

# Tutorial em Robôs de Combate

Versão 1.0 – Agosto/2006

Prof. Marco Antonio Meggiolaro - [meggi@mec.puc-rio.br](mailto:meggi@mec.puc-rio.br)

Coordenador da Equipe RioBotz PUC-Rio - [www.riobotz.com.br](http://www.riobotz.com.br)

Colaboradores: Felipe Maimon, Felipe dos Santos Scofano, Bruno Favoreto Fernandes Soares

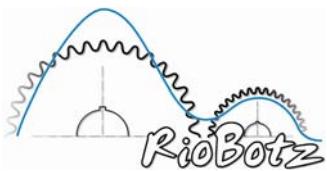
## 1. Introdução

A motivação para escrever este tutorial veio das inúmeras interações que eu e toda a RioBotz tivemos com as outras equipes durante as competições. Felizmente as equipes têm cada vez mais cooperado entre si, trocando informações, emprestando ferramentas, ajudando nos reparos dos robôs. Nós da RioBotz começamos do zero, como todo mundo. Nosso primeiro robô, o Lacrainha, precursor do Lacraia, foi quase todo feito com sucata, com orçamento quase zero. Desde então nós temos aprendido muito, seja pesquisando ou seja cometendo erros. Quando estivemos no Robogames 2006, nos EUA, percebemos o quanto os competidores são amigos e trocam informações, mostrando os seus robôs com detalhes por dentro mesmo para os adversários que enfrentarão a seguir. Muitas equipes dos EUA publicam em seus *websites* os *build reports*, que são informações detalhadas, passo a passo, de como eles construíram seus robôs. Foi dessa forma que eles conseguiram chegar ao nível que estão.

Eu gostaria de seguir esse exemplo e tentar repassar neste tutorial tudo o que a gente aprendeu desde janeiro de 2003, quando a RioBotz foi criada. O maior desafio foi tentar incluir o máximo de informação possível, desde princípios básicos até dicas avançadas, de uma forma compacta mas sem prejudicar a didática. Eu também tento repassar, de forma condensada, as informações mais relevantes contidas em todos os livros relacionados na bibliografia. O objetivo é transmitir o máximo possível de informação para que a nossa liga – a Guerra de Robôs – seja cada vez mais forte e reconhecida no mundo todo. Mesmo que isso signifique que vocês possam usar essas informações para ganhar da gente! Faz parte do jogo.

Fiquem à vontade para distribuir ou imprimir este tutorial, pediria apenas que fosse repassado sempre na forma integral e sem alterar seu conteúdo. Acredito que esse tutorial ajudará não só aos construtores de robôs de combate, mas também a todos que quiserem construir robôs robustos e resistentes, para participarem em qualquer tipo de competição. Espero também estimular novas equipes a serem criadas, que elas percebam o quanto se pode aprender construindo esses robôs, e que é possível fazê-lo mesmo com pouca experiência.

Me desculpem se cometermos algum erro nas páginas a seguir, muitas das informações incluem opiniões pessoais, e portanto podem ser tendenciosas – apesar de todas terem sido testadas na prática, na arena. Por exemplo, quando eu falar mal da resistência de rebites, isto não quer dizer que um robô todo rebitado e muito bem feito não seja resistente, sempre há exceções. Gostaria muito de ter o *feedback* de todos vocês quanto a isso.



## Histórico

As competições de robôs existem há mais tempo do que se imagina, e têm cada vez mais atraído competidores e espectadores. A primeira competição envolvendo confronto de robôs foi a “Design 2.007” (informações, fotos e vídeos em <http://pergatory.mit.edu/2.007>), um evento de 2 noites que ocorre anualmente desde 1970 no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Os robôs são construídos durante um semestre por alunos de graduação que cursam a matéria 2.007, *Introduction to Design and Manufacturing* (no MIT os cursos são chamados pelo número, o 2 significa que é do Departamento de Engenharia Mecânica, e o 007 é o código da matéria). O objetivo é construir um robô controlado por rádio que execute determinadas tarefas, como coletar bolas ou transportar peças, em uma arena de obstáculos. A cada ano a tarefa é modificada para estimular a criatividade.

Eu tive a oportunidade de ajudar algumas equipes na competição de 1996 (foto ao lado), mas infelizmente não pude competir pois eu já era aluno de pós-graduação. Fiquei fascinado com o entusiasmo e principalmente com a criatividade dos alunos.

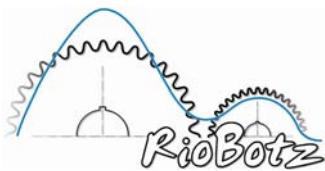
O mais legal das competições do MIT é que as tarefas são disputadas com dois robôs se enfrentando na arena. Ganhá quem conseguir mais pontos coletando bolas, transportando peças, depende do ano, mas uma regra não muda: após marcar pelo menos um ponto, você tem o direito de bloquear o adversário. Deu pra notar claramente que essa era a parte que os pilotos mais esperavam e na qual a platéia mais vibrava: o bloqueio do adversário. Apesar de muitos não admitirem, ver robôs se confrontando, empurrando e bloqueando de forma engenhosa as ferramentas de captura de bolas do adversário era muito mais emocionante do que apenas jogar bolas dentro de buracos.



O sucesso da Design 2.007 inspirou a criação em 1992 da primeira competição de robôs entre alunos do ensino médio, organizada pela fundação FIRST (*For Inspiration and Recognition of Science and Technology*, [www.usfirst.org](http://www.usfirst.org)), que ocorre até hoje, porém não inclui combate de robôs.

Nesse mesmo ano, o *designer* norte-americano Marc Thorpe conectou um aspirador de pó a um tanque de controle remoto para facilitar as tarefas domésticas. A invenção não funcionava bem como aspirador, mas era barulhenta e causava estragos, uma combinação perfeita para o novo esporte que ele acabara de inventar: o combate de robôs. Na época ele trabalhava para a *LucasFilms* e, inspirado no filme *Star Wars*, criou em 1994 a primeira competição oficial, a *Robot Wars*. O primeiro evento da história foi disputado naquele ano no *Fort Mason Center*, em São Francisco, o mesmo local que sediou o Robogames 2006.





Em 1997, o *Robot Wars* foi televisionado no Reino Unido pela BBC, iniciando a febre de combate de robôs naquele país. Disputas judiciais à parte, o sucesso foi tanto que o evento se mudou para o Reino Unido. Nesse mesmo ano, surgem nos Estados Unidos o *Robotica* e o *BotBash*, eventos similares ao *Robot Wars*.



Em 1999, Trey Roski e Greg Munson fundaram em São Francisco a liga *BattleBots* ([www.battlebots.com](http://www.battlebots.com)), criando a competição de robôs de maior exposição na mídia até hoje. O primeiro evento foi na Califórnia em agosto de 1999, com 70 robôs inscritos. O segundo evento foi um dos mais famosos, ocorreu em Las Vegas em novembro de 1999, televisionado pelo *pay-per-view*. Finalmente os combates de robôs atingiram em grande escala a mídia norte-americana. Em 2000 o *BattleBots* passou a ser televisionado pelo canal a cabo *Comedy Central*, e rapidamente se popularizou, sendo transmitido por 5 temporadas. A apresentadora do programa, Carmen Electra, muitas vezes roubava a atenção dos espectadores, provocando alguns ciúmes dentre os que queriam que o programa focasse apenas nos robôs.



Em 2001, a primeira Guerra de Robôs brasileira foi disputada, inspirada nos moldes da *BattleBots*, em uma arena montada na Unicamp. Em 2002, a segunda competição foi realizada novamente na Unicamp, agora vinculada ao ENECA (Encontro Nacional de Estudantes de Controle e Automação). Desde então as competições brasileiras têm sido realizadas anualmente, vinculadas ao ENECA, organizadas pela liga Guerra de Robôs ([www.guerraderobos.com.br](http://www.guerraderobos.com.br)), atraindo público cada vez maior.



Em 2002 foi criada nos EUA a *Robot Fighting League* ([www.botleague.com](http://www.botleague.com)), atualmente a liga com maior atividade no mundo, organizando desde os eventos locais até os *RFL Nationals*, o campeonato nacional de lá, e o *Robogames*, que conta com diversos países.



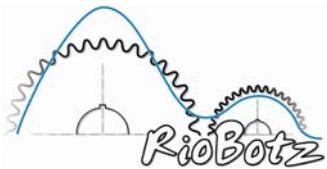
Em 2005 foi criada mais uma competição brasileira, o *Winter Challenge*, que tem sido realizado anualmente em julho. A competição de 2005 foi disputada, pela primeira vez no mundo, sobre uma arena de gelo.



Vamos torcer para que mais competições sejam sediadas anualmente no Brasil.

## Estrutura do Tutorial

O tutorial está dividido em 10 capítulos. Este capítulo engloba a introdução, histórico, e agradecimentos. O capítulo 2 fala sobre os fundamentos do projeto dos diversos tipos de robôs de combate. O capítulo 3 aborda os principais materiais usados nesses robôs, e como selecioná-los. O capítulo 4 apresenta os principais elementos de fixação, como parafusos. O capítulo 5 aborda os motores que acionam a locomoção e a arma de um robô, e os sistemas de transmissão de potência, como engrenagens e correias. Nesse capítulo estão também diversas equações para projetar o

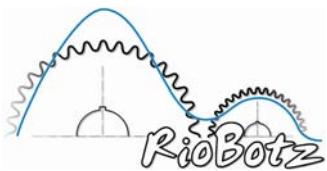


acionamento do robô. Algumas dessas equações se baseiam em princípios de dinâmica e cálculo, no entanto o desconhecimento destes não prejudica o entendimento do texto. O capítulo 6 discute os diversos componentes eletrônicos e elétricos necessários para acionar o robô. O capítulo 7 apresenta os diversos tipos de baterias e suas vantagens e desvantagens. O capítulo 8 aborda informações e dicas importantes de como se preparar e proceder antes, durante e após uma competição. O capítulo 9 expõe uma anatomia detalhada e ilustrada dos robôs da RioBotz, em especial do Ciclone, Titan e Touro, exemplificando diversos conceitos expostos nos capítulos anteriores. E finalmente o capítulo 10 apresenta as conclusões. Incluímos também uma seção de perguntas frequentes (FAQ), uma bibliografia contendo as melhores referências para se aprofundar mais no projeto de robôs de combate, e um apêndice contendo uma revisão de análise de tensões e tabelas e informações úteis em forma resumida.

## Agradecimentos

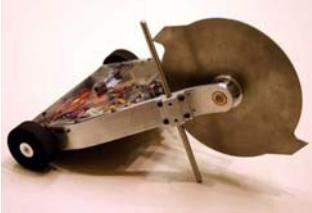
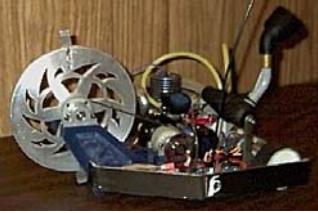
Gostaria de aproveitar para agradecer a toda a equipe RioBotz, sem a qual as idéias aqui expostas não teriam saído do papel, e pela revisão cuidadosa deste tutorial. Mais especificamente, agradeço ao Felipe Scofano e Felipe Maimon por toda a iniciativa e liderança, pelo esforço em criar uma eletrônica potente e robusta, além das contribuições ao capítulo 6; Bruno Favoreto por pilotar o *Solidworks* de olhos fechados; Eduardo “Dudu” Ristow por conseguir virar a noite usando a fresa e torno ao mesmo tempo sem perder o bom humor; Julio Guedes pela fidelidade à equipe desde a sua criação; Ilana Nigri por toda a ajuda em organizar e tornar civilizados os nossos *pitstops* mais frenéticos; Gustavo “Calouro” Lima pelo vinho; Mariana Bystronski pela multimídia; Rodrigo Almeida pelas filmagens; Cláudio Duvivier pela nossa *webpage*; Guilherme Vasconcellos por estar sempre presente ajudando na mecânica; Aline Mello pela paciência e dedicação em rosquear os 285 furos do Touro; e Rafael “Pardal” Moreira, Márcio Barros, Filipe “Saci” Sacchi, Daniel Zacarias, Daniel Lucas, Raphael Rodrigues e Felipe Philadelpho por todo o empenho na construção dos robôs. Não posso deixar de agradecer aos Profs. Mauro Schwanke, por tudo o que tem ensinado para nós, e Mauro Speranza, pelo fundamental apoio administrativo, e a todo o apoio da PUC-Rio. À HOPE Recursos Humanos e EPTCA Medical Devices, por todo o patrocínio e por terem acreditado em nós mesmo antes de termos resultados. E finalmente ao Paulo e Thacia, cuja dedicação em organizar as guerras de robôs me inspirou a dedicar tempo para organizar todo esse material da RioBotz em forma de tutorial. Obrigado a todos!

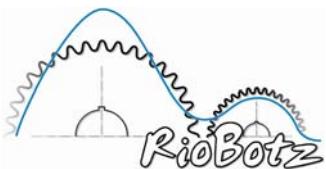




## 2. Fundamentos do Projeto

O ponto de partida do projeto é a escolha da classe de peso. Nas competições nacionais, a escolha ainda é limitada a *middleweights* (120 libras, cerca de 55kg) e, mais recentemente, a *hobbyweights* (12 libras, cerca de 5,5kg). No entanto, nas competições internacionais existe uma grande variedade de classes de peso. As classes de peso norte-americanas oficiais estão a seguir.

