

Capítulo 5

Projeto e desenvolvimento das unidades de hardware

5.1 Introdução

Este capítulo se dedica a mostrar as etapas do projeto da plataforma de força proposta nestes estudos. Serão abordadas as etapas de construção da estrutura mecânica do protótipo, envolvendo o projeto das superfícies (superior e inferior), bem como o desenvolvimento dos transdutores de carga. Serão destacados ainda, os projetos dos circuitos eletrônicos, as simulações realizadas durante o modelamento dos dispositivos como um todo, desde as células de carga, as placas, até a escolha dos sensores.

De forma geral, o projeto da plataforma de força pode ser subdividido em duas partes distintas: as superfícies de apoio e as células de carga, como mostra a Figura 5.1.



Figura 5.1 Imagem da plataforma de força modelada.

5.2 Projeto mecânico das superfícies da plataforma

Para o projeto das superfícies da plataforma, deve-se observar a aplicação desejada e os problemas específicos decorrentes. Um aspecto importante é a observação da frequência natural das superfícies, que deve ser bem superior às frequências dos sinais a serem medidos. Por meio das especificações do material escolhido, como rigidez, módulo de elasticidade e tensão de escoamento do material, é possível obter um valor aproximado para essa frequência.

Nesse sentido, normalmente, tenta-se produzir superfícies com máxima rigidez aliada à mínima massa. A alta rigidez requerida tem o objetivo de diminuir ao máximo a flexão das superfícies durante a utilização da plataforma, garantindo assim, uma transmissão praticamente total do esforço recebido pela superfície superior às células de carga colocadas imediatamente abaixo.

Consultando a literatura em particular (Mansfield,1989), verifica-se que há várias equações para diferentes tipos de placas e seu tipo de engaste, que definem o cálculo da flecha máxima que pode ocorrer nessa superfície. O critério da flecha máxima é um fator adotado para definir a espessura ideal para as superfícies, de forma que estas não sofram deformação maior que um valor específico. Neste caso, assumiu-se como valor máximo admitido 0.01% do esforço máximo (1200Newtons) para o qual a plataforma foi projetada.

A superfície superior tem a função de transmitir o esforço sobre ela aplicado às células de carga, enquanto a superfície inferior oferece o apoio e a sustentação requeridos pelos demais componentes da plataforma, além de servir como suporte para a fixação das células de carga. Já as células de carga são os dispositivos pelos quais o elemento sensível (sensor) faz a conversão das forças sobre elas aplicadas em um nível de tensão elétrica correspondente.

Com relação ao formato para as superfícies da plataforma, foi definido o quadrado para permitir trabalhar tanto com análise de balanço quanto em avaliações de marcha, possibilitando a união, no solo, de duas ou mais plataformas como uma passarela para posteriores avaliações. Isso porque é mais

simples trabalhar com seqüências em formatos quadrados do que, por exemplo, de triângulos ou círculos.

As superfícies foram usinadas com dimensões de 50x50x15cm cada, em alumínio 5052F, como ilustra a Figura 5.2.



Figura 5.2 Foto das superfícies da amostra

A Tabela 5.1 reúne as principais propriedades do material utilizado na usinagem das superfícies.

Propriedade	Símbolo	Valor
Módulo de elasticidade	E	$7.31 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	ν	0.3333
Massa específica	μ	$2.70 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Tensão de escoamento	σ_e	$8.07 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

Tabela 5.1 Principais propriedades do material das placas (Alumínio 5052) – www.asaalumino.com.br.

5.3 Projeto das células de carga

Inicialmente, foram feitos estudos para se determinar qual seria a geometria mais adequada para as células de carga, bem como o tipo de material a ser utilizado. Várias questões foram levantadas no sentido de buscar uma geometria capaz de desacoplar três esforços ortogonais e com uma mínima interferência entre eles.

Basicamente, deve-se observar que é essencial que a célula seja capaz de medir esforços quando submetidas à tração e à compressão, visto que há a necessidade de detecção de mudanças na direção e no sentido dos esforços a que elas serão submetidas. Sendo assim, pode-se eliminar algumas geometrias convencionais, por não serem adequadas a esses requerimentos.

Durante as pesquisas por um modelo de transdutor multiaxial, foi observado que tipo de estrutura mecânica seria capaz de fornecer tal nível de desacoplamento. Encontrou-se um modelo, mostrado na Figura 5.3, utilizado para detecção de abalos sísmicos, com capacidade nominal de cinco toneladas, e capaz de medir forças e momentos em três direções. Em detalhe, pode-se observar as conexões dos sensores à célula.

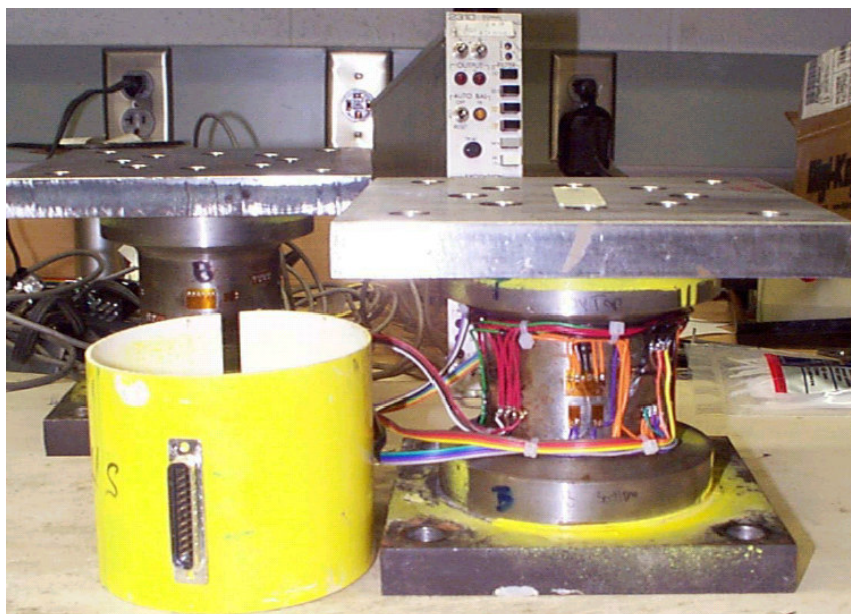


Figura 5.3 Modelo de célula de utilizada para detecção de terremotos (www.civil.buffalo.edu)

mbora a geometria encontrada permitisse o desacoplamento dos esforços desejados, algumas inconveniências foram detectadas quando adequou-se essa geometria para os níveis de esforços aos quais seria submetida no presente trabalho. Ou seja, para a carga máxima de 1200N, esse modelo sofreria reduções na suas dimensões, ao ponto de tornar o trabalho de colagem e conexão dos sensores mais difícil, visto que a área de colagem tem a geometria cilíndrica, o que dificulta o posicionamento em simetria durante a fixação dos sensores.

Observando o emprego dos transdutores de força em áreas como a odontologia, ortopedia e esportes, foi encontrado um modelo de célula de carga proposto por (Hull & Davis, 1981) durante suas pesquisas com cinética humana, o qual buscava avaliar os esforços exercidos pelos ciclistas ao pedal da bicicleta quando estes realizavam provas de ciclismo. O modelo idealizado por (Hull & Davis, 1981) pode ser visto na Figura 5.4, onde se verifica a geometria octogonal adotada ao projeto. Essa geometria permitia o desacoplamento de dois esforços com mínima interferência entre eles, como apontou os estudos conduzidos por (Hull & Davis, 1981).

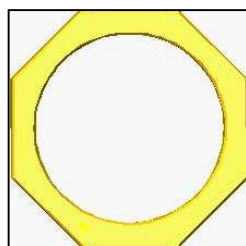


Figura 5.4 Modelo de célula de carga (Hull & Davis, 1981)

Em seguida, observando trabalhos desenvolvidos em laboratórios de pesquisa especializados em estrutura de materiais, foi encontrado um projeto para transdutor multiaxial proposto por (Bagesteiro, 1996) que utilizava, com algumas adaptações, o modelo proposto por Hull e Davis originalmente. Avaliando os resultados obtidos com essa plataforma, foi possível determinar o emprego dessa geometria como base para o início do desenvolvimento dos transdutores propostos. A Figura 5.5 apresenta o modelo de célula de carga idealizado por (Bagesteiro, 1996). Esse transdutor foi desenvolvido para compor uma plataforma de forças utilizada em estudos de desempenho no treinamento com atletas da natação.

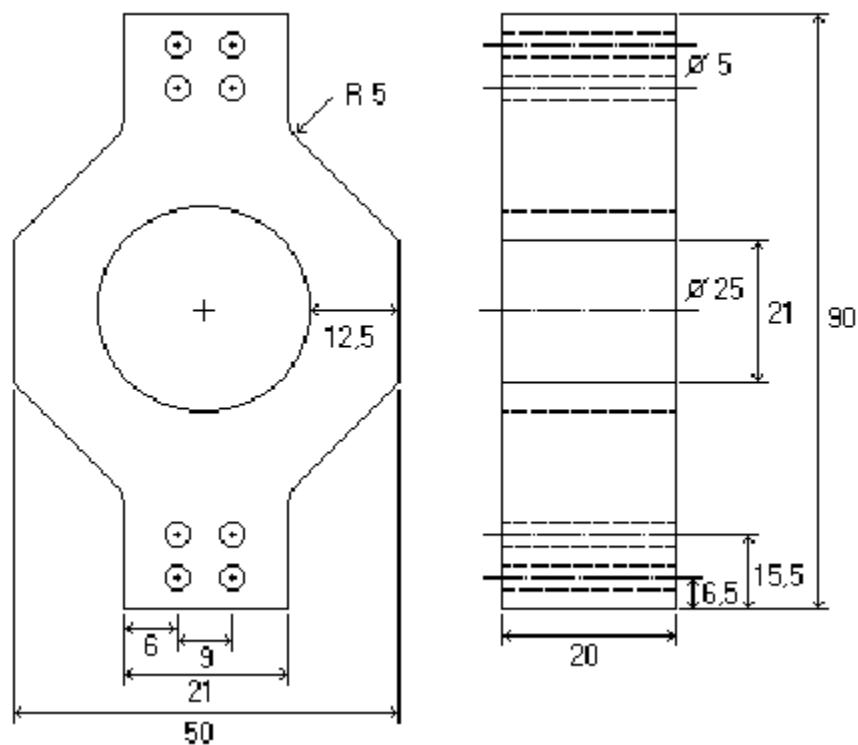


Figura 5.5 Detalhes da geometria octogonal para célula de carga (Bagesteiro, 1996).

