

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ**

***RITAM***

***ISRIM — УНИВЕРСИТЕТ Г. ПЕРУДЖА — CSM***

**Исследовательская лаборатория сейсмостойких технологий,  
конструкций и материалов**

---

**СТРОИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА EMMEDUE**

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ  
ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
РАБОТ**

**Перуджа, 13.07.2000**

**Проф. инж. Антонио Борри**

**Проф. инж. Андреа Виньоли**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Интерпретация экспериментальных данных, полученных на прототипе
2. Математическая модель прототипа и калибровка механических характеристик элементов конструкции
3. Примеры объединения модулей

# 1. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ПРОТОТИПЕ

Ниже приводятся соображения, содержащиеся в заключительной части отчета «Строительная система EMMEDUE — динамические испытания» от 04.02.2000, дополненные результатами последующих расчетов, позволивших выявить некоторые собственные частоты прототипа.

### *1.1 Структура данных и точки установки приборов*

Данные экспериментов хранятся в файлах формата ASCII. Первые семь строк файла содержат описание общих характеристик данных. Далее данные организованы в 8 колонок. Первая колонка — отсчет по оси времени, остальные семь — показания датчиков ускорения.

Данные были получены одновременно при частоте 500 Гц. Проанализированы данные четырех экспериментов. В первых двух экспериментах генератор вибраций вырабатывал синусоидальные вибрации, направленные по оси север-юг, в двух последующих экспериментах конструкция нагружалась по оси восток-запад.

Как известно, датчики размещались на двух уровнях конструкции: на уровне второго этажа (уровень 1) и на уровне кровли (уровень 2). Последние располагались на разных высотах в зависимости от ориентации фасадов: на южном и северном фасадах — на высоте конька, на восточном и западном — на высоте свеса кровли.

При проведении каждого эксперимента точки размещения датчиков ускорения изменялись. Порядок изменения точек описан в пояснительной записке к отчету о результатах эксперимента. Для удобства читателя та же информация приведена ниже в настоящем отчете. Данные получены с помощью снабженных приспособлениями самобалансировки датчиков ускорения РСВ. Никакой предварительной фильтрации либо предварительной обработки данных не проводилось.

### *1.2 Анализ данных и определение динамических параметров*

Полученные данные были подвергнуты фильтрации с помощью цифрового фильтра с проходом по низу, частота отсечения 50 Гц.

Затем был рассчитан спектральный тензор. Для расчета тензора полученные данные были подвергнуты обработке по алгоритму FFT с целью исключения тренда. Обработка проводилась по последовательным временным окнам. Длина окон задавалась как минимум по второй степени, что необходимо для получения дискретизации частот  $r_f = 0,05$  Гц. Таким образом, с учетом того, что частота сигнала  $f_c = 500$  Гц, получаем:

$$n = 2^{\lceil \log_2(f_c/r_f) \rceil + 1} = 2^{14} = 16\,384 \text{ значения для каждого временного окна.}$$

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Число временных окон, необходимых для получения спектра сигналов, зависит от самих сигналов. Экспериментаторы старались добиться наложения последовательных временных окон в 10-15% длины каждого окна, что соответствует примерно 2000 значений. После этого спектры были поделены на  $f^4$ , что позволило уравновесить увеличение интенсивности нагружения, пропорциональной  $f^2$ .

Была выбрана система координат: ось  $x$  по направлению восток-запад, ось  $y$  по направлению север-юг, ось  $z$  перпендикулярно им. В качестве точки отсчета был выбран угол фундамента. На основании этого были определены сигналы датчиков ускорения, позволяющие определить перемещение по трем осям жестких плоскостей, соответствующих двум рассматриваемым уровням. Из спектрального тензора экспериментальных данных ускорения путем предварительного и последующего умножения для псевдоинверсии матрицы расположения приборов, был получен спектральный тензор перемещений плоскостей на уровнях размещения приборов.

### *1.3 Первая серия экспериментов*

#### Генератор вибраций на уровне перекрытия (уровень 1) с северного фасада, возбуждение север-юг

В этой серии экспериментов (результаты см. в первой части настоящего отчета) нагрузка прикладывалась с северной стороны на уровне первого перекрытия. В первых двух экспериментах ускорение составляло  $\pm 4 \text{ м/с}^2 (\cong 0,4 \text{ g})$ , во вторых двух экспериментах —  $\pm 5 \text{ м/с}^2 (\cong 0,5 \text{ g})$ .

При обработке результатов было выявлено несимметричное поведение конструкции относительно плоскости, проходящей через центр источника колебаний перпендикулярно северному фасаду, что, скорее всего, объясняется асимметрией конструкции, т. е. наличием с восточной стороны выгородки для лестницы. Точка наибольшего напряжения — конек кровли с южной стороны. В этой точке в ходе двух последних экспериментов, когда частота колебаний достигла 20 Гц, были зарегистрированы максимальные значения ускорения —  $\pm 5 \text{ м/с}^2 (\cong 0,5 \text{ g})$ . Кроме того, в ходе первого и третьего экспериментов при приложении максимальной нагрузки 18,2 кН, что соответствует частоте вращения генератора вибраций 20 Гц, в районе 16-17 Гц была выявлена резонансная частота.

Из результатов замера с помощью лазерного вибromетра вытекает, что в ходе второго эксперимента перемещение в точке отражения лазерного луча составило 0,132 мм.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

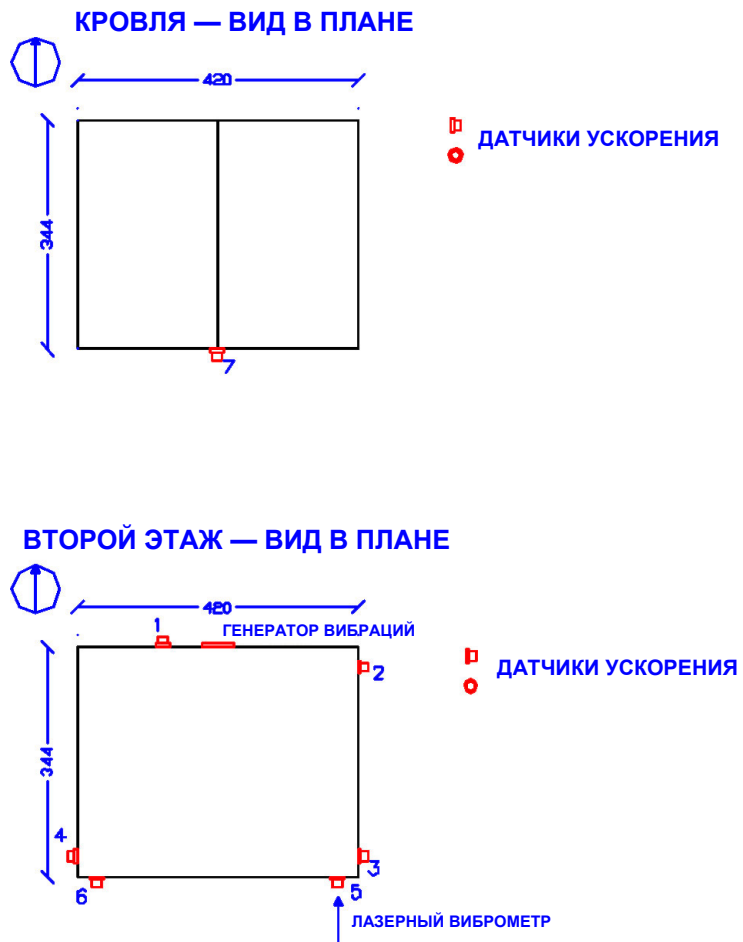


Рис. 1.1 — Расположение приборов (вид в плане)

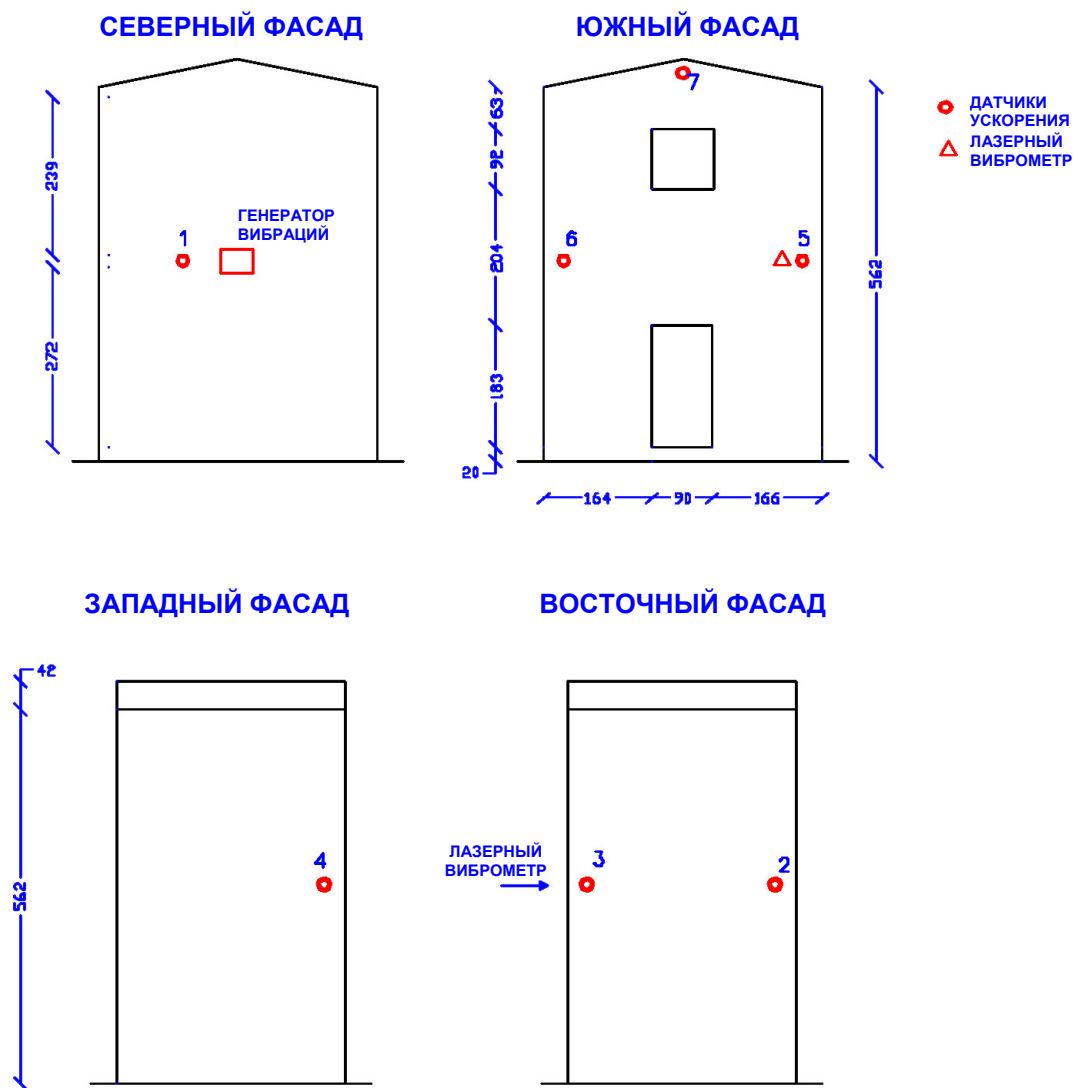


Рис. 1.2 — Расположение приборов (фасады)

### 1.3.1 Обработка экспериментальных данных

Обработке подвергнуты данные, полученные в экспериментах 1 и 3. На графиках синяя кривая — данные для уровня 1, зеленая — для уровня 2.

#### Эксперимент № 1

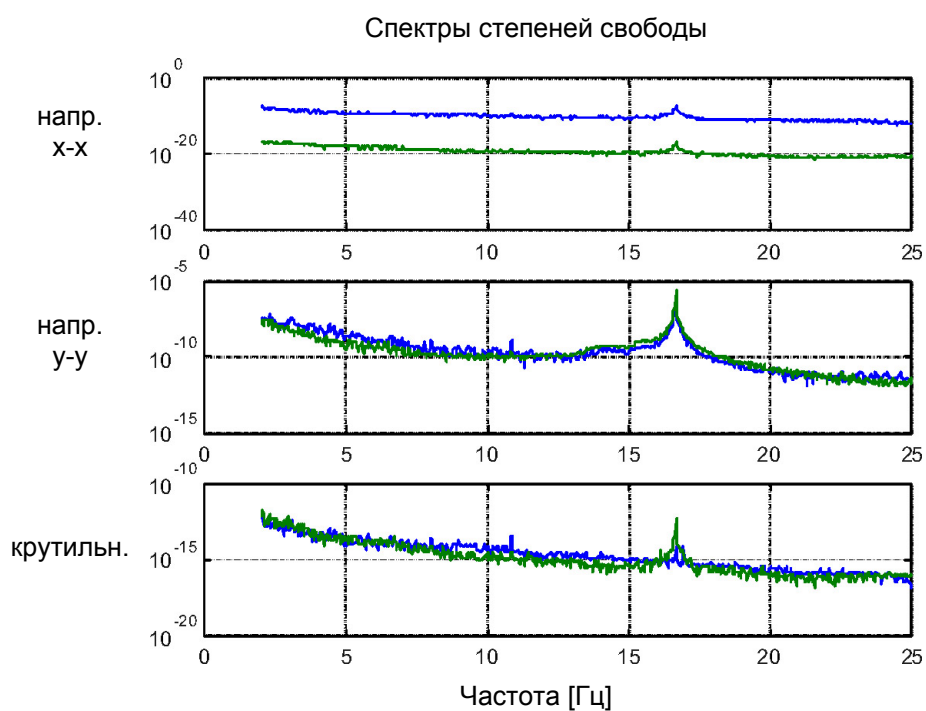


Рис. 1.3 — Спектры перемещений плоскости в направлениях В-З, С-Ю и крутильных перемещений на двух уровнях, где установлены приборы

Эксперимент № 2

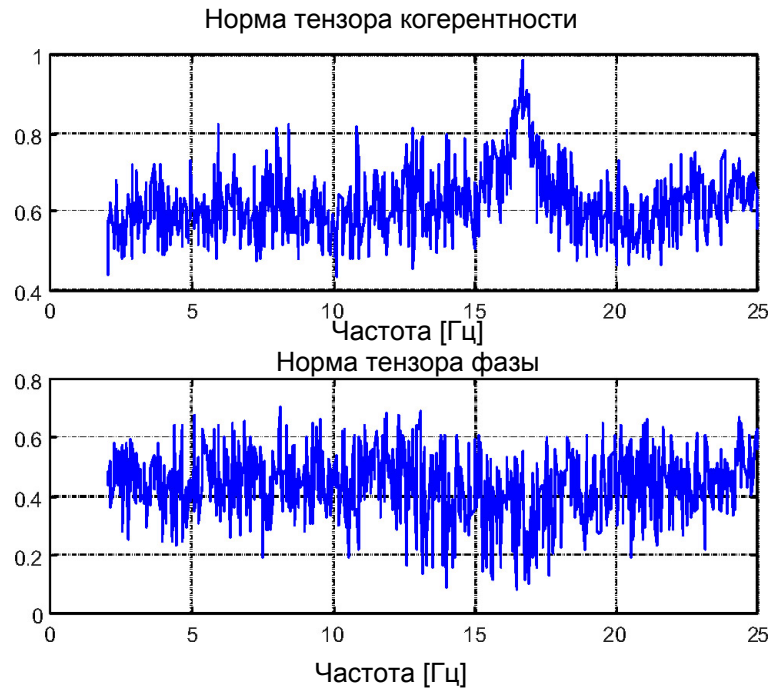


Рис. 1.4 — *Норма тензора фазы и тензора когерентности сигналов в зависимости от частоты*

По результатам анализа перемещений плоскости выявлен пик при частоте, близкой к 16,3 Гц. Наличие резонанса подтверждается тем, что норма тензора когерентности вблизи указанной частоты практически равна 1, а норма тензора фазы близка к нулю.



Эксперимент № 3

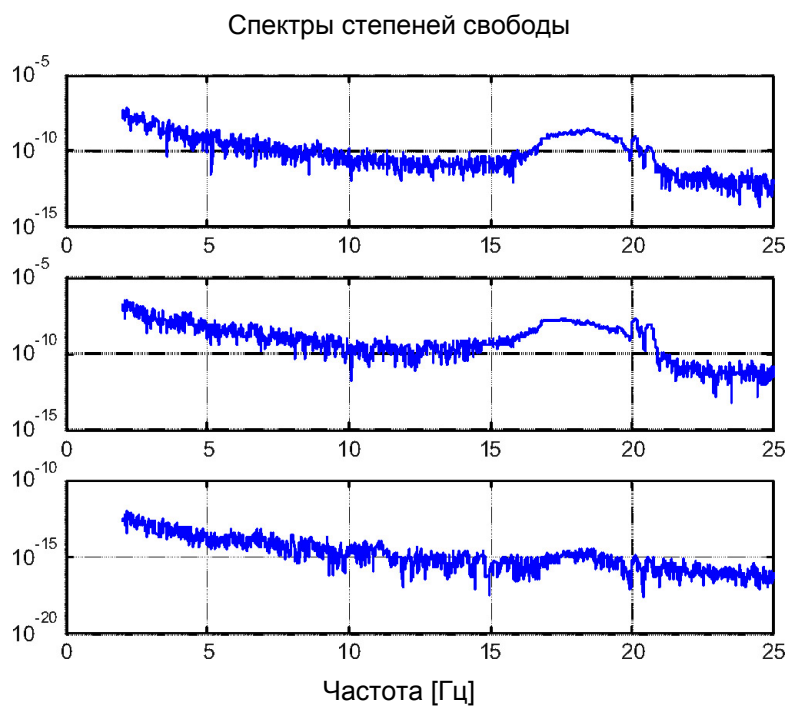


Рис. 1.5 — Спектры перемещений плоскости в направлениях В-З, С-Ю и крутильных перемещений на уровне 1

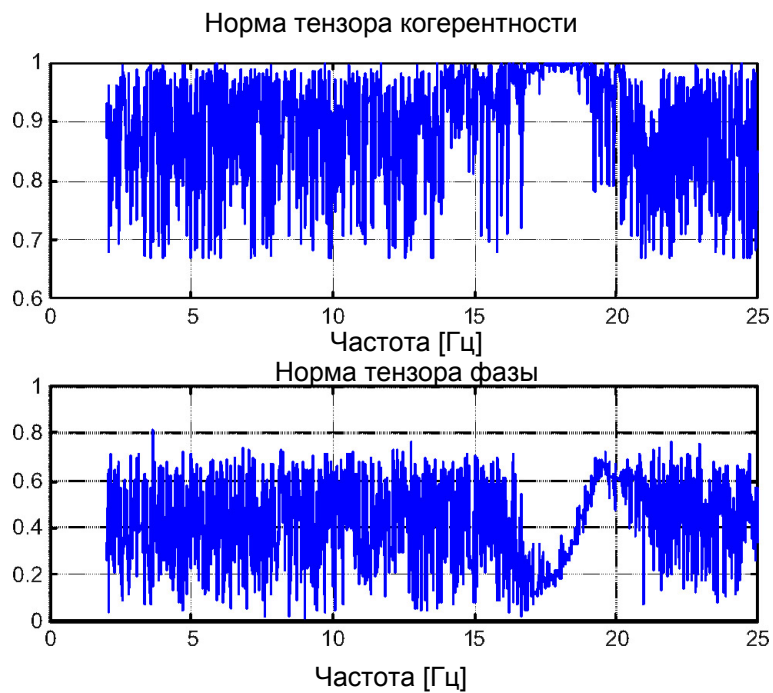


Рис. 1.6 — Норма тензора фазы и тензора когерентности сигналов в зависимости от частоты

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Результаты эксперимента № 3 подтвердили данные, полученные в ходе эксперимента № 1. Особый интерес представляет анализ графика направления колебаний, полученного из отношения значений спектральной плотности ускорений по направлениям С-Ю и В-З (см. рис. 7).

Видно, что до значений частоты 16-17 Гц конструкция вибрирует по направлению С-Ю (параллельно возбуждению), а при дальнейшем росте частоты направление вибрации несколько изменяется, т. е. имеет место вибрация по направлению В-З.

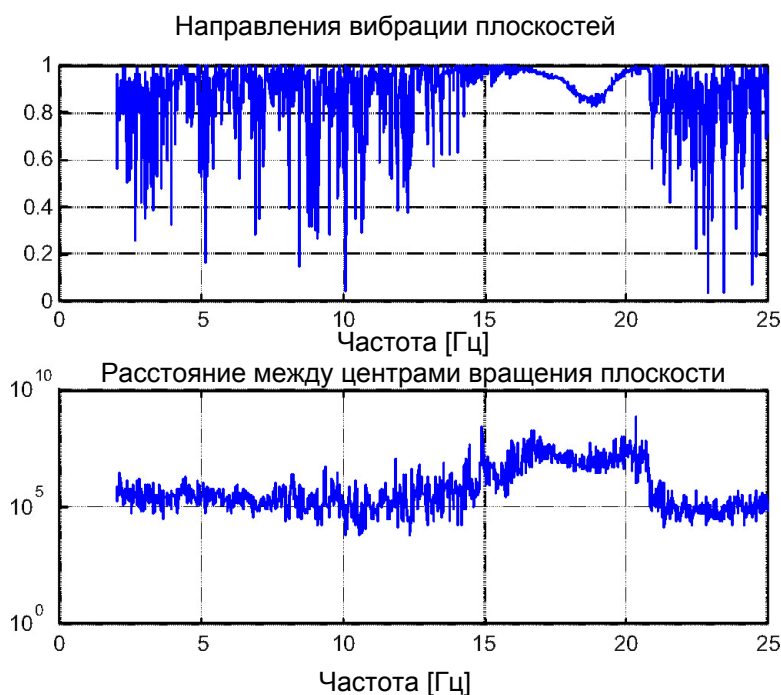


Рис. 1.7 — Направление колебаний уровня 1 на различных частотах (0 — направление В-З, 1 — направление С-Ю)

Отсюда вытекает, что в данном диапазоне частот конструкция особо чувствительна к поперечно направленным колебаниям. Вполне можно предположить, что возбуждение, вырабатываемое генератором вибраций, направлено не строго по линии С-Ю, а несколько смещено. Такое смещение не оказывает существенного влияния на направление колебаний конструкции, если последняя не обладает особой чувствительностью к колебаниям по направлению В-З. Такая чувствительность может, в частности, проявляться вблизи резонансных частот. Отсюда можно заключить, что в диапазоне от 17 Гц до 20 Гц (максимальная частота генератора вибраций) имеет место резонансная частота по направлению В-З.

### *1.4 Вторая серия экспериментов*

#### Генератор вибраций на коньке северного фасада, возбуждение север-юг

Ввиду того, что источник вибраций находился на уровне кровли, а направление вибраций было тем же, что и в первой серии экспериментов, были получены более высокие значения ускорения и перемещения. В первых трех экспериментах данной серии датчик ускорения, размещенный непосредственно на генераторе вибраций, зарегистрировал максимальное значение ускорения  $\pm 9 \text{ м/с}^2$  ( $\cong 0,9 \text{ g}$ ), а датчик на коньке южного фасада —  $\pm 7 \text{ м/с}^2$  ( $\cong 0,7 \text{ g}$ ). В следующих трех экспериментах датчик № 7 (подвергавшийся наибольшим вибрациям) зарегистрировал ускорение  $\pm 8 \text{ м/с}^2$  ( $\cong 0,8 \text{ g}$ ). В данной серии экспериментов также было выявлено несимметричное поведение конструкции относительно плоскости, проходящей через источник колебаний перпендикулярно северному фасаду, при приложении возбуждения к северному фасаду (конструкция вела себя так же, как и в первой серии экспериментов). В ходе данной серии многократно регистрировалось значительное усиление реакции конструкции, что свидетельствует о близости к возможным резонансным частотам. В частности, в ходе экспериментов №№ 4, 5 и 6 перемещение конструкции в точке отражения луча лазерного виброметра составило 0,370 мм.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

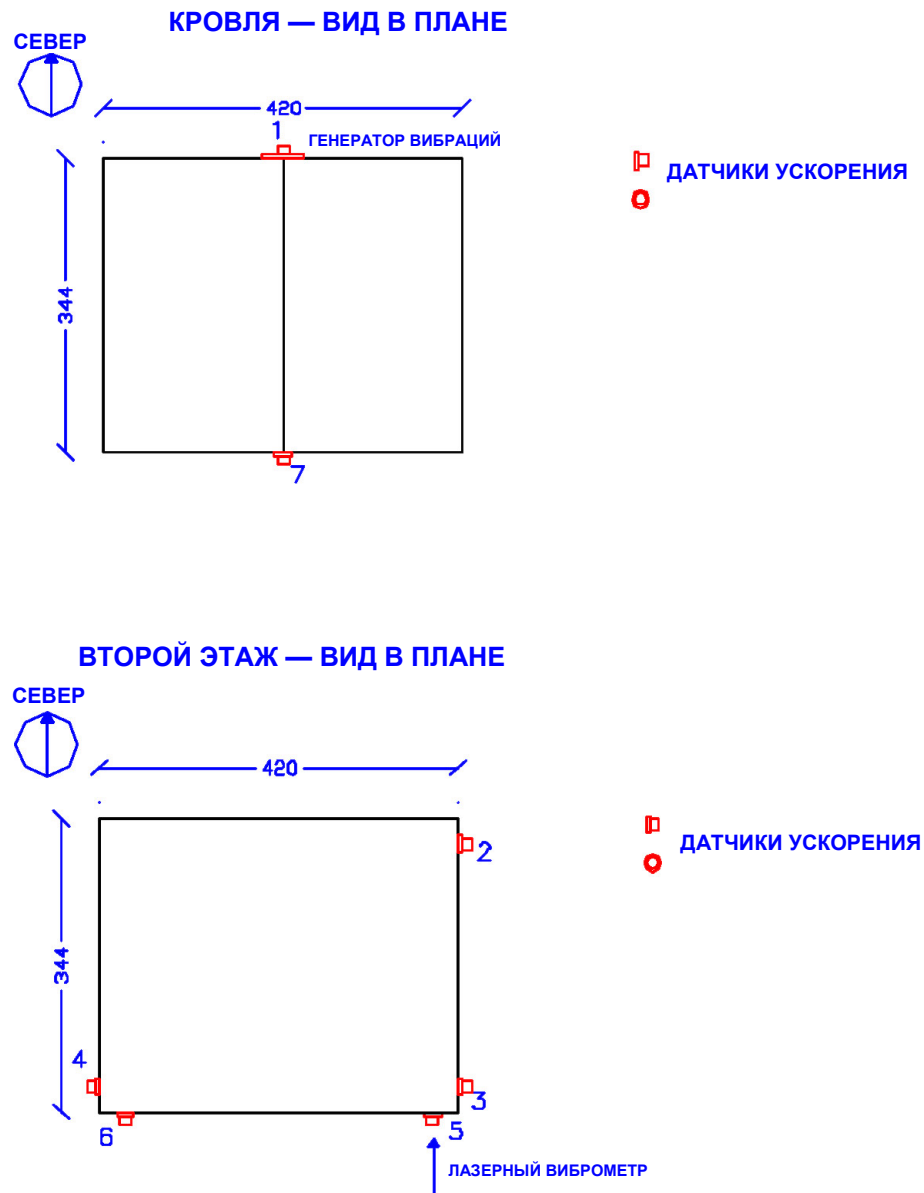


Рис. 1.8 — Расположение приборов (вид в плане) — первая группа экспериментов, возбуждение север-юг

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

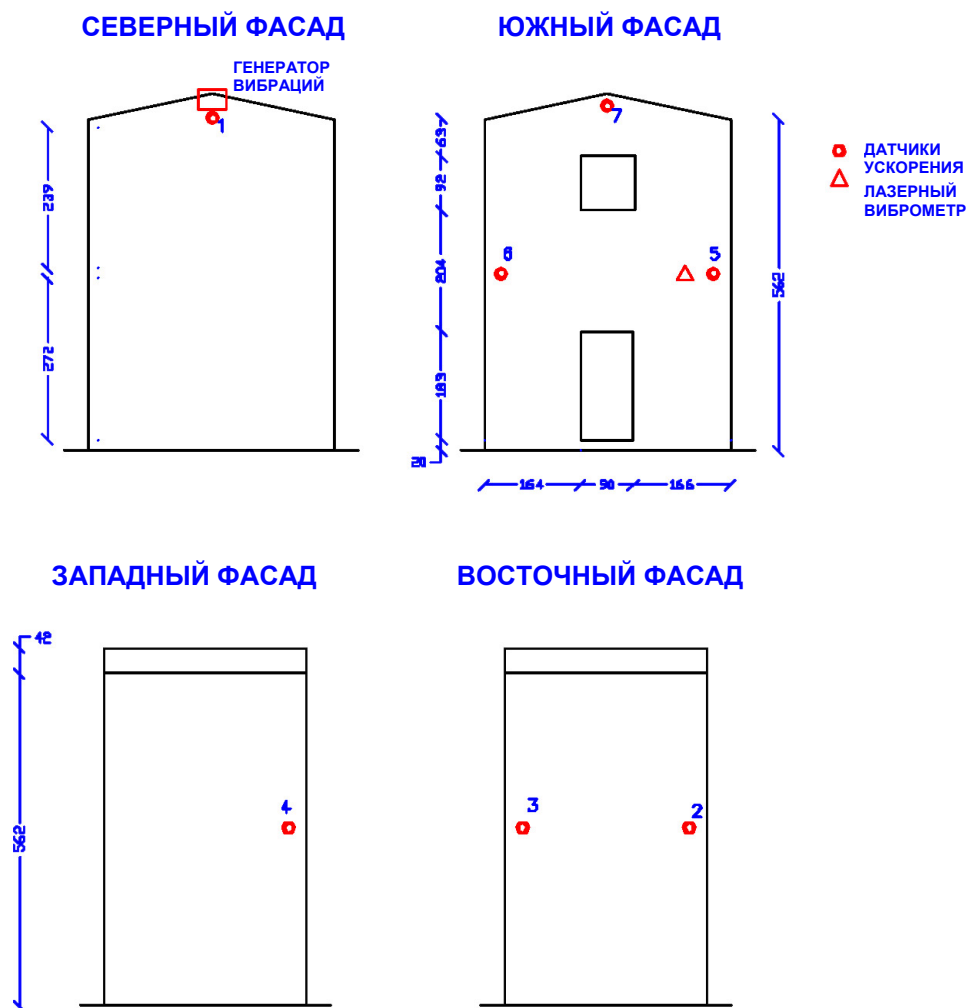


Рис. 1.9 — Расположение приборов (фасады) — первая группа экспериментов, возбуждение север-юг

Генератор вибраций на линии свеса кровли восточного фасада, возбуждение восток-запад

В данном случае генератор вибраций был расположен таким образом, чтобы не создавались крутильные нагрузки на конструкцию (конструкция симметрична относительно плоскости, проходящей через источник вибраций и включающей линию направления вибраций). В первых трех экспериментах датчик ускорения, размещенный непосредственно на генераторе вибраций, зарегистрировал максимальное значение ускорения около  $\pm 10 \text{ м/с}^2$  ( $\cong 1 \text{ g}$ ), а датчики на кровле с восточной стороны —  $\pm 6 \text{ м/с}^2$  ( $\cong 0,6 \text{ g}$ ). В ходе эксперимента № 10 была выявлена возможность наличия резонансной частоты в диапазоне 16-17 Гц.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

В данном диапазоне виброметр зарегистрировал перемещение в 0,232 мм, в то время как при частоте 20 Гц значение перемещения составило 0,169 мм.

По результатам экспериментов отмечается асимметричное поведение конструкции: в точках установки датчиков положительные и отрицательные значения ускорения не равны по модулю. В частности, значения ускорений, снятые с помощью датчика № 5 в ходе эксперимента № 7, находятся в интервале от  $-5 \text{ м/с}^2$  до  $+7 \text{ м/с}^2$ .

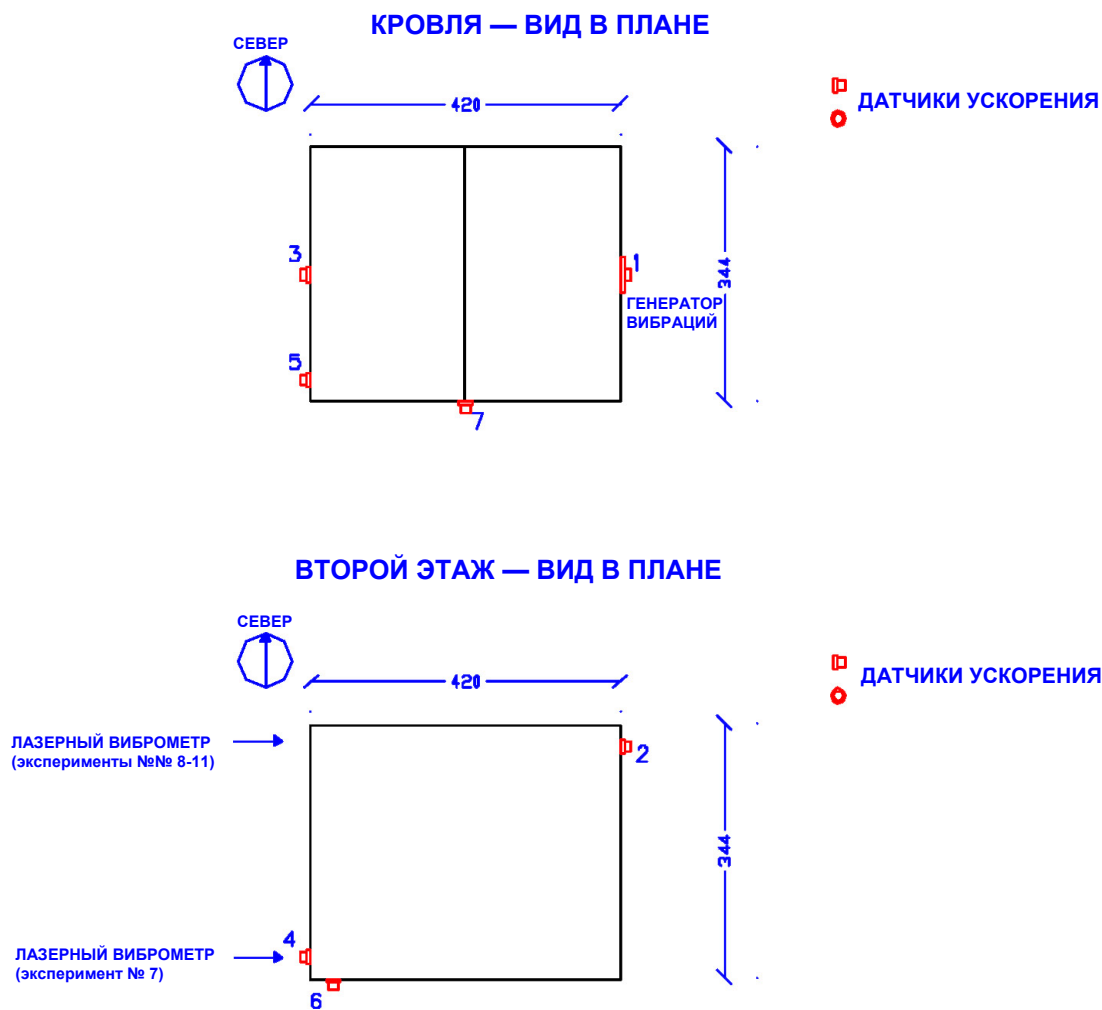


Рис. 1.10 — Расположение приборов (вид в плане) — вторая группа экспериментов, возбуждение восток-запад

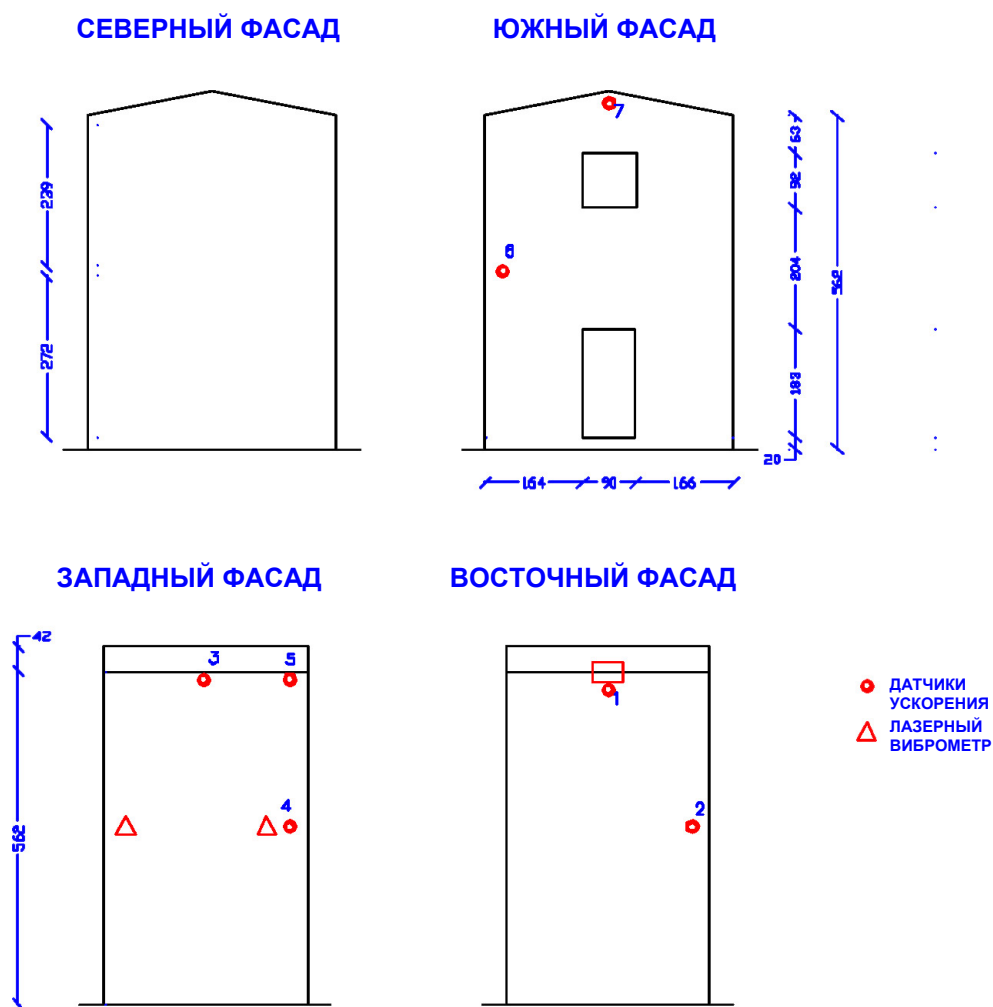


Рис. 1.11 — Расположение приборов (фасады) — вторая группа экспериментов, возбуждение восток-запад

#### 1.4.1 Обработка экспериментальных данных

Обработке подвергнуты данные, полученные в экспериментах 10 и 11 (возбуждение по направлению восток-запад). На графиках синяя кривая — данные для уровня 1, зеленая — для уровня 2.

Эксперимент № 10

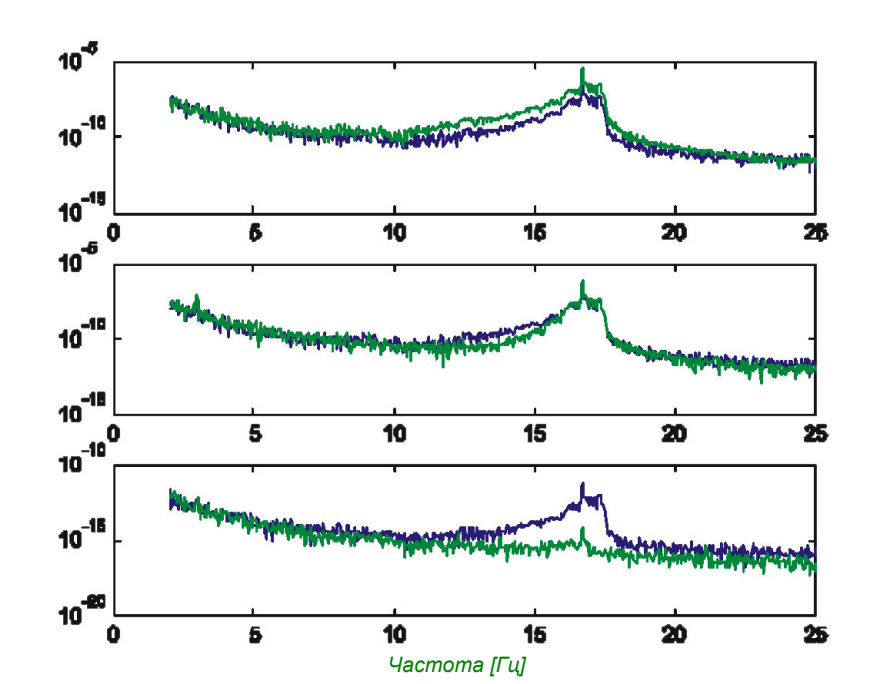


Рис. 1.12 — Спектры перемещений плоскости в направлениях В-З, С-Ю и крутильных перемещений на двух уровнях, где установлены приборы

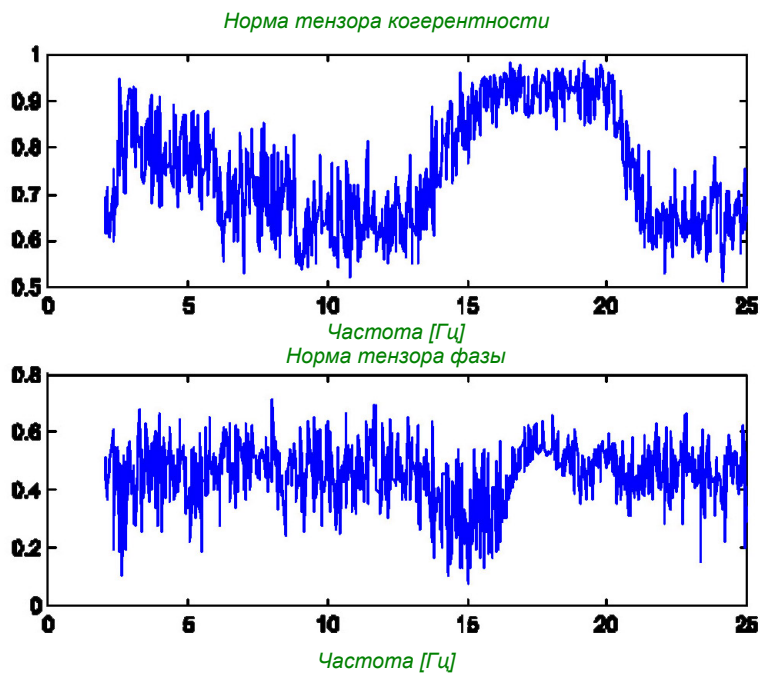


Рис. 1.13 — Норма тензора когерентности и тензора фазы



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Норма тензора когерентности (рис. 1.13) близка к 1 в диапазоне от 16 Гц до 20 Гц. При этом норма тензора фазы приобретает низкие значения при частоте 16 Гц, а также при частотах от 18 Гц до 19 Гц. Вероятно, наряду с резонансной частотой 16,3 Гц в направлении С-Ю, имеет место резонансная частота порядка 18-19 Гц в направлении В-З.

Кроме того, следует отметить пик вблизи значения частоты 20 Гц. Наличие такого пика, наряду с поведением тензоров когерентности и фазы, может свидетельствовать о еще одном повышении чувствительности конструкции к возбуждению в районе частоты 20 Гц. К сожалению, при достижении указанной частоты эксперимент был остановлен, ввиду чего данные о поведении конструкции при более высоких частотах отсутствуют.

Тем не менее, вполне вероятно, что на частотах непосредственно выше 20 Гц также имеет место резонансная частота конструкции.

### Эксперимент № 11

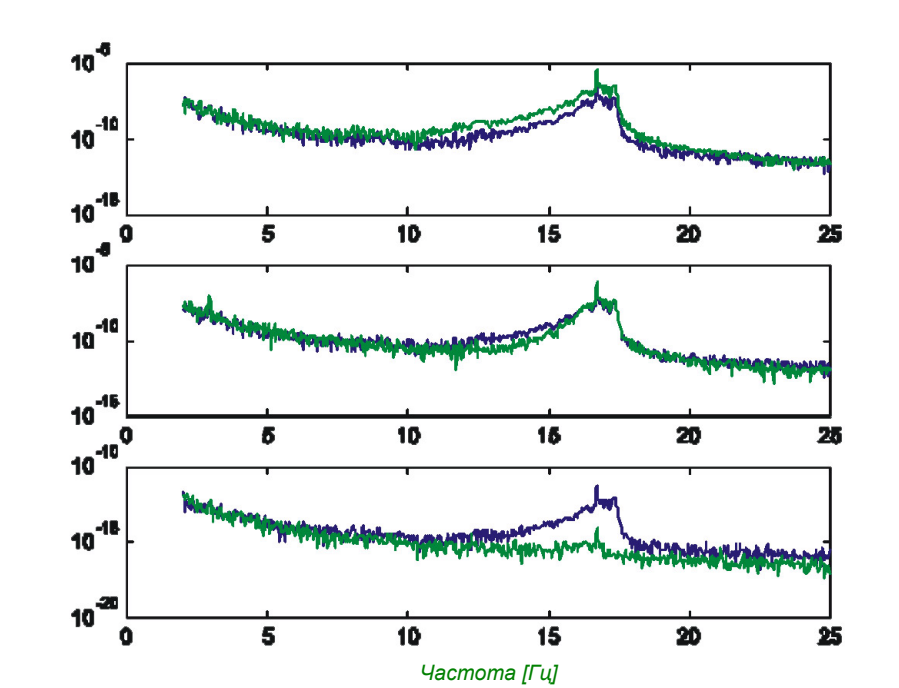


Рис. 1.14 — Спектры перемещения плоскостей двух уровней

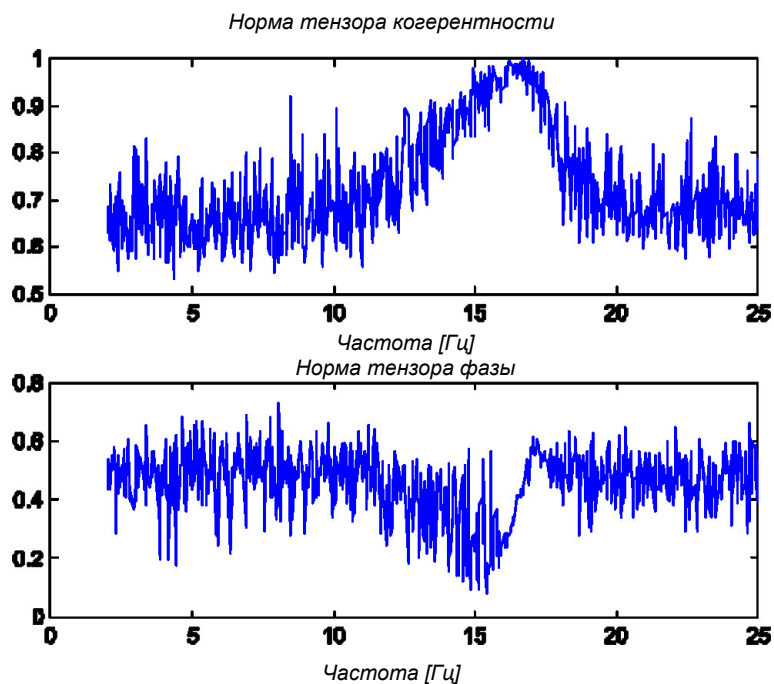


Рис. 1.15 — *Норма тензора когерентности и тензора фазы*

В данном эксперименте генератор вибраций работал с частотой около 16,7 Гц. В спектрах можно отметить пик на частоте 16,7 Гц и еще более заметный пик на частоте 16,3 Гц (по результатам анализа направлений колебаний последний пик, естественно, свидетельствует о наличии резонансной частоты по направлению север-юг).

