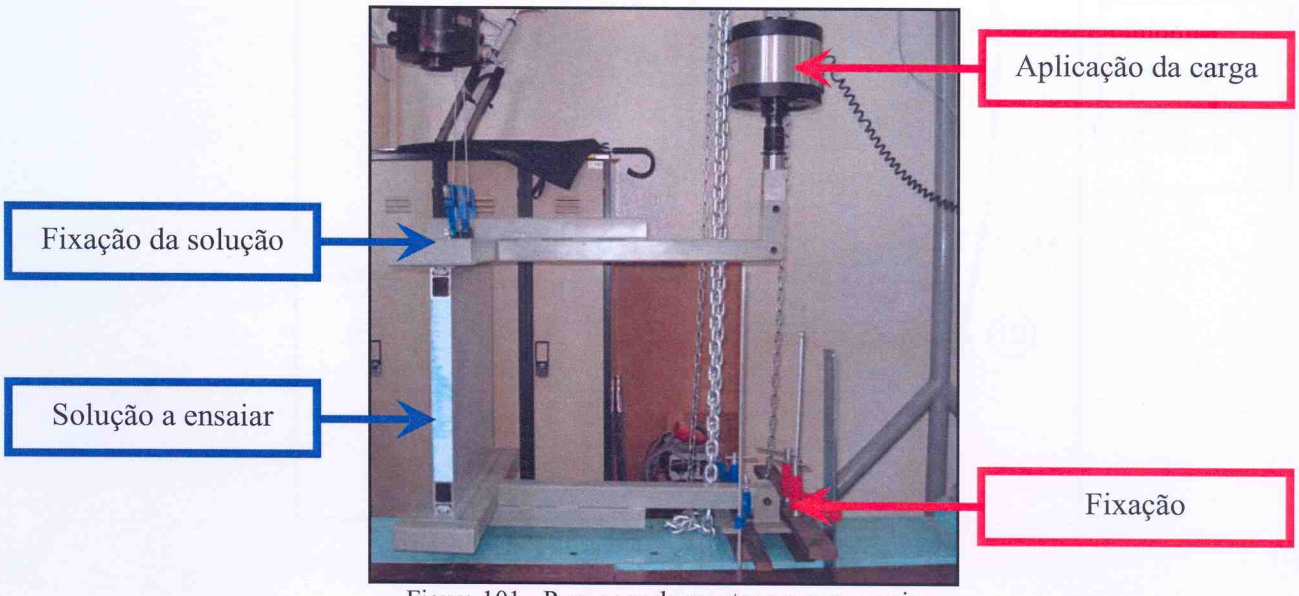


Figura 101 - Pormenor da montagem para ensaio

O método de fixação por parafusos pode ser observado nas figuras 102 e 103.

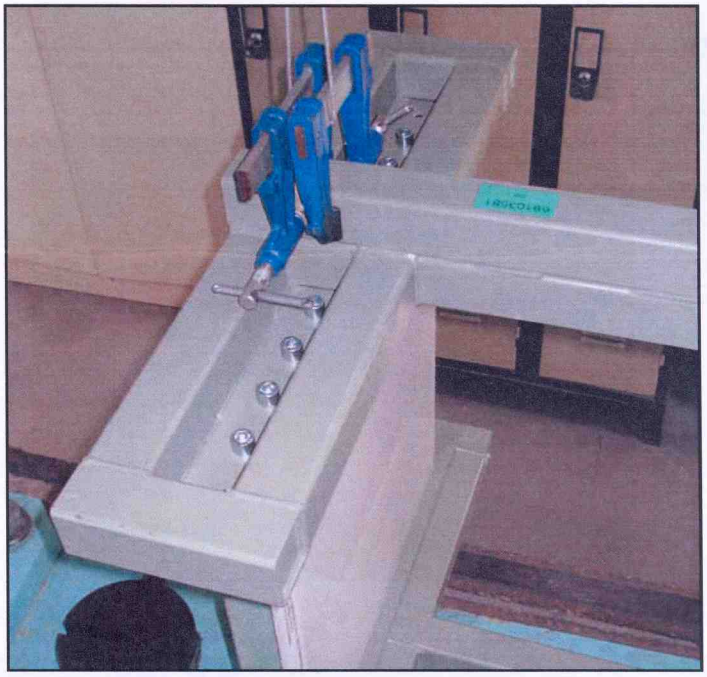


Figura 102 - Pormenor da fixação da solução para ensaio



Figura 103 - Pormenor da fixação da solução para ensaio

Objectivo do ensaio

O resultado do "set-up" apresentado para o ensaio pretendido é um gráfico que relacione os momentos obtido com o deslocamento aplicado. Será este resultado que permitirá comparar o comportamento estrutural da nova solução construtiva com a actual em aço.

5.7 Apresentação dos Resultados

Solução construtiva placa 1

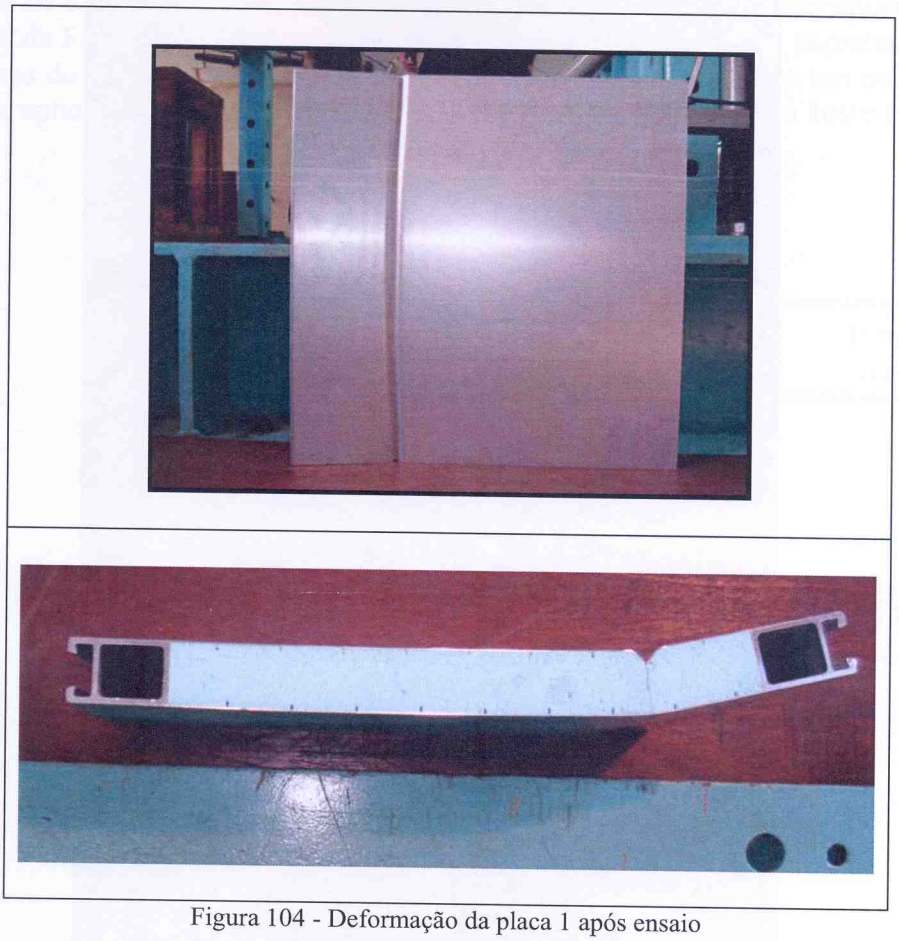


Figura 104 - Deformação da placa 1 após ensaio

Observações:

Verificou-se que o ensaio foi bastante rápido e com um colapso brusco. A deformação observada é idêntica à esperada, na medida em que se verifica uma curvatura da peça inicialmente horizontal (ver figura 104). Verificou-se que o colapso da solução foi na pele exterior de alumínio.

O gráfico pretendido para este provete 1 pode ser observado na figura 105.

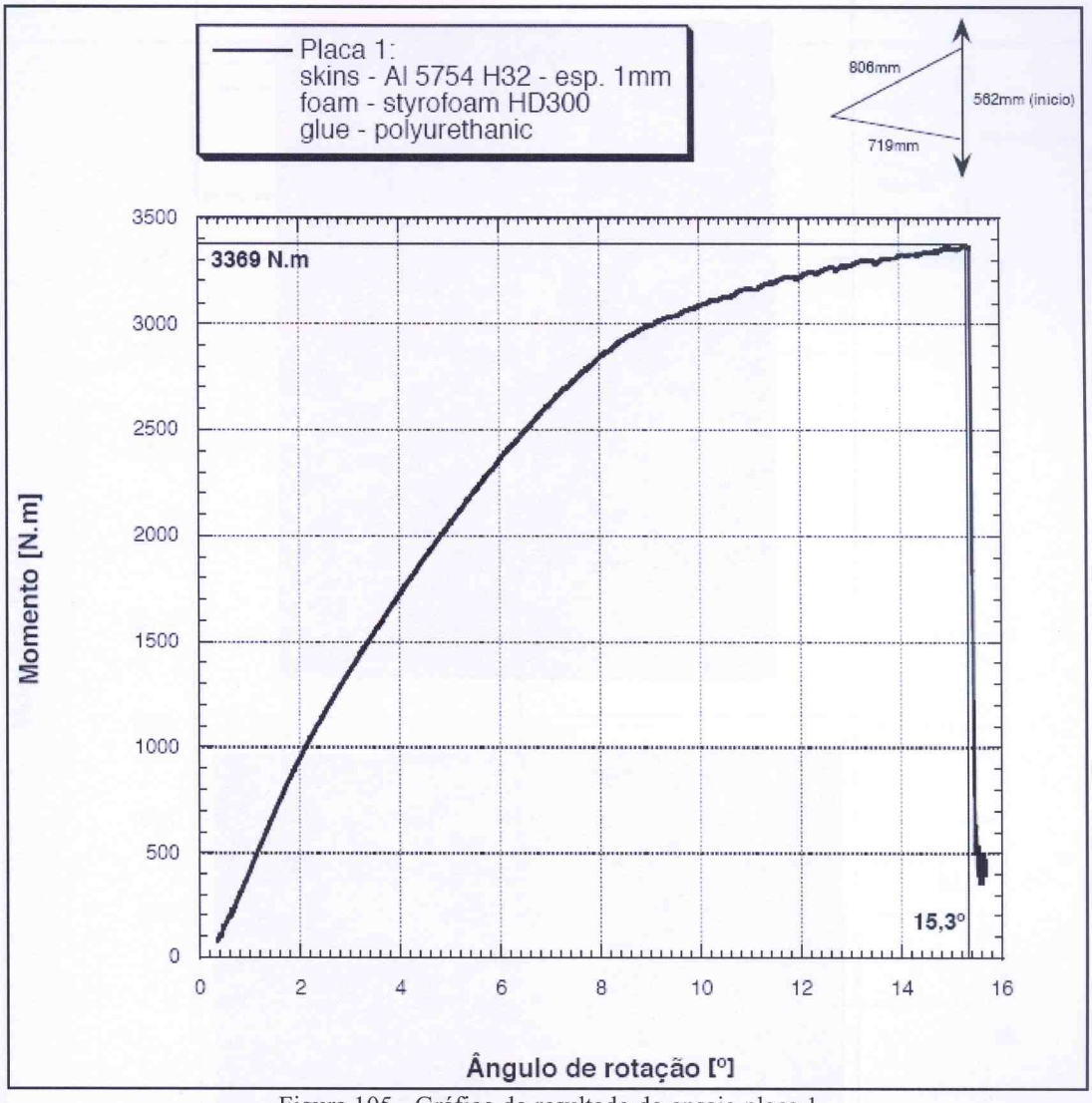


Figura 105 - Gráfico do resultado do ensaio placa 1

É importante referir que por ser o primeiro ensaio a ser realizado, o teste à placa 1 serviu de teste ao "set-up" idealizado. Após a realização do ensaio verificou-se que os parafusos de aperto da placa ao sistema de fixação (figura 102 e 103) não foram apertados com binário suficiente e existiu um deslize da solução a ensaiar. O ensaio pode ser considerado na mesma válido mas o ângulo final de abertura das peças apresentado é superior ao verdadeiro. No entanto, o valor máximo de momento registado é verdadeiro.

Solução construtiva placa 2

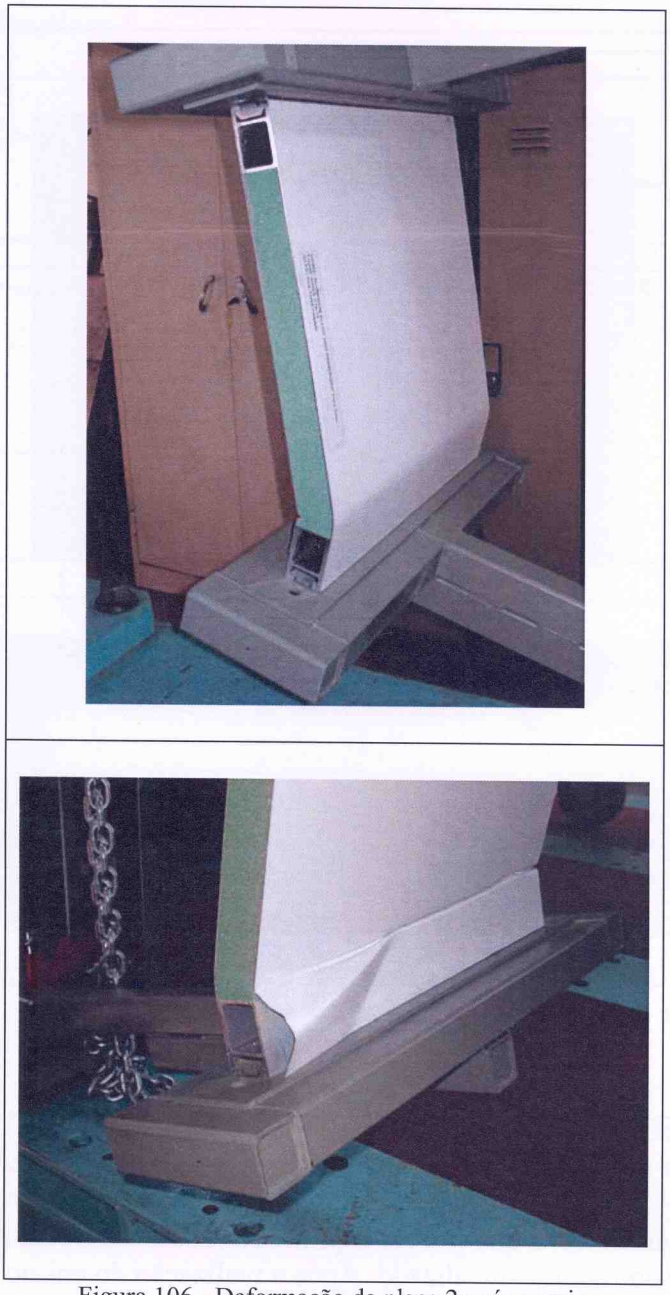


Figura 106 - Deformação da placa 2 após ensaio

Observações:

Também se verificou que o ensaio foi rápido e com um colapso brusco. A deformação observada é idêntica à esperada, na medida em que se verifica uma curvatura da peça inicialmente horizontal (ver figura 106). Verificou-se que o colapso da solução foi na ligação (colada) entre a pele exterior e o perfil, ambos em alumínio.

O gráfico pretendido para este provete 2 pode ser observado na figura 107.

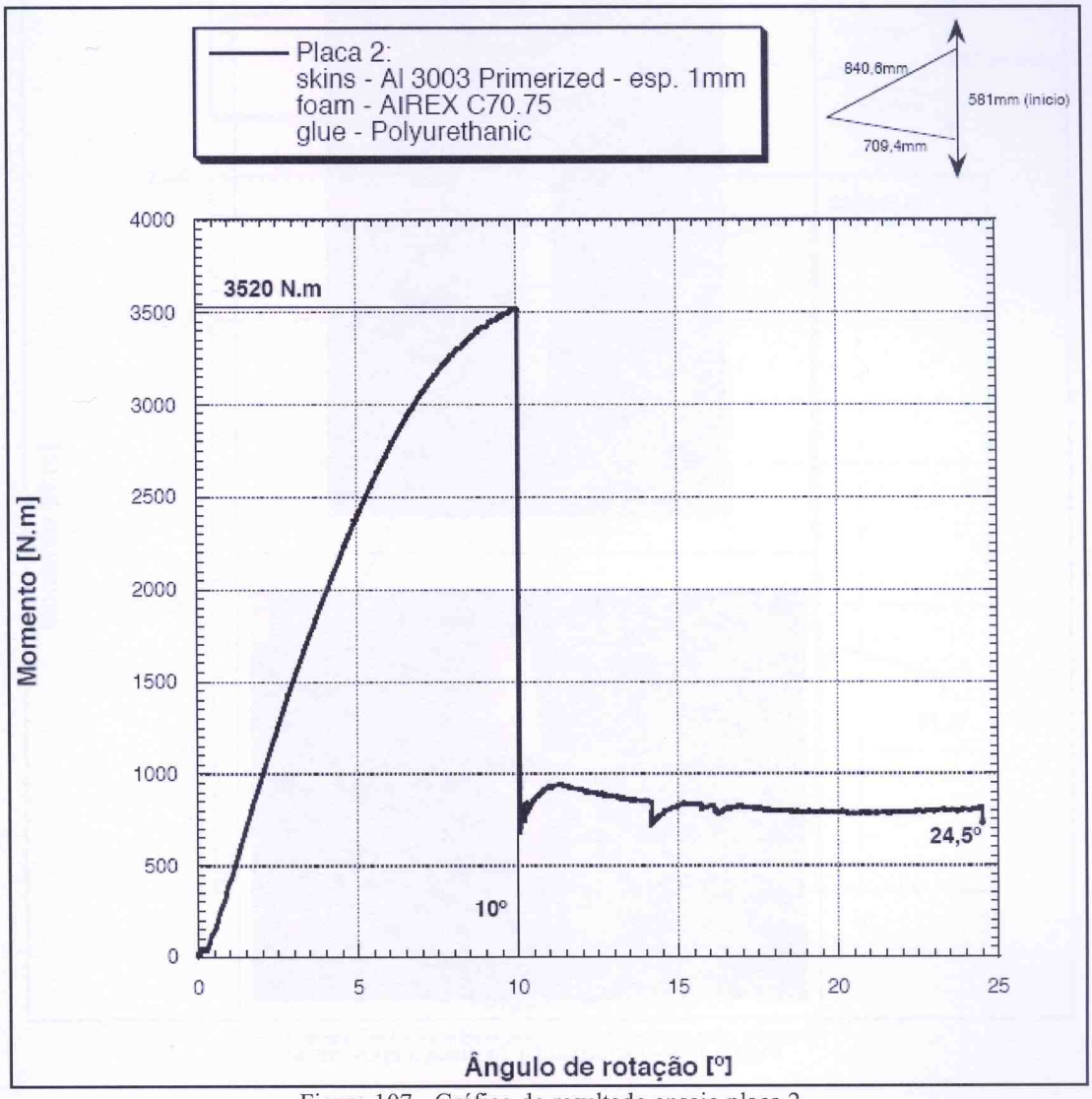


Figura 107 - Gráfico do resultado ensaio placa 2

Solução construtiva placa 3

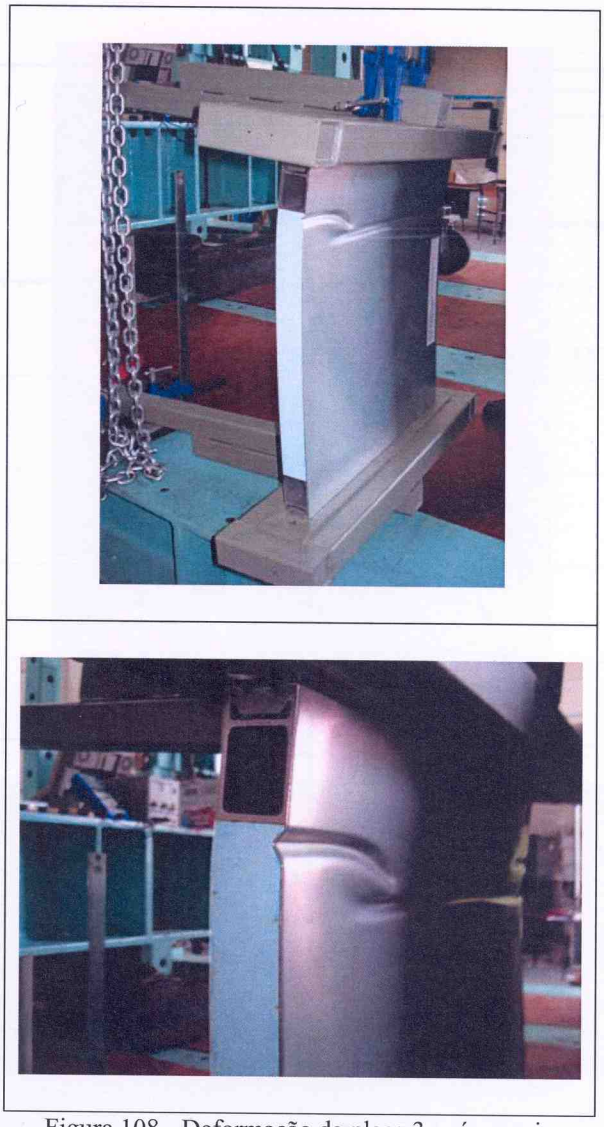


Figura 108 - Deformação da placa 3 após ensaio

Observações:

Também se verificou que o ensaio foi rápido e com um colapso brusco. A deformação observada é idêntica à esperada, na medida em que se verifica uma curvatura da peça inicialmente horizontal (ver figura 108). Verificou-se um colapso da solução idêntico ao provete número 1, no qual a pele exterior cedeu.

O gráfico pretendido para este provete 3 pode ser observado na figura 109.

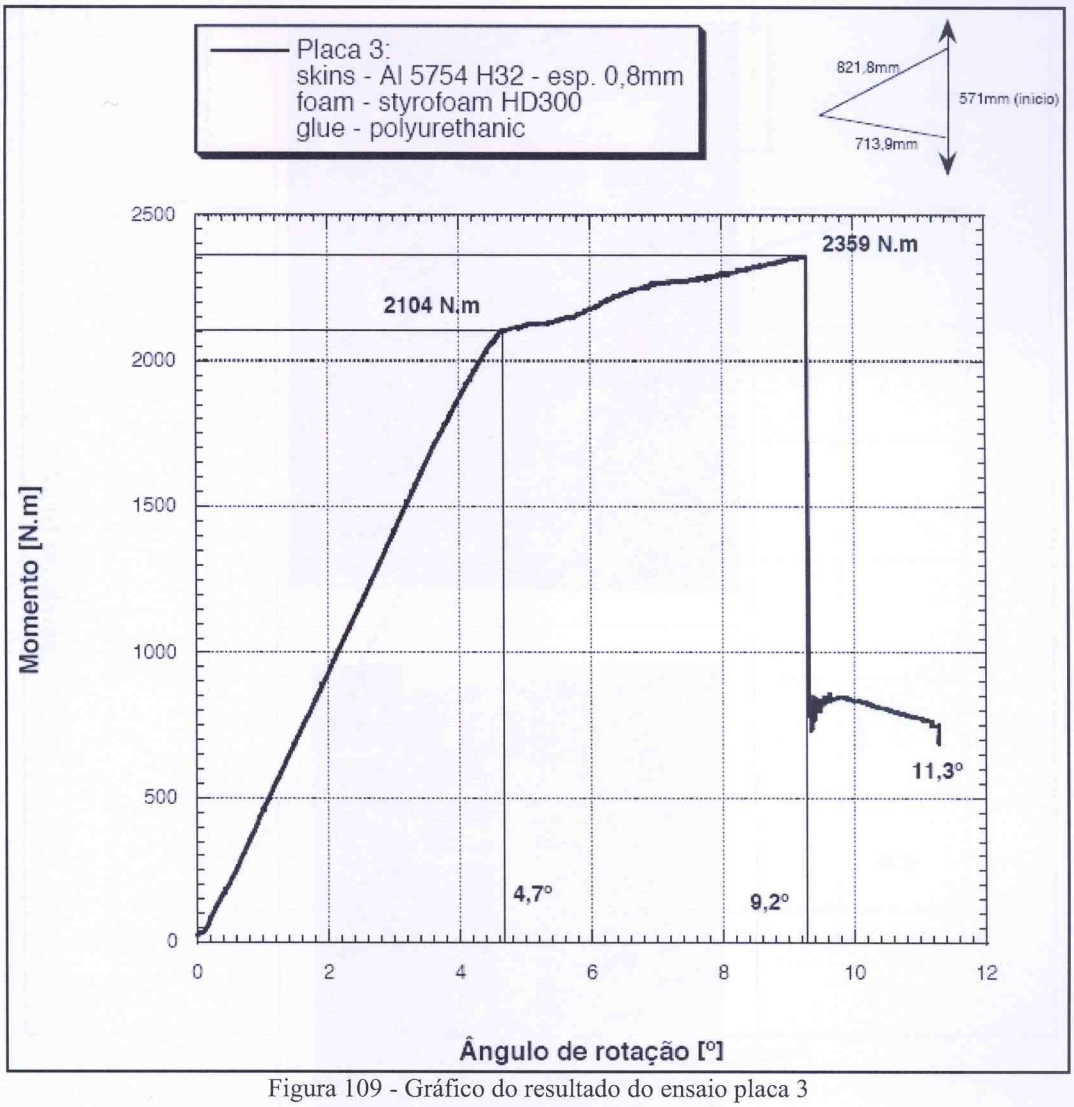


Figura 109 - Gráfico do resultado do ensaio placa 3

Solução construtiva placa 4

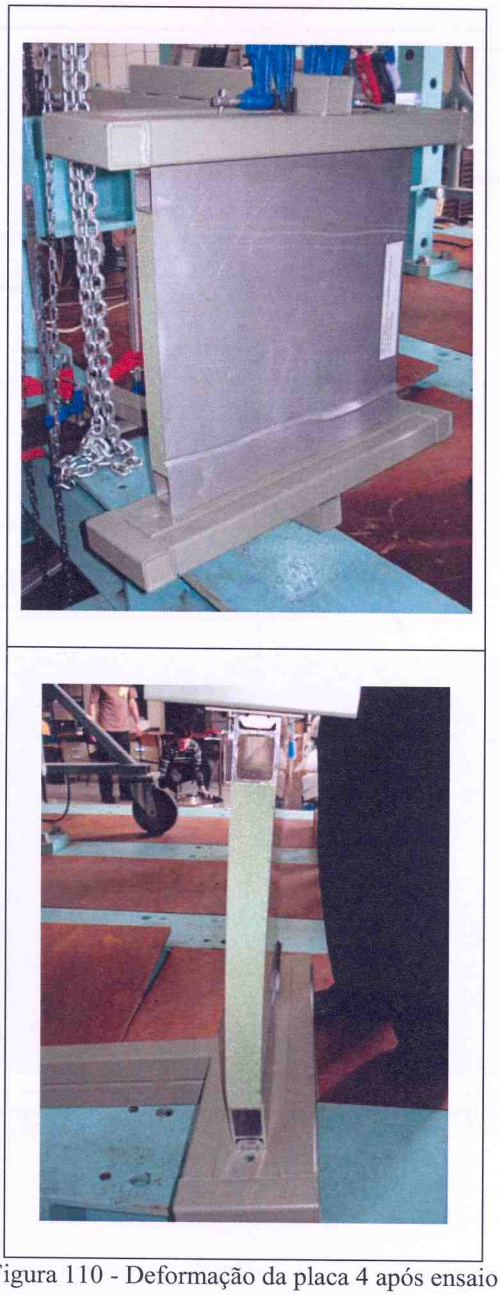


Figura 110 - Deformação da placa 4 após ensaio

Observações:

Também se verificou que o ensaio foi rápido e com um colapso brusco. A deformação observada é idêntica à esperada (ver figura 110), na medida em que se verifica uma curvatura da peça inicialmente horizontal.

O gráfico pretendido para este provete 4 pode ser observado na figura 111.

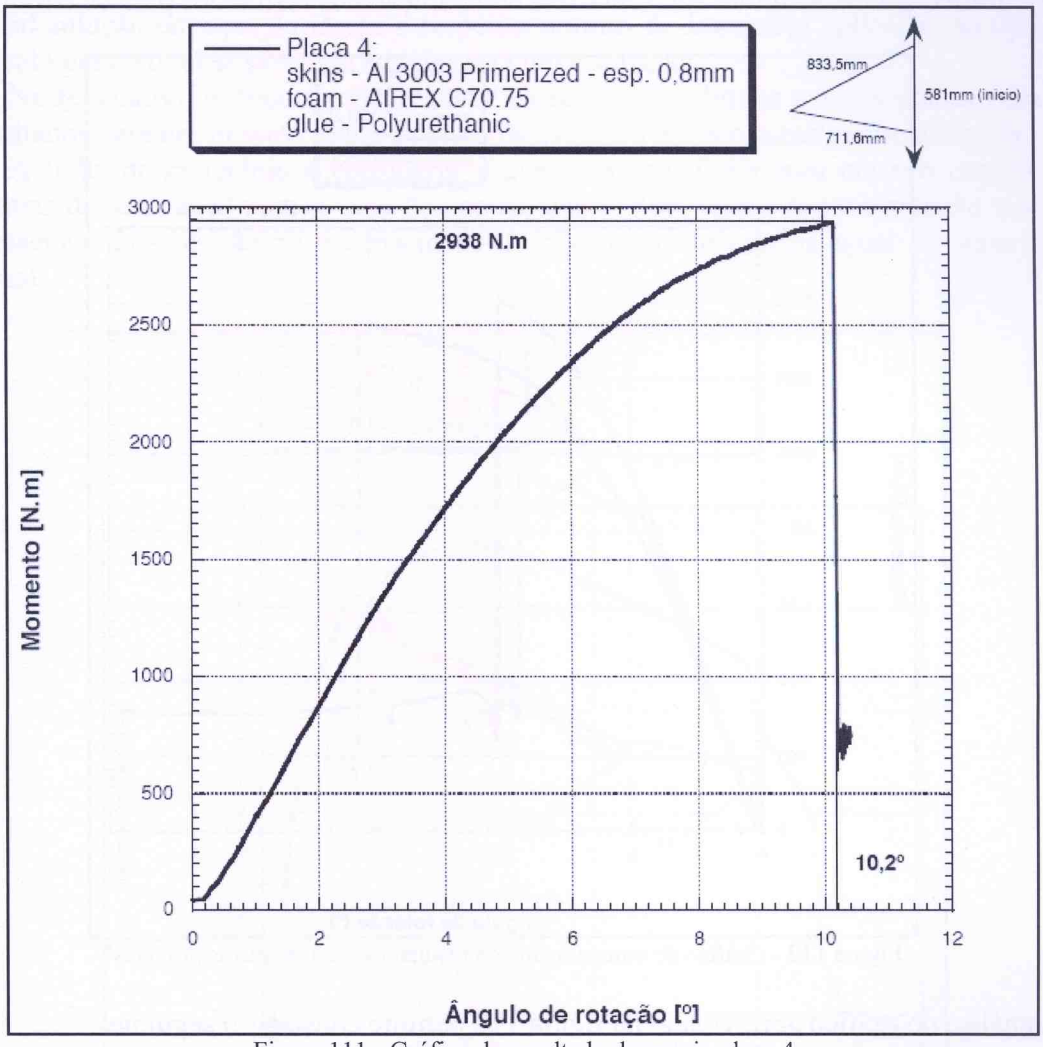


Figura 111 - Gráfico do resultado do ensaio placa 4

5.8 Comparação dos Resultados

No gráfico síntese seguinte apresenta-se a comparação dos resultados para os ensaios:

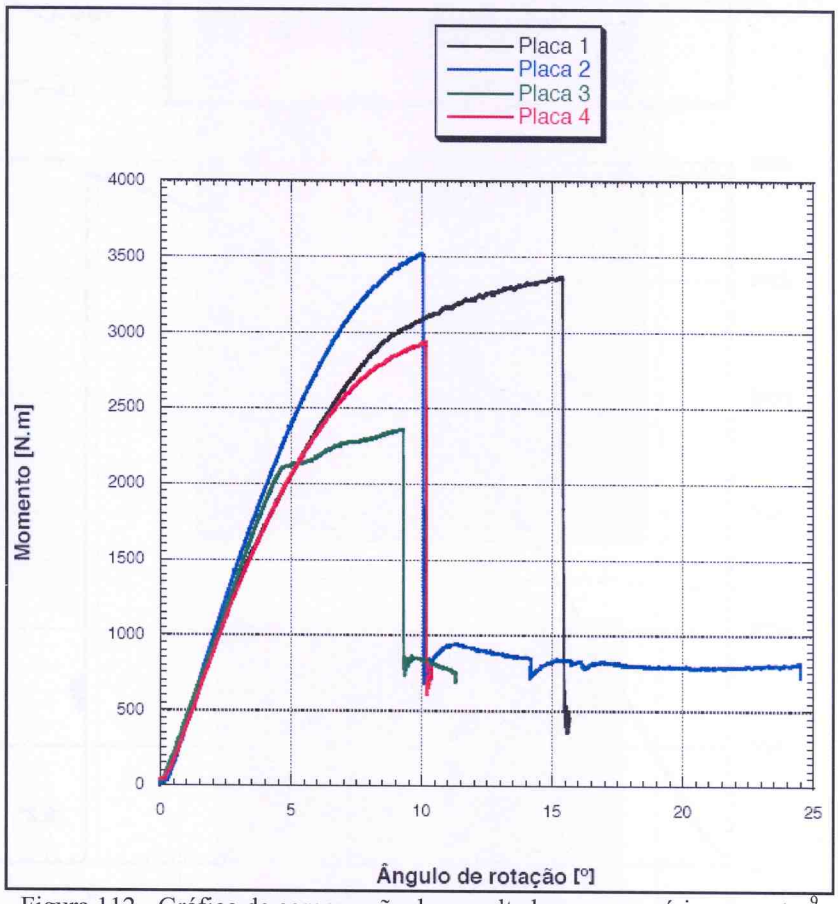


Figura 112 - Gráfico de comparação dos resultados para os vários provetes[9]

A análise do gráfico apresentado na figura 112 permite constatar o seguinte:

- ✓ Os provetes apresentam um comportamento estrutural idêntico para ensaio realizado (com uma salvaguarda na placa 1[4]). A solução construtiva é bastante rígida e com pouca capacidade de dissipar energia durante o ensaio.