		
<i>classe ainda sem nome – 35g</i>	<i>Fleaweight – 75g</i>	<i>Fairyweight – 150g</i>
		
<i>Antweight – 1lb (454g)</i>	<i>Kilobot (Canadá) – 1kg</i>	<i>Beetleweight – 3lb (1,36kg)</i>
		
<i>Mantisweight – 6lb (2,72kg)</i>	<i>Hobbyweight – 12lb (5,44kg)</i>	<i>BBIQ – 15lb (6,80kg)</i>
		
<i>Featherweight – 30lb (13,6kg)</i>	<i>Lightweight – 60lb (27,2kg)</i>	<i>Middleweight – 120lb (54,4kg)</i>
		
<i>Heavyweight – 220lb (99,8kg)</i>	<i>Super Heavyweight – 340lb (154,2kg)</i>	<i>Mechwars – 390lb (176,9kg)</i>



## 2.1. Classes de Peso

Os menores robôs de combate possuem apenas 35 gramas, mas são tão poucos que ainda não há um nome para esta classe de peso. Os *fleaweights* (75g) são também poucos, suas competições são ainda raras. Os *fairyweights* (150g) estão se tornando comuns, no entanto ainda há poucos eventos para eles. As classes *antweight* (1lb) e *beetleweight* (3lb) são as mais concorridas dentre os robôs “insetos” (formigas, besouros, pulgas...). Já a classe *kilobot* (1kg) só existe no Canadá, e a de 15lb é somente para estudantes do ensino médio de 12 a 18 anos, que participam da competição BattleBots IQ. *Mantisweight* (6lb) é outra classe que não pegou, existem muito poucos robôs com este peso. A *featherweight* (30lb) tem muitos robôs, mas não é das mais populares.

As classes mais disputadas e competitivas são a *hobbyweight* (12lb), *lightweight* (60lb) e *middleweight* (120lb). A *heavyweight* (220lb) é a classe mais famosa, apesar de ter hoje em dia bem menos competidores do que na época em que o BattleBots era televisionado. A *super heavyweight* (340lb) está em declínio, seu apogeu também foi na época do BattleBots. Existem alguns campeonatos onde aparece a classe mais pesada, a *mechwars* (390lb), porém existem poucos robôs. Há boatos sobre o possível surgimento de classes ainda mais pesadas, no entanto o alto custo e dificuldade de transporte dos robôs provavelmente não as fará muito populares (a menos que haja muito patrocínio envolvido, como foi com os *super heavyweights* no auge do BattleBots).

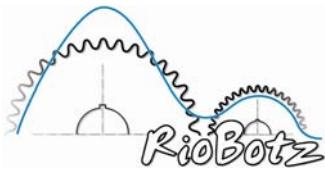
Como a grande maioria dos robôs de combate do Brasil são *middleweights*, todos os exemplos nesse tutorial serão voltados para esta classe de peso. No entanto, o conteúdo deste texto pode ser aplicado a qualquer tamanho de robô.

## 2.2. Fator de Escala

Algo importante para se ter em mente é o fator de escala. Se você dobrasse de tamanho em todas as suas dimensões, você ficaria com o dobro da altura, e com oito vezes o seu peso (pois seu volume seria multiplicado por  $2^3 = 8$ ). No entanto, a área da seção reta dos seus ossos e músculos só teria sido multiplicada por  $2^2 = 4$ . Como é a área da seção reta (de uma coluna de um edifício, por exemplo) que dita sua resistência e capacidade de carga, você ficaria 8 vezes mais pesado mas apenas 4 vezes mais forte. Conclusão: quanto maior a escala, pior a relação força/peso.

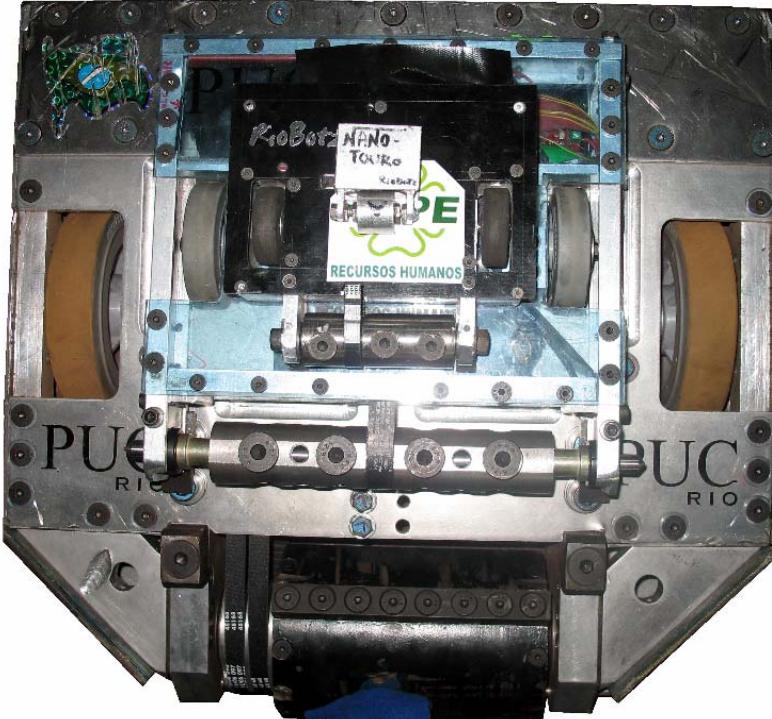
Para compensar isso, seus ossos teriam que ser proporcionalmente mais largos e menos longos para que eles não fraturassem ou flambassem. É por isso que rinocerontes e elefantes têm pernas tão largas e curtas. Por outro lado, ao diminuir a escala ocorre o efeito inverso. Uma formiga é cerca de 100 vezes menor que um ser humano, e por isso seu peso é cerca de  $100^3$  vezes menor, no entanto sua força apenas  $100^2$  menor. Assim, relativamente elas podem carregar objetos  $100^3/100^2 = 100$  vezes mais pesados do que um ser humano conseguiria. Essa estimativa se confirma na prática: um ser humano normalmente consegue carregar um objeto com metade de seu peso, enquanto que já foi provado que as formigas conseguem carregar 50 vezes o seu peso próprio, um fator de 100 a mais!

Você deve estar se perguntando: o que isso tem a ver com robôs de combate? Tudo. Se por exemplo você tiver projetado um robô *hobbyweight* que funcione bem e seja resistente, você



poderia aproveitar muito deste projeto para construir um *middleweight*, desde que você fique atento ao efeito de escala. Para isso você precisa multiplicar o peso por 10, o que ocorre se multiplicar todas as dimensões por raiz cúbica de 10, que resulta em um fator de escala 2,15.

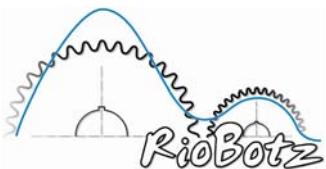
A figura ao lado mostra, de fora para dentro, o *middleweight* Touro, o *hobbyweight* Tourinho, o *beetleweight* Mini-Touro, e o *mock-up* de um *fleaweight* Nano-Touro. De fato, o fator de escala entre o Tourinho de 12lb e o Touro de 120lb é um pouco menor que 2 (o que é próximo dos 2,15 teóricos, e indica que daria para ter otimizado e compactado ainda mais o Tourinho para chegar nesse valor de 2,15, se comparado com o Touro). Essa regra funciona muito bem em todas as escalas, desde que os robôs sejam parecidos: o Touro é de uma classe de peso 40 vezes mais pesada que o Mini-Touro, e o fator de escala medido entre eles é de cerca de 3,25, que é próximo de 3,42, a raiz cúbica de 40!



A questão é: seguindo o raciocínio da formiga, um *middleweight* como o Touro seria, relativamente, cerca de  $2,15^3/2,15^2 = 2,15$  vezes menos forte, ágil, potente e resistente do que um *hobbyweight* como o Tourinho? Sim e não. O Touro provavelmente será relativamente menos forte e ágil. Se por exemplo o Tourinho usasse um cilindro pneumático, cuja força depende da área do seu pistão, um cilindro em escala 2,15 no Touro seria apenas  $2,15^2$  vezes mais forte, enquanto que o robô seria  $2,15^3$  vezes mais pesado. As acelerações, que dependem da razão entre a força e a massa do robô, também seriam prejudicadas. É por isso que comparativamente os robôs insetos parecem muito mais ágeis.

No entanto, o Touro não será relativamente 2,15 vezes menos potente e resistente. No caso de um cilindro pneumático, a sua energia vem do seu volume interno (multiplicado pela pressão). Assim, um cilindro do Touro teria  $2,15^3$  vezes mais volume e energia, o que é compatível com seu peso  $2,15^3$  vezes maior. O mesmo se observa, por exemplo, em motores de corrente contínua (DC). Na prática, a relação potência/peso dos melhores motores DC depende pouco de seu fator de escala – caso contrário valeria a pena trocar um grande motor por centenas de micro-motores. Como a potência que gera energia, e a energia que gera destruição, o Touro e o Tourinho teriam relativamente a mesma potência e portanto o mesmo poder de destruição.

Essa conclusão não é muito intuitiva, pois ao vermos o Touro e o Tourinho arremessarem adversários de suas classes de peso aos mesmos 1 metro de altura (o que foi testado aplicando-se ao Tourinho 24V ao invés de seus 17V habituais, para ficar igual ao Touro), a impressão que dá é que



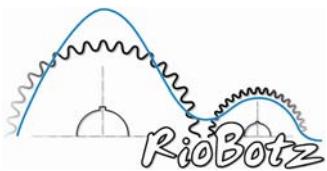
o Tourinho geraria relativamente mais destruição, pois a altura de arremesso relativa ao tamanho do robô é bem maior. Mas essa mesma altura não é surpresa, isso é verificado pela expressão da energia potencial  $E = m \cdot g \cdot h$ , onde  $m$  é a massa do robô,  $g$  a aceleração da gravidade, e  $h$  a altura atingida no arremesso. Como a relação  $E/m$  do Touro e o Tourinho é aproximadamente igual (como discutido acima) e  $g$  é uma constante, a altura  $h$  é a mesma. Assim, apesar de os robôs pequenos serem arremessados a uma grande altura em relação ao seu tamanho, eles são mais resistentes às quedas, o que acaba igualando o poder de destruição.

Mas por que o Touro e o Tourinho são igualmente resistentes, uma vez que a resistência de uma coluna depende do quadrado de sua escala e não do seu cubo? De fato, se o Touro usasse de alguma forma colunas esbeltas, sujeitas à compressão e flambagem, elas seriam relativamente 2,15 vezes menos resistentes que no Tourinho. Mas os bons robôs de combate são compactos e robustos, sem partes esbeltas. As cargas mais importantes que atuam na sua estrutura são de flexão e torção. Como as resistências à flexão e torção aumentam com o cubo de seu fator de escala (um eixo de diâmetro  $d$ , por exemplo, tem essas resistências proporcionais a  $d^3$ ), então a relação resistência/peso continua similar para o Touro e Tourinho.

A conclusão é que o fator de escala pode ser usado diretamente em todo o robô, sem nenhuma perda significativa das razões potência/peso ou resistência/peso. Por exemplo, se você multiplicar por 2 o tamanho de um robô, seu peso é multiplicado por 8. A analogia com a formiga diria que o diâmetro de um eixo do robô precisaria ser multiplicado por raiz quadrada de 8, cerca de 2,83, para manter a mesma relação força/peso. Isso seria preciso se você estivesse projetando a coluna de um edifício, que pode sofrer flambagem, mas não é necessário para robôs de combate. Nesse caso, basta multiplicar por 2 o diâmetro, que as resistências à flexão e torção desse eixo se manterão. Isso é útil por dois motivos: primeiro, isso quer dizer que você pode aplicar o mesmo fator de escala (no caso 2) em todos os componentes individuais do robô, e segundo, você economiza peso (o eixo com diâmetro multiplicado por 2,83 teria exatamente o dobro do peso daquele multiplicado por 2).

Mas há um último fator a considerar: os eixos em robôs de combate costumam ser curtos, e neles há o efeito das cargas cortantes, que tendem a cisalhá-lo. Além disso, grandes impactos podem gerar tensões de tração ou compressão significativas. A resistência a esses esforços de tração, compressão e cisalhamento em um eixo de diâmetro  $d$  é proporcional a  $d^2$ , e não a  $d^3$ , levando de volta à analogia da formiga. Como em combate não podemos prever se essas cargas serão ou não significativas, e como os eixos são componentes críticos que não podem empregar, por segurança seria bom adotar o fator  $2^{1.5} = 2.83$  no eixo do exemplo anterior. Assim, utilize o fator de escala para multiplicar as dimensões de todos os componentes do robô mas, apenas nos eixos, por segurança, use esse fator elevado a 1,5. Não use esse maior fator em todo o robô, caso contrário ele ganhará muito peso sem necessidade, use apenas nos eixos ou em alguma outra peça crítica.