Других резонансных частот не выявлено. Скорее всего, резонансные частоты по направлению восток-запад лежат выше 16,7 Гц.

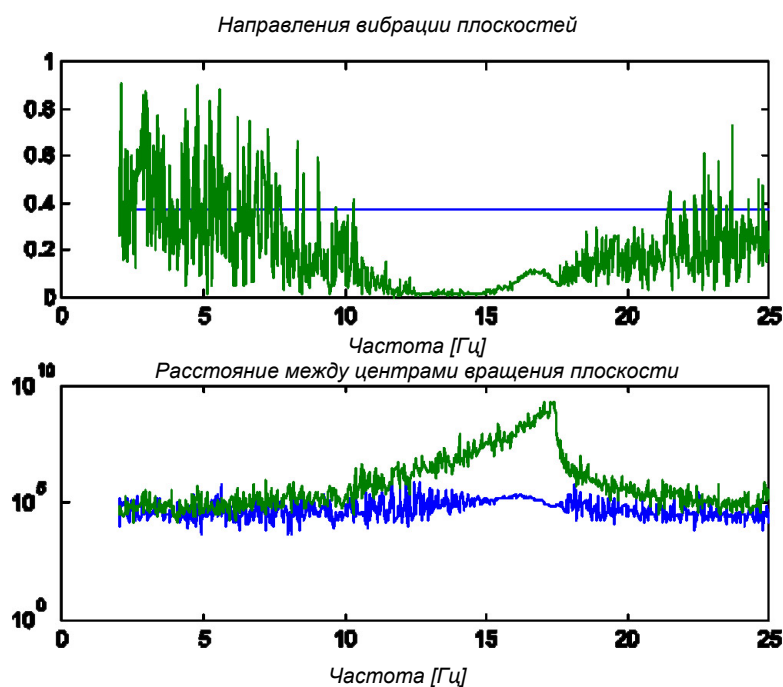


Рис. 1.16 — Направления колебаний на двух уровнях

### 1.5 Выводы

Анализ сигналов, приведенный в отчетах «Строительная система EMMEDUE — динамические испытания» от 24.11.1999 и от 04.02.2000 и результаты описанной выше обработки экспериментальных данных позволили определить некоторые характеристики динамического поведения прототипа.

В эксперименте получены достаточно высокие значения ускорений, что свидетельствует о способности строительной системы противостоять динамическим воздействиям. При этом следует учесть, что достигались значения ускорения от 0,5 g до 1 g, что соответствует землетрясениям высокой интенсивности: 11-12 баллов по шкале Меркалли-Каньяни-Зибберга, 9-11 баллов по шкале Рихтера.

Небольшая амплитуда свободных колебаний системы и явное поглощение вибраций свидетельствуют о достаточной способности рассеивать энергию, в том числе в зоне пластичной деформации, за счет вязкого демпфирования.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Была выявлена первая частота собственных колебаний конструкции — 16,3 Гц в направлении север-юг. Кроме того, возможно, имеют место другие собственные частоты в диапазоне от 18 Гц до 20 Гц.

Характеристики использованного в эксперименте источника колебаний не позволили провести исследование для частот выше 20 Гц. Зарегистрированные усиления, наряду с приведенными выше выводами, позволяют предположить наличие собственной частоты по направлению восток-запад выше 20 Гц.

Модальный анализ (см. ниже пункт 2) показал, что математическая модель прототипа, и, в частности, по направлению север-юг, обладает большей жесткостью, чем исходная модель, но это может быть обусловлено недостаточно жестким креплением прототипа к полу помещения, где проводились эксперименты. Крепление было выполнено несимметрично и, по всей вероятности, было жестче в направлении восток-запад. В этом направлении полученная в результате обработки математических данных резонансная частота располагается ближе к значению резонансной частоты, полученному в эксперименте ( $> 20$  Гц).

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОТОТИПА И КАЛИБРОВКА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Полученные в эксперименте данные были использованы для настройки конечно-элементной модели и калибровки механических характеристик элементов исследуемой конструкции. При определении динамических характеристик в первую очередь учитывалось поведение прототипа в направлении север-юг, поскольку в данном направлении конструкция более слаба. После тарировки механических параметров поведение прототипа было проанализировано на математической модели. При проведении математического анализа применялись спектры реакции конструкции (значения ускорений), предписанные Министерским декретом от 16.01.1996.

### *Конечно-элементная математическая модель*

Для построения конечно-элементной модели использовалось программное обеспечение Ansys. Конечный элемент (рис. 2.1) взят из библиотеки Shell63. Данный конечный элемент позволяет схематизировать сэндвич-панель, представляющую собой две железобетонные стенки с заключенной между ними плитой из пенополистирола.

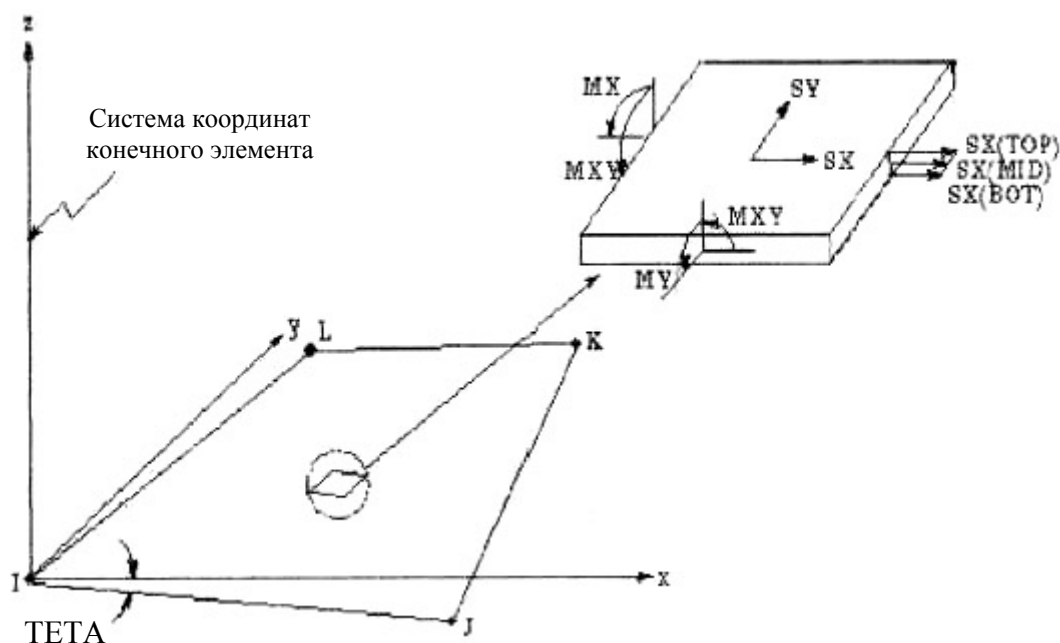


Рис. 2.1 — Конечный элемент Shell63

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Конечный элемент Shell63 — это двухмерный элемент с четырьмя узлами. Каждый узел обладает шестью степенями свободы (три степени свободы линейного перемещения и три степени свободы вращения), что позволяет проводить анализ в упругой зоне (мембрана и изгиб). Для элемента должны быть заданы обычные параметры: модули упругости в плоскости элемента ( $E_X$ ,  $E_Y$ ), тангенциальный модуль упругости ( $G_{XY}$ ), коэффициент Пуассона ( $\nu_{XY}$ ), плотность ( $DENS$ ) и толщина ( $TK$ ). Кроме того, должен быть задан специальный параметр ( $RMI$ ), позволяющий схематизировать сэндвич-панель:

$$RMI = \frac{MIR}{MISI}$$

где:

$MIR$  = момент инерции реального сечения;

$MISI$  = момент инерции предполагаемого сплошного сечения.

### Геометрическое описание модели конструкции

Геометрически математическая модель точно воспроизводит все характеристики прототипа (рис. 2.2 и 2.3).

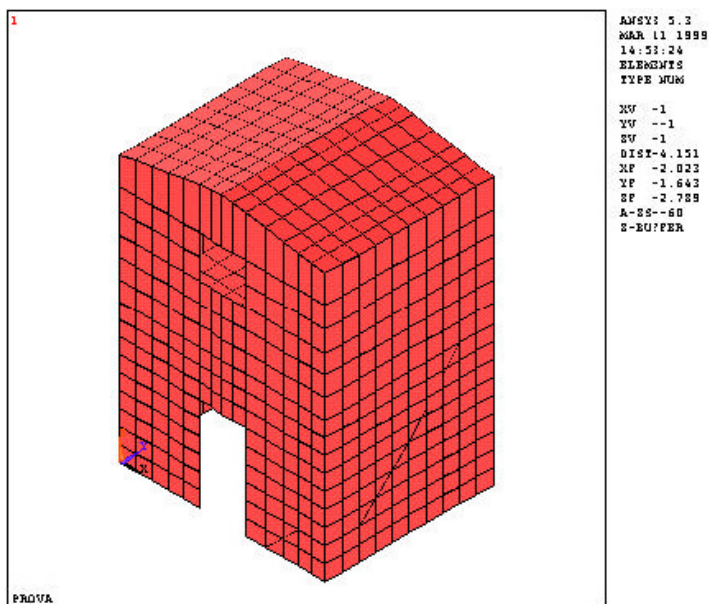


Рис. 2.2 — Конечно-элементная математическая модель (аксонометрия, вид с юго-востока)

Анализируемая конструкция была жестко закреплена по узлам нижнего сечения (в эксперименте прототип был жестко закреплен стальным крепежом на жесткой плите в лаборатории). По массе была рассчитана эквивалентная плотность, что позволило учесть при расчете собственный вес конструкции.

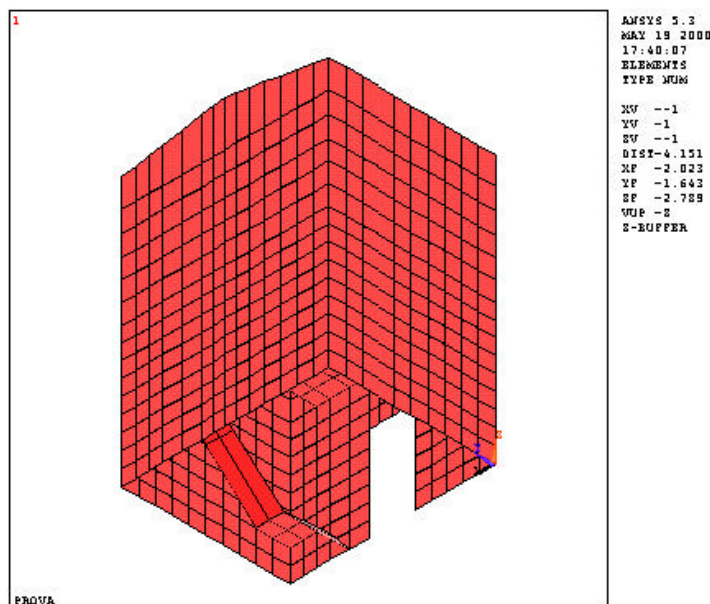


Рис. 2.3 — Конечно-элементная математическая модель (аксонометрия, вид с северо-запада)

### ***Механические характеристики панели***

Для тарировки параметров  $E_x$ ,  $E_y$  и  $G_{xy}$ , наряду с результатами математической обработки экспериментальных данных, был проведен анализ математической модели панелей. Для математического моделирования был принят конечный элемент Solid65 (рис. 2.4) из библиотеки того же программного обеспечения Ansys. Это трехмерный элемент с восемью узлами, каждый узел обладает тремя степенями свободы линейного перемещения. Кроме того, данный элемент позволяет моделировать добавление арматурных прутков в трех перпендикулярных плоскостях. За счет этого можно с точностью описать поведение слоя бетона, армированного стальной сеткой.

При анализе модели было принято, что арматура работает по двум направлениям, деформация арматуры идеально пластическая, симметричная, предел пластичности  $606 \text{ Н/мм}^2$ , модуль упругости  $210\,000 \text{ Н/мм}^2$ . Для бетона были заданы характеристики по графику, приведенному на рис. 2.5, прочность на сжатие  $57,7 \text{ Н/мм}^2$ .

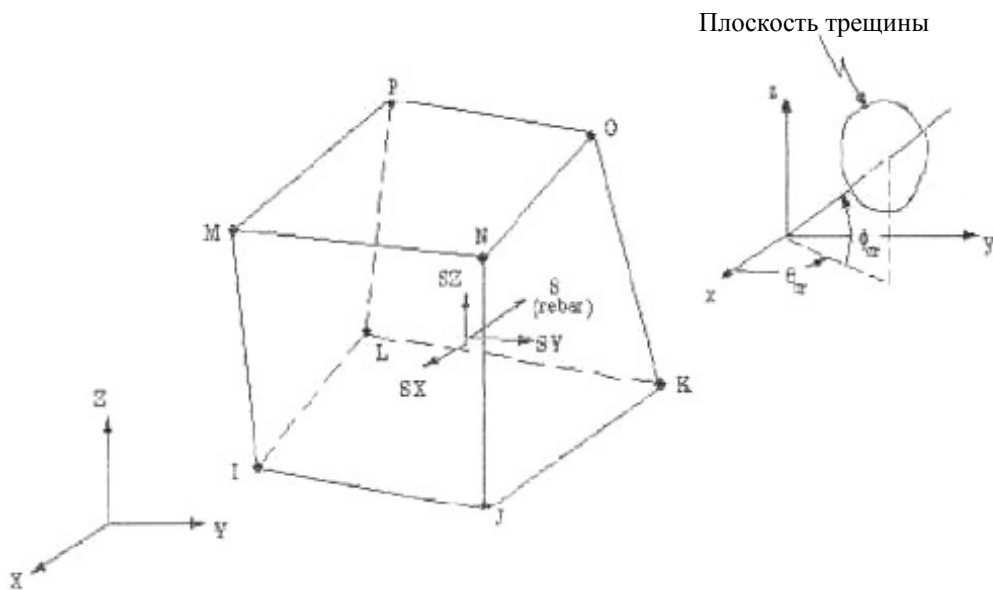


Рис. 2.4 — Конечный элемент Solid65

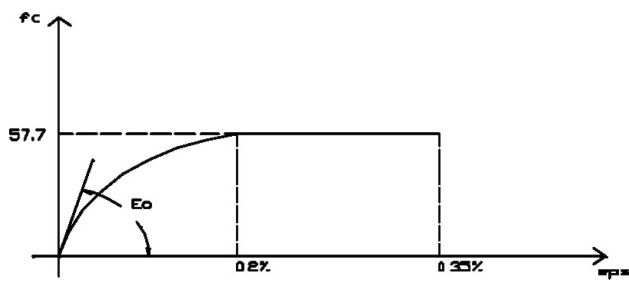


Рис. 2.5 — Кривая поведения бетона при сжатии

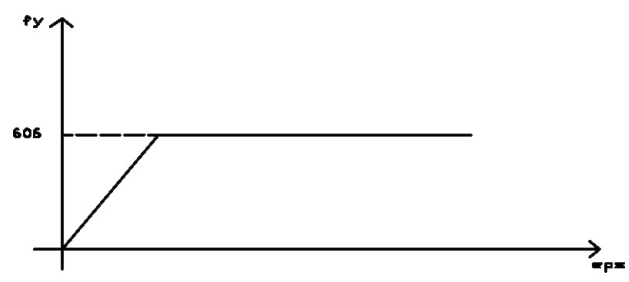


Рис. 2.6 — Кривая поведения стали (два отрезка)



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Указанное значение прочности на сжатие было получено в лаборатории при исследовании реального бетона панели. Кроме того, был задан предел прочности на растяжение, равный  $4 \text{ Н/мм}^2$ . В состав конструкции прототипа входят панели двух типов — вертикальная панель и панель перекрытия. Для панелей обоих типов были созданы точно описывающие их математические модели.

### *Вертикальная панель*

Модель состоит из двух слоев конечных элементов Solid65 (бетон с электросварной арматурной сеткой). Толщина каждого слоя составляет 3 см, расстояние между слоями 9,5 см. Ширина панели по математической модели составляет 164 см, высота 273,5 см, общая толщина 15,5 см.

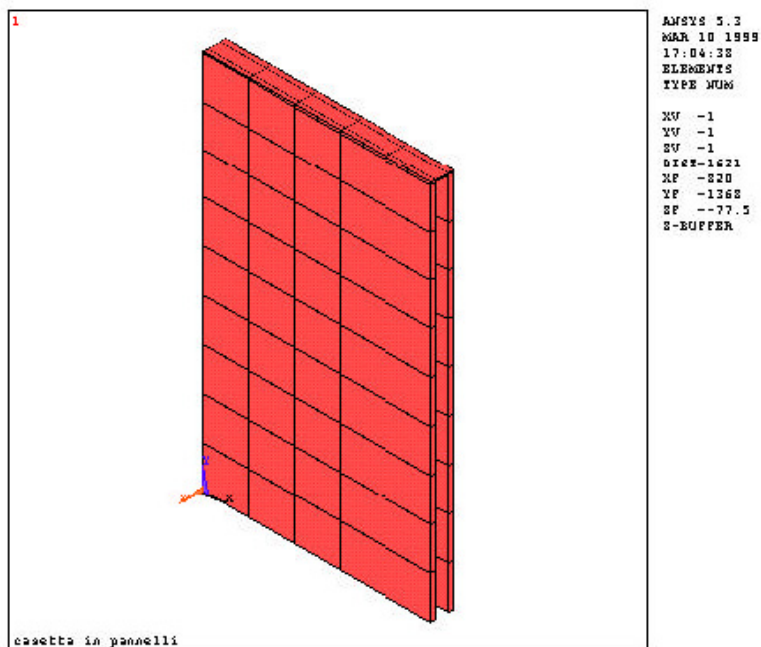


Рис. 2.7 — Конечно-элементная математическая модель вертикальной панели

### *Горизонтальная панель*

Заложенные в математическую модель (рис. 2.8) механические и конструктивные характеристики те же, что для вертикальной панели. Геометрические характеристики отличаются. Толщина верхнего слоя конечных элементов Solid65 (бетон с электросварной арматурной сеткой) составляет 4 см, нижнего 1,5 см, расстояние между слоями 11,5 см. Характеристики бетона и сетки те же, что для вертикальной панели.

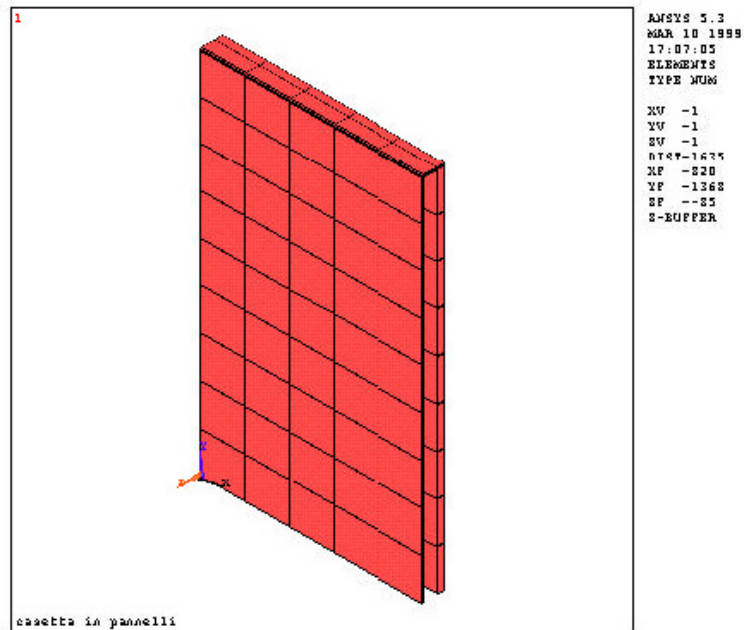


Рис. 2.8 — Конечно-элементная математическая модель горизонтальной панели

### **Определение модуля упругости ( $E_X$ , $E_Y$ ) при сжатии**

С целью определения модулей упругости  $E_x$  и  $E_y$  математическая модель вертикальной панели нагружается сверху, нагрузка равномерно распределяется по площади верхней грани. Модуль упругости рассчитывается, исходя из перемещения  $s$  верхней грани (см. рис. 2.9):

$$E = \frac{N l}{s A}$$

где:

$E$  — модуль упругости панели;

$N$  — нормально приложенная нагрузка;

$l$  — высота панели;

$s$  — вертикальное перемещение верхней грани;

$A$  — общая площадь панели.

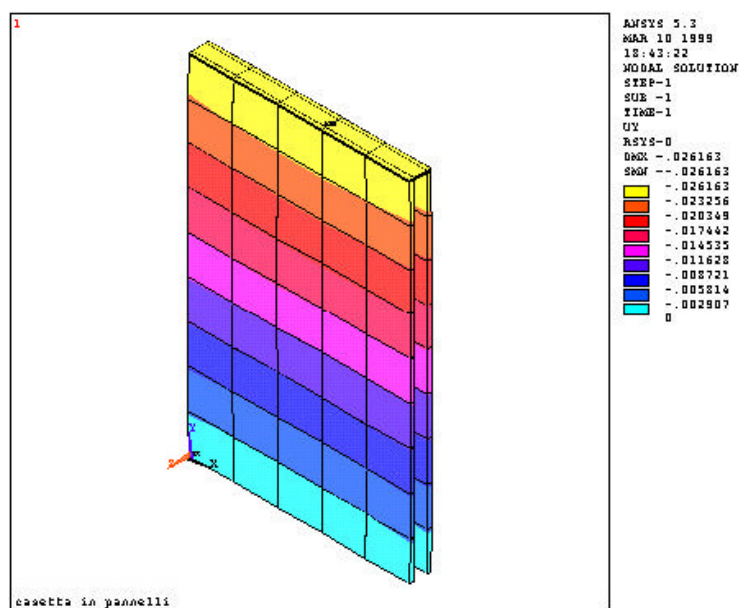


Рис. 2.9 — Вертикальная панель — перемещения

### Определение тангенциального модуля упругости (GXY)

Тангенциальный модуль упругости получаем из следующего уравнения:

$$K_0 = \frac{T}{\delta}$$

$$K_0 = \frac{G}{1,2} \frac{A}{H} \frac{1}{1 - \frac{1}{1,2} \frac{G}{E} \frac{H}{B}^2}$$

$K_0$  — тангенциальная жесткость панели;

$T$  — сила, приложенная по горизонтали;

$\delta$  — горизонтальное перемещение верхней грани панели;

$G$  — тангенциальный модуль упругости панели;

$E$  — модуль упругости панели при сжатии (получен из предыдущего вычисления).

### *Механические характеристики лестничного марша*

Поскольку механические характеристики лестницы в меньшей степени влияют на результаты моделирования, модуль упругости при сжатии был определен по следующей формуле:

$$E_{\text{escala}} = \frac{A_{\text{ner}}}{A_{\text{tot}}} E_{\text{cls}}$$

$E_{\text{escala}}$  — модуль упругости лестницы при сжатии;

$A_{\text{ner}}$  — полная площадь ребер;

$A_{\text{tot}}$  — полная площадь элемента с учетом толщины 20 см;

$E_{\text{cls}}$  — модуль упругости бетона (принят равным 21 000 Н/мм<sup>2</sup>).

Значение  $G$  определяется при постоянном отношении модулей упругости.

### *Отладка математической модели с учетом результатов эксперимента*

Под математической идентификацией конструкции понимается определение (на основе исходных и выходных данных) модели  $M$ , которая входит в определенный класс моделей  $S(M)$  и по выбранному критерию является эквивалентной по отношению к исследуемой системе.

Следует также учитывать, что при такой идентификации, когда при создании модели были использованы подтвержденные и достоверные данные, известные до проведения эксперимента, в процессе идентификации механических свойств конструкции может быть выбран один из двух подходов:

- 1) *Параметрическая идентификация*, если модель конструкции полностью определена, за исключением вектора параметров (в нашем случае, как будет показано ниже, это модули упругости панелей), которые принимаются за неизвестное.
- 2) *Непараметрическая идентификация*, то есть построение теоретической модели и затем, на основании экспериментальных данных, определение репрезентативных характеристик реального поведения конструкции.

В рассматриваемом случае мы имеем результаты проведенных в лаборатории экспериментов над прототипом и механические характеристики, предоставленные изготовителем панелей, ввиду чего был выбран путь параметрической идентификации, предполагающий определенное число итераций с последовательным уточнением результатов.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Выбор математической модели, которая позволяет наилучшим образом схематизировать поведение реальной конструкции, был сделан на основании априорно известных данных и результатов экспериментальных исследований. В качестве параметра сравнения поведения реальной конструкции и математической модели было выбрано перемещение в точке отражения луча лазерного виброметра. Приложение возбуждения к математической модели производилось аналогично воздействию генератора вибраций на реальную конструкцию. Поскольку было выявлено, что основными неизвестными параметрами являются характеристики жесткости (модули упругости панели  $E_X$ ,  $E_Y$  и  $G_{XY}$  и, как следствие, модули упругости бетона  $E$  и  $G$ ), в качестве неизвестных при идентификации были выбраны значения параметров  $E$  и  $G$ . Их значение оценивалось по минимизации процентной ошибки результатов математического анализа относительно экспериментальных результатов.

### *Описание экспериментов, результаты которых использовались для отладки математической модели*

На прототипе были поставлены две серии экспериментов (см. соответствующие отчеты):

- В первой серии экспериментов нагрузка прикладывалась с северной стороны на уровне первого перекрытия. В первых двух экспериментах ускорение составило  $\pm 4 \text{ м/с}^2$ , во вторых двух экспериментах —  $\pm 5 \text{ м/с}^2$ .
- Во второй серии экспериментов генератор вибраций сначала был установлен на коньке северного фасада, а затем — на линии свеса кровли с восточной стороны. В первом случае, как и следовало ожидать, значения вибраций и перемещений были выше, чем во втором. В первых трех экспериментах датчик ускорения, размещенный непосредственно на генераторе вибраций, зарегистрировал максимальное значение ускорения  $\pm 9 \text{ м/с}^2$ , а в трех последующих экспериментах —  $\pm 8 \text{ м/с}^2$ . При приложении возбуждений на линии свеса кровли с восточной стороны датчик, установленный непосредственно на генераторе вибраций, зарегистрировал значение ускорения  $10 \text{ м/с}^2$ .

По результатам описанных выше экспериментов были также получены значения перемещения точки отражения луча лазерного виброметра:

- перемещение при нагрузке 1200 кг (соответствует частоте 16,9 Гц), когда генератор вибраций был установлен с северной стороны на уровне первого перекрытия;
- перемещение при нагрузке 1200 кг (соответствует частоте 16,9 Гц), когда генератор вибраций был установлен на коньке северного фасада.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

В таблице приводятся полученные результаты с указанием условий проведения экспериментов.

Таблица 1 — *Сводная таблица экспериментальных данных, использованных при отладке математической модели*

Эксперимент	Частота колебаний, Гц	Приложенная нагрузка, кг	Точка размещения генератора вибраций	Измеренное перемещение
1	16,9	1200	Первое перекрытие, северная сторона	132
2	16,9	1200	Конек, северная сторона	143

### *Описание анализа математической модели*

Моделирование указанной выше нагрузки проводилось путем гармонического анализа с приложением концентрированного усилия 1200 кг при частоте колебаний 16,9 Гц. Нагрузка наращивалась постепенно, за 8 шагов.

Ниже приводятся результаты двух нагружений. Показаны нагруженные состояния по TX и TY (осевые нагрузки по горизонтали и вертикали в местной системе координат), MX и MY (изгибающие нагрузки на горизонтальной и вертикальной поверхностях элемента в местной системе координат). Кроме того, приводятся результаты расчетов по наиболее нагруженным сечениям.

### *Результаты первого анализа математической модели (генератор вибраций установлен на уровне первого перекрытия)*

Из результатов эксперимента берется значение относительного перемещения точки отражения луча лазерного виброметра, которое сравнивается со значением перемещения той же точки по результатам анализа математической модели.

На рис. 2.10 показаны перемещения элементов математической модели по оси Y (в направлении, параллельном лучу лазерного виброметра).

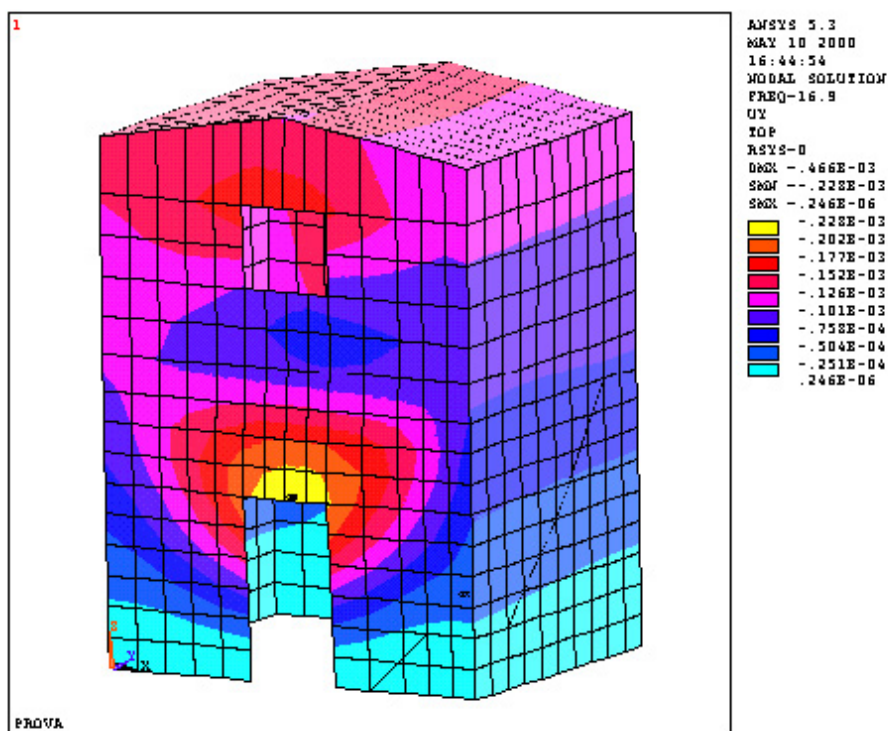


Рис. 2.10 — Перемещения по направлению Y

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

По результатам анализа математической модели перемещение точки отражения луча лазерного вибromетра составило 0,108 мм. В сравнении с перемещением той же точки, полученным в результате эксперимента (0,132 мм), разница составила 18%.

На рис. 2.11 приводится график изменения перемещения в зависимости от частоты колебаний. При анализе математической модели частота колебаний нарастала заданным порядком (см. выше). Из графика видно, что перемещение прямо пропорционально частоте, и что небольшим изменениям частоты соответствует значительное нарастание перемещения. Анализ математической модели носит более консервативный характер, нежели эксперимент: в первом случае амплитуда возбуждения постоянна во времени и равна максимальному значению, а во втором случае амплитуда нарастает пропорционально квадрату частоты.

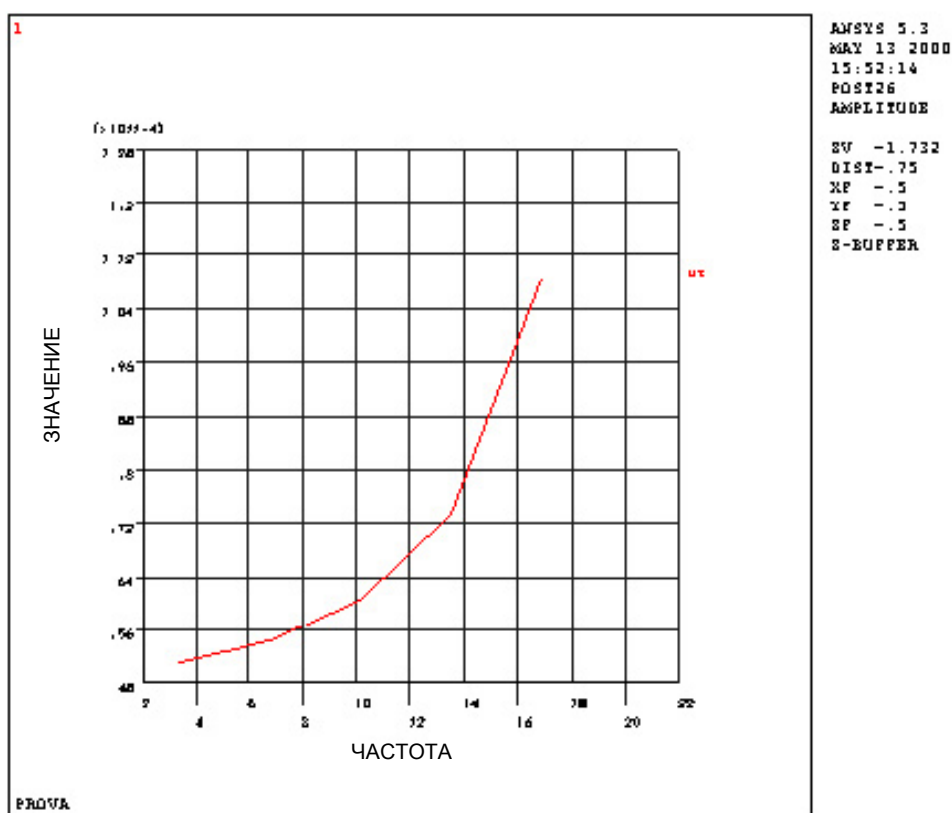


Рис. 2.11 — Зависимость перемещения от частоты



*Напряженное состояние*

На рис. 2.12-2.13 показано распределение напряжений  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_{xy}$ ,  $M_x$  и  $M_y$  (силы и моменты на единицу длины). На рис. 2.24-2.26 показаны сечения, по которым проводились расчеты, и рассматриваемые направления нагружения.

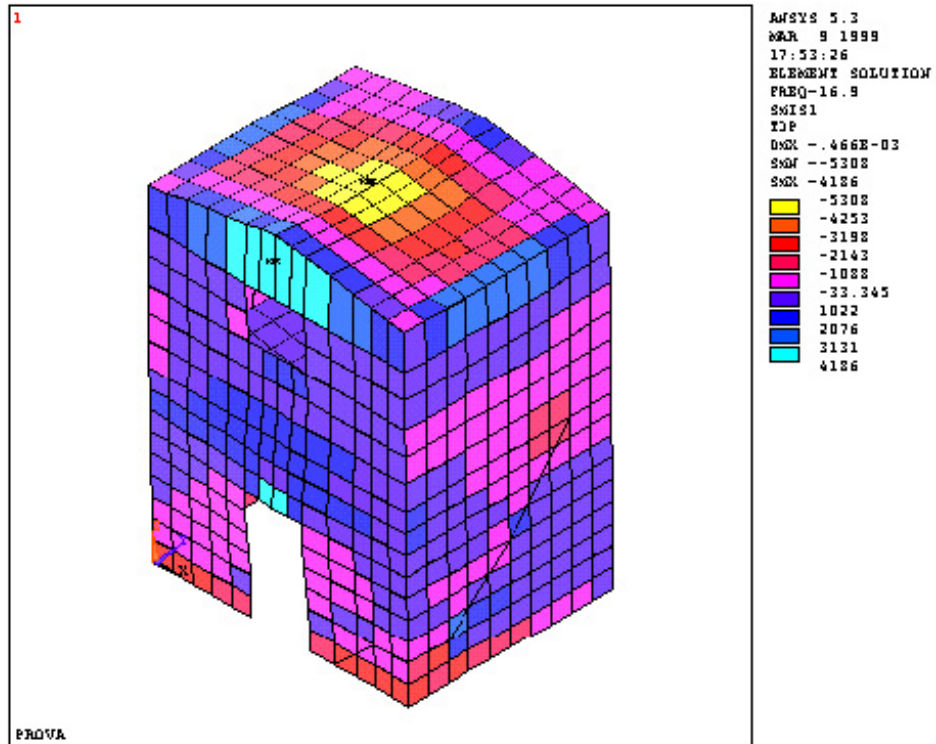


Рис. 2.12 — Напряжение  $T_x$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

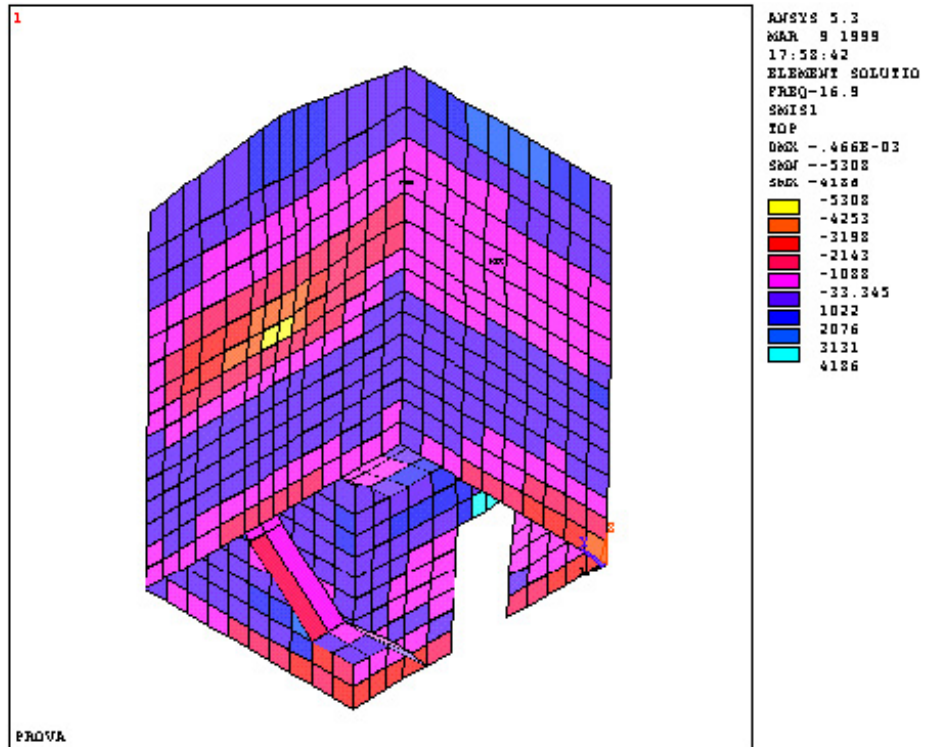


Рис. 2.13 — Напряжение  $T_x$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

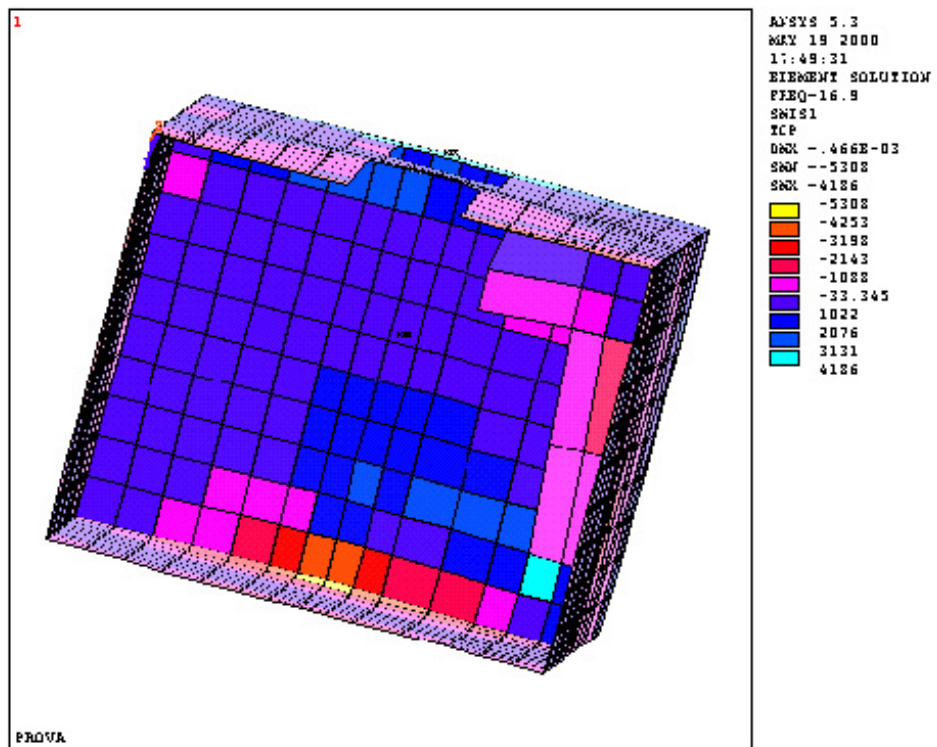


Рис. 2.14 — Напряжение  $T_x$  (аксонометрия, вид снизу)

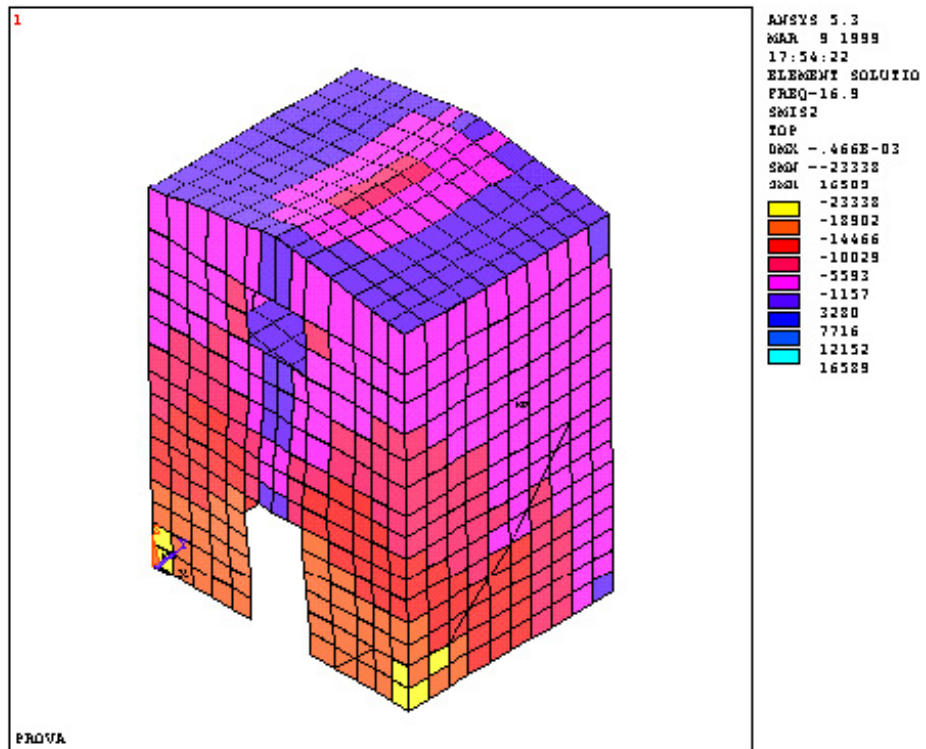


Рис. 2.15 — Напряжение  $T_{xy}$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

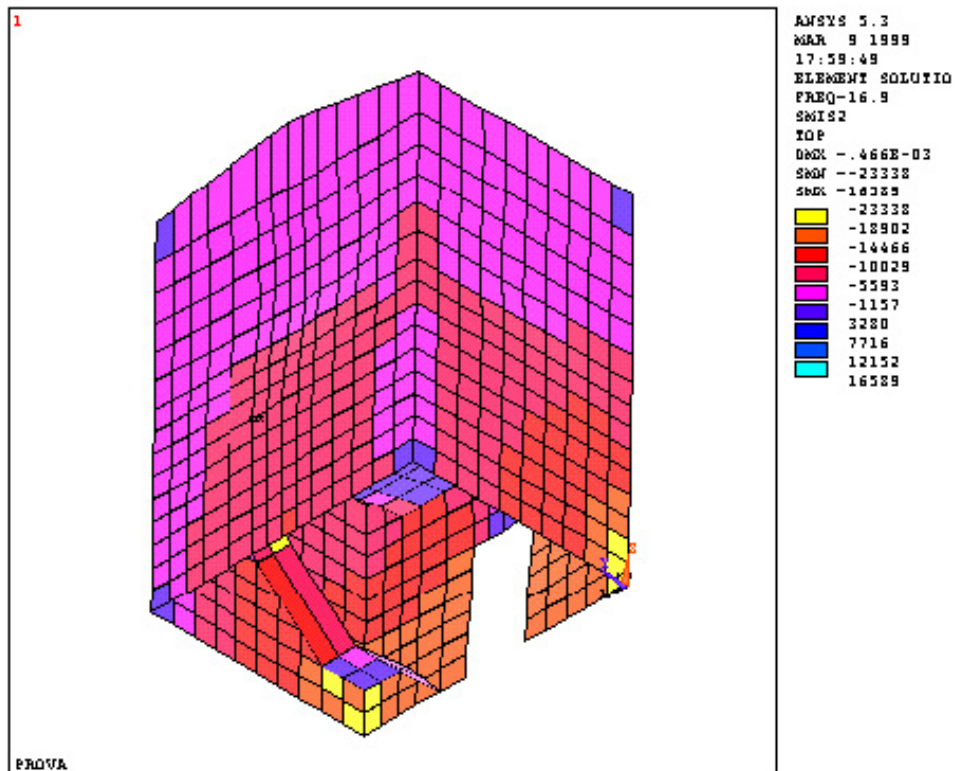


Рис. 2.16 — Напряжение  $T_{xy}$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