Depois de avaliar detalhes estruturais da peça, foram feitas modificações em cima deste modelo, para se verificar a influência das alterações durante a etapa de simulação dos esforços na peça. Basicamente, as modificações iniciais foram:

- A redução de quatro para três parafusos de fixação da célula às bases da plataforma, no sentido de reduzir um ponto concentrador de tensão;
- Aumentar o raio da abertura central da peça;
- Diminuir a espessura de algumas paredes da peça;
- Promover um arredondamento em pontos de encontro de algumas arestas.

Definida a geometria base e as alterações iniciais, o passo seguinte foi modelar em um software específico a proposta da célula de carga e realizar algumas simulações numéricas para avaliar o desempenho do protótipo, quanto a:

- desacoplamento de forças;
- valores de tensões e deformações mínimos e máximos ao longo da peça;
- limite de escoamento;
- flambagem;
- locais de deformação uniforme de tensão para a fixação dos sensores.

Para a modelagem da região ativa da célula de carga em ambos os esforços, lateral e vertical, foi utilizado o software *Mechanical* (Banach, 2000) e para as simulações de elementos finitos o *ANSYS*® (Lawrence, 2002), versão 6.0 (Swanson Analysis System Inc, 2002). O objetivo da análise foi conhecer, antes da usinagem da peça, os níveis de tensões com um carregamento simultâneo nas três direções ortogonais, estimando-se assim, a carga máxima admissível, bem

como verificando o desacoplamento de deformações nos pontos de colagem dos extensômetros em cada uma das direções.

Também foi alvo de análise, a relação massa/ rigidez visando garantir uma boa sensibilidade para a célula de carga sem, entretanto, ultrapassar o limite de escoamento, σ_e , visto, que definiu-se anteriormente que as células seriam de aço inox e as simulações indicariam ser possível ou não tal escolha. Um nível de tensão equivalente superior a σ_e implicaria na presença do regime plástico (deformações permanentes), podendo levar a célula de carga a funcionar de forma insatisfatória.

O desenvolvimento da análise numérica foi executado utilizando a hipótese de estado plano de tensões, ou seja, os esforços são obtidos a partir das relações com deformações planas para o material em estudo. Empregou-se também a definição de espessura com um elemento do tipo quadrilátero (*PLANE 42*) disponível na biblioteca de elementos do *ANSYS 6.0* (Lawrence, 2002). Utilizou-se uma malha de 52781 elementos, 11000 pontos e o elemento estrutural *SOLID 45*.

Os carregamentos simultâneos usados na simulação buscaram representar a realidade que ocorre quando um esforço é realizado sobre uma superfície de apoio. Os valores dos carregamentos foram:

- Força vertical (F_y) – 1000N e um coeficiente de segurança (cs) de 1,5;
- Força médio lateral (F_z) – 500N e um coeficiente de segurança (cs) de 1,5;
- Força anterior – posterior (F_x) – idem a força F_z .

O resultado das simulações quanto ao limite de escoamento, flambagem e as deformações podem ser vistos nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

A Figura 5.6 indica que a tensão máxima ocorrida foi de 128Mpa e que a peça trabalhará em regime elástico para o esforço que foi projetada, pois a tensão de escoamento do aço inox 304 é de 275Mpascal, bem inferior ao valor obtido. A

maior parte da peça ficou com uma tensão situada bem abaixo de 128Mpascal, como é indicado na legenda de cores do *Ansys*.

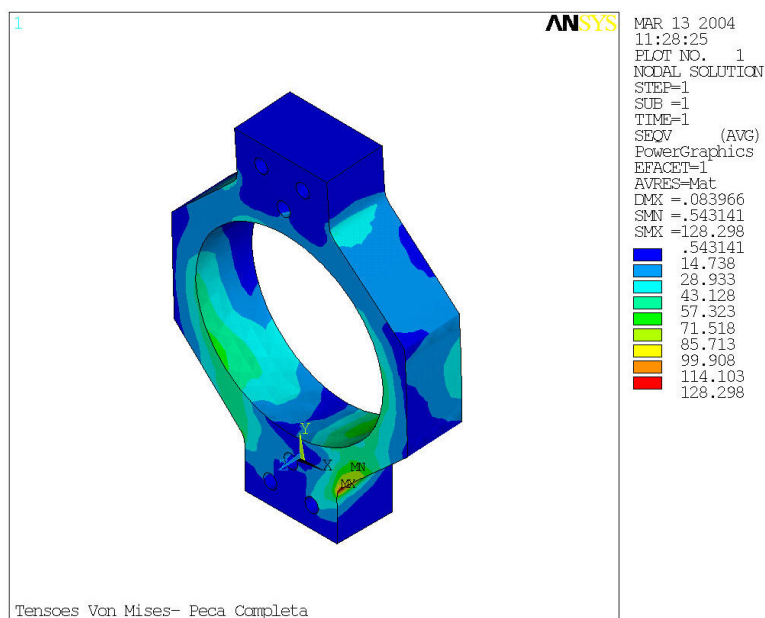


Figura 5.6 Análise numérica da tensão de escoamento da peça – 128 MPa o máximo valor, o que está mais de duas vezes abaixo do limite do aço inox 304.

Uma outra análise realizada foi a de avaliação de flambagem. Quando uma barra de seção transversal pequena em relação ao comprimento é submetida a um esforço de compressão, pode ocorrer uma tendência de curvatura nessa barra, e nessa condição, diz-se que a estrutura sofreu uma flambagem, provocando assim, instabilidades na estrutura. Esse esforço pode ocorrer ainda que as tensões máximas suportadas pela peça não tenham sido atingidas. Os resultados da análise ficaram dentro do limite da normalidade, com um valor menor que 1.



Figura 5.7 Análise da flambagem da peça.

Com relação ao comportamento das deformações ao longo da peça, a Figura 5.8 mostra como ocorreram essas deformações, verificando seus valores pela indicação da legenda de cores do *Ansys* (Lawrence, 2002). Essa análise torna-se fundamental, pois a partir dela pode-se determinar locais de interesse para posterior posicionamento dos extensômetros elétricos, como as arestas inclinadas, as faces verticais do octaedro e o interior do círculo. Verificando-se os níveis de tensões encontrados em cada uma das regiões da peça, foi possível perceber uma relação de esforço e deformação, o que permitiu definir a posição de fixação dos sensores, bem como conhecer quais regiões da célula mostraram-se mais sensíveis a presença do esforço vertical e lateral individualmente, bem como a influência no conjunto como um todo. Dessa forma, foi possível a visualização das regiões onde ocorre o desacoplamento dos esforços nas direções vertical e lateral.

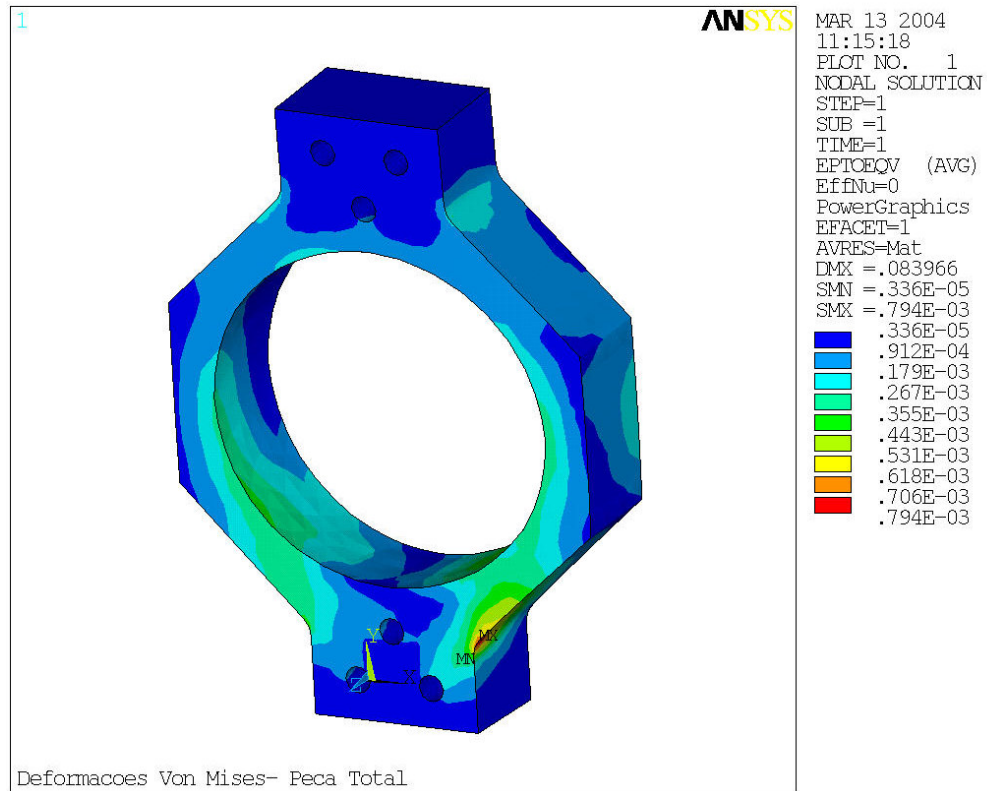


Figura 5.8 Simulação numérica das deformações sofridas na célula.

Concluídas as etapas de modelagem e simulação, o projeto da célula de carga foi redesenhado no software *Autocad*, como pode ser visto na Figura 5.9, juntamente com as dimensões finais da peça.

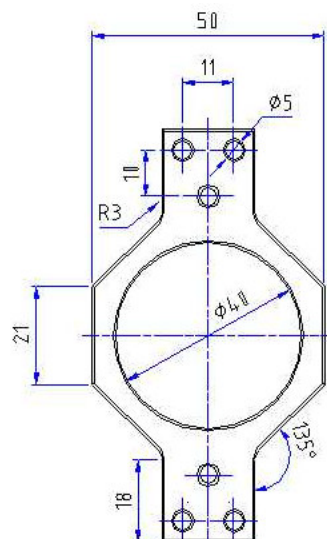


Figura 5.9 Geometria final da célula de carga.

Para a fixação das células nas placas de alumínio, foram desenvolvidos oito suportes, dois para cada célula, construídos também em aço inox AISI 304, os quais tem sua geometria e dimensões mostradas na Figura 5.10. Estes foram fixados nas placas através de parafusos M5 de cabeça sextavada.