- ✓ A melhoria em conjunto da qualidade do material da pele exterior em alumínio com a espuma estrutural, não se reflecte de forma significativa nos resultados (comparação das placas 2 e 1). A proporção do aumento do momento máximo é de:

$$M^{max}_{placa2} \Big/ M^{max}_{placa1} = 3520/3369 = 1{,}04 \Rightarrow 4\%$$

- ✓ O aumento da espessura da pele exterior em alumínio implica um aumento significativo do valor do momento máximo. (comparação das placas 1 com 3 e das placas 2 com 4)

$$M^{max}_{placa1} \Big/ M^{max}_{placa3} = 3369/2104 = 1{,}6 \Rightarrow 60\% \quad M^{max}_{placa2} \Big/ M^{max}_{placa4} = 3520/2138 = 1{,}65 \Rightarrow 65\%$$

[9] Para placa 1 o Ângulo final de abertura não é verdadeiro mas momento máximo é – ver pagina 102

Tal como referido anteriormente, uma das conclusões finais importantes a retirar dos ensaios realizados é verificar se a nova solução construtiva para o tejadilho apresenta valores de resistência e capacidade de dissipação de energia iguais ou superiores à actual solução em aço, de forma a respeitar normas de segurança aplicadas ao tipo de veículo para o qual se pretende adoptar esta nova solução.

Neste sentido, é importante comparar os resultados obtidos para as placas com os resultados para um provete representativo da estrutura em aço actualmente utilizada.

A linha de raciocínio a considerar é que se a actual estrutura em aço cumpre as normas de segurança para o caso do capotamento (R66), então a nova solução terá de apresentar uma resistência e capacidade de dissipação de energia igual ou superior à actual.

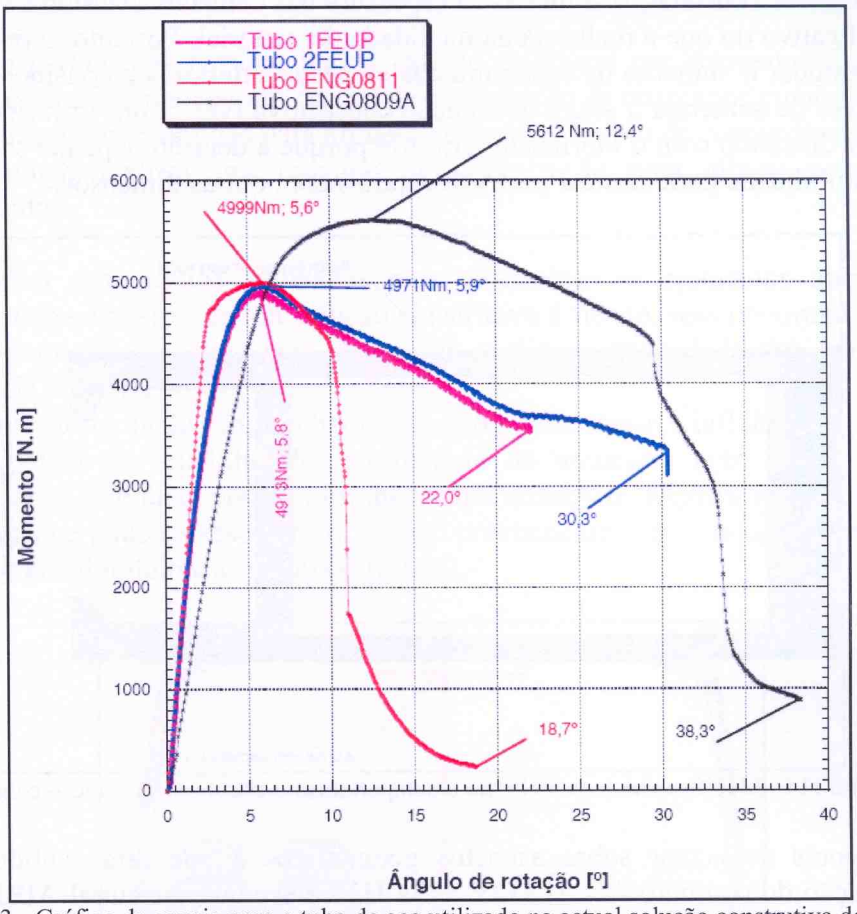


Figura 113 - Gráfico do ensaio para o tubo de aço utilizado na actual solução construtiva do tejadilho

Analisando o gráfico da figura 113 podemos observar um comportamento dúctil típico de um ensaio a um aço de construção. Comparando os dois gráficos podemos constatar que a área do gráfico da figura 113 (que está directamente relaciona com a capacidade de dissipação de energia) é significativamente superior à área característica do gráfico da figura 112, o que significa que a nova solução construtiva não será capaz de dissipar a mesma energia.

É importante referir que devido à falta de ductilidade da nova solução construtiva em desenvolvimento, o colapso é bastante súbito e sem previsão da sua ocorrência o que representa uma desvantagem em relação à actual solução em aço.

Verifica-se que os valores máximos dos momentos são consideravelmente superiores aos conseguidos para a nova solução construtiva.

5.9 Conclusões

A análise dos resultados apresentados permite concluir o seguinte:

- ✓ Existe ainda necessidade de melhorar esta solução construtiva inicial para o tejadilho mas com os ensaios realizados é possível ter noção de qual o melhor caminho a seguir e o objectivo que ainda necessita de ser atingido.

- ✓ Os ensaios apresentados permitiram perceber que uma melhoria da solução construtiva deverá passar primeiro por ser em termos geométricos porque, tal como foi possível constatar, o aumento da espessura das camadas exteriores é muito mais significativo do que a melhoria da qualidade do material. Portanto, o próximo passo será estudar o aumento da espessura das camadas exteriores e considerar também a hipótese de aumentar a altura da solução construtiva (ver figura 114. Este passo terá de ser discutido com o fabricante ALCAN porque a decisão depende sempre da sua disponibilidade para fabricar perfis estruturais com outras dimensões.

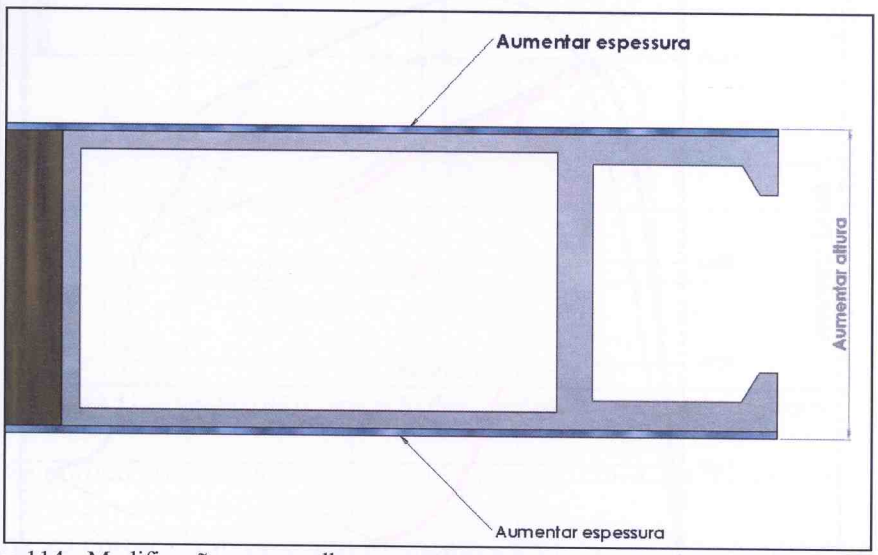


Figura 114 - Modificações para melhorar o comportamento estrutural da solução construtiva

- ✓ Só depois de actuar sobre aspectos geométricos é que fará sentido estudar a utilização do conjunto AL ALLOY 5754 H32 e espuma estrutural AIREX C70.75, com qualidades superiores. Como em termos proporcionais o aumento da resistência é pouco significativo, será necessário avaliar se o aumento dos custos na solução final compensa o ganho que se tem em utilizar estes materiais.

5.10 Indicações para trabalhos subsequentes

Como referido anteriormente o trabalho realizado pelo autor e descrito neste capitulo 5, diz respeito a um trabalho de investigação interno da empresa que ainda se encontra em desenvolvimento. A abordagem completa com um trabalho de investigação profundo poderia conduzir a uma boa e completa tese de mestrado, uma vez que o sucesso do objectivo final poderia revolucionar os métodos actualmente existentes de construção de autocarros.

Apesar do estudo ainda se encontrar numa fase inicial de avaliação da viabilidade e possibilidade de desenvolver uma solução construtiva capaz de substituir a actual construção soldada em aço existem alguns trabalhos que o autor gostaria de apontar como importantes passos seguintes a realizar:

- ✓ Tirando partido das ferramentas de cálculo estrutural por elementos finitos, seria bastante benéfico realizar um estudo de comparação de resultados numéricos com os resultados práticos obtidos para afinar e determinar o grau de concordância e a partir desse ponto realizar um trabalho de optimização para atingir os objectivos pretendidos.

- ✓ Para além dos ensaios realizados para determinar os momentos máximos e o comportamento estrutural da solução construtiva à flexão, será importante estudar o comportamento da solução ao corte para avaliar a integridade dos materiais e a aderência entre eles.

  A par desta avaliação, também será importante testar a influência da curvatura característica do tejadilho de um modelo de autocarro (ver figura 115) para averiguar se este facto poderá introduzir uma influência negativa no comportamento uma vez que pode representar um defeito previamente existe na ligação entre a pele exterior em alumínio e a espuma estrutural.

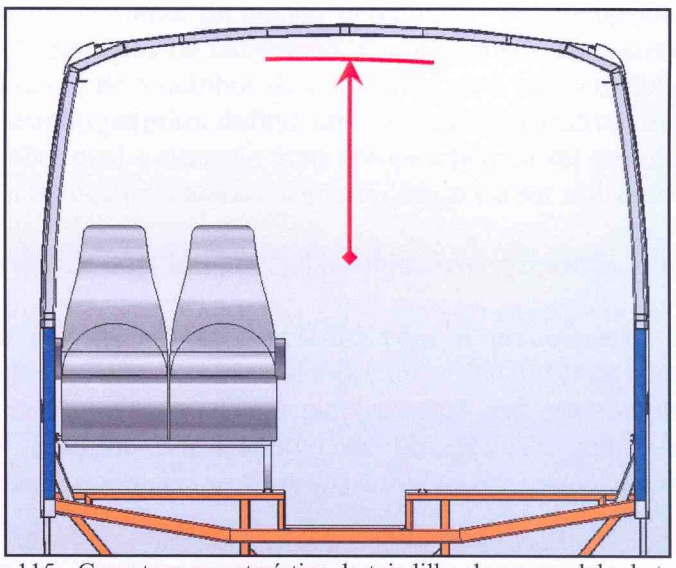


Figura 115 - Curvatura característica do tejadilho de um modelo de turismo

Aproveitamento a necessidade fabricar novos provetes, existe toda a vantagem em avançar para um ensaio a uma placa com dimensões gerais próximas da solução final (ver figura 116) para permitir averiguar a influência da largura característica de um autocarro no comportamento estrutural.

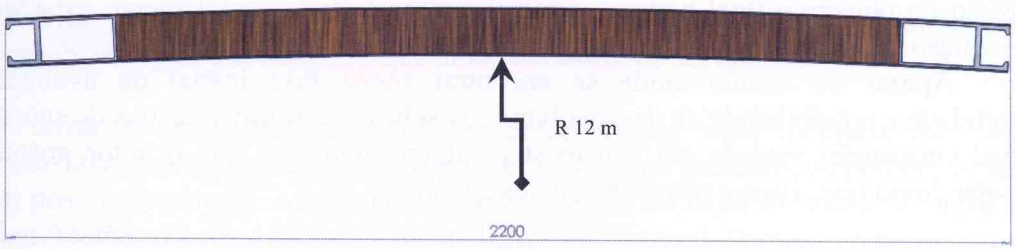


Figura 116 - Configuração do próximo provete a ensaiar

Capitulo VI – Conclusões gerais

6.1 Síntese do trabalho desenvolvido

O presente relatório abordou 4 temas de trabalhos desenvolvidos ao longo de vários meses e por isso o autor julga ser importante realizar uma síntese dos trabalhos.

No primeiro tema foi apresentado o estudo realizado pelo autor para a correcta utilização da nova ferramenta ANSYS na aplicação da metodologia de optimização de estruturas de autocarros desenvolvida pelo departamento técnico da Caetanobus. Foi possível constatar as principais vantagens da utilização de ANSYS face ao anterior programa StressLab e perceber o aperfeiçoamento da metodologia, realizada pelo autor com base nas funcionalidades e potencialidades que o recente programa possui.

No segundo tema foi demonstrado um método de passagem de informação entre StressLab e ANSYS que se revelou bastante eficaz. Uma vez consolidada e assegurada esta tarefa foi possível comparar resultados entre os dois programas de cálculo e ter uma noção das principais diferenças nos resultados.

No terceiro tema foi apresentado um caso prático real da aplicação da metodologia de optimização de estruturas de autocarros, recorrendo a ANSYS. Para o sucesso desta tarefa foi utilizado todo o conhecimento adquirido no primeiro tema e foi possível concluir que o ANSYS fornece resultados bastante acertados e correspondentes com a realidade. Porém é essencial saber interpretar os dados que o programa fornece para se poder tomar as acções correctas e para isso é muito importante contar com a experiência profissional na modelação e análise de estruturas de autocarros.

Por fim, o último tema pretendeu demonstrar a preocupação da empresa em apostar em novas tecnologias de fabricação de autocarros e apresentou o estudo inicial para o desenvolvimento de tejadilhos de autocarros com base em soluções construtivas "sandwich". Este estudo permitiu definir uma solução construtiva inicial de abordagem ao problema, perceber qual a situação mais apropriada para ser testada e concluir qual a melhor solução em termos de material disponibilizado e a ser utilizado na solução.

O autor considera que de uma forma geral os objectivos propostos foram alcançados

A escolha dos temas estudados foi com a preocupação de, por um lado possuírem conteúdo académico relevante e por outro satisfazer as necessidades técnicas do departamento de Engenharia da Caetanobus. Por isso o autor pode afirmar que o presente relatório trata de um *trabalho de investigação sobre a optimização de estruturas de autocarros num contexto profissional e com aplicação prática.*

6.2 Conclusões

Tendo em conta todo o trabalho apresentado e considerando as ideias principais de cada tema, podemos concluir o seguinte:

- ✓ Os conhecimentos técnicos do autor na análise de estruturas de autocarros evoluíram e consolidaram-se ao longo de vários estudos com aplicação prática, realizados no âmbito das suas funções profissionais, integradas no departamento de projecto e concepção da CaetanoBus. Para o demonstrar, o autor escolheu um tema que se encontra na linha do âmbito do trabalho de fim de curso realizado anteriormente;

- ✓ A utilização de ferramentas CAE no departamento de Engenharia da CaetanoBus tem-se revelado bastante importante no desenvolvimento de projectos na medida em que permitem a optimização do produto, previnem eventuais problemas críticos e contribuem para o aumento o conhecimento técnico do comportamento estrutural de autocarros típicos.

- ✓ É muito importante ter cuidado com utilização de ferramentas CAE porque estas por si só não executam o importante trabalho de apoio ao projecto. É necessário aliar a experiencia de Engenharia na resolução e compreensão do comportamento de estruturas complexas e um espírito bastante crítico na analise dos resultados para compreender os fenómenos associados. Por esta razão, o apoio ao projecto com base em ferramentas de cálculo terá se ser sempre realizado por Engenheiros experientes, sob o risco de comprometer decisões erradas.

- ✓ Só se poderá retirar benefícios da utilização de ferramentas CAE quando se compreende as premissas do problema e as vantagens e limitações da modelação que se utiliza. Esta tese pretende explanar o trabalho de Engenharia subjacente à metodologia utilizada no desenvolvido e apoio ao projecto de carroçarias de autocarros, baseada na utilização de ferramentas CAE.
  As metodologias apresentadas não estarão limitadas na aplicação do projecto de carroçarias de autocarros e poderão ser consideradas em outras situações que em se debatam com os mesmos problemas.

- ✓ É possível existir uma evolução dos métodos de construção de carroçarias de autocarros, já num futuro próximo. Técnicas de construção que recorrem a novas soluções construtivas com base em materiais compósitos estão a ser desenvolvidas pelo departamento técnico da Caetanobus e já existe uma estratégia delineada para o sucesso do novo conceito.

6.3 Experiência do autor

Entende o autor ser relevante referir-se, muito sinteticamente, à experiência adquirida e vivida durante a realização do trabalho descrito na presente dissertação.

Devido ao facto deste trabalho se ter estendido por um período considerável (cerca de 11 meses), muitos foram os assuntos possíveis de abordar. Esta possibilidade foi bastante enriquecedora e contribuiu bastante para o aumento do conhecimento técnico do autor.

É importante realçar que o autor conseguiu demonstrar que o conhecimento adquirido durante a licenciatura e no Projecto de Fim de Curso (realizado nesta mesma empresa) foram consolidados com o decorrer da experiência profissional e importante para o desenvolvimento do trabalho apresentado na medida em que potencializou e abriu caminho ao desenvolvimento de novos estudos.

A possibilidade de realizar trabalho de investigação e estudo académico com contexto profissional e com aplicação prática foi bastante aliciante para o autor porque para além de aumentar os conhecimentos técnicos, a observação da aplicação dos resultados do trabalho é entusiasmante para um jovem Engenheiro. Por outro lado, como o trabalho foi desenvolvido com acompanhamento e supervisão de um Engenheiro com larga experiência profissional esta oportunidade permitiu ao autor desenvolver capacidades técnicas e análise de problemas reais de Engenharia.

Em suma, esta oportunidade proporcionada pela parceria entre o departamento de Engenharia Mecânica da FEUP e a empresa CaetanoBus foi uma experiencia bastante enriquecedora para o autor.

Referências e Bibliografia

[1] – Ramos, André, "Projecto de Fim de Curso", Relatório do Projecto Final da LEM, FEUP, 2006

[2] – Nogueira, Afonso, " Contribuição para o Projecto de um Autocarro", Relatório do Projecto Final do MIEM, FEUP 2009

[3] – "Release 12.0 Documentation for ANSYS"

[4] – Garrido, Rui "Modelação de autocarros em elementos finitos", Relatório de projecto final do MIEM, FEUP 2010

[5] – Martec Limited, "INTERCITY BUS WEIGHT REDUCTION PROGRAM Phase II - A Design Investigation for Lightweight Intercity Bus Roof and Floor Components", 2003.
Consultado a 06/10 em http://www.martec.com/transportation-ps1.html

[6] – TEMSA/CADFEM, "Regulatory Bus Roll-Over Crash Analysis Using LS DYNA", 2006.
Consultado a 06/10 em
http://www.figes.com.tr/ls-dyna/dokuman/RegulatoryBusRollOverCrashAnalysis.pdf

[7] – Propriedade Mecânicas da Liga de Alumínio série 5754
Consultado a 06/10 em
http://www.aalco.co.uk/technical/datasheets/Aalco_Datasheet_Al_Alloy_5754.pdf
http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2806

[8] – Propriedade Mecânicas da Liga de Alumínio série 3003
Consultado a 06/10 em
http://www.efunda.com/materials/alloys/aluminum

[9] - Propriedades Mecânicas da Espuma Estrutural AIREX C70.75
Consultado a 06/10 em
http://www.topplast.ee

[10] – Propriedades Mecânicas da Espuma Estrutural STYROFOAM HD300
Consultado a 06/10 em
http://www.compositepanel.co.uk

[11] – Dias Fernandes, Mário Filipe, "Resistência estrutural de autocarros ao capotamento lateral", Tese de Mestrado em Estruturas, FEUP 1990

Sites Consultados

[A] – www.ansys.com
[B] – www.alcancomposites.com
[C] – www.caetanobus.pt
[D] – http://eur-lex.europa.eu/pt/index.htm

Anexos

1) – Variação média das áreas calculadas pelas ferramentas ANSYS

2) – Resultados do estudo da determinação da propriedade física de inércia à torção

3) – Passagem de informação StressLab-ANSYS

4) – Desenho de homologação modelo OPTIMO 2K "Low Entry)

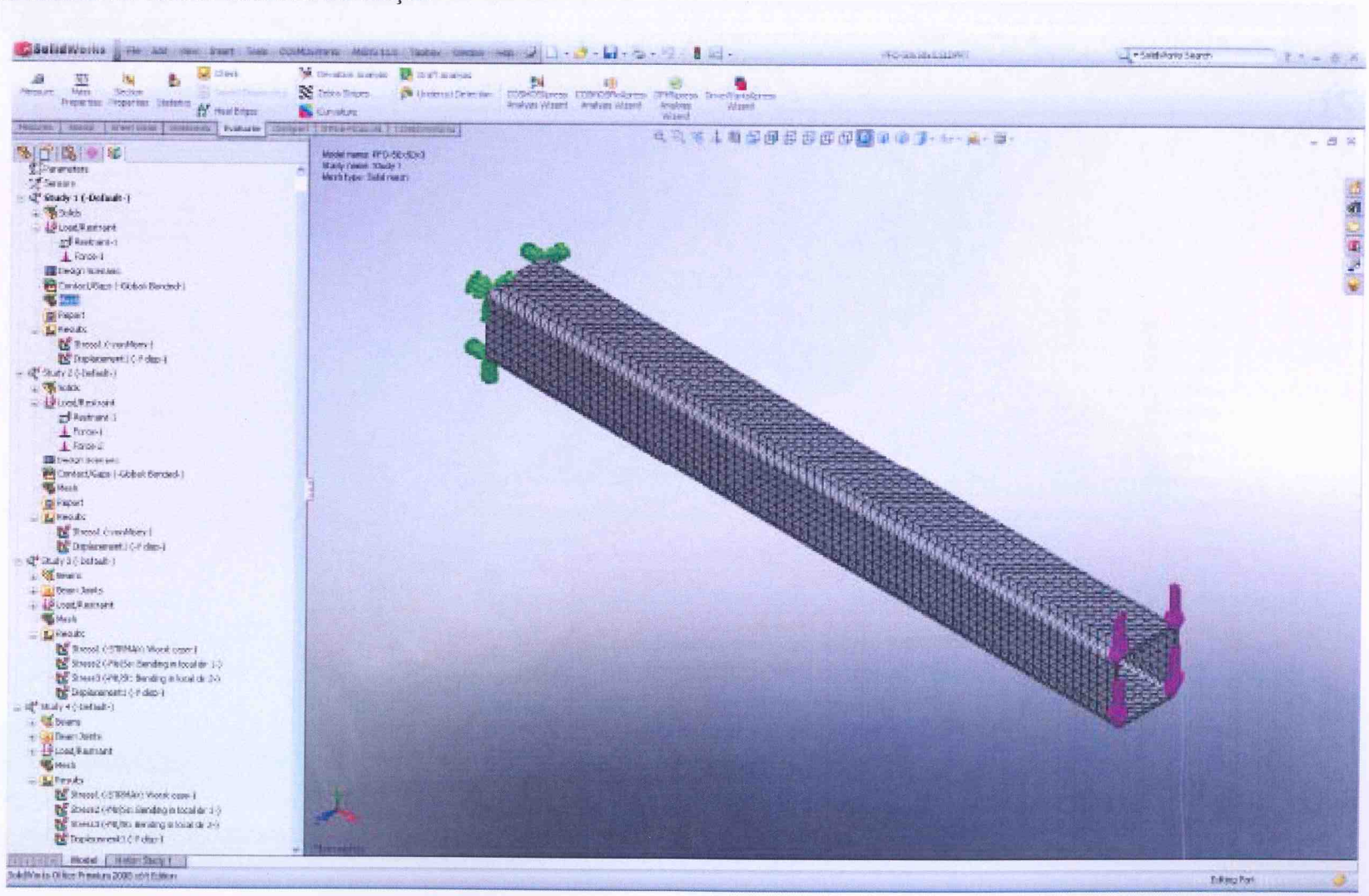
(1) – Variação média das propriedades físicas calculadas pelas ferramentas ANSYS

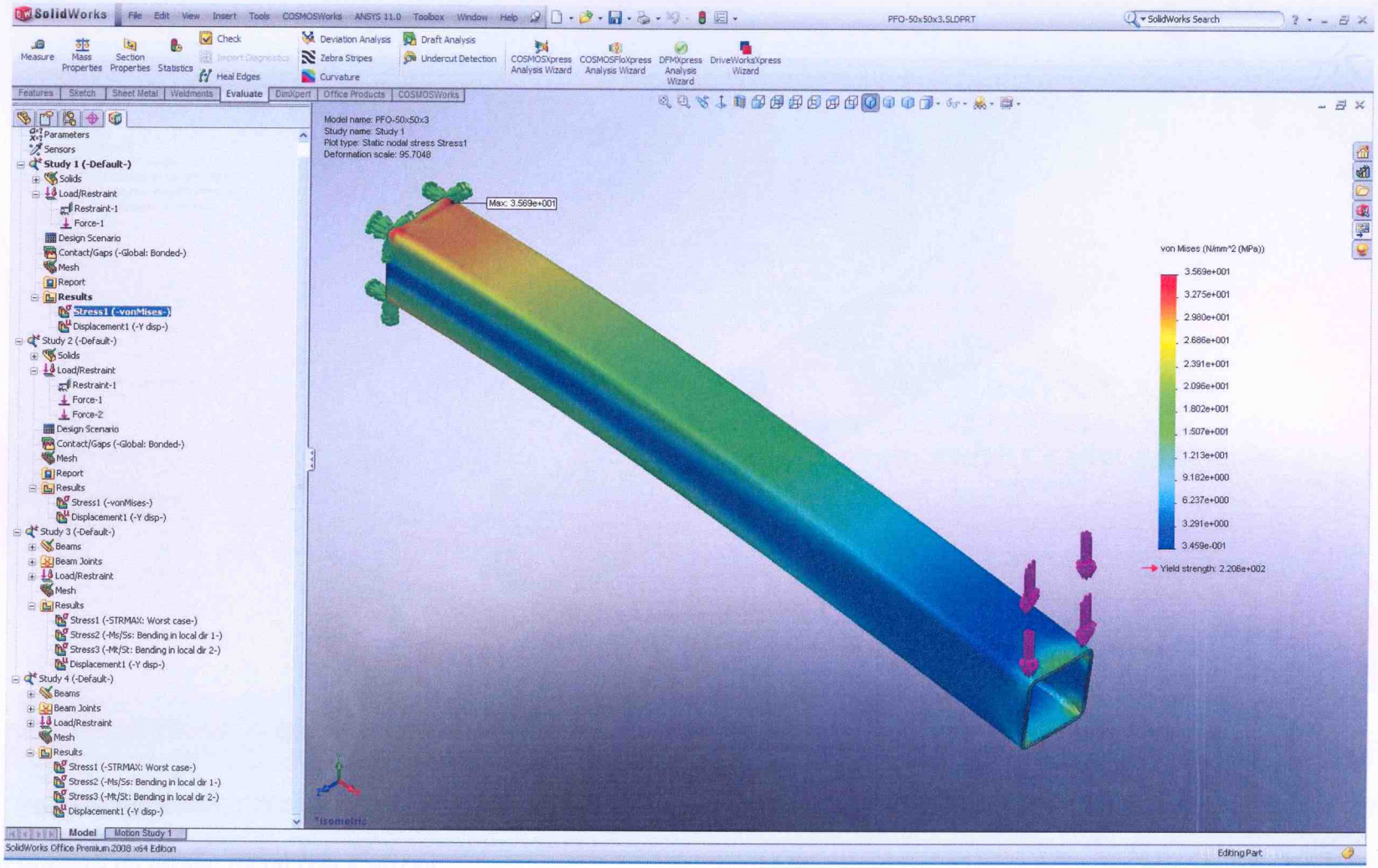
Reunindo os tipos de perfis mais comuns numa estrutura típica de autocarro podemos determinar a relação (média) entre o valor da área calculada por ANSYS e o valor de tabelas normalizadas.

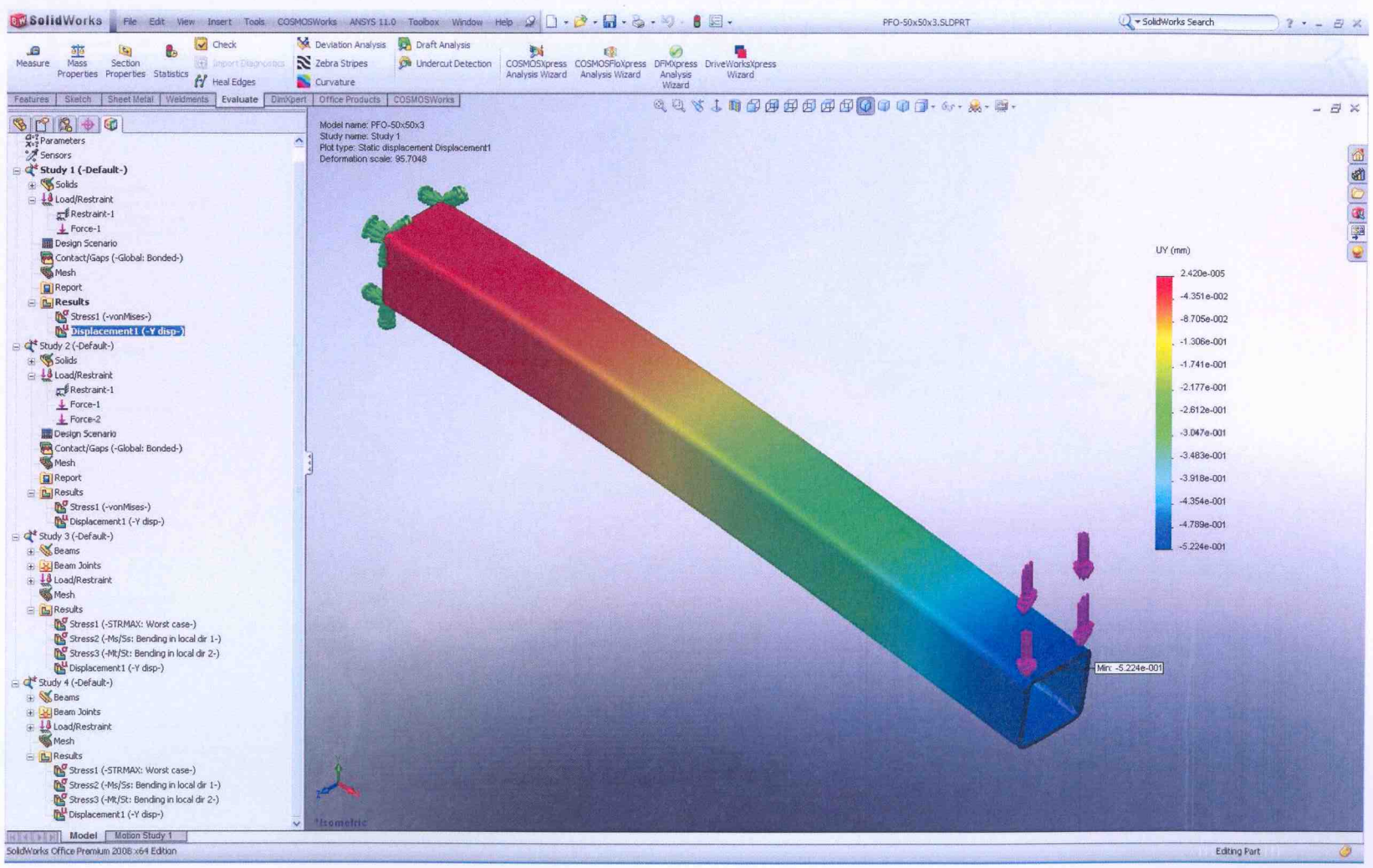
	Valor tabela normalizada			ANSYS	Relação entre áreas
	A	Iy	Iz	A	A'/A
PT-100X40X4	9,905	117,00	27,00	10,20	3%
PT-100X50X5	12,845	158,00	53,00	13,40	4%
PT-40X20X2	2,076	4,12	1,36	2,15	4%
PT-40X30X2	2,486	5,56	3,55	2,55	3%
PT-50X30X2	2,886	9,64	4,33	2,95	2%
PT-50X40X3	4,754	16,60	11,70	4,89	3%
PT-60X40X3	5,351	26,10	13,70	5,49	3%
PT-60X40X4	6,671	31,60	16,50	7,02	5%
PT-60X50X3	5,891	30,60	23,00	6,05	3%
PT-60X50X5	8,691	42,90	32,10	9,36	8%
PT-80X40X2	4,495	37,60	12,80	4,55	1%
PT-80X40X3	6,481	52,70	17,70	6,65	3%
PT-80X40X4	8,427	66,90	22,00	8,69	3%
PT-80X40X5	9,668	75,11	24,59	10,36	7%
PT-80X50X4	9,123	77,40	36,90	9,42	3%
PT-30X20X1,5	1,323	1,61	0,85	1,36	3%
PT-40X20X1,5	1,625	3,30	1,11	1,66	2%
PT-40X30X1,5	1,929	4,42	2,83	1,96	2%
PT-60X25X2	3,052	13,36	3,34	3,14	3%
PT-40X40X2	2,890	7,01	7,01	2,95	2%
PT-40X40X3	4,069	9,47	9,47	4,25	4%
PT-50X50X2	3,707	14,30	14,30	3,75	1%
PT-50X50X3	5,287	19,70	19,70	5,45	3%
			Variação Média		3%

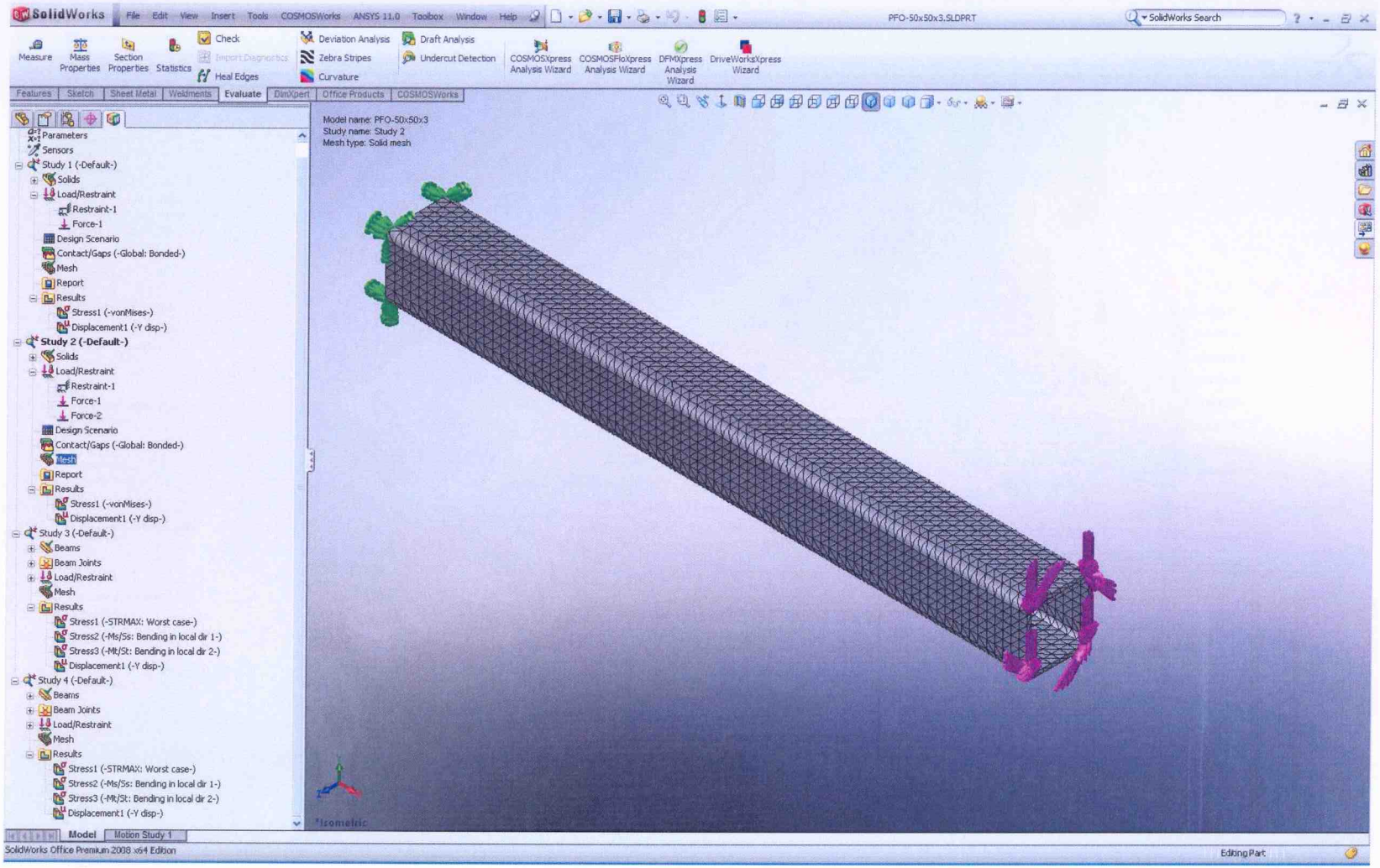
O valor da variação média é o mesmo valor determinado para o caso de estudo apresentado na secção A. Esta situação confirma o valor determinado.