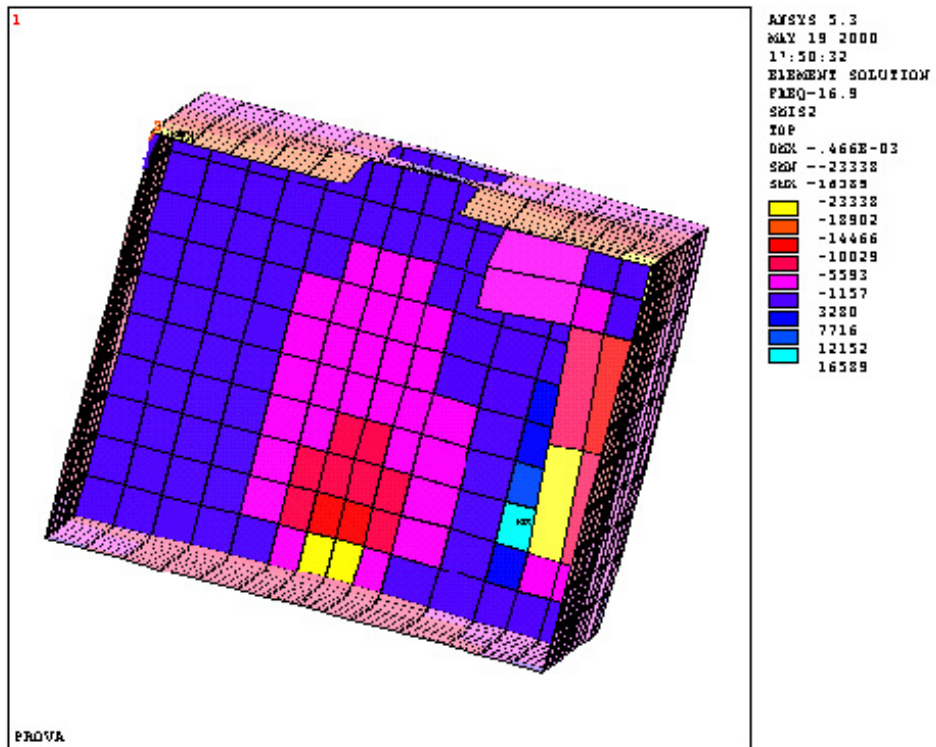


Рис. 2.17 — Напряжение  $T_z$  (аксонометрия, вид снизу)

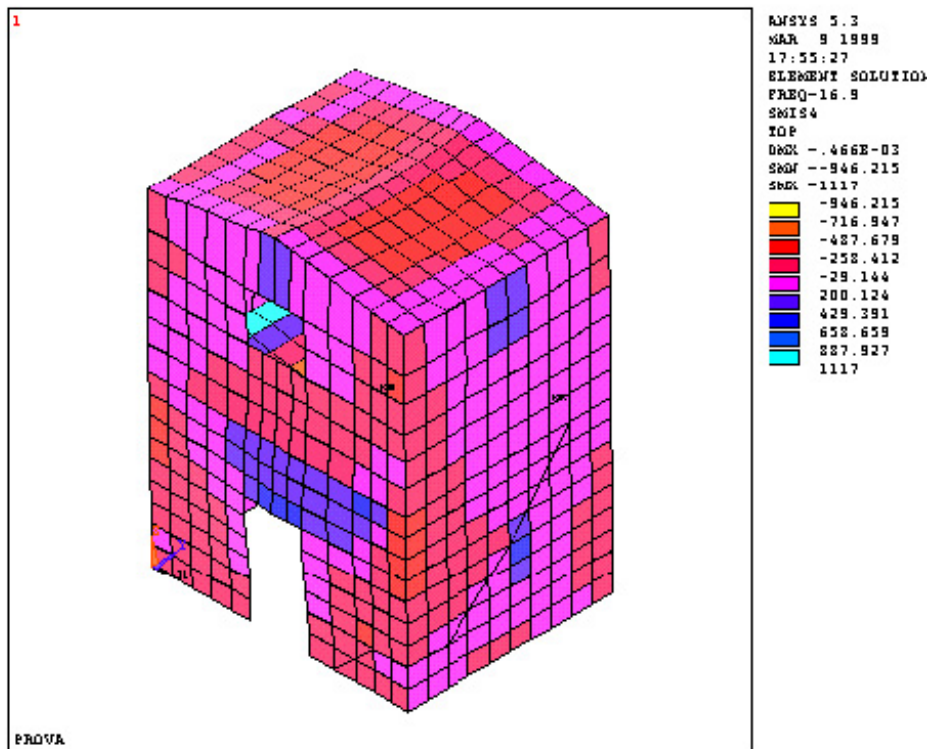


Рис. 2.18 — Напряжение  $M_x$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

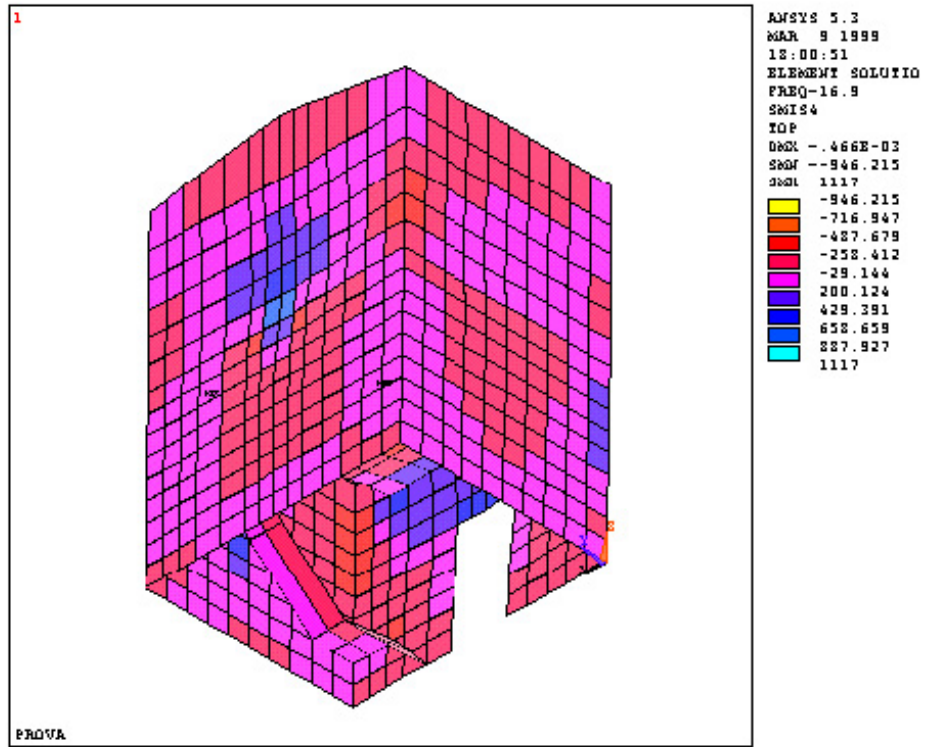


Рис. 2.19 — Напряжение  $M_X$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

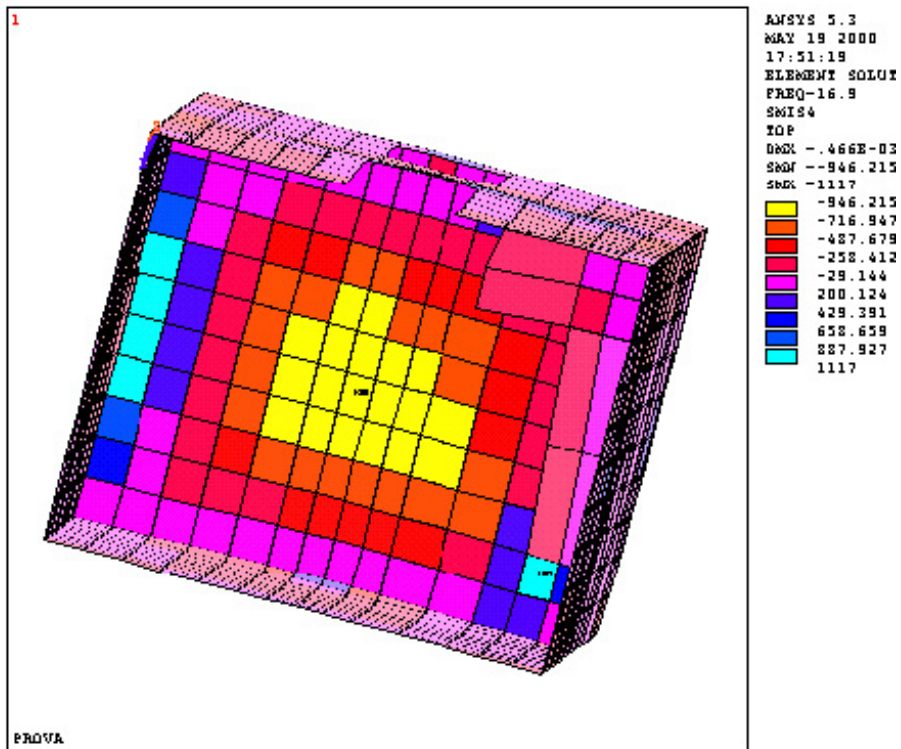


Рис. 2.20 — Напряжение  $M_X$  (аксонометрия, вид снизу)

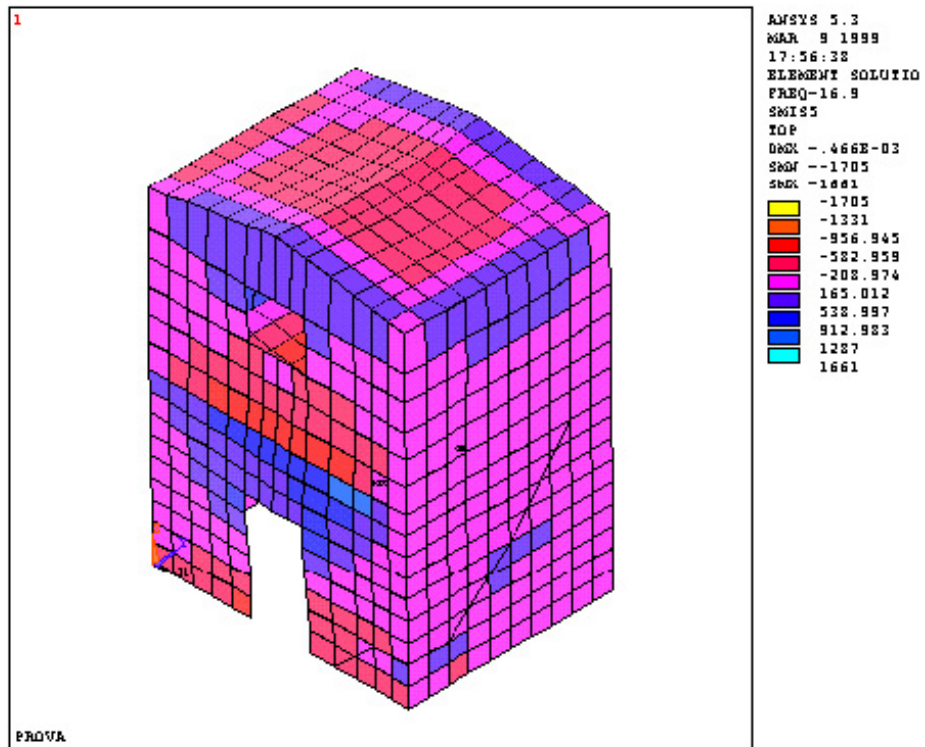


Рис. 2.21 — Напряжение MY (аксонометрия, вид с юго-востока)

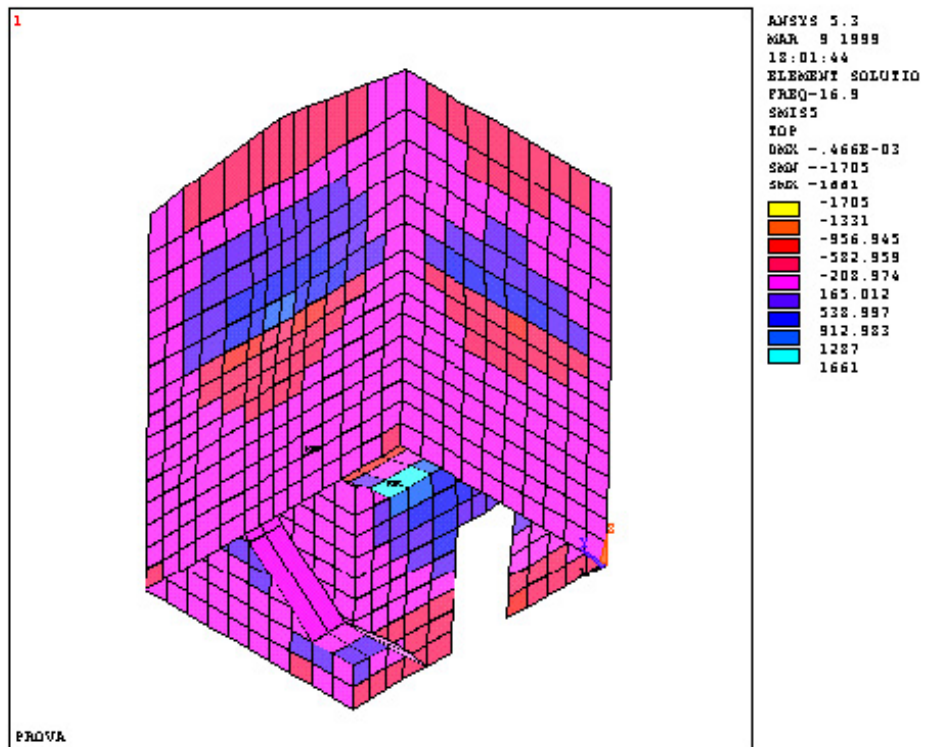


Рис. 2.22 — Напряжение MY (аксонометрия, вид с северо-запада)

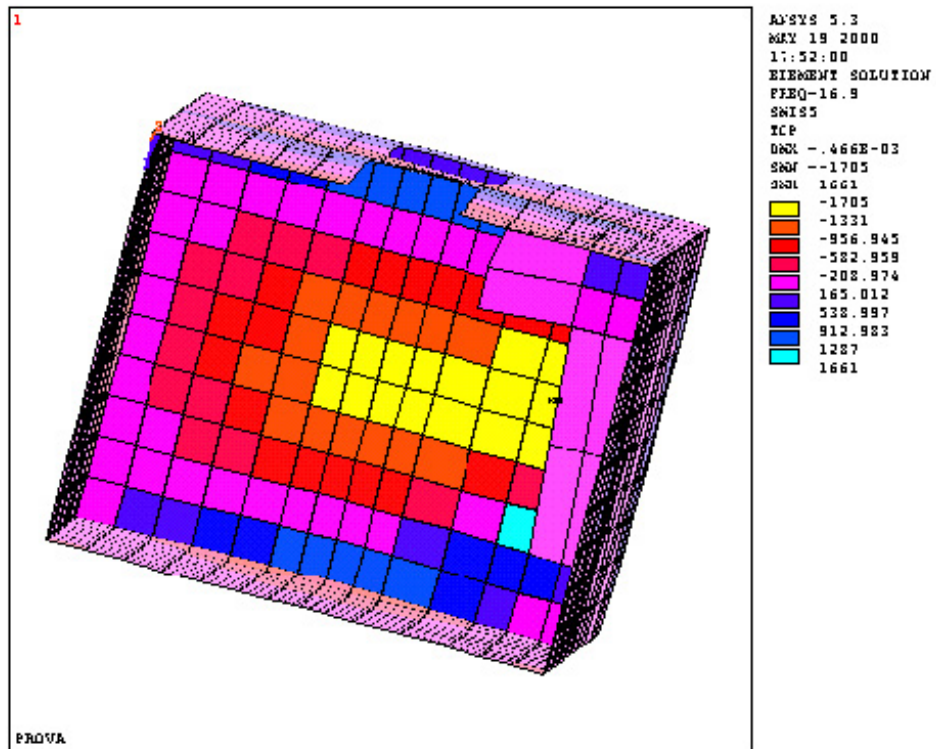


Рис. 2.23 — Напряжение  $M_Y$  (аксонометрия, вид снизу)

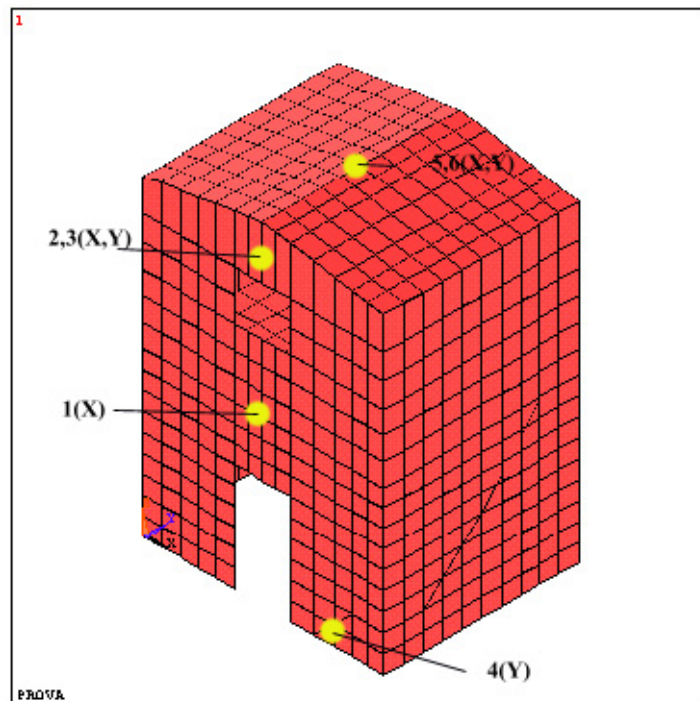


Рис. 2.24 — Зоны, для которых выполнены поверочные расчеты (аксонометрия, вид с юго-востока)

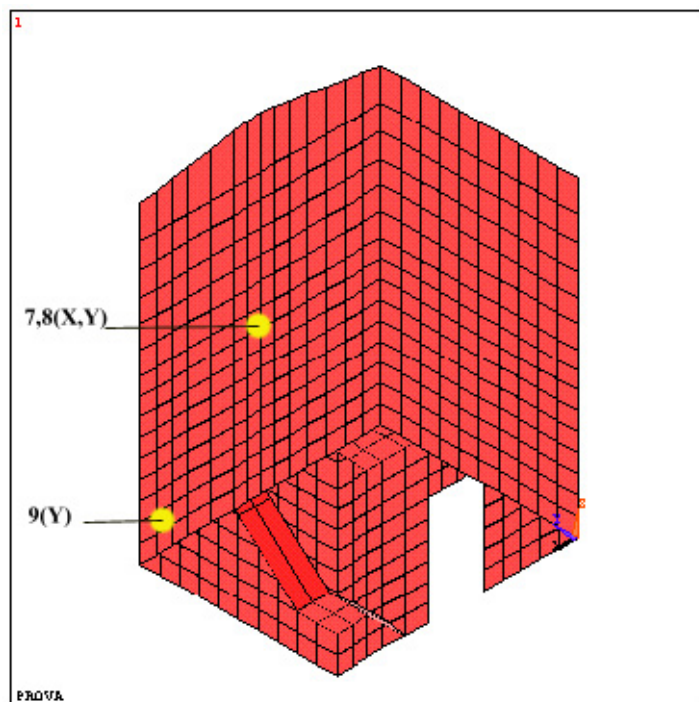


Рис. 2.25 — Зоны, для которых выполнены поверочные расчеты (аксонометрия, вид с северо-запада)

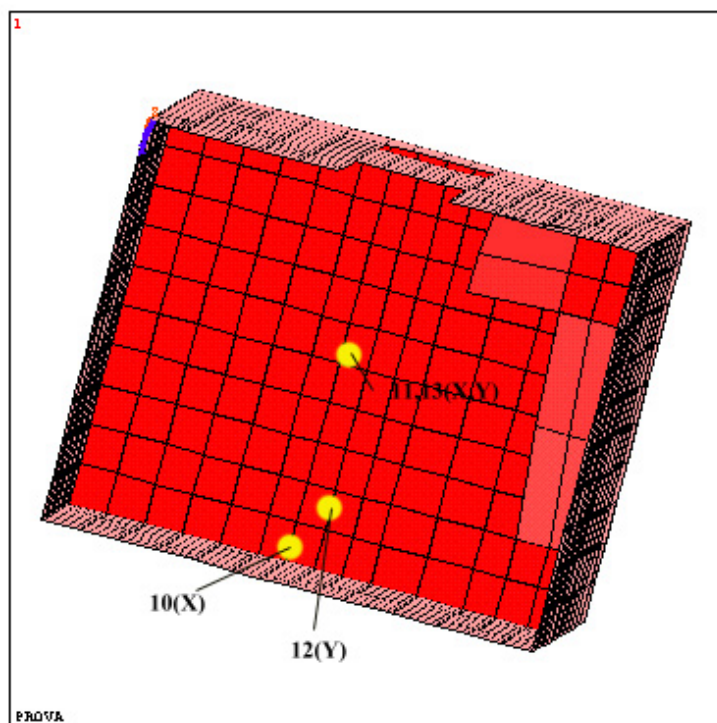


Рис. 2.26 — Зоны, для которых выполнены поверочные расчеты (аксонометрия, вид снизу)



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

В таблицах 2.2 и 2.3 для рассмотренных сечений приводятся соответственно значения напряжений и результаты поверочных расчетов.

Таблица 2.2 — *Наиболее значительные напряжения*

Сечение	ТХ, Н/м	ТУ, Н/м	МХ	МУ
1	2076		429,39	
2	4186		429,39	
3		3280		538,99
4		-18902		-582,95
5	-5382		-487,68	
6		-10028		-582,95
7	-4253		429,39	
8		-5593		912,98
9		-5593		-208,97
10	-3198		-258,41	
11	1022		-946,21	
12		-10029		-208,97
13		-5593		-1331

Поверочный расчет по границам сечений не учитывается, поскольку полученные максимальные значения напряжений намного ниже максимально допустимых.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 2.3 — Результаты поверочных расчетов для сечений, указанных в табл. 2.2

Сечение	Yn (снизу), мм	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$	$\sigma_{\text{сmax}}$
1	8,7	123,72	5,95	-0,546
2	6,2	156,55	10,22	0,489
3	14,3	45,98	0,26	-0,349
4	Только сжатие	-2,29	-6,60	-0,475
5	144,1	41,28	-1,77	-0,521
6	106,3	90,3	-4,00	-0,388
7	130,4	29,81	-2,47	-0,423
8	30,1	33,2	-4,58	-0,608
9	Только сжатие	-0,54	-2,09	-0,152
10	141,7	19,19	-1,19	-0,27
11	10,9	210,50	-5,18	-1,105
12	139,5	84,61	-6,67	-1,299
13	153,2	191,55	4,26	-1,469

Из полученных результатов следует, что поверочные расчеты подтвердили (в части напряжений, возникающих при приложении нагрузок, близких к нагрузкам, которые были приложены в эксперименте), что напряжения, возникающие в конструкции, намного ниже принятых допустимых значений  $367 \text{ Н/мм}^2$  для стали и (консервативно)  $11 \text{ Н/мм}^2$  для бетона.

### ***Результаты второго анализа математической модели (генератор вибраций установлен на коньке кровли)***

Второй анализ математической модели для сравнения с результатами эксперимента был выполнен при приложении нагрузки в 12 кН с частотой 16,9 Гц к коньку кровли со стороны северного фасада.

На рис. 2.27 показаны перемещения элементов математической модели по оси Y (в направлении, параллельном лучу лазерного виброметра).

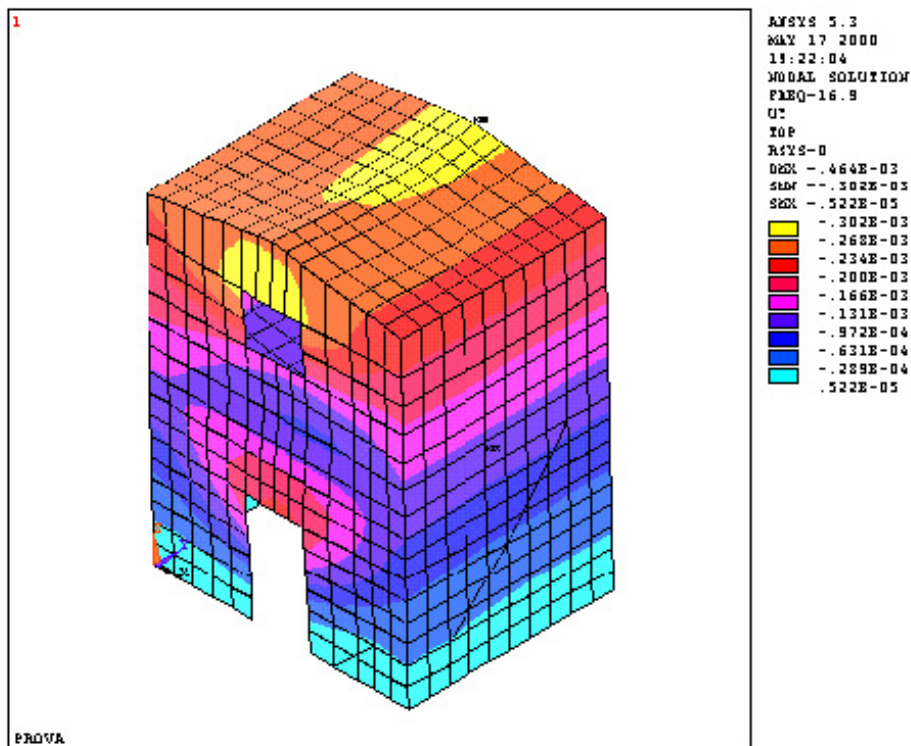


Рис. 2.27 — Перемещения по направлению Y

По результатам анализа математической модели перемещение точки отражения луча лазерного виброметра составило 0,116 мм. В сравнении с перемещением той же точки, полученным в результате эксперимента (0,143 мм), разница составила 19%.

На рис. 2.28 приводится график изменения перемещения точки с увеличением частоты колебаний. При анализе математической модели частота колебаний нарастала так же, как и в предыдущем случае (см. выше).

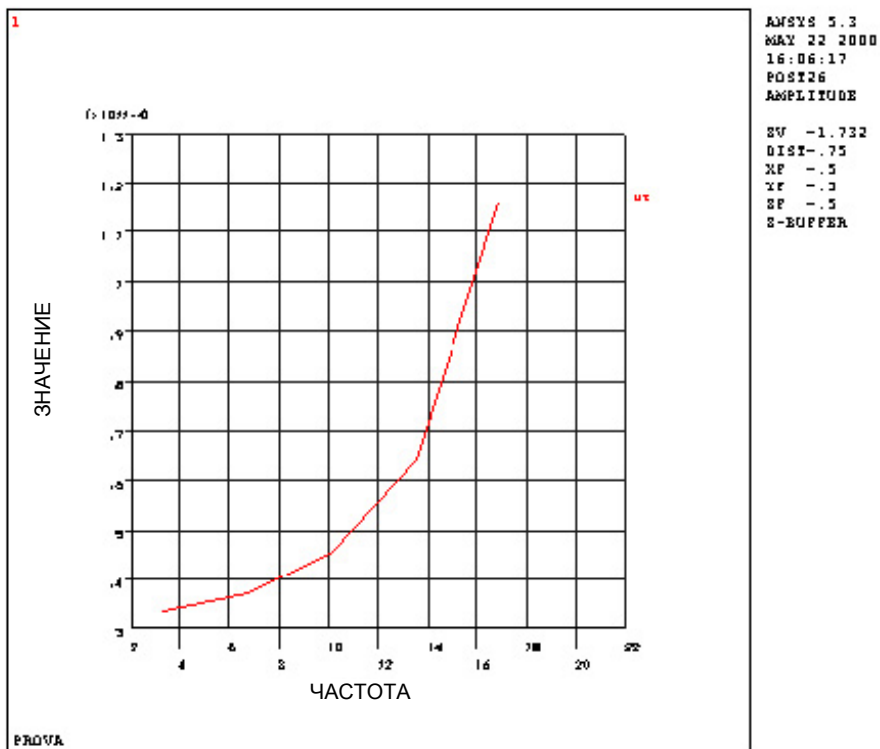


Рис. 2.28 — Зависимость перемещения от частоты

#### 4.2.5.1 — Напряженное состояние

Как и в первом анализе математической модели, были выявлены точки наибольшего напряжения, для них были проведены поверочные расчеты.

На рис. 2.29-2.42 показано распределение напряжений. В таблицах 2.4 и 2.5 для рассмотренных сечений приводятся соответственно значения напряжений и результаты поверочных расчетов.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

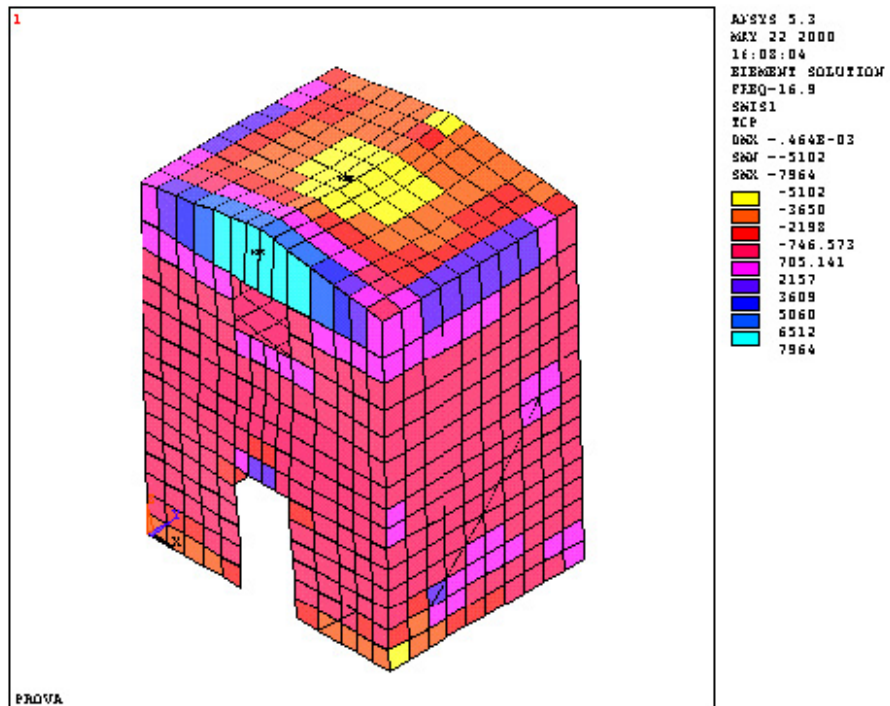


Рис. 2.29 — Напряжение  $T_x$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

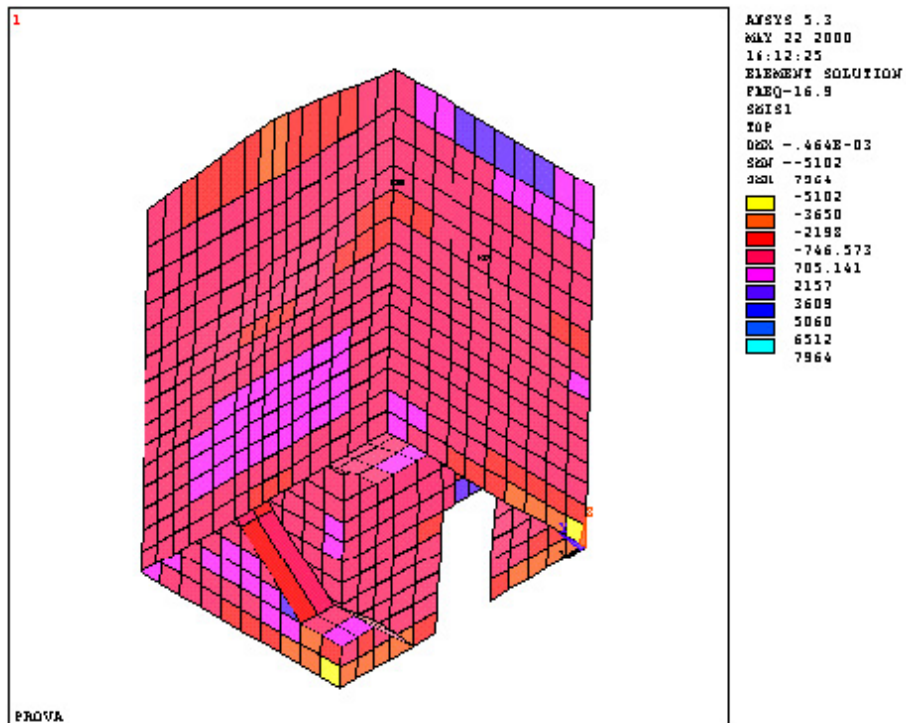


Рис. 2.30 — Напряжение  $T_x$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

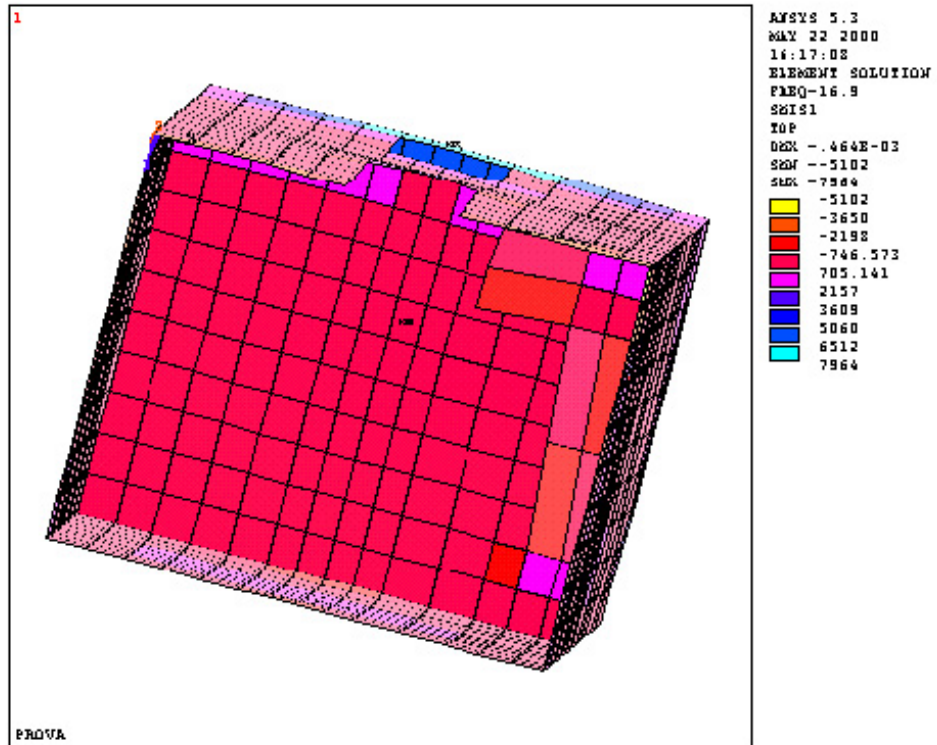


Рис. 2.31 — Напряжение  $T_X$  (аксонометрия, вид снизу)

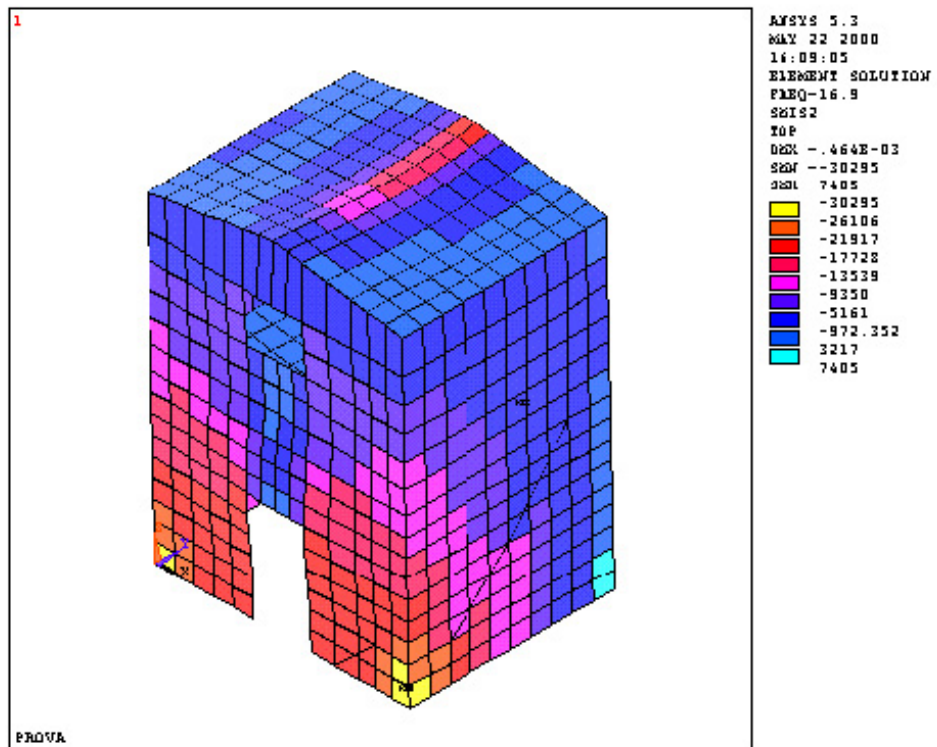


Рис. 2.32 — Напряжение  $T_Y$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

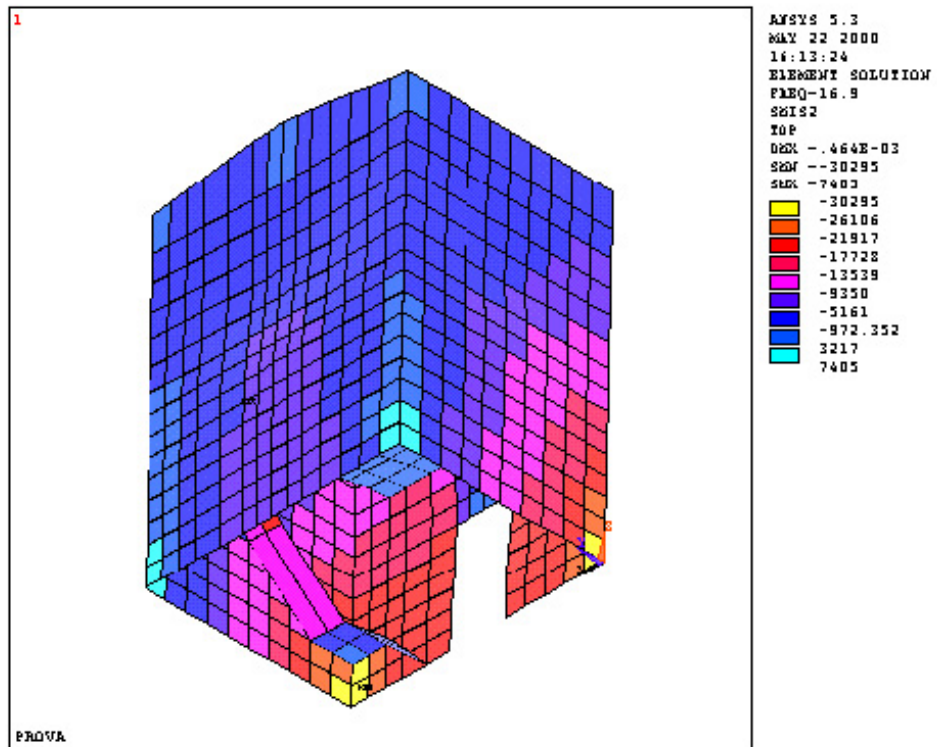


Рис. 2.33 — Напряжение  $T_{xy}$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

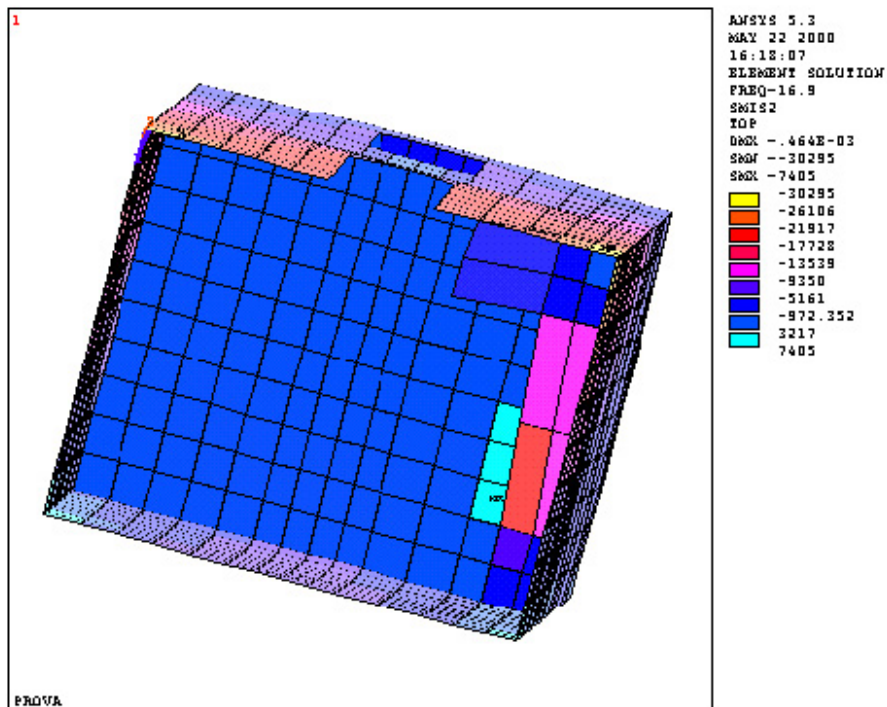


Рис. 2.34 — Напряжение  $T_{xy}$  (аксонометрия, вид снизу)

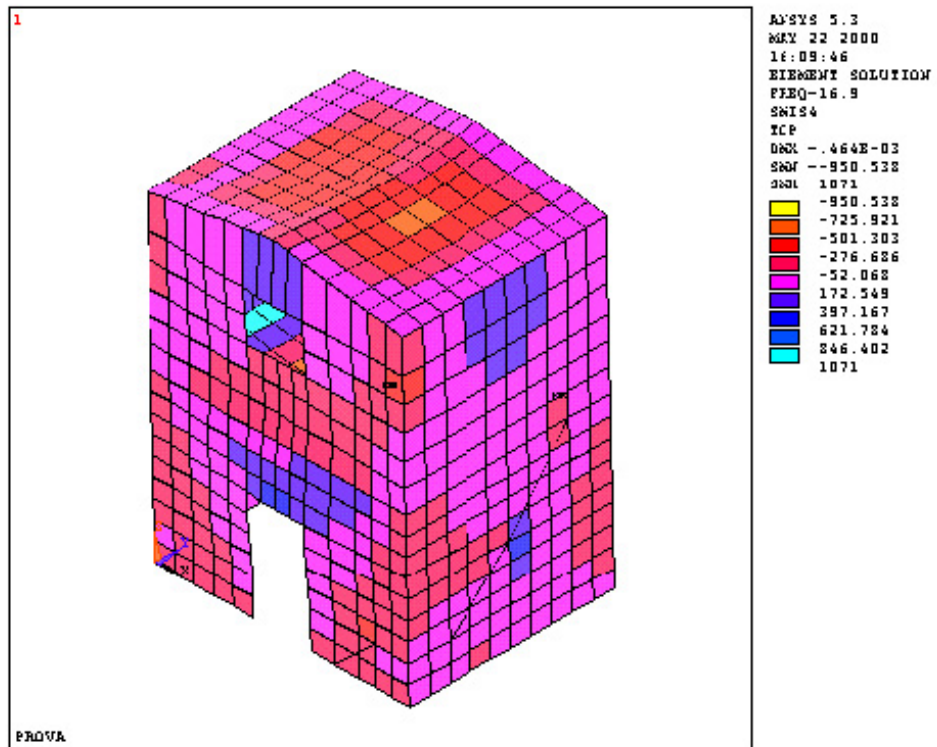


Рис. 2.35 — Напряжение  $M_x$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

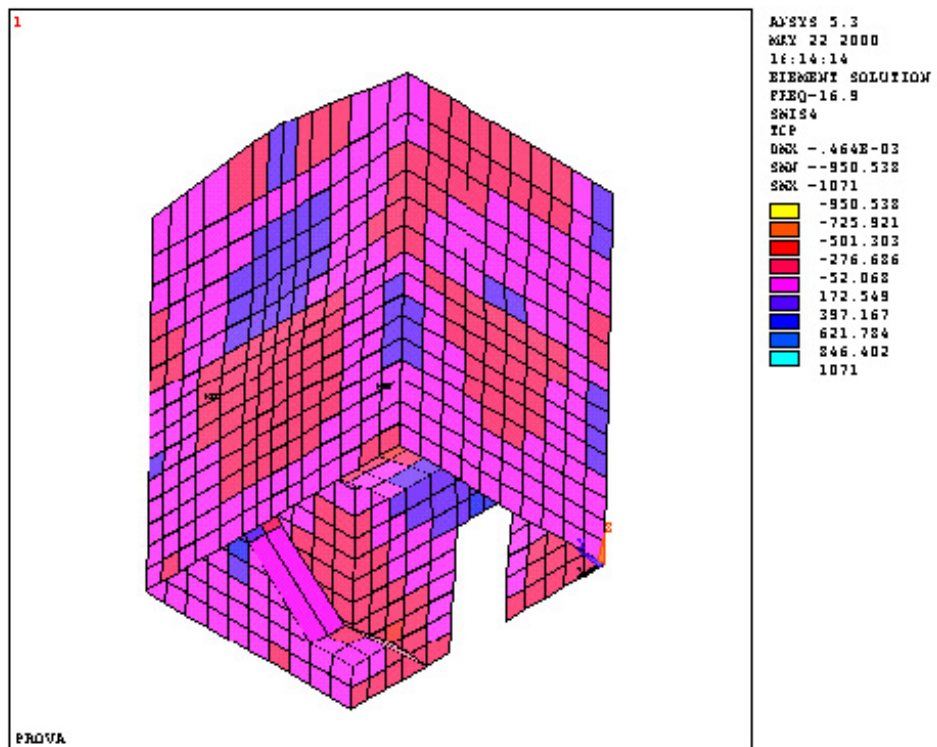


Рис. 2.36 — Напряжение  $M_x$  (аксонометрия, вид с северо-запада)