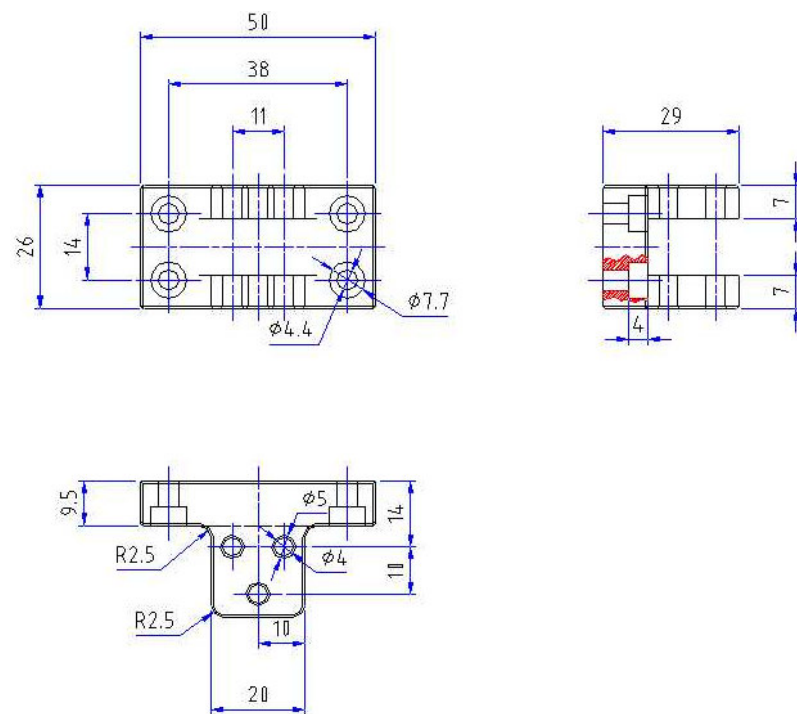


Figura 5.10 Geometria e dimensões dos suportes de fixação das células de carga (mm).

As principais propriedades do material empregado para a usinagem das células de carga e dos suportes de fixação estão reunidas na Tabela 5.2

Propriedade	Símbolo	Valor
Módulo de elasticidade	E	$2,10 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coeficiente de Poisson	ν	0.30
Massa específica	μ	$7,85 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Tensão de escoamento	σ_e	$2,75 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

Tabela 5.2 Propriedades do material da célula de carga – aço inox AISI304 (www.asaaluminio.com.br).

Depois do modelamento e simulação realizada, a célula de carga e os suportes foram usinados para composição da plataforma como mostra a Figura 5.11.

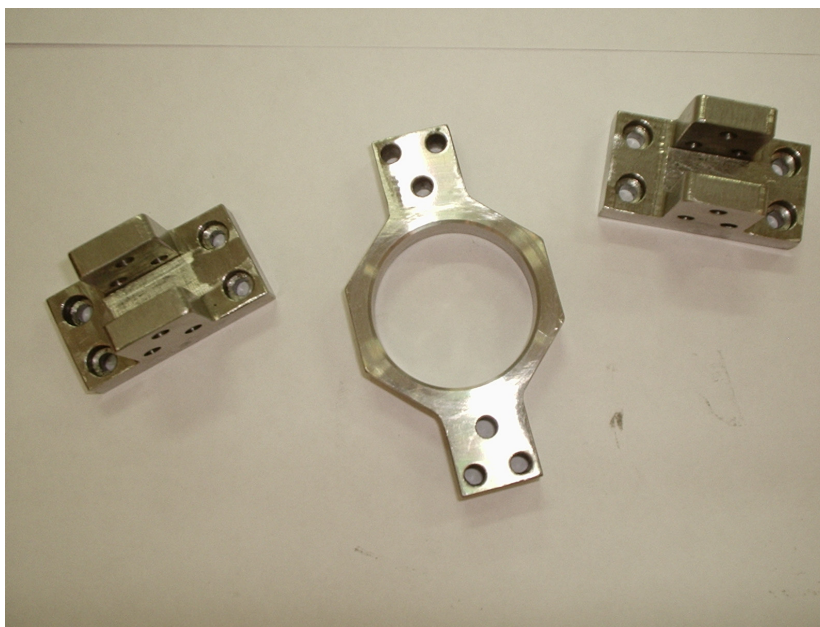


Figura 5.11 Foto da célula de carga e dos suportes usinados.

Após o desenvolvimento completo das células de carga, dos suportes de fixação e das placas de contato, foi possível reunir todos os elementos constituintes da plataforma, resultando no equipamento mostrado nas Figuras 5.12 e 5.13, onde se visualizam suas principais vistas, frontal e lateral respectivamente.

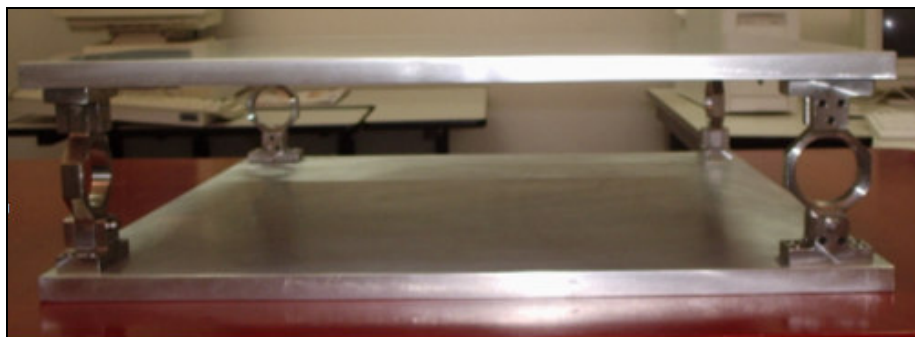


Figura 5.12 Foto da vista frontal da plataforma.

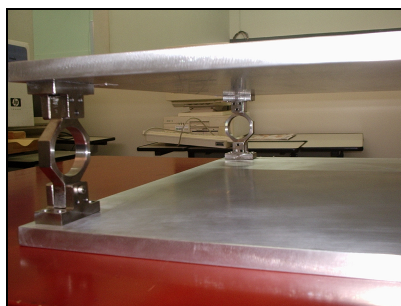


Figura 5.13 Foto da vista lateral da plataforma.

De posse dos valores de tensões e deformações ao longo da peça, é possível calcular para cada região de interesse, como mostra a Figura 5.14, os valores médios de deformação. A Tabela 5.3 reúne os valores médios calculados para cada região indicada por números na Figura 5.14

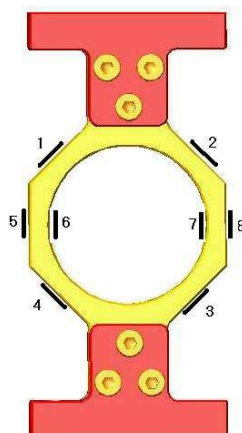


Figura 5.14 Regiões consideradas para os cálculos das deformações médias.

regiões 1, 2, 3 e 4 para representação média das deformações ocorridas na ponte horizontal e 5, 6, 7 e 8 para representação média das deformações ocorridas na

ponte vertical, foi possível obter os coeficientes médios para cada direção de esforço, os quais serão empregados posteriormente no cálculo da sensibilidade das células de carga na direção horizontal e vertical

Regiões	Deformação média (m)
1	41.16u
2	86.05u
3	86u
4	41.1u
5	41.25u
6	41.3u
7	86.05u
8	86.05u

Tabela 5.3: Deformações médias obtidas por região

1	86.05u
8	86.05u

5.4 Fixação dos *strain gauges*

Durante as simulações numéricas realizadas, foi observado o carregamento máximo admissível, bem como os locais onde, pelo nível de deformação, os *strain gauges*, deveriam ser fixados. Dessa maneira, iniciou-se a escolha dos sensores obedecendo critérios quanto a:

- superfície de fixação – a base do *strain gauge* deve ser adequada ao tipo de superfície onde vai ser fixado;
- compensação térmica – se a superfície escolhida for um metal como aço inox, o *strain gauge* escolhido deve ter essa codificação, para que haja uma melhor transmissão e uniformidade com relação às variações térmicas;

- sensibilidade e imunidade maior ao ruído – nas aplicações de uso geral, os *strain gauges* de 120Ω são os mais indicados, devido ao menor custo e à boa resposta que apresentaram frente às medições no circuito. No entanto, quanto maior a resistência da grade, maior a variação, ou seja, mais sensibilidade ao sistema esse sensor poderá proporcionar às medições realizadas.

A Tabela 5.4 fornece as especificações técnicas do sensor (*strain gauge*) escolhido para o projeto.

Tipo	KGF- 5 – 120 C1 – 11 (Kyowa)
Compensação de temperatura	Aço
Comprimento da grade	5mm
Resistência da grade	119,8 +/- 0.2 Ω
Fator de <i>Gage</i> (K)	2,10 +/- 1,0%

Tabela 5.4 Características dos extensômetros elétricos empregados nas células de carga (www.kyowa.com).

Concluída a usinagem da célula de carga, o próximo passo foi a colagem dos *strain gauges* nas regiões já determinadas pelas análises feitas na simulação. Para tal, foi realizado um estudo sobre as configurações básicas e mais usuais em algumas células de carga comerciais foi realizado. Isso permitiu observar que aqueles dispositivos são fixados geralmente aos pares, de forma a detectar as deformações de compressão ou de tração mecânica em determinada região.

A partir da Figura 5.15, podem ser observados detalhes da colagem dos sensores e do isolante usado para a sua proteção, a disposição desses na célula,

bem como o cabeamento utilizado. O silicone em gel foi utilizado para proteger os sensores da contaminação por partículas indesejáveis, como poeira, entre outras. Os cabos utilizados para a conexão da célula de carga ao circuito de condicionamento foram do tipo blindado, com quatro fios de bitola 20.

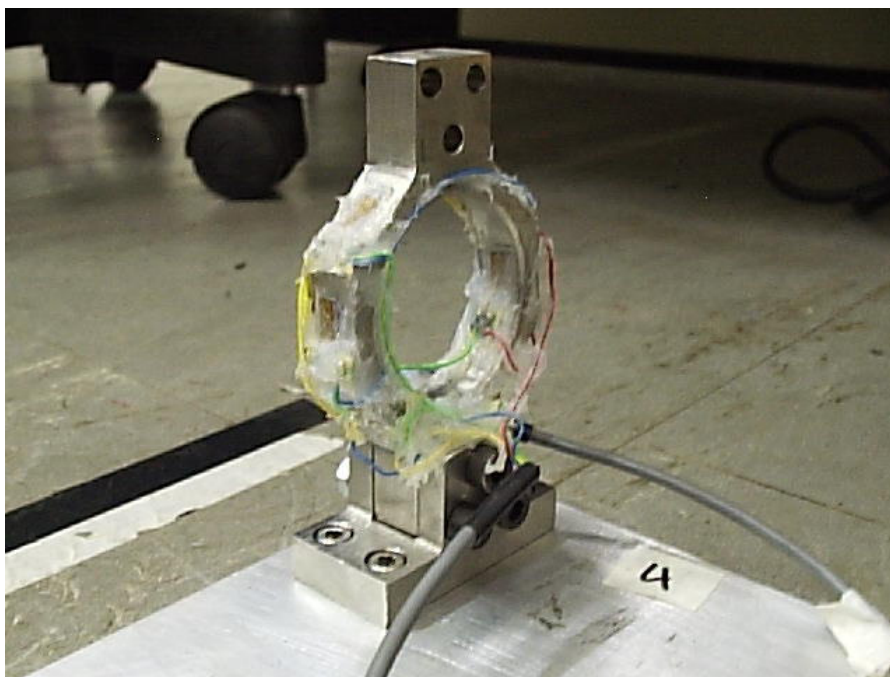


Figura 5.15 Foto da célula de carga instrumentada com *strain gauges*.