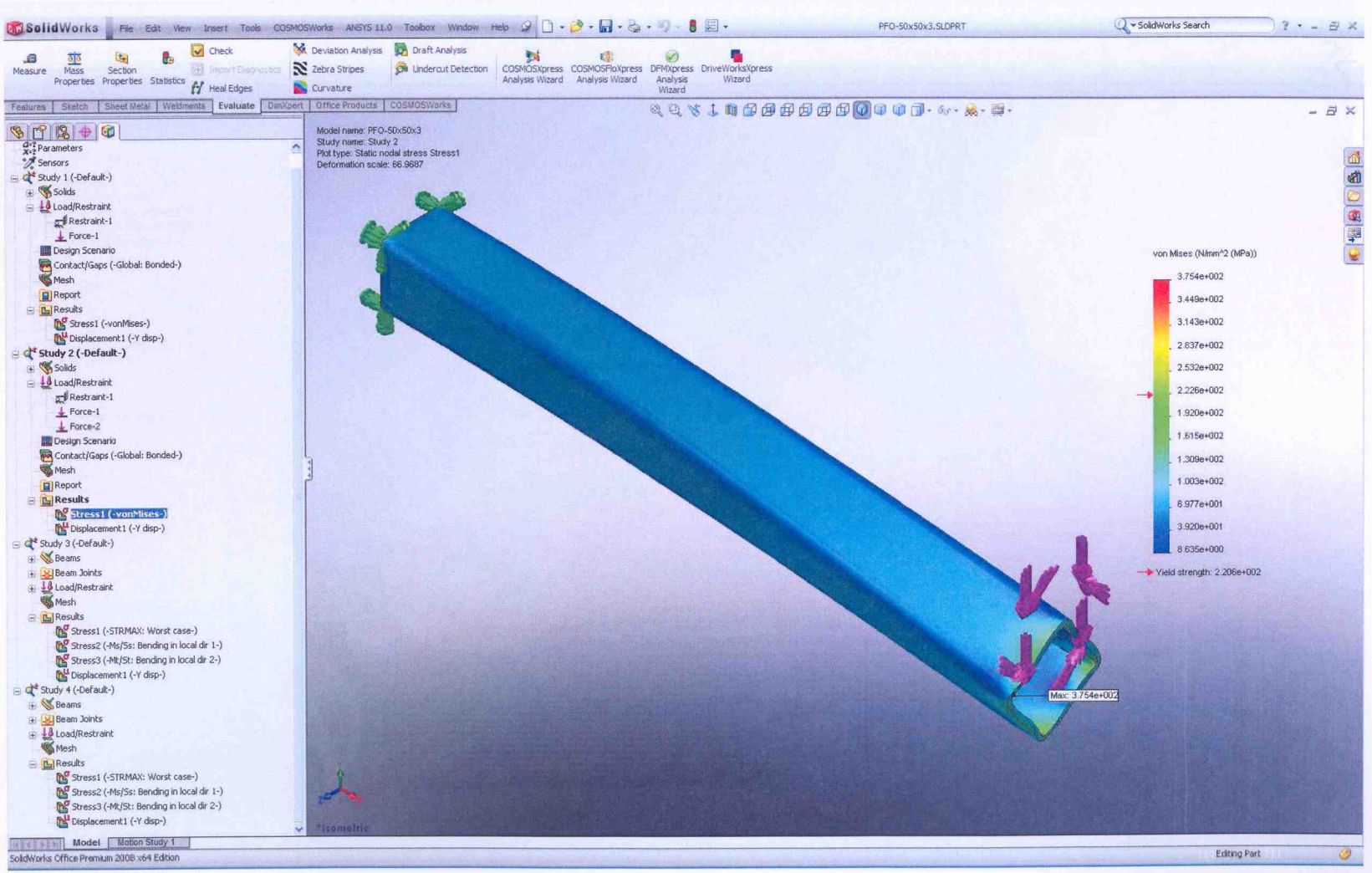
(2) – Resultados do estudo da inércia à torção

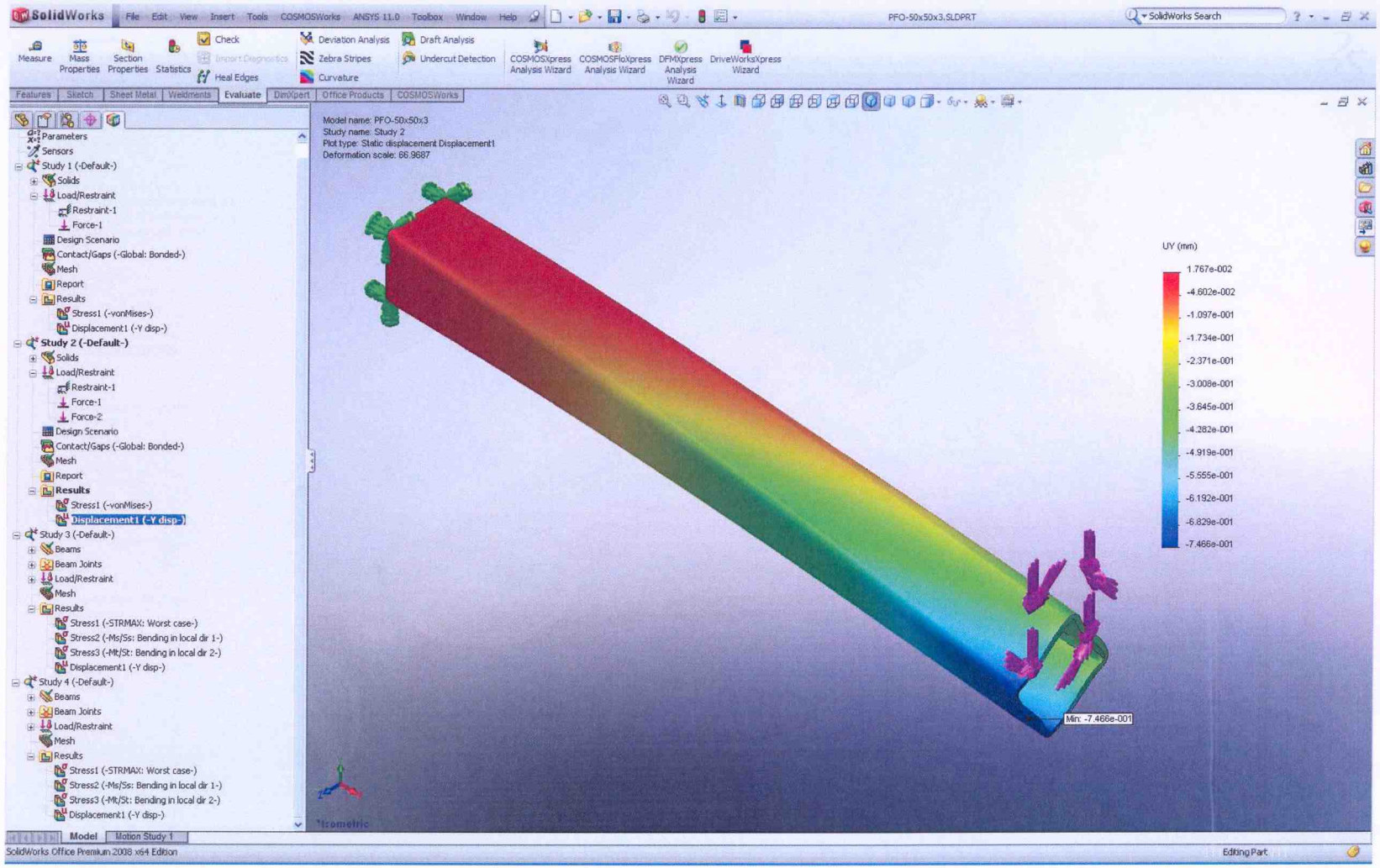


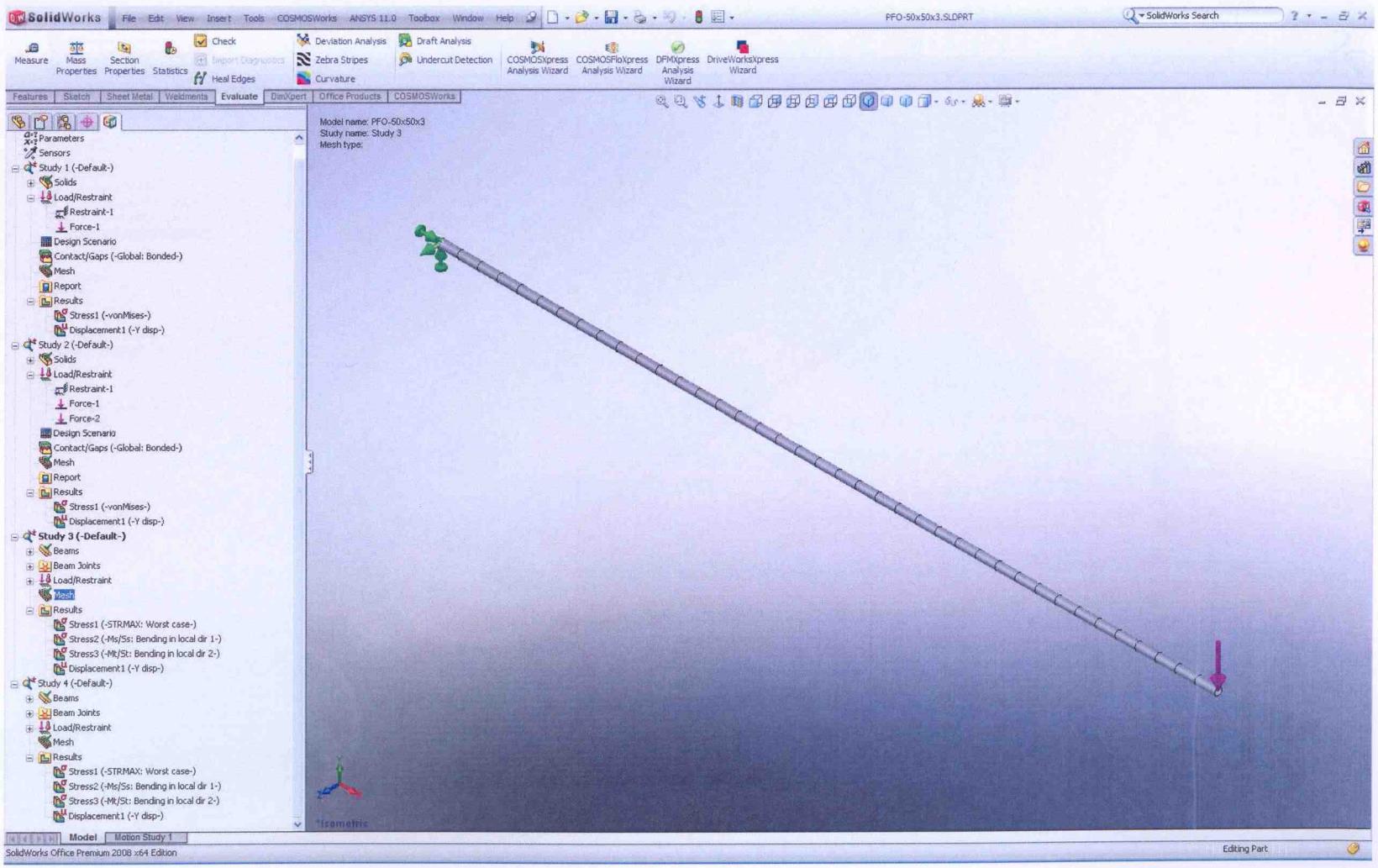

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure
Mass Properties
Section Properties
Statistics
Check
Import Diagnostics
Heal Edges
Deviation Analysis
Zebra Stripes
Curvature
Draft Analysis
Undercut Detection
COSMOSXpress Analysis Wizard
COSMOSFloXpress Analysis Wizard
DFMXpress Analysis Wizard
DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 1
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 95.7048
Max: 3.569e+001
von Mises (N/mm^2 (MPa))
3.569e+001
3.275e+001
2.980e+001
2.686e+001
2.391e+001
2.096e+001
1.802e+001
1.507e+001
1.213e+001
9.182e+000
6.237e+000
3.291e+000
3.459e-001
Yield strength: 2.206e+002
*Isometric
Model
Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

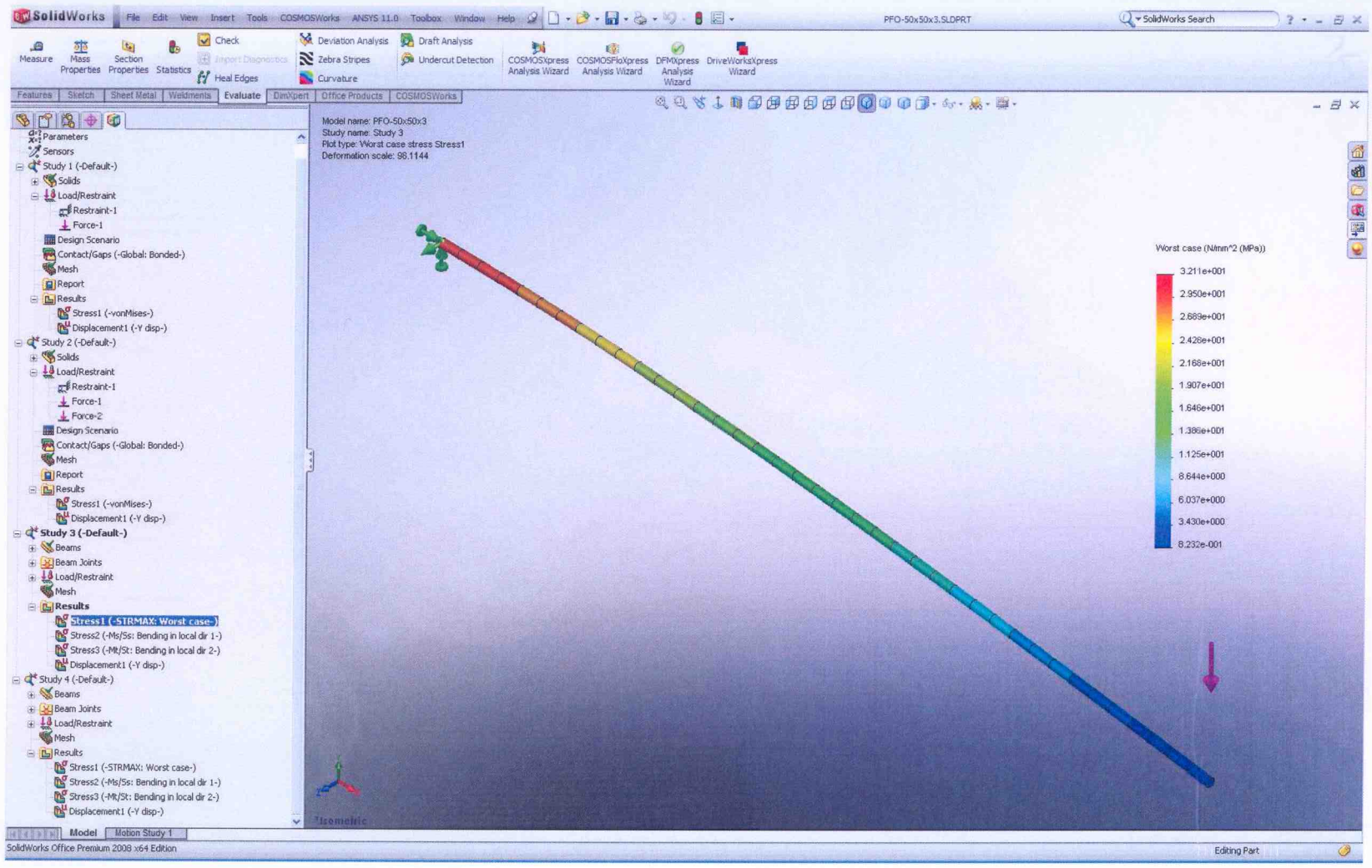

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure Mass Properties Section Properties Statistics Check Import Diagnostics Heal Edges Deviation Analysis Zebra Stripes Curvature Draft Analysis Undercut Detection COSMOSXpress Analysis Wizard COSMOSFloXpress Analysis Wizard DFMXpress Analysis Wizard DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 1
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 95.7048
UY (mm)
2.420e-005
-4.351e-002
-8.705e-002
-1.306e-001
-1.741e-001
-2.177e-001
-2.612e-001
-3.047e-001
-3.483e-001
-3.918e-001
-4.354e-001
-4.789e-001
-5.224e-001
Min: -5.224e-001
*Isometric
Model Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

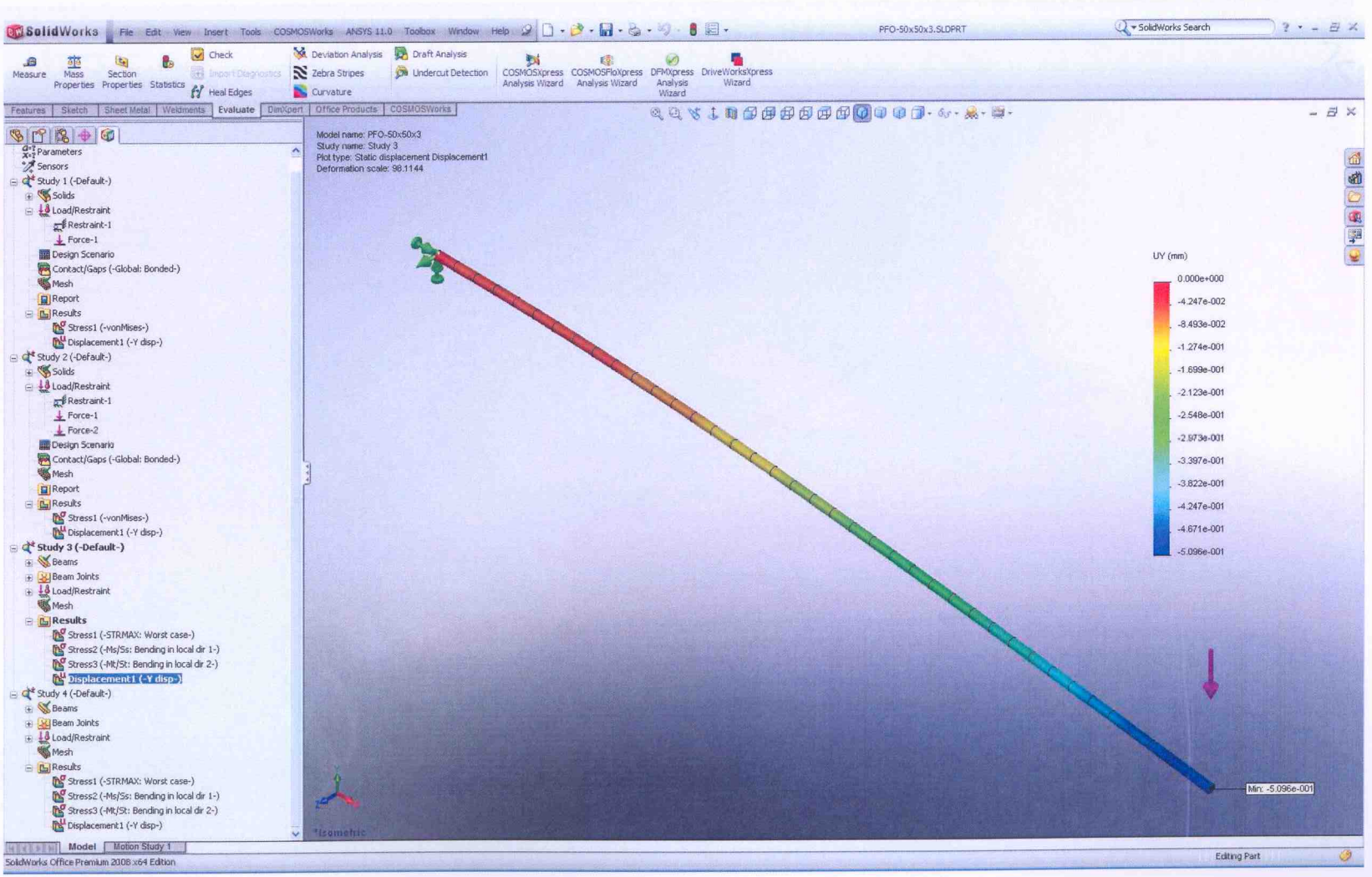

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure
Mass Properties
Section Properties
Statistics
Check
Import Diagnostics
Heal Edges
Deviation Analysis
Zebra Stripes
Curvature
Draft Analysis
Undercut Detection
COSMOSXpress Analysis Wizard
COSMOSFloXpress Analysis Wizard
DFMXpress Analysis Wizard
DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 2
Mesh type: Solid mesh
*Isometric
Model
Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

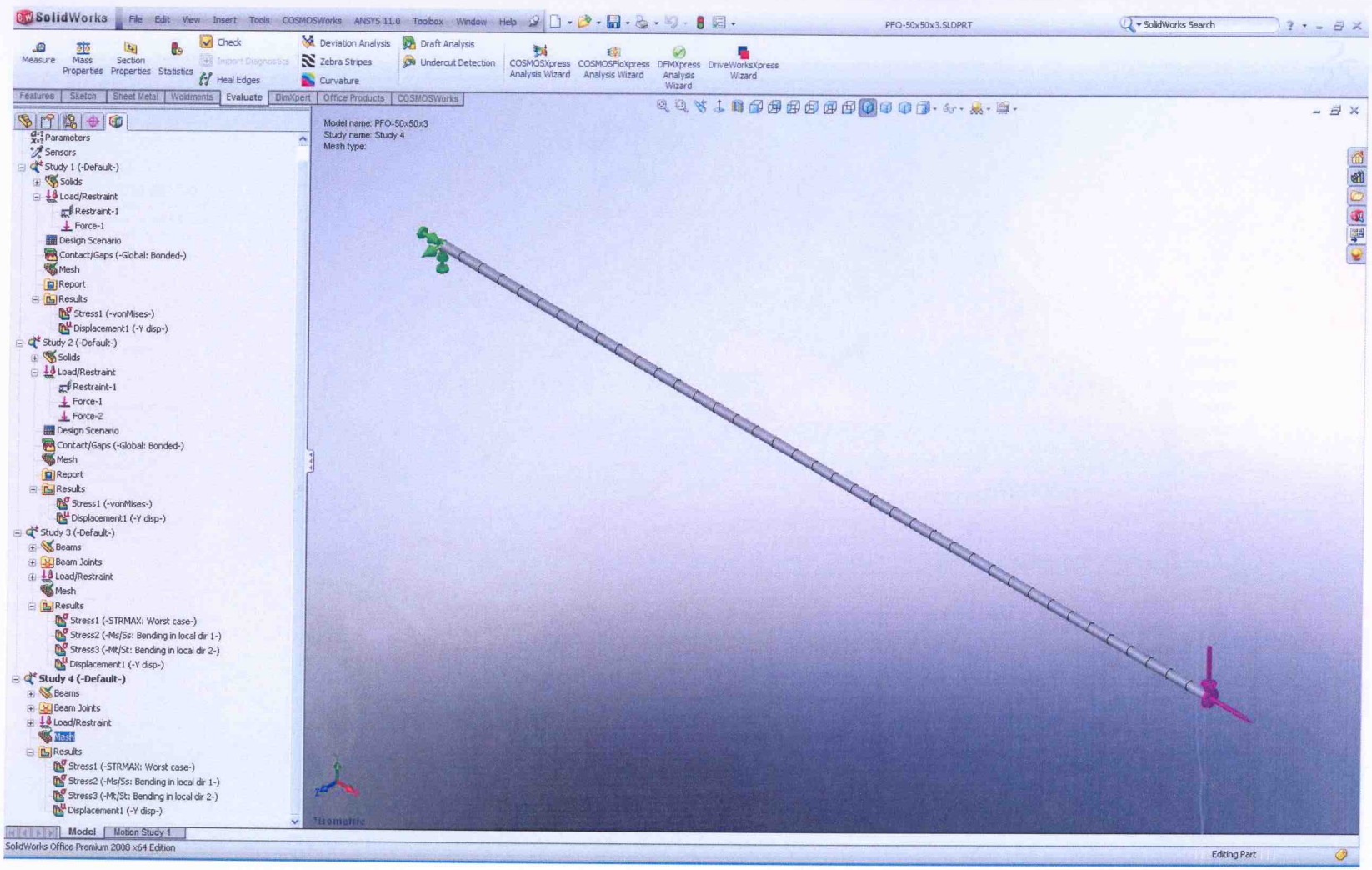

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure
Mass Properties
Section Properties
Statistics
Check
Import Diagnostics
Heal Edges
Deviation Analysis
Zebra Stripes
Curvature
Draft Analysis
Undercut Detection
COSMOSXpress Analysis Wizard
COSMOSFloXpress Analysis Wizard
DFMXpress Analysis Wizard
DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 2
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 86.9687
von Mises (N/mm^2 (MPa))
3.754e+002
3.449e+002
3.143e+002
2.837e+002
2.532e+002
2.226e+002
1.920e+002
1.615e+002
1.309e+002
1.003e+002
6.977e+001
3.920e+001
8.635e+000
Yield strength: 2.206e+002
Max: 3.754e+002
*Isometric
Model
Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

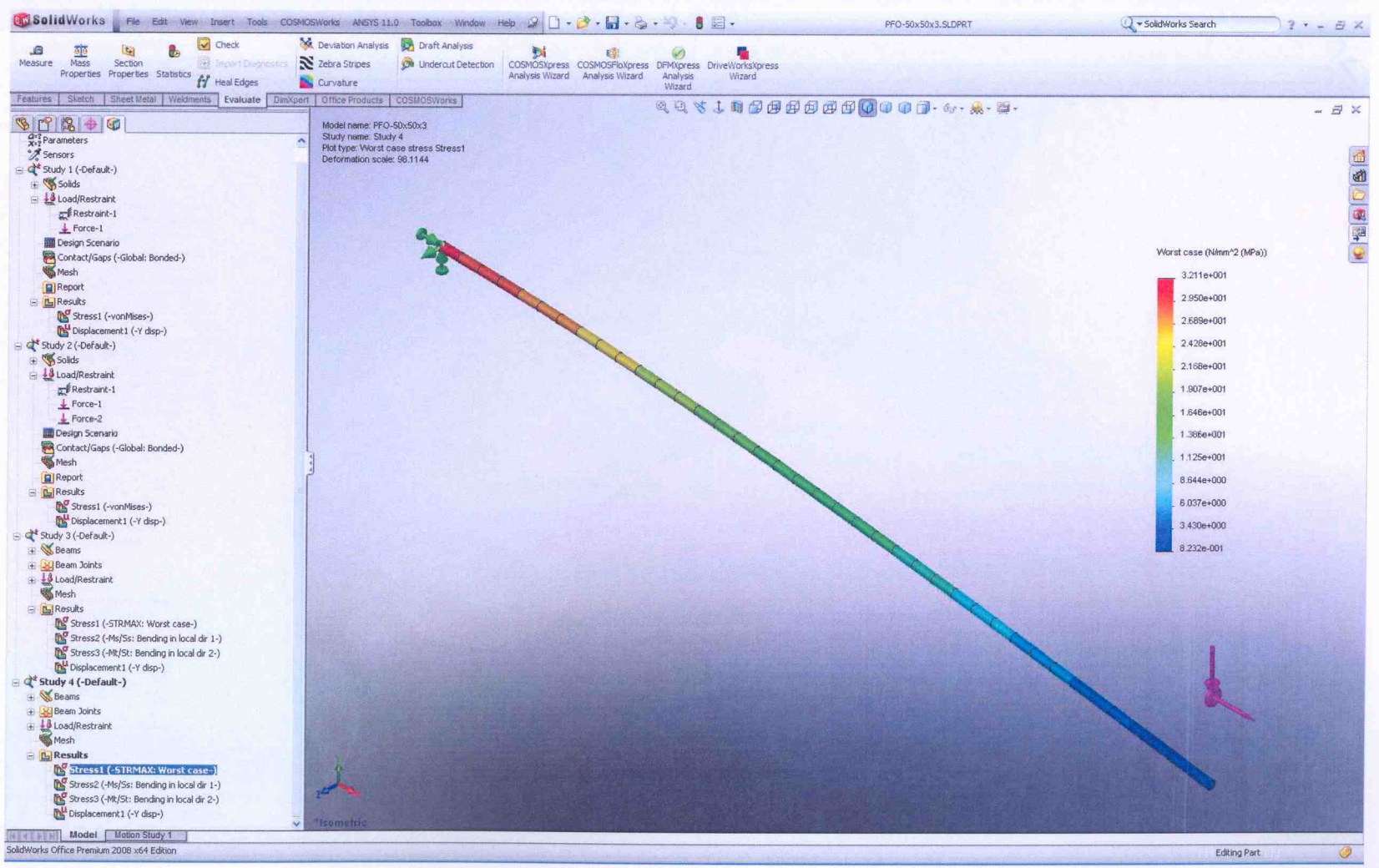

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure
Mass Properties
Section Properties
Statistics
Check
Heal Edges
Deviation Analysis
Zebra Stripes
Curvature
Draft Analysis
Undercut Detection
COSMOSXpress Analysis Wizard
COSMOSFloXpress Analysis Wizard
DFMXpress Analysis Wizard
DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 2
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 66.9687
UY (mm)
1.767e-002
-4.602e-002
-1.097e-001
-1.734e-001
-2.371e-001
-3.008e-001
-3.645e-001
-4.282e-001
-4.919e-001
-5.555e-001
-6.192e-001
-6.829e-001
-7.466e-001
Min: -7.466e-001
*Isometric
Model
Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