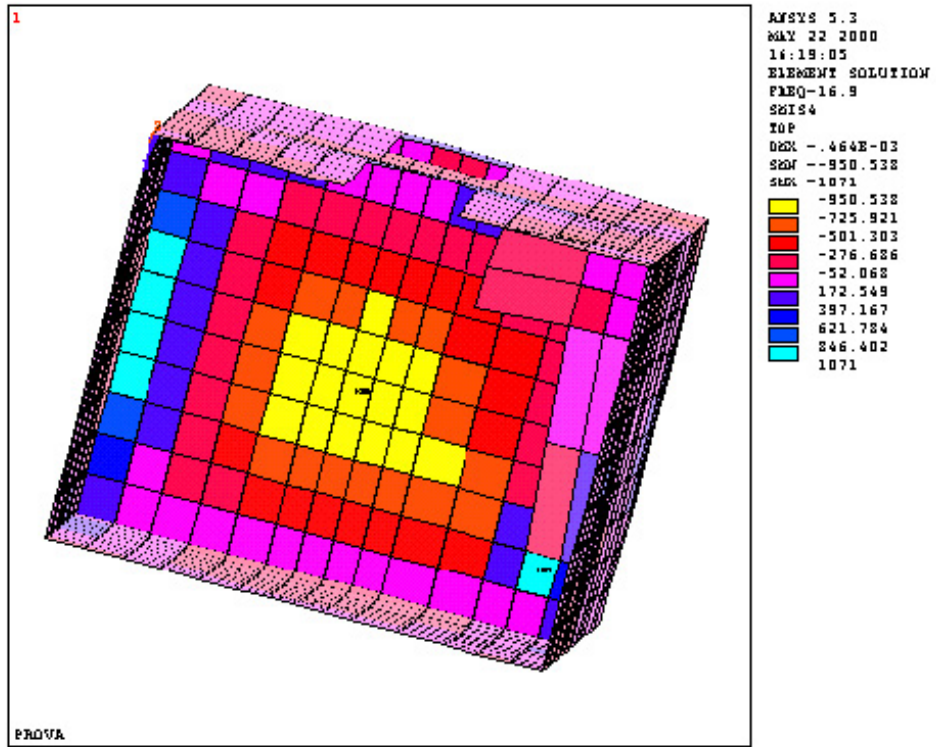


Рис. 2.37 — Напряжение  $M_X$  (аксонометрия, вид снизу)

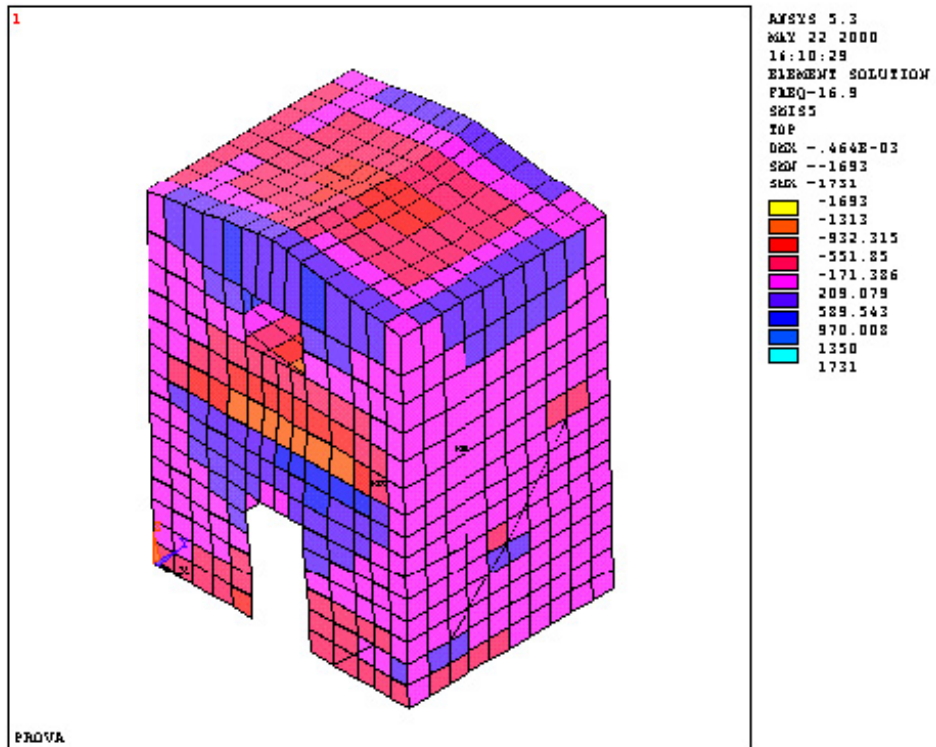


Рис. 2.40 — Напряжение  $M_Y$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

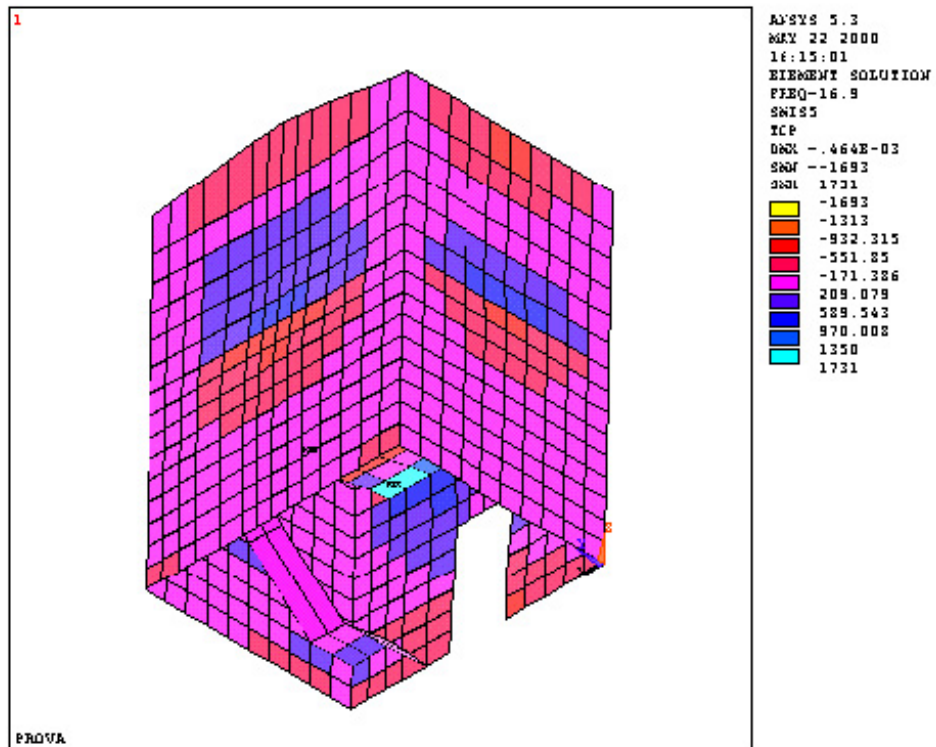


Рис. 2.41 — Напряжение  $M_Y$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

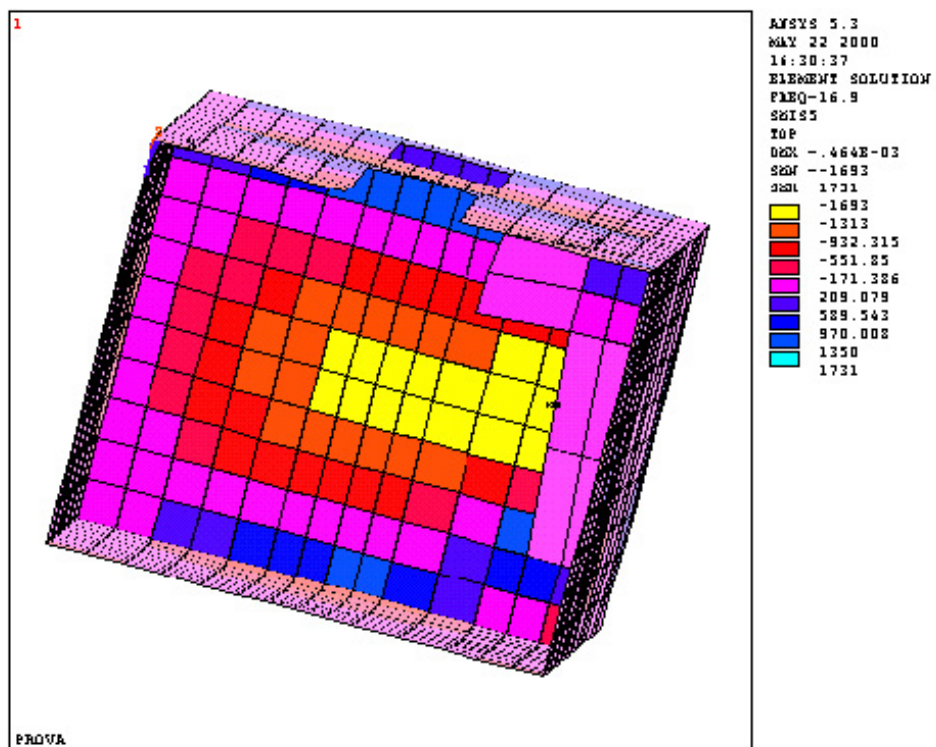


Рис. 2.42 — Напряжение  $M_Y$  (аксонометрия, вид снизу)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 2.4 — Наиболее значительные напряжения

Сечение	ТХ, Н/м	ТУ, Н/м	МХ	МУ
1	746		-276	
2	7964		397,17	
3		-5161		589,54
4		-21917		-551,85
5	-5102		-501,0	
6		-9350		-932,31
7	-746,57		846,4	
8		-5161		-551,85
9		-5161		209,08
10	-746,57		172,55	
11	3217		-1313	
12		3217		589,54
13		-746,57		-950,54

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 2.5 — Результаты поверочных расчетов для сечений, указанных в табл. 2.4

Сечение	$Y_n$ (снизу), мм	$\sigma_{fmax}$	$\sigma_{fmin}$	$\sigma_{сmax}$
1	141,2	47,68	0,45	-0,348
2	Только растяжение	208,73	23,45	0,000
3	37,0	15,65	-3,35	-0,375
4	Только сжатие	-3,12	-7,20	-0,34
5	145,5	45,87	-1,48	-0,542
6	129,6	27,48	-4,58	-0,605
7	22,0	71,15	-4,24	-0,886
8	115,8	13,41	-3,22	-0,348
9	Только сжатие	-0,44	-1,99	-0,145
10	16,9	18,927	-1,35	-0,161
11	1,51	75,96	0,55	-0,669
12	15,0	51,48	-2,85	-0,381
13	156,6	167,15	7,38	-1,003

В данном случае также видно, что напряжения, возникающие при приложении нагрузок, близких к нагрузкам, которые были приложены в эксперименте, для каждого материала по отдельности ниже максимально допустимых значений.

В табл. 2.6 приводятся результаты, полученные в ходе эксперимента и в ходе анализа математической модели, целью которого было определение наиболее значимых механических параметров, т. е. модулей упругости.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 2.6. — Результаты, полученные в процессе идентификации

Эксперимент	Частота колебаний, Гц	Приложенная нагрузка, кг	Точка размещения генератора вибраций	Измеренное перемещение, мкм	Перемещение по результатам анализа математической модели	Ошибка, %
1	16,9	12000	Первое перекрытие, северная сторона	132	108	18%
2	16,9	12000	Конек, северная сторона	143	116	19%

Таким образом, значения модулей упругости панелей, откалиброванные на основании анализа математической модели, составляют:

вертикальные панели  $E_X, E_Y = 8129 \text{ Н/мм}^2$   
 $G_{XY} = 893 \text{ Н/мм}^2$

горизонтальные панели  $E_X, E_Y = 6749 \text{ Н/мм}^2$   
 $G_{XY} = 747 \text{ Н/мм}^2$

марш лестничный  $E = 3780 \text{ Н/мм}^2$   
 $G = 415 \text{ Н/мм}^2$ .

Модуль упругости бетона составляет  $21\,000 \text{ Н/мм}^2$ .

### *Анализ математической модели по спектру*

После того как по результатам эксперимента и анализа математической модели были определены модули упругости, был выполнен динамический анализ. При проведении анализа применялись спектры реакции конструкции (значения ускорений), предписанные Министерским декретом от 16.01.1996.

### *Динамический анализ*

В целях динамического анализа к модели прикладывался спектр реакции в части ускорений. Как того требует указанный выше Декрет, было принято переменное значение ускорения с учетом динамических характеристик конструкции, описываемое следующей формулой:

$$a/g = C \cdot R \cdot \varepsilon \cdot \beta \cdot I$$

При выборе коэффициентов были взяты наиболее консервативные значения:

$$C = 0,1, R = 1, \varepsilon = 1,3, \beta = 1,4, \gamma_i = 1, I = 1,2$$

$$T_0 > 0,8 \text{ с} \quad R = 0,862/T_0^{2/3}$$

$$T_0 \leq 0,8 \text{ с} \quad R = 1,00$$

Приложенный спектр показан на рис. 2.43.

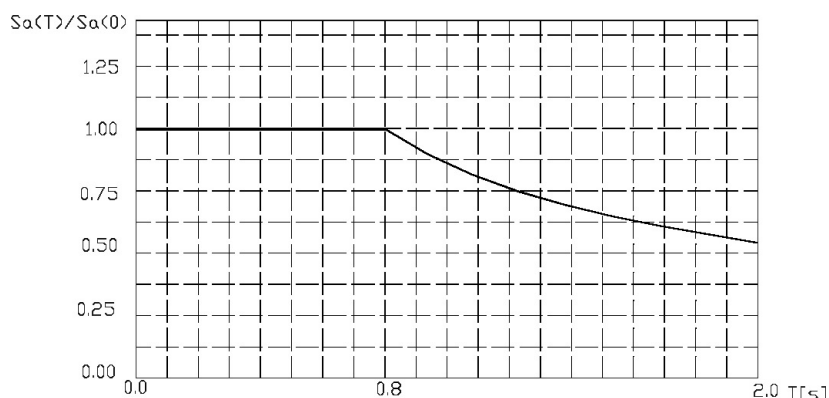


Рис. 2.43 — Нормализованный проектный спектр по требованиям итальянских нормативных актов

Были проведены два анализа с приложением спектра по двум направлениям — X и Y в принятой системе координат.

### *Спектр по направлению Y*

Результат показывает, что конструкция обладает высокой жесткостью (рис. 2.44). Перемещение точки отражения луча лазерного виброметра меньше полученного при анализе математической модели в условиях, повторяющих условия эксперимента. Значение перемещения составило 53 мкм (по результатам первого анализа 107 мкм, второго — 117 мкм).

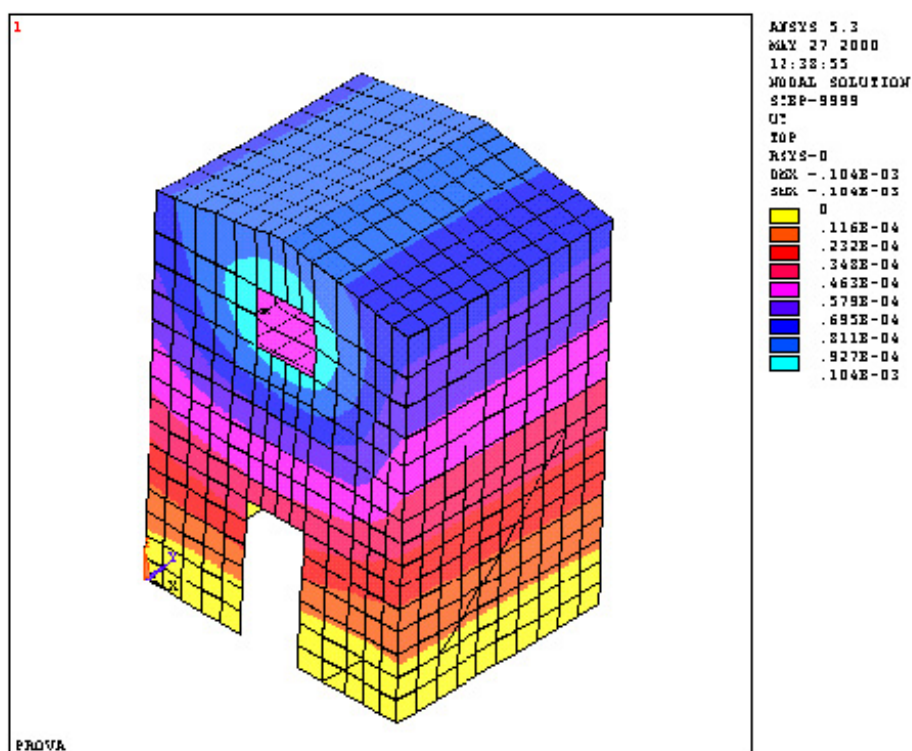


Рис. 2.44 — Относительные перемещения при приложении спектра по направлению Y

### *Напряженное состояние*

На рис. 2.45-2.56 показано напряженное состояние под воздействием линейных нагрузок TX и TY (соответственно по горизонтали и по вертикали) и изгибающих моментов MX и MY (соответственно на горизонтальной и вертикальной поверхности), возникающих при приложении спектра по направлению Y.

Поверочные расчеты выполнялись для наиболее напряженных сечений. Наибольшие напряжения отмечались в тех же сечениях, что и в описанных выше исследованиях.

К значениям напряжений, полученным по результатам анализа спектра, следует прибавить напряжения, возникающие под воздействием силы тяжести.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

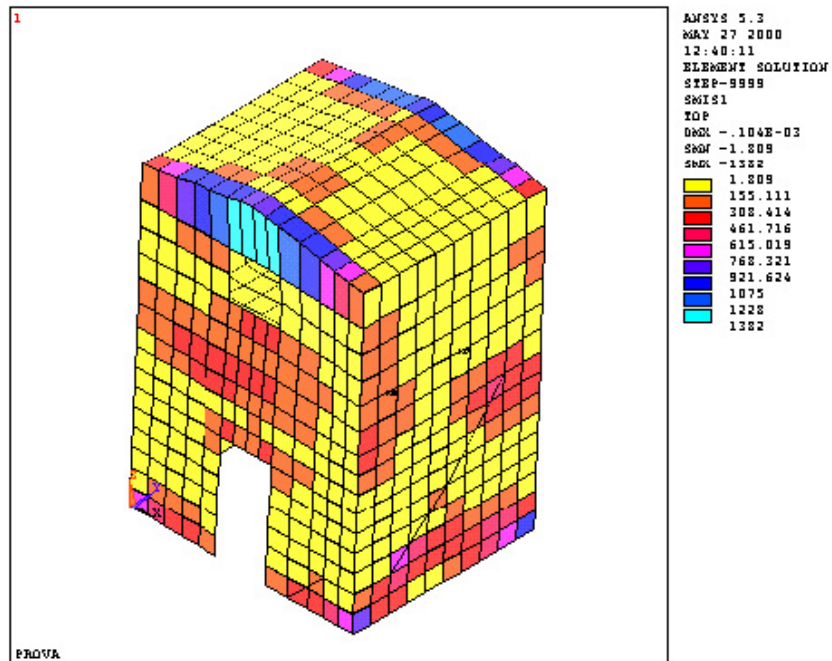


Рис. 2.45 — Напряжение  $T_x$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

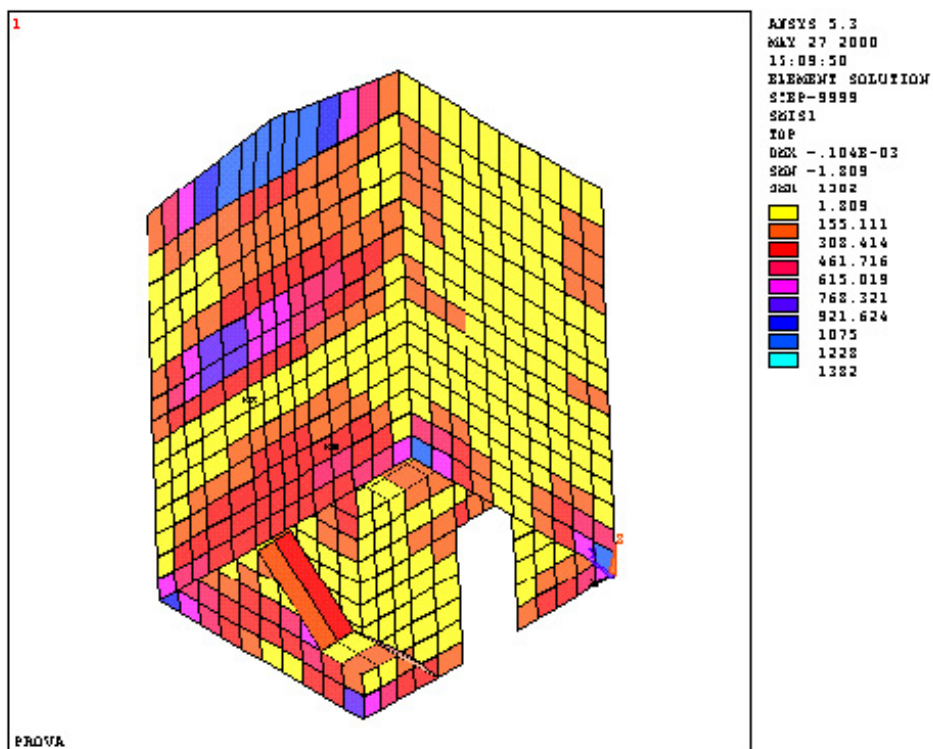


Рис. 2.46 — Напряжение  $T_x$  (аксонометрия, вид с северо-запада)



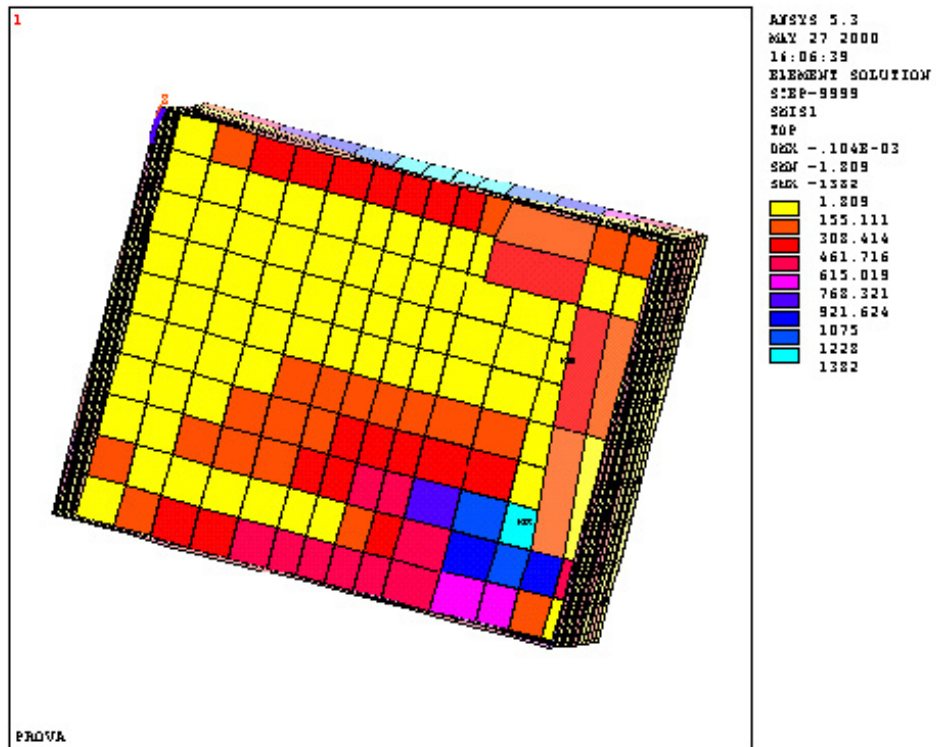


Рис. 2.47 — Напряжение TX (аксонометрия, вид снизу)

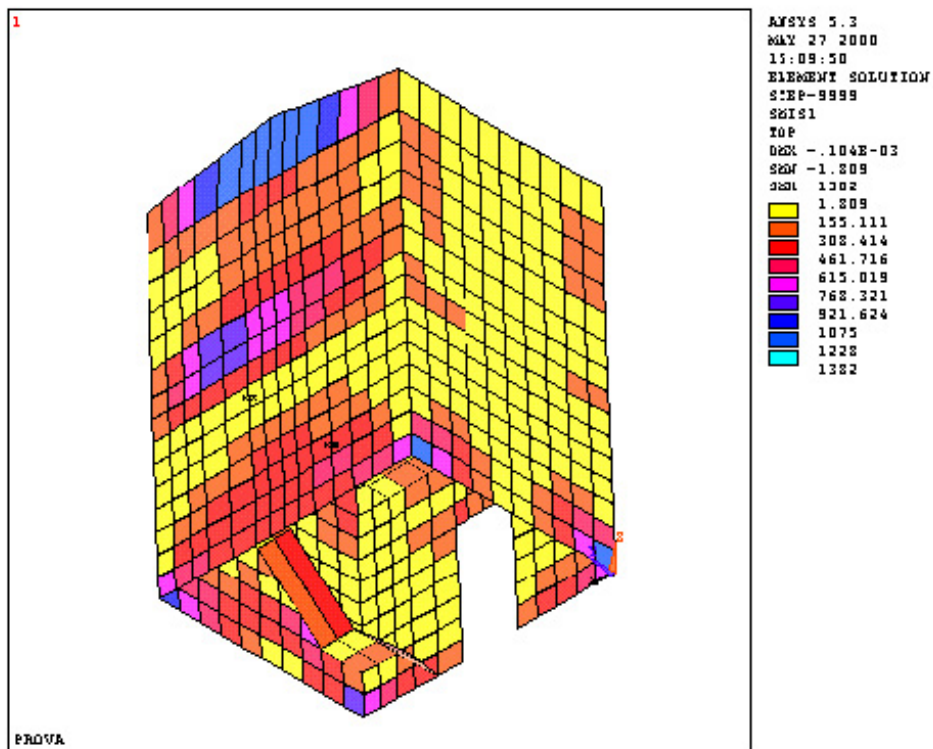


Рис. 2.48 — Напряжение TY (аксонометрия, вид с юго-востока)

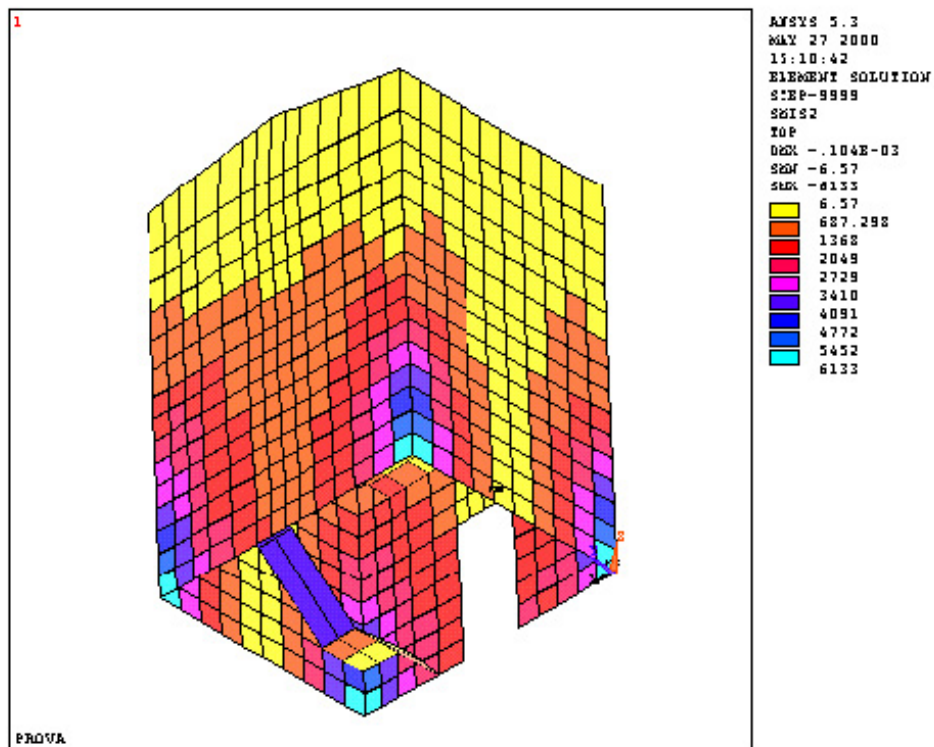


Рис. 2.49 — Напряжение  $T_{xy}$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

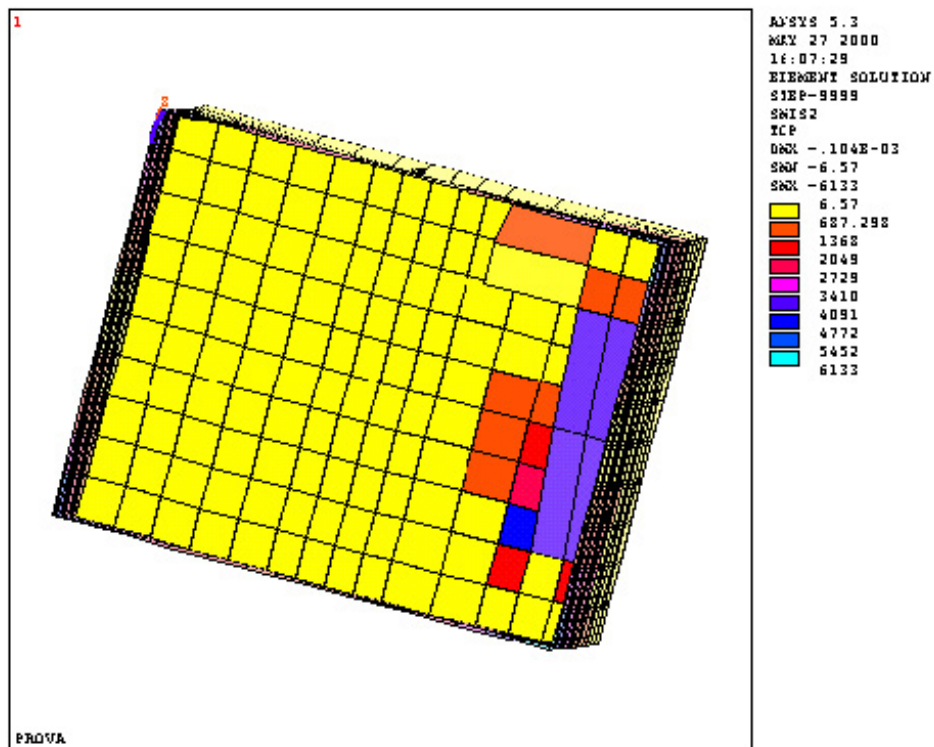


Рис. 2.50 — Напряжение  $T_{xy}$  (аксонометрия, вид снизу)

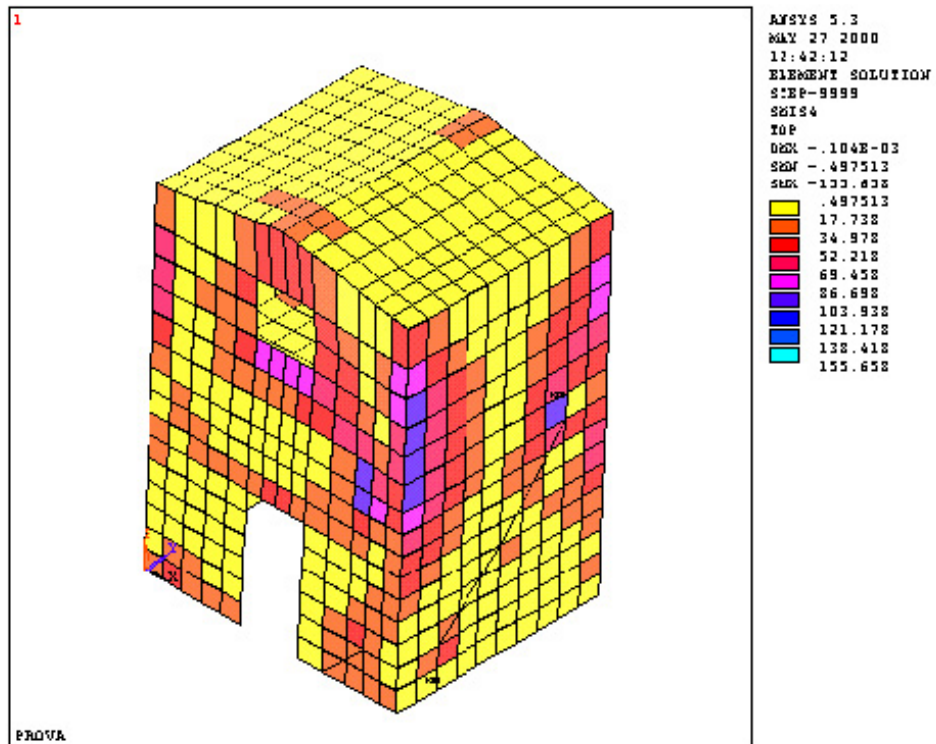


Рис. 2.51 — Напряжение  $M_x$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

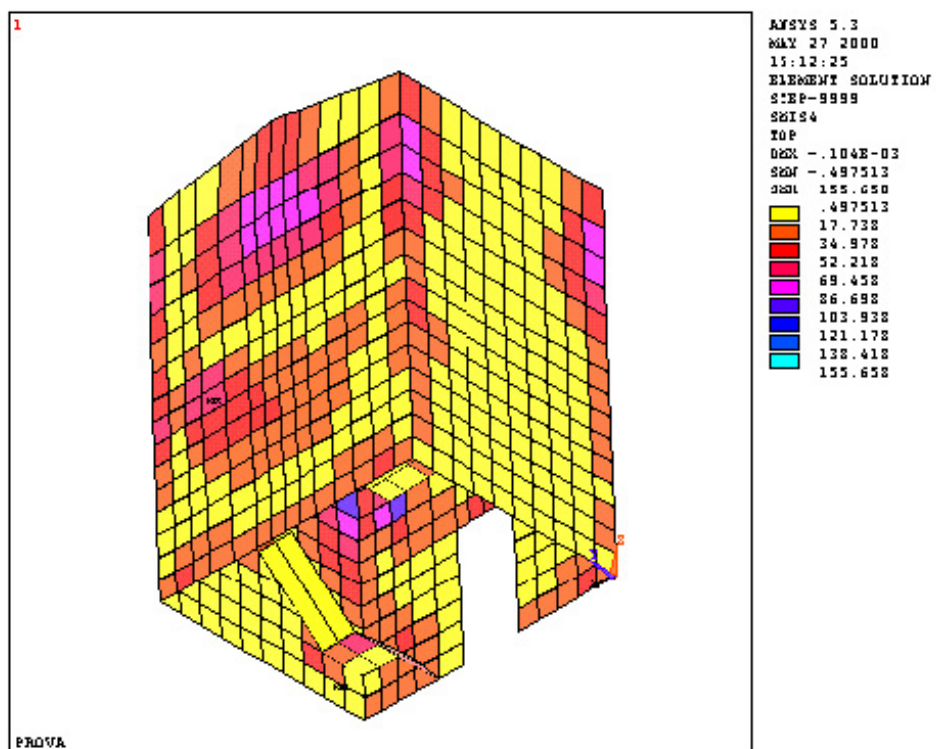


Рис. 2.52 — Напряжение  $M_x$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

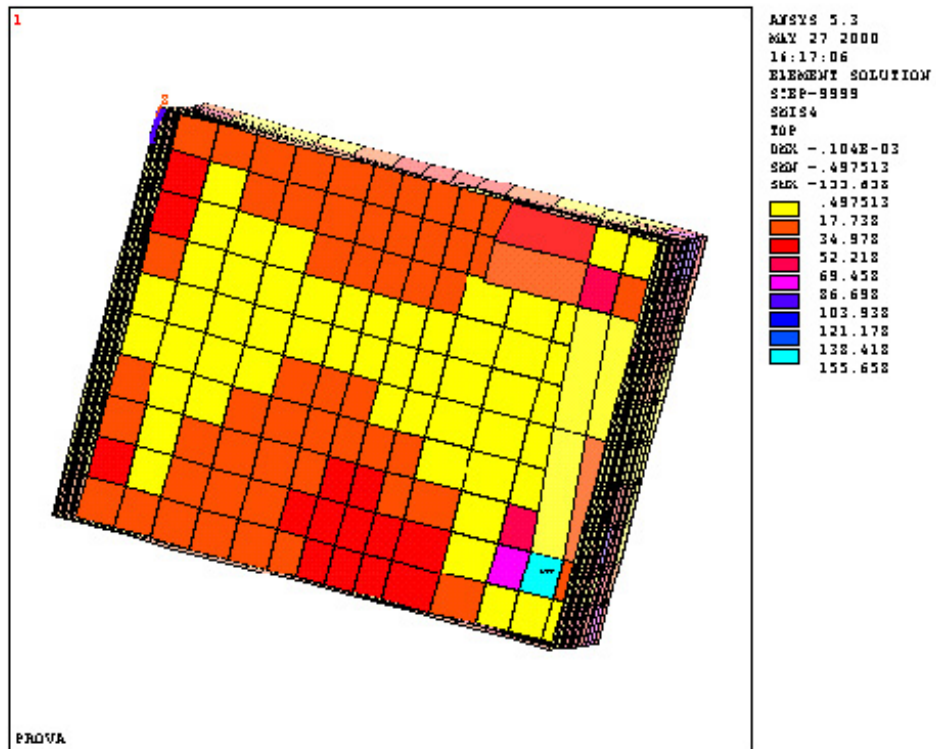


Рис. 2.53 — Напряжение  $M_X$  (аксонометрия, вид снизу)

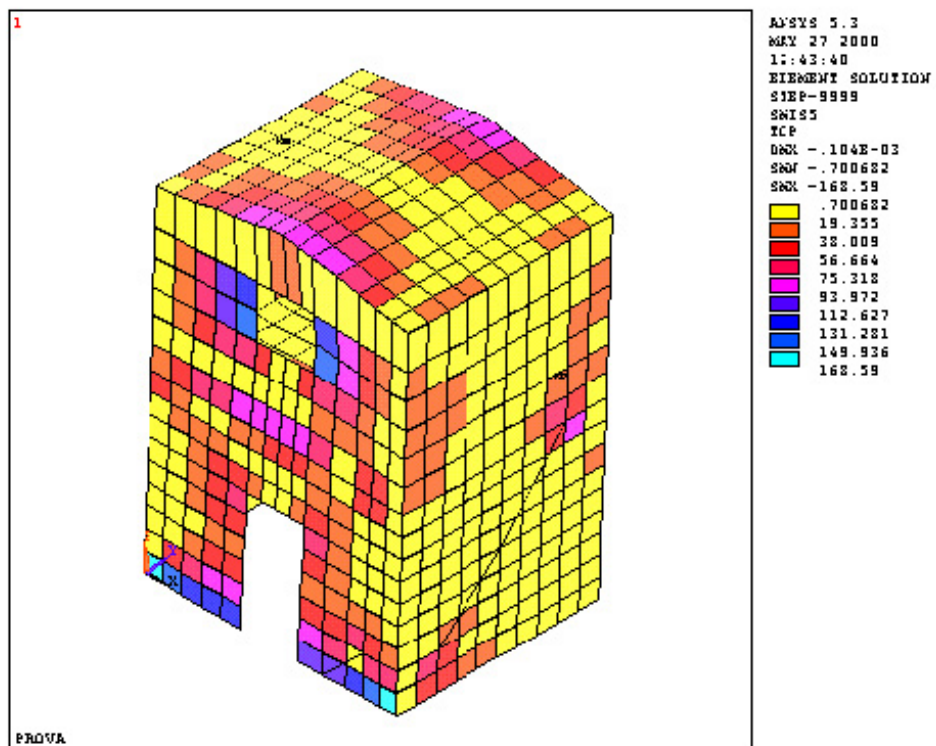


Рис. 2.54 — Напряжение  $M_X$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

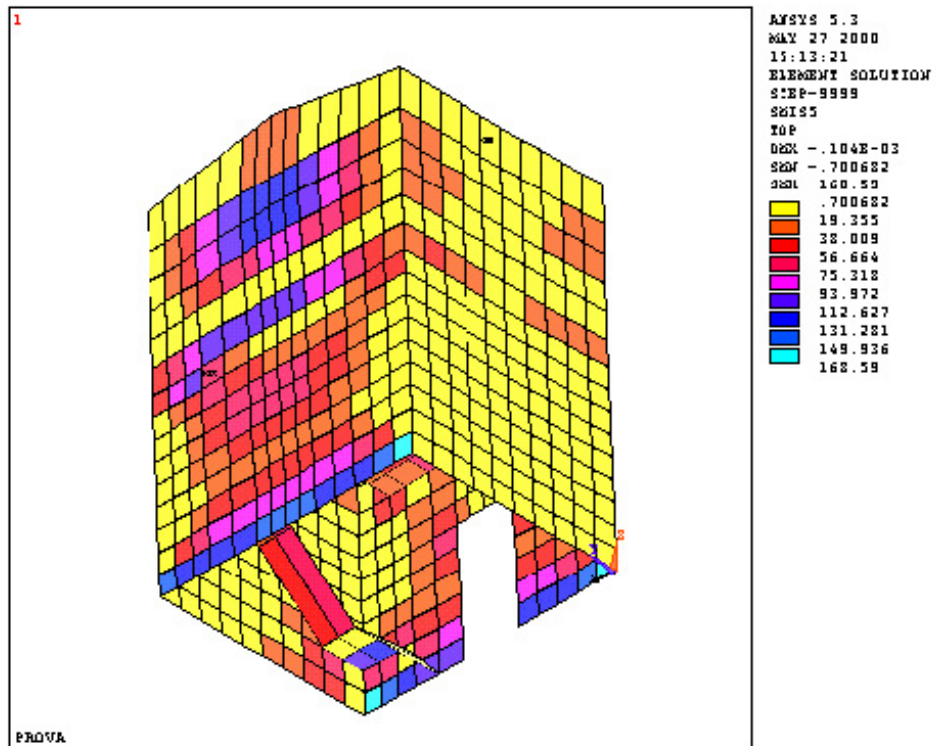


Рис. 2.55 — Напряжение MY (аксонометрия, вид с северо-запада)

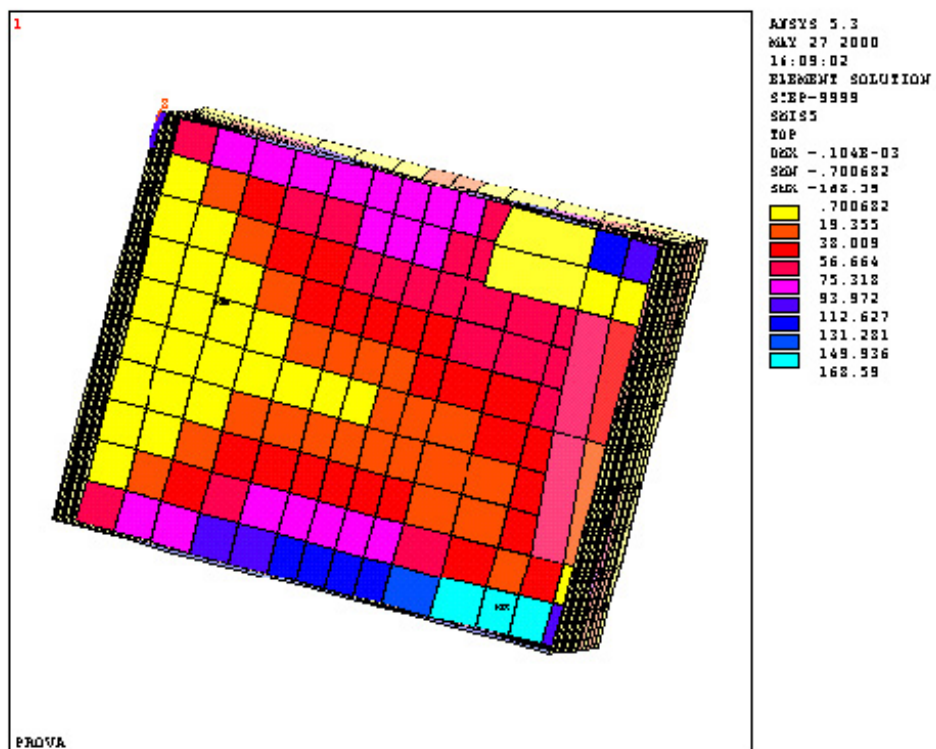


Рис. 2.56 — Напряжение MY (аксонометрия, вид снизу)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

На рис. 2.57-2.68 показаны напряжения, возникающие под воздействием собственного веса конструкции. В сумме с напряжениями, возникающими при приложении спектра, они позволяют получить точное представление о напряжениях, возникающих в модели.