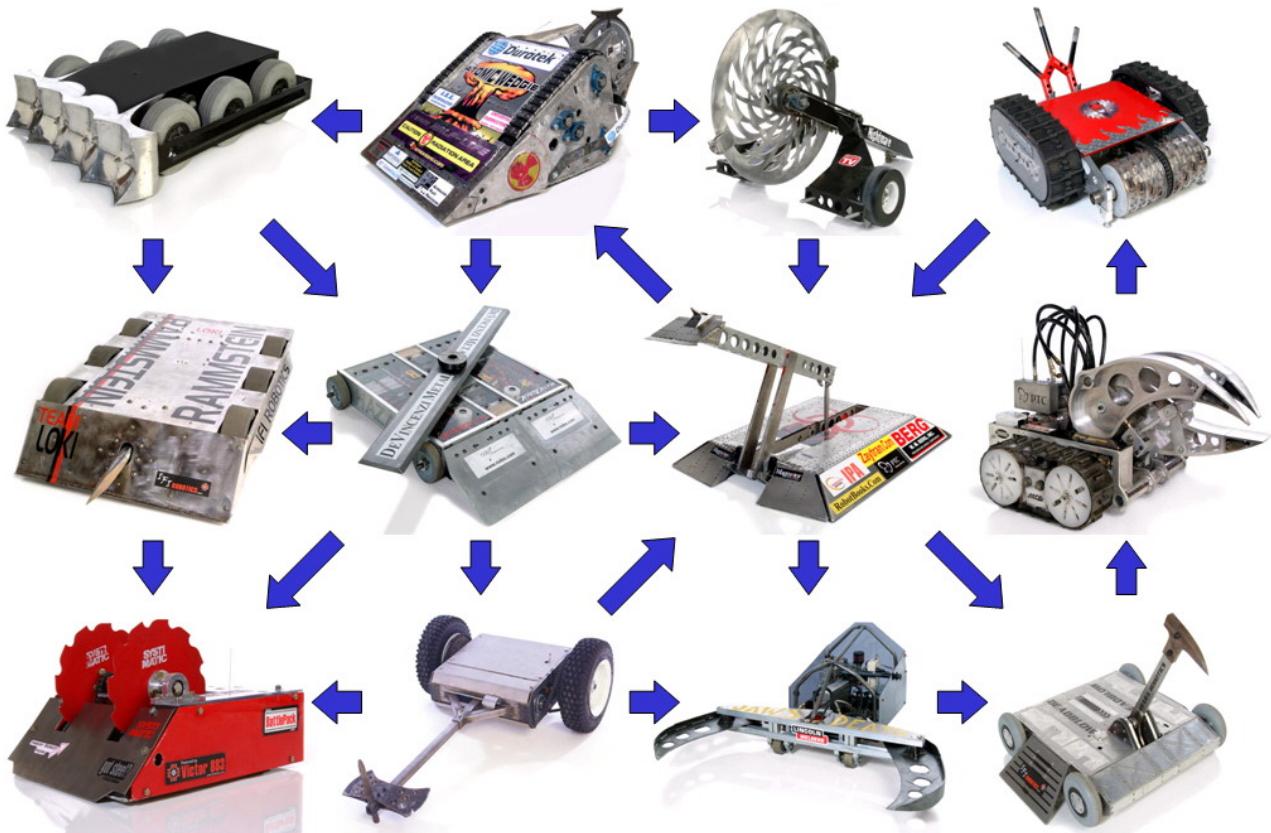
Todas essas considerações não são apenas filosóficas, elas são verificadas na prática. Um estudo com diversos robôs de combate nos Estados Unidos mostra que eixos de aço usados nas rodas possuem diâmetro, em média, de cerca de 13mm para *lightweights* (60lb), 18mm para *middleweights* (120lb), 25mm para *heavyweights* (220lb) e 31mm para *super-heavyweights* (340lb). Comparando *lightweights* e *middleweights* de aspecto similar, seu fator de escala teórico seria  $(120\text{lb}/60\text{lb})^{1/3} = 2^{1/3} = 1.26$ , e a razão entre os diâmetros dos eixos na prática é 18mm/13mm =

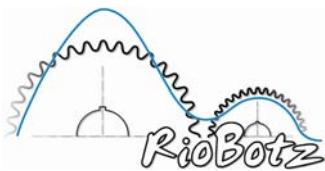


1,38, um valor incrivelmente próximo a  $1,26^{1.5} = 1,41$ . Entre *middleweights* e *heavyweights*, o fator teórico é  $(220\text{lb}/120\text{lb})^{1/3} = 1,22$ , e a razão dos diâmetros é  $25\text{mm}/18\text{mm} = 1,39$ , o que é próximo de  $1,22^{1.5} = 1,35$ . E entre *heavyweights* e *super-heavyweights*, o fator teórico é  $(340\text{lb}/220\text{lb})^{1/3} = 1,16$ , e a razão dos diâmetros é  $31\text{mm}/25\text{mm} = 1,24$ , o que confere muito bem com  $1,16^{1.5} = 1,25$ . A moral da história é que a teoria, combinada com o bom senso, é uma ferramenta muito poderosa na prática. Imagine quantos eixos foram empenados e quebrados em combates nos Estados Unidos até chegarem aos diâmetros médios otimizados acima, enquanto que com algumas contas simples nós conseguimos chegar ao mesmo resultado.

## 2.3. Tipos de Robôs de Combate

Tendo decidido sobre a classe de peso, o passo seguinte é a escolha do tipo de robô. Existem muitos tipos de robô de combate. Nenhum deles é o melhor de todos. É como um jogo de papel-pedra-tesoura. Ou, como costumam dizer, *wedge-spinner-hammer*. As rampas dos *wedges* tendem a capotar os *spinners*, que tendem a decepar os martelos dos *hammers*, que tendem a martelar e perfurar os *wedges*. Só tendem. A verdade é que um robô bem feito é capaz de ganhar de qualquer outro, independentemente das tendências. Na figura a seguir há um quadro de tendências que montamos para diversos tipos de robôs. Na figura, cada robô tem uma tendência a ganhar daquele para o qual ele está apontando. Mas um bom projeto e um bom piloto podem mudar completamente essa história.





Existem basicamente 16 tipos de robôs de combate: *rammers*, *wedges*, *lifters*, *launchers*, *thwacks*, *overhead thwacks*, *spears*, *spinners*, *saws*, *vertical spinners*, *drums*, *hammers*, *clampers*, *crushers*, *flamethrowers* e *multibots*, que serão descritos adiante.

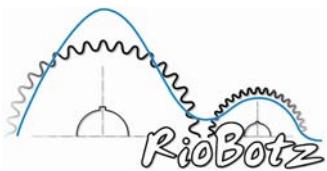
Outros tipos de robôs existem, mas quase sempre podem ser enquadrados em uma das categorias acima, ou então em uma combinação delas, como o robô “canivete suíço”, que possui duas ou mais armas. Os canivetes suíços não costumam ser eficientes, em geral é mais vantajoso concentrar o peso em uma única arma poderosa e eficiente do que em duas armas menores. Só pode ser vantajoso ter duas armas quando elas atuarem em conjunto, ao mesmo tempo em um adversário – por exemplo, a versão 2006 do *spinner* Titan (figura ao lado) usa uma rampa (a arma dos *wedges*) em conjunto com a lâmina para levantar adversários mais baixos e atingi-los.



Há também o robô “camaleão”, cujas armas podem ser trocadas em cada *pitstop* de acordo com o adversário da próxima luta. Esses robôs podem mudar de tipo rapidamente, aproveitando o melhor de cada um. O *super heavyweight* Shovelhead (figura ao lado) tem 15 armas diferentes que podem ser instaladas na sua frente articulada, uma para cada tipo de adversário. Alguns acessórios podem fazer muita diferença, por exemplo instalar um pára-choque feito de metade de um pneu se for lutar contra um *spinner*. Há até acessórios específicos contra um determinado robô, como um longo garfo que já foi usado para segurar o *spinner* Megabyte pelo seu tubo vertical e arremessá-lo repetidamente contra as paredes da arena. No entanto não é fácil fazer armas eficientes que possam ser desmontadas e montadas rapidamente durante um *pitstop*.



A seguir vamos discutir alguns detalhes dos 16 principais tipos de robôs.



### 2.3.1. Rammers



Rammers são robôs aríete, eles danificam o adversário se jogando contra eles ou empurrando-os contra as bordas da arena. Normalmente possuem tração nas 4 (ou mais) rodas, rodas largas de alta tração, um sistema de locomoção resistente, armadura robusta, alta resistência a impactos, e não possuem armas. Em geral são inversíveis (funcionam de cabeça para baixo). Eles precisam ser capazes de empurrar pelo menos 2 vezes o seu peso próprio. São eficazes contra robôs com armas giratórias, como *spinners*, *drums* e *saws*.

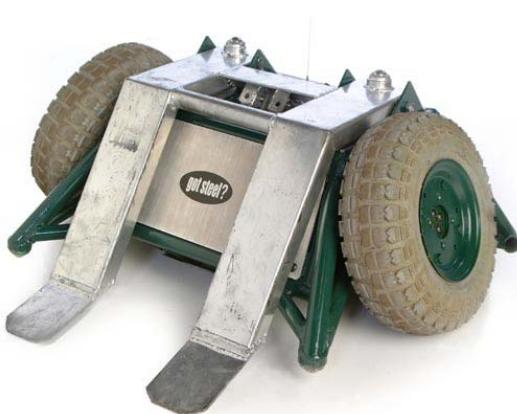
### 2.3.2. Wedges



Wedges são robôs tipo rampa, normalmente possuem 2 ou 4 rodas, e são altamente resistentes. Podem ser inversíveis ou não. Apesar de raramente causarem dano diretamente, eles são uma boa tática contra *spinners*, fazendo-os capotarem ao atingirem sua rampa. *Wedges* ganham dos adversários entrando por baixo deles e os arrastando pela arena, ou até capotando-os se o choque for em alta velocidade. *Wedges* rápidos atingem 20 a 25km/h. A frente da rampa não deve ser feita de folhas de metal, pois ao serem amassadas elas perdem sua funcionalidade. Use placas grossas que suportem os impactos dos adversários. *Wedges* são bons adversários contra *rammers* e robôs com armas giratórias, e são vulneráveis principalmente a outros *wedges* mais baixos, rápidos e potentes.



### 2.3.3. Lifters

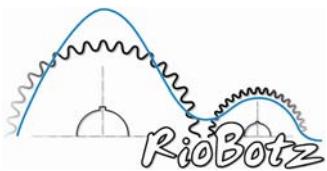


*Lifters* são robôs capazes de levantar o adversário, imobilizando-o ou virando-o de cabeça para baixo. São eficientes contra robôs que dependam de tração como *rammers* e *wedges*, ou robôs que possuam abas expostas que possam ser agarradas. São ineficientes contra *thwacks* e *overhead thwacks*, pois estes são difíceis de agarrar e funcionam invertidos. *Lifters* costumam ser presas fáceis para *spinners*. Seu projeto envolve um mecanismo lento para levantar o oponente, que pode parar no meio do curso. Desse modo o *lifter* pode levantar um robô adversário e arrastá-lo pela arena ao invés de apenas capotá-lo. Alguns lifters usam sistemas pneumáticos, mas os mais comuns usam motores elétricos com atuadores lineares. Coloque as baterias o mais atrás possível do robô, para fazer contra-peso na hora de levantar o adversário. As rodas da frente precisam ter alto torque e alta tração, pois o peso do robô irá se deslocar para frente ao levantar e arrastar o adversário. Alguns *wedges*, como o famoso Devil's Plunger, usam rampas ativas que também funcionam como *lifters*.

### 2.3.4. Launchers / Flippers



*Launchers* (ou *flippers*) são uma versão anabolizada dos *lifters*, sendo capazes de arremessar o adversário para o alto. O adversário não apenas pode capotar, como também o impacto com o solo pode causar danos. São portanto bons contra adversários com chassis fracos ou eletrônica sem proteção contra impactos. *Launchers* precisam de componente pneumático com grande diâmetro (em geral caros), atuados por ar em alta pressão ou CO<sub>2</sub>. Elimine todas as válvulas de agulha do sistema, ou então use um acumulador grande, para garantir a alta vazão de gás necessária no acionamento da arma.