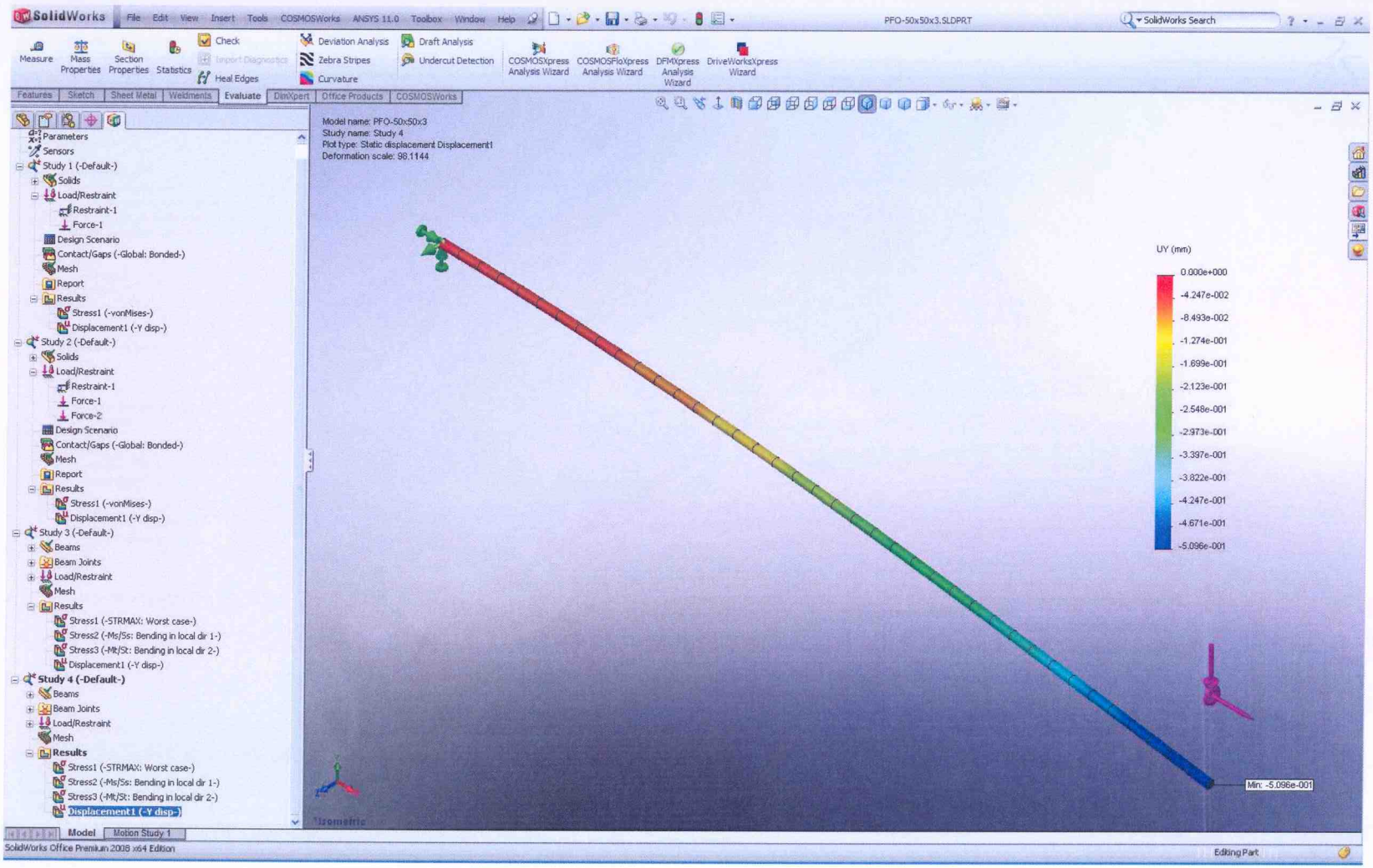

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure
Mass Properties
Section Properties
Statistics
Check
Import Diagnostics
Heal Edges
Deviation Analysis
Zebra Stripes
Curvature
Draft Analysis
Undercut Detection
COSMOSXpress Analysis Wizard
COSMOSFloXpress Analysis Wizard
DFMXpress Analysis Wizard
DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 3
Mesh type:
*Isometric
Model
Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

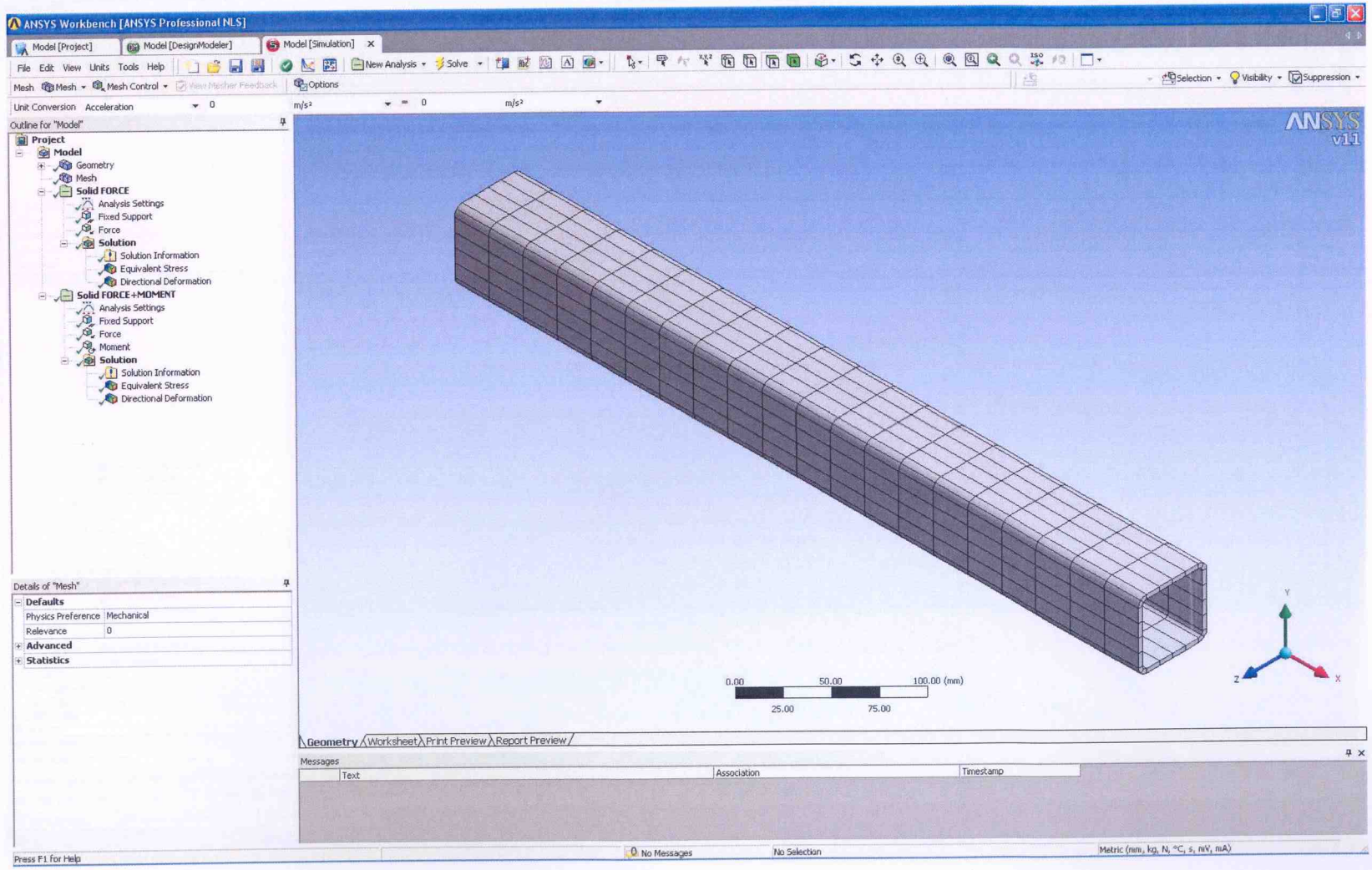

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure
Mass Properties
Section Properties
Statistics
Check
Import Diagnostics
Heal Edges
Deviation Analysis
Zebra Stripes
Curvature
Draft Analysis
Undercut Detection
COSMOSXpress Analysis Wizard
COSMOSFloXpress Analysis Wizard
DFMXpress Analysis Wizard
DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 3
Plot type: Worst case stress Stress1
Deformation scale: 98.1144
Worst case (N/mm^2 (MPa))
3.211e+001
2.950e+001
2.689e+001
2.428e+001
2.168e+001
1.907e+001
1.646e+001
1.386e+001
1.125e+001
8.644e+000
6.037e+000
3.430e+000
8.232e-001
*Isometric
Model
Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

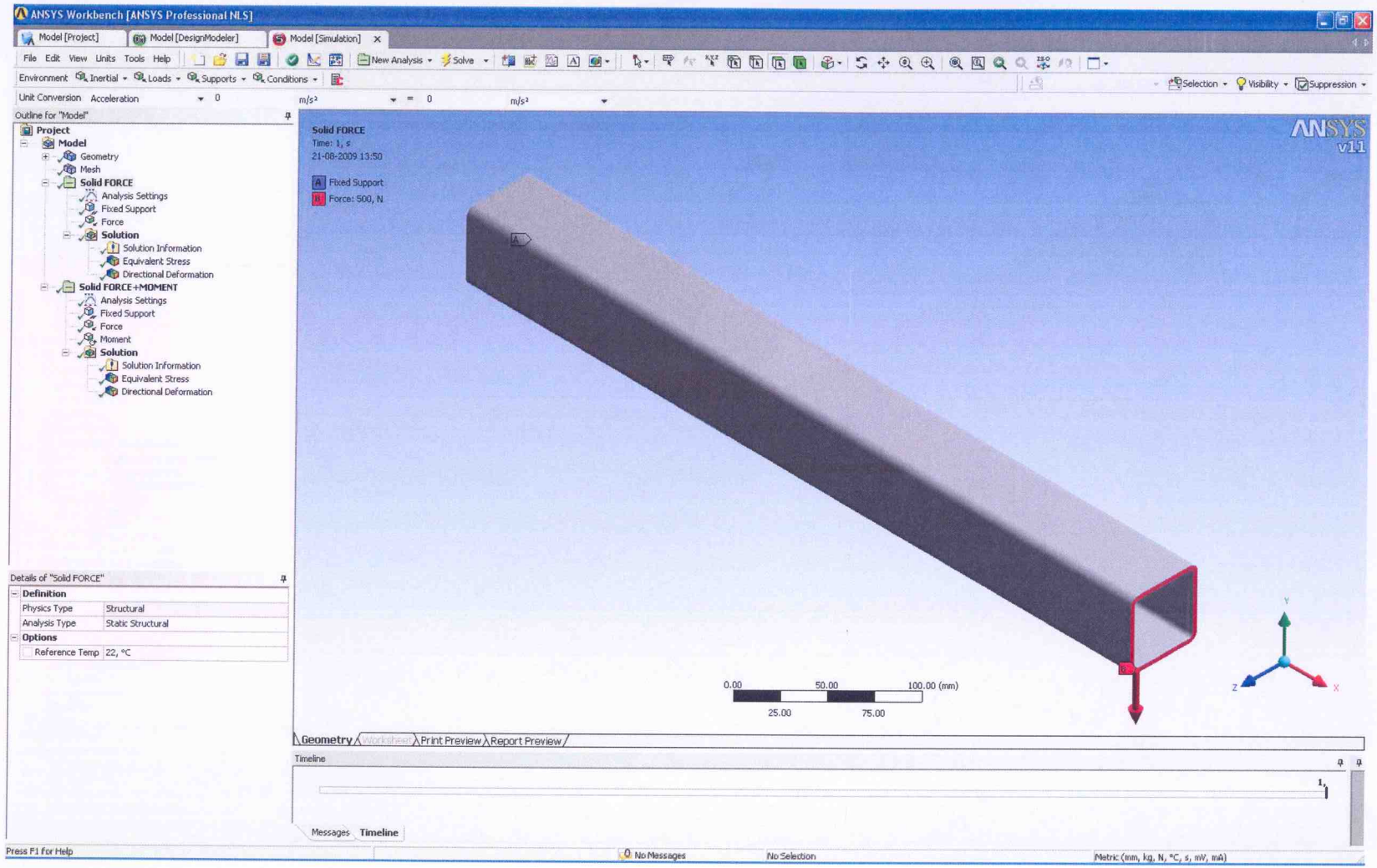

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure
Mass Properties
Section Properties
Statistics
Check
Import Diagnostics
Heal Edges
Deviation Analysis
Zebra Stripes
Curvature
Draft Analysis
Undercut Detection
COSMOSXpress Analysis Wizard
COSMOSFloXpress Analysis Wizard
DFMXpress Analysis Wizard
DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 3
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 98.1144
UY (mm)
0.000e+000
-4.247e-002
-8.493e-002
-1.274e-001
-1.699e-001
-2.123e-001
-2.548e-001
-2.973e-001
-3.397e-001
-3.822e-001
-4.247e-001
-4.671e-001
-5.096e-001
Min: -5.096e-001
*Isometric
Model
Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

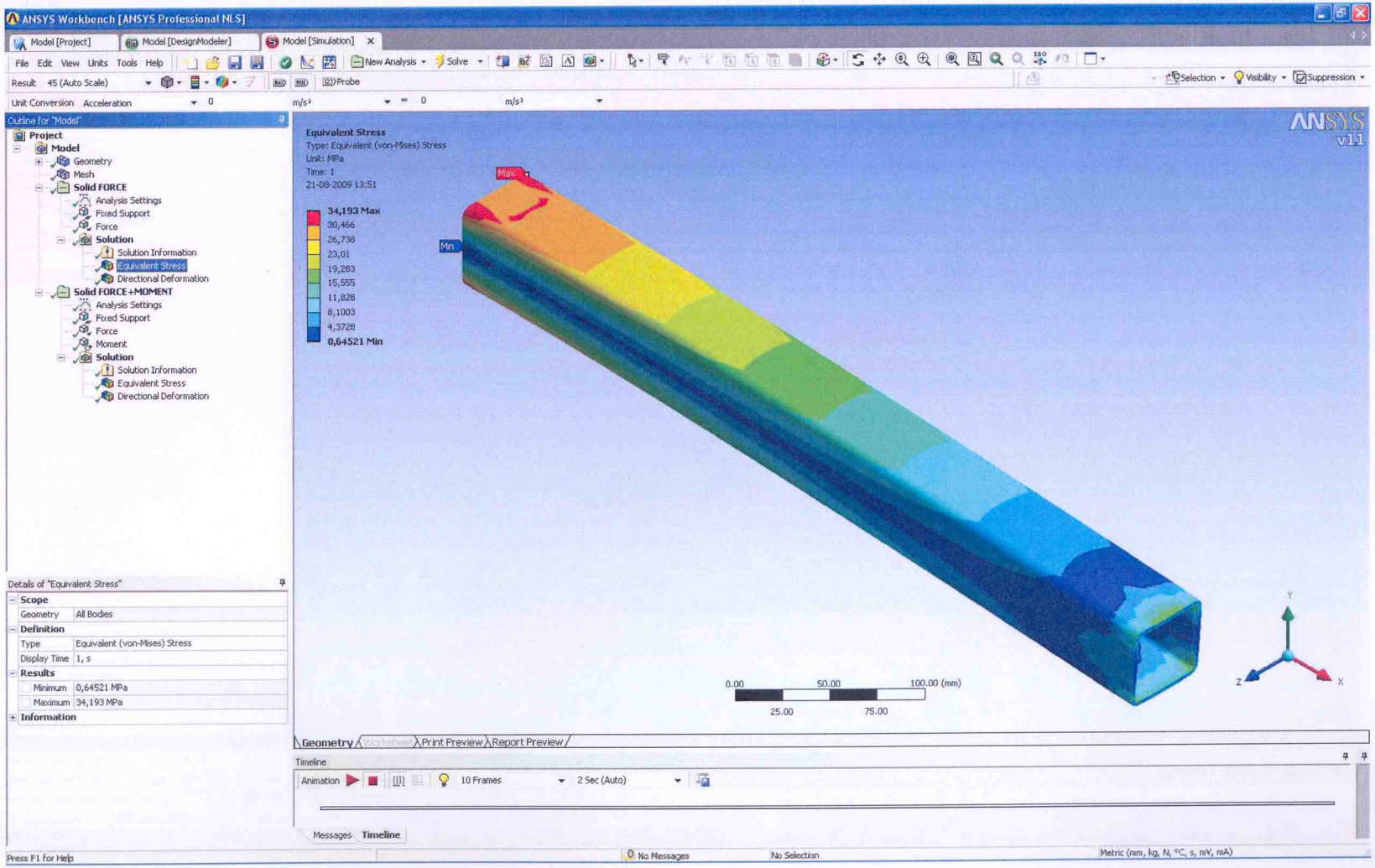

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure
Mass Properties
Section Properties
Statistics
Check
Import Diagnostics
Heal Edges
Deviation Analysis
Zebra Stripes
Curvature
Draft Analysis
Undercut Detection
COSMOSXpress Analysis Wizard
COSMOSFloXpress Analysis Wizard
DFMXpress Analysis Wizard
DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 4
Mesh type:
*Isometric
Model
Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

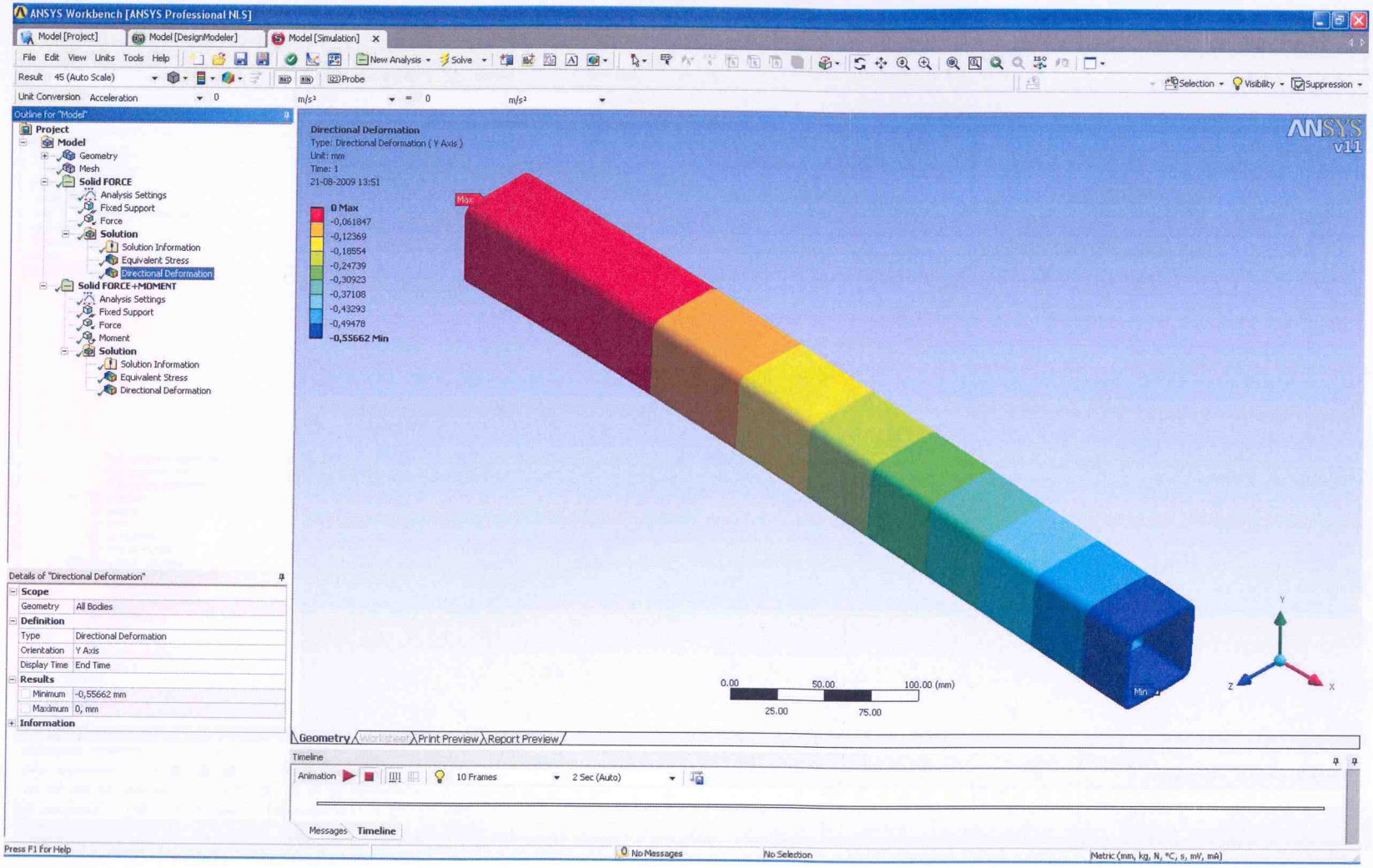

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure
Mass Properties
Section Properties
Statistics
Check
Import Diagnostics
Heal Edges
Deviation Analysis
Zebra Stripes
Curvature
Draft Analysis
Undercut Detection
COSMOSXpress Analysis Wizard
COSMOSFloXpress Analysis Wizard
DFMXpress Analysis Wizard
DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 4
Plot type: Worst case stress Stress1
Deformation scale: 98.1144
Worst case (N/mm^2 (MPa))
3.211e+001
2.950e+001
2.689e+001
2.428e+001
2.168e+001
1.907e+001
1.646e+001
1.386e+001
1.125e+001
8.644e+000
6.037e+000
3.430e+000
8.232e-001
*Isometric
Model
Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

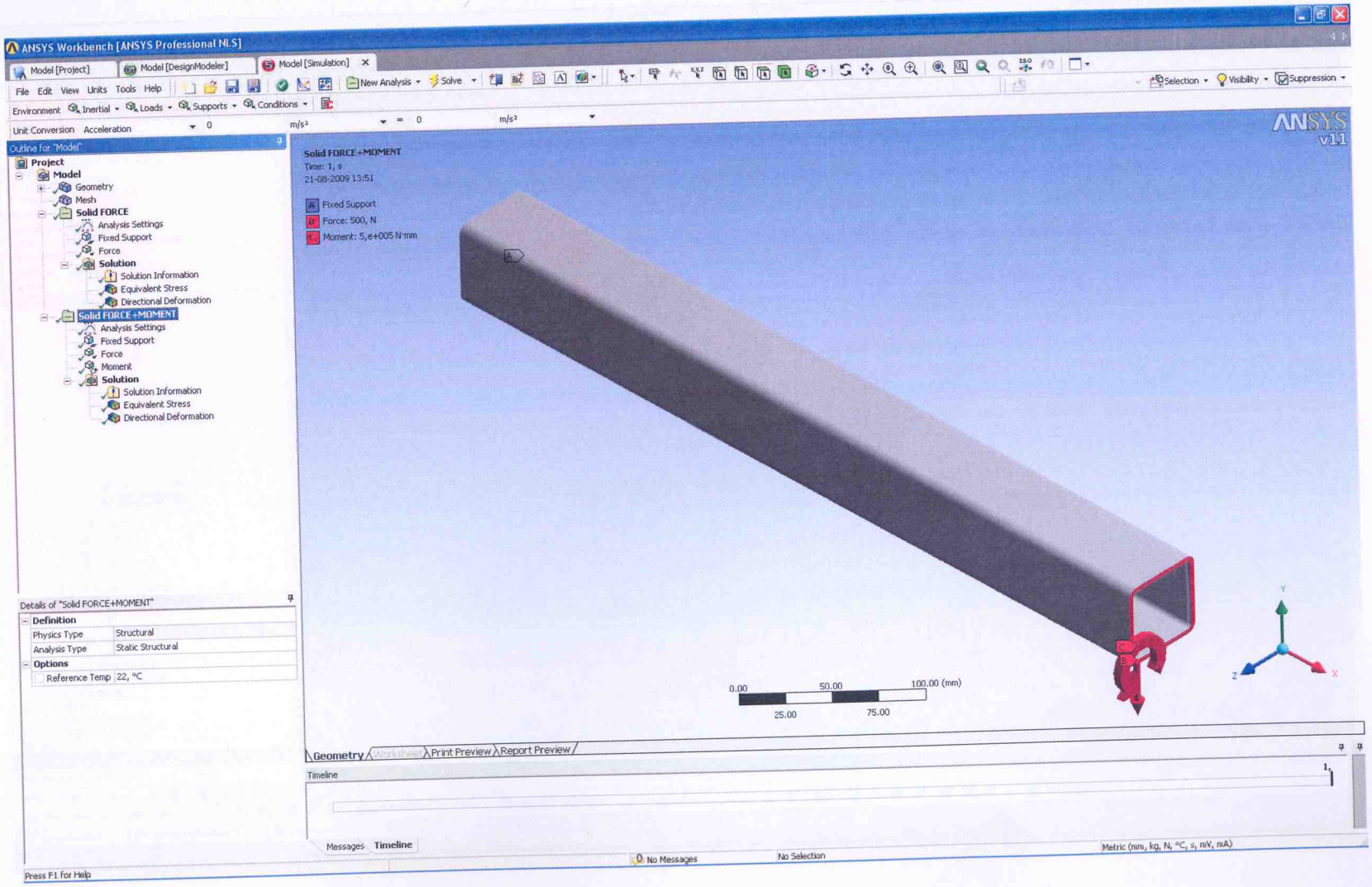

SolidWorks
File Edit View Insert Tools COSMOSWorks ANSYS 11.0 Toolbox Window Help
PFO-50x50x3.SLDPRT
SolidWorks Search
Measure
Mass Properties
Section Properties
Statistics
Check
Import Diagnostics
Heal Edges
Deviation Analysis
Zebra Stripes
Curvature
Draft Analysis
Undercut Detection
COSMOSXpress Analysis Wizard
COSMOSFloXpress Analysis Wizard
DFMXpress Analysis Wizard
DriveWorksXpress Wizard
Features Sketch Sheet Metal Weldments Evaluate DimXpert Office Products COSMOSWorks
Parameters
Sensors
Study 1 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 2 (-Default-)
Solids
Load/Restraint
Restraint-1
Force-1
Force-2
Design Scenario
Contact/Gaps (-Global: Bonded-)
Mesh
Report
Results
Stress1 (-vonMises-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 3 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Study 4 (-Default-)
Beams
Beam Joints
Load/Restraint
Mesh
Results
Stress1 (-STRMAX: Worst case-)
Stress2 (-Ms/Ss: Bending in local dir 1-)
Stress3 (-Mt/St: Bending in local dir 2-)
Displacement1 (-Y disp-)
Model name: PFO-50x50x3
Study name: Study 4
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 98.1144
UY (mm)
0.000e+000
-4.247e-002
-8.493e-002
-1.274e-001
-1.699e-001
-2.123e-001
-2.548e-001
-2.973e-001
-3.397e-001
-3.822e-001
-4.247e-001
-4.671e-001
-5.096e-001
Min: -5.096e-001
*Isometric
Model Motion Study 1
SolidWorks Office Premium 2008 x64 Edition
Editing Part

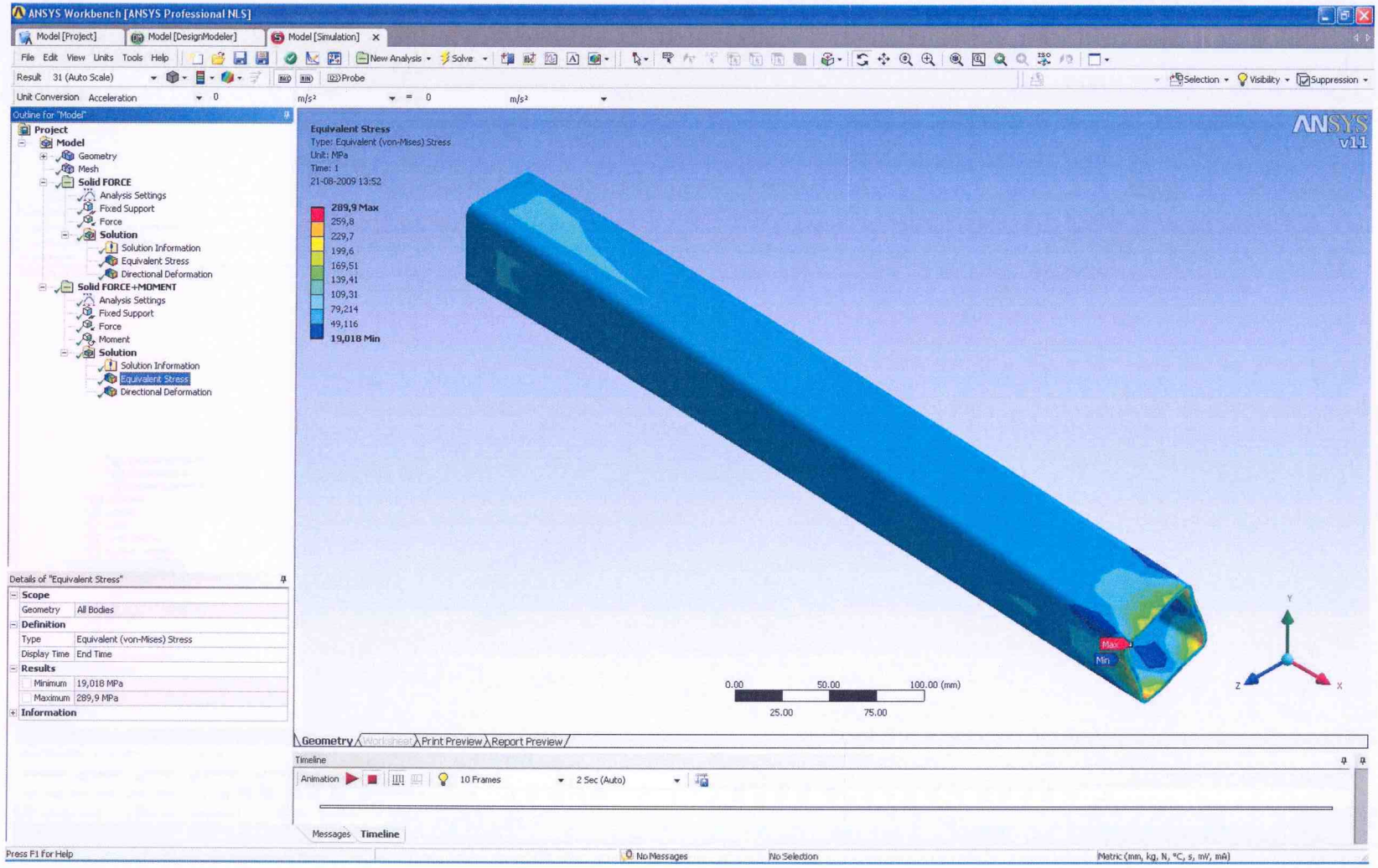

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model [Project]
Model [DesignModeler]
Model [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Mesh Mesh Control
Options
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model"
Project
Model
Geometry
Mesh
Solid FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Solid FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Details of "Mesh"
Defaults
Physics Preference Mechanical
Relevance 0
Advanced
Statistics
ANSYS
v11
0.00 50.00 100.00 (mm)
25.00 75.00
Y
Z
X
Geometry Worksheet Print Preview Report Preview
Messages
Text
Association
Timestamp
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

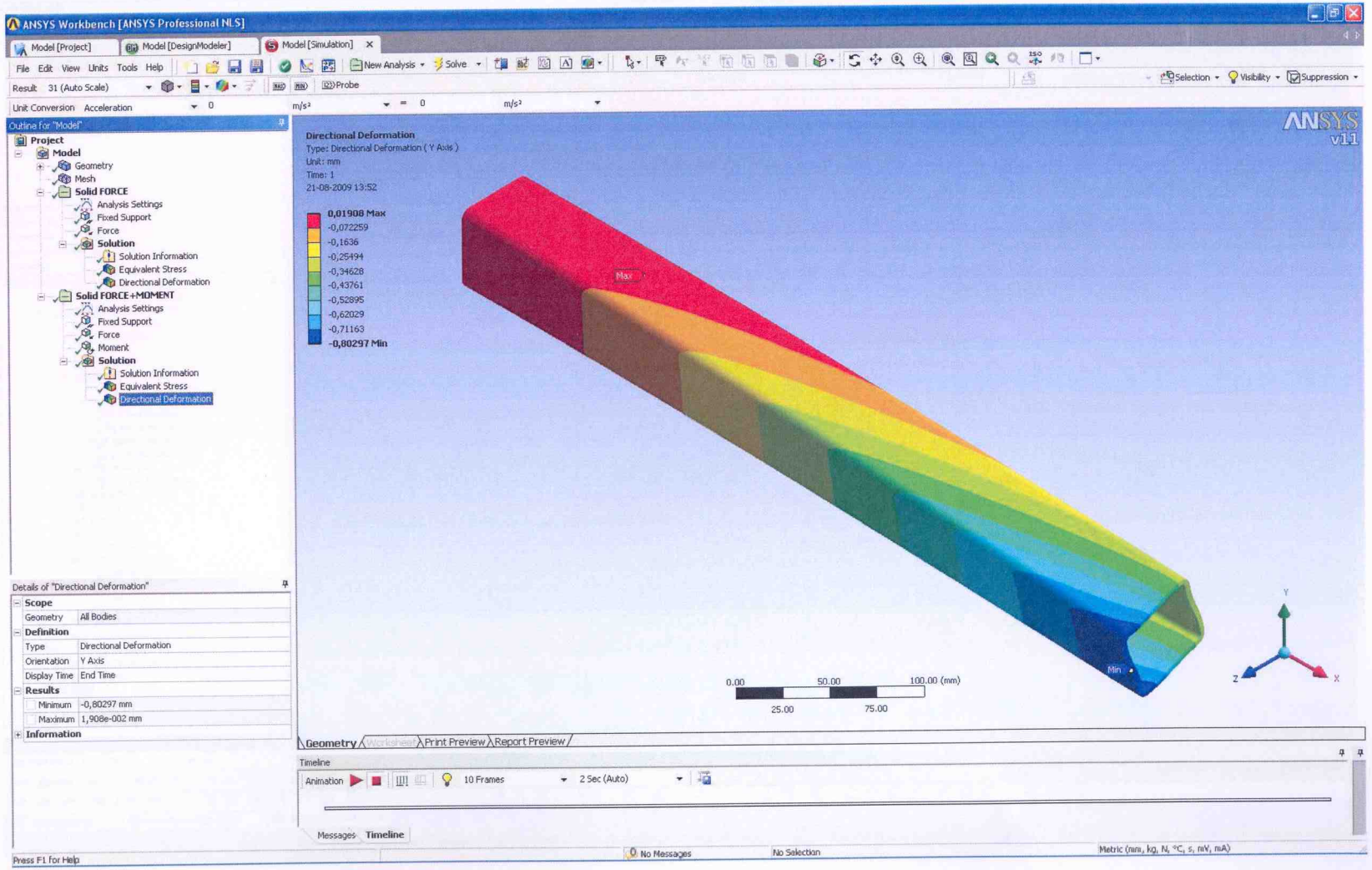

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model [Project]
Model [DesignModeler]
Model [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Environment
Inertial
Loads
Supports
Conditions
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model"
Project
Model
Geometry
Mesh
Solid FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Solid FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Details of "Solid FORCE"
Definition
Physics Type Structural
Analysis Type Static Structural
Options
Reference Temp 22, °C
Solid FORCE
Time: 1, s
21-08-2009 13:50
A Fixed Support
B Force: 500, N
ANSYS
v11
0.00
50.00
100.00 (mm)
25.00
75.00
Y
Z
X
Geometry
Worksheet
Print Preview
Report Preview
Timeline
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