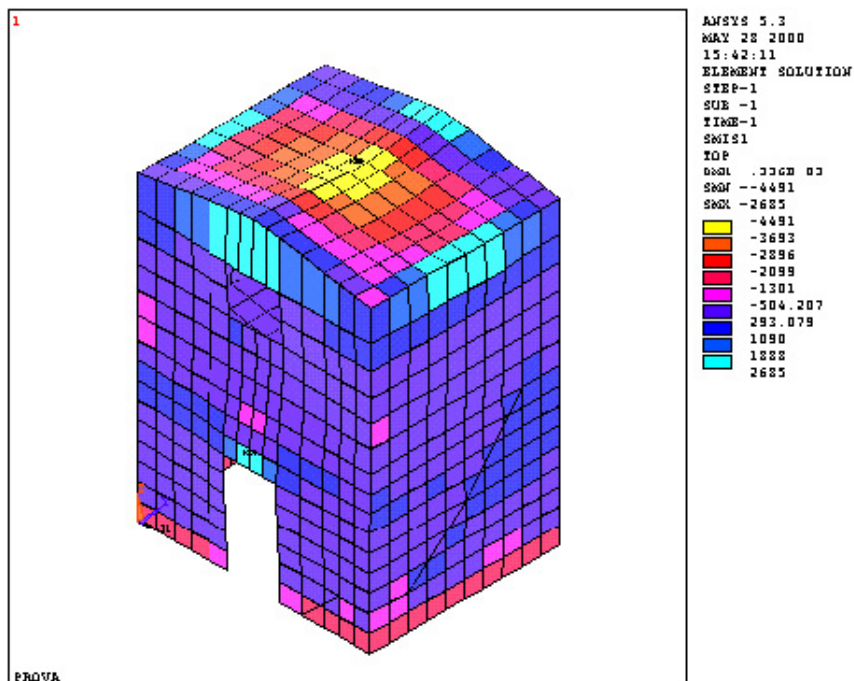


Рис. 2.57 — Напряжение TX (аксонометрия, вид с юго-востока)

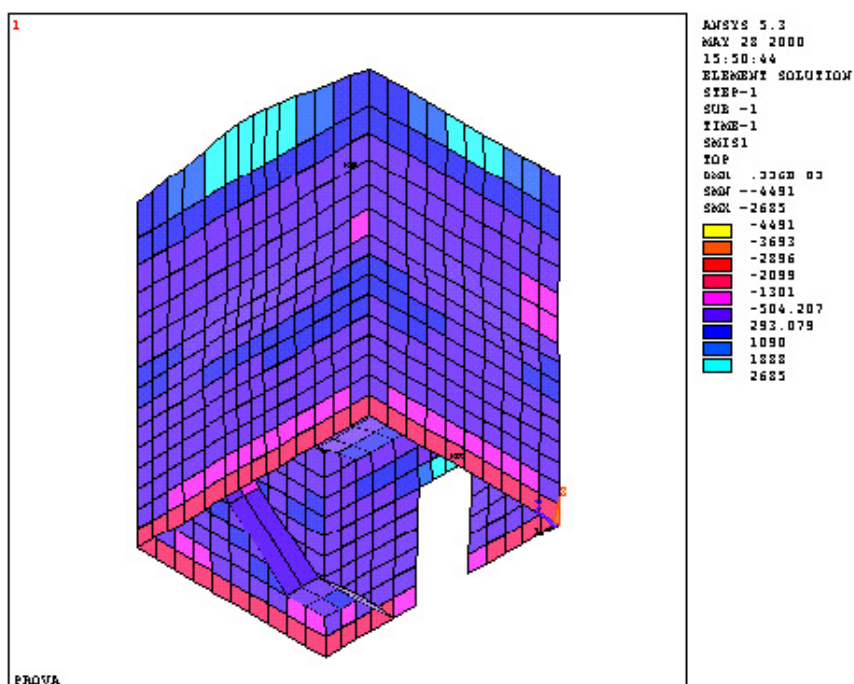


Рис. 2.58 — Напряжение TX (аксонометрия, вид с северо-запада)

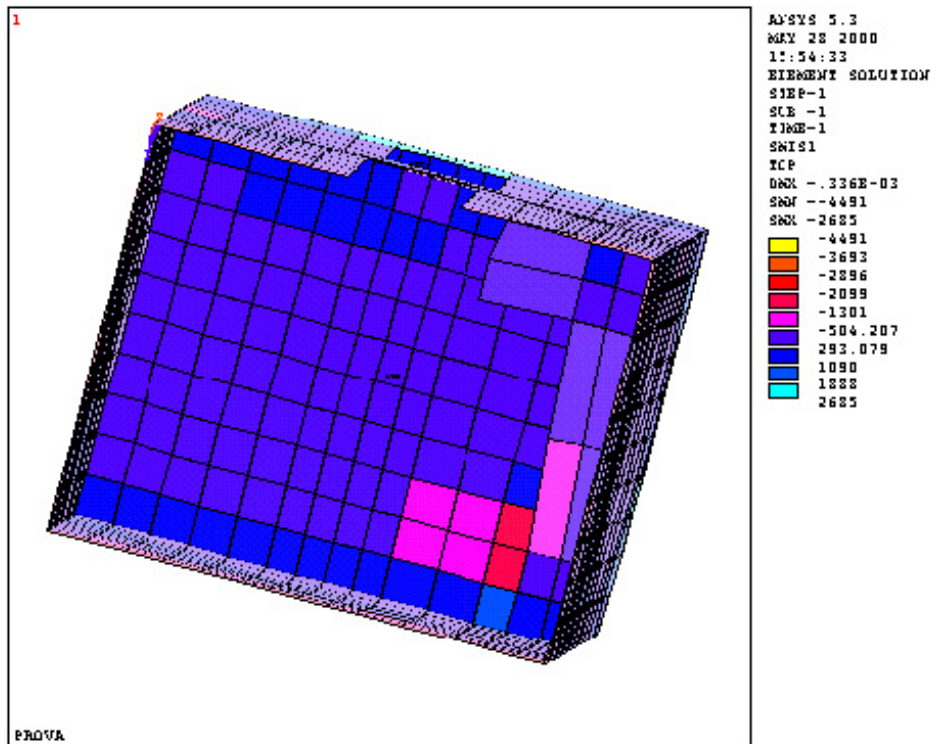


Рис. 2.59 — Напряжение  $T_X$  (аксонометрия, вид снизу)

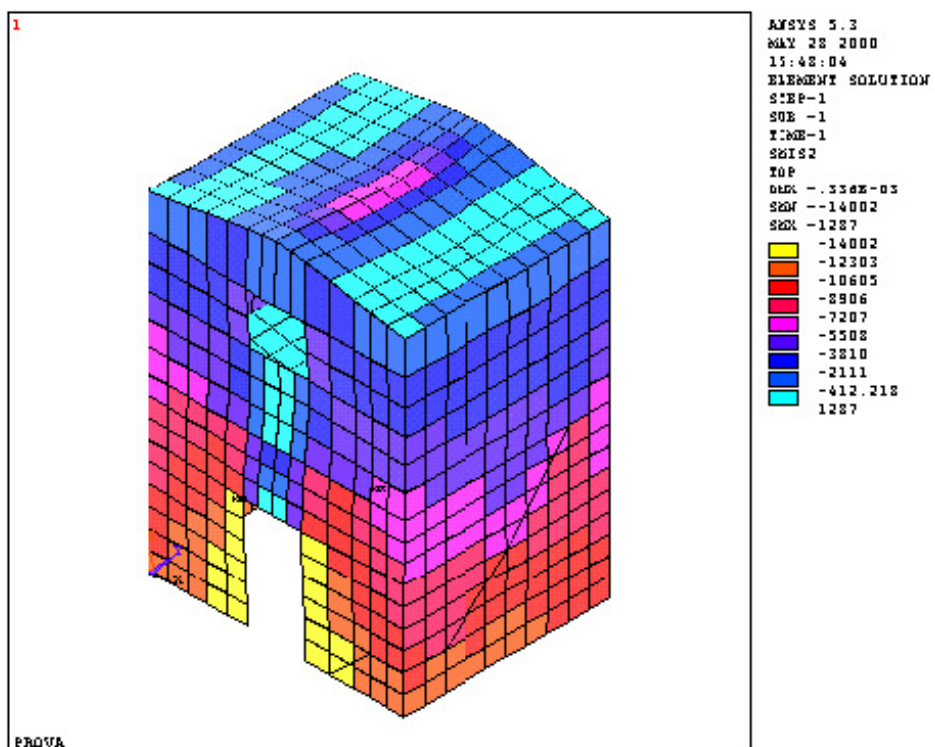


Рис. 2.60 — Напряжение  $T_Y$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

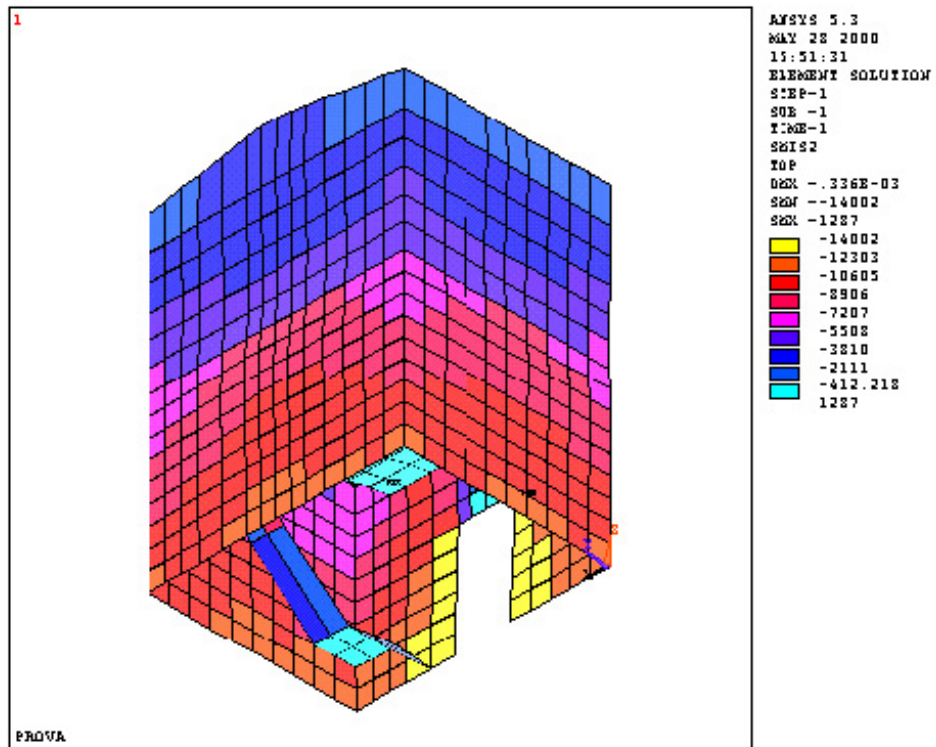


Рис. 2.61 — Напряжение  $T_{xy}$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

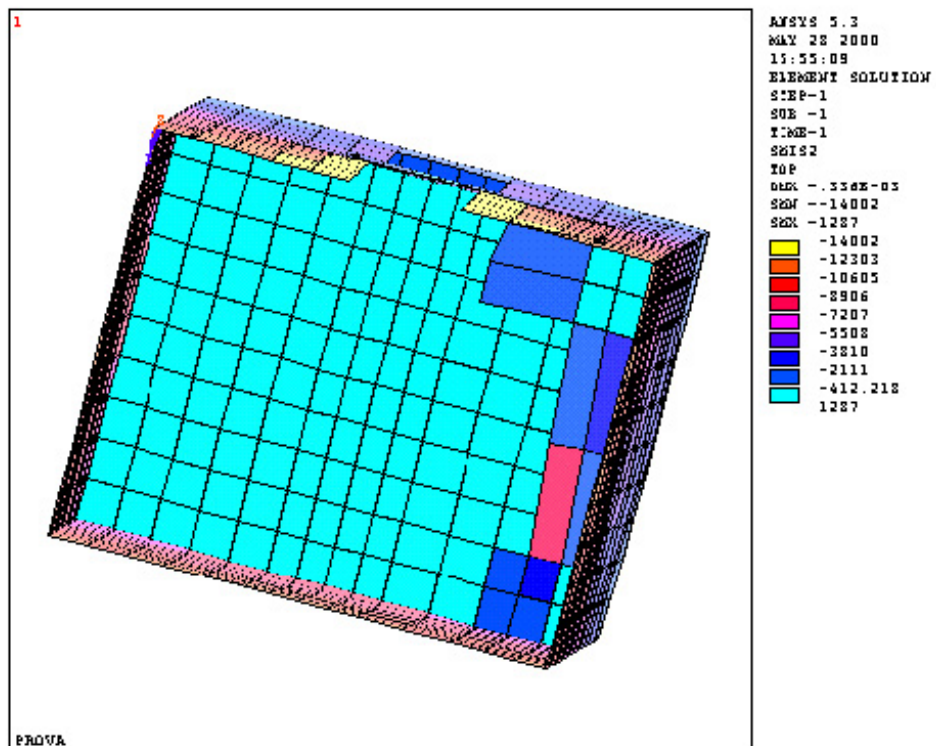


Рис. 2.62 — Напряжение  $T_{xy}$  (аксонометрия, вид снизу)



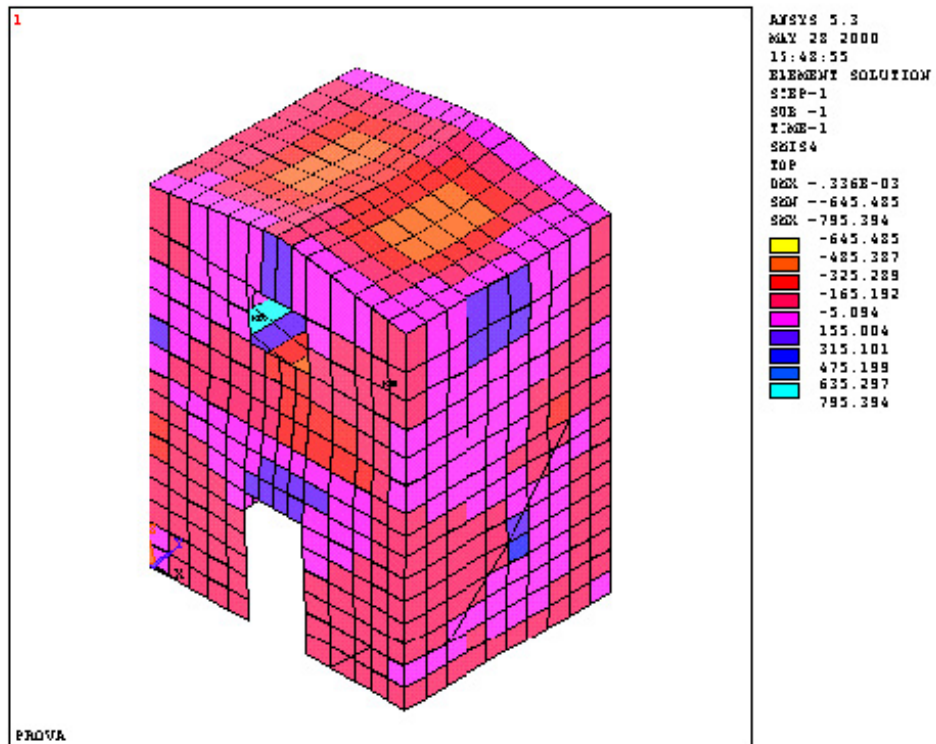


Рис. 2.63 — Напряжение  $M_x$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

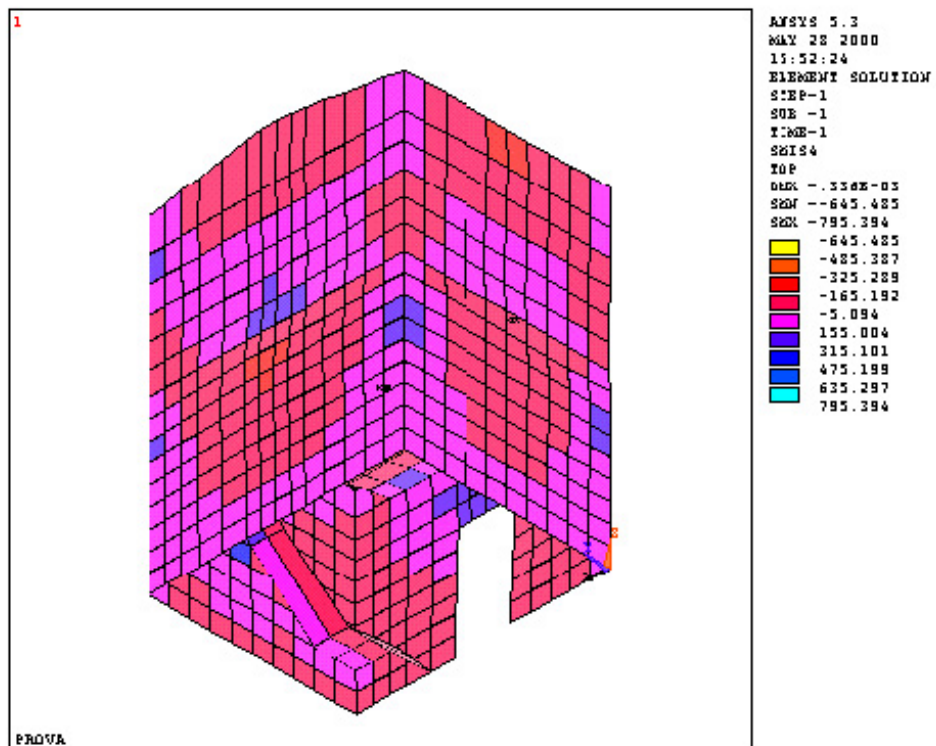


Рис. 2.64 — Напряжение  $M_x$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

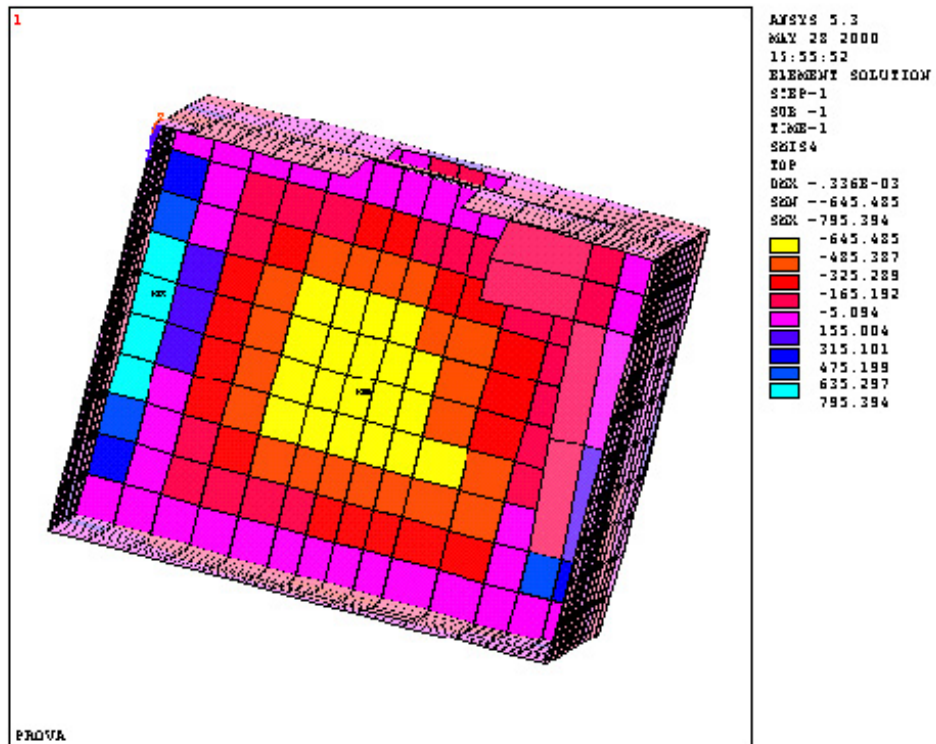


Рис. 2.65 — Напряжение  $M_X$  (аксонометрия, вид снизу)

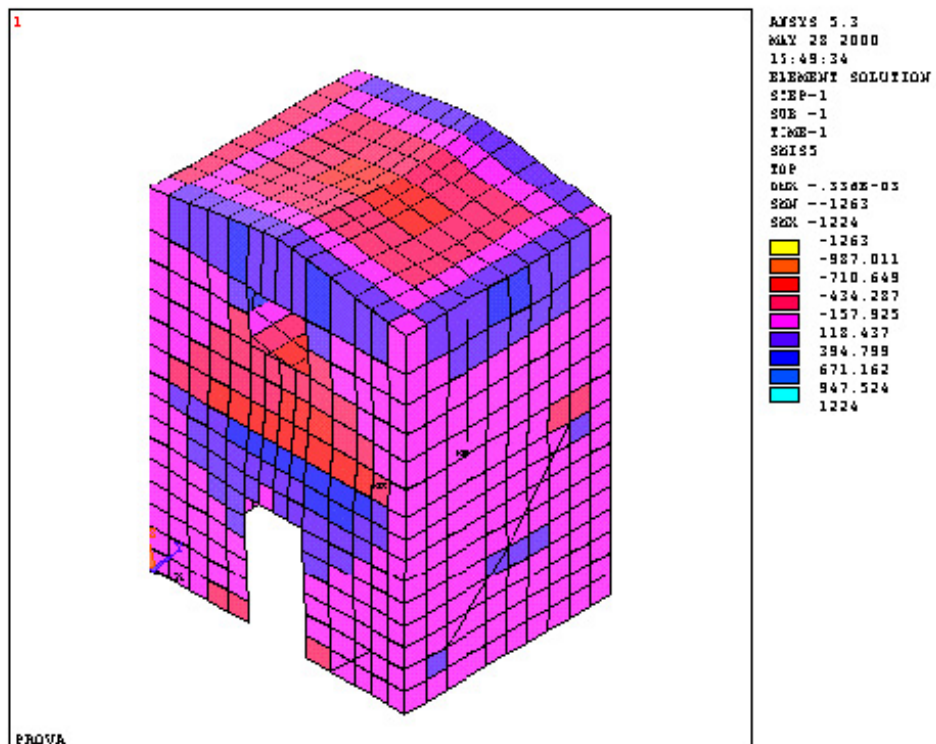


Рис. 2.66 — Напряжение  $M_Y$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

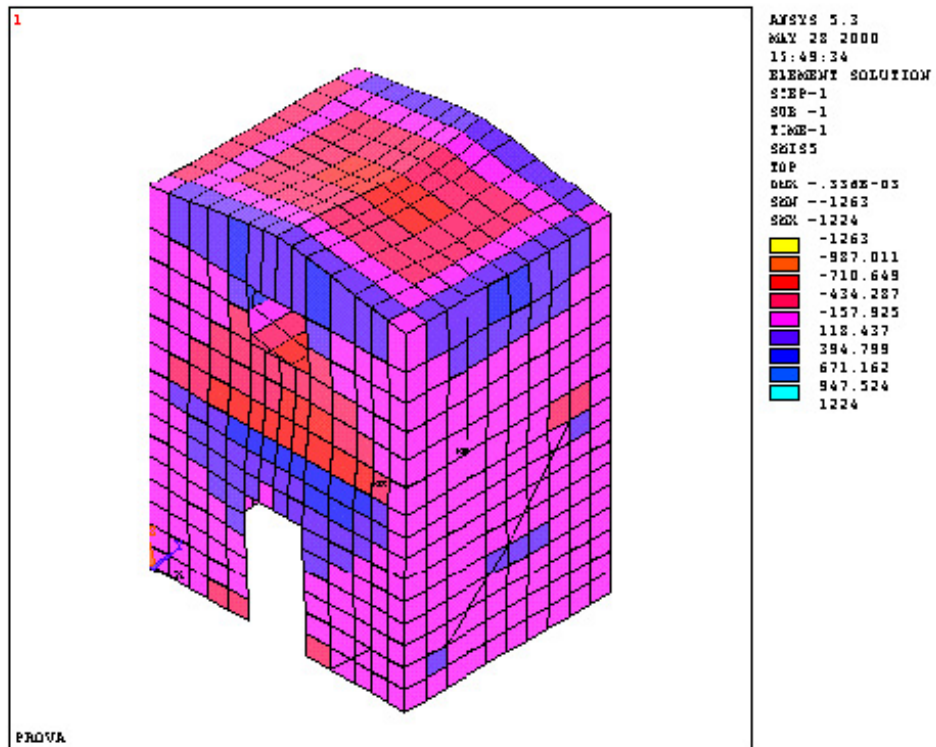


Рис. 2.67 — Напряжение MY (аксонометрия, вид с северо-запада)

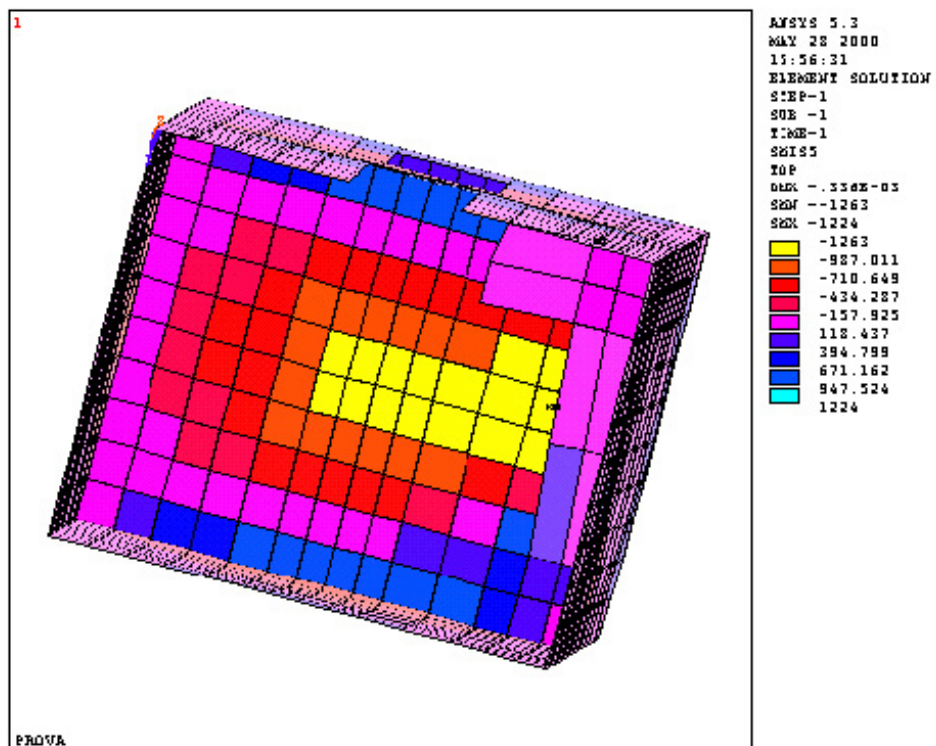


Рис. 2.68 — Напряжение MY (аксонометрия, вид снизу)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Ниже в таблицах приводятся значения напряжений, полученные по результатам двух анализов (вертикальные и горизонтальные нагрузки соответственно). Там же охарактеризовано напряженное состояние конструкции (суммарное значение двух составляющих) и приведены результирующие значения по итогам поверочных расчетов для наиболее напряженных сечений. Значения напряжений для стали и бетона значительно ниже максимально допустимых.

Таблица 2.77 — Наиболее значимые напряжения при приложении спектра по направлению  $Y$

Сечение и направление нагружения	Динамический анализ с приложением спектра		Статический анализ (только сила тяжести)		Суммарное значение	
	Т, Н/м	М	Т, Н/м	М	Т, Н/м	М
1(x)	461	17,73	-1301	-325,2	-1761	-342,93
2(x)	1382	75,31	2685	315,1	4067	390,41
3(y)	687,29	92,97	-412,22	394,79	-1099,51	487,76
4(y)	2729	157,92	-12303	-112,63	-15032	-270,55
5(x)	155,11	325,2	-4491	-17,74	-4646,11	-342,94
6(y)	687,29	19,35	-7207	-424,28	-7894,29	-443,63
7(x)	615,02	34,97	1090	155	1705,02	189,97
8(y)	687,3	112,63	-3810	671,16	-4497,3	783,79
9(y)	2049	112,63	-10005	-157,92	-12054	-270,55
10(x)	615,02	52,21	1090	98,2	1705,02	150,41
11(x)	308,41	34,97	-504,2	-645,48	-812,61	-680,45
12(y)	687,29	93,97	1287	118,43	1974,29	212,4
13(y)	687,29	38,01	1287	-987,01	1974,29	-1025,02

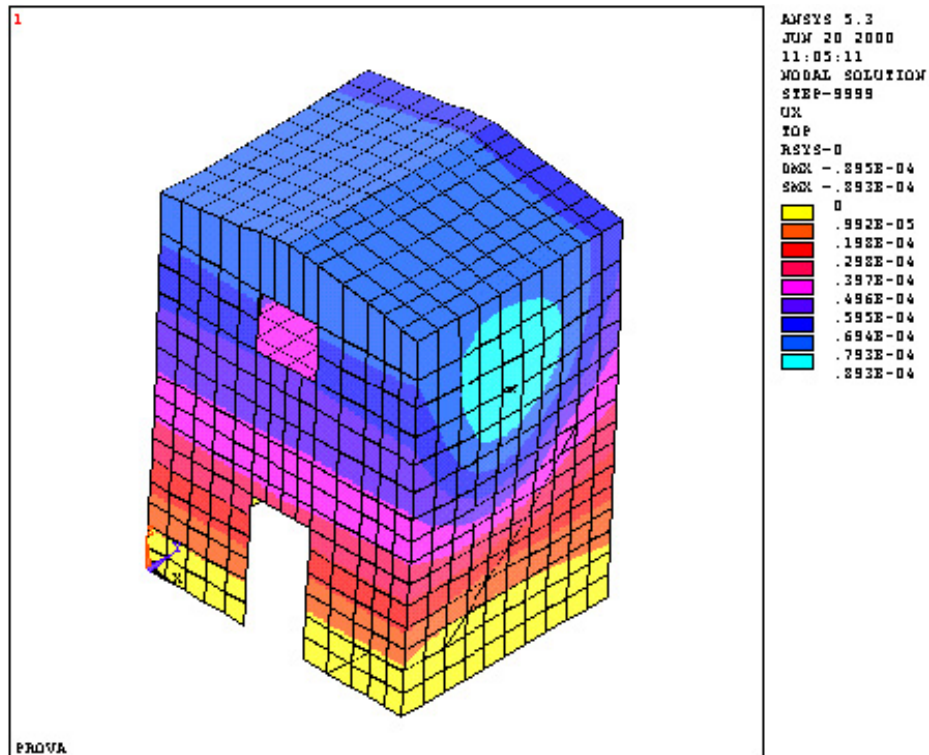
## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 2.8 — Результаты поверочных расчетов для сечений, указанных в табл. 2.7

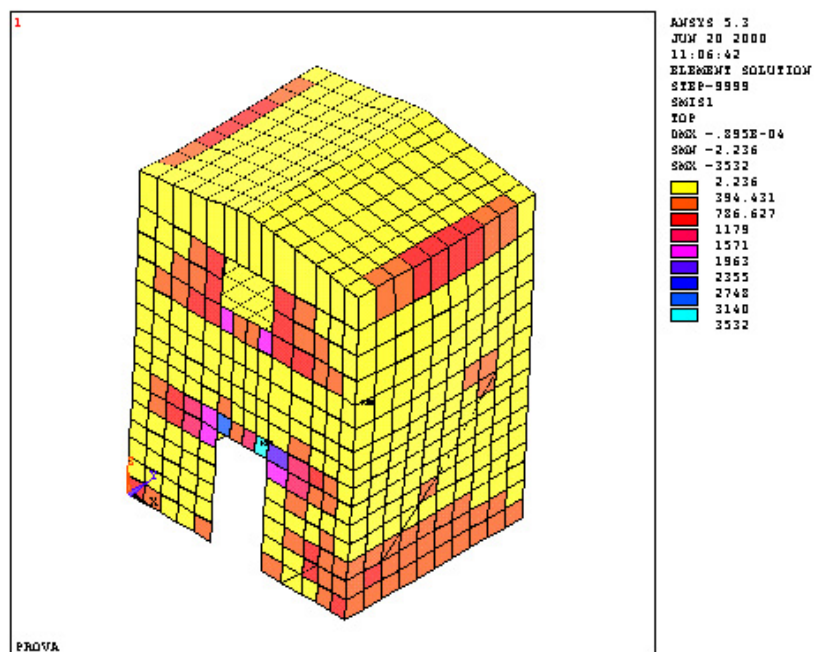
Сечение	$Y_n$ (снизу), см	$\sigma_{fmax}$	$\sigma_{fmin}$	$\sigma_{сmax}$
1	13,86	46,83	-0,49	-0,411
2	0,59	146,41	9,87	-0,434
3	2,36	25,02	-1,85	-0,338
4	Только сжатие	-2,54	-4,54	-0,319
5	13,92	22,50	-1,82	-0,349
6	10,33	6,36	-3,11	-0,296
7	0,66	66,95	4,20	-0,222
8	3,00	29,64	-3,86	-0,525
9	Только сжатие	-1,84	-3,84	-0,272
10	0,62	66,27	0,60	-0,190
11	15,61	117,02	4,88	-0,724
12	14,43	48,32	-2,00	-0,604
13	15,02	57,95	0,10	-0,534

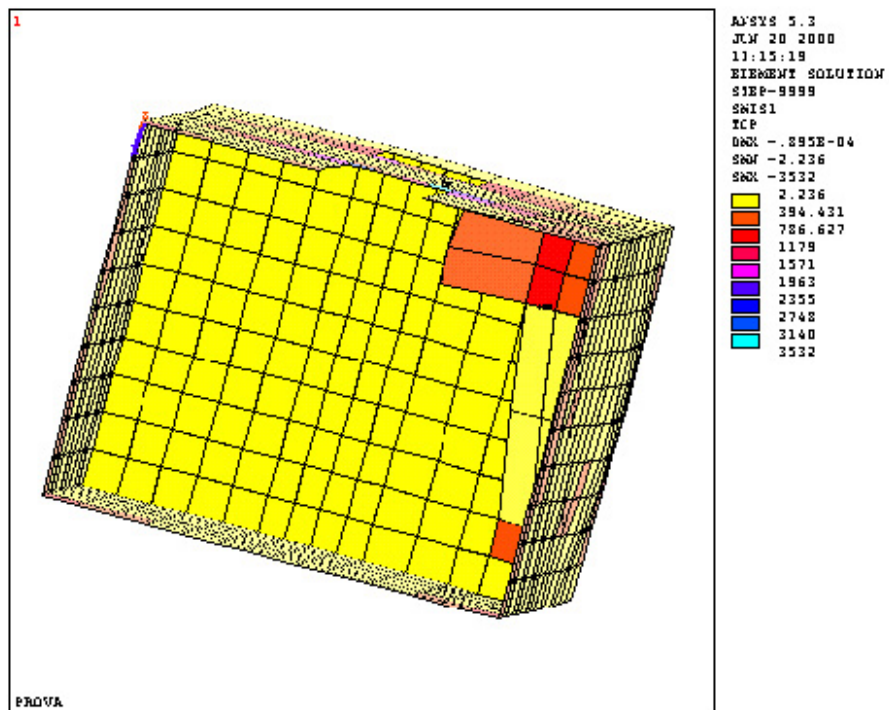
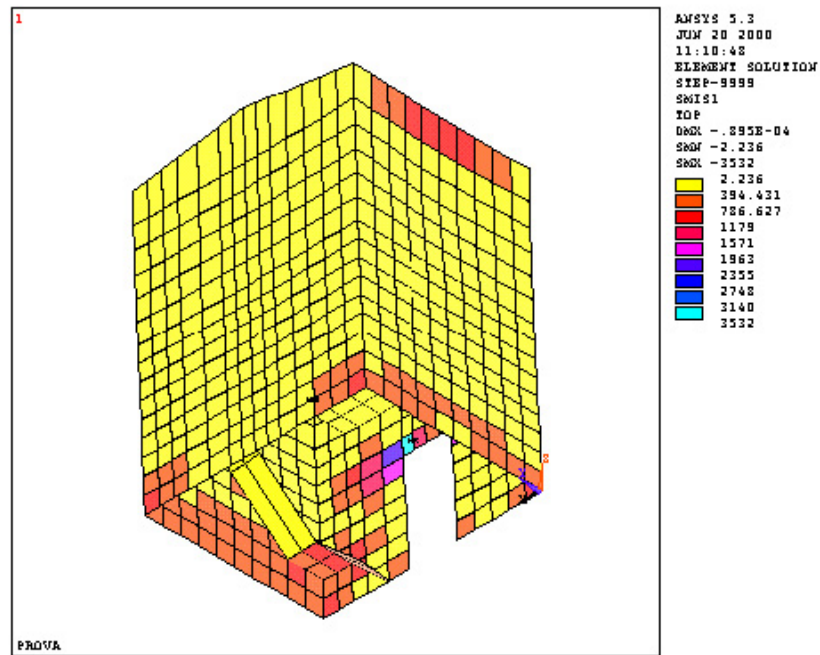
### *Спектр по направлению X*

Ниже приведены перемещения и напряжения, возникающие при приложении спектра по направлению X.



*Напряженное состояние*





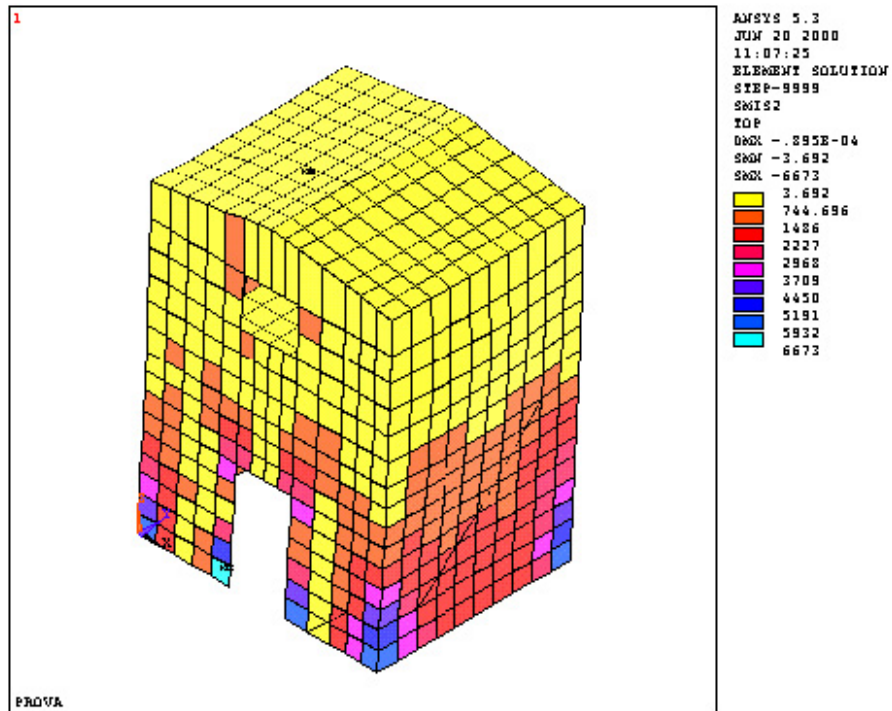


Рис. 2.73 — Напряжение  $T_{xy}$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

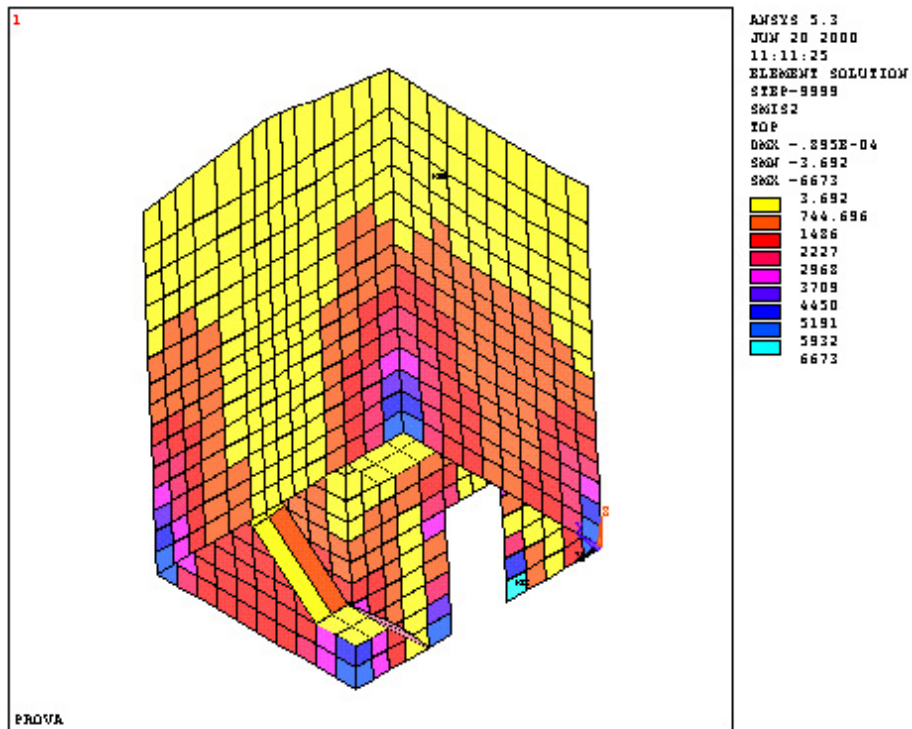


Рис. 2.74 — Напряжение  $T_{xy}$  (аксонометрия, вид с северо-запада)



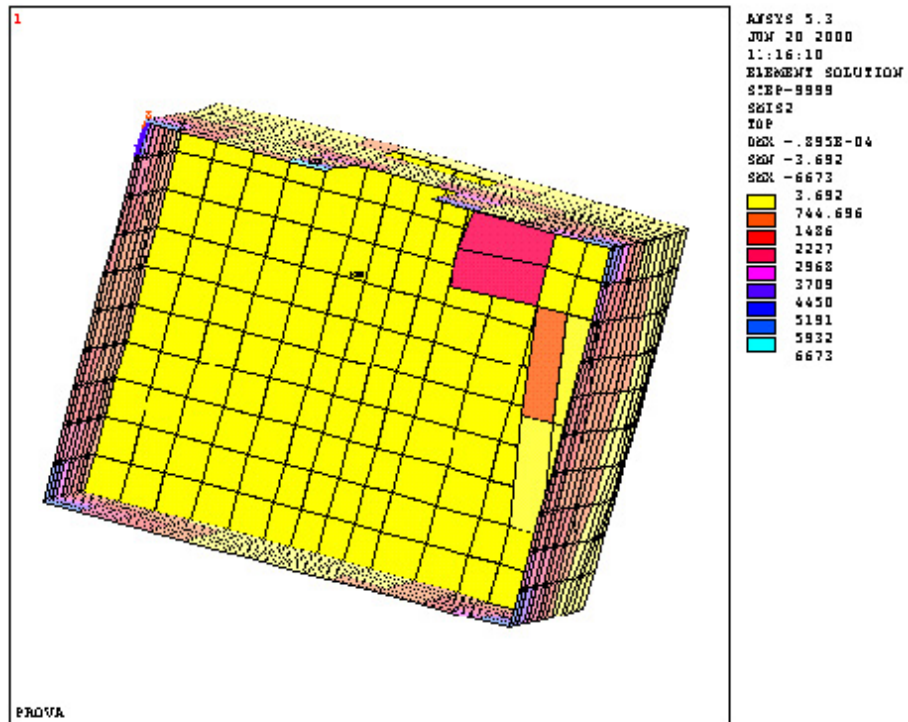


Рис. 2.75 — Напряжение  $T_{Y}$  (аксонометрия, вид снизу)

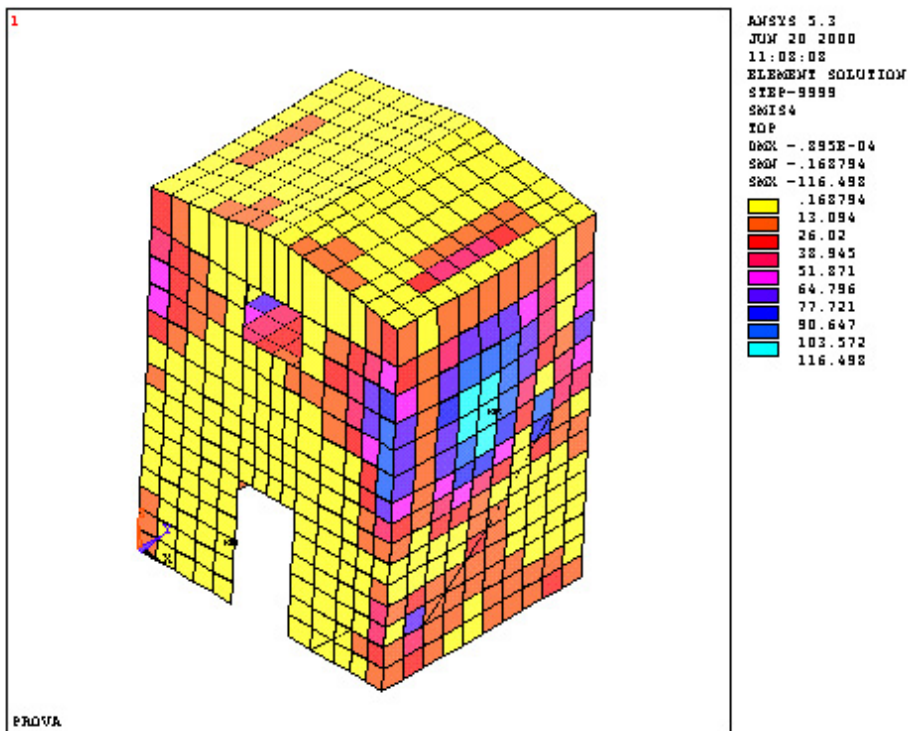


Рис. 2.76 — Напряжение  $M_X$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