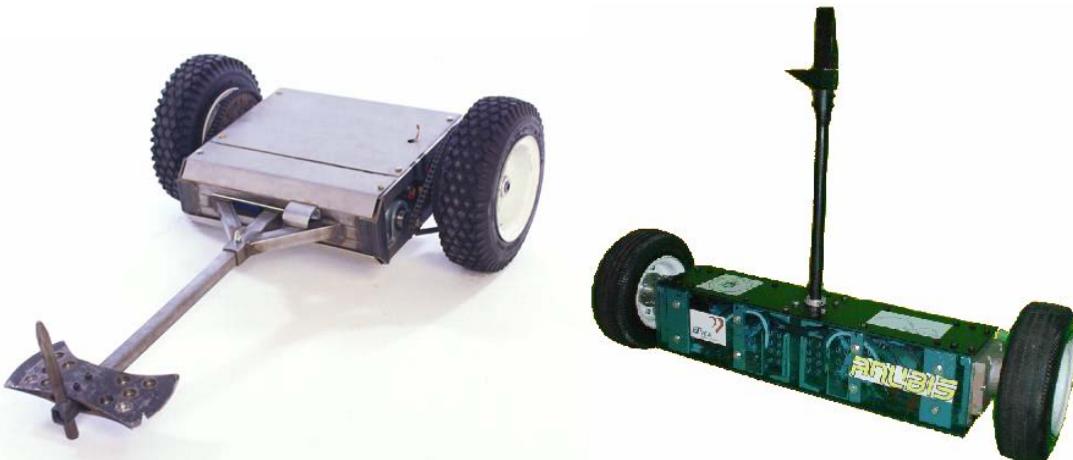


### 2.3.5. Thwacks

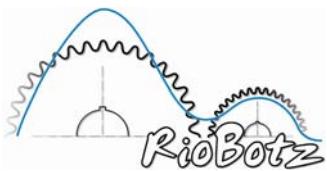


*Thwacks* são robôs de 2 rodas, normalmente inversíveis, que giram toda a sua estrutura no mesmo lugar em alta velocidade. Possuem pelo menos uma haste longa com um martelo, machado, ou alguma arma perfurante. Usam a energia dos próprios motores das rodas para acionar a arma, sobrando mais peso para a sua armadura. Suas rodas precisam ser estreitas, diminuindo o efeito de escorregamento que rodas largas sofreriam em curvas de raio pequeno. As rodas, além de estreitas, precisam estar próximas. Quanto mais próximas entre si, mais rápida será a velocidade final de rotação do robô, em compensação mais lenta será a aceleração e mais difícil será andar em linha reta caso necessário. Os motores precisam ter alta rotação final. Seu principal problema é que eles não são capazes de se mover para perseguir o adversário enquanto estiverem girando. Poucos *thwacks* conseguiram desenvolver um sistema mecânico ou eletrônico com essa finalidade.

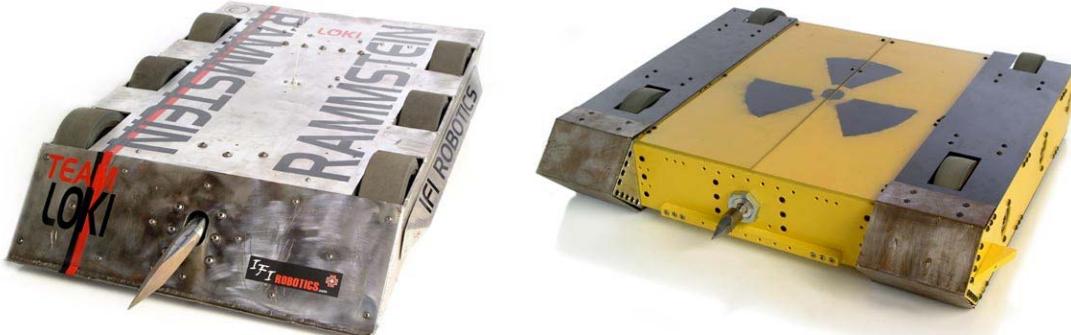
### 2.3.6. Overhead Thwacks



*Overhead thwacks* atacam com sua arma/haste por cima, ao invés de pelos lados como os *thwacks*. Possuem 2 rodas e uma haste longa, que gira por sobre o robô quando os motores das rodas são revertidos, atacando o adversário por cima. Neles é importante que os motores possuam alto torque, pois a arma só tem 180 graus de curso para adquirir sua velocidade máxima. Ao contrário dos *thwacks*, as rodas devem ficar bem afastadas entre si para ajudá-lo a andar em linha reta e aumentar a precisão do ataque, e devem ser largas para maximizar a tração. O centro de massa do robô precisa estar muito próximo da linha dos eixos das rodas para garantir que ele consiga virar a haste e atacar. São bons contra *rammers*, *wedges* e *lifters*.

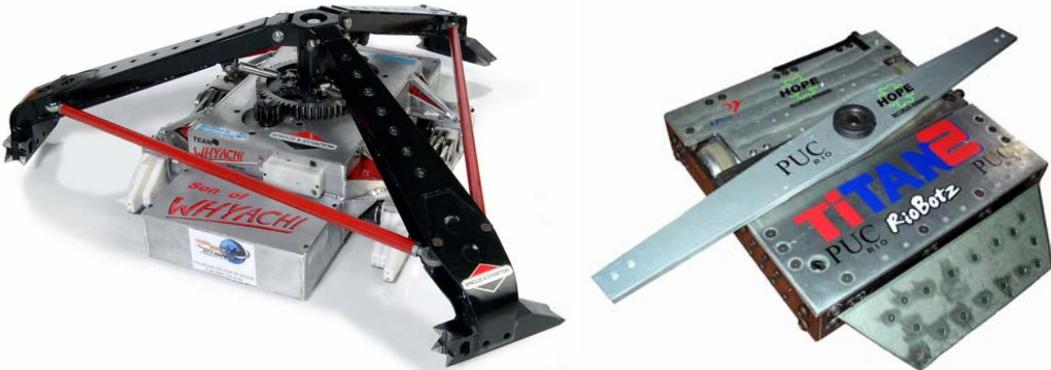


### 2.3.7. Spears

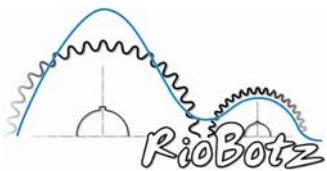


*Spears* possuem uma lança penetrante longa e fina, normalmente acionada pneumáticamente, tentando penetrar nas paredes da armadura do adversário e danificar componentes internos vitais. A lança precisa ser resistente, afiada, e atingir a maior velocidade possível. Um pouco de conicidade na lança evita que fique presa nos adversários. Costumam ter 6 rodas, para garantir alta tração, necessária para que o robô não mova demais para trás no instante do ataque. São pouco eficientes, exceto contra robôs com armaduras laterais finas ou com peças vitais que precisam ficar expostas. Alguns robôs tentaram implementar ataques com projéteis presos (projéteis são proibidos a não ser que estejam presos por um cabo), mas acabaram convergindo para o projeto dos *spears*.

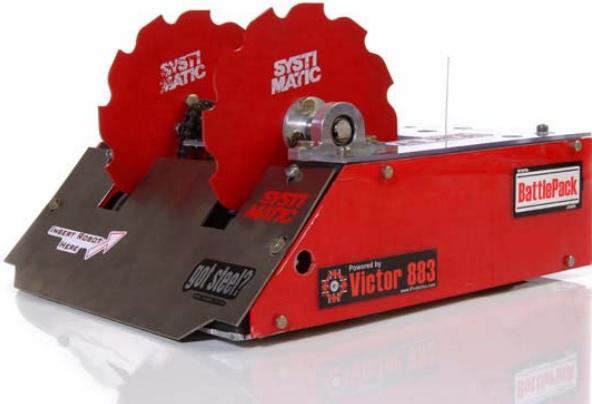
### 2.3.8. Spinners



*Spinners* são os robôs mais destrutivos que existem, são os maiores predadores. Possuem uma lâmina, disco ou concha giratória que gira em alta velocidade. Os *shell spinners* (como o robô *Megabyte*) giram toda a sua armadura, sendo capazes de armazenar alta energia cinética. Em geral é impossível que os adversários os acertem sem serem atingidos pela arma. A lâmina precisa girar o mais rápido possível, e deve acelerar até uma velocidade que já cause grande dano em menos de 4 segundos. *Spinners* que demoram mais de 8 segundos acelerando podem nunca ter chance de danificar um adversário resistente e agressivo. Eles precisam ser rápidos para poderem fugir do adversário enquanto aceleram a arma. Seu maior problema é que em geral não são inversíveis, contando com a sorte para se desvirarem, como no caso do *Megabyte*. Para contornar isso, alguns *spinners* como o *The Mortician* e o *Crap* deslocaram a sua lâmina à frente, permitindo que funcionem invertidos. Em compensação, o robô acaba com dimensões muito grandes, prejudicando sua resistência, sua traseira fica desprotegida de ataques, e o centro de gravidade do robô fica muito à frente das 2 rodas, prejudicando a tração.

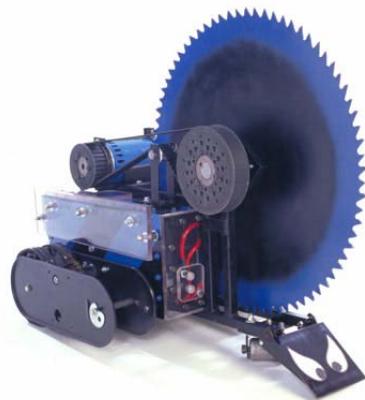


### 2.3.9. Saws

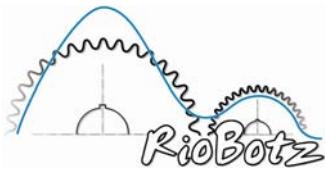


*Saws* possuem serras abrasivas ou com dentes, acionadas por um motor potente. São em geral combinadas com *designs* de outros tipos de robôs, por exemplo *wedge-saws* (rampas com serras). As serras costumam ter pouca eficiência para cortar através do adversário, em especial se ele estiver tentando escapar. Conseguem atravessar folhas de metal e Lexan, mas dificilmente conseguem cortar placas de metal durante uma luta. Sua maior vantagem é o dano estético que causa, gerando uma chuva de faíscas, arranhões e cortes rasos, que podem impressionar alguns juízes e garantir a vitória em uma luta empatada. Serras que giram de modo a levantar o adversário possuem alto risco de agarrarem e quebrarem ou amassarem. Serras que giram para baixo diminuem o problema de agarrar e mantêm o adversário preso durante o corte, porém aumentam a chance de auto-capotagem.

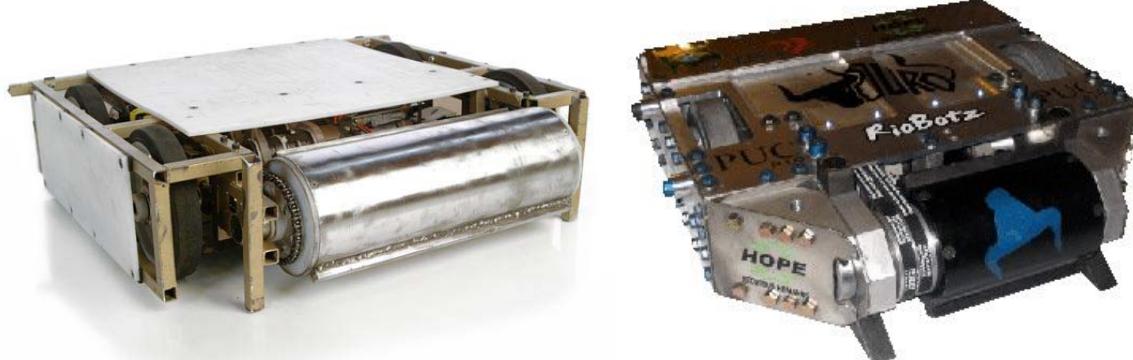
### 2.3.10. Vertical Spinners



*Vertical spinners* são a versão anabolizada dos *saws*. Ao contrário dos *saws*, em geral usam discos de grande diâmetro e com apenas 2 dentes, ou então barras girando em um plano vertical. O dano é causado pelo impacto e pelo arremesso do adversário para o alto. Precisam ter uma base larga para que não tombem ao fazer uma curva devido ao efeito giroscópico da arma (vide capítulo 5). A força do impacto é transmitida para o solo, e não lateralmente como nos *spinners*, permitindo que ele não seja arremessado durante o próprio impacto. Suas desvantagens são: laterais e traseiras expostas, e dificuldade em fazer curvas rapidamente devido ao efeito giroscópico. Costumam ter problemas contra *wedges* bem baixos e *rammers* resistentes. As lutas contra *spinners* costumam ser extremamente violentas e rápidas, sem haver um favoritismo.



### 2.3.11. Drums

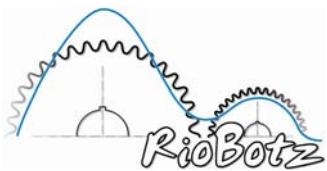


*Drums* possuem um tambor (cilindro) giratório com dentes, em geral acionado por correntes ou correias, e montado horizontalmente na frente do robô. Normalmente giram de modo a levantar o adversário, capotando-o ou causando danos no impacto com a arma ou na queda no solo. *Drums* são versões mais compactas dos *vertical spinners*, com menos momento de inércia na arma, o que permite um menor tempo de aceleração do tambor, no entanto causando menos danos ao adversário. São mais estáveis por possuirem baixo centro de gravidade, podem ser inversíveis, e fazem curvas mais facilmente que os *vertical spinners* devido ao menor efeito giroscópico (vide capítulo 5). Tambores mais largos permitem atingir o adversário sem precisarem estar perfeitamente alinhados com ele. O tempo de aceleração do tambor deve ser de no máximo 4 segundos. Seus piores inimigos são robôs muito resistentes, bem blindados e inversíveis.