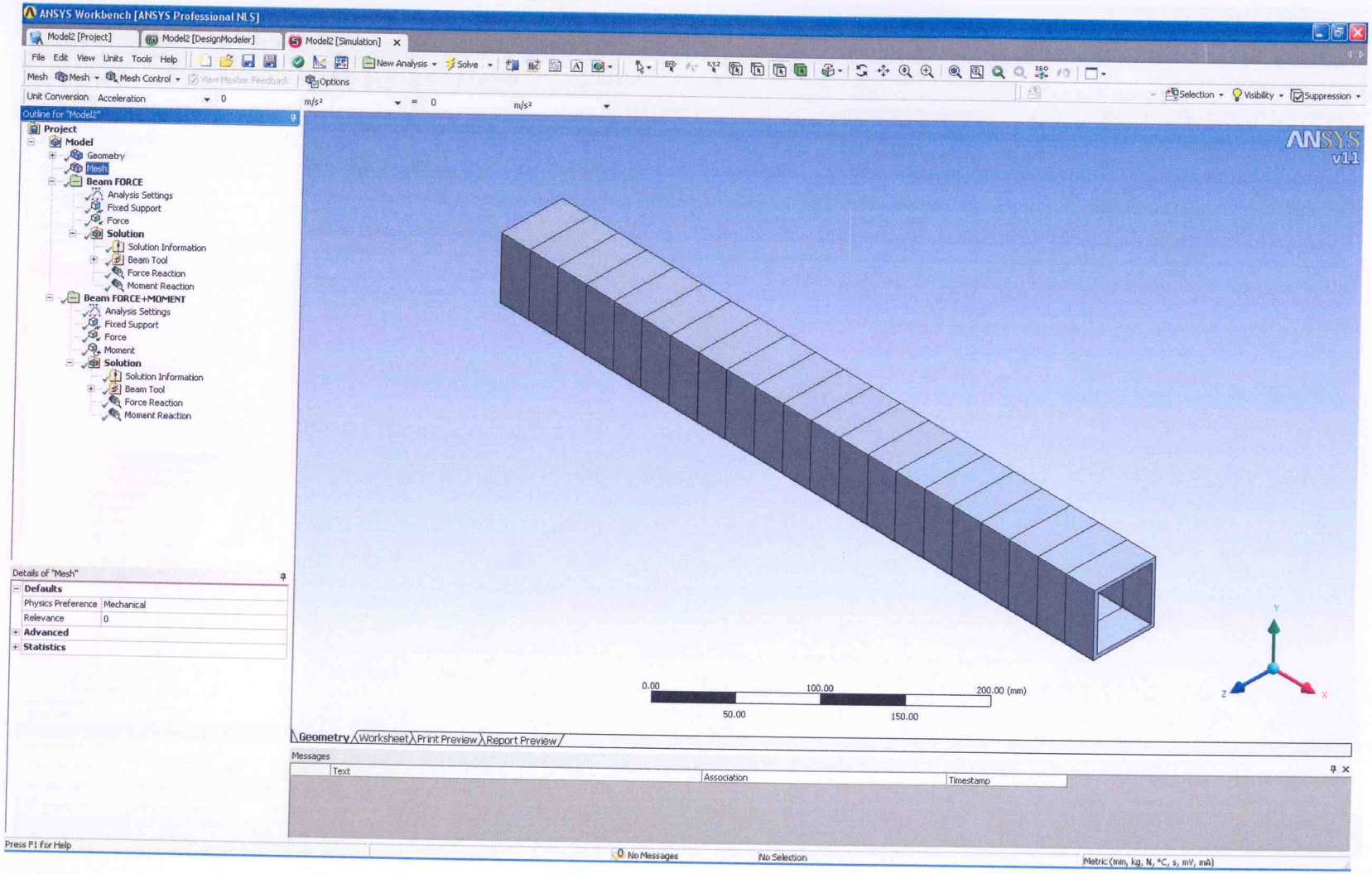

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model [Project]
Model [DesignModeler]
Model [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Result 45 (Auto Scale)
Probe
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model"
Project
Model
Geometry
Mesh
Solid FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Solid FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Details of "Equivalent Stress"
Scope
Geometry All Bodies
Definition
Type Equivalent (von-Mises) Stress
Display Time 1, s
Results
Minimum 0,64521 MPa
Maximum 34,193 MPa
Information
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
21-08-2009 13:51
34,193 Max
30,466
26,738
23,01
19,283
15,555
11,828
8,1003
4,3728
0,64521 Min
Max
Min
ANSYS
v11
0.00
50.00
100.00 (mm)
25.00
75.00
Y
Z
X
Geometry
Worksheet
Print Preview
Report Preview
Timeline
Animation
10 Frames
2 Sec (Auto)
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

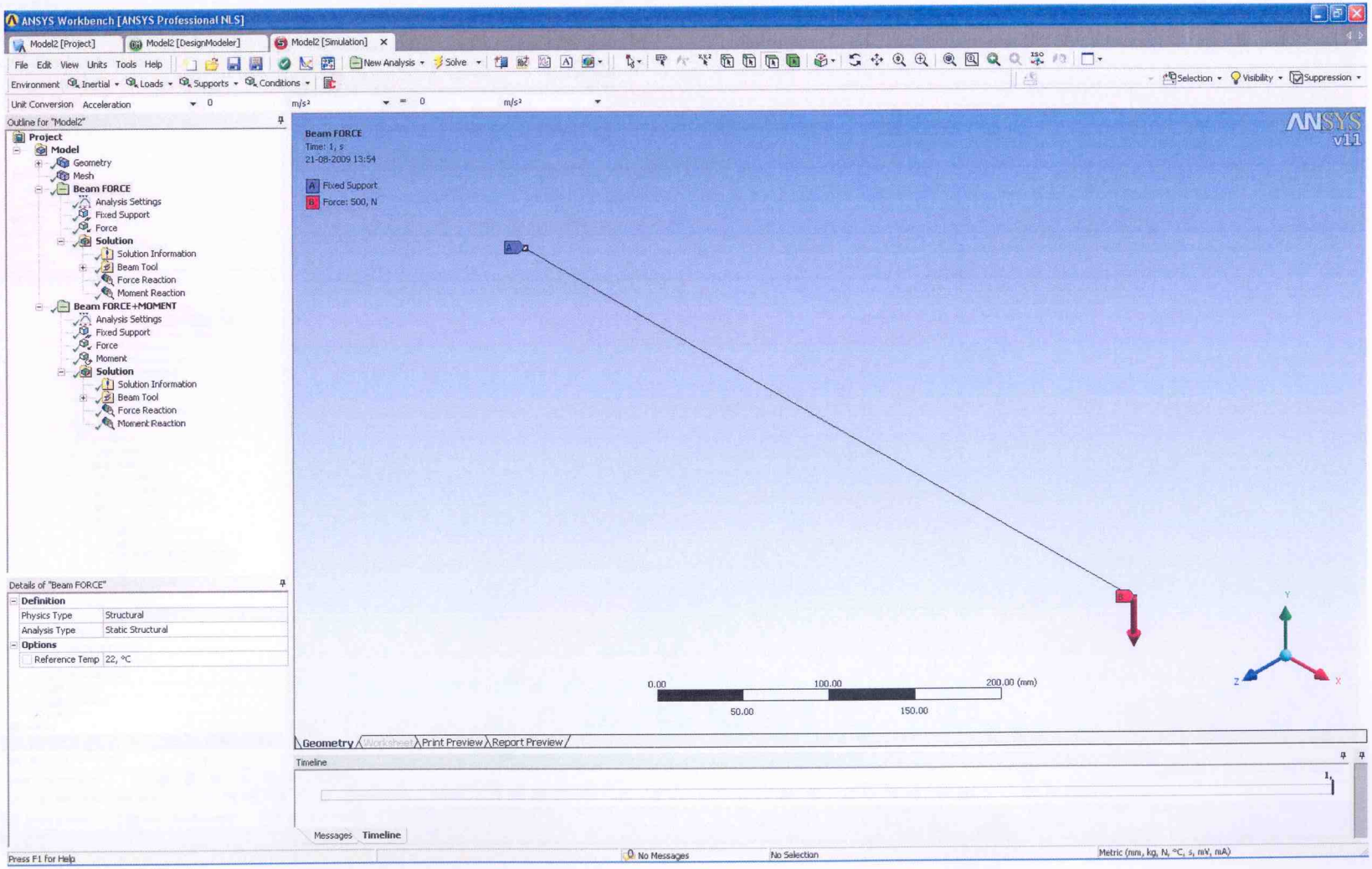

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model [Project]
Model [DesignModeler]
Model [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Result 45 (Auto Scale)
Probe
Unit Conversion Acceleration
Selection
Visibility
Suppression
Outline for "Model"
Project
Model
Geometry
Mesh
Solid FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Solid FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Directional Deformation
Type: Directional Deformation (Y Axis)
Unit: mm
Time: 1
21-08-2009 13:51
0 Max
-0,061847
-0,12369
-0,18554
-0,24739
-0,30923
-0,37108
-0,43293
-0,49478
-0,55662 Min
ANSYS
v11
0.00
50.00
100.00 (mm)
25.00
75.00
Details of "Directional Deformation"
Scope
Geometry All Bodies
Definition
Type Directional Deformation
Orientation Y Axis
Display Time End Time
Results
Minimum -0,55662 mm
Maximum 0, mm
Information
Geometry
Print Preview
Report Preview
Timeline
Animation
10 Frames
2 Sec (Auto)
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

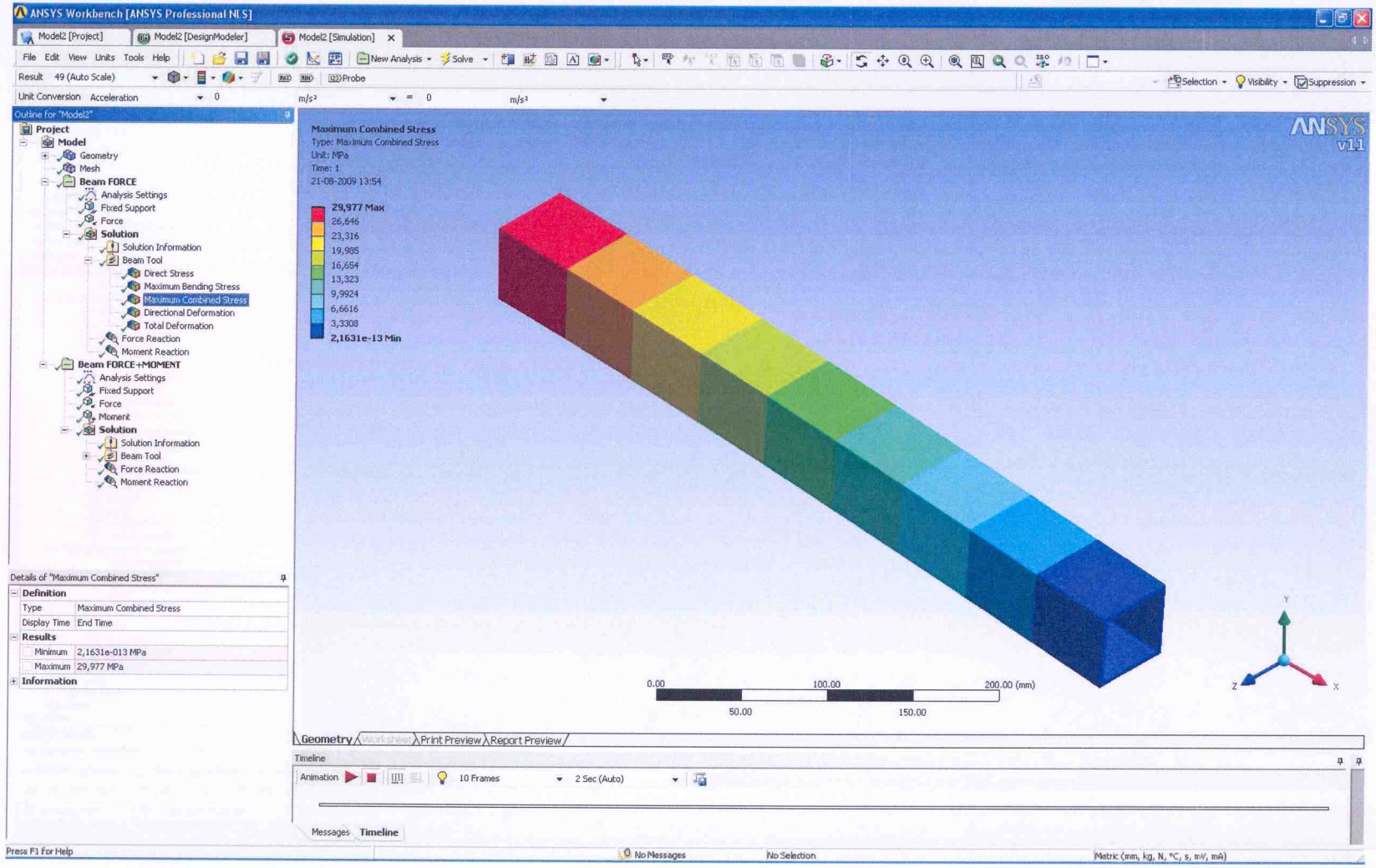

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model [Project]
Model [DesignModeler]
Model [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Environment
Inertial
Loads
Supports
Conditions
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model"
Project
Model
Geometry
Mesh
Solid FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Solid FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Details of "Solid FORCE+MOMENT"
Definition
Physics Type Structural
Analysis Type Static Structural
Options
Reference Temp 22, °C
Solid FORCE+MOMENT
Time: 1, s
21-08-2009 13:51
Fixed Support
Force: 500, N
Moment: 5,e+005 N·mm
ANSYS
v11
0.00
50.00
100.00 (mm)
25.00
75.00
Geometry
Print Preview
Report Preview
Timeline
Messages
Timeline
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)
Press F1 for Help

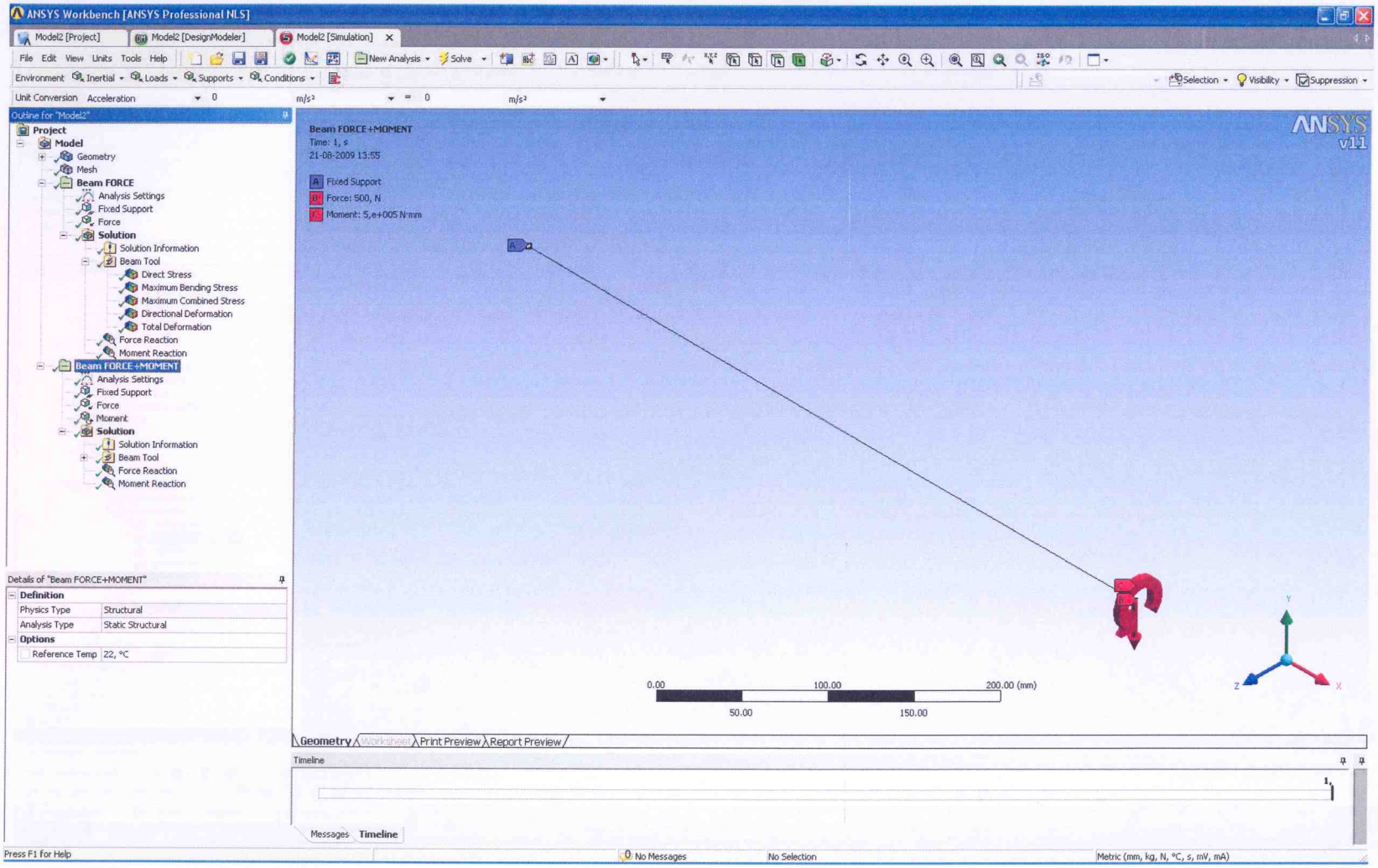

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model [Project]
Model [DesignModeler]
Model [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Result 31 (Auto Scale)
Probe
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model"
Project
Model
Geometry
Mesh
Solid FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Solid FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Details of "Equivalent Stress"
Scope
Geometry All Bodies
Definition
Type Equivalent (von-Mises) Stress
Display Time End Time
Results
Minimum 19,018 MPa
Maximum 289,9 MPa
Information
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
21-08-2009 13:52
289,9 Max
259,8
229,7
199,6
169,51
139,41
109,31
79,214
49,116
19,018 Min
ANSYS
v11
Max
Min
0.00
50.00
100.00 (mm)
25.00
75.00
Y
Z
X
Geometry
Print Preview
Report Preview
Timeline
Animation
10 Frames
2 Sec (Auto)
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

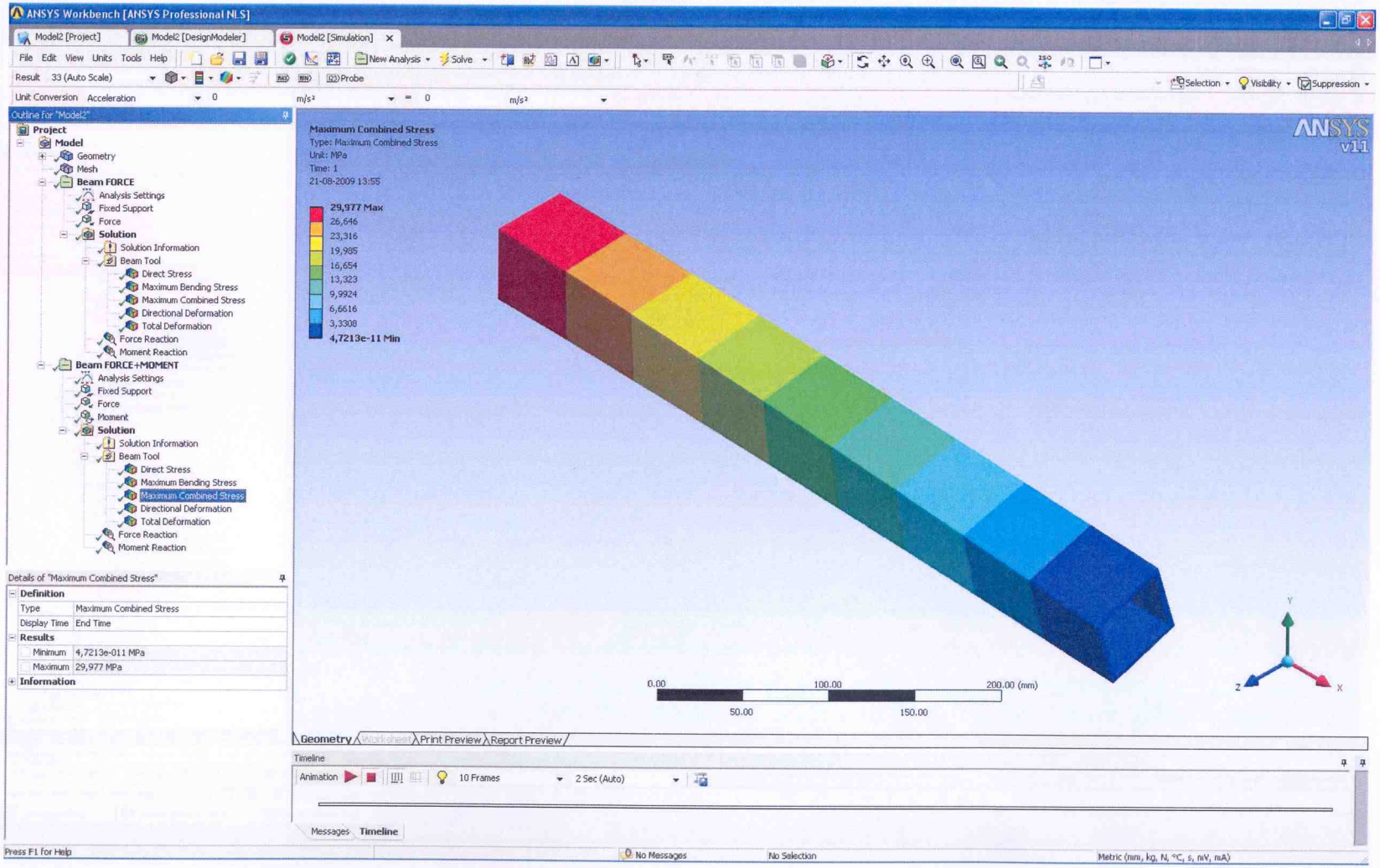

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model [Project]
Model [DesignModeler]
Model [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Result 31 (Auto Scale)
Probe
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model"
Project
Model
Geometry
Mesh
Solid FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Solid FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Equivalent Stress
Directional Deformation
Details of "Directional Deformation"
Scope
Geometry All Bodies
Definition
Type Directional Deformation
Orientation Y Axis
Display Time End Time
Results
Minimum -0,80297 mm
Maximum 1,908e-002 mm
Information
Directional Deformation
Type: Directional Deformation (Y Axis)
Unit: mm
Time: 1
21-08-2009 13:52
0,01908 Max
-0,072259
-0,1636
-0,25494
-0,34628
-0,43761
-0,52895
-0,62029
-0,71163
-0,80297 Min
Max
Min
ANSYS
v11
0.00
50.00
100.00 (mm)
25.00
75.00
Y
Z
X
Geometry
Print Preview
Report Preview
Timeline
Animation
10 Frames
2 Sec (Auto)
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

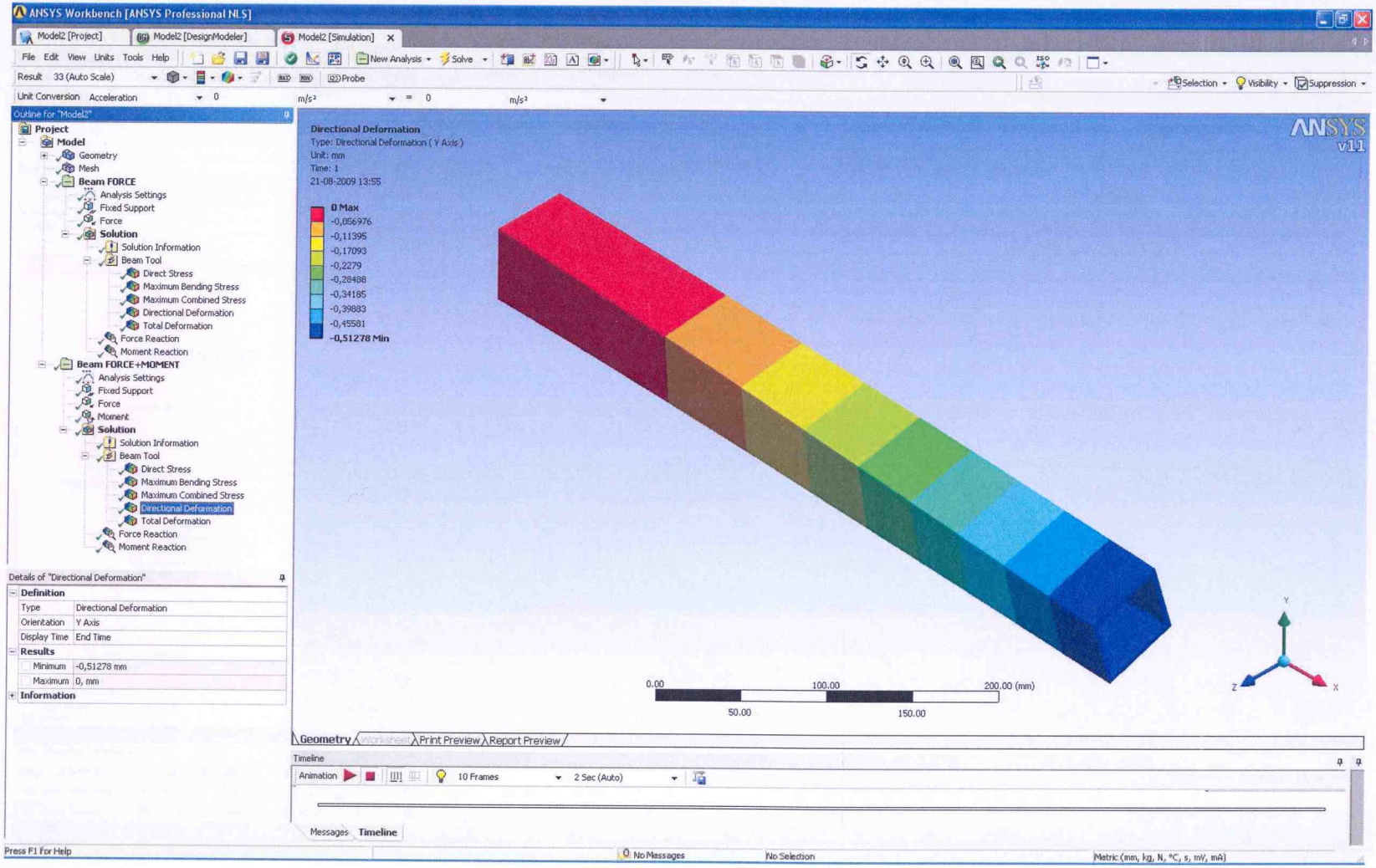

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model2 [Project]
Model2 [DesignModeler]
Model2 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Mesh
Mesh Control
Options
Unit Conversion Acceleration
Selection
Visibility
Suppression
Outline for "Model2"
Project
Model
Geometry
Mesh
Beam FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Beam FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "Mesh"
Defaults
Physics Preference Mechanical
Relevance 0
Advanced
Statistics
ANSYS
v11
0.00
100.00
200.00 (mm)
50.00
150.00
Y
Z
X
Geometry
Worksheet
Print Preview
Report Preview
Messages
Text
Association
Timestamp
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

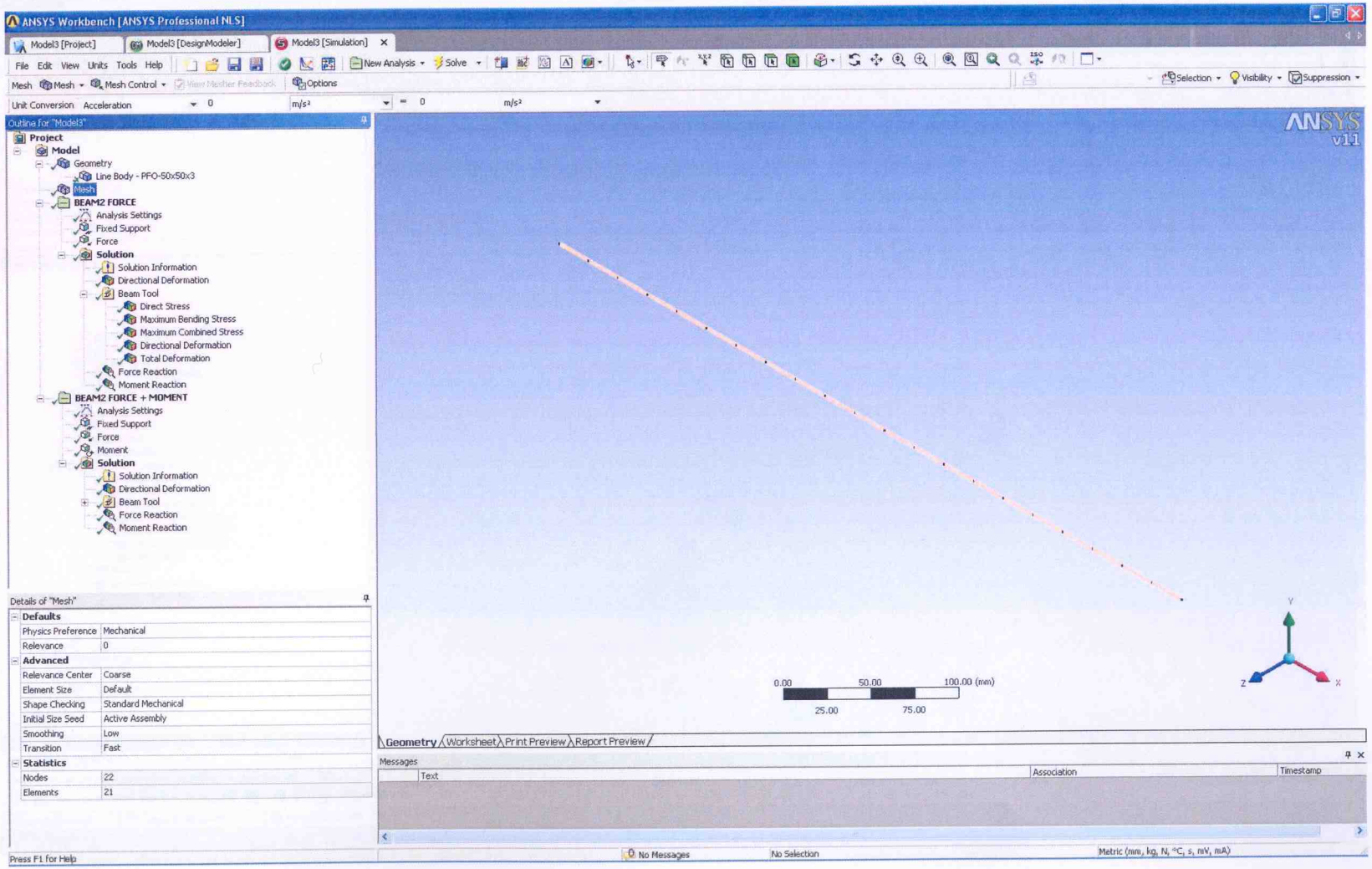

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model2 [Project]
Model2 [DesignModeler]
Model2 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Environment
Inertial
Loads
Supports
Conditions
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model2"
Project
Model
Geometry
Mesh
Beam FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Beam FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "Beam FORCE"
Definition
Physics Type Structural
Analysis Type Static Structural
Options
Reference Temp 22, °C
Beam FORCE
Time: 1, s
21-08-2009 13:54
Fixed Support
Force: 500, N
ANSYS
v11
0.00
100.00
200.00 (mm)
50.00
150.00
Geometry
Worksheet
Print Preview
Report Preview
Timeline
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