A conexão dos sensores foi feita em ponte completa e segundo o arranjo mostrado na Figura 5.16, em que cada um desses fornece os valores de tensão correspondentes a cada um dos esforços, vertical e lateral, independentemente. A conexão em ponte completa, como já visto em capítulos anteriores, permite uma maior sensibilidade nas medidas, bem como minimiza os efeitos da variação das resistências com a temperatura, ficando estas compensada devido à presença de elementos ativos em cada um dos braços da ponte.

Para a fixação dos *strain gauges*, procurou-se adotar todas as recomendações dos fabricantes durante o processo de colagem e cura. Há que se ressaltar que fatores como a limpeza adequada da região de colagem, escolha do adesivo correto e as medidas adicionais de proteção aos *strain gauges*, (por exemplo, proteção contra umidade e desgastes mecânicos), são itens fundamentais para a precisão nas medidas e para a longa vida útil da célula de carga.

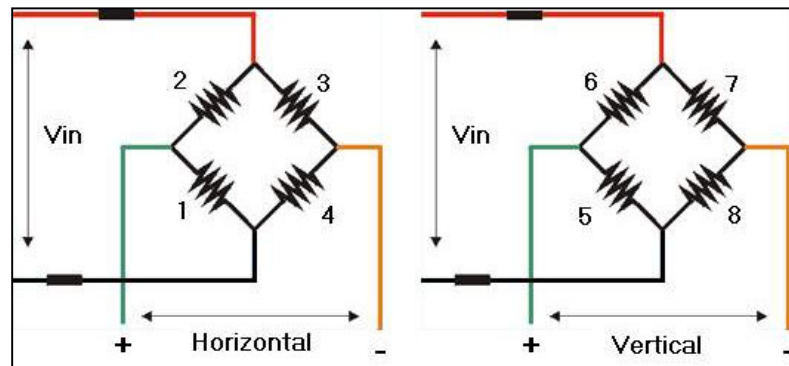


Figura 5.16 Esquema de conexões das pontes de Wheatstone na célula e posicionamento dos sensores.
(www.celuladecarga.com.br).

5.5 Sensibilidade da célula de carga

Conhecidas as deformações médias em cada parede da célula de carga, bem como as equações para o cálculo da tensão de saída da ponte em função de diversos parâmetros e ainda, algumas constantes fornecidas pelos fabricantes dos *strain gauges*, pode-se determinar a sensibilidade das células de carga nas direções vertical e horizontal.

Resgatando os valores mostrados na Tabela 5.3, determina-se a média das deformações ocorridas nas regiões sensíveis ao esforço vertical (5, 6, 7 e 8 da Figura 5.16) e nas regiões sensíveis ao esforço lateral (1, 2, 3 e 4 da mesma Figura). Assim, encontra-se os seguintes valores de deformação média:

$$\epsilon_{mV} = \text{Deformação média ocorrida na ponte vertical} = 63.65 \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_{mH} = \text{Deformação média ocorrida na ponte horizontal} = 65.57 \mu\text{m/m}$$

Ao substituir na equação 3.15¹ os valores de K , que para este caso é de 2,10 +/- 1% como indicado anteriormente na Tabela 5.4, juntamente com as deformações médias, o valor da sensibilidade da célula de carga vertical e horizontal, respectivamente, é indicado pelas equações (5.1) e (5.2):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = K * (\epsilon_m) \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} = 0.1336 \left(\frac{mV}{V} \right) \quad (5.1)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 0.1335 \left(\frac{mV}{V} \right) \quad (5.2)$$

Desse modo, com o valor de tensão escolhido V_{in} igual a 8 volts, para a alimentação dos sensores, obtêm-se para o carregamento máximo projetado de 1200 Newtons, valores de tensões de saída nas pontes vertical e horizontal de:

$$\mathbf{V_{out}_v = 1.0688mV \text{ e}}$$

$$\mathbf{V_{out}_h = 1.0679mV.}$$

É importante ressaltar que, os valores encontrados são bastante pequenos, considerando que os valores representados só ocorrem na presença de carga máxima, o que não é usual.

Assim, surgiu a necessidade de elevar esse sinal a valores mais adequados para serem manipulados, uma vez que em valor real, ou seja, sem ganhos adicionais e nenhum tipo de tratamento, torna-se complexo diferenciar o sinal proveniente de um esforço de ruídos que possam ter a morfologia e nível de amplitude semelhantes ao que se deseja avaliar.

Para tanto, foi desenvolvido, um módulo para prover o condicionamento e a digitalização desses sinais para este trabalho.

5.6 O Condicionador de Sinais

Após o cálculo do sinal de saída da ponte V_{out} , verificou-se a sua baixa amplitude, mesmo quando a célula é submetida à carga máxima. A necessidade de adequar esse sinal a melhores níveis para trabalho tornou-se evidente e, então, começaram as pesquisas em cima de circuitos apropriados para amplificação, filtragem e digitalização de sinais dessa magnitude. Todo esse esforço é feito no intuito de minimizar a influência de interferências indesejáveis, como por exemplo, induções eletromagnéticas de 60Hz originadas da rede elétrica, ruídos que advêm de cabos de alimentação com baixa blindagem, a presença no ambiente de componentes que retém energia estática, entre outros.

As etapas para a construção do condicionador de sinais podem ser divididas em:

- projeto da alimentação das células de carga e geração da tensão de referência externa;
- circuitos de amplificação de ganho fixo;
- circuito de ajuste de *offset*;
- módulo de filtragem;
- módulo de multiplexagem e ganho programável;
- módulo do Microcontrolador e Conversor analógico digital;
- módulo para Interface com a porta RS232.

Um diagrama em blocos mostrado na Figura 5.17, ilustra, separadamente, os circuitos, que compõem o módulo de condicionamento e digitalização dos sinais.

Cada uma das quatro células de carga fornece dois valores de tensão, por medirem os esforços vertical e lateral que ocorrem em sua estrutura. Dessa maneira, a unidade de hardware desenvolvida para condicionar esses sinais conta com oito canais diferenciais para o seu processamento simultâneo.

Inicialmente, oito sinais de tensão vindos da deformação do elemento sensível fixado à célula de carga passam por dois estágios de ganho de tensão fixos. Depois de adequadamente amplificados, esses sinais são conduzidos à etapa de filtragem, em que se busca eliminar do circuito as frequências que não apresentam qualquer contribuição ao sinal. Em seguida, são multiplexados e podem ser amplificados novamente, caso não estejam com a amplitude desejada.

Um conversor analógico digital de 16 bits é usado para digitalizar os sinais que, em seguida, são encaminhados para um microcontrolador. Esse componente realiza todo o controle da comunicação dos sinais com a porta serial do computador.

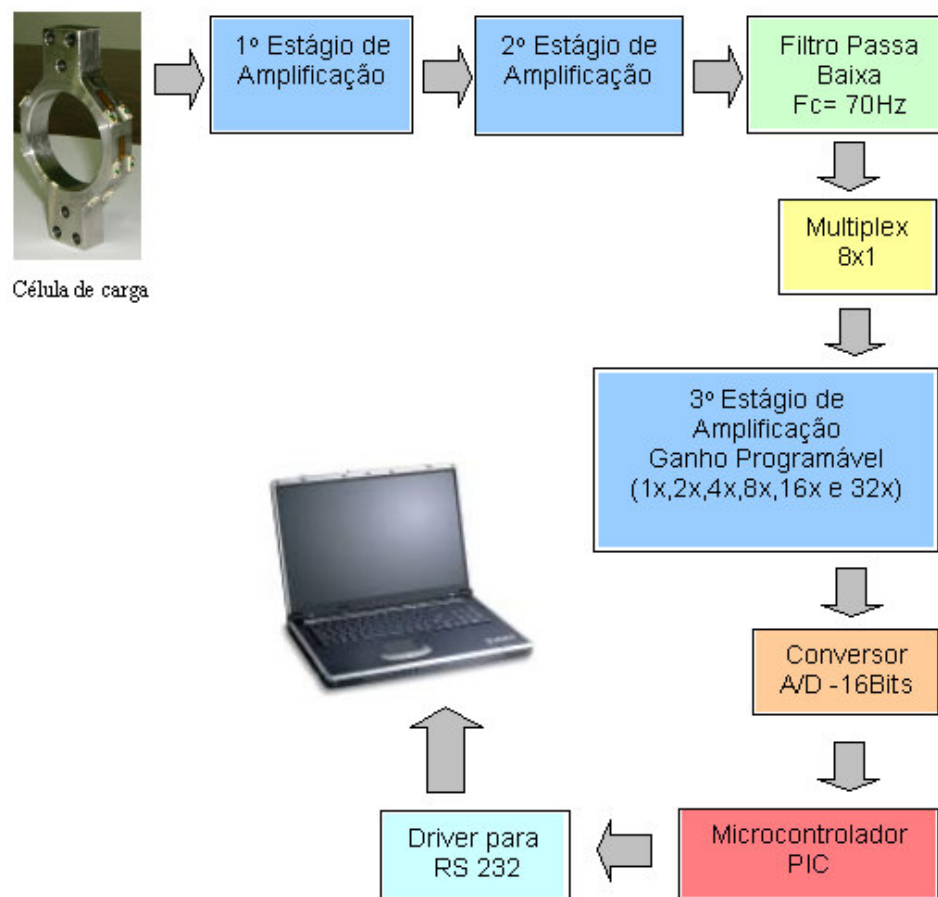


Figura 5.17 Diagrama em blocos do projeto do módulo condicionador.

5.6.1 Alimentação e tensão de referência

O condicionador de sinais foi projetado para trabalhar com uma fonte externa, simples de 12V regulados. As células de carga, bem como os circuitos analógicos do dispositivo foram projetados para trabalhar com alimentação de 8 volts contínuos, para tanto, foi utilizado o regulador LM7808. Para a alimentação dos circuitos digitais (microcontrolador, entre outros) utilizou-se uma tensão de 5 volts fornecidos pelo regulador LM7805. A Figura 5.18 ilustra o diagrama das conexões empregadas para a alimentação dos componentes do módulo condicionador.