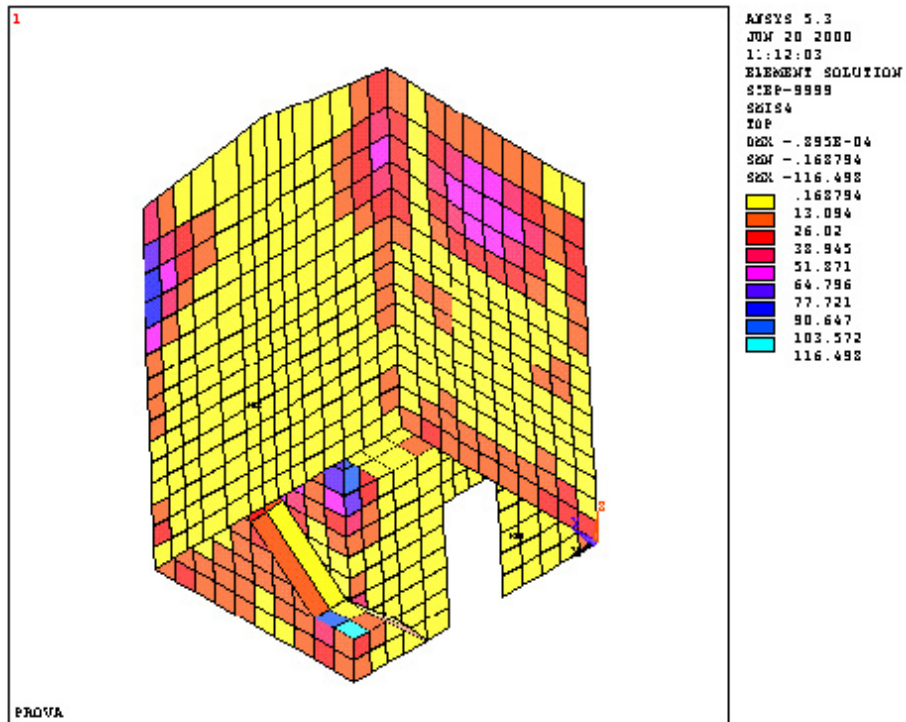


Рис. 2.77 — Напряжение  $M_X$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

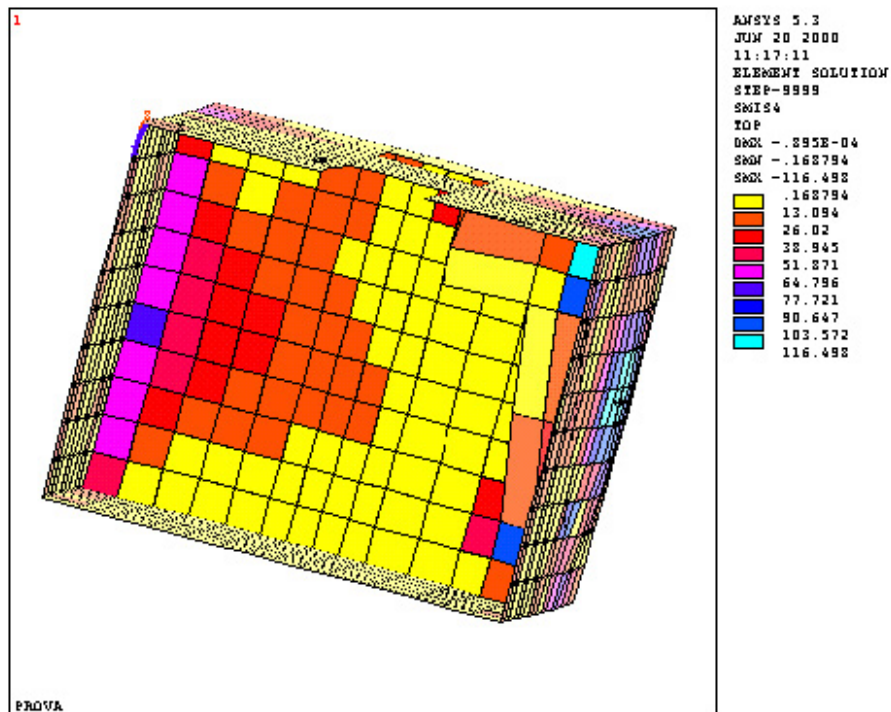


Рис. 2.78 — Напряжение  $M_X$  (аксонометрия, вид снизу)

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

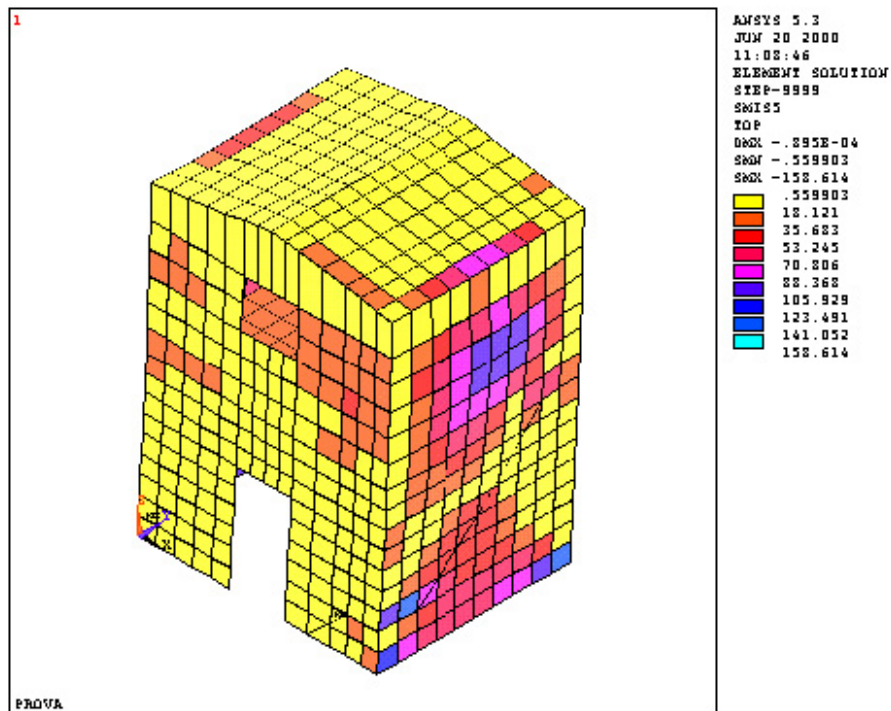


Рис. 2.79 — Напряжение  $M_Y$  (аксонометрия, вид с юго-востока)

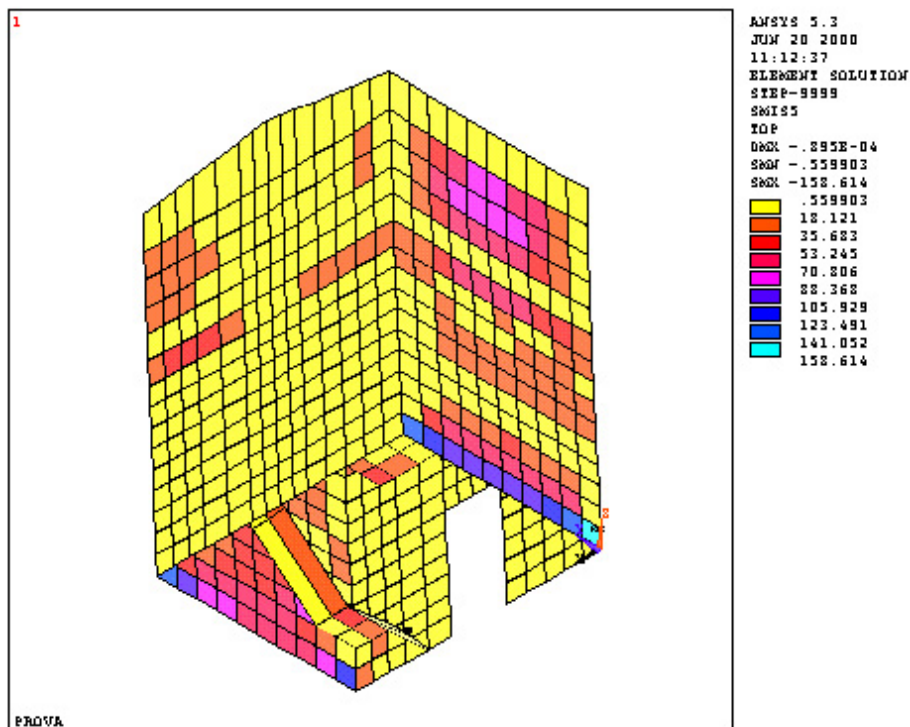


Рис. 2.80 — Напряжение  $M_Y$  (аксонометрия, вид с северо-запада)

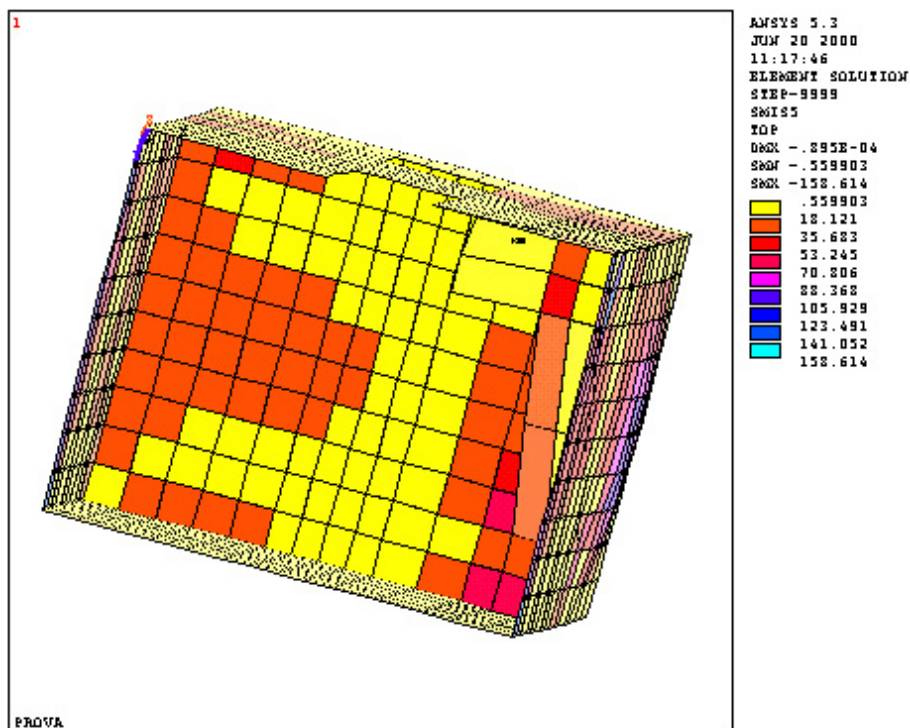


Рис. 2.81 — Напряжение  $M_x$  (аксонометрия, вид снизу)

На рис. 2.82-2.84 показаны наиболее значимые зоны с точки зрения необходимости проведения поверочного расчета напряжений в материалах (в скобках указано направление оценки напряжений, принятое для поверочного расчета).

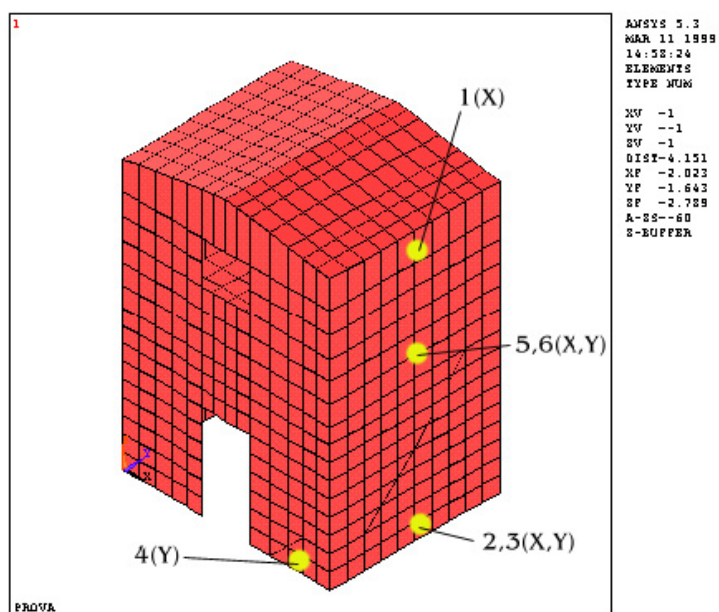


Рис. 2.82 — Зоны, для которых выполнен поверочный расчет (аксонометрия, вид с юго-востока)

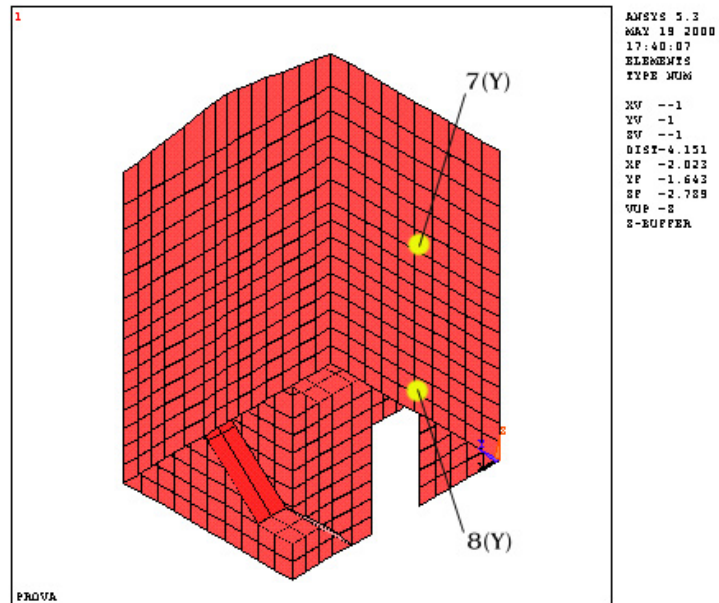


Рис. 2.83 — Зоны, для которых выполнен поверочный расчет (аксонометрия, вид с северо-запада)

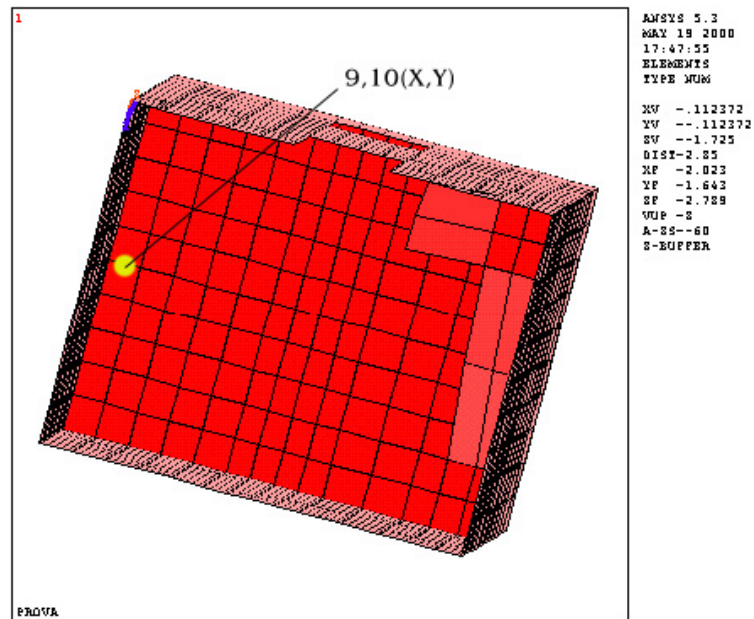


Рис. 2.84 — Зоны, для которых выполнен поверочный расчет (аксонометрия, вид снизу)

В табл. 2.9 и 2.10 приведены соответственно значения нагрузок и напряжений в материалах.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 2.9 — Наиболее значимые напряжения при приложении спектра по направлению *X*

Сечение и направление нагружения	Динамический анализ с приложением спектра		Статический анализ (только сила тяжести)		Суммарное значение	
	T, Н/м	M	T, Н/м	M	T, Н/м	M
1(x)	1179	13,09	2685	155	3864	168,09
2(x)	786,62	13,09	-1301	155	2087,62	168,09
3(y)	2227	88,36	-10005	118,43	-12232	206,79
4(y)	2968	18,12	-12303	-112,63	-15271	-130,75
5(x)	354,45	116,49	293,07	155	647,52	271,49
6(y)	744,7	105,92	-7207	118	-7951,7	213,92
7(y)	1486	88,36	-5508	394,79	-6994	483,15
8(y)	2968	105,92	-8906	118	-11874	213,92
9(x)	394,43	64,79	293,07	475,19	687,5	540
10(y)	744,7	35,68	1287	-157,92	2031,7	-193,6

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 2.10 — Результаты поверочных расчетов для сечений, указанных в табл. 2.9

Сечение	$Y_n$ (снизу), мм	$\sigma_{fmax}$	$\sigma_{fmin}$	$\sigma_{сmax}$
1	Только растяжение	95,53	17,12	0,00
2	5,0	68,31	5,04	-0,17
3	Только сжатие	-2,17	-3,73	-0,26
4	Только сжатие	-3,19	-4,18	-0,28
5	10,0	67,95	2,57	-0,35
6	Только сжатие	-1,11	-2,73	-0,19
7	73,2	4,00	-3,52	-0,29
8	Только сжатие	-2,05	-3,77	-0,26
9	158,3	105,59	5,88	-0,54
10	165,7	15,26	1,50	-0,03

Все полученные значения напряжений намного ниже максимально допустимых значений для отдельных материалов.

### 3. ПРИМЕРЫ ОБЪЕДИНЕНИЯ МОДУЛЕЙ

Строительная система EMMEDUE в первую очередь применяется для ускоренного возведения жилых зданий. При этом жилые модули обычно объединяются в ряд либо по линии конька (рис. 3.1 и 3.2). Кроме того, возможно несимметричное объединение модулей.



Рис. 3.1 — Жилые модули, объединенные в ряд

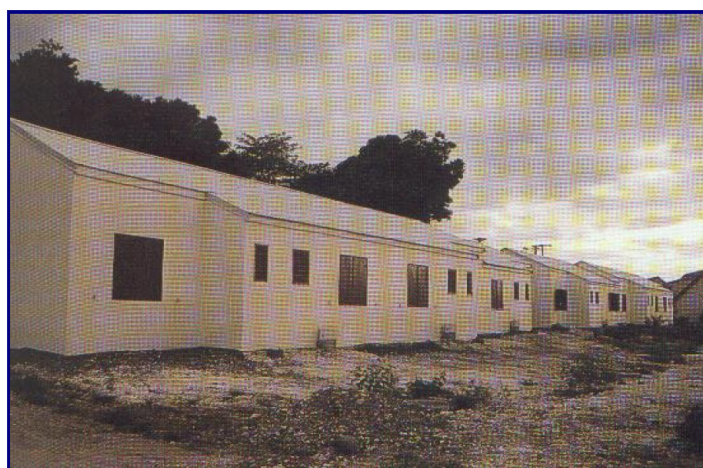


Рис. 3.2 — Жилые модули, объединенные по линии конька



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Для оценки сейсмостойкости подобных конструкций, объединяющих несколько модулей, были подготовлены схематические математические модели:

- модули, объединенные в ряд — три жилых модуля, объединенных по направлению X;
- модули, объединенные по линии конька — два жилых модуля, объединенные по направлению Y;
- модули, объединенные несимметрично (Г-образно) — к одному из крайних модулей, объединенных в ряд, добавлен жилой модуль, объединенный с ним по линии конька (по направлению Y).

Для всех трех моделей был выполнен анализ с приложением спектра по двум взаимно перпендикулярным направлениям (X и Y, где Y во всех трех случаях — направление вдоль линии конька кровли). В соответствии с указаниями, приведенными в Министерском декрете от 16.01.1996, анализ выполнялся для зоны с сейсмичностью  $S = 12$ . При проведении анализа учитывались нагрузка от собственного веса, постоянные нагрузки и временные нагрузки, принятые равными  $2 \text{ кН/м}^2$ .

Для проведения анализа сейсмостойкости было принято переменное значения ускорения, определяемое динамическими характеристиками конструкции. Зависимость описывается формулой:

$$a/g = C \cdot R \cdot \varepsilon \cdot \beta \cdot I$$

где:

$C = 0,1$ ,  $R = 1$ ,  $\varepsilon = 1,3$ ,  $\beta = 1,4$  (ввиду отсутствия характеристик площадки, где расположено здание, значения коэффициентов выбраны исходя из наиболее консервативного предположения),

для  $T_0 > 0,8 \text{ с}$   
для  $T_0 \leq 0,8 \text{ с}$

$R = 0,862/T_0^{2/3}$   
 $R = 1,00$

### **МОДУЛИ, ОБЪЕДИНЕННЫЕ В РЯД**

Ниже по результатам каждого проведенного анализа показано полученное напряженное состояние под воздействием линейных нагрузок  $T_X$  и  $T_Y$  (соответственно по горизонтали и по вертикали), нагрузок среза  $T_{XY}$  и изгибающих моментов  $M_X$  и  $M_Y$  (соответственно на горизонтальной и вертикальной поверхности элемента). Кроме того, показаны сечения, по которым проводились поверочные расчеты, и соответствующие направления нагружения.

В таблицах для рассмотренных сечений приводятся соответственно значения напряжений (вертикальные и горизонтальные нагрузки) и результаты поверочных расчетов для наиболее напряженных сечений. Значения напряжений для стали и бетона значительно ниже максимально допустимых.

Спектр по направлению Y

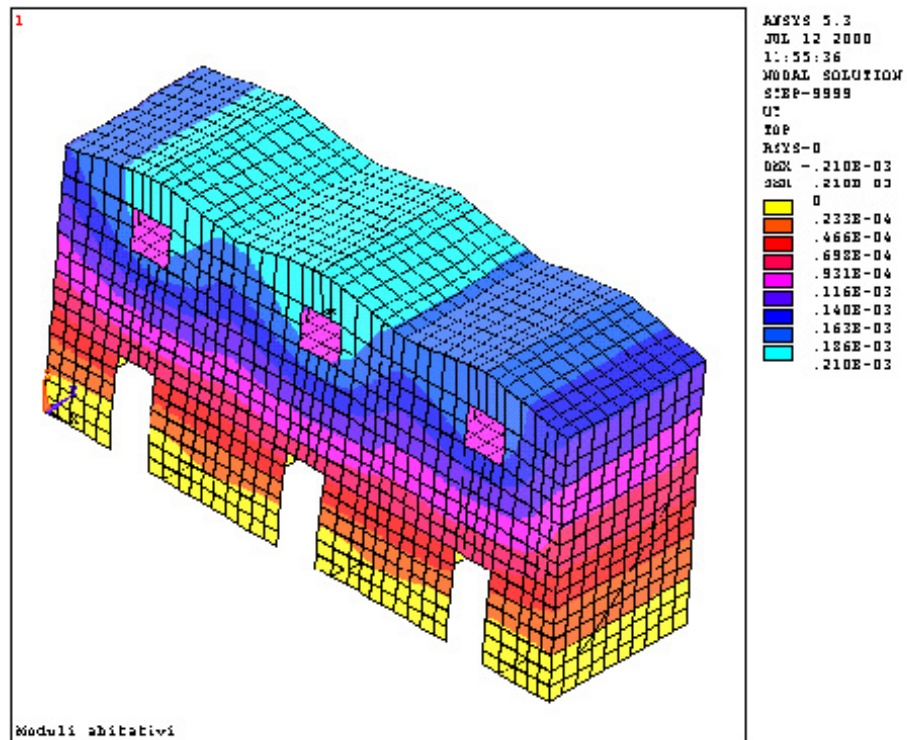


Рис. 3.3 — Перемещения по направлению Y



Рис. 3.4 — Напряжение TX

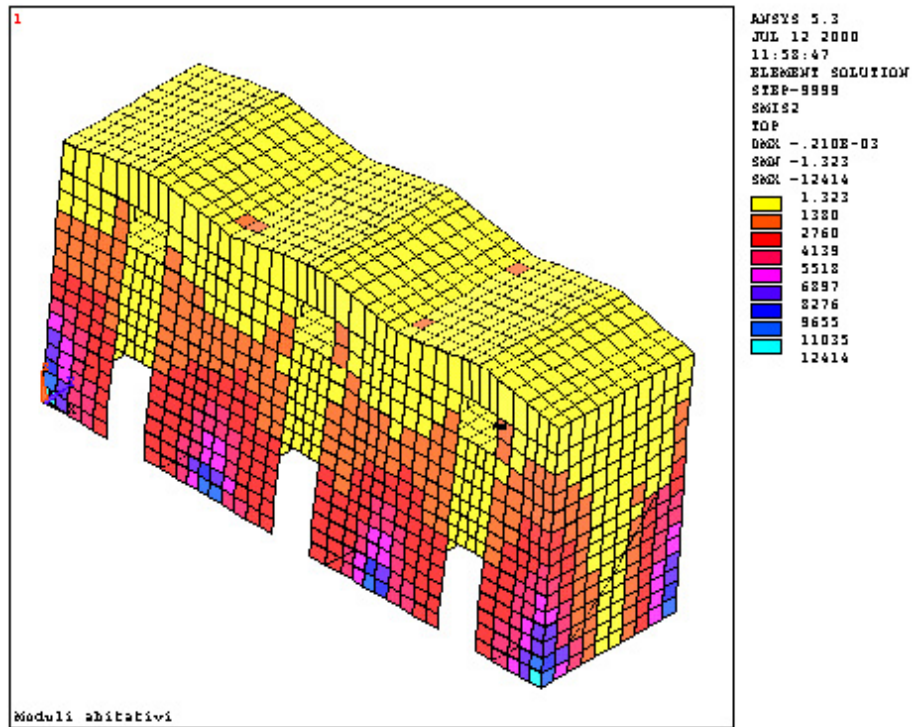


Рис. 3.5 — Напряжение  $T_Y$

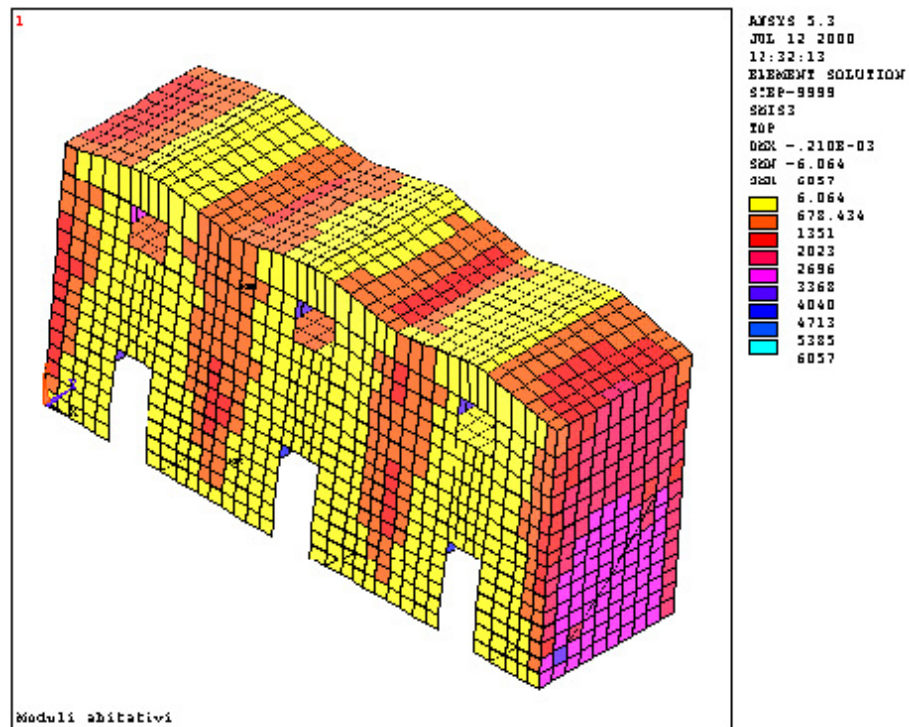


Рис. 3.6 — Напряжение  $T_{XY}$

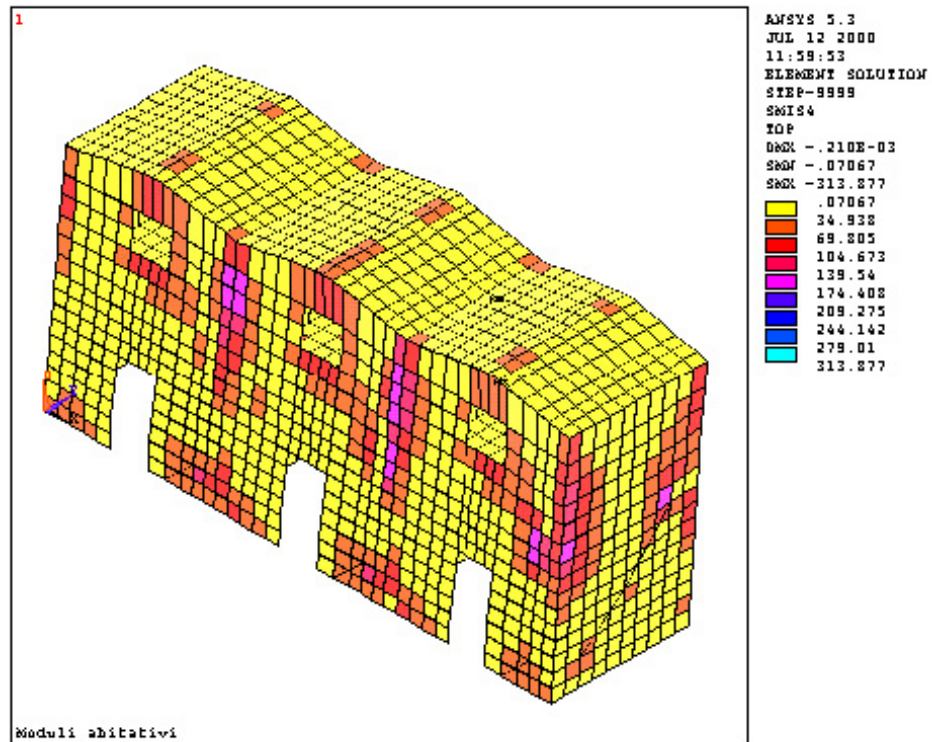


Рис. 3.7 — Напряжение  $M_x$

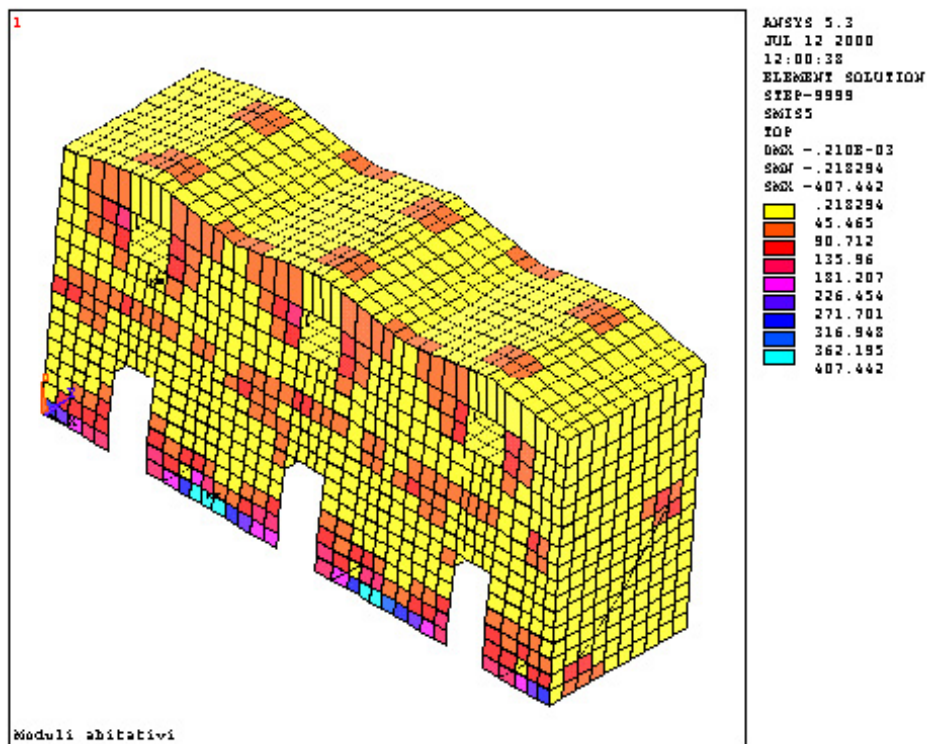


Рис. 3.8 — Напряжение  $M_y$

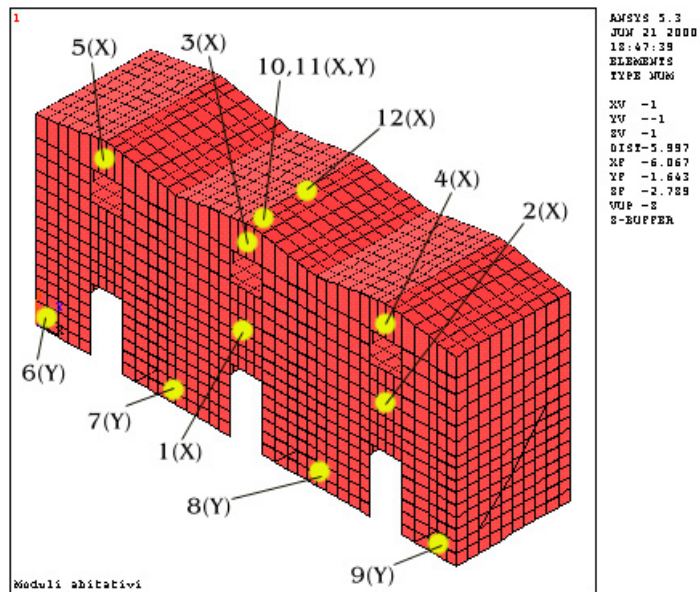


Рис. 3.9 — Сечения, для которых выполнены поперочные расчеты (аксонометрия, вид с юго-востока)

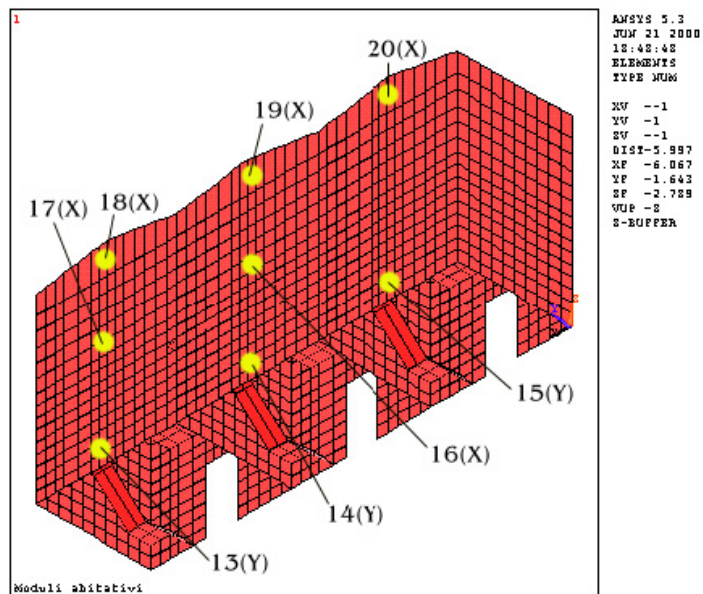


Рис. 3.10 — Сечения, для которых выполнены поперочные расчеты (аксонометрия, вид с северо-запада)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.1 — Наиболее значимые напряжения при приложении спектра по направлению *Y*

Сечение и направление нагружения	Динамический анализ с приложением спектра			Статический анализ (только сила тяжести)			Суммарное значение		
	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м
1(x)	1137	20,2	120,3	3330	-869,86	-980,8	4467	-890,06	-1101,1
2(x)	758,62	45,46	120,3	3330	-869,86	-980,8	4088,62	-815,32	-1101,1
3(x)	3409	45,46	201,2	9692	371,2	768,88	13101	416,66	970,1
4(x)	3031	45,46	201,2	9692	424,29	2519	12723	469,75	2720,2
5(x)	3031	45,46	201,2	9692	429,29	-980,8	12723	469,75	-1182
6(y)	9655	135,96	360,2	-18584	330,04	-2131	-28239	466	3091,2
7(y)	8276	316,94	360,2	-18584	330,04	768,88	-26860	646,98	970,1
8(y)	8276	316,94	360,2	-18584	330,04	768,88	-26860	646,98	970,1
9(y)	9655	135,96	360,2	-18584	330,04	2519	-28239	466	2720,2
10(x)	1895	45,46	120,3	-3032	301,3	2519	-4927	346,76	2639,3
11(y)	400,7	26,3	120,3	659,78	1065	2519	2919,7	1091,3	2639,3
12(x)	163,2	23,1	109,6	-18936	-869,3	768,88	-19099,2	-892,4	878,48
13(y)	2760	181,2	200,2	-18584	330,04	768,88	-21344	511,24	969,08
14(y)	2760	181,2	200,2	-18584	330,04	768,88	-21344	511,24	969,08
15(y)	2760	181,2	200,2	-18584	330,04	768,88	-21344	511,24	969,08
16(x)	758,62	90,71	190,3	149,23	424,29	603,8	907,85	515	794,1
17(x)	758,62	90,71	190,3	149,23	424,29	603,8	907,85	515	794,1
18(x)	2652	90,71	190,3	9692	-338,47	6018	12344	-429,18	6208,3
19(x)	3031	90,71	190,3	9692	-338,37	768,88	12723	-429,18	959,18
20(x)	2652	90,71	190,3	9692	-338,37	-4480	12344	-429,18	-4670,3

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.2 — Результаты поверочных расчетов для сечений, указанных в табл. 3.1

Сечение	$Y_n$ (снизу), мм	$\sigma_{fmax}$	$\sigma_{fmin}$	$\sigma_{сmax}$
1	146,4	226,84	10,16	-1,056
2	145,5	226,45	9,62	-1,093
3	Только растяжение	252,11	82,07	0,000
4	Только растяжение	254,14	6,64	0,000
5	Только растяжение	254,14	6,64	0,000
6	Только сжатие	-4,92	-8,37	-0,585
7	Только сжатие	-3,93	-8,71	-0,619
8	Только сжатие	-3,93	-8,71	-0,619
9	Только сжатие	-4,92	-8,37	-0,585
10	Только сжатие	-0,45	-3,60	-0,251
11	153,0	228,21	14,41	-1,04
12	108,6	17,87	-7,30	-0,722
13	Только сжатие	-3,13	-6,91	-0,491
14	Только сжатие	-3,13	-6,91	-0,491
15	Только сжатие	-3,13	-6,91	-0,491
16	11,1	108,66	3,27	-0,625
17	11,1	108,66	3,27	-0,625
18	Только растяжение	245,02	69,88	0,000
19	Только растяжение	249,85	74,71	0,000
20	Только растяжение	245,02	69,88	0,000