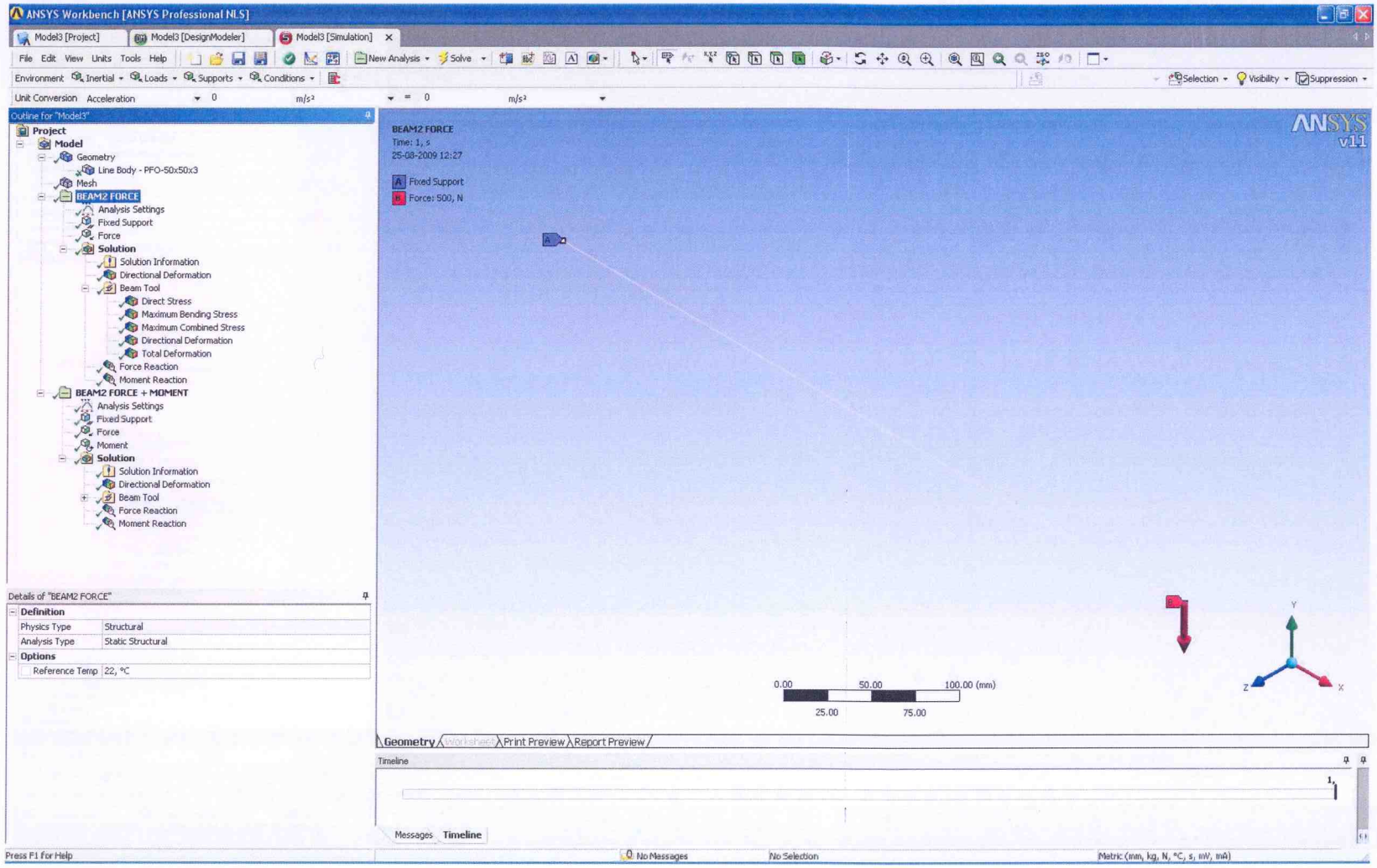

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model2 [Project]
Model2 [DesignModeler]
Model2 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Result 49 (Auto Scale)
Probe
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model2"
Project
Model
Geometry
Mesh
Beam FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
Beam FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Maximum Combined Stress
Type: Maximum Combined Stress
Unit: MPa
Time: 1
21-08-2009 13:54
29,977 Max
26,646
23,316
19,985
16,654
13,323
9,9924
6,6616
3,3308
2,1631e-13 Min
ANSYS
v11
0.00
50.00
100.00
150.00
200.00 (mm)
Y
Z
X
Details of "Maximum Combined Stress"
Definition
Type Maximum Combined Stress
Display Time End Time
Results
Minimum 2,1631e-013 MPa
Maximum 29,977 MPa
Information
Geometry
Print Preview
Report Preview
Timeline
Animation
10 Frames
2 Sec (Auto)
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

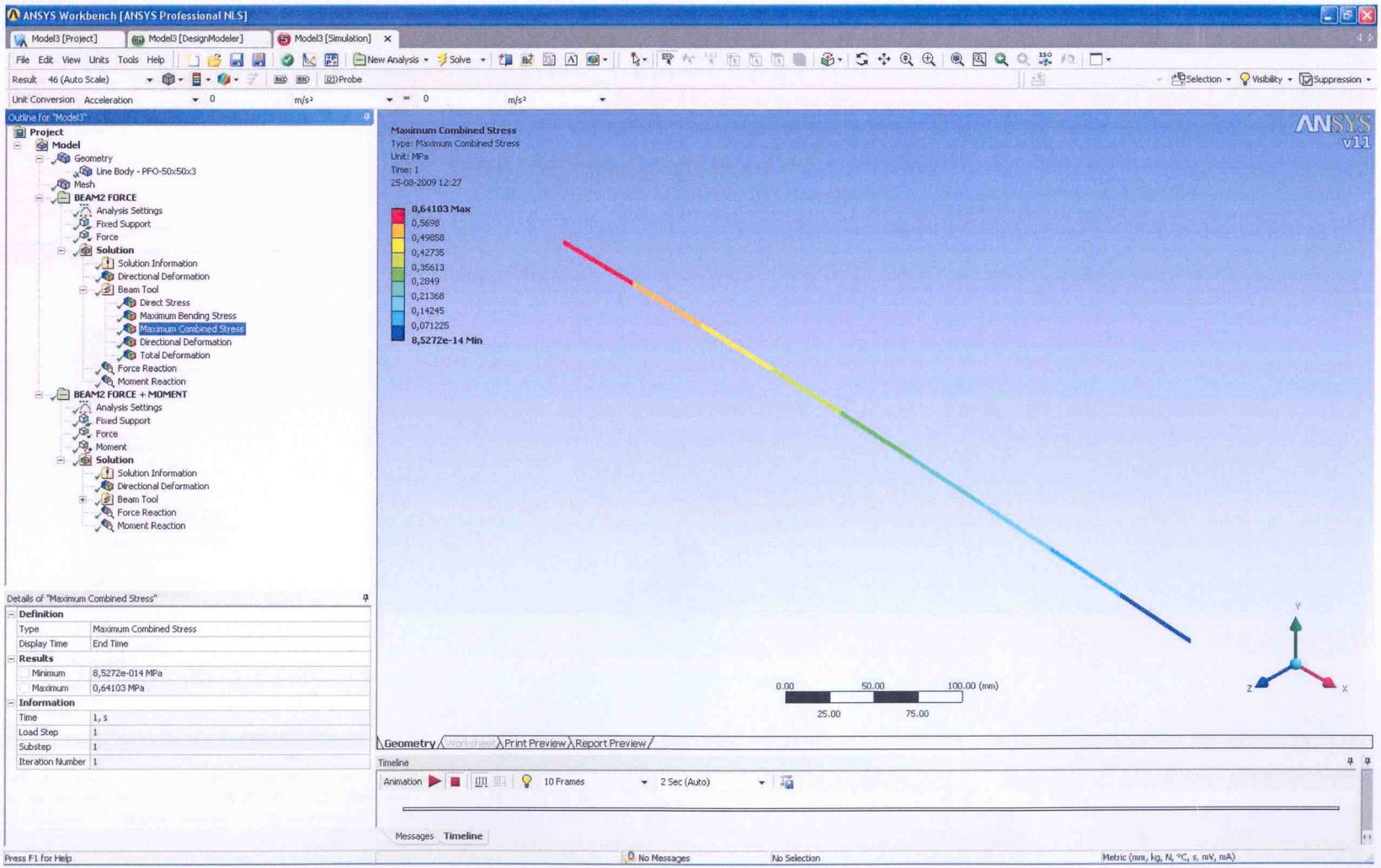

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model2 [Project]
Model2 [DesignModeler]
Model2 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Environment
Inertial
Loads
Supports
Conditions
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model2"
Project
Model
Geometry
Mesh
Beam FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
Beam FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "Beam FORCE+MOMENT"
Definition
Physics Type Structural
Analysis Type Static Structural
Options
Reference Temp 22, °C
Beam FORCE+MOMENT
Time: 1, s
21-08-2009 13:55
Fixed Support
Force: 500, N
Moment: 5,e+005 N·mm
ANSYS
v11
0.00
100.00
200.00 (mm)
50.00
150.00
Geometry
Print Preview
Report Preview
Timeline
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

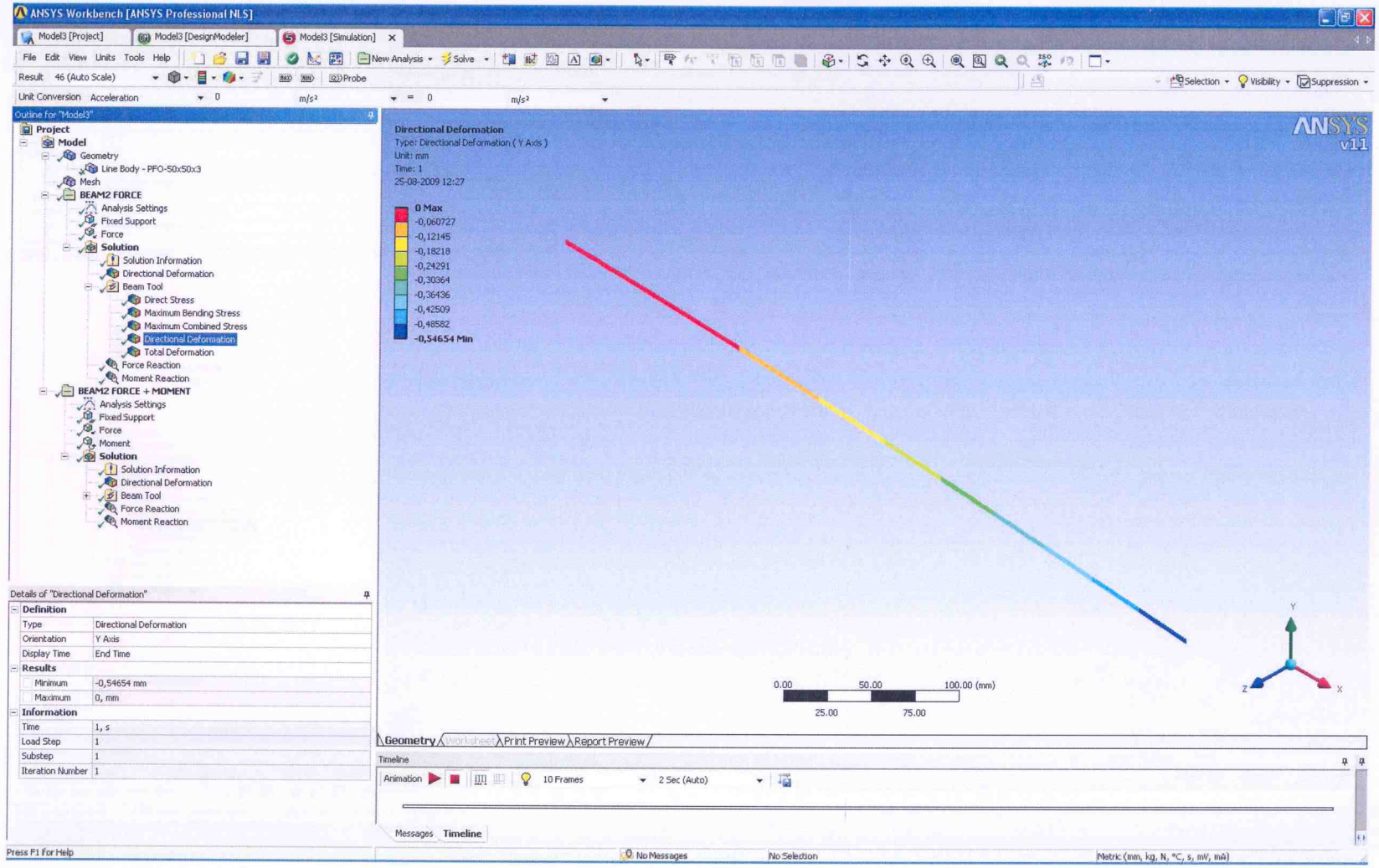

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model2 [Project]
Model2 [DesignModeler]
Model2 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Probe
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model2"
Project
Model
Geometry
Mesh
Beam FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
Beam FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "Maximum Combined Stress"
Definition
Type Maximum Combined Stress
Display Time End Time
Results
Minimum 4,7213e-011 MPa
Maximum 29,977 MPa
Information
Maximum Combined Stress
Type: Maximum Combined Stress
Unit: MPa
Time: 1
21-08-2009 13:55
29,977 Max
26,646
23,316
19,985
16,654
13,323
9,9924
6,6616
3,3308
4,7213e-11 Min
ANSYS
v11
0.00
100.00
200.00 (mm)
50.00
150.00
Geometry
Print Preview
Report Preview
Timeline
Animation
10 Frames
2 Sec (Auto)
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, nV, mA)

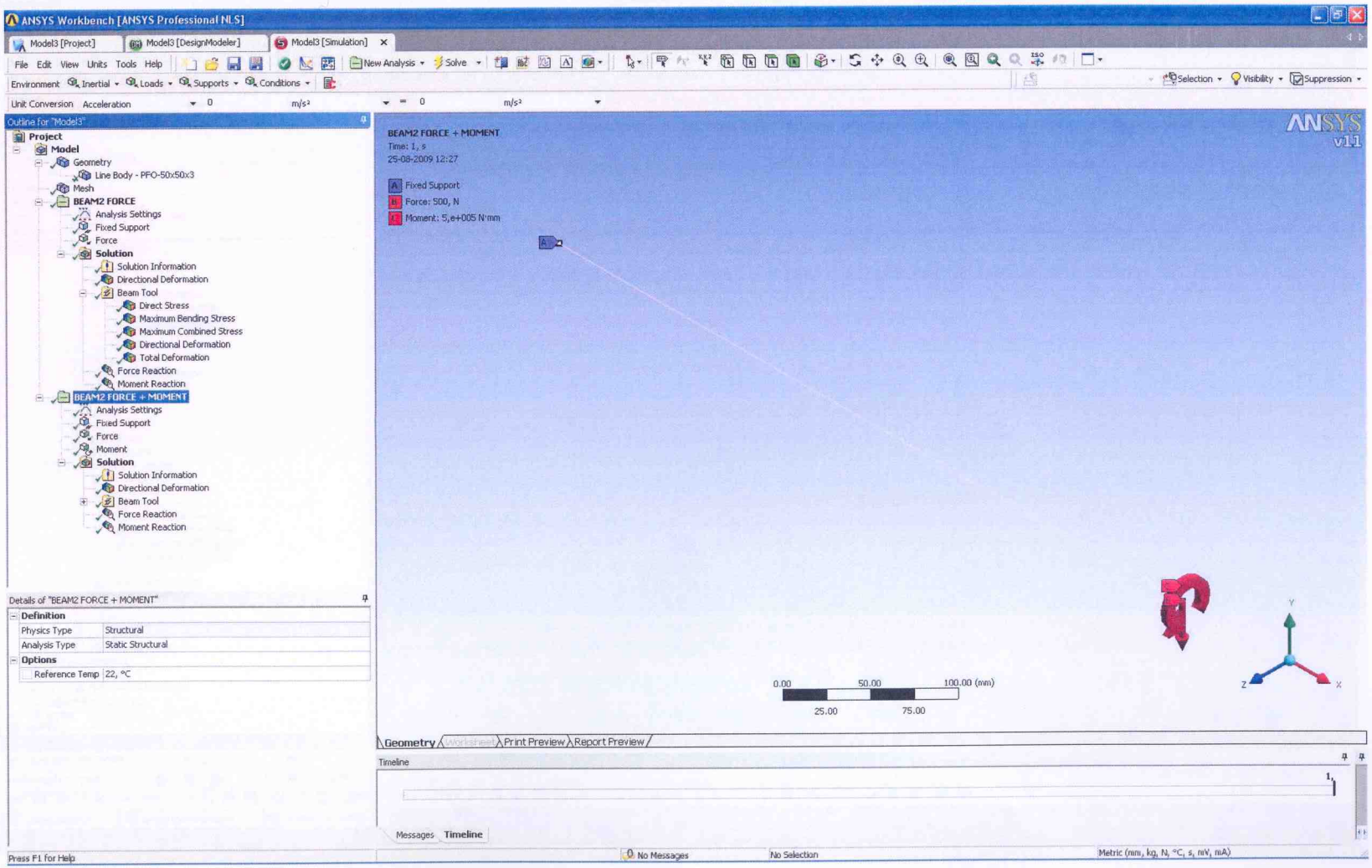

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model2 [Project]
Model2 [DesignModeler]
Model2 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Result 33 (Auto Scale)
Probe
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model2"
Project
Model
Geometry
Mesh
Beam FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
Beam FORCE+MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "Directional Deformation"
Definition
Type Directional Deformation
Orientation Y Axis
Display Time End Time
Results
Minimum -0,51278 mm
Maximum 0, mm
Information
Directional Deformation
Type: Directional Deformation (Y Axis)
Unit: mm
Time: 1
21-08-2009 13:55
0 Max
-0,056976
-0,11395
-0,17093
-0,2279
-0,28488
-0,34185
-0,39883
-0,45581
-0,51278 Min
ANSYS
v11
0.00
100.00
200.00 (mm)
50.00
150.00
Geometry
Print Preview
Report Preview
Timeline
Animation
10 Frames
2 Sec (Auto)
Messages
Timeline
Press F1 For Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

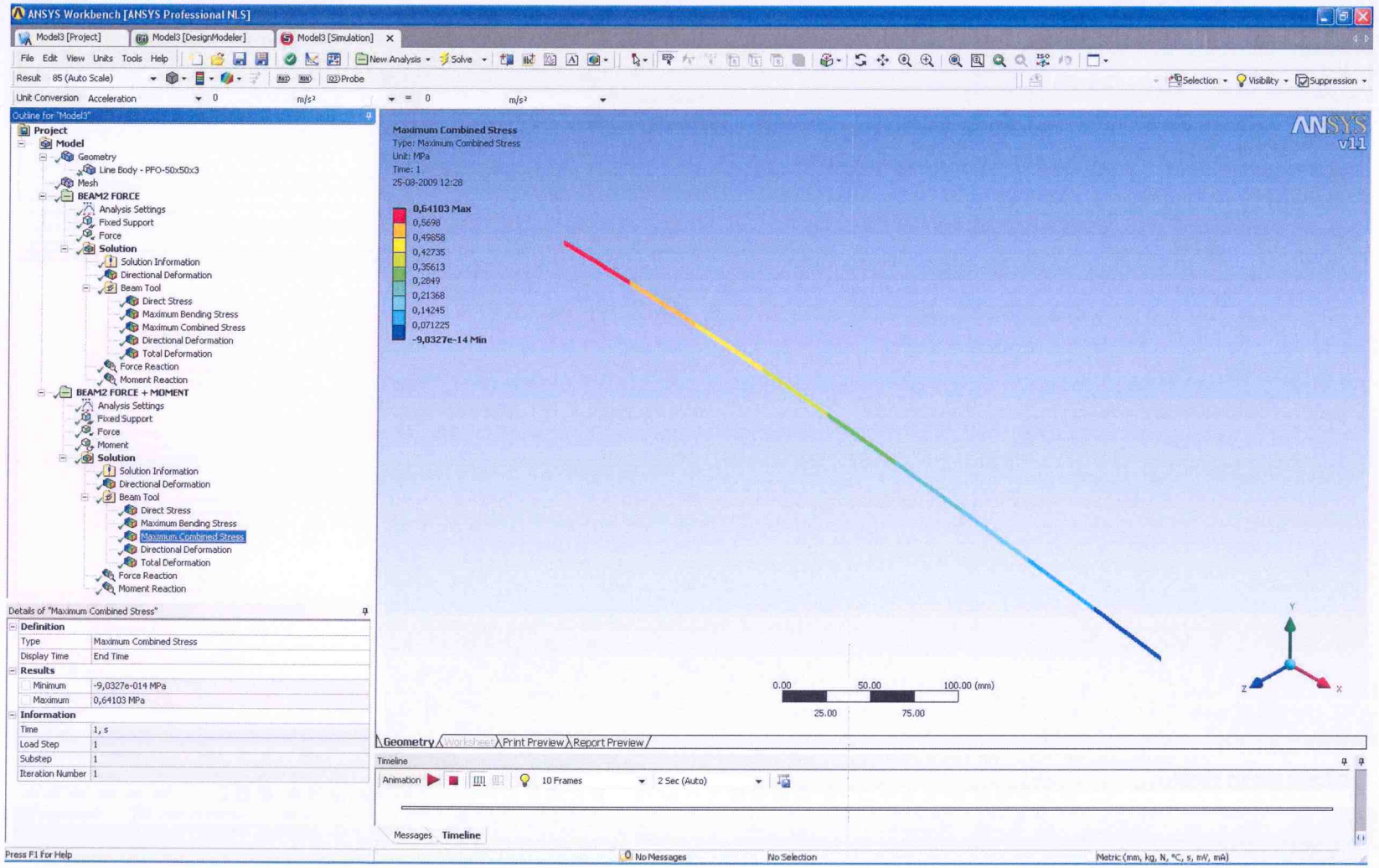

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model3 [Project]
Model3 [DesignModeler]
Model3 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Mesh Mesh Control
Options
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model3"
Project
Model
Geometry
Line Body - PFO-50x50x3
Mesh
BEAM2 FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
BEAM2 FORCE + MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "Mesh"
Defaults
Physics Preference Mechanical
Relevance 0
Advanced
Relevance Center Coarse
Element Size Default
Shape Checking Standard Mechanical
Initial Size Seed Active Assembly
Smoothing Low
Transition Fast
Statistics
Nodes 22
Elements 21
ANSYS
v11
0.00 50.00 100.00 (mm)
25.00 75.00
Geometry Worksheet Print Preview Report Preview
Messages
Text
Association
Timestamp
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

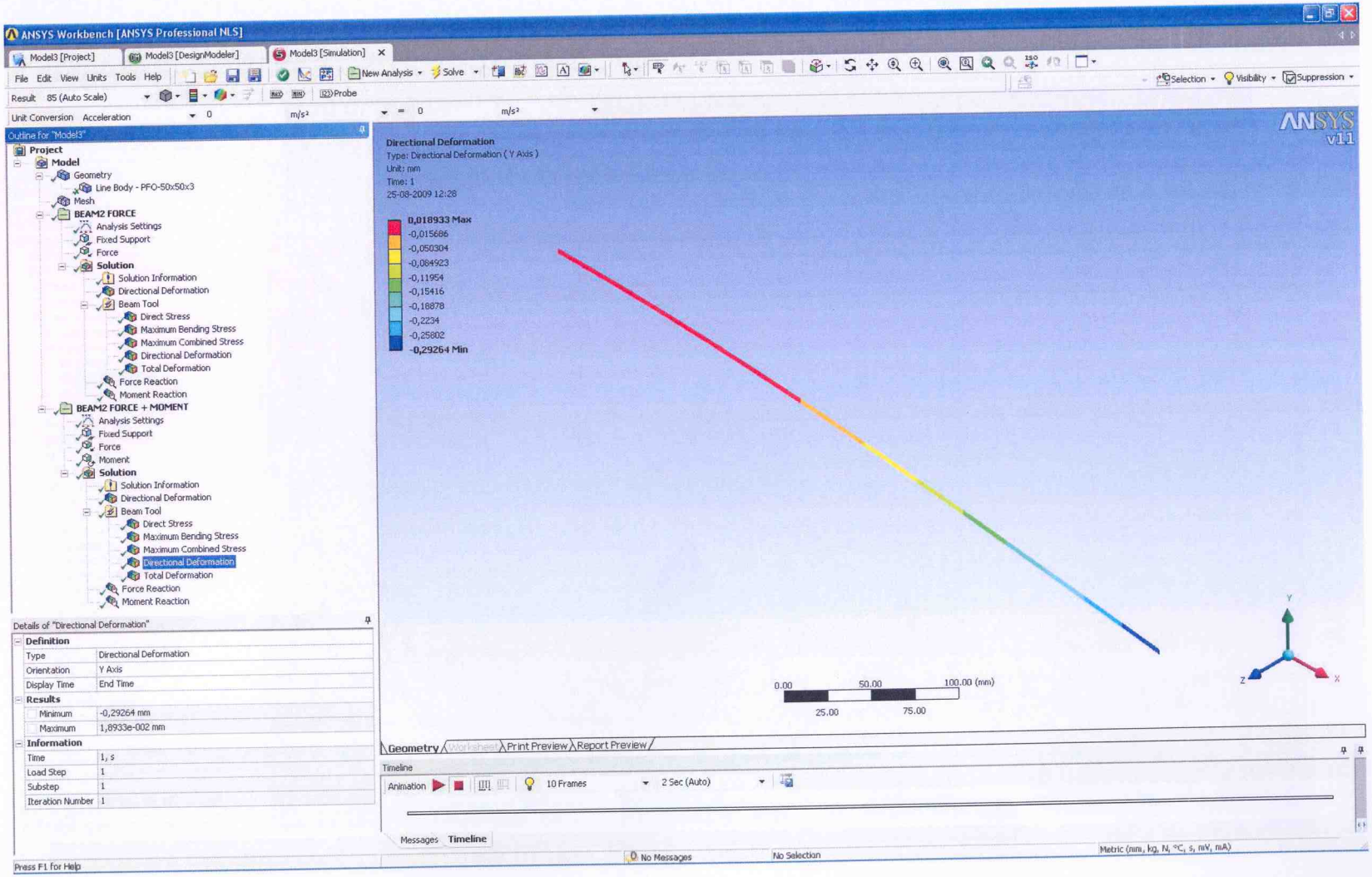

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model3 [Project]
Model3 [DesignModeler]
Model3 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Environment
Inertial
Loads
Supports
Conditions
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion
Acceleration
m/s²
Outline for "Model3"
Project
Model
Geometry
Line Body - PFO-50x50x3
Mesh
BEAM2 FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
BEAM2 FORCE + MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "BEAM2 FORCE"
Definition
Physics Type
Structural
Analysis Type
Static Structural
Options
Reference Temp
22, °C
BEAM2 FORCE
Time: 1, s
25-08-2009 12:27
Fixed Support
Force: 500, N
ANSYS
v11
0.00
50.00
100.00 (mm)
25.00
75.00
Geometry
Print Preview
Report Preview
Timeline
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

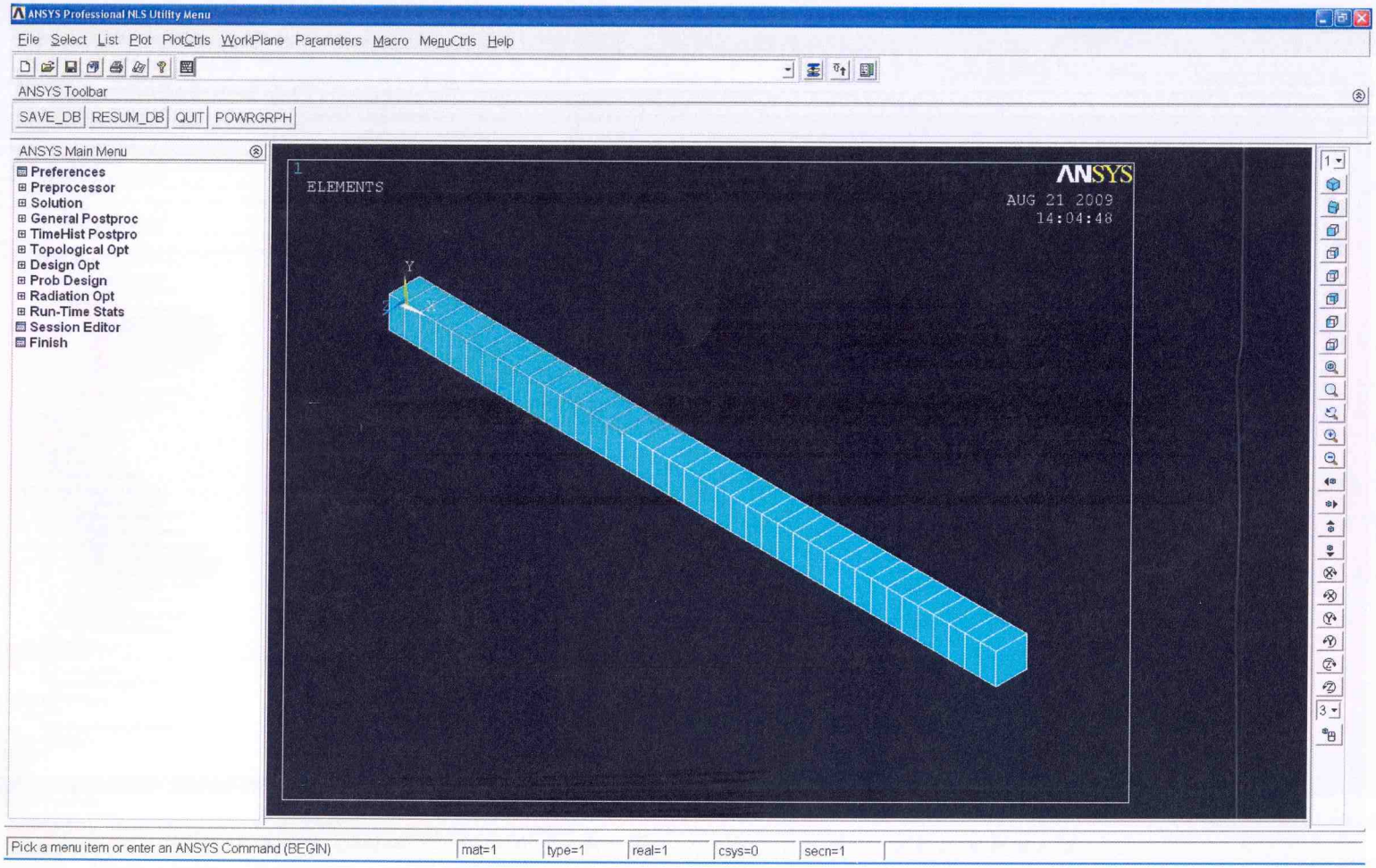

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model3 [Project]
Model3 [DesignModeler]
Model3 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Probe
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model3"
Project
Model
Geometry
Line Body - PFO-50x50x3
Mesh
BEAM2 FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
BEAM2 FORCE + MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Maximum Combined Stress
Type: Maximum Combined Stress
Unit: MPa
Time: 1
25-08-2009 12:27
0,64103 Max
0,5698
0,49858
0,42735
0,35613
0,2849
0,21368
0,14245
0,071225
8,5272e-14 Min
ANSYS
v11
0.00
50.00
100.00 (mm)
25.00
75.00
Y
Z
X
Details of "Maximum Combined Stress"
Definition
Type Maximum Combined Stress
Display Time End Time
Results
Minimum 8,5272e-014 MPa
Maximum 0,64103 MPa
Information
Time 1, s
Load Step 1
Substep 1
Iteration Number 1
Geometry
Worksheet
Print Preview
Report Preview
Timeline
Animation
10 Frames
2 Sec (Auto)
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

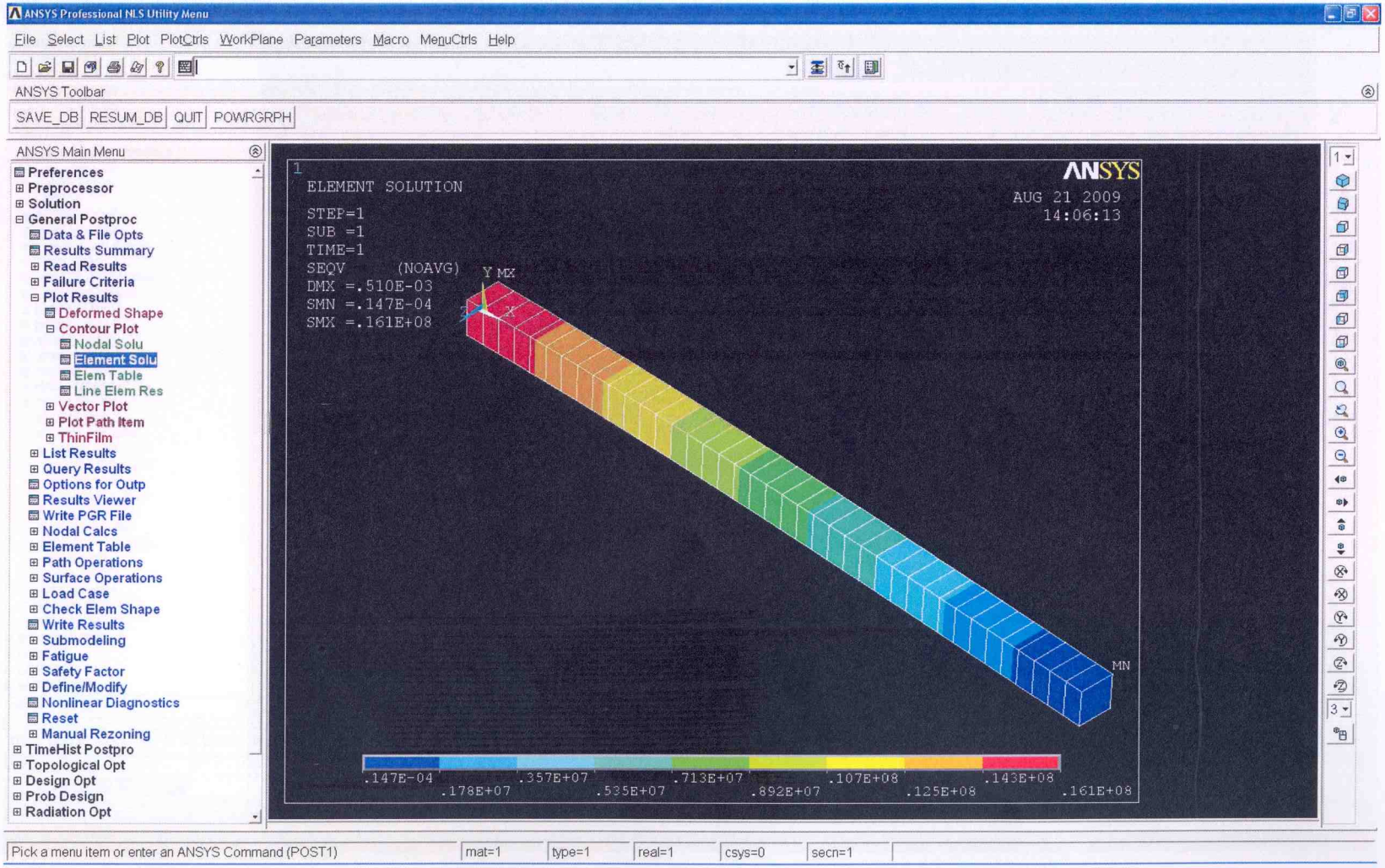

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model3 [Project]
Model3 [DesignModeler]
Model3 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Result 46 (Auto Scale)
Probe
Selection
Visibility
Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model3"
Project
Model
Geometry
Line Body - PFO-50x50x3
Mesh
BEAM2 FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
BEAM2 FORCE + MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "Directional Deformation"
Definition
Type Directional Deformation
Orientation Y Axis
Display Time End Time
Results
Minimum -0,54654 mm
Maximum 0, mm
Information
Time 1, s
Load Step 1
Substep 1
Iteration Number 1
Directional Deformation
Type: Directional Deformation (Y Axis)
Unit: mm
Time: 1
25-08-2009 12:27
0 Max
-0,060727
-0,12145
-0,18218
-0,24291
-0,30364
-0,36436
-0,42509
-0,48582
-0,54654 Min
ANSYS
v11
0.00
50.00
100.00 (mm)
25.00
75.00
Geometry
Print Preview
Report Preview
Timeline
Animation
10 Frames
2 Sec (Auto)
Messages
Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