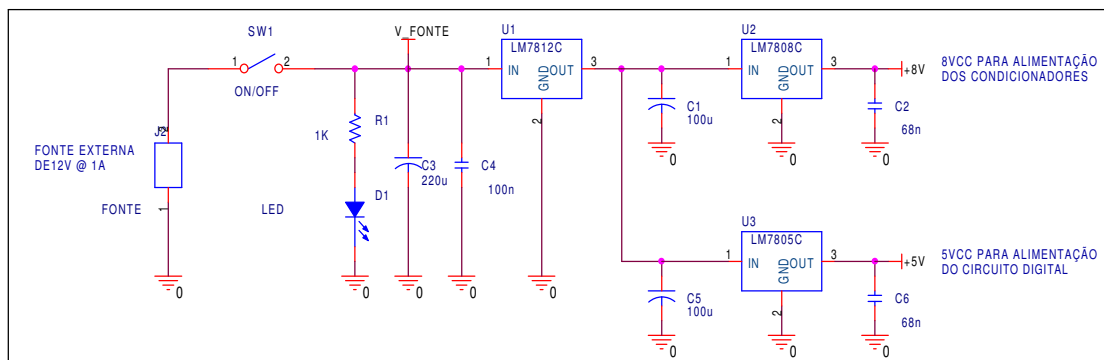


Figura 5.18 Módulo de alimentação do circuito do condicionador.

Para o projeto do condicionador, optou-se por utilizar fonte simples em vez de simétrica na alimentação dos CI's, o que permitiu a inserção de um ponto a menos de ruído para o circuito. Por isso, se tornou necessário fazer um arranjo eletrônico de tal forma que fosse conseguida uma tensão positiva para servir como referência externa para o circuito.

A Figura 5.19 mostra o diagrama das conexões do circuito utilizadas para gerar tensão de referência. O gerador de tensão de referência usado foi o REF195, capaz de fornecer uma tensão de 5 volts precisos, a qual, posteriormente, será aplicada a um divisor de tensão que possibilita o ajuste de *offset* no circuito.

Esse também alimenta o pino de referência externa do amplificador diferencial que tenha sido escolhido para a entrada do circuito, de forma que a sua

saída nunca seja 0 volts (originalmente), pois como trabalha-se em alimentação simples, deve-se respeitar faixas de valores positivos e negativos que a saída do amplificador escolhido não deverá assumir, causando risco de avaliações errôneas.

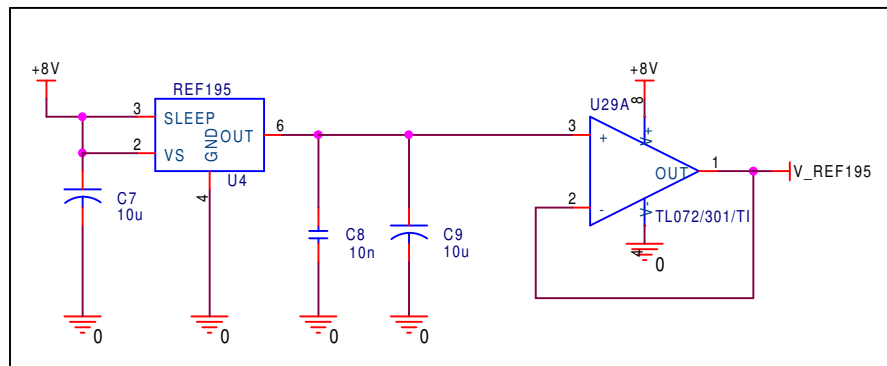


Figura 5.19: Módulo de geração de tensão de referência com o REF 195.

5.6.2 Circuitos de amplificação

Os circuitos de amplificação têm a função de adequar o nível de sinal vindo dos sensores a valores menos sensíveis a interferências diversas e permitir melhores condições de leitura pelo computador. Dessa forma, foi elaborado um circuito de amplificação implementado com duas etapas de ganho.

A primeira etapa de ganho tem a função de aumentar o nível do sinal de entrada, e também de não permitir que ruídos presentes na entrada cheguem ao final do circuito. Pode-se ver em detalhe na Figura 5.20 o circuito de amplificação desenvolvido com o uso do amplificador de instrumentação INA121, o qual possui uma relação sinal/ruído alta, um dos motivos pelo qual foi escolhido como *front – end* no circuito.

A equação para o ganho fornecida pelo *datasheet* do componente INA 121 é dada por:

$$G = 1 + \frac{50K\Omega}{RG} \quad (5.3)$$

onde R_G é a resistência vista entre os pinos 1 e 8 do INA 121. Nesse caso com o uso de um resistor de precisão de $2.61K\Omega$, obteve-se um ganho de 20.15 vezes o sinal de entrada.

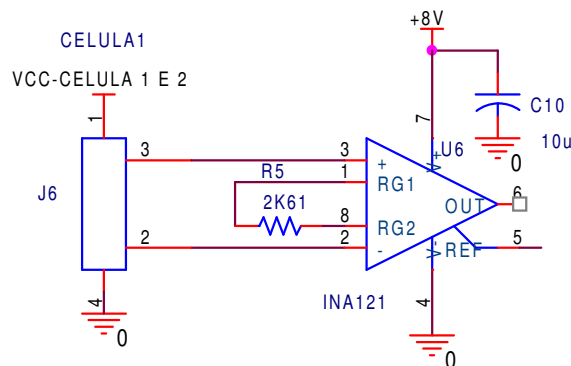


Figura 5.20 Diagrama esquemático da 1ª etapa de amplificação.

É comum quando se conecta um sensor ao sistema, que esse ocasiona pequenas alterações que se propagam por todo o circuito, devido à influência da variação de temperatura e de outras mais. Assim, quase sempre é necessário um circuito capaz de minimizar esse sinal indesejado e, freqüentemente, esse é conhecido como circuito para ajuste de *offset*.

Por isso, devido ao desequilíbrio das resistências nos braços das Pontes de Wheatstone, conectou-se ao pino 5 do INA121, pino para referência externa, a saída de um circuito que ao mesmo tempo em que corrige o *offset* de entrada no circuito, também eleva a nossa referência para 2.5V, em que se torna possível a excursão de sinais de zero a 5 (cinco) volts. A Figura 5.21 mostra o diagrama de conexões do circuito de ajuste de *offset*.

A faixa de ajuste de *offset* para o qual o circuito foi projetado é de ± 220 milivolts (mV), ou seja, pode-se compensar a presença de ruídos que geram tensões indesejadas e desequilíbrios naturais entre os componentes eletrônicos numa faixa de 220mV, para mais ou para menos.

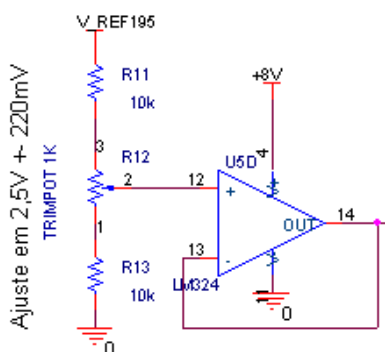


Figura 5.21 Circuito de ajuste e *offset*.

A

pesar da pré-amplificação a que os sinais já foram submetidos, ainda fez-se necessário elevar um pouco mais a sua amplitude para deixá-los com valores mais adequados para as etapas posteriores de processamento. Assim, foi projetado um segundo estágio de amplificação utilizando-se a configuração não-inversora com um ganho de 26.64 vezes, como mostra a Figura 5.22.

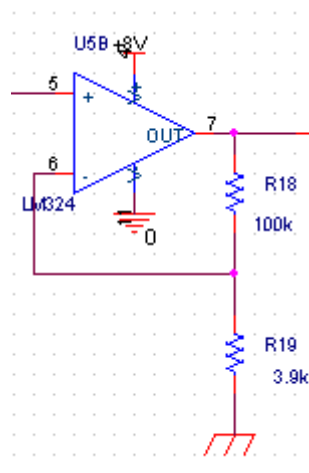


Figura 5.22 Diagrama da 2ª etapa de amplificação do circuito

Dessa forma o condicionador, ao final das duas etapas de amplificação, perfaz um ganho de 536.81 vezes o sinal de entrada.

5.6.3 Circuito de filtragem

Independentemente das etapas de amplificação adotadas, os sinais podem conter frequências indesejáveis para o funcionamento do circuito. Então, conhecendo a faixa de frequência de interesse, deve-se retirar do sinal os

componentes de frequência presentes e desnecessários. Para tanto, é imprescindível o desenvolvimento de um circuito de filtragem, permitindo que somente as componentes de frequência na faixa de interesse permaneçam no sinal.

Utilizando-se amplificadores operacionais, como o LM324, é possível construir um filtro que atenda aos requisitos de resposta plana na faixa de frequência de interesse, ganho unitário, e desvio de fase linear, requisitos esses encontrados em um arranjo com o filtro *Sallen-key* na implementação do filtro *Butterworth*, o qual foi adotado no desenvolvimento da etapa de filtragem deste projeto.

A Figura 5.23 mostra o diagrama do filtro empregado. Foi utilizada para este projeto, a configuração *Butterworth*, passa-baixa analógico de 3ª ordem (atenuação de 60 dB/década), com frequência de corte, f_c , igual a 70Hz. A frequência de corte de 70 Hz foi empregada por ser bem superior à faixa de frequência dos sinais que serão estudados, como por exemplo, o de balanço (oscilação) humano, que tem seu conteúdo espectral significativo em frequências abaixo de 10 Hz. O ganho total do sistema até esse estágio não é afetado com a introdução do filtro, pois, na configuração adotada, esse fornece ganho unitário.

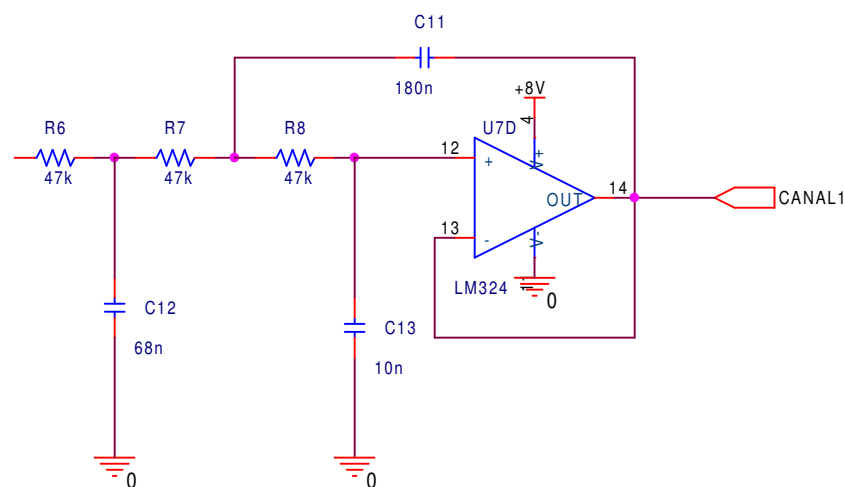


Figura 5.23 Diagrama do filtro *Butterworth* passa-baixa 3ª ordem com

Além dessa filtragem por *hardware*, estão disponíveis no aplicativo desenvolvido módulos de filtros digitais para melhorar ainda mais a qualidade do sinal processado, minimizando a presença de eventuais ruídos ou distorções decorrentes do processo de digitalização.