Спектр по направлению X

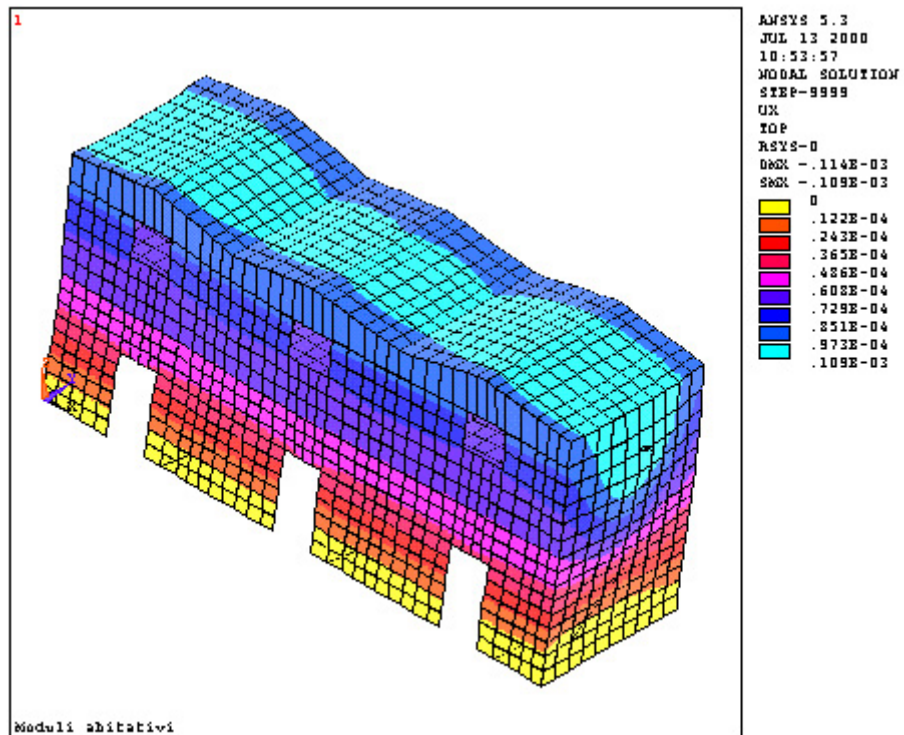


Рис. 3.11 — Перемещения по направлению X

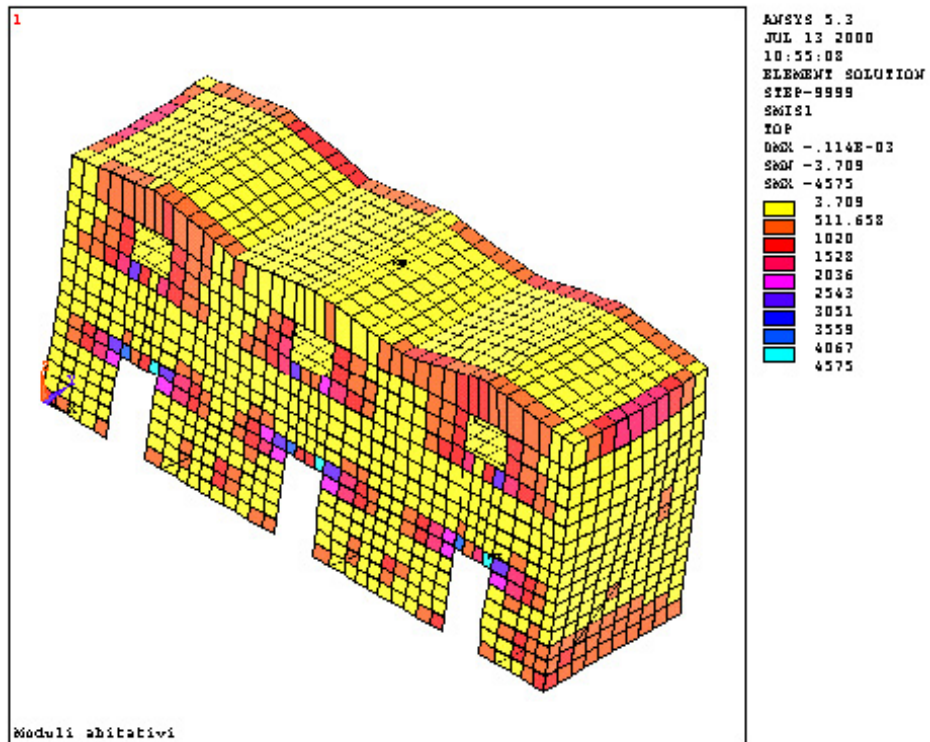


Рис. 3.12 — Напряжение TX

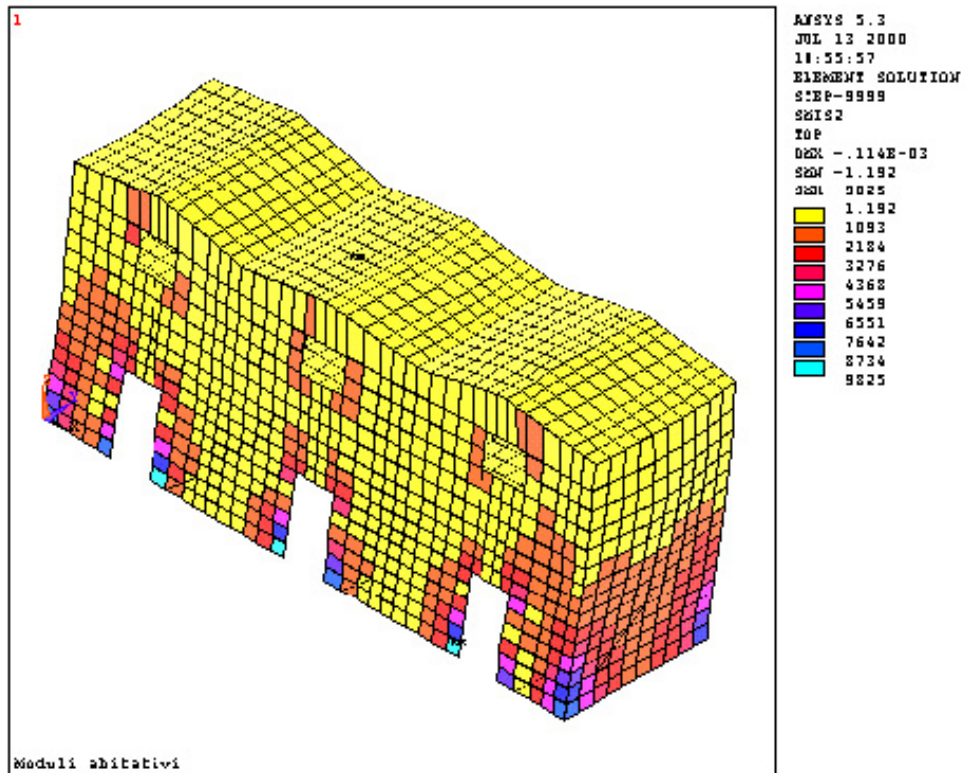


Рис. 3.13 — Напряжение  $T_U$

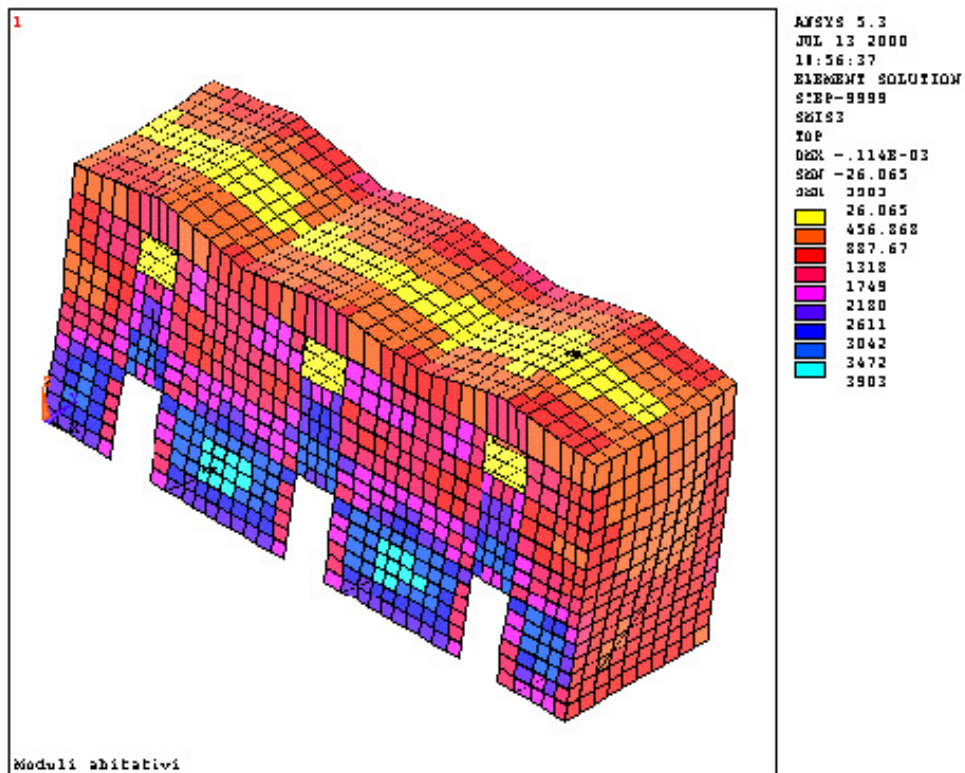


Рис. 3.14 — Напряжение  $T_{XY}$

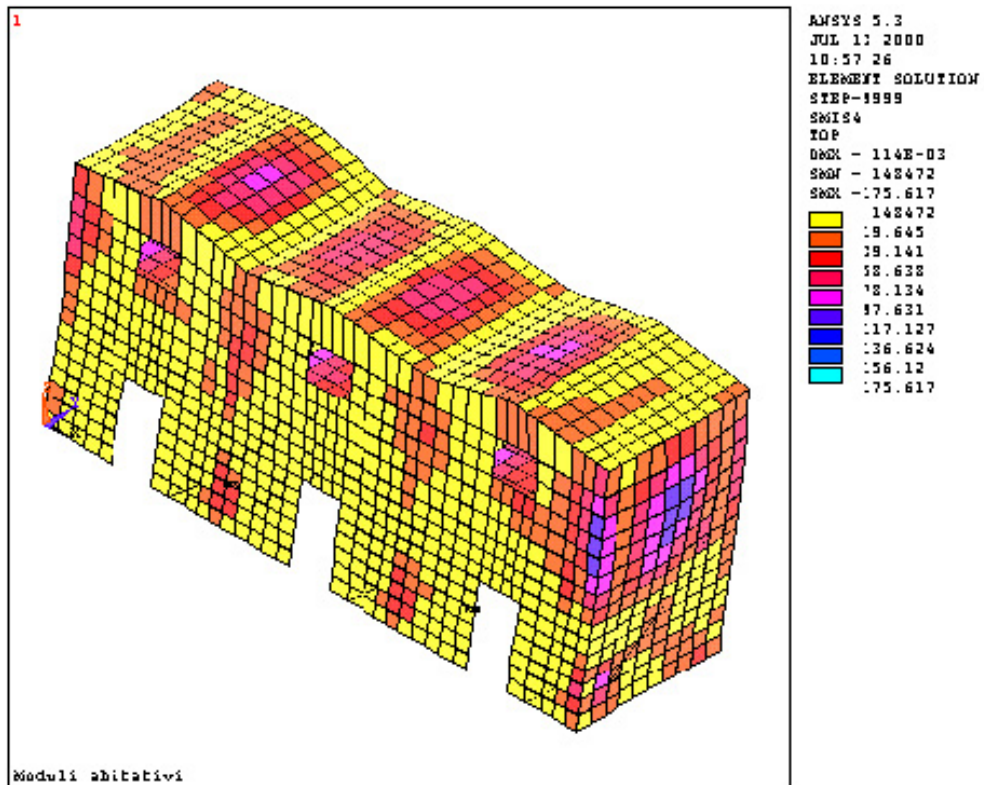


Рис. 3.15 — Напряжение  $M_X$

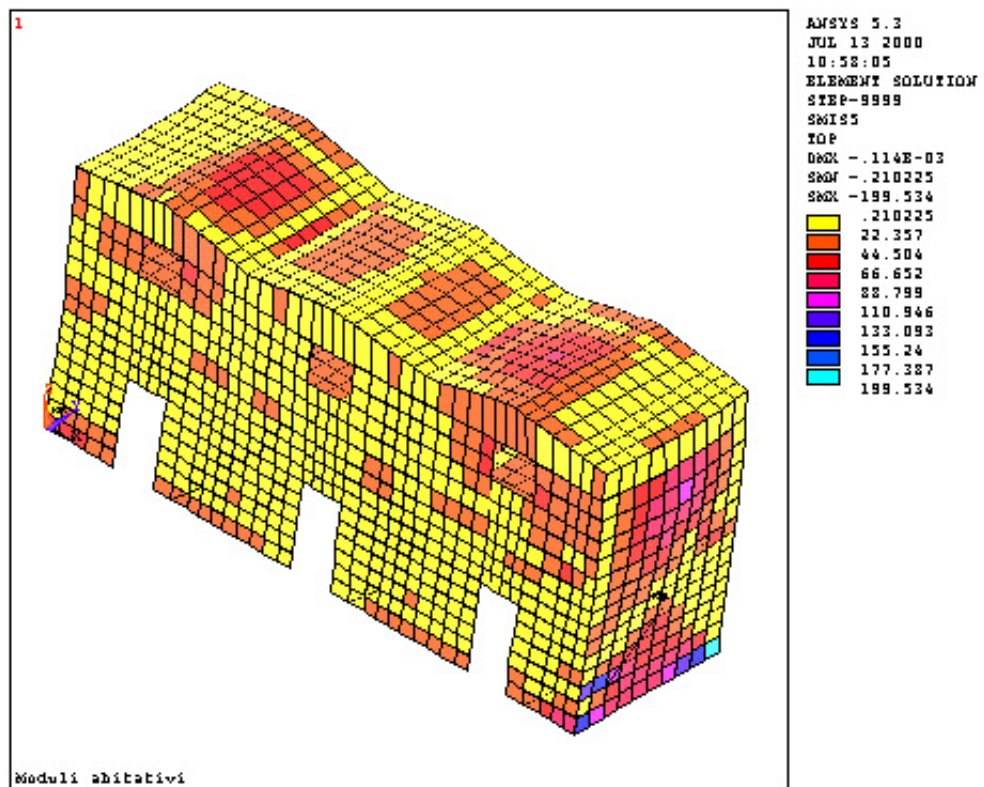


Рис. 3.16 — Напряжение  $M_Y$

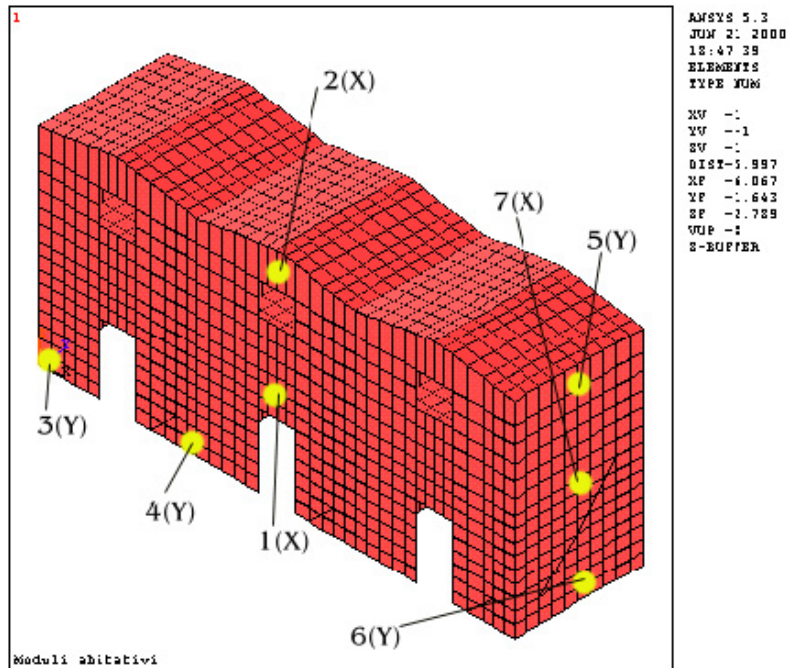


Рис. 3.17 — Сечения, для которых выполнен расчет (аксонометрия, вид с юго-востока)

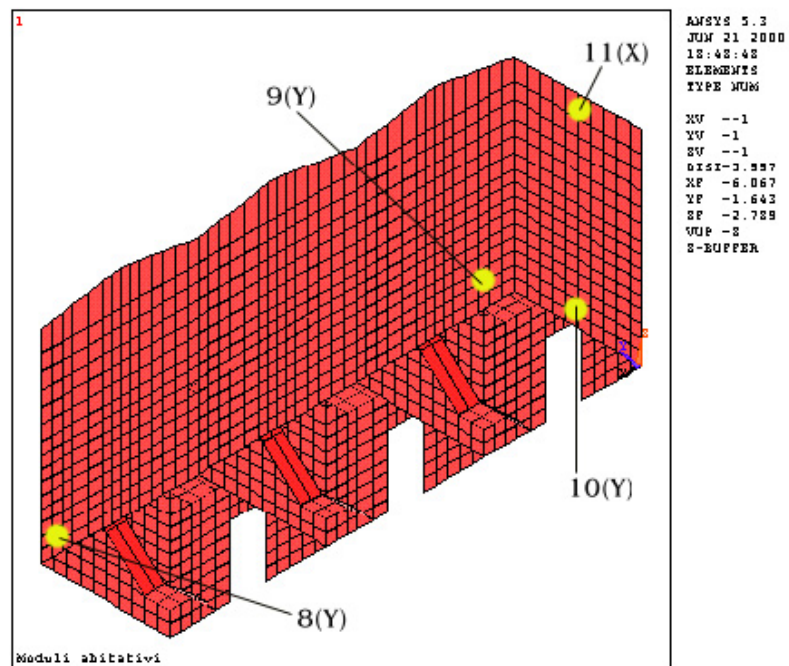


Рис. 3.18 — Сечения, для которых выполнен расчет (аксонометрия, вид с северо-запада)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.2 — Результаты поверочных расчетов для сечений, указанных в табл. 3.4

Сечение	$Y_n$ (снизу), мм	$\sigma_{fmax}$	$\sigma_{fmin}$	$\sigma_{сmax}$
1	145,2	212,73	8,62	-1,058
2	Только растяжение	206,44	48,56	0,000
3	Только сжатие	-4,11	-6,69	-0,467
4	Только сжатие	-3,59	-6,18	-0,433
5	26,6	81,85	-8,42	-1,283
6	Только сжатие	-4,33	-5,96	-0,410
7	8,3	149,09	7,58	-0,627
8	Только сжатие	-4,10	-6,70	-0,468
9	Только сжатие	-4,10	-6,70	-0,468
10	Только сжатие	-3,74	-6,04	-0,421
11	Только растяжение	253,55	45,63	0,000

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.3 — Наиболее значимые напряжения при приложении спектра по направлению *X*

Сечение и направление нагружения	Динамический анализ с приложением спектра			Статический анализ (только сила тяжести)			Суммарное значение		
	Т, Н/м	М	Срез, Н/м	Т, Н/м	М	Срез, Н/м	Т, Н/м	М	Срез, Н/м
1(x)	202,3	12,3	2611	3330	-869,86	-980,8	3532,3	-882,16	-3521,8
2(x)	304,6	15,6	1749	9692	371,2	768,88	9996,6	386,8	2517,8
3(y)	4368	19,64	2611	-18584	330,04	-2131	-22952	349,68	-4732
4(y)	2184	19,64	3042	-18584	330,04	768,88	-20768	349,68	3810,8
5(y)	2184	78,13	887,67	-5755	1800	-333,4	-7939	1878,1	1221,0
6(y)	3276	19,64	1318	-18584	200,2	-301,2	-21860	219,84	1619,2
7(x)	206,3	117,12	887,67	3330	424,29	-230,1	3536,3	541,41	1117,7
8(y)	4368	22,35	2180	-18584	330,04	768,88	-22952	352,39	2948,8
9(y)	4368	22,35	2180	-18584	330,04	768,88	-22952	352,39	2948,8
10(y)	2184	110,94	887,67	-18584	200,2	668,18	-20768	311,14	1555,8
11(x)	2036	39,14	100,4	9692	-469,86	668,18	11728	509	768,58

## **МОДУЛИ, ОБЪЕДИНЕННЫЕ ПО ЛИНИИ КОНЬКА КРОВЛИ**

Ниже по результатам каждого проведенного анализа показано полученное напряженное состояние под воздействием линейных нагрузок  $T_X$  и  $T_Y$  (соответственно по горизонтали и по вертикали), нагрузок среза  $T_{XY}$  и изгибающих моментов  $M_X$  и  $M_Y$  (соответственно на горизонтальной и вертикальной поверхности элемента). Кроме того, показаны сечения, по которым проводились поверочные расчеты, и соответствующие направления нагружения.

В таблицах для рассмотренных сечений приводятся соответственно значения напряжений (вертикальные и горизонтальные нагрузки) и результаты поверочных расчетов наиболее напряженных сечений. Значения напряжений для стали и бетона ниже максимально допустимых.

Спектр по направлению Y

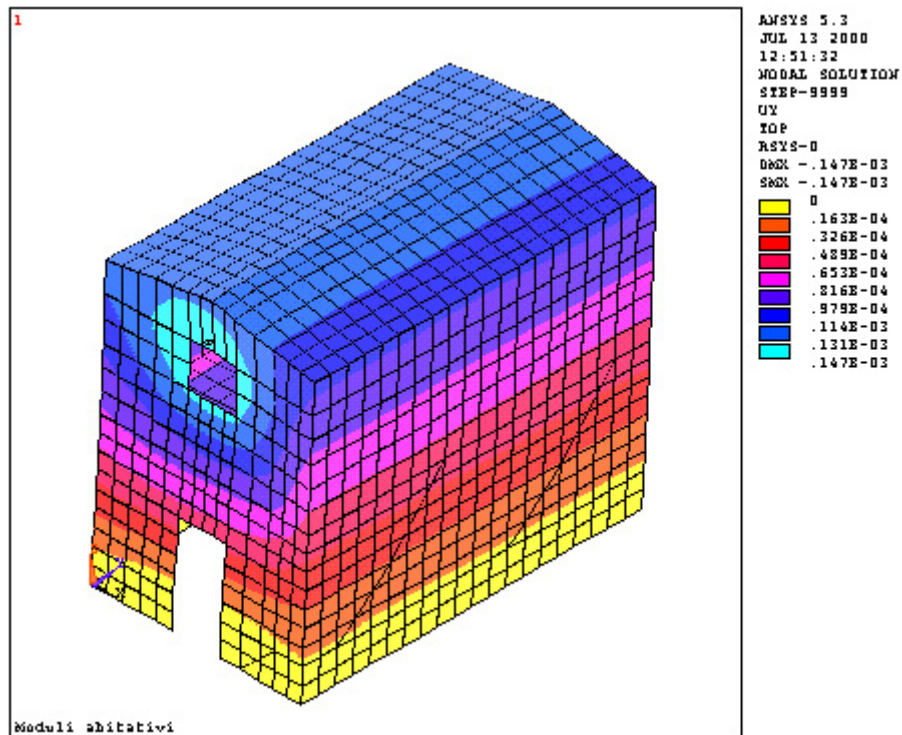


Рис. 3.19 — Перемещения по направлению Y

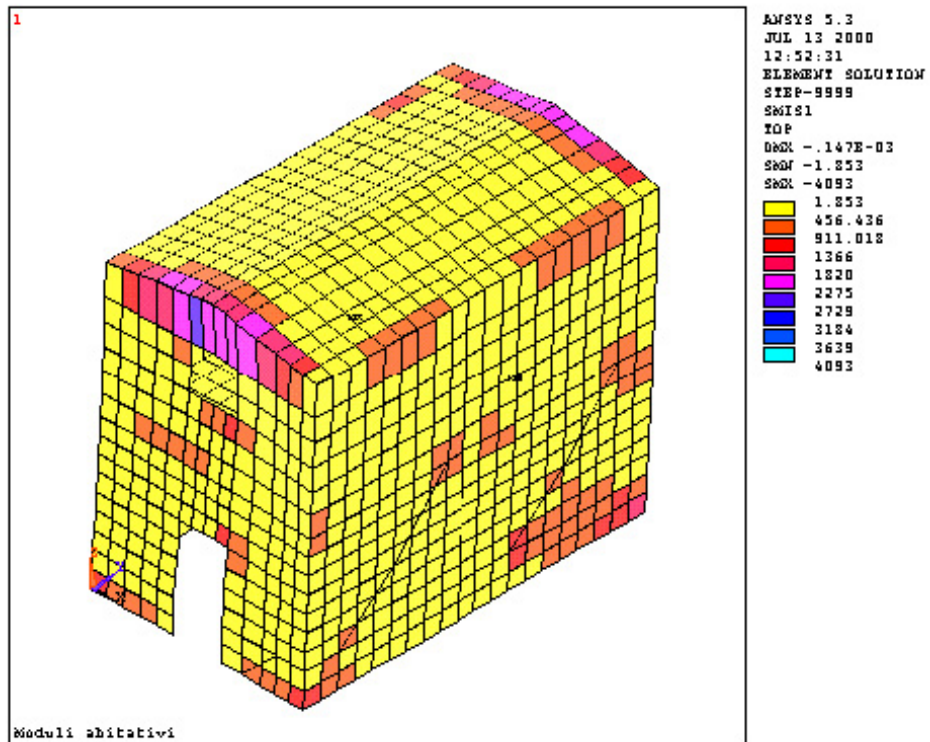


Рис. 3.20 — Напряжение TX



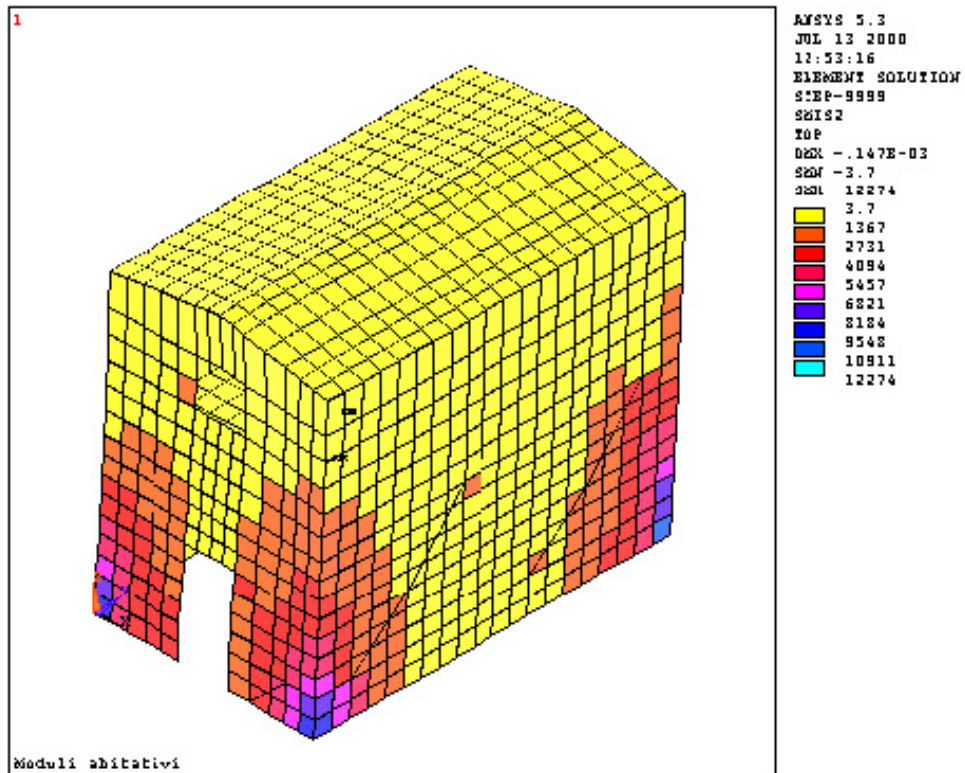


Рис. 3.21 — Напряжение  $T_{xy}$

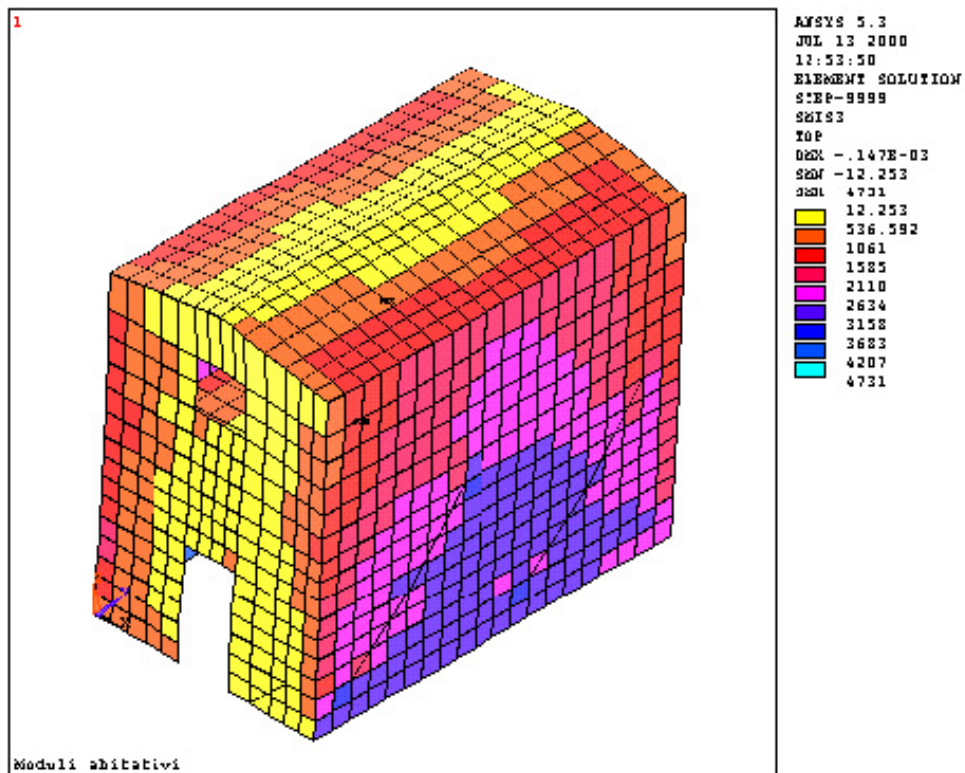


Рис. 3.22 — Напряжение  $T_{xy}$

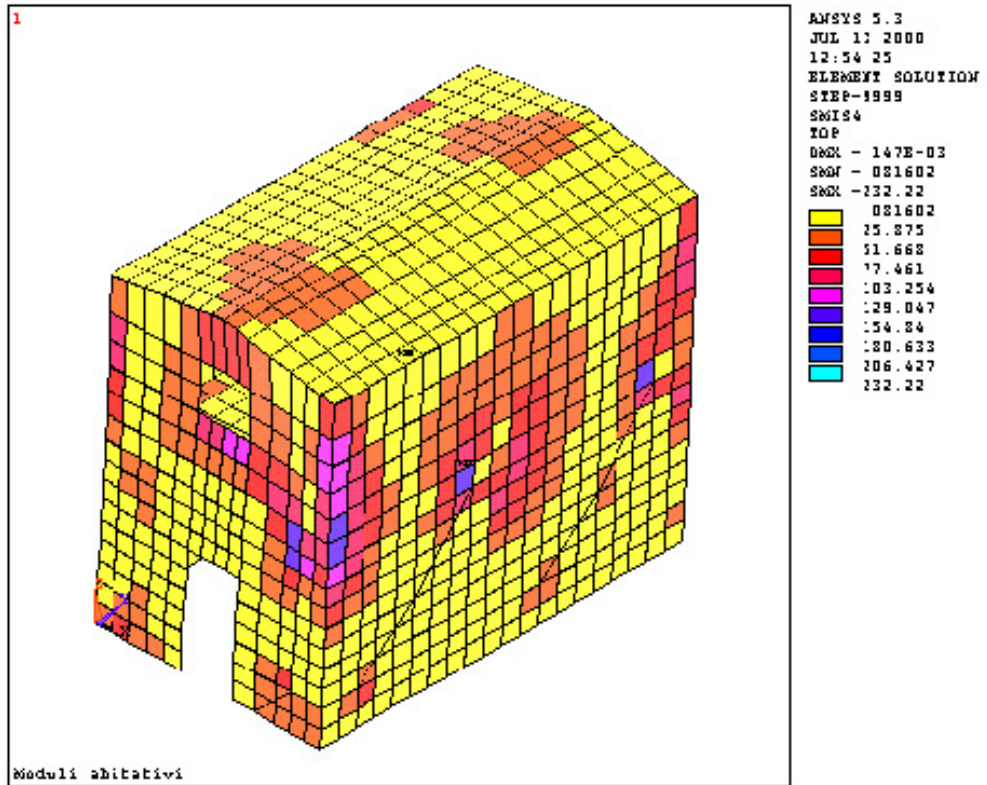


Рис. 3.23 — Напряжение  $M_X$

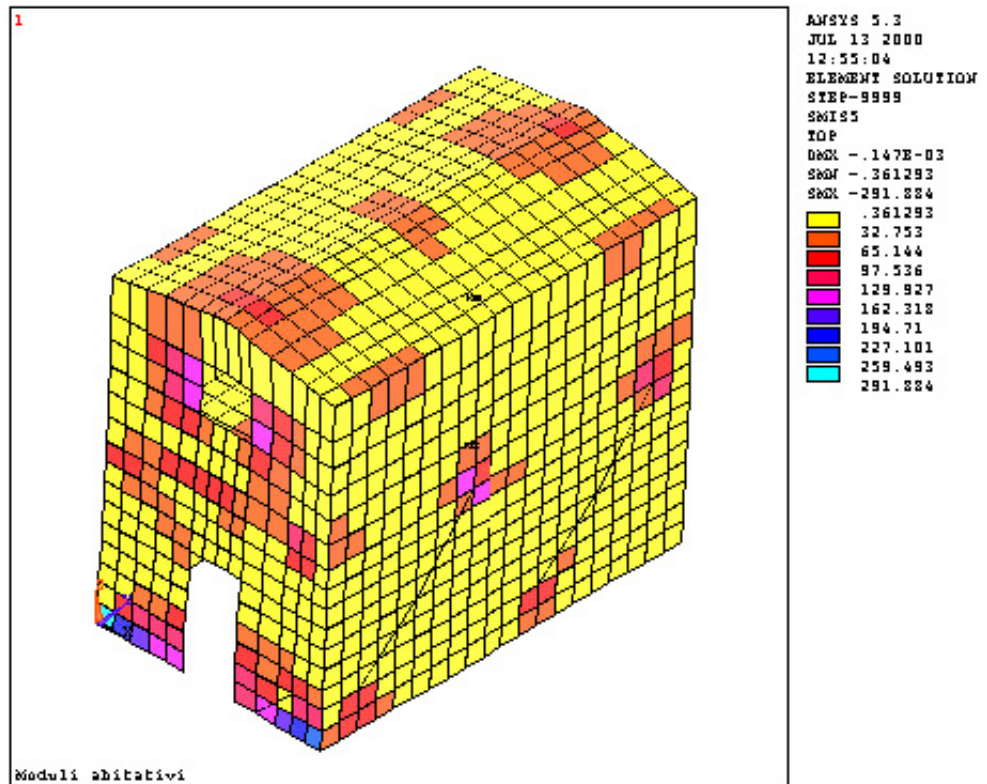


Рис. 3.24 — Напряжение  $M_Y$

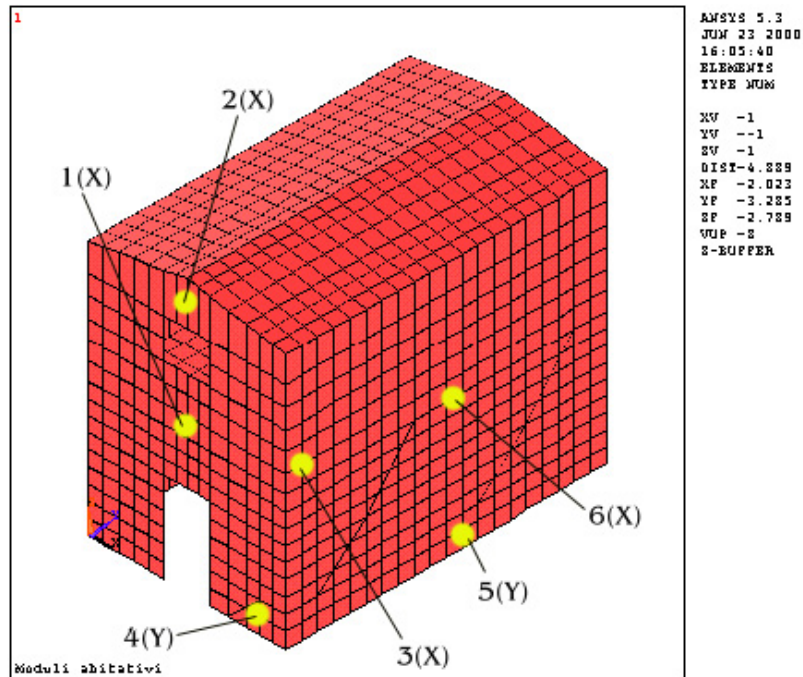


Рис. 3.25 — Сечения, для которых выполнены поверочные расчеты (аксонометрия, вид с юго-востока)

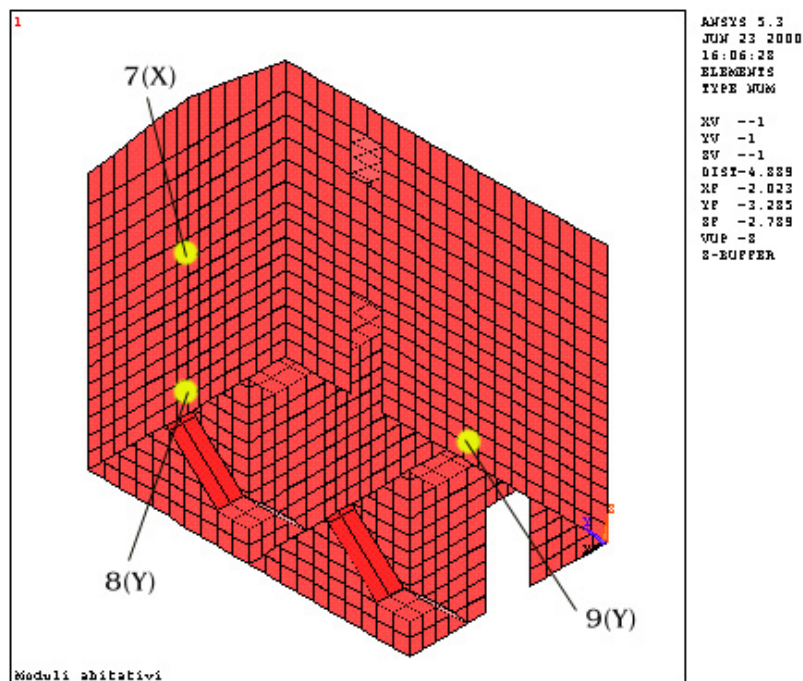


Рис. 3.26 — Сечения, для которых выполнены поверочные расчеты (аксонометрия, вид с северо-запада)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.5 — Наиболее значимые напряжения при приложении спектра по направлению  $Y$

Сечение и направление нагружения	Динамический анализ с приложением спектра			Статический анализ (только сила тяжести)			Суммарное значение		
	Т, Н/м	М	Срез, Н/м	Т, Н/м	М	Срез, Н/м	Т, Н/м	М	Срез, Н/м
1(x)	456,43	30,1	200,2	1374	-742,3	-778,34	1830,4	-772,4	-976,54
2(x)	2275	77,46	200,2	6659	-366,85	-3556	8934	-444,31	-3756,2
3(x)	911,01	129,04	1585	1374	100,4	610,46	2285	229,44	2195,4
4(y)	5457	129,92	196,8	-20243	-748,57	610,46	-25700	-878,49	807,26
5(y)	1367	32,75	3158	-20243	-748,57	-778,34	-21610	-781,32	-3936,3
6(x)	279,3	51,66	2634	-1268	-203,2	709,8	-1547,3	-254,86	3343,8
7(x)	911,01	50,9	271,2	709,7	-366,85	610,46	1620,7	-417,75	881,66
8(y)	1367	129,92	271,2	-20243	500,2	519,86	-21610	630,12	791,06
9(y)	910,9	32,75	4207	-20243	500,2	519,86	-21153	532,77	4726,8

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.6 — Результаты поверочных расчетов для сечений, указанных в табл. 3.5

Сечение	$Y_n$ (снизу), мм	$\sigma_{fmax}$	$\sigma_{fmin}$	$\sigma_{сmax}$
1	10,7	169,27	5,59	-0,937
2	Только растяжение	204,63	23,29	0,000
3	6,6	73,89	4,67	-0,242
4	Только сжатие	-2,89	-9,27	-0,670
5	Только сжатие	-4,04	-6,13	-0,425
6	136,4	27,59	-0,80	-0,280
7	145,2	100,03	4,00	-0,502
8	Только сжатие	-2,75	-7,42	-0,532
9	Только сжатие	-3,01	-6,95	-0,495

Спектр по направлению X

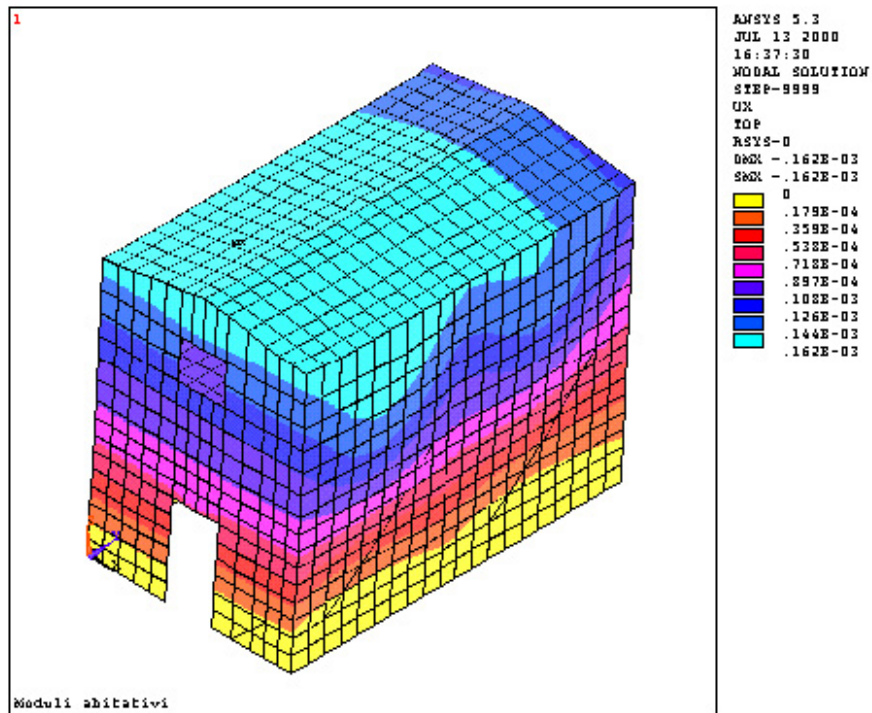


Рис. 3.27 — Перемещения по направлению X

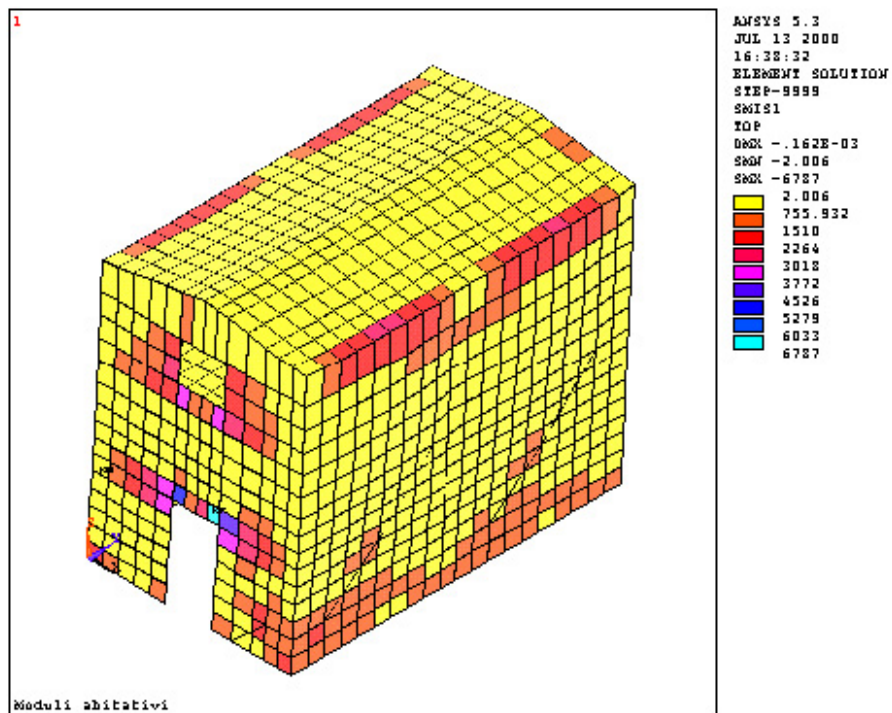


Рис. 3.28 — Напряжение TX

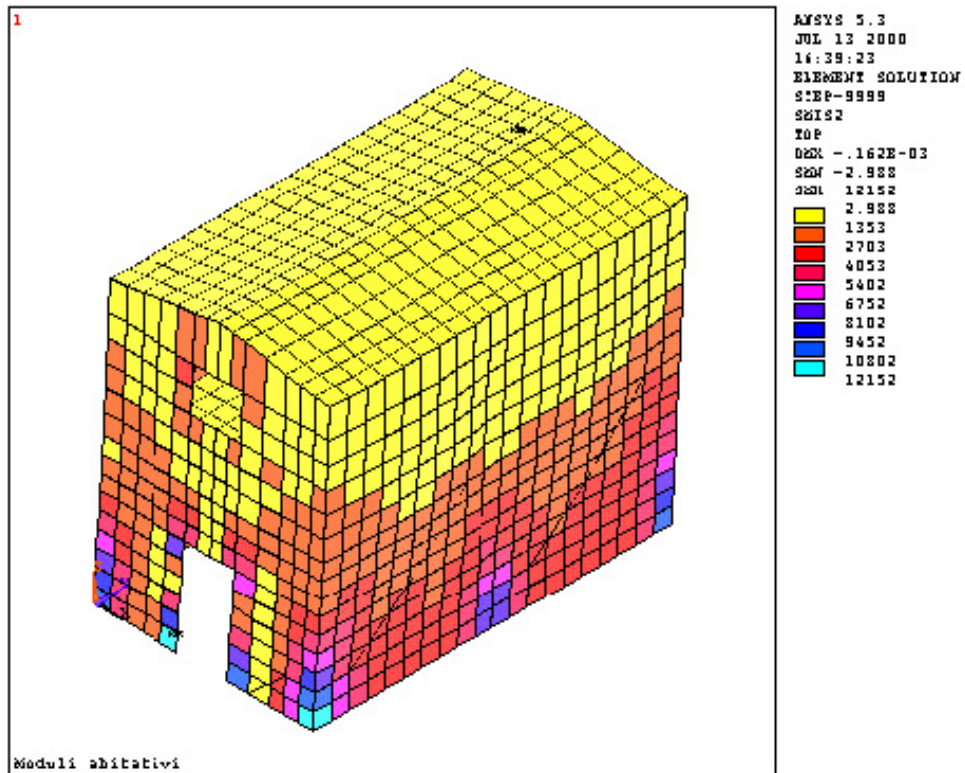


Рис. 3.29 — Напряжение  $T_{xy}$

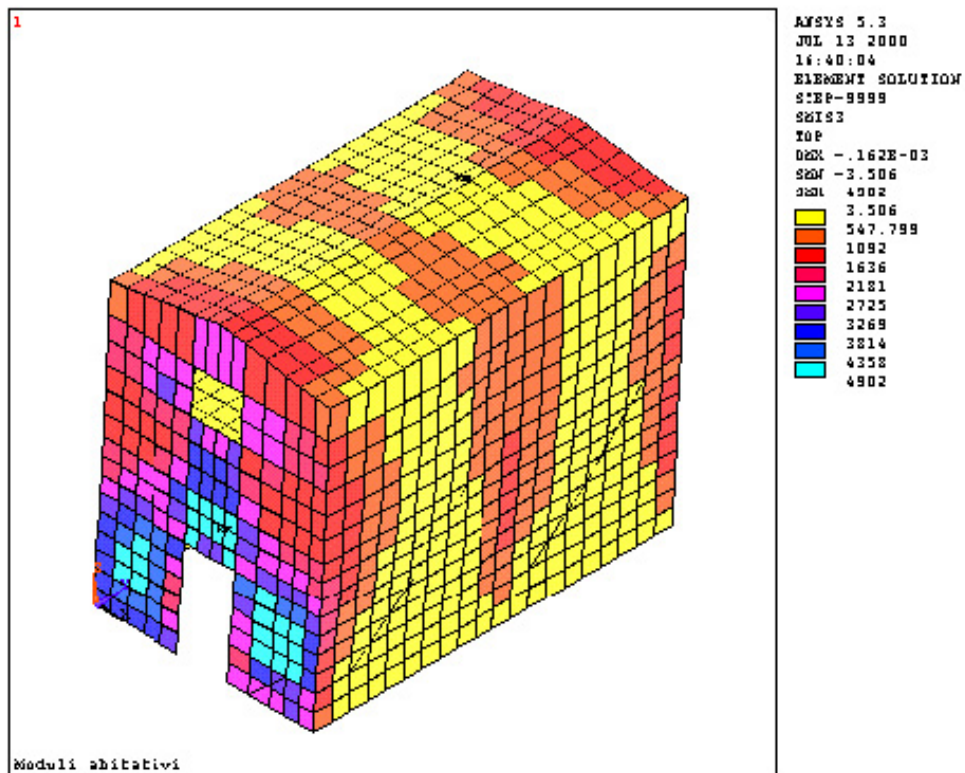


Рис. 3.30 — Напряжение  $T_{xy}$

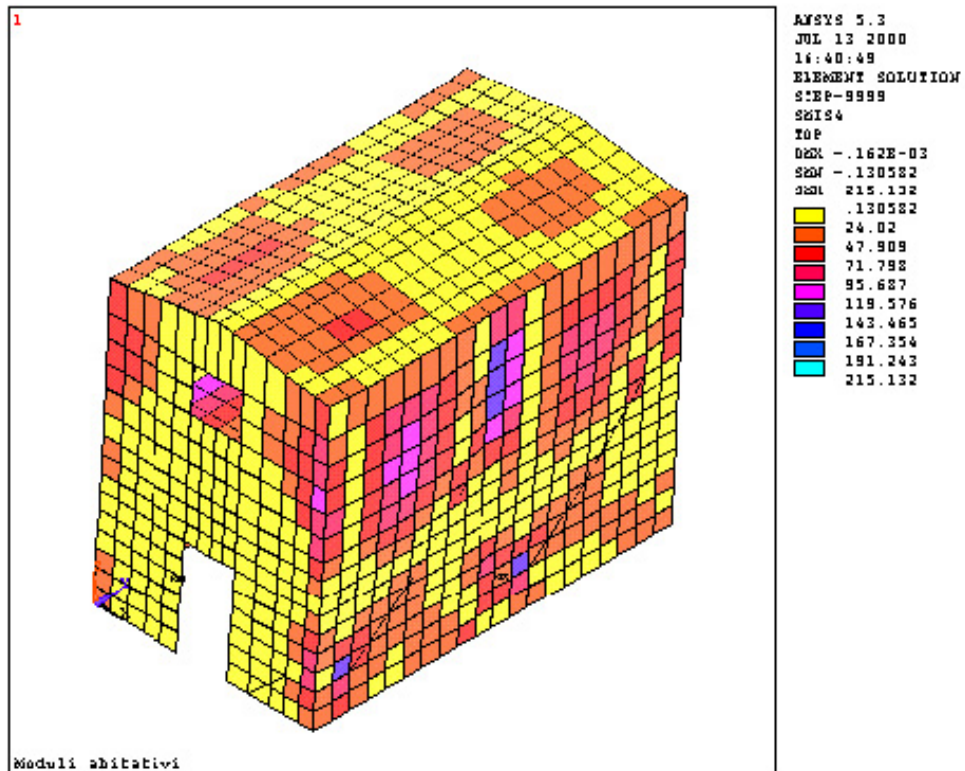


Рис. 3.31 — Напряжение  $M_X$

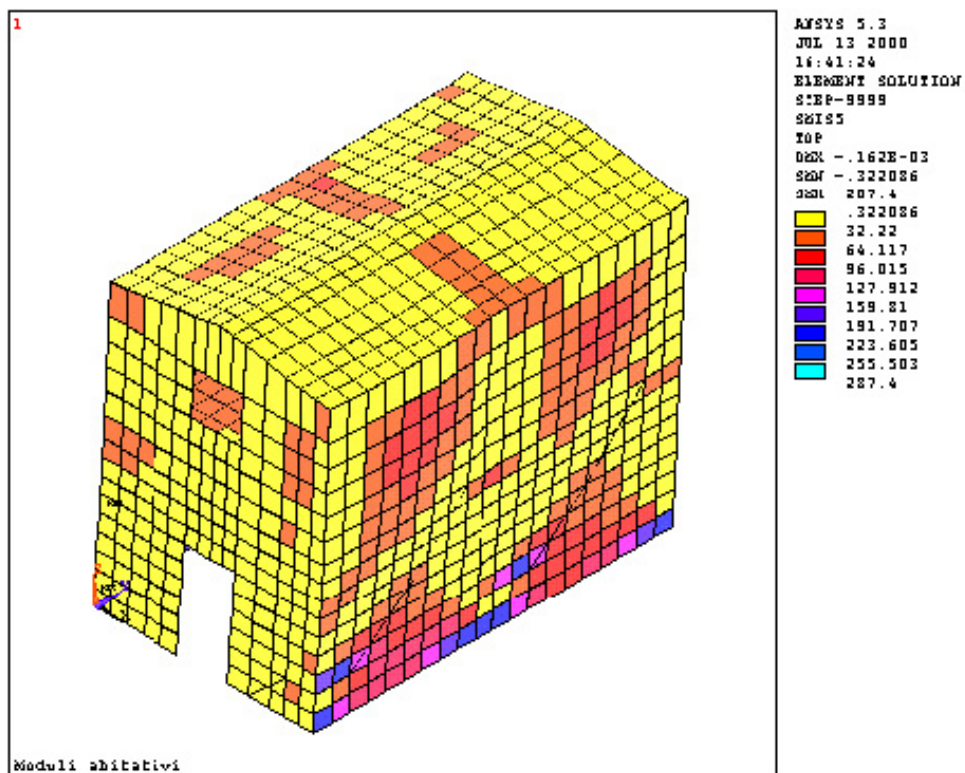


Рис. 3.32 — Напряжение  $M_Y$



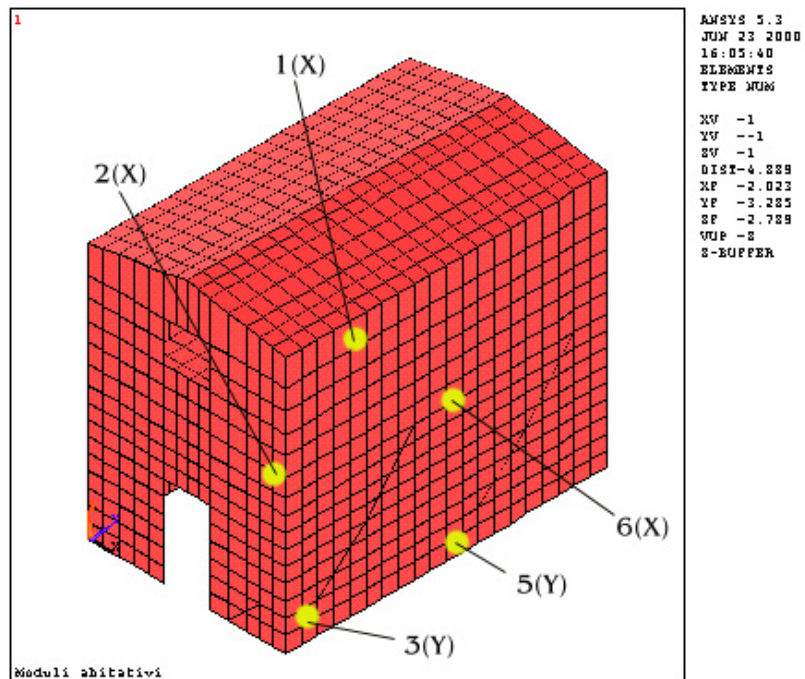


Рис. 3.33 — Сечения, для которых выполнены поверочные расчеты (аксонометрия, вид с юго-востока)