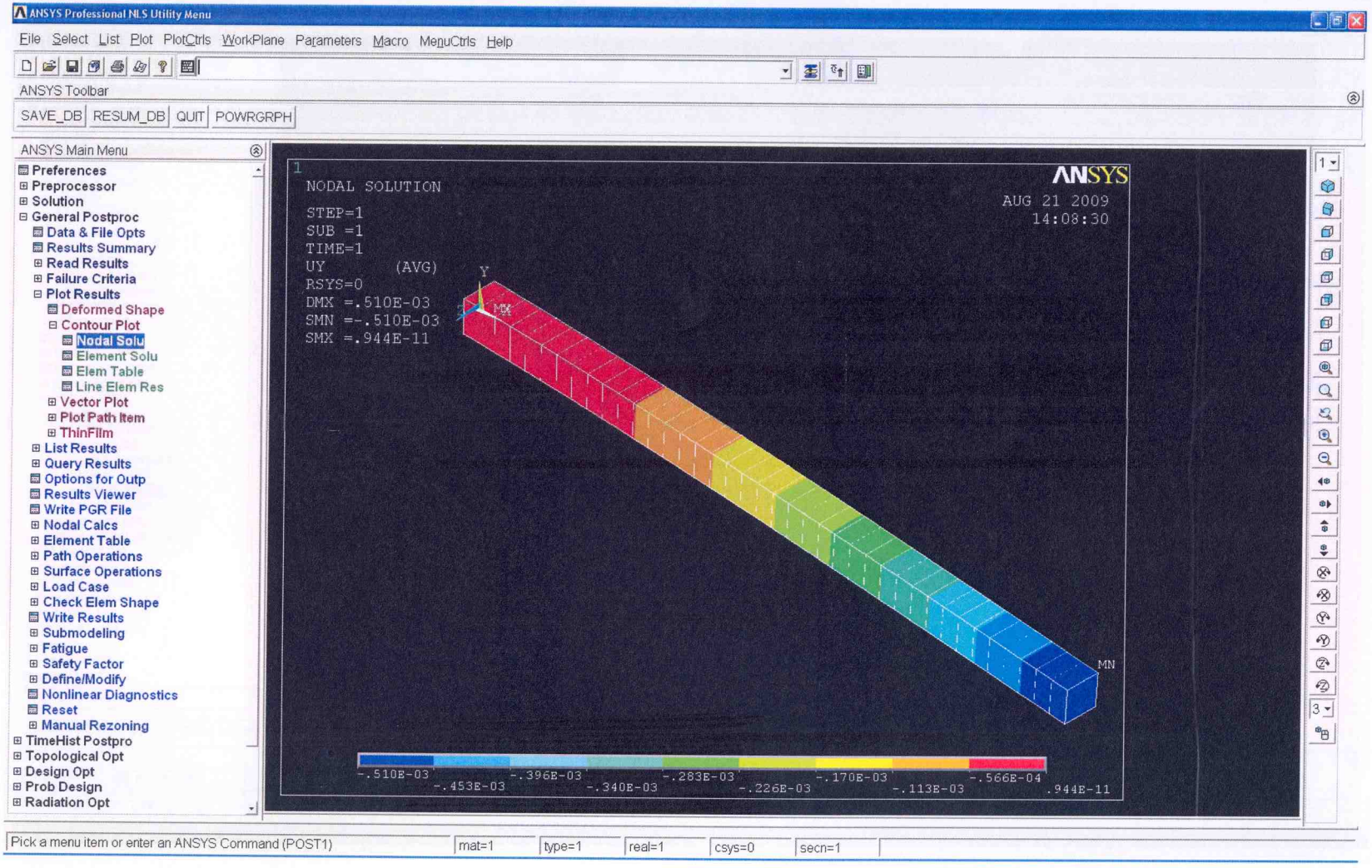

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model3 [Project]
Model3 [DesignModeler]
Model3 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Environment Inertial Loads Supports Conditions
Selection Visibility Suppression
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model3"
Project
Model
Geometry
Line Body - PFO-50x50x3
Mesh
BEAM2 FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
BEAM2 FORCE + MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "BEAM2 FORCE + MOMENT"
Definition
Physics Type Structural
Analysis Type Static Structural
Options
Reference Temp 22, °C
BEAM2 FORCE + MOMENT
Time: 1, s
25-08-2009 12:27
Fixed Support
Force: 500, N
Moment: 5,e+005 N·mm
ANSYS
v11
0.00 50.00 100.00 (mm)
25.00 75.00
Geometry Worksheet Print Preview Report Preview
Timeline
Messages Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

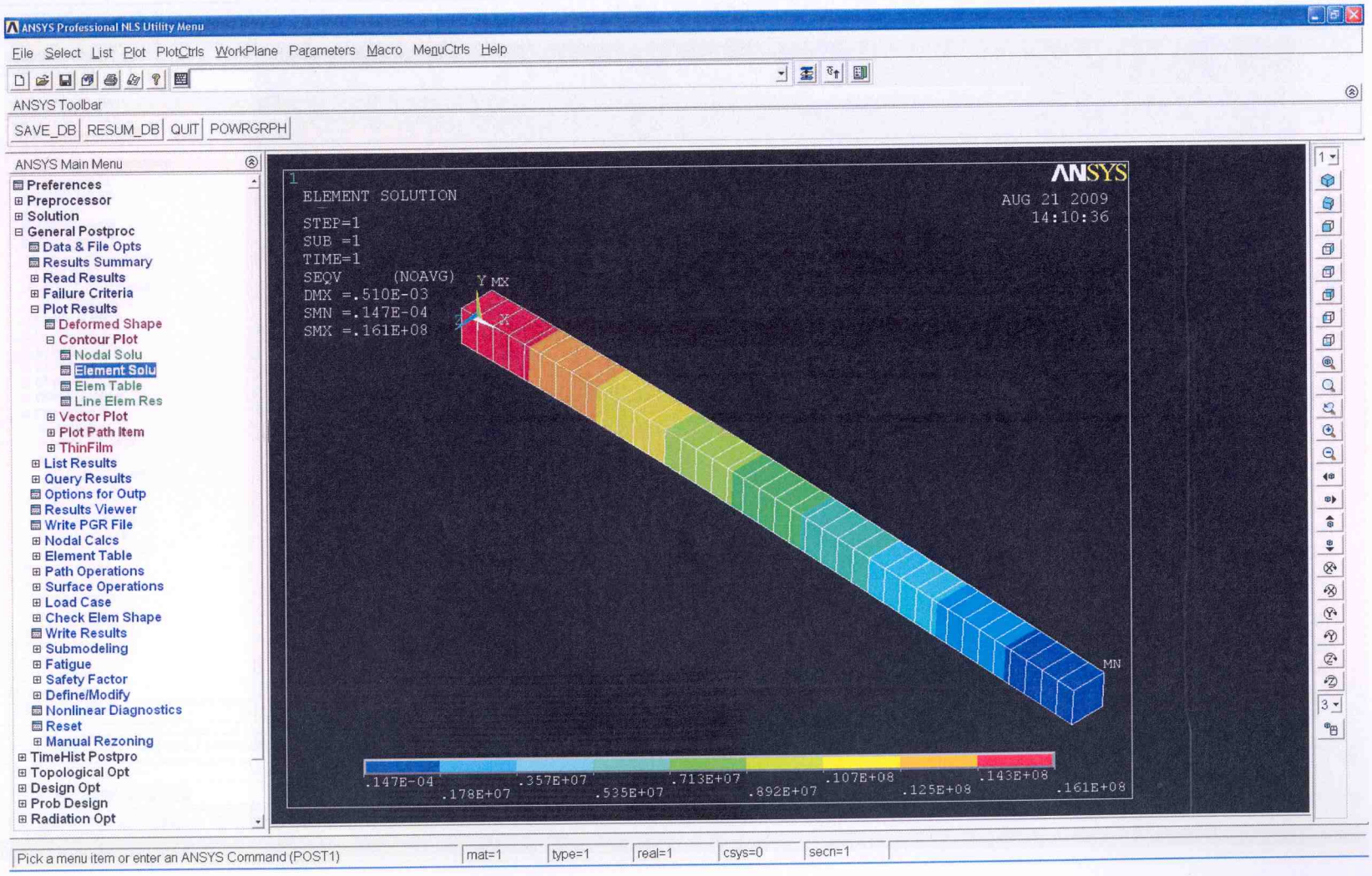

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model3 [Project]
Model3 [DesignModeler]
Model3 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Result 85 (Auto Scale)
Probe
Unit Conversion Acceleration
Selection
Visibility
Suppression
Outline for "Model3"
Project
Model
Geometry
Line Body - PFO-50x50x3
Mesh
BEAM2 FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
BEAM2 FORCE + MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "Maximum Combined Stress"
Definition
Type Maximum Combined Stress
Display Time End Time
Results
Minimum -9,0327e-014 MPa
Maximum 0,64103 MPa
Information
Time 1, s
Load Step 1
Substep 1
Iteration Number 1
Maximum Combined Stress
Type: Maximum Combined Stress
Unit: MPa
Time: 1
25-08-2009 12:28
0,64103 Max
0,5698
0,49858
0,42735
0,35613
0,2849
0,21368
0,14245
0,071225
-9,0327e-14 Min
ANSYS
v11
0.00 50.00 100.00 (mm)
25.00 75.00
Y
Z X
Geometry Worksheet Print Preview Report Preview
Timeline
Animation 10 Frames 2 Sec (Auto)
Messages Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

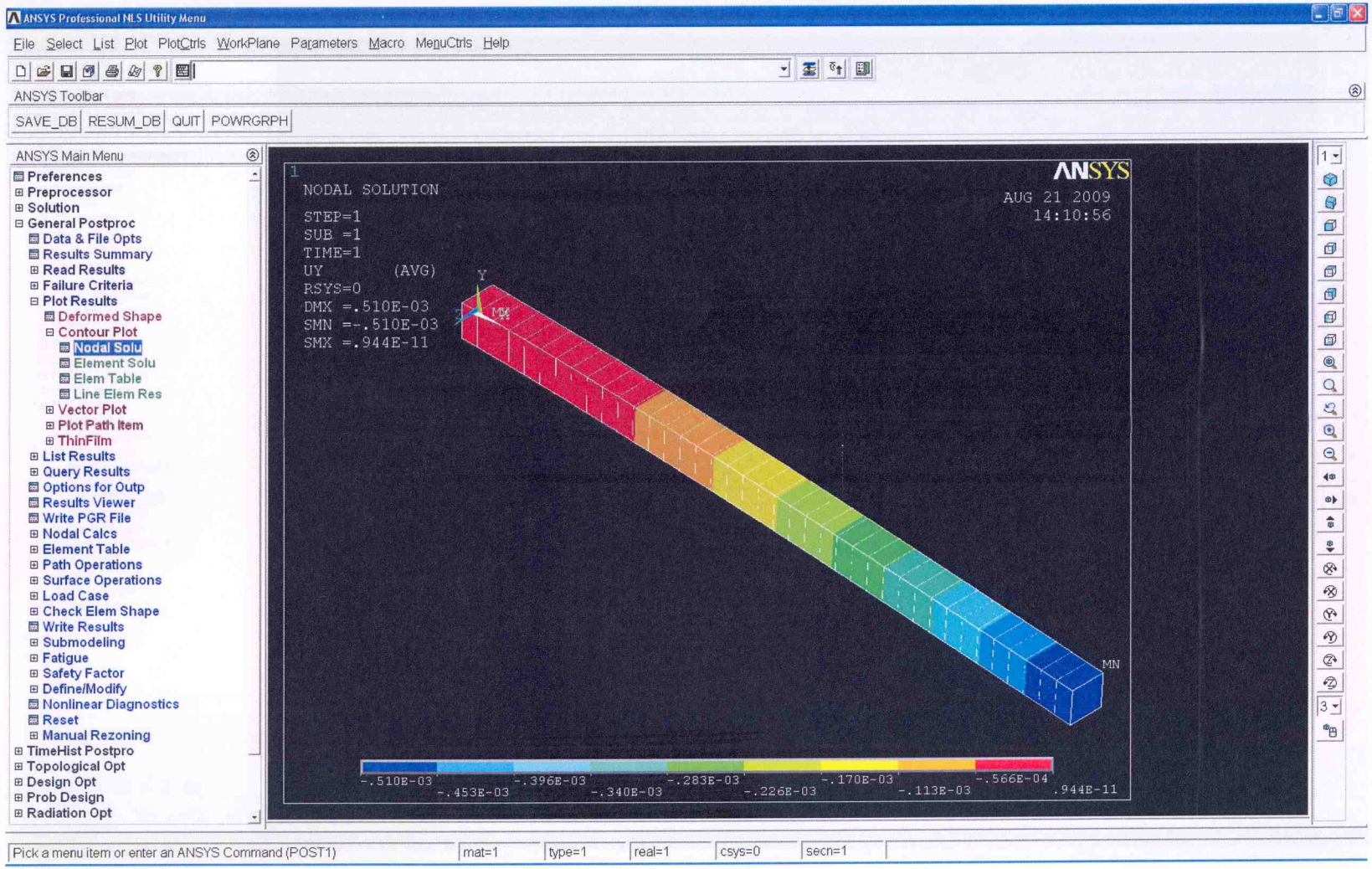

ANSYS Workbench [ANSYS Professional NLS]
Model3 [Project]
Model3 [DesignModeler]
Model3 [Simulation]
File Edit View Units Tools Help
New Analysis
Solve
Selection
Visibility
Suppression
Result 85 (Auto Scale)
Probe
Unit Conversion Acceleration
Outline for "Model3"
Project
Model
Geometry
Line Body - PFO-50x50x3
Mesh
BEAM2 FORCE
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
BEAM2 FORCE + MOMENT
Analysis Settings
Fixed Support
Force
Moment
Solution
Solution Information
Directional Deformation
Beam Tool
Direct Stress
Maximum Bending Stress
Maximum Combined Stress
Directional Deformation
Total Deformation
Force Reaction
Moment Reaction
Details of "Directional Deformation"
Definition
Type Directional Deformation
Orientation Y Axis
Display Time End Time
Results
Minimum -0,29264 mm
Maximum 1,8933e-002 mm
Information
Time 1, s
Load Step 1
Substep 1
Iteration Number 1
Directional Deformation
Type: Directional Deformation (Y Axis)
Unit: mm
Time: 1
25-08-2009 12:28
0,018933 Max
-0,015686
-0,050304
-0,084923
-0,11954
-0,15416
-0,18878
-0,2234
-0,25802
-0,29264 Min
ANSYS
v11
0.00 50.00 100.00 (mm)
25.00 75.00
Geometry Worksheet Print Preview Report Preview
Timeline
Animation 10 Frames 2 Sec (Auto)
Messages Timeline
Press F1 for Help
No Messages
No Selection
Metric (mm, kg, N, °C, s, mV, mA)

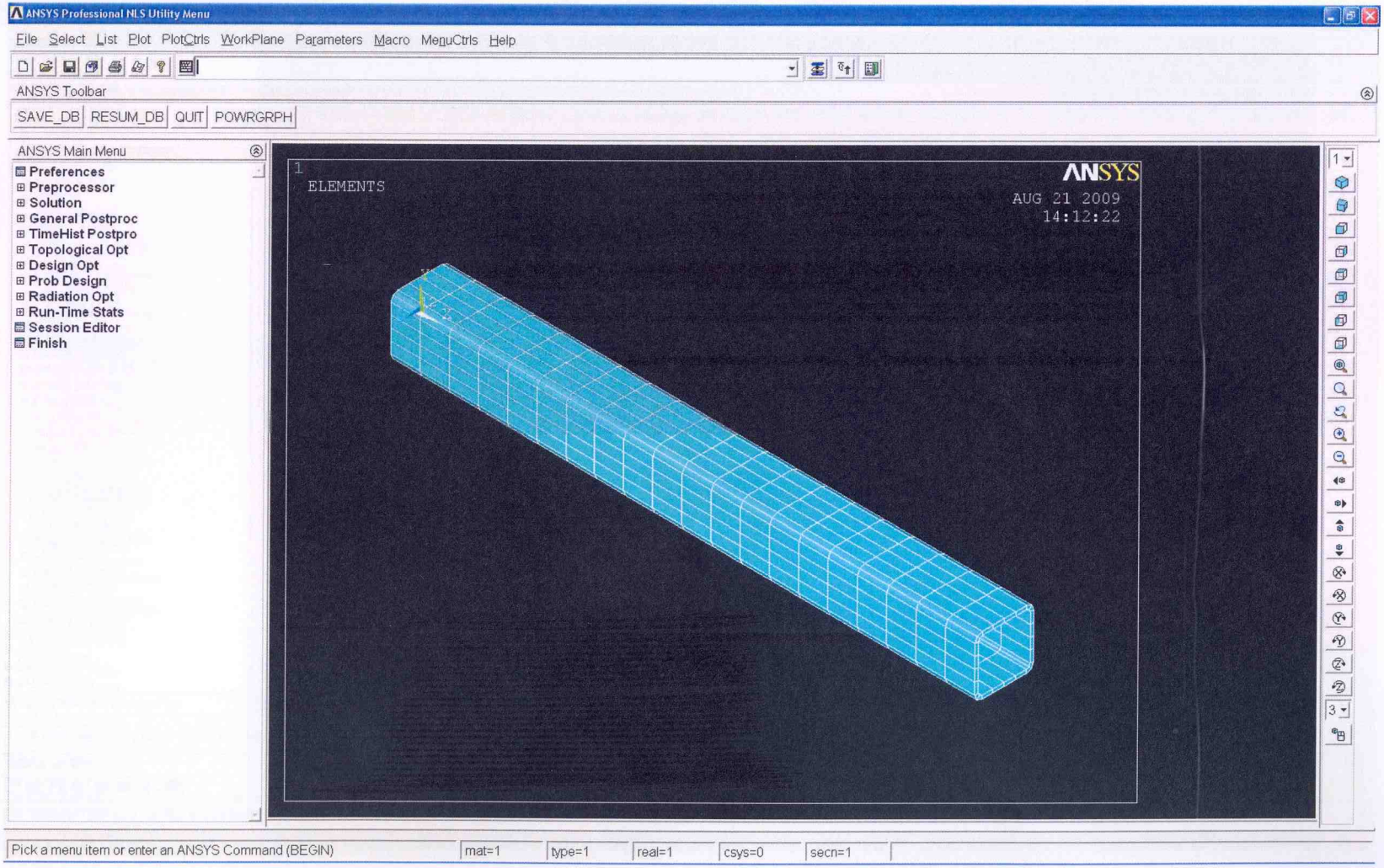

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
Run-Time Stats
Session Editor
Finish
1
ELEMENTS
ANSYS
AUG 21 2009
14:04:48
Y
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (BEGIN)
mat=1
type=1
real=1
csys=0
secn=1

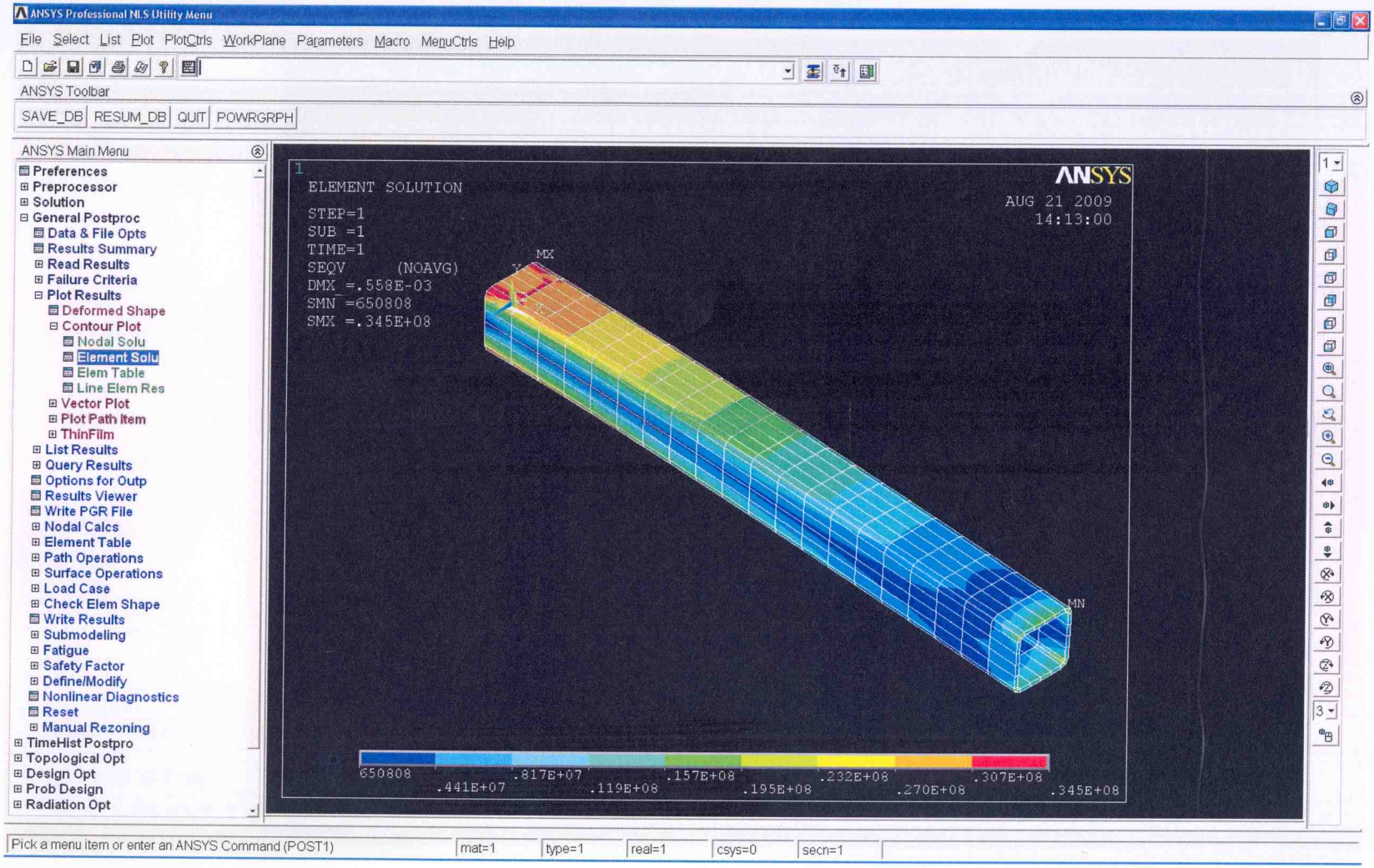

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (NOAVG)
DMX =.510E-03
SMN =.147E-04
SMX =.161E+08
Y MX
Z
X
MN
ANSYS
AUG 21 2009
14:06:13
.147E-04
.178E+07
.357E+07
.535E+07
.713E+07
.892E+07
.107E+08
.125E+08
.143E+08
.161E+08
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=1
type=1
real=1
csys=0
secn=1

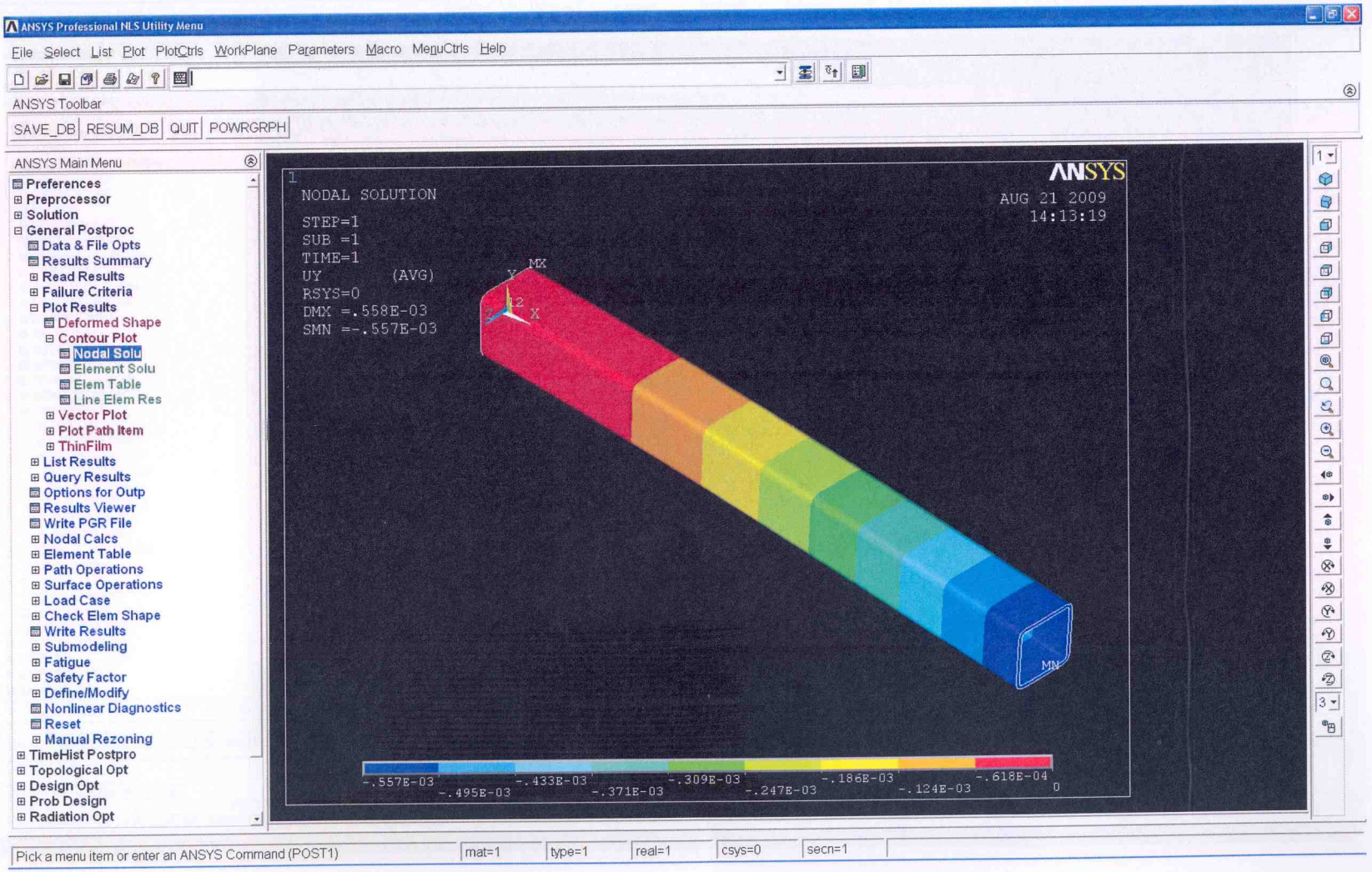

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =.510E-03
SMN =-.510E-03
SMX =.944E-11
ANSYS
AUG 21 2009
14:08:30
Y
MX
MN
-.510E-03
-.453E-03
-.396E-03
-.340E-03
-.283E-03
-.226E-03
-.170E-03
-.113E-03
-.566E-04
.944E-11
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=1
type=1
real=1
csys=0
secn=1

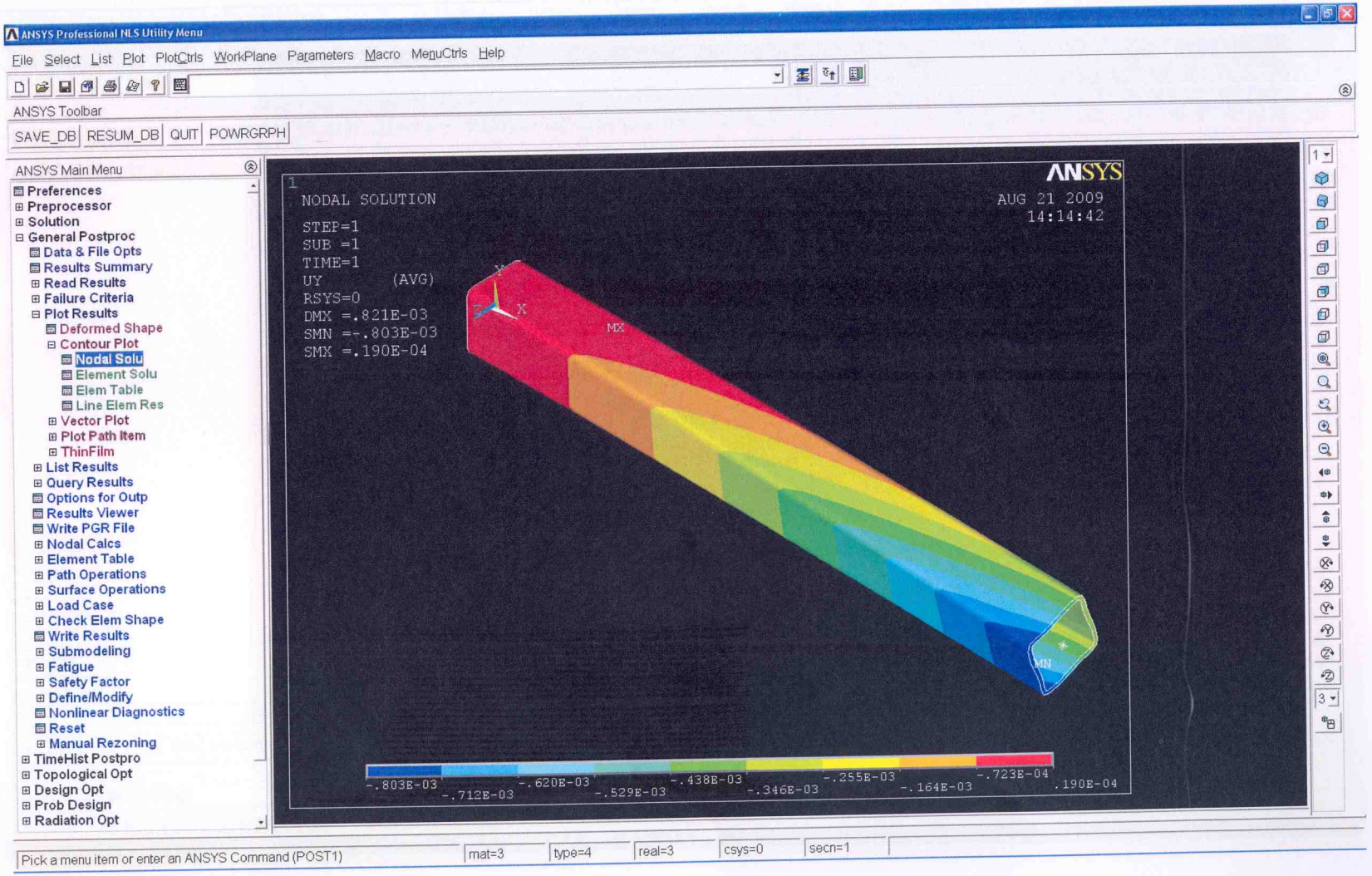

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (NOAVG)
DMX =.510E-03
SMN =.147E-04
SMX =.161E+08
Y MX
MN
ANSYS
AUG 21 2009
14:10:36
.147E-04
.178E+07
.357E+07
.535E+07
.713E+07
.892E+07
.107E+08
.125E+08
.143E+08
.161E+08
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=1
type=1
real=1
csys=0
secn=1