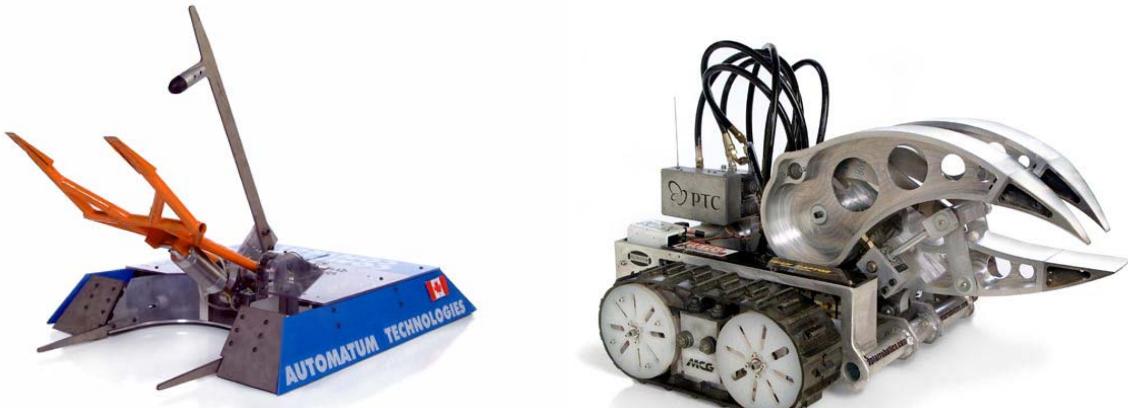
### 2.3.12. Hammers



*Hammers* são robôs, normalmente de 4 rodas, com martelos ou machados que atingem o topo dos adversários. Seus ataques se parecem com os dos *overhead thwacks*, no entanto o acionamento da arma é independente das rodas. A arma pode ser acionada repetida e rapidamente, e normalmente é atuada pneumáticamente para adquirir velocidade suficiente em apenas 180 graus de curso. A arma costuma funcionar como um mecanismo para desvirar o próprio robô. É muito eficiente contra robôs que possuam armaduras pouco resistentes em seu topo. *Hammers* potentes costumam levar vantagem sobre *rammers*, *wedges*, *thwacks* e *saws*. Seus piores inimigos são os *spinners*.

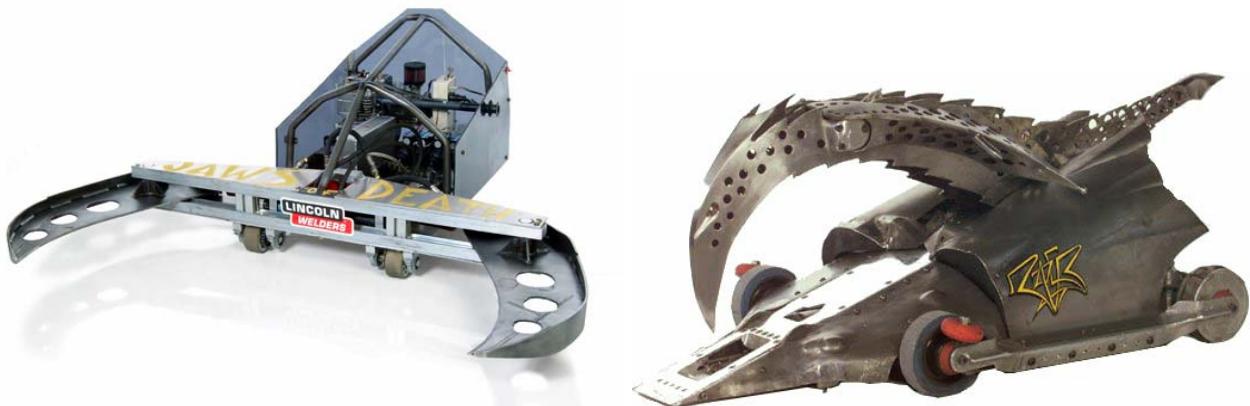


### 2.3.13. Clampers

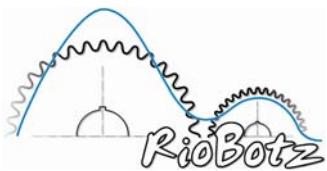


*Clampers* são robôs capazes de segurar e levantar um adversário, e carregá-lo para fora das bordas da arena. Normalmente são acionados pneumáticamente (mais rápidos) ou por um sistema elétrico com grande redução (mais lentos). Seu projeto se assemelha ao dos *lifters*, onde o peso do robô deve ser deslocado para trás para evitar que tombe ao içar o adversário. *Clampers* precisam ser rápidos para alcançar seus oponentes antes que fujam de suas garras. São bons contra *rammers*, *wedges* e *thwacks*. Os *hammers* devem ser agarrados pelos lados, para evitar que sofra repetidas marteladas enquanto o segura.

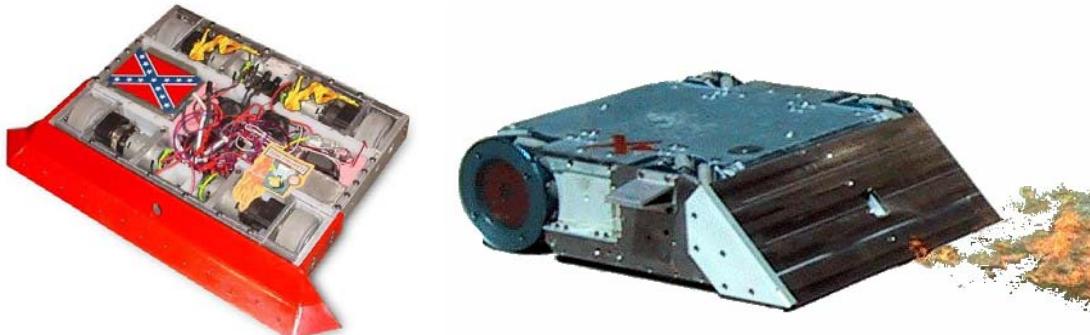
### 2.3.14. Crushers



*Crushers* são robôs com pinças ou garras hidráulicas capazes de perfurar e esmagar o adversário vagarosamente. As pinças precisam ter pontas alongadas para penetrar eficientemente, e precisam ter um curso longo para serem capazes de acomodar um adversário de grandes dimensões. Sua principal vantagem é que, uma vez tendo conseguido agarrar o adversário, este normalmente não consegue escapar e a luta termina. *Crushers* precisam ser acionados hidraulicamente para conseguirem gerar forças suficientes para o esmagamento, o que os torna bastante complexos e pesados, sobrando pouco peso para a locomoção. Normalmente são *heavyweights* ou *super-heavyweights*. Robôs mais sofisticados usam um sistema hidráulico em 2 estágios, o primeiro sendo rápido para segurar o adversário, e o segundo mais lento mas com alta pressão para esmagá-lo.

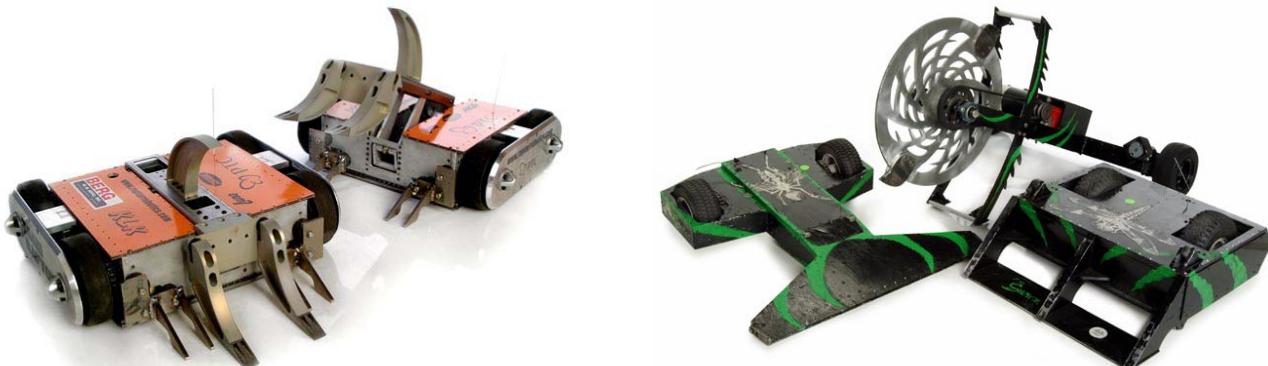


### 2.3.15. Flamethrowers

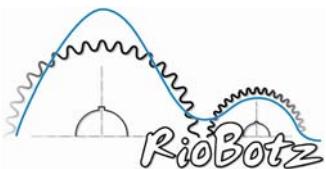


Recentemente algumas competições permitiram os *flamethrowers*, robôs com lança-chamas. Normalmente os lança-chamas são usados em conjunto com outras armas, como *wedges*. Seu efeito é mais visual, contando pontos com alguns juízes. Porém são ineficientes pois normalmente os robôs são à prova de fogo, exceto se sua eletrônica estiver exposta ou alguma roda for inflamável.

### 2.3.16. Multibots



*Multibots* são robôs compostos de 2 ou mais sub-robôs, cujos pesos somados não podem ultrapassar o limite da categoria. A maioria das competições adota a regra que diz que é preciso desabilitar 50% ou mais (em peso) do robô para vencer um round. Usar 2 sub-robôs é portanto arriscado, pois basta que aquele um pouco mais pesado seja desabilitado para perder. Por esse motivo, muitos *multibots* usam 3 robôs de pesos similares, obrigando o adversário a desabilitar 2 deles para vencer. Pode-se usar por exemplo 3 *middleweights*, emagrecendo um deles para 100lb, para competir como um único *multibot super-heavyweight* ( $120 + 120 + 100 = 340$ lb). Da mesma forma que várias armas pequenas costumam ser menos eficientes do que uma grande, *multibots* costumam ter pouca vantagem sobre os adversários, a menos que o ataque (feito por 2 ou mais pilotos) seja muito bem coordenado. Na prática é difícil coordenar um ataque simultâneo, o adversário acaba desabilitando os *multibots* um a um (em geral partindo para cima do menor dos 3 logo no início do round). Outra técnica é usar, por exemplo, um robô principal com cerca de 90% do peso da categoria e outros 2 pequenos com 5% cada, que servem como distração para o adversário. Na prática, os pequenos são ignorados e o adversário parte para cima do robô principal (o *multibot* Chiabot usava 1 robô pequeno como distração, mas não teve muito sucesso). Uma idéia é usar um enxame de micro-robôs autônomos, que escalariam o adversário e entrariam em sua carcaça destruindo-o por dentro. Mas ainda são ficção científica, como os Sentinelas do *Matrix* e os *Buzz Droids* de *Star Wars*.



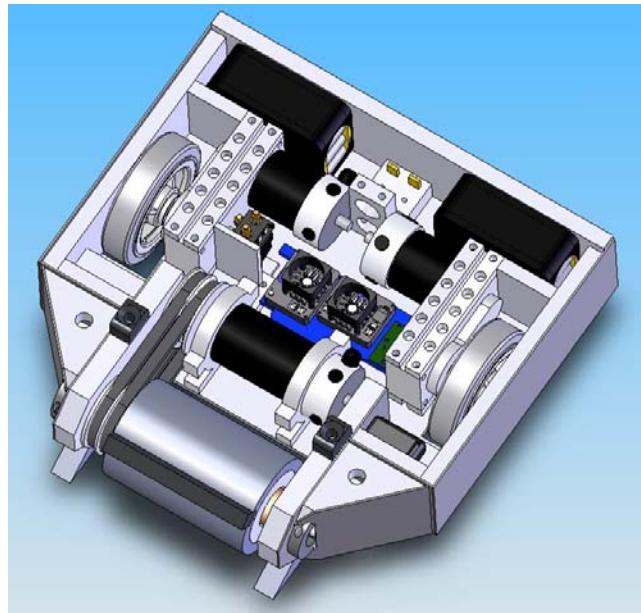
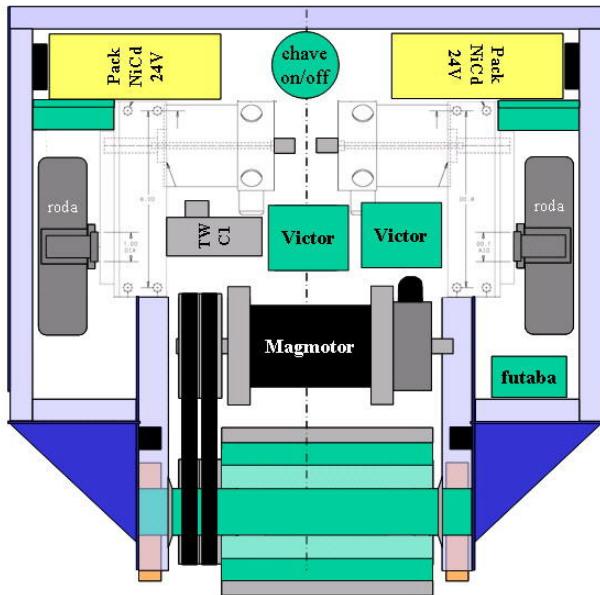
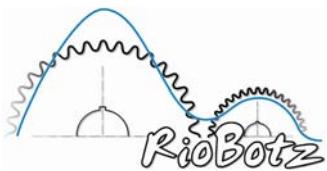
## 2.4. Etapas do Projeto

Após escolher a classe de peso e tipo do robô, a primeira preocupação é com o seu custo. Um robô *middleweight*, para ser competitivo internacionalmente, tem um custo mínimo de cerca de US\$4.000, incluindo o rádio controle. Isso não quer dizer que não é possível ganhar uma competição internacional com um robô bem menos caro, tudo depende da criatividade, mas estatisticamente esse é um número razoável. A recíproca também é verdadeira, não há nenhuma garantia de que um robô caro irá ganhar uma competição. O robô *Doom On You* (foto ao lado), todo feito em peças de titânio fresado, custou cerca de US\$30.000, e no entanto não obteve o sucesso esperado, provavelmente por falha de projeto – muito peso foi investido na estrutura/armadura, sobrando pouco para a arma, uma pequena lâmina giratória. De qualquer forma, infelizmente este não é um esporte barato, porém para muitos patrocinadores este valor é baixo se comparado com o que usualmente se investe em outros esportes.