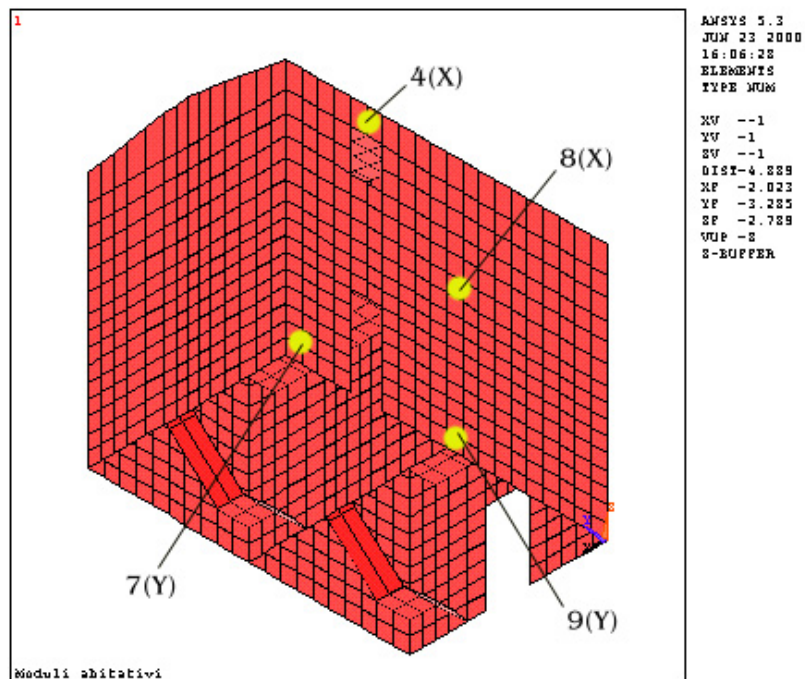


Рис. 3.34 — Сечения, для которых выполнены поверочные расчеты (аксонометрия, вид с северо-запада)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.7 — Наиболее значимые напряжения при приложении спектра по направлению  $X$

Сечение и направление нагружения	Динамический анализ с приложением спектра			Статический анализ (только сила тяжести)			Суммарное значение		
	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м
1(x)	1510	47,9	200,4	6659	384,04	620,46	8169	436,94	810,86
2(x)	500,2	60,9	1092	-1268	-200,6	1207,3	-1768,2	-261,5	2299,3
3(y)	9452	127,91	470,7	-20243	-74,85	-2167	-29695	-202,6	-2637,7
4(x)	2264	47,9	100,4	6659	-366,85	610,46	8923	-414,75	710,86
5(y)	6752	223,60	200,4	-20243	-748,57	-778,34	-26995	-972,17	-978,74
6(x)	300,6	47,90	1636	-1268	-203,2	709,8	-1568,6	-251,11	2345,8
7(y)	9452	191,7	100,7	-20243	400,3	1207,3	-29695	592	1301
8(x)	500,2	47,9	547,79	207,4	-366,85	610,46	707,6	-414,75	1158,2
9(y)	6752	223,6	70,3	-20243	500,2	519,86	-26995	723,8	590,16

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.8 — Результаты поверочных расчетов для сечений, указанных в табл. 3.7

Сечение	$Y_n$ (снизу), мм	$\sigma_{fmax}$	$\sigma_{fmin}$	$\sigma_{stmax}$
1	1,6	192,99	19,63	-0,153
2	135,0	26,05	-0,98	-0,282
3	Только сжатие	-6,24	-7,74	-0,528
4	Только растяжение	198,45	29,18	0,000
5	Только сжатие	-2,76	-9,95	-0,721
6	136,2	26,63	-0,83	-0,275
7	Только сжатие	-4,80	-9,18	-0,647
8	143,8	87,19	2,60	-0,504
9	Только сжатие	-3,68	-9,03	-0,645

## **МОДУЛИ, ОБЪЕДИНЕННЫЕ Г-ОБРАЗНО**

Ниже по результатам каждого проведенного анализа показано полученное напряженное состояние под воздействием линейных нагрузок  $T_X$  и  $T_Y$  (соответственно по горизонтали и по вертикали), нагрузок среза  $T_{XY}$  и изгибающих моментов  $M_X$  и  $M_Y$  (соответственно на горизонтальной и вертикальной поверхности элемента). Кроме того, показаны сечения, по которым проводились поверочные расчеты, и соответствующие направления нагружения.

В таблицах для рассмотренных сечений приводятся соответственно значения напряжений (вертикальные и горизонтальные нагрузки) и результаты поверочных расчетов для наиболее напряженных сечений. Значения напряжений для стали и бетона значительно ниже максимально допустимых.

Спектр по направлению Y

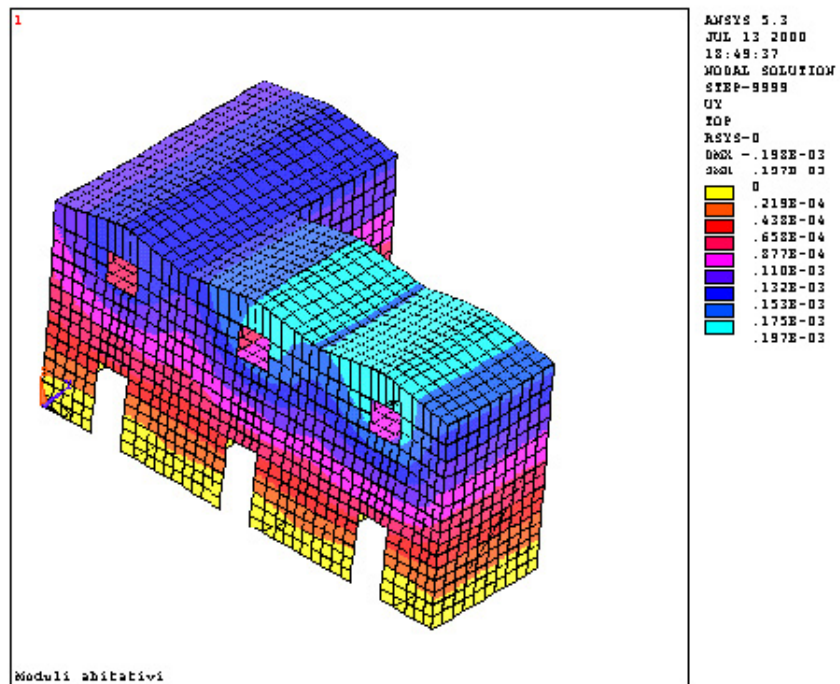


Рис. 3.35 — Перемещения по направлению Y

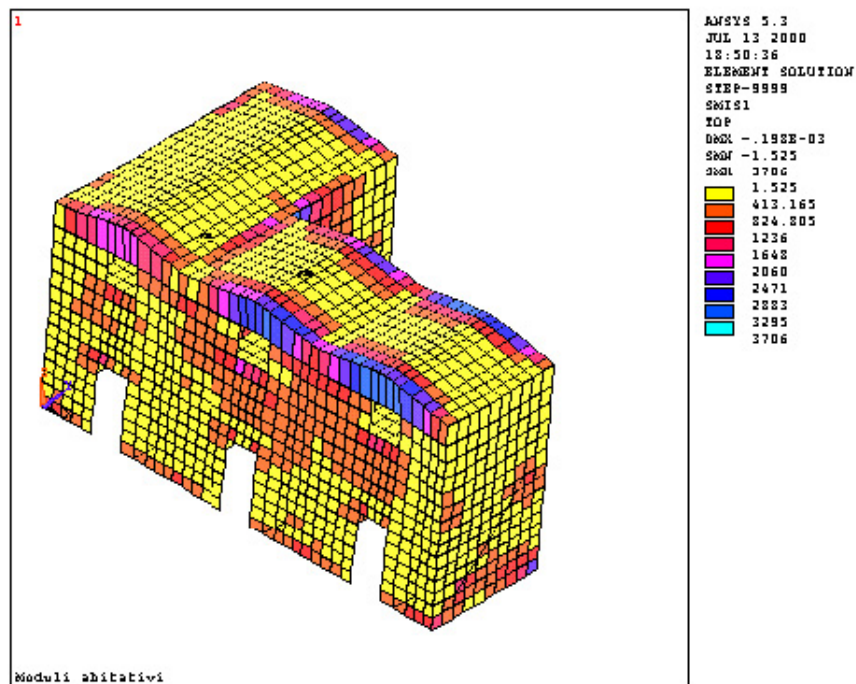


Рис. 3.36 — Напряжение TX

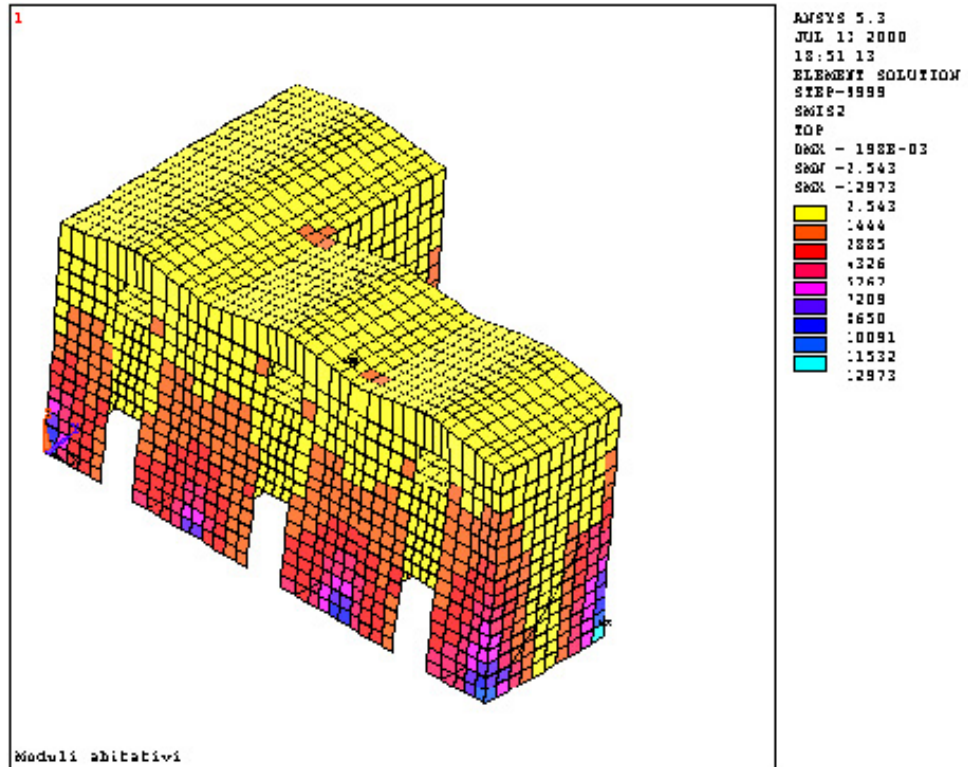


Рис. 3.37 — Напряжение  $T_{xy}$

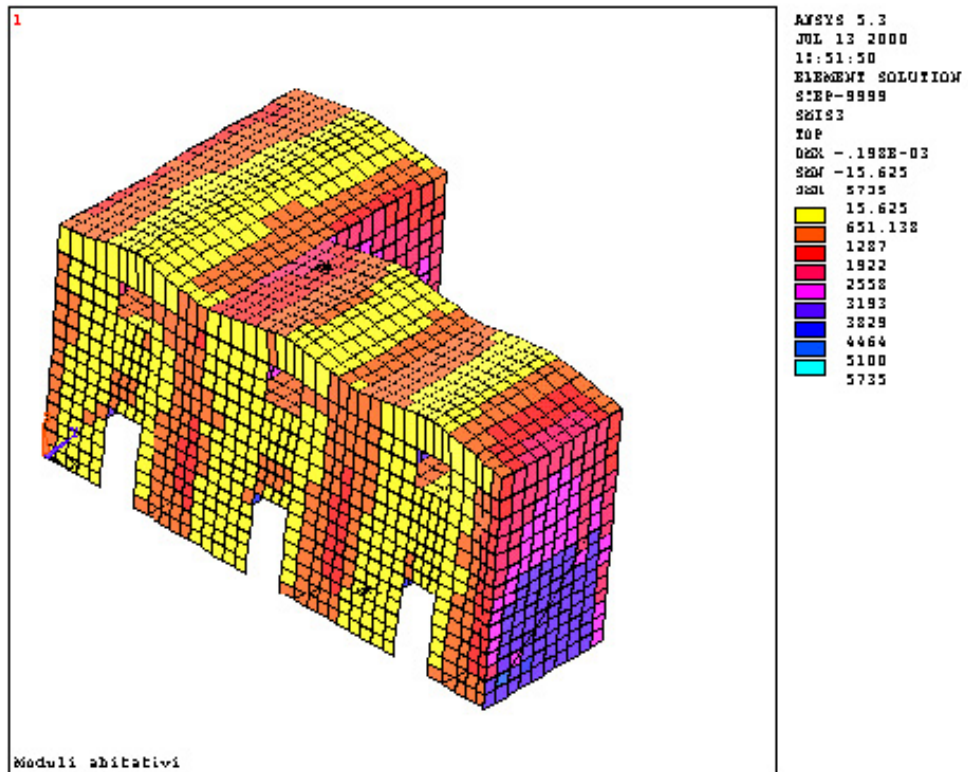


Рис. 3.38 — Напряжение  $T_{xy}$

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

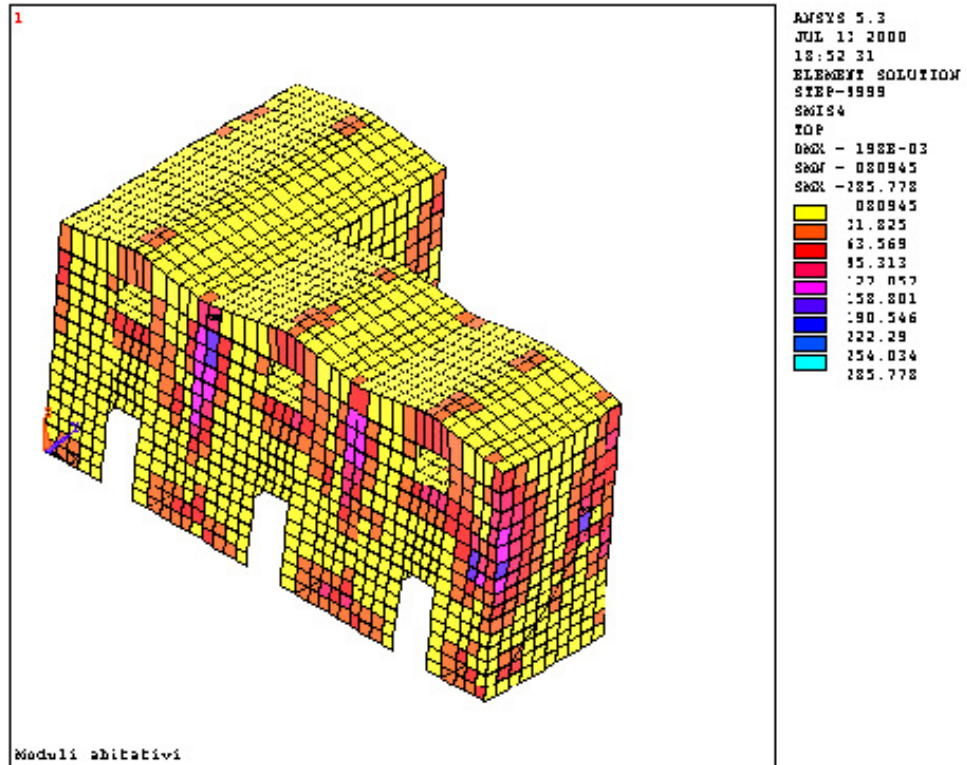


Рис. 3.39 — Напряжение  $MX$

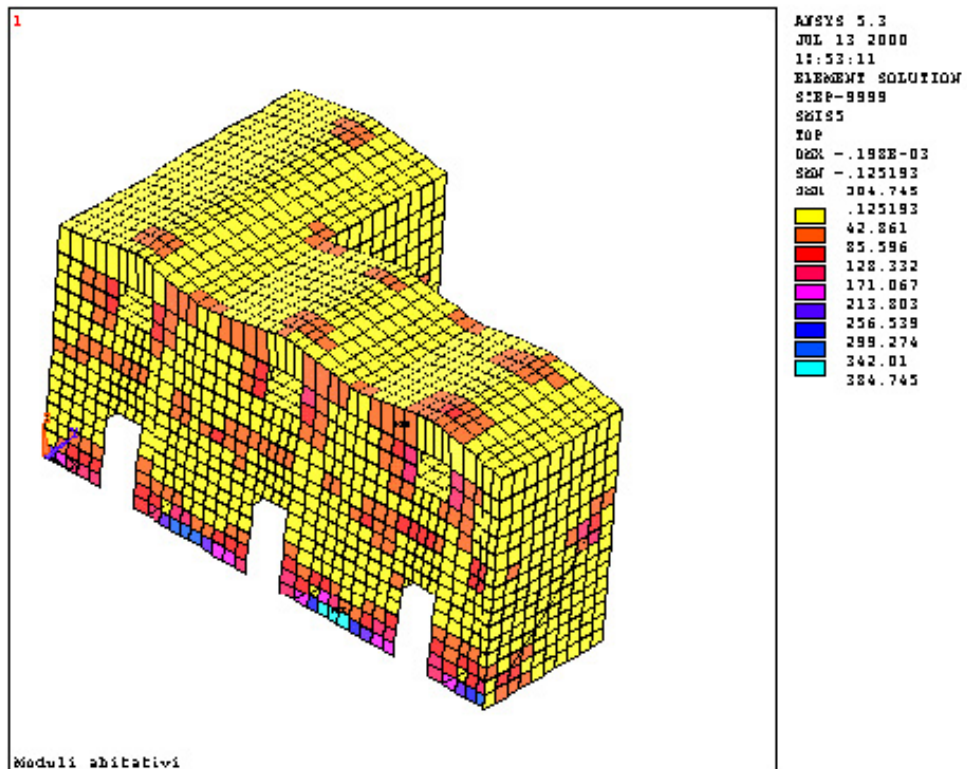


Рис. 3.40 — Напряжение  $MY$

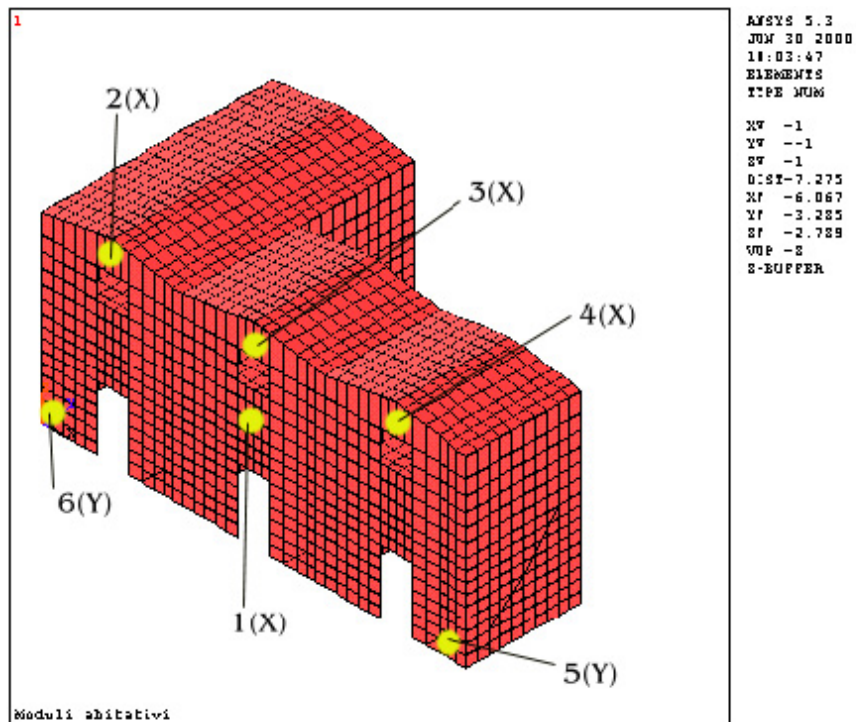


Рис. 3.41 — Сечения, для которых выполнен поверочный расчет (аксонометрия, вид с юго-востока)

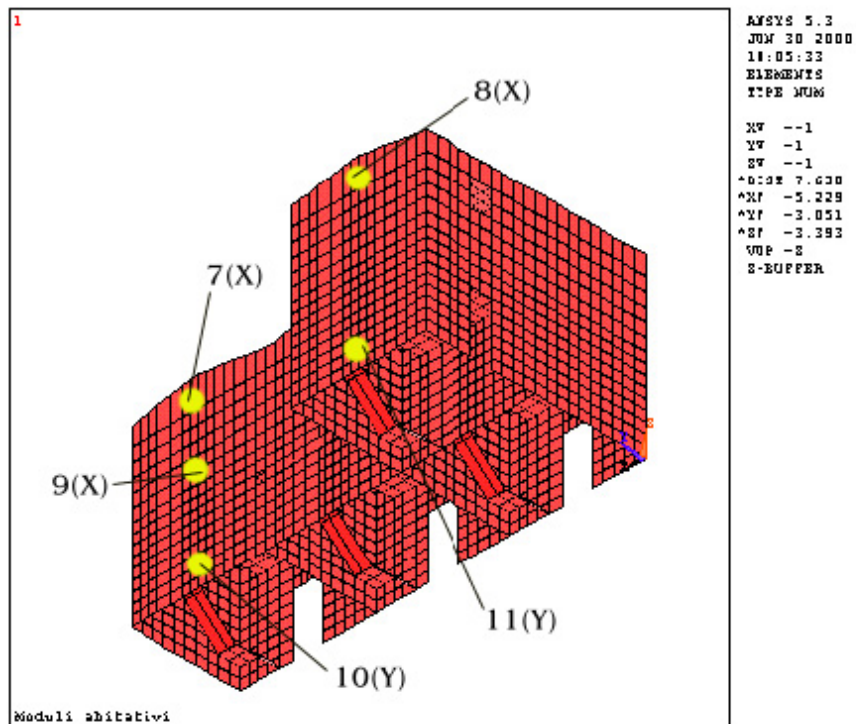


Рис. 3.42 — Сечения, для которых выполнен поверочный расчет (аксонометрия, вид с северо-запада)



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.9 — Наиболее значимые напряжения при приложении спектра по направлению  $Y$

Сечение и направление нагружения	Динамический анализ с приложением спектра			Статический анализ (только сила тяжести)			Суммарное значение		
	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м
1(x)	413,6	31,86	19,62	1203	-451,8	795,11	1616,1	-483,6	814,73
2(x)	1648	63,56	500,14	7631	623,65	-2696	9279	687,21	-3196
3(x)	2883	70,4	651,13	7631	398,8	-950,3	10514	469,2	-1601
4(x)	3295	95,3	651,13	7631	623,65	2541	10926	718,95	3192
5(y)	7209	213,8	1287	-20208	-699,4	795,11	-27417	-913,2	2082
6(y)	7209	128,33	651,13	-20208	-699,4	795,11	-27417	-827,6	1446
7(x)	3295	65,36	507,8	7631	-451,0	2541	10926	-514,6	3048
8(x)	2060	31,82	507,8	7631	-451,0	2541	9691	-482,9	3048
9(x)	824,8	63,56	327,6	3305	-200,3	795,11	4129,8	-263,8	1122
10(y)	4326	171,06	192,4	-20208	729,5	-950,3	-24534	900,56	-1142
11(y)	4326	171,06	192,4	-20208	729,5	-950,3	-24534	900,56	-1142

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.10 — Результаты поверочных расчетов для сечений, указанных в табл. 3.9

Сечение	$Y_n$ (снизу), мм	$\sigma_{fmax}$	$\sigma_{fmin}$	$\sigma_{сmax}$
1	144,8	112,30	4,20	-0,583
2	4,8	254,62	19,19	-0,604
3	Только растяжение	229,86	38,35	0,000
4	3,9	282,95	23,03	-0,544
5	Только сжатие	-3,07	-9,83	-0,709
6	Только сжатие	-3,39	-9,31	-0,683
7	Только растяжение	244,38	34,34	0,000
8	Только растяжение	222,16	25,06	0,000
9	154,0	105,53	8,76	-0,190
10	Только сжатие	-2,44	-9,10	-0,660
11	Только сжатие	-2,44	-9,10	-0,660

Спектр по направлению X

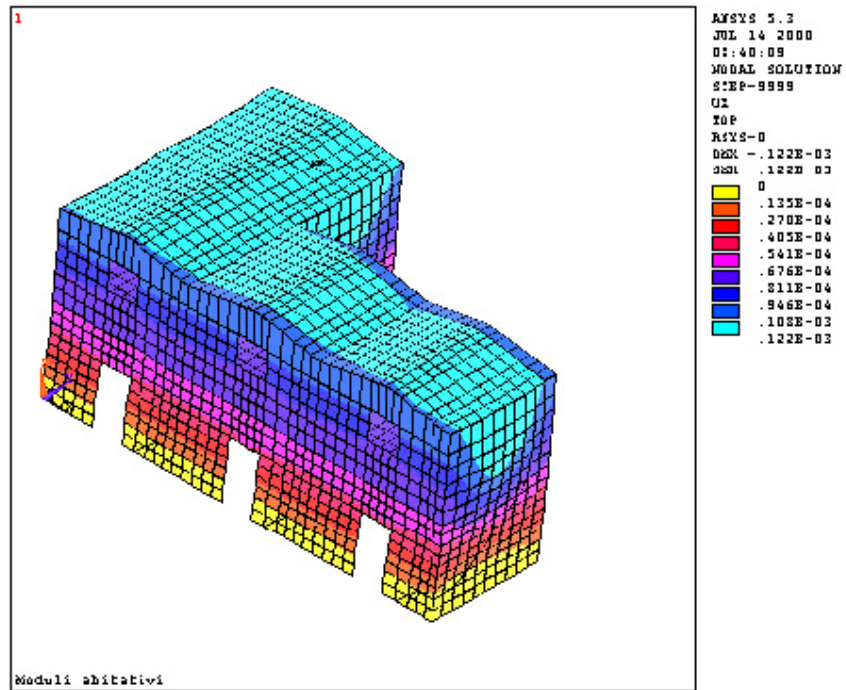


Рис. 3.43 — Перемещения по направлению X

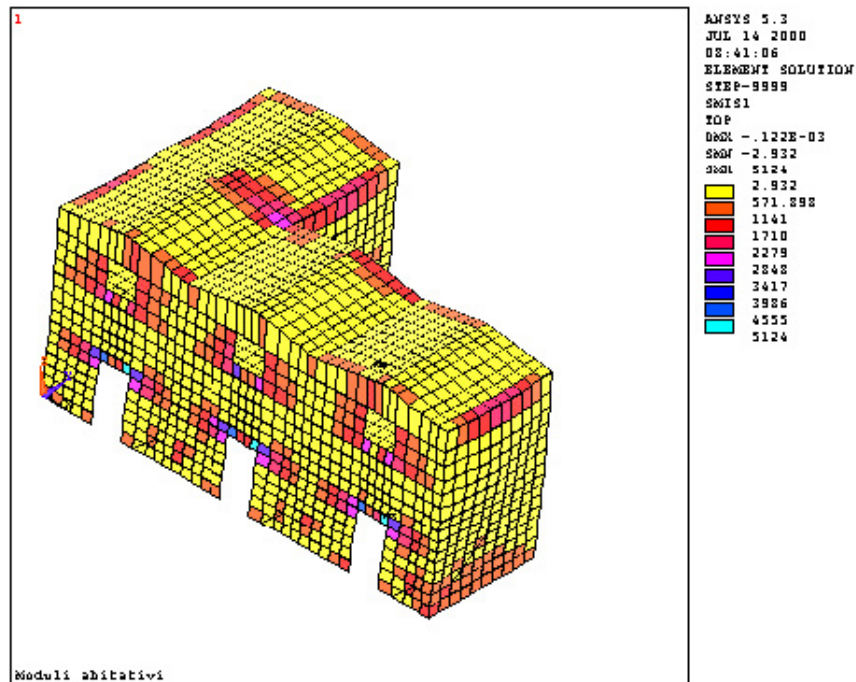


Рис. 3.44 — Напряжение TX

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

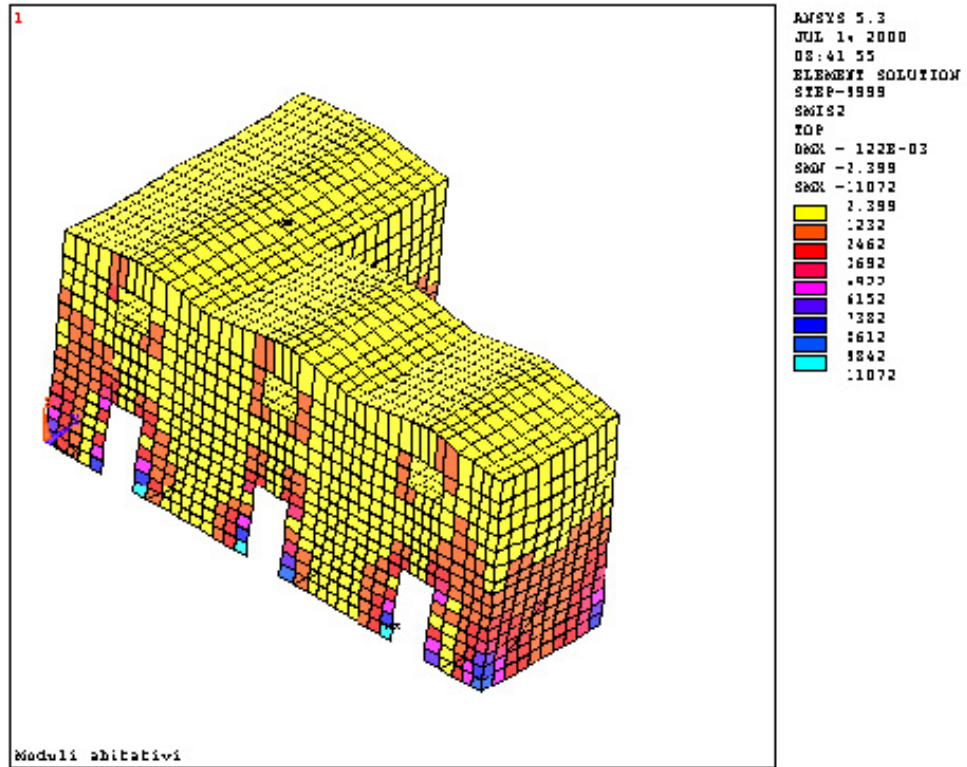


Рис. 3.45 — Напряжение  $T_{xy}$

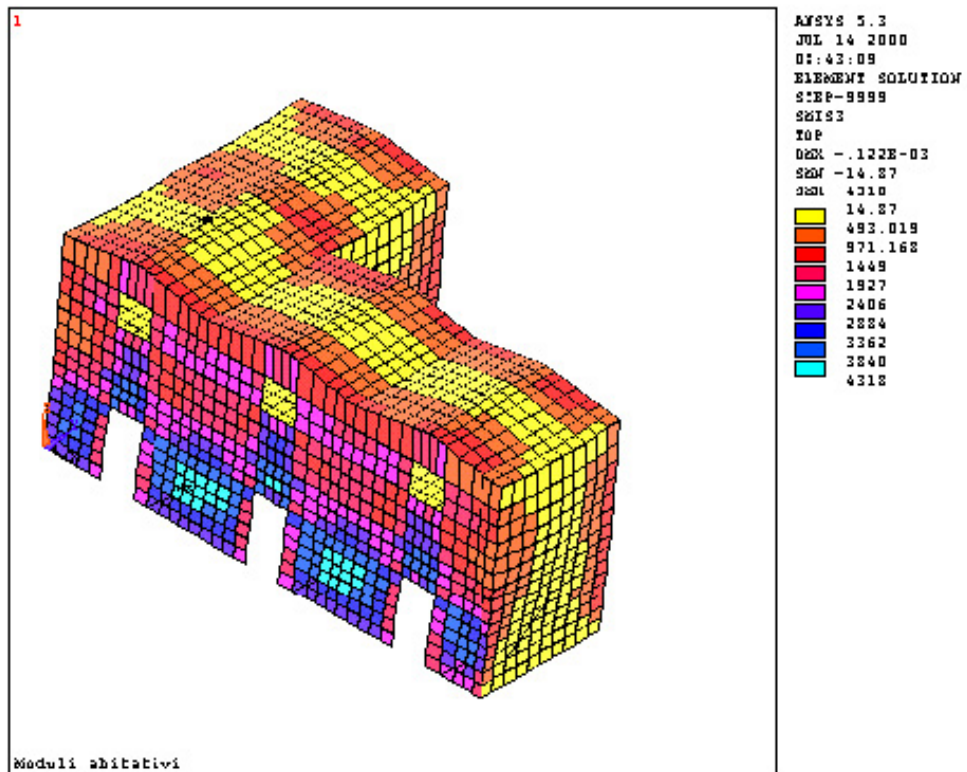


Рис. 3.46 — Напряжение  $T_{xy}$

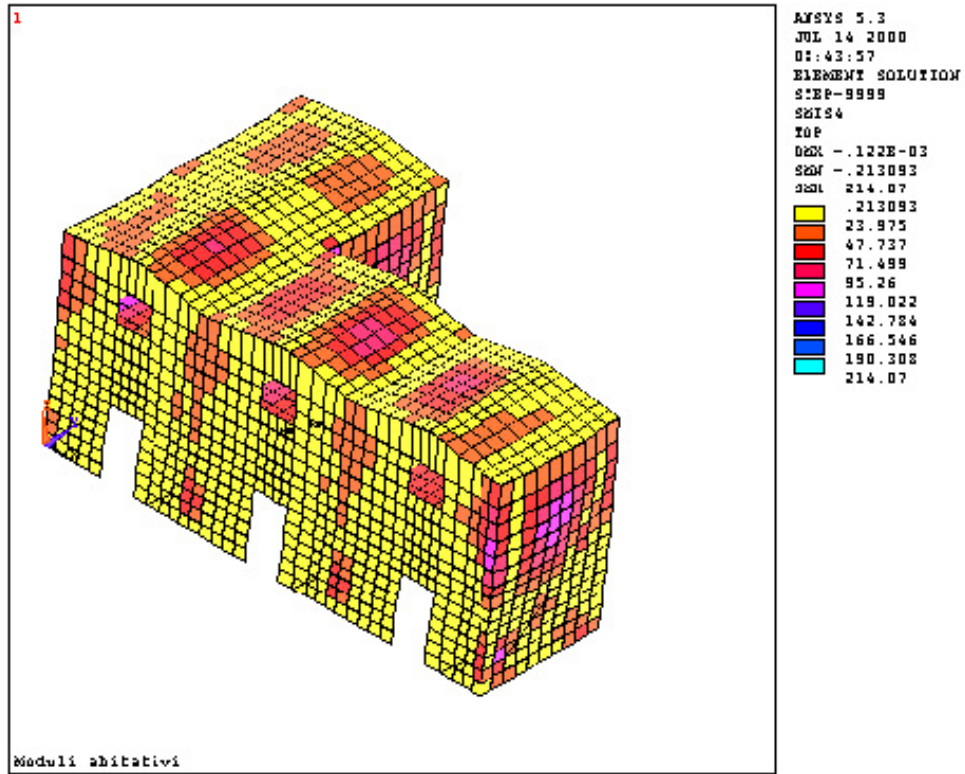


Рис. 3.47 — Напряжение  $M_X$

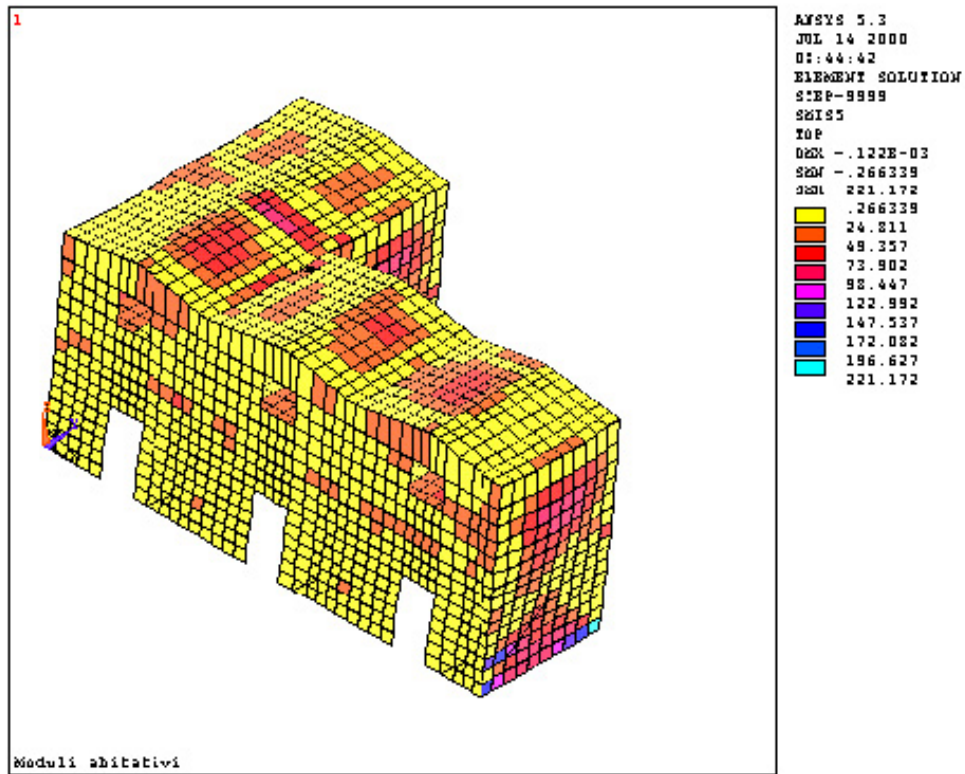


Рис. 3.48 — Напряжение  $M_Y$

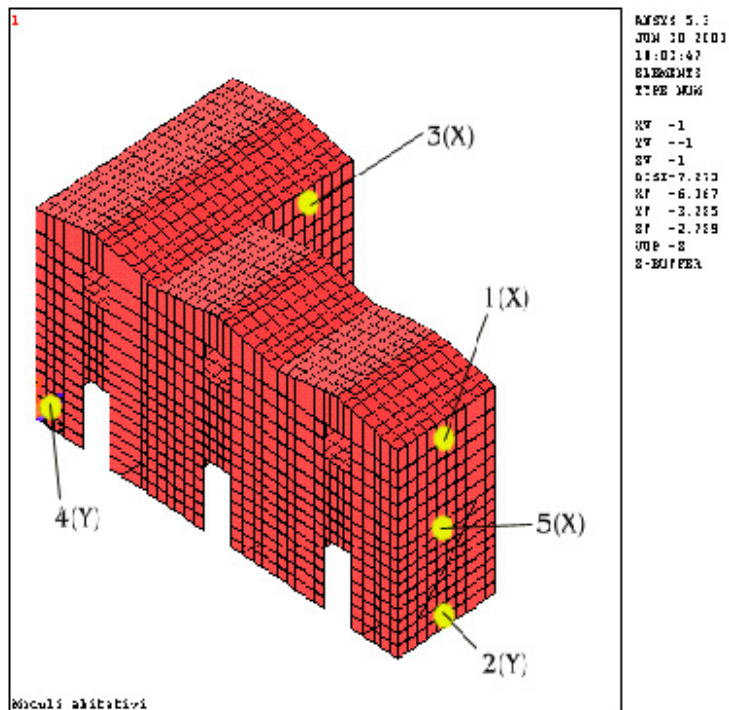


Рис. 3.49 — Сечения, для которых выполнен поверочный расчет (аксонометрия, вид с юго-востока)

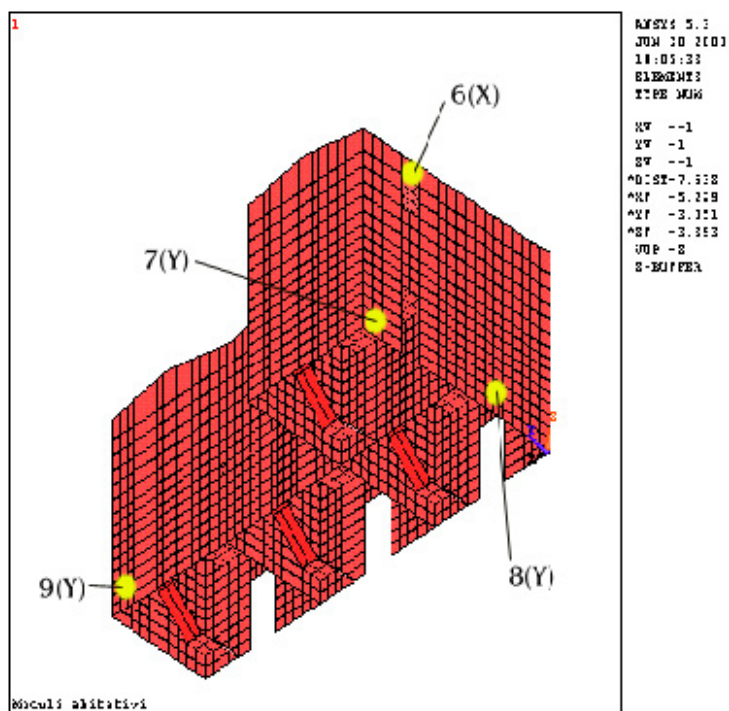


Рис. 3.50 — Сечения, для которых выполнен поверочный расчет (аксонометрия, вид с северо-запада)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.11 — *Наиболее значимые напряжения при приложении спектра по направлению X*

Сечение и направление нагружения	Динамический анализ с приложением спектра			Статический анализ (только сила тяжести)			Суммарное значение		
	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м	Т, Н/м	М, Н×м/м	Срез, Н/м
1(x)	2279	71,49	493,01	7468	723,65	795,11	9747	795,14	1288,1
2(y)	3692	98,44	387,2	-20208	-351,0	795,11	-23900	-449,5	1182,3
3(x)	2279	71,49	493,01	5305	723,65	-650,3	7584	795,14	-1143
4(y)	6152	24,81	2884	-20208	-351,0	-650,3	-26360	-375,8	-3534
5(x)	100,4	119,02	387,2	4305	398,74	795,11	4405,4	517,76	1182,3
6(x)	2279	47,73	493,01	5468	-675,9	1945,1	7747	-723,6	2438,1
7(y)	6152	172,08	971,16	-20208	629,5	1945,1	-26360	801,58	2916,2
8(y)	3692	172,08	200,7	-20208	629,5	795,1	-23900	801,58	995,9
9(y)	6152	24,81	2884	-18707	629,5	2541	-24859	654,31	5425

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Таблица 3.12 — Результаты поверочных расчетов для сечений, указанных в табл. 3.11

Сечение	$Y_n$ (снизу), мм	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$	$\sigma_{\text{сmax}}$
1	5,4	280,40	19,99	-0,750
2	Только сжатие	-3,96	-7,29	-0,512
3	6,7	251,51	15,54	-0,852
4	Только сжатие	-4,81	-7,59	-0,528
5	7,3	156,49	9,10	-0,573
6	148,8	240,40	15,82	-0,742
7	Только сжатие	-3,24	-9,17	-0,659
8	Только сжатие	-2,66	-8,59	-0,620
9	Только сжатие	-3,43	-8,27	-0,590