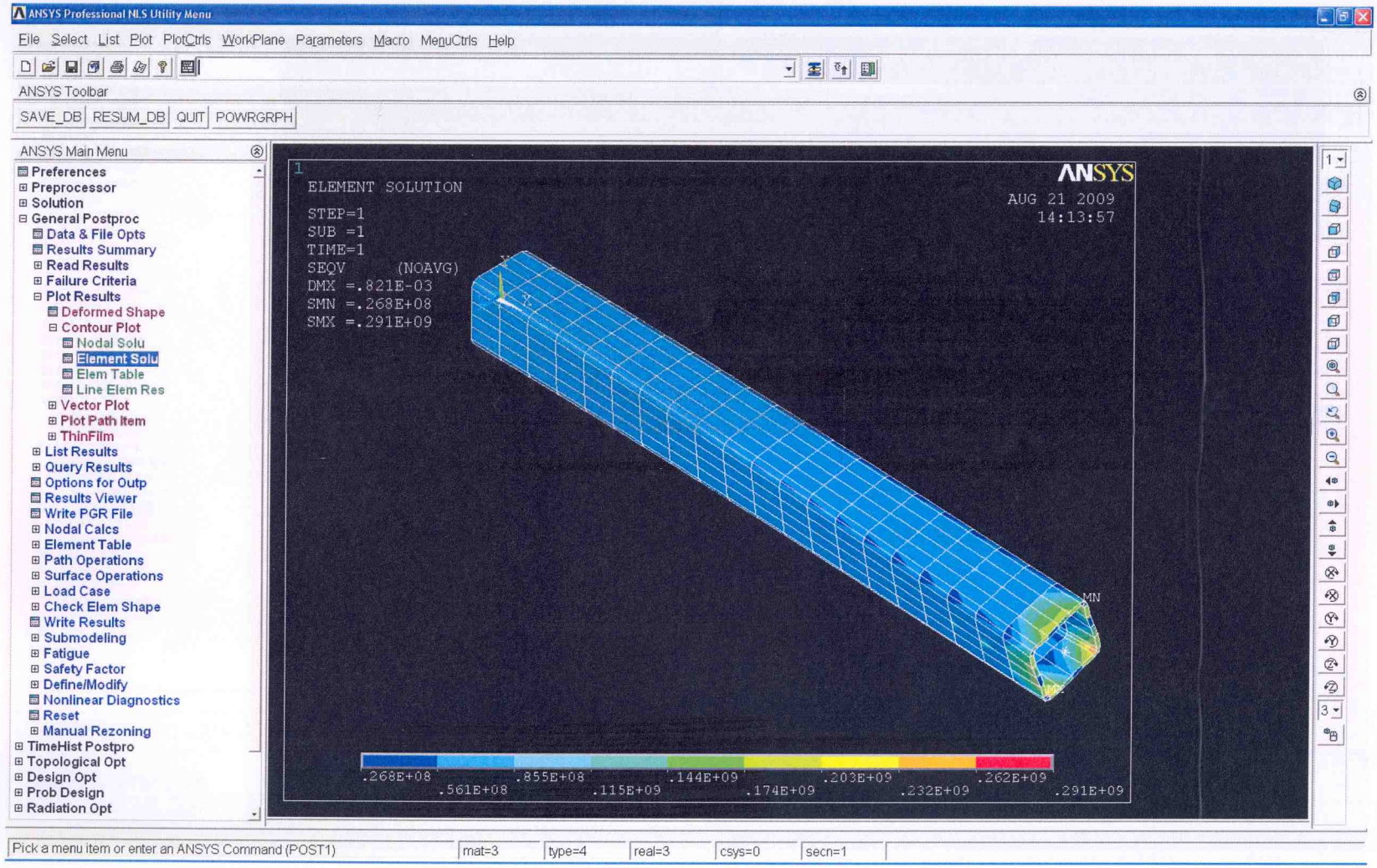

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =.510E-03
SMN =-.510E-03
SMX =.944E-11
ANSYS
AUG 21 2009
14:10:56
Y
MX
MN
-.510E-03
-.453E-03
-.396E-03
-.340E-03
-.283E-03
-.226E-03
-.170E-03
-.113E-03
-.566E-04
.944E-11
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=1
type=1
real=1
csys=0
secn=1

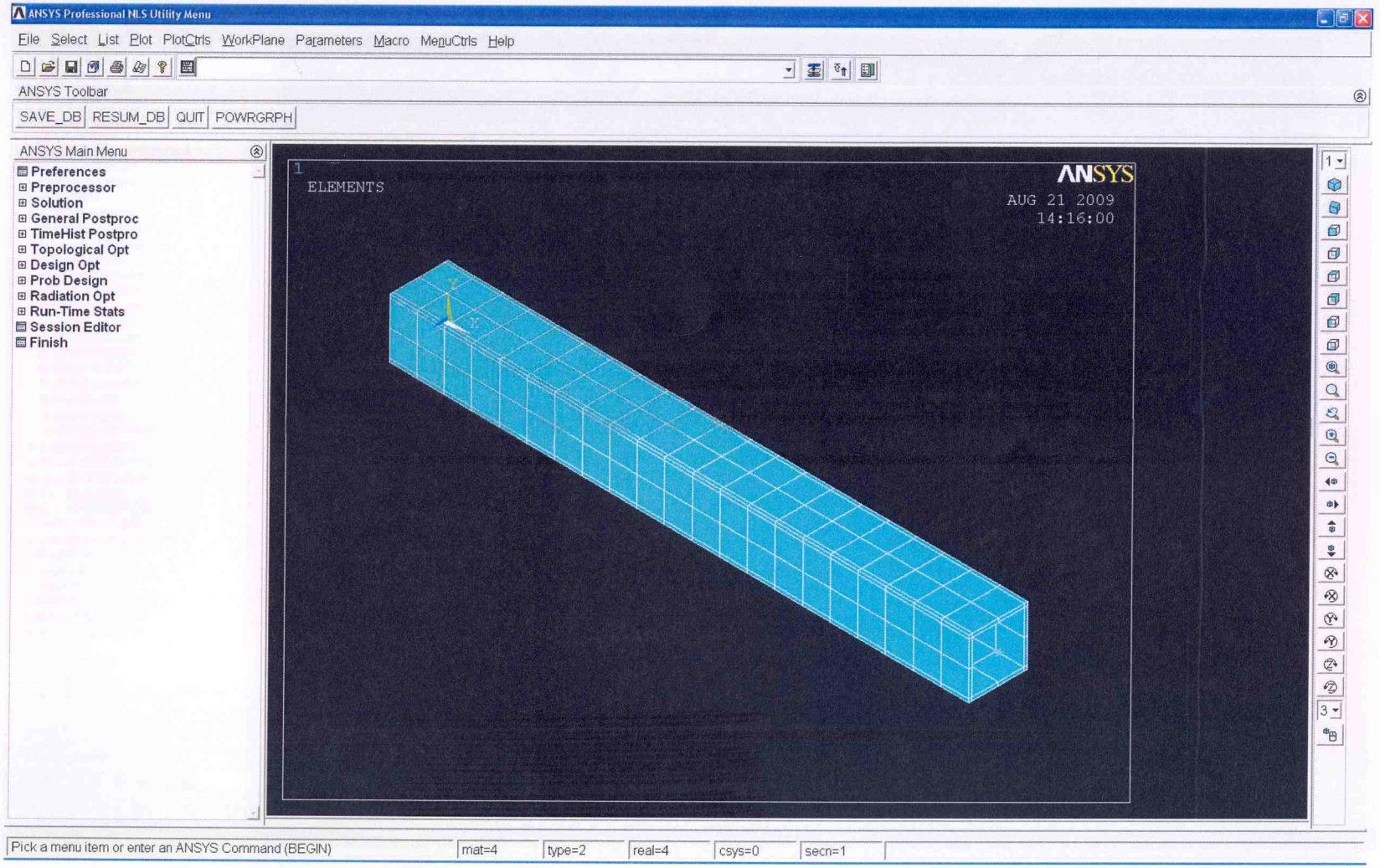

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
Run-Time Stats
Session Editor
Finish
1
ELEMENTS
ANSYS
AUG 21 2009
14:12:22
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (BEGIN)
mat=1
type=1
real=1
csys=0
secn=1

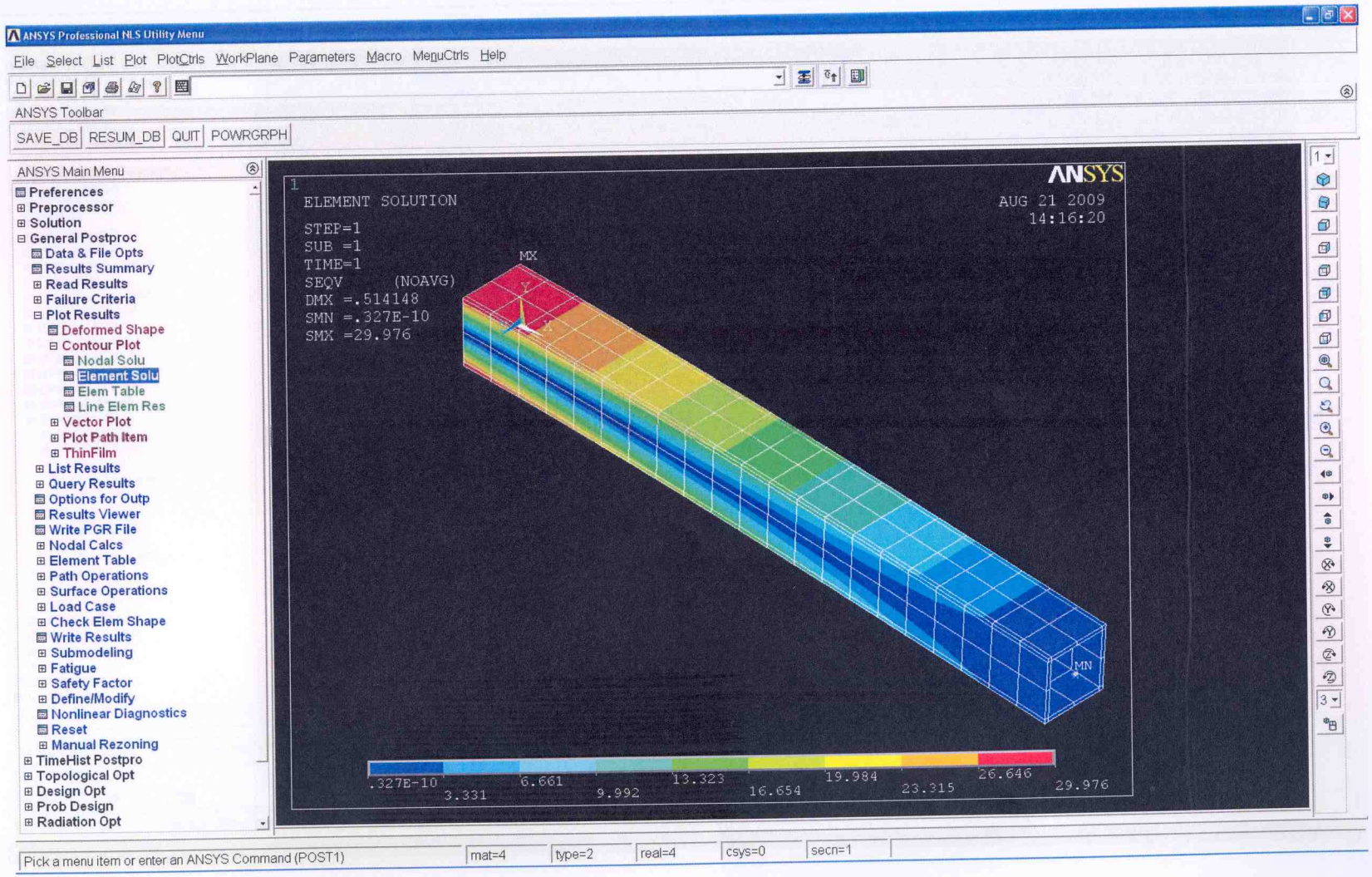

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (NOAVG)
DMX =.558E-03
SMN =650808
SMX =.345E+08
ANSYS
AUG 21 2009
14:13:00
MX
MN
650808
.441E+07
.817E+07
.119E+08
.157E+08
.195E+08
.232E+08
.270E+08
.307E+08
.345E+08
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=1
type=1
real=1
csys=0
secn=1

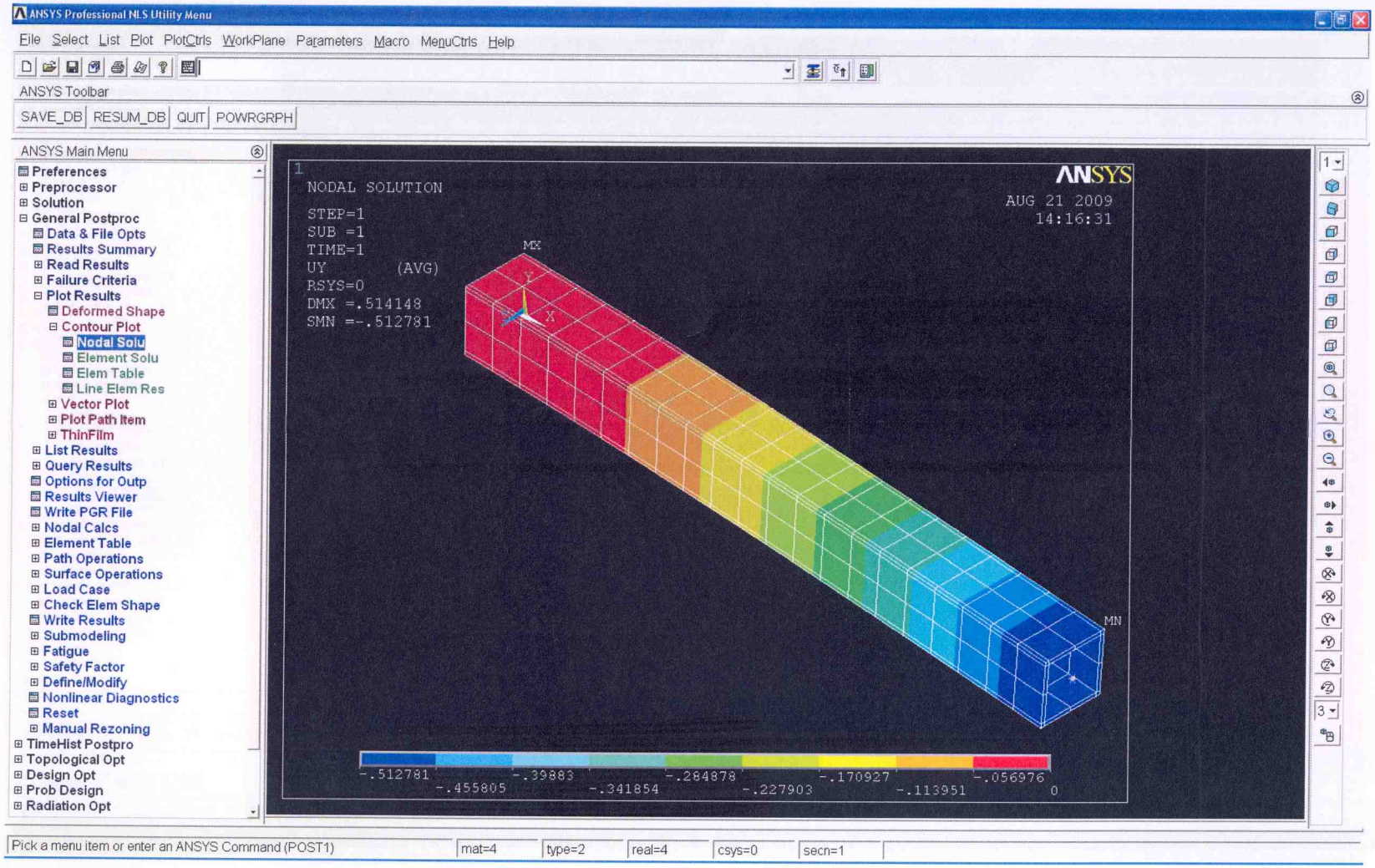

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =.558E-03
SMN =-.557E-03
ANSYS
AUG 21 2009
14:13:19
MX
MN
-.557E-03
-.495E-03
-.433E-03
-.371E-03
-.309E-03
-.247E-03
-.186E-03
-.124E-03
-.618E-04
0
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=1
type=1
real=1
csys=0
secn=1

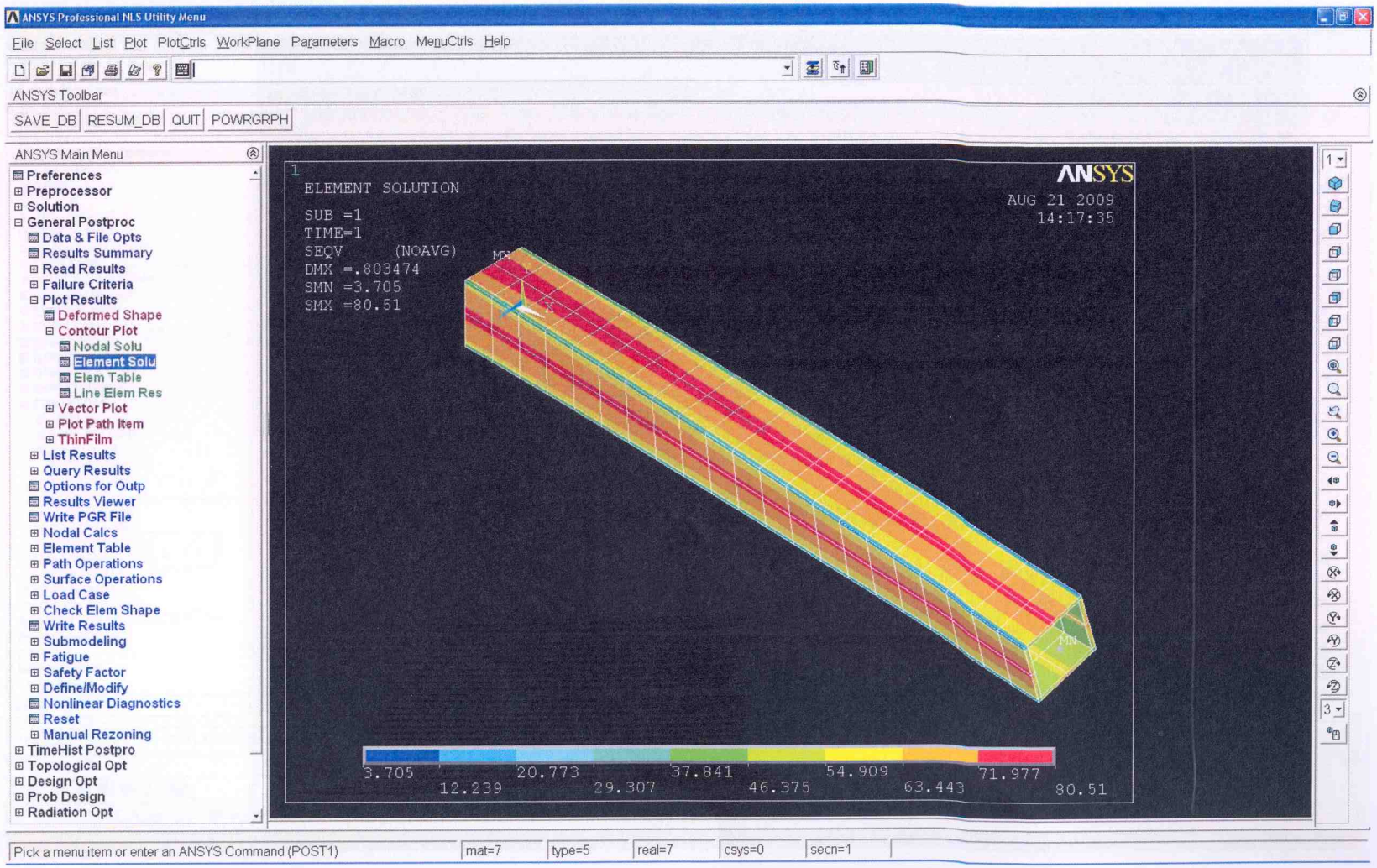

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =.821E-03
SMN =-.803E-03
SMX =.190E-04
ANSYS
AUG 21 2009
14:14:42
MX
MN
-.803E-03
-.712E-03
-.620E-03
-.529E-03
-.438E-03
-.346E-03
-.255E-03
-.164E-03
-.723E-04
.190E-04
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=3
type=4
real=3
csys=0
secn=1

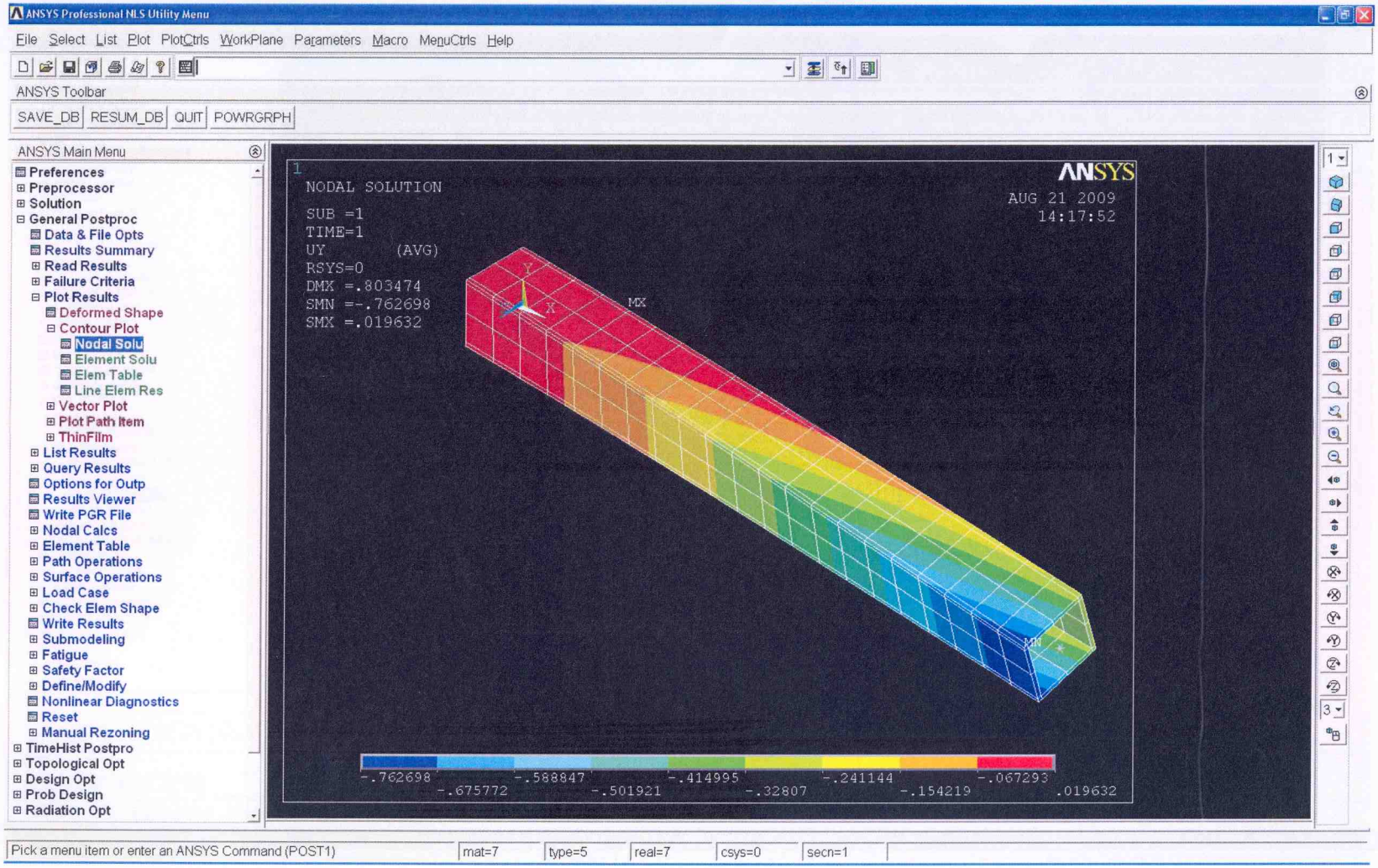

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (NOAVG)
DMX =.821E-03
SMN =.268E+08
SMX =.291E+09
ANSYS
AUG 21 2009
14:13:57
MN
.268E+08
.561E+08
.855E+08
.115E+09
.144E+09
.174E+09
.203E+09
.232E+09
.262E+09
.291E+09
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=3
type=4
real=3
csys=0
secn=1

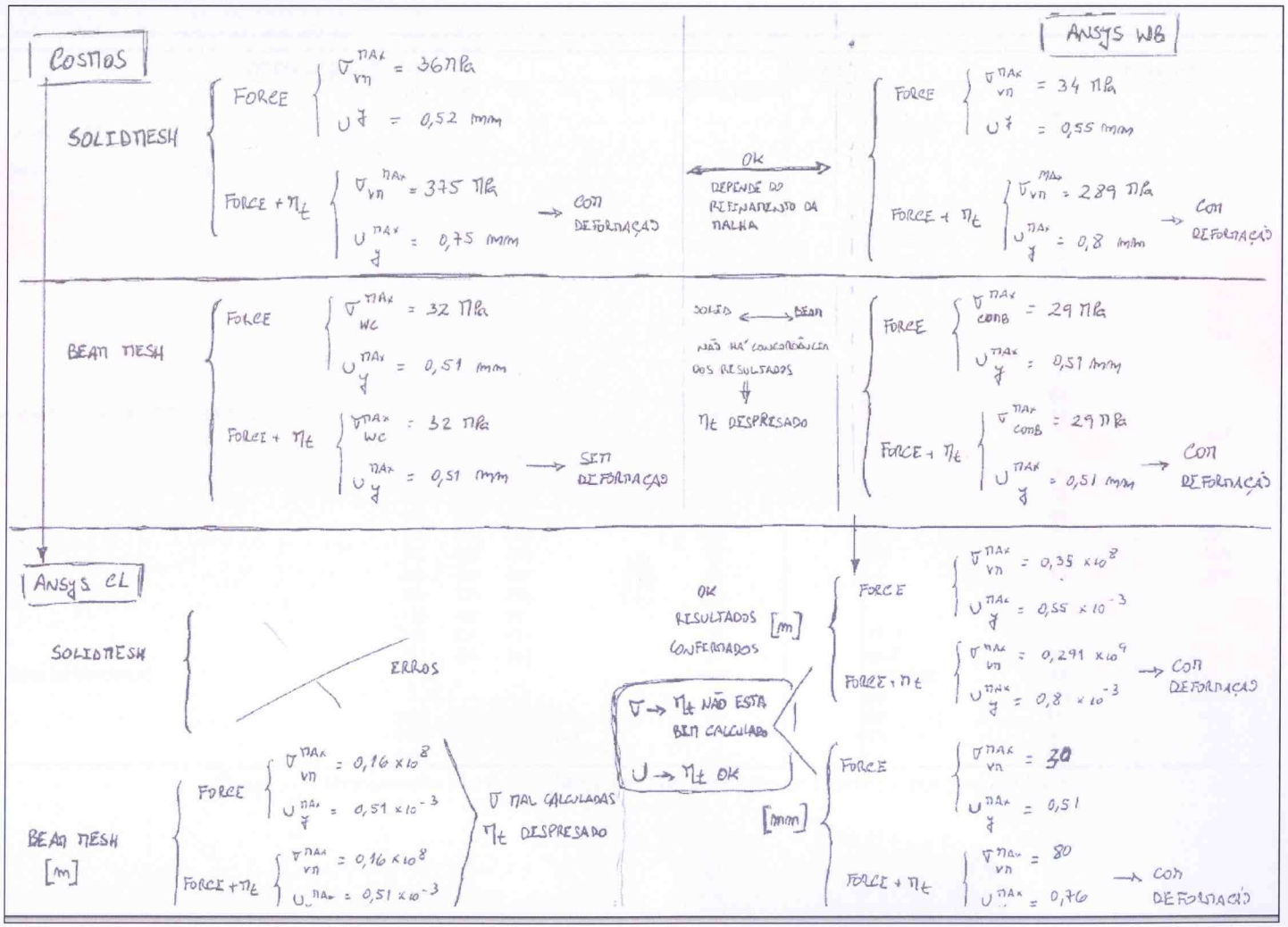

ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
Run-Time Stats
Session Editor
Finish
1
ELEMENTS
ANSYS
AUG 21 2009
14:16:00
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (BEGIN)
mat=4
type=2
real=4
csys=0
secn=1


ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (NOAVG)
DMX =.514148
SMN =.327E-10
SMX =29.976
ANSYS
AUG 21 2009
14:16:20
MX
MN
.327E-10
3.331
6.661
9.992
13.323
16.654
19.984
23.315
26.646
29.976
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=4
type=2
real=4
csys=0
secn=1


ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =.514148
SMN =-.512781
ANSYS
AUG 21 2009
14:16:31
MX
MN
-.512781
-.455805
-.39883
-.341854
-.284878
-.227903
-.170927
-.113951
-.056976
0
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=4
type=2
real=4
csys=0
secn=1


ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
ELEMENT SOLUTION
SUB =1
TIME=1
SEQV (NOAVG)
DMX =.803474
SMN =3.705
SMX =80.51
ANSYS
AUG 21 2009
14:17:35
3.705
12.239
20.773
29.307
37.841
46.375
54.909
63.443
71.977
80.51
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=7
type=5
real=7
csys=0
secn=1


ANSYS Professional NLS Utility Menu
File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help
ANSYS Toolbar
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Failure Criteria
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Elem Table
Line Elem Res
Vector Plot
Plot Path Item
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Check Elem Shape
Write Results
Submodeling
Fatigue
Safety Factor
Define/Modify
Nonlinear Diagnostics
Reset
Manual Rezoning
TimeHist Postpro
Topological Opt
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
1
NODAL SOLUTION
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =.803474
SMN =-.762698
SMX =.019632
ANSYS
AUG 21 2009
14:17:52
MX
MN
-.762698
-.675772
-.588847
-.501921
-.414995
-.32807
-.241144
-.154219
-.067293
.019632
Pick a menu item or enter an ANSYS Command (POST1)
mat=7
type=5
real=7
csys=0
secn=1


Cosmos
SOLIDMESH
FORCE
σ_{vm}^{max} = 367 MPa
u_y = 0,52 mm
FORCE + η_t
σ_{vm}^{max} = 375 MPa
u_y^{max} = 0,75 mm
→ COM DEFORMAÇÃO
OK
DEPENDE DO REFINAMENTO DA MALHA
ANSYS WB
FORCE
σ_{vm}^{max} = 34 MPa
u_y = 0,55 mm
FORCE + η_t
σ_{vm}^{max} = 289 MPa
u_y^{max} = 0,8 mm
→ COM DEFORMAÇÃO
BEAM MESH
FORCE
σ_{WC}^{max} = 32 MPa
u_y^{max} = 0,51 mm
FORCE + η_t
σ_{WC}^{max} = 32 MPa
u_y^{max} = 0,51 mm
→ SEM DEFORMAÇÃO
SOLID ⟷ BEAM
NÃO HÁ CONCORDÂNCIA DOS RESULTADOS
∄
η_t DESPREZADO
FORCE
σ_{comb}^{max} = 29 MPa
u_y^{max} = 0,51 mm
FORCE + η_t
σ_{comb}^{max} = 29 MPa
u_y^{max} = 0,51 mm
→ COM DEFORMAÇÃO
Ansys CL
SOLIDMESH
ERROS
OK
RESULTADOS CONFIRMADOS [m]
σ → η_t NÃO ESTÁ BEM CALCULADO
u → η_t OK
[mm]
FORCE
σ_{vm}^{max} = 0,35 × 10^8
u_y^{max} = 0,55 × 10^-3
FORCE + η_t
σ_{vm}^{max} = 0,291 × 10^9
u_y^{max} = 0,8 × 10^-3
→ COM DEFORMAÇÃO
BEAM MESH
[m]
FORCE
σ_{vm}^{max} = 0,16 × 10^8
u_y^{max} = 0,51 × 10^-3
FORCE + η_t
σ_{vm}^{max} = 0,16 × 10^8
u_y^{max} = 0,51 × 10^-3
σ MAL CALCULADAS
η_t DESPREZADO
FORCE
σ_{vm}^{max} = 30
u_y^{max} = 0,51
FORCE + η_t
σ_{vm}^{max} = 80
u_y^{max} = 0,76
→ COM DEFORMAÇÃO

(3) – Passagem de informação

Dados Organizados								MACRO	Ficheiro Tipico de Input para ANSYS						
	MAT	EN	Ni	Nj	Nk	Nl	PHYSICAL PROP.		TYPE	,	1				
C*** ELEMENT CONNECTIVITY									MAT	,	53				
C***									SECNUM	,	73				
C*** material properties for table 'DENS.ALONGAMENTO '									EN	,	1	,	352	,	355
MAT	53	53							EN	,	2	,	355	,	340
EN		1	352	355			73		EN	,	3	,	342	,	346
EN		2	355	340			73								
EN		3	342	346			73		TYPE	,	1				
EN		4	340	351			40		MAT	,	53				
EN		5	343	341			40		SECNUM	,	40				
EN		6	346	347			40		EN	,	4	,	340	,	351
EN		7	341	342			73		EN	,	5	,	343	,	341
EN		8	350	353			40		EN	,	6	,	346	,	347
EN		9	356	351			40								
EN		10	338	174			40		TYPE	,	1				
C*** material properties for table 'DENS.ESTRADO.COMPLEM'							#N/D		MAT	,	53				
MAT	56	56					40		SECNUM	,	73				
EN		161	177	491			42		EN	,	7	,	341	,	342
EN		162	491	492			42								
EN		163	492	493			42		TYPE	,	1				
EN		164	493	494			42		MAT	,	53				
EN		165	494	495			42		SECNUM	,	40				
EN		166	495	496			42		EN	,	8	,	350	,	353
EN		167	496	497			42		EN	,	9	,	356	,	351
EN		168	329	498			75		EN	,	10	,	338	,	174
EN		169	498	501			75								
EN		170	501	499			75		TYPE	,	1				
EN		171	499	502			75		MAT	,	56				
C*** material properties for table 'ACO '							#N/D		SECNUM	,	42				
MAT	1	1					73		EN	,	161	,	177	,	491
EN		1492	1204	1203	248	1211	10		EN	,	162	,	491	,	492
EN		1493	1203	1202	248	248	10		EN	,	163	,	492	,	493
FN		1494	1202	171	248	248	10		EN	,	164	,	493	,	494

Figura … - Organização dos dados (StressLab) para geração de ficheiro input para ANSYS

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto PORTUGAL
www.fe.up.pt

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000116665

(4) – Desenho de homologação modelo OPTIMO 2K "Low Entry