A seguir é fundamental fazer uma estimativa de peso do robô. Se somados todos os motores, rodas, estrutura, armas e baterias ele passar muito de 55kg (no caso de um *middleweight*), isso significa que é preciso diminuir a escala do robô ou usar componentes mais leves. Para distribuir bem o peso do robô, uma dica muito útil é usar a regra 30-30-25-15: 30% do peso do robô deve ser gasto no sistema de locomoção (motores, transmissões e rodas), 30% nas armas (arma, motor, transmissão), 25% na estrutura e armadura, e 15% nas baterias e eletrônica. É claro que esses números podem variar bastante dependendo do tipo do robô, mas são valores médios representativos.

Faça então um esboço do robô. Ao projetá-lo, tenha sempre em mente o princípio conhecido como KISS: *Keep It Simple, Stupid!* Ou seja, não complique demais o seu projeto sem necessidade, elabore o robô da forma mais simples possível – mas nunca mais simples que isso. Os esboços podem ser feitos de qualquer modo, à mão, em programa de CAD, ou de qualquer forma que seja rápido de alterar e compartilhar com todos os membros da equipe. O primeiro esboço do Touro foi feito, acreditem se quiser, em *Powerpoint*, vejam a figura abaixo à esquerda. É um programa que toda a equipe tem em qualquer micro, seja em casa, na universidade ou no estágio, ao contrário de programas de CAD, que por causa de licenças ficam limitados a poucos micros. Assim todos podem pensar em melhorias no projeto do robô em qualquer lugar, em qualquer micro. Se você tiver acesso a programas de CAD como *Solidworks* ou *Rhino3D*, eles serão muito úteis para se ter uma noção do robô em 3D, vide a figura abaixo à direita (feita em *Solidworks*).

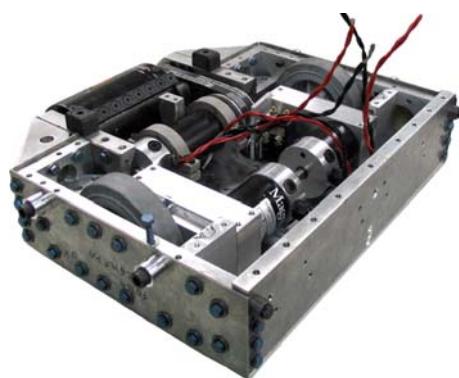


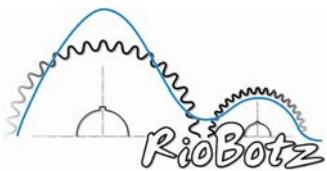
Durante o projeto, é preciso ter em mente que partes frágeis como a eletrônica devem ficar bem para dentro do robô, para se protegerem de armas cortantes. O robô deve ser também o mais compacto possível, para que sua estrutura externa possa ter maior espessura sem ultrapassar o limite de peso. Mas não se esqueça de que robôs compactos demais são difíceis de se lidar num *pitstop*, as peças a serem trocadas ficam pouco acessíveis, é preciso usar o bom senso.

Quanto à estrutura do robô, os três principais tipos são: os treliçados, os integrados e os *unibody*. Os treliçados (figura ao lado) são formados por diversas barras, em geral soldadas entre si, formando uma estrutura muito rígida em forma de treliça. A armadura é composta de diversas placas, que são em geral aparafusadas nas treliças, às vezes usando-se coxins (vide capítulo 4) para prover amortecimento contra armas de impacto. Eles são os mais rápidos de construir, basta usar uma serra e um aparelho de solda para cortar e soldar as barras. Também são fáceis de lidar durante o *pitstop*, pois se uma das placas for danificada é fácil desaparafusá-la e trocar por outra. A maior desvantagem é ter que depender das soldas, que são em geral o ponto fraco. Além disso, as placas da armadura são propensas a serem arrancadas em combate.

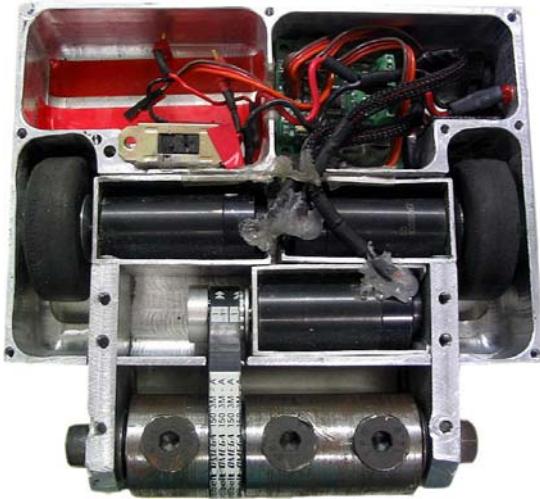


Os robôs integrados (figura ao lado) recebem esse nome porque a estrutura e a armadura são integradas em um único conjunto, usando parafusos ou soldas. As mesmas placas que servem como armadura são aquelas onde os componentes internos são montados. Às vezes há uma camada de armadura, normalmente mais fina, sobreposta à estrutura integrada. O projeto destes robôs é trabalhoso, no entanto eles costumam gerar sistemas muito compactos e resistentes.



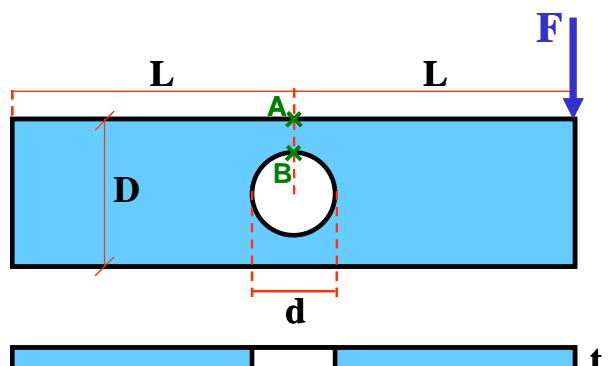


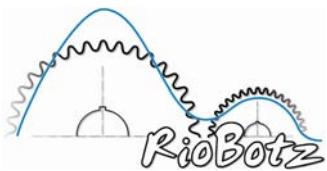
Os *unibody* (figura ao lado) são robôs com estrutura feita a partir de uma peça única maciça. Um bloco maciço é fresado, formando as paredes, o fundo, e os compartimentos para encaixar baterias, motores, etc. Com isso não é necessário soldar ou usar parafusos na estrutura, exceto para instalar os componentes e para prender a tampa superior. Estes são os robôs mais leves e resistentes. No entanto, você perde cerca de 80 a 90% do bloco maciço para “esculpir” o seu interior, sem contar as horas (ou dias) ocupando a fresadora. O custo e o desperdício são tão altos que só valem a pena para robôs *beetleweight* ou mais leves. Outra desvantagem é que não há como trocar apenas uma parte danificada da estrutura, como é feito nas placas dos treliçados. Se o dano for grande, é preciso construir um *unibody* inteiramente novo.



Após os primeiros esboços, é necessário fazer uma **análise de tensões** (mecânicas) para calcular a resistência de cada componente do robô. Esse assunto é muito vasto e foge do escopo desse tutorial, mas há uma boa referência sobre o assunto na bibliografia e uma revisão com exemplos no apêndice. Cursos de mecânica dos sólidos e resistência dos materiais abordam esse tema. Ele consiste basicamente em calcular os esforços de tração, flexão, torção e cisalhamento na estrutura e nos componentes do robô, incluindo os fatores de concentração de tensão dos entalhes (como furos, mudanças bruscas de geometria), e combinando-os para obter uma tensão mecânica equivalente, normalmente a tensão de Mises ou Tresca. Com a tensão equivalente é possível projetar as peças contra escoamento (plastificação), ruptura, colapso plástico, fadiga, etc. Softwares de elementos finitos (como Abaqus, Ansys, Nastran, Adina) podem ser usados para auxiliar no cálculo numérico da resistência do robô, a maioria deles é capaz de importar os desenhos diretamente de programas de CAD. A licença destes programas é cara, porém eles não são imprescindíveis. Com um pouco de bom senso e experiência dá para fazer “na mão” todas as análises de tensões, de forma aproximada, mas com precisão suficiente para o projeto.

Por exemplo, não é difícil projetar a lâmina de um *spinner* usando princípios básicos de análise de tensões. Considere a lâmina da figura ao lado, uma barra de aço temperado de comprimento  $2L$ , largura  $D$  e espessura  $t$ , com um furo central de diâmetro  $d$ . No instante do impacto, uma força  $F$  é sofrida por ela em seu lado direito. Vamos assumir que a lâmina se comporta como uma viga engastada na região do furo (devido à simetria da lâmina e à inércia da metade esquerda). A tensão que o material sofre no ponto A (vide figura) devido à flexão dessa viga é  $\sigma_A = 6 \cdot F \cdot L \cdot D / [(D^3 - d^3) \cdot t]$ . A tensão no ponto B teoricamente seria menor que em A, no entanto o furo é um concentrador de tensões. Ele amplifica as tensões próximas de sua borda. No exemplo acima, ele multiplica sua





tensão por 2, ou seja, seu fator de concentração de tensões é 2 (esse valor é obtido de tabelas específicas, vide a bibliografia deste tutorial). Assim,  $\sigma_B = 2 \times F \cdot L \cdot d / [(D^3 - d^3) \cdot t]$ .

Se  $\sigma_A > \sigma_B$ , então se a lâmina quebrar ela o fará de fora para dentro, começando a fraturar em A (onde a tensão é maior) e propagando bruscamente a trinca (fissura) até o ponto B, e em seguida a lâmina quebrará em duas metades porque o ligamento residual no outro lado do furo (região abaixo do furo na figura) irá ficar sobrecarregado e romperá. Tudo isso ocorre em uma fração de segundo (nos metais a fratura se propaga a cerca de 2 a 3km/s, logo uma lâmina típica de um *middleweight* levaria da ordem de 0,01ms para fraturar).

Por outro lado, se  $\sigma_B > \sigma_A$ , a lâmina quebrará de dentro para fora, começando a trinca em B e terminando em A. Essa foi a forma que a lâmina do nosso *spinner* Ciclone quebrou no Winter Challenge 2005, de B para A. Isso porque o diâmetro d do furo da lâmina do Ciclone era grande em relação à largura D, penalizando o ponto B.

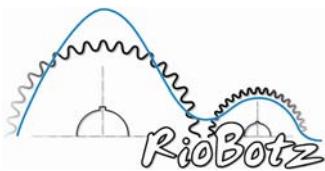
Um projeto ótimo seria fazer o ponto A tão resistente quanto o B. Assim, não haveria um ponto mais fraco isolado, a lâmina resistiria o máximo possível até romper quase que simultaneamente em A e B. Para isso, basta igualar  $\sigma_A = \sigma_B$ . Substituindo as equações acima concluimos que  $d = D/2$ . Assim, projete sua arma (e o eixo que vai suportá-la) de modo que o diâmetro do furo tenha metade da largura da lâmina. As lâminas do nosso *spinner* Titan passaram a usar essa relação ótima.

E qual força a arma suportaria? Considere, por exemplo,  $2L = 1000\text{mm}$ ,  $D = 80\text{mm}$ ,  $d = D/2 = 40\text{mm}$ , e a espessura  $t = 12\text{mm}$ . A lâmina de aço, cuja densidade em média é  $\rho = 7800\text{kg/m}^3$ , teria uma massa de, aproximadamente (sem descontar o furo),  $\rho \times 2L \times D \times t = 7800\text{kg/m}^3 \times 1\text{m} \times 0,080\text{m} \times 0,012\text{m} = 7,5\text{kg}$ , o que é um valor razoável para um *middleweight* (pela regra 30-30-25-15, um *middleweight* teria cerca de 16kg para a arma, sobrando nesse exemplo  $16 - 7,5 = 8,5\text{kg}$  para o eixo, rolamentos, transmissão e motor da arma, um valor também razoável). Um aço temperado de dureza 45 Rockwell C (unidade que mede o quanto duro é o material, veja o capítulo 3) tolera uma tensão máxima antes de romper de cerca de  $34 \times 45 = 1530\text{N/mm}^2$  (esse fator 34 só vale para aços, e estima bem a resistência à ruptura a partir da dureza em Rockwell C). Assim igualamos as tensões em A e B à resistência  $1530\text{N/mm}^2$ ,  $\sigma_A = \sigma_B = 6 \cdot F \cdot L \cdot D / [(D^3 - d^3) \cdot t] = 1530$ , resultando em  $F = 1530[(D^3 - d^3) \cdot t] / (6 \cdot L \cdot D) = 1530[(80^3 - 40^3) \cdot 12] / (6 \cdot 500 \cdot 80) = 34272\text{N}$ , o equivalente a quase 3,5 toneladas! Agora é preciso garantir que o eixo da arma e o restante do robô tolerem essas 3,5 toneladas, isso pode ser feito usando a mesma filosofia empregada acima, fazendo uma simples análise de tensões. Contas aproximadas podem ser muito eficientes se houver bom senso e alguma familiaridade com o assunto.