Lembrando que o sinal de saída da ponte quando a célula está submetida à força máxima de 1800N é para o esforço vertical, de 1.0688mV e para o horizontal, de 1.0679mV, após amplificado nas duas etapas, o sinal resultante possuirá amplitude máxima de, aproximadamente, 573mV para a vertical e para a horizontal.

5.6.4 Multiplexação, ganho programável e digitalização de sinais

Um multiplexador é um circuito que recebe várias entradas e que, em tempo determinado, conduz cada uma dessas à saída. Um circuito multiplex foi utilizado neste projeto devido à necessidade de levar cada canal do amplificador à etapa de ganho programável, que foi implementada com o circuito integrado MCP6S21 da *Microchip* de uma entrada apenas. Assim, foi utilizado o mutiplex CD 4051 de oito entradas analógicas e três entradas de controle binário.

Utilizou-se também um amplificador programável para fornecer ao sistema maior liberdade para adequação dos sinais a faixas mais apropriadas de processamento. Para tal usou-se neste projeto o amplificador programável MCP6S21 com oito faixas de ganhos (1x, 2x, 4x, 5x, 8x, 10x, 16x e 32x) disponíveis. A Figura 5.24 ilustra o diagrama de conexões do multiplex e do MCP6S21.

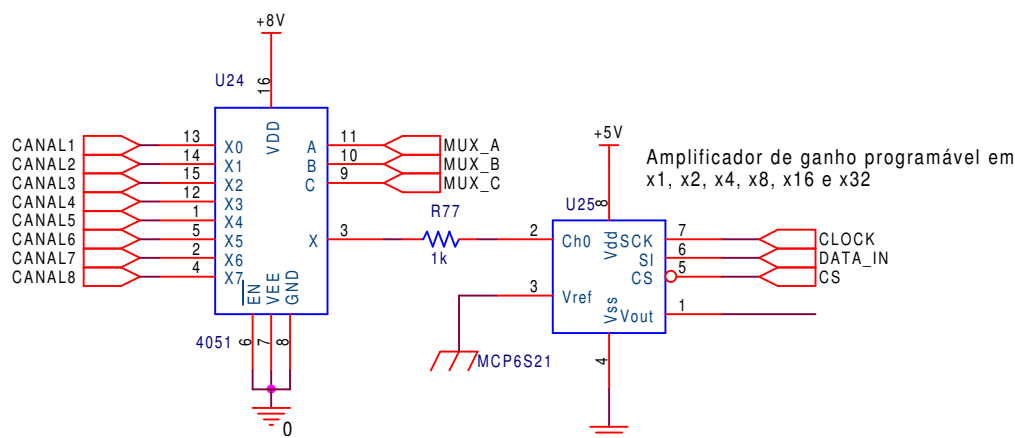


Figura 5.24 Diagrama de conexões do multiplex 4051 com o MCP6S21.

Devido à possibilidade do ganho programável, esse sistema, no estágio final do condicionamento, pode fornecer os ganhos mostrados na Tabela 5.5.

Ganho Fixo x Ganho programável = Ganho Final		
536.81	1	536.81
536.81	2	1073.62
536.81	4	2147.24
536.81	5	2684.05
536.81	8	4294.48
536.81	10	5368.1
536.81	16	8588.96
536.81	32	17177.92

Tabela 5.5 Ganhos totais fornecidos pelo circuito.

Iniciado o processo de digitalização, o sinal de saída, ainda analógico, do amplificador programável é enviado a um conversor analógico/digital (ADS7821) que espera os oito canais serem digitalizados e, em seguida envia todos para um

A Figura 5.25 ilustra o diagrama das conexões do ADS7821 com as linhas de dados para o microcontrolador PIC.

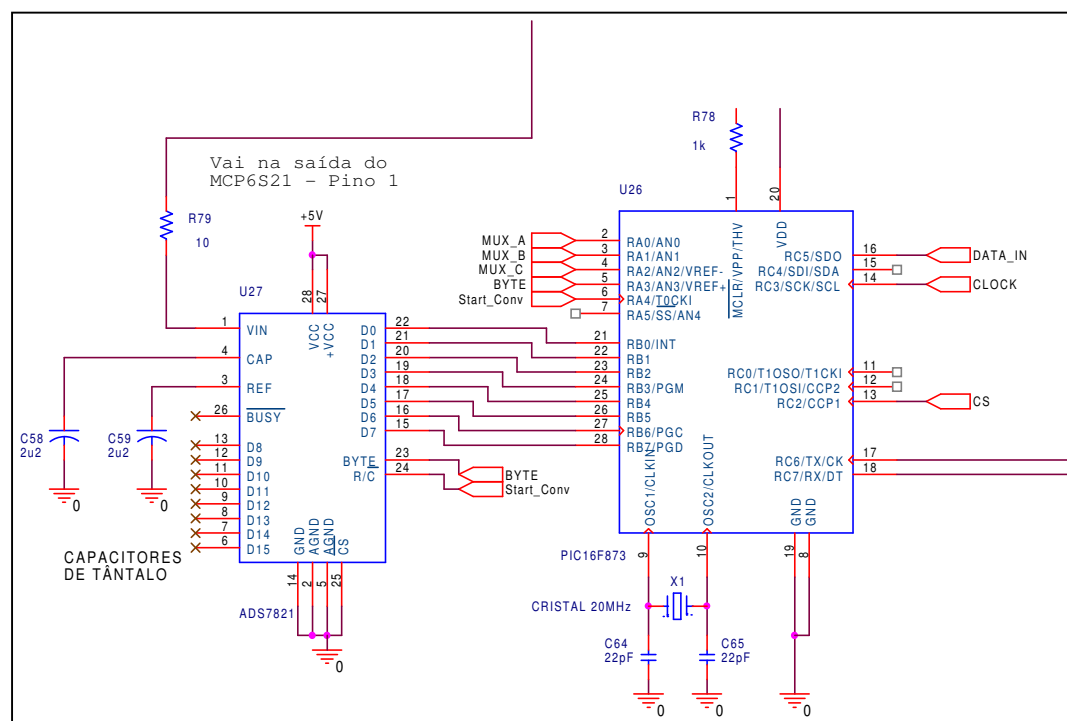


Figura 5.25 Diagrama de conexões do conversor A/D (ADS7821) com o PIC (16F873).

Pode ser visto na Figura 5.26 que os sinais vindos do PIC passam por um *driver* TTL/CMOS para RS232 para serem recebidos pela porta serial do computador. O CI MAX232 da MAXIM foi utilizado para esse fim.

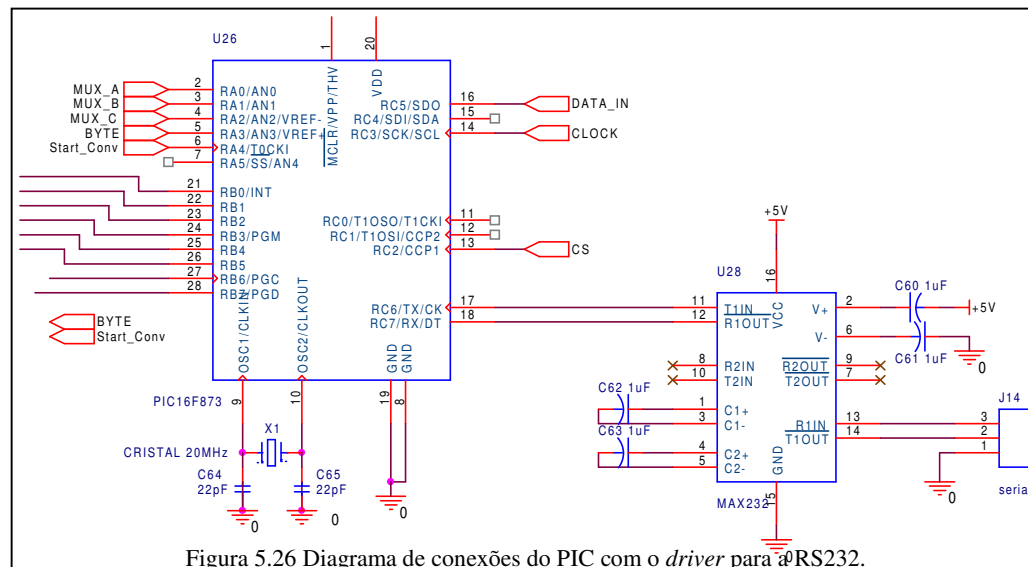


Figura 5.26 Diagrama de conexões do PIC com o driver para RS232.

Ao final do projeto do módulo condicionador e digitalizador, esse foi acomodado em uma caixa como mostra a Figura 5.27, em que se pode identificar a disposição dos componentes na placa do circuito.

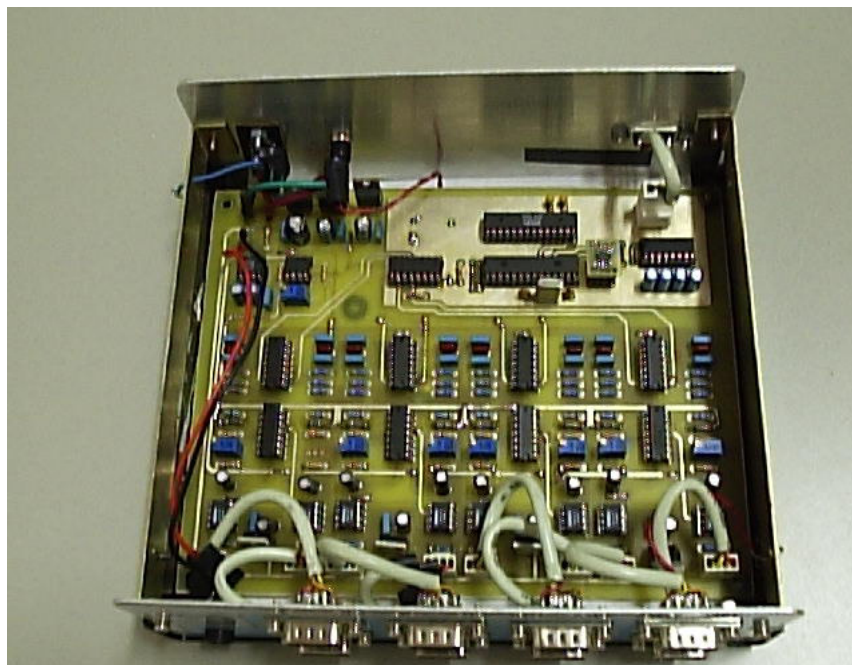


Figura 5.27 Foto da disposição dos componentes no módulo condicionador de sinais.

Nas Figuras 5.28, 5.29 e 5.30, visualizam-se as principais vistas do equipamento, isto é do painel frontal, painel traseiro e conjunto condicionador, cabo para comunicação serial e fonte de tensão, respectivamente.