Durante o projeto do robô, construir uma maquete também é útil.

Já fizemos maquetes de vários robôs, e de componentes que ainda não tínhamos, usando isopor pluma (vide o motor Etek e seu suporte ao lado, feitos de isopor, papelão, e um *snorkel* velho!). Elas garantem que a sua mão vai caber em todas as partes do robô na hora do *pitstop*. Infelizmente o *Solidworks* não permite (ainda) que você entre com a mão dentro do monitor. Sempre refaça as contas do peso do robô, eles tendem a engordar sem você perceber.



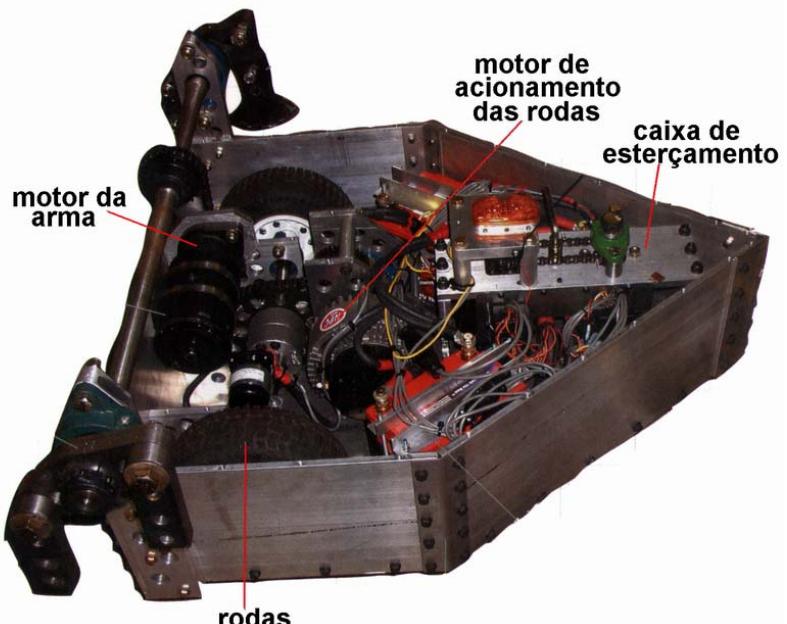


Em seguida vem a construção em si, e finalmente a parte que todo mundo (inclusive nós) se esquece: os testes. Quase sempre se termina o robô em cima da hora e não dá tempo de testar. Isso é fatal, pois muitos dos problemas vão aparecer justamente no meio de um round e deixar seu robô parado no meio da arena. Com alguns testes eles poderiam ter sido evitados. Além disso, nos testes o piloto adquire experiência em pilotar aquele robô específico, o que pode fazer toda a diferença num round.

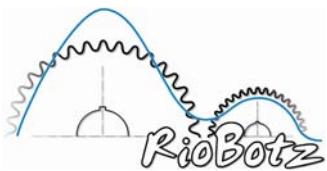
## 2.5. Sistema de Locomoção

O sistema de locomoção é muito importante no projeto. Os 3 tipos básicos são: rodas, esteiras e pernas. Pernas são complexas e frágeis. Esteiras (ou lagartas) são bonitas e possuem excelente tração, porém gastam muita energia fazendo curvas, devido ao atrito com o solo, e fazem curvas vagarosamente, o que permite que o seu adversário dê a volta e o pegue por trás. Além disso, esteiras costumam ser arrancadas facilmente por adversários com armas potentes. A comunidade internacional convergiu para a solução das rodas.

Há duas principais formas de se acionar veículos com rodas: direção tipo Ackerman ou tipo tanque. Ackerman é a forma adotada nos automóveis: um grande motor é usado na propulsão para frente ou ré, e outro menor muda a orientação das rodas frontais para fazer curvas (esterçamento). Essa forma é eficiente para altas velocidades, pois é fácil andar em linha reta, no entanto exige muitas manobras para que o robô gire em torno de seu próprio eixo. Além disso, o sistema de esterçamento costuma ser um ponto fraco do robô, ele precisa ser muito robusto, e consequentemente pesado. A figura ao lado mostra um dos raros robôs de combate com direção tipo Ackerman. Ele usa um único potente motor Etek para acionar as rodas ativas. E uma caixa de esterçamento, acionada por um pequeno motor, muda a direção de uma roda passiva.



A direção tipo tanque recebe esse nome por ser usada nos tanques de guerra. Nela todo o lado esquerdo do robô é acionado de forma independente do lado direito. Para andar em linha reta, é preciso que ambos os lados tenham a mesma velocidade, o que nem sempre é fácil de ser obtido. As curvas são feitas quando essas velocidades são diferentes. A grande vantagem desse método é que



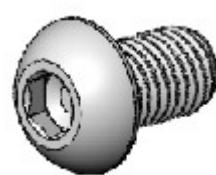
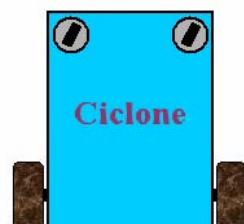
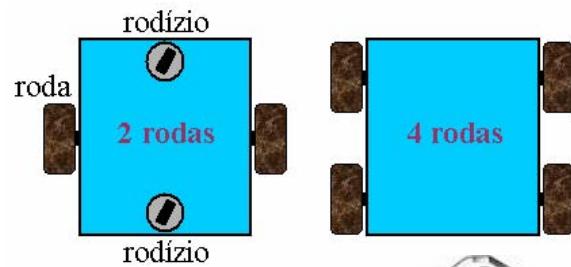
se a velocidade de um lado for contrária e de mesma intensidade que a do outro, o robô gira em torno de seu próprio eixo. Isso é perfeito para se manter sempre de frente a um adversário.

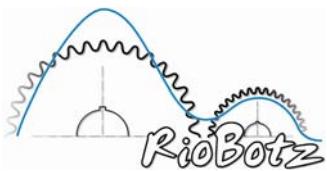
As duas opções mais comuns, em direção tipo tanque, são usar 2 ou 4 rodas ativas (acionadas por motores), veja a figura ao lado. Com 2 rodas ativas é possível fazer curvas muito rápidas e com menos gasto de energia, e perde-se peso ao se utilizar apenas dois conjuntos de eixos, rolamentos e rodas.

Com apenas 2 rodas ativas o robô precisará de pelo menos mais 1 apoio no chão, idealmente 2, o que usualmente é feito com o uso de esferas deslizantes ou rodízios (figuras ao lado). Tente colocar as 2 rodas ativas nas laterais perto do centro de gravidade do robô, e os rodízios ou esferas na frente e na traseira do robô, formando uma configuração em cruz (vide a figura anterior). Com isso você garante que quase toda a força normal do solo vai para as 2 rodas ativas, que é onde você precisa de tração. O robô Ciclone, por falta de espaço, não pode usar essa configuração em cruz. Com isso, as 2 rodas ativas ficaram na traseira, suportando apenas metade do peso do robô, prejudicando a tração (figura ao lado). Mas deve-se tomar cuidado com a configuração em cruz para que os rodízios não levantem as rodas ativas do chão, em especial em uma arena desnívelada. Para isso, muitos robôs de 2 rodas com configuração em cruz têm seus rodízios em um plano alguns milímetros mais alto do que o das rodas ativas, ou então usam molas nos rodízios para funcionarem como uma suspensão.

Uma desvantagem de usar apenas 2 rodas é que fica mais difícil andar em linha reta. Muitos motores possuem avanço de fase, o que faz com que girem mais rápido em uma direção, dificultando ainda mais andar em linha reta. Se possível, tente deixar neutra a fase do motor para que tenha o mesmo desempenho em ambas as direções (vide o capítulo 5), ou então se o rádio-controle for programável tente compensar através dos ajustes *trim* dos manches. Alguns robôs usam giroscópios para garantir que ele ande em linha reta, mais detalhes estão no capítulo 6. Se o seu robô continua com problemas em andar em linha reta, tente usar os rodízios fixos (figura ao lado) ao invés dos que mudam de direção (girando/pivotando). Você terá mais dificuldade em fazer curvas, mas o robô andará bem mais reto.

Em robôs com armas muito violentas, os rodízios podem não suportar as forças extremas transmitidas ao solo durante um impacto contra o adversário (que podem facilmente passar de algumas toneladas em *middleweights*). Nesse caso, você pode substituir os rodízios por, por exemplo, parafusos de 12mm com cabeça arredondada (figura ao lado), presos de cabeça para baixo no fundo do robô. A cabeça arredondada desliza muito bem no chão da arena, é a técnica que usamos no robô Titan. Use parafusos de aço temperado, os de classe alta (vide o capítulo





4), pois eles são mais duros e não se desgastam facilmente com o atrito com o chão da arena. Algumas equipes usam também peças largas de teflon para apoiarem no solo com menos atrito.

Outra opção é o uso de 4 rodas. Os robôs de 4 rodas andam melhor em linha reta, são bons contra *wedges* e *lifters* (pois em geral conseguem garantir pelo menos 2 rodas no chão para escaparem, mesmo se levantados), e possuem redundância caso algumas rodas sejam destruídas durante um round. Pilotos experientes, como o Matt do Team Plumb Crazy, ainda conseguem dirigir mesmo após 3 das 4 rodas terem sido arrancadas! Alguns robôs usam até 6 ou 8 rodas para maximizar a tração e aumentar a redundância. O problema de 4 ou mais rodas é o gasto de energia maior para fazer curvas, além de mais peso empregado nos motores, eixos, rolamentos, polias, coroas, etc. adicionais necessários.

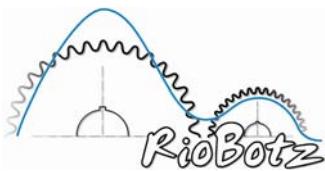
Quanto ao tipo de roda, alguns robôs usam rodas pneumáticas, no entanto elas são preenchidas internamente com espuma de poliuretano para que não furem ou fiquem murchas.

Outra boa solução é usar rodas sólidas. Nessas rodas, para maximizar a tração, é preciso ter uma camada externa de borracha com dureza em torno de 65 Shore A, e no máximo 75 Shore A. Rodas mais duras tendem a deslizar. Se a dureza da sua roda é medida em Shore D, provavelmente ela é dura demais. Muitos robôs norte-americanos, assim como o Touro e Titan, usam a roda Colson Performa (figura ao lado). Ela também é fabricada no Brasil pela Colson, e o custo é baixo: cada roda do nosso robô Touro saiu a apenas US\$6,50. Além do baixo preço, esse modelo Performa da Colson possui dureza 65 Shore A, a ideal para tração.



Um caso específico interessante foi o da competição Winter Challenge 2005, disputada sobre uma arena de gelo. Nesse caso, a dureza da roda é irrelevante, o importante é que haja pontas afiadas de metal para gerarem tração. O segredo de andar no gelo é saber que não é o atrito (muito baixo no caso) que gera tração, e sim as forças normais. A solução para o problema foi muito barata: prendemos vários parafusos auto-atarrachantes de cabeça chata fazendo ângulos de cerca de 60 graus em relação ao raio da roda (figura ao lado). As cabeças dos parafusos ainda foram afiadas para melhorar o resultado. Essas pontas afiadas geraram uma área de contato com o gelo muito pequena, deixando a pressão de contato muito alta. Essa pressão alta faz o gelo





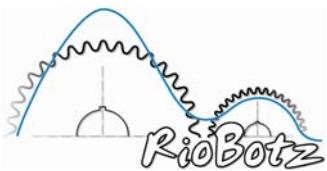
derreter localmente, permitindo que as pontas afundem ligeiramente e travem no sulco formado pelo degelo. Assim, quando o motor aciona as rodas, as pontas “fincadas” no gelo conseguem exercer no solo forças normais na horizontal, gerando tração sem deslizamento. A tração sobre o gelo chega a ser melhor do que a de uma roda comum sobre metal. Veja na foto que optamos por apenas uma fileira de parafusos: testes que fizemos com 2 fileiras geraram pior tração, pois com o dobro de parafusos para distribuirem a carga, a pressão sobre o gelo cai à metade, e eles “fincam” muito menos. Um parafuso bem fincado gera tração muito melhor do que dois parafusos fincados pela metade. Note também que intercalamos os ângulos de entrada dos parafusos, para garantir que na média a tração fosse idêntica em ambos os sentidos de giro da roda.