Figura 5.28 Foto do painel frontal do condicionador.

Como é possível verificar, foram empregados conectores do tipo DB09 como portal para entrada das células de carga.

No painel traseiro, mostrado na Figura 5.29, observa-se, à esquerda, o conector de saída para a porta serial do computador, ao lado o pino de *reset* (para reinicializar valores de variáveis no aplicativo) do sistema de aquisição e, à direita, o conector de entrada da fonte de alimentação.



Figura 5.29 Foto do painel traseiro do condicionador

O conjunto completo da unidade de condicionamento e digitalização pode ser observado na Figura 5.30.



Figura 5.30 Foto da unidade de condicionamento, fonte e cabo serial.

O circuito com todas as etapas diagramadas do condicionador encontra-se disponível no ANEXO B deste trabalho.

5.7 Calibração das células de carga e montagem da plataforma

O processo de calibração consiste em obter as equações das retas de carga que representam cada uma das células de carga, permitindo o estabelecimento de correspondências entre os valores de tensão e as forças aplicadas. A partir dessas, torna-se possível a avaliação de parâmetros como linearidade, histerese, repetibilidade, entre outros.

Para a realização da calibração estática em ambas as direções, vertical e horizontal, foi utilizada uma máquina de ensaio de compressão, com uma esfera macroindentadora na extremidade, como mostra em detalhe a Figura 5.31, cuja função foi imprimir um esforço conhecido à secção transversal da estrutura

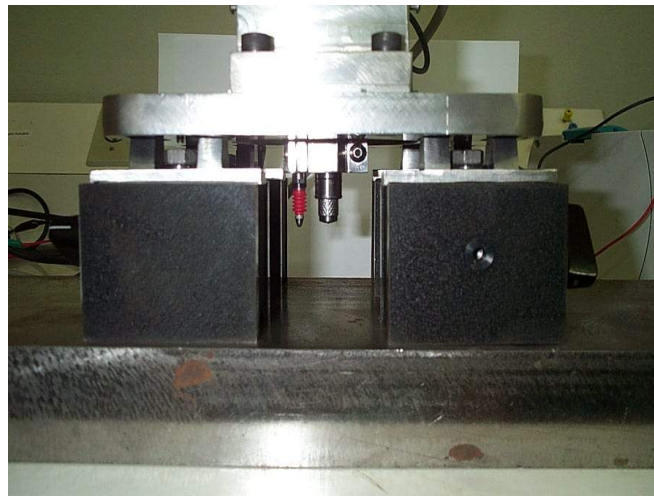
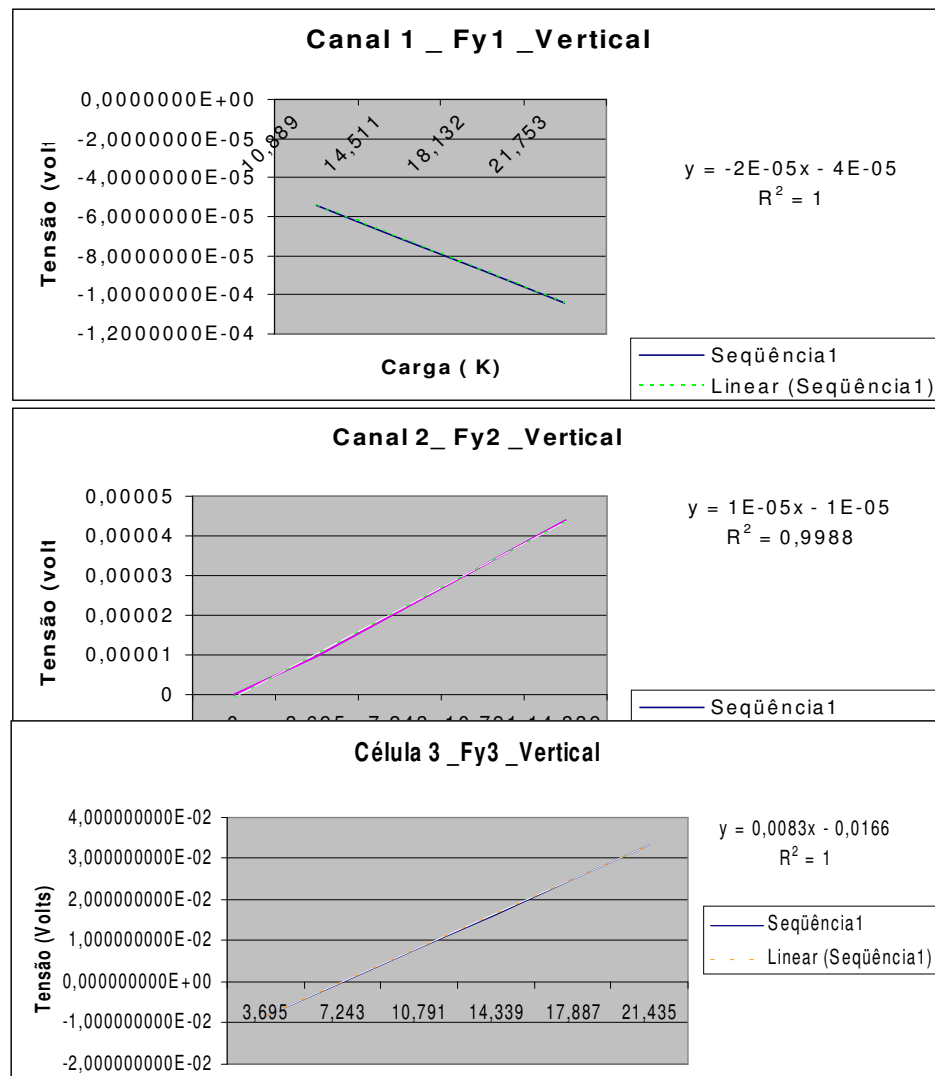


Figura 5.31 Foto do macro indentador com detalhes do penetrador (Biolab,2005).

O objetivo foi aproveitar a precisão com que o carregamento era imposto, na vertical, pelo equipamento, tomado os devidos cuidados para que a célula não sofresse nenhuma indentação preocupante. O ensaio vertical foi realizado com um carregamento máximo imposto de 700 Newtons. As equações das retas de carga obtidas no ensaio vertical podem ser visualizadas na Figura 5.32.



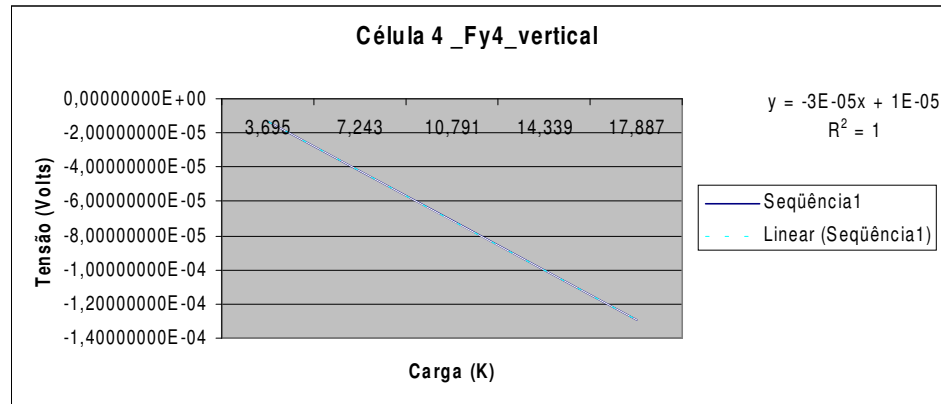
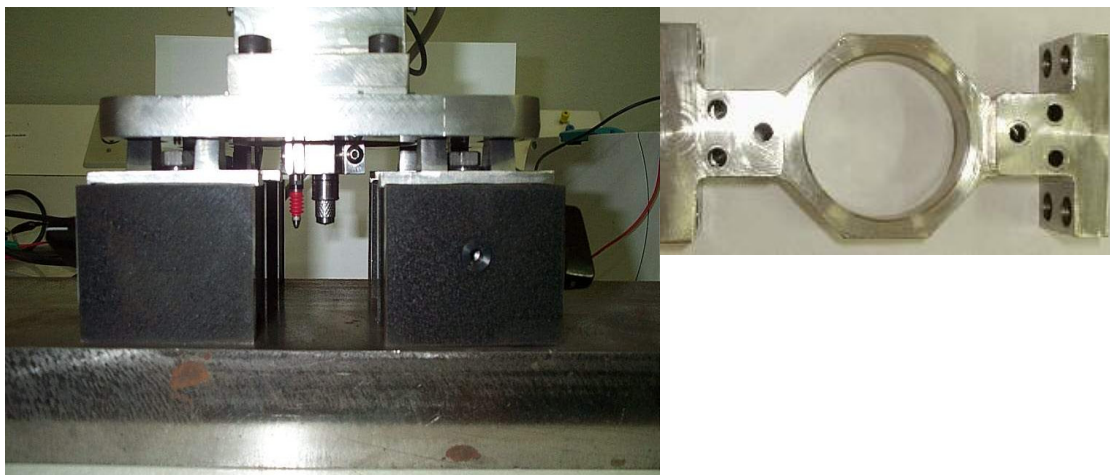


Figura 5.32 Equações e retas de carga obtidas para os ensaios verticais.

Algumas retas de carga apresentaram um coeficiente angular negativo, como mostrou a Figura 5.32. Tal fato pôde ser corrigido, bastando inverter as conexões de saída da célula de carga em relação às entradas do amplificador diferencial do circuito de entrada do condicionador de sinais. Dessa forma, quando um esforço de compressão for realizado sobre algumas das células, o sinal de variação na saída da célula será positivo.

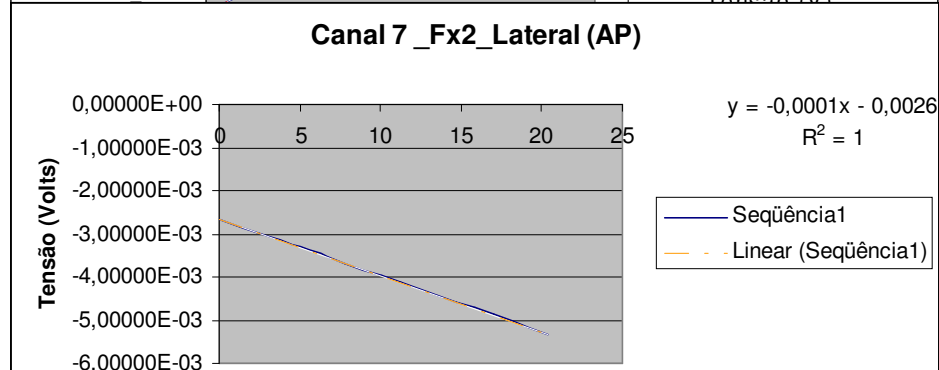
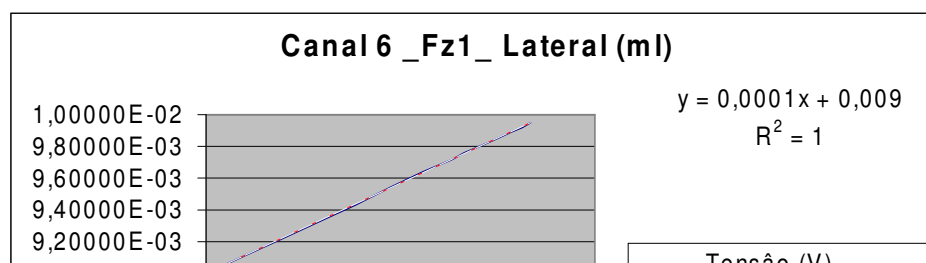
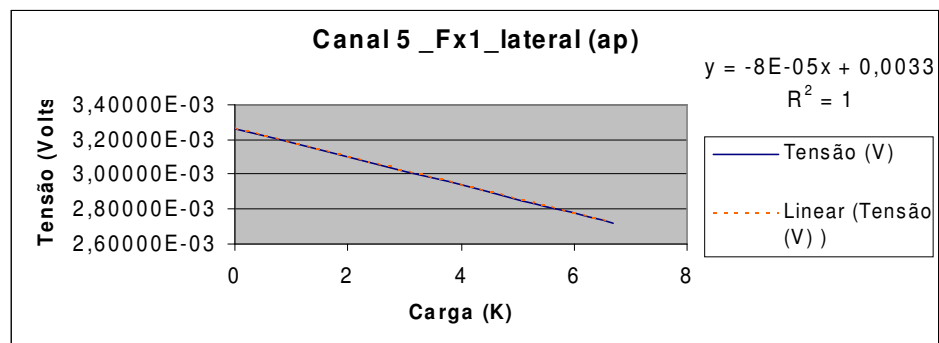
Para a realização dos ensaios laterais, foi desenvolvido um arranjo com uma barra de ferro, de forma que a célula ficasse fixada rigidamente na posição horizontal, posicionada bem abaixo da extremidade do penetrador, como mostrado na Figura 5.33.



Local de posicionamento da célula de carga para os ensaios horizontais.

Figura 5.33 Foto da posição da célula de carga para ensaio lateral

Para o ensaio horizontal, um carregamento de 300N foi imposto à célula de carga. As equações das retas obtidas no ensaio horizontal podem ser visualizadas na Figura 5.34. Da mesma maneira que no ensaio vertical, algumas retas de carga apresentaram um coeficiente angular negativo, como mostra a Figura 5.34. Essa situação foi corrigida invertendo as conexões de saída da célula de carga em relação às entradas do amplificador diferencial do circuito de entrada do condicionador de sinais. Todas as planilhas, gráficos e equações das retas de carga de ambos ensaios estão disponíveis para consulta no ANEXO C deste trabalho.



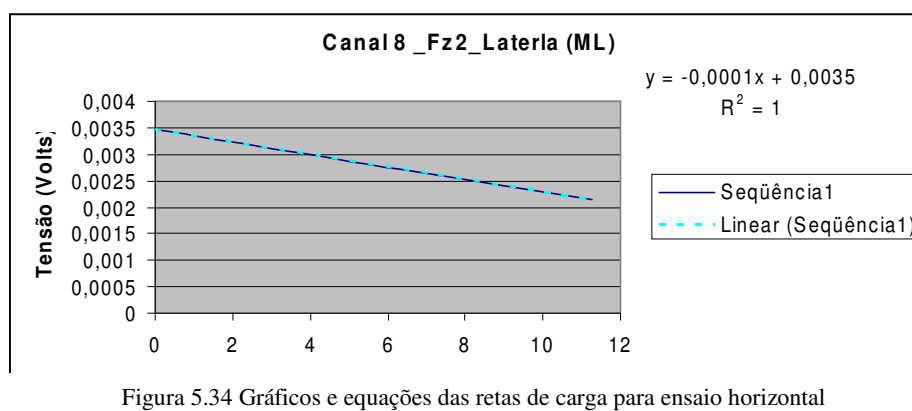


Figura 5.34 Gráficos e equações das retas de carga para ensaio horizontal

Portanto, de posse das para cada uma das células de carga, elas foram fixadas em seus devidos lugares, na base da plataforma, e alguns acertos de posicionamento foram feitos, no sentido de corrigir imperfeições decorrentes da usinagem do protótipo. A falta de planicidade em regiões de fixação da célula com outra superfície, bem como falhas no acabamento e matriz de furação no equipamento foram identificadas e minimizadas durante o processo da remontagem do protótipo.

A Figura 5.35 mostra a disposição das células de carga na base da plataforma e as conexões entre si. As principais vistas do equipamento, como a lateral e frontal, podem ser observadas nas Figuras 5.36 e 5.37 respectivamente.

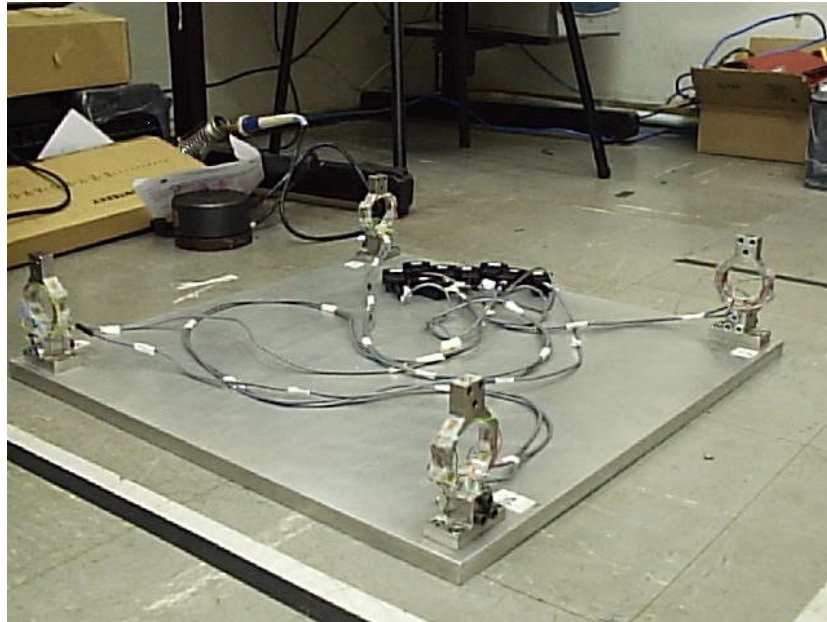


Figura 5.35 Foto da disposição das células de carga na plataforma.

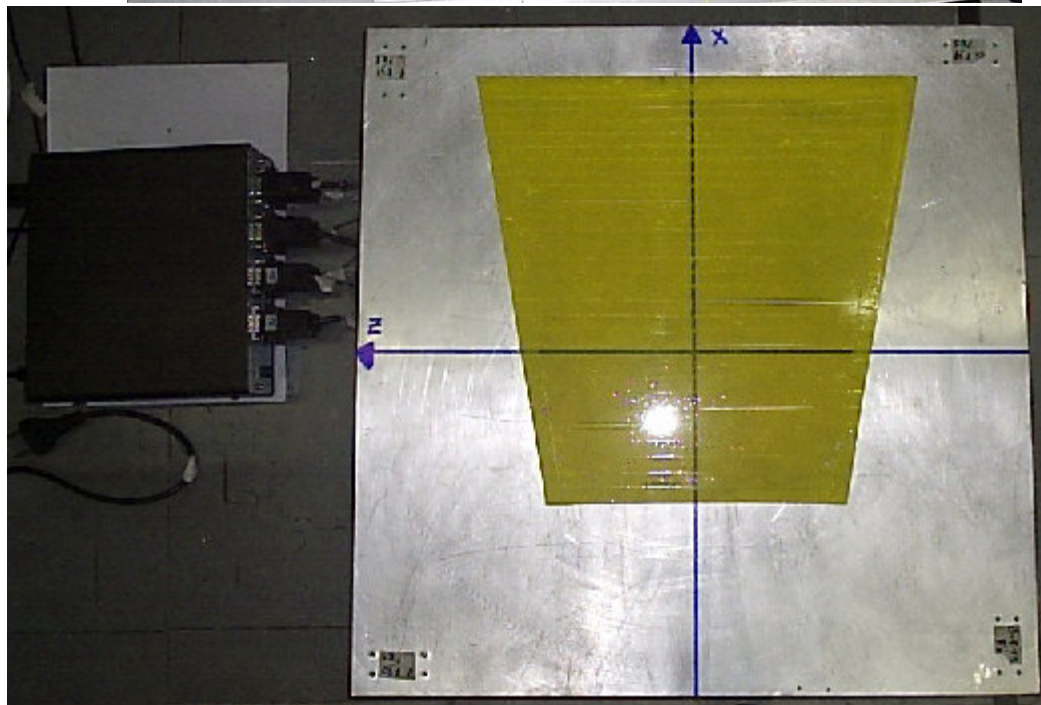
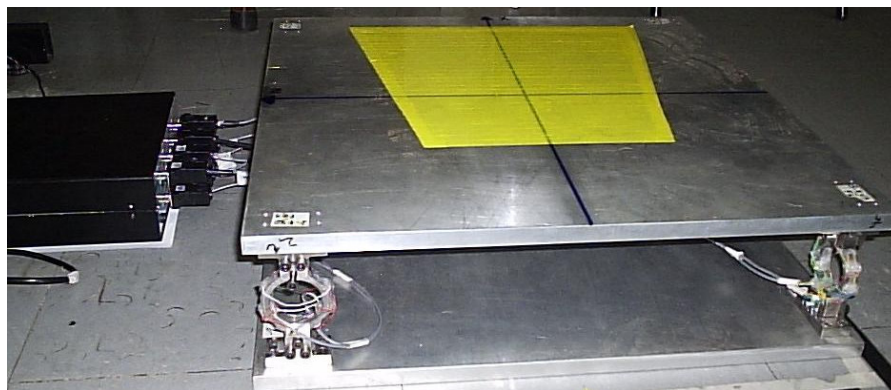


Figura 5.37 Foto da plataforma de força montada e instrumentada - vista de cima.

A Figura 5.37 ilustra a plataforma vista por cima, onde se observa a indicação dos eixos coordenados e as direções adotadas. Uma área delimitada em cor amarela foi imposta sobre a superfície superior da placa, no sentido de indicar ao usuário qual a área disponível à sua acomodação, sem causar restrições ou mal estar quanto à sua postura natural.

Todos os desenhos cotados dos elementos estruturais desenvolvidos para a composição da plataforma estão disponíveis para consulta no ANEXO D deste trabalho.