Outro caso específico é o da roda omni-direcional. Elas são usadas em robôs omni-direcionais, que podem se locomover de lado sem mudar a direção das rodas nem do robô. Essas rodas possuem vários roletes em sua periferia, que giram livremente (figura ao lado). As configurações mais comuns são 4 rodas paralelas, ou 3 rodas fazendo  $120^\circ$  entre si (ao lado). Os roletes fazem com que a roda só tenha tração na direção de seu movimento, ficando livre para ser movida perpendicularmente. Coordenando o movimento das 3 (ou 4) rodas, é possível andar de frente e de lado sem precisar girar o robô. No caso de 3 rodas a  $120^\circ$ , o controle do sistema omni-direcional não é tão simples de ser implementado, você precisa programar alguns cálculos envolvendo senos e cossenos. Uma solução pronta é o *OMX-3 Omni-Directional Mixer* (figura ao lado), uma pequena placa de US\$45 da Robot Logic ([www.robotlogic.com](http://www.robotlogic.com)) que faz todas essas contas para você. Esse sistema é excelente para competições de futebol de robôs: o robô atacante, com o domínio da bola, pode andar para o lado para driblar um adversário sem deixar de ficar apontado para o gol. Assim é possível chutar a gol imediatamente após o drible, sem perder tempo mudando de direção e fazendo curvas.

No entanto, em combate de robôs essa habilidade omni-direcional não é necessária, pois em um round você quer sim ficar apontado para o seu adversário. Ele é o seu gol. Andar de lado pode ser vantajoso para “dar um olé” quando o oponente atacar, mas o custo-benefício é alto: as rodas omni-direcionais possuem menor tração que as comuns, são menos eficientes (gastam mais energia), e os roletes não suportam impactos violentos.

Outro fator importante no projeto da locomoção é a localização do centro de massa do robô. Se ele estiver muito deslocado para a esquerda, por exemplo, as rodas deste lado receberão uma maior força normal do solo, e por isso terão melhor tração que as da direita, e o robô não andará em linha reta. Tente distribuir o peso por igual pelas rodas do robô. Além disso, para robôs de 2 rodas ativas, o ideal é que o centro de gravidade fique bem próximo do centro da linha que une as rodas. Nesse caso, cada roda receberá cerca de metade do peso do robô, garantindo boa tração. O Touro usa este





princípio. Como já discutimos acima, o Ciclone, por falta de opção, teve suas 2 rodas ativas colocadas muito atrás no robô, longe do centro de gravidade, e assim cada roda suporta apenas cerca de um quarto do peso total, o restante é suportado pelos apoios frontais. Com esse menor peso aplicado nas rodas, o Ciclone fica com menos tração e tende mais a deslizar.

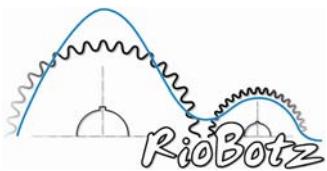
A distância entre o fundo do robô e o chão da arena também é importante, ela precisa ser grande o suficiente para evitar que ele fique preso em destroços ou em desniveis da arena. Mas também não pode ser grande demais, pois é importante manter o centro de gravidade do robô bem próximo ao solo para evitar que ele seja virado. Uma distância *mínima* sugerida para um *middleweight* é de cerca de 6mm.

## 2.6. Ferramentas

Os capítulos seguintes vão apresentar os diversos materiais e componentes para você construir o seu robô de combate. Mas para isso é desejável dispor de uma série de ferramentas. A seguir encontra-se uma lista ilustrada com tudo o que conseguimos lembrar que poderia ser útil na construção desses robôs. É claro que não é preciso dispor de toda a lista abaixo para construir um robô de combate.

### Mecânica

- proteção pessoal: óculos de proteção, máscara facial, luvas, abafador de ruído, kit de primeiros socorros;
- chaves: de fenda, de boca, phillips, allen (em L ou em T), soquete, inglesa, torquímetro;
- alicates: tipo agulha, de pressão, de corte, com junta deslizante, para retentor;
- fixação: grampos C, grampos tipo barra, morsas de bancada, morsas para furadeira;
- medição: paquímetro, micrômetro, régua de metal, fita métrica, esquadro de metal, transferidor;
- marcação: riscador, marcador de furos (punção) normal ou automático, marcador de centros (transferidor de furos ou de centros);
- corte: tesoura, estilete, canivete;
- furação: brocas, unibits (brocas de múltiplos diâmetros), rebaixadores, chanfradores, fresas, serras-copo, tira-rebarba;
- roscas: rosqueadores (machos), desandadores (vira-machos);
- ferramentas em geral: serras de arco, limas, martelos, saca-polias, nível, brocha de chaveta, bucha para brocha, espelho telescópico, ímã telescópico;
- para pesar o robô: dinamômetro, balança analógica ou digital;
- manuais: furadeira à bateria (de preferência 18V ou mais), serra tico-tico, dremel, esmerilhadeira, lixadeira orbital, lixadeira de bancada (de disco), serra circular;



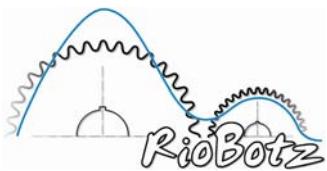
- de grande porte: torno, fresadora, furadeira de bancada, serra de fita, policorte (com disco abrasivo), esmeril, lixadeira de fita, guilhotina (para chapas finas), sistemas CNC, sistemas de corte a jato d'água ou plasma;
- aparelho de solda oxiacetileno, MIG e TIG;
- compressor de ar com pistola (para limpeza);
- aspirador de pó (rebarbas de metal podem causar curtos na eletrônica).

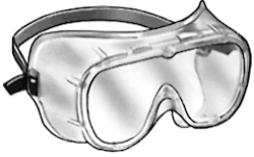
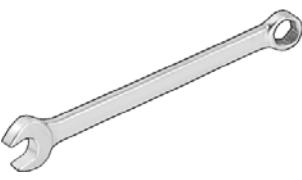
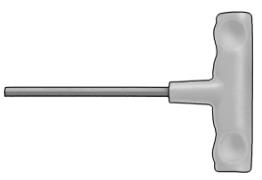
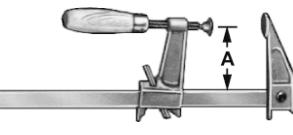
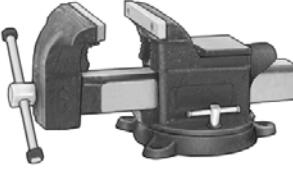
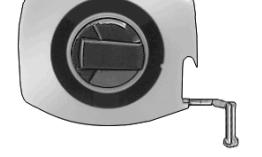
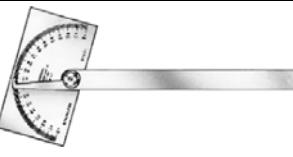
## Elétrica/Eletrônica

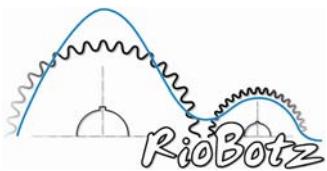
- alicates: de corte, de agulha, para prensar conectores (*crimper*);
- desencapador de fios;
- ferro de solda e suporte com esponja;
- sugador de solda;
- pinça;
- lupa;
- suporte de placas;
- estilete;
- multímetro;
- fonte;
- osciloscópio;
- carregador de bateria;
- pistola de ar quente (para termo-retráteis);
- pistola de cola quente.

## Fluidos

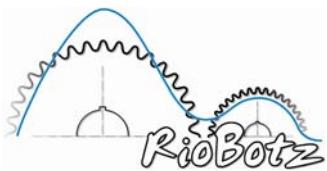
- WD-40 (lubrificante, pode ser usado para cortar, furar e rosquear);
- cera (para lubrificar discos de corte);
- trava-roscas (Loctite 242, evita que um parafuso se solte);
- trava-rolamentos (Loctite 601, prende bem um rolamento em seu suporte);
- epóxi profissional (o de 24 horas, bom para colar em metal);
- álcool e acetona (limpeza de metal antes de aplicar epóxi);
- azul de metileno (para pintar as peças e depois marcar furos ou desenhar sobre elas);
- líquido penetrante (para inspecionar a presença de trincas/fissuras em componentes);
- spray adesivo (3M Spray 77, você pode imprimir em escala real em papel um padrão de furação feito em CAD, colá-lo diretamente na peça com o spray, para em seguida marcar os furos com um punção e furá-la);
- solvente cítrico (tira-grude);
- pasta de solda e fita isolante líquida.

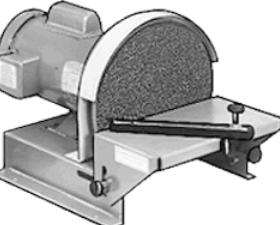
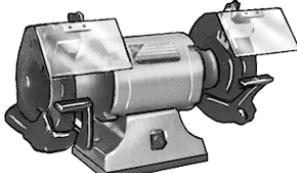
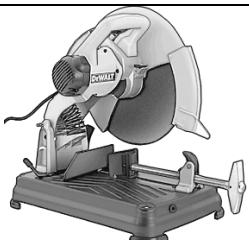
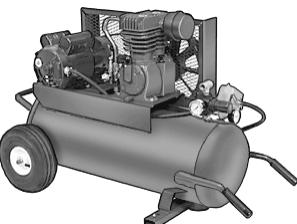
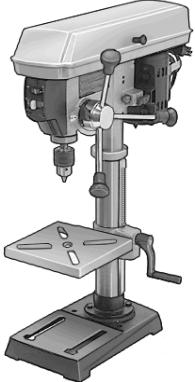
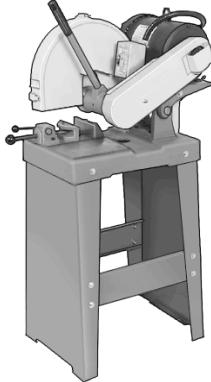
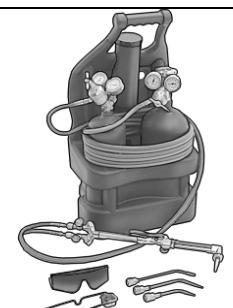


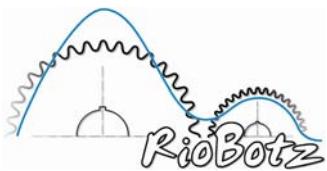


chanfrador	rebaixador	fresa	serra-copo
rosqueador	desandador	serra arco	lima
espelho telescópico	ímã telescópico	torquímetro	pistola de ar
alicate para retentor	nível	brocha de chaveta	bucha para brocha
tesoura	estilete	canivete	tira-rebarba
martelo	saca-polia	dinamômetro	balança digital
furadeira à bateria	serra tico-tico	dremel	esmerilhadeira



			
lixadeira de fita	lixadeira orbital	lixadeira de bancada	esmeril
			
guilhotina	serra circular	compressor de ar	aspirador de pó
			
furadeira de bancada	fresadora	serra de fita	policorte
			
torno	oxiacetileno (solda)	aparelho de solda MIG	aparelho de solda TIG
			
serra horizontal	corte a plasma	corte a jato d'água	sistema CNC

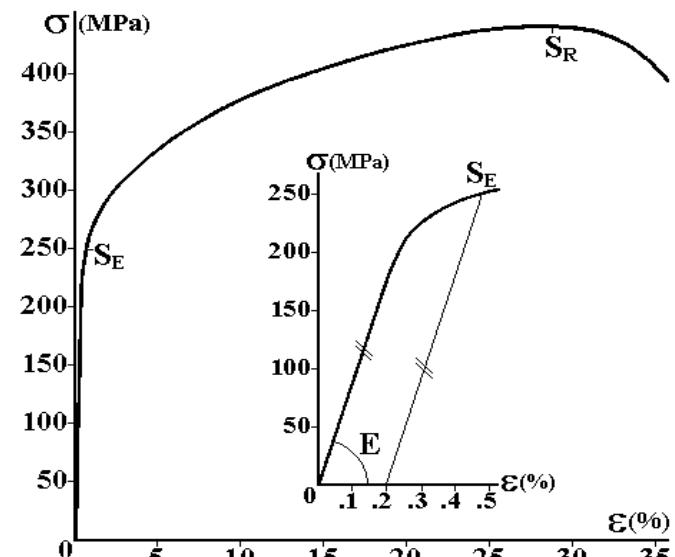
alicate de corte	alicate agulha	crimper	desencapador de fios
ferro de solda	suporte com esponja	sugador de solda	pinça
multímetro	fonte	osciloscópio	carregador de baterias
suporte de placas	lupa	pistola de ar quente	pistola de cola quente
Loctite 242	epóxi profissional	azul de metileno	líquido penetrante



### 3. Materiais

A escolha de materiais é um passo importante para garantir a resistência do robô sem ultrapassar seu peso limite. Escolher dentre os quase 100 mil materiais existentes não é uma tarefa simples, e para isso é preciso conhecer suas propriedades mecânicas. Essas propriedades quantificam as diversas respostas do material a carregamentos nele impostos. Esses carregamentos geram tensões, denominadas  $\sigma$ , que são a força aplicada ao material por unidade de área (similar a pressões), medidas usualmente em MPa ( $1\text{MPa} = 1\text{N/mm}^2$ ), e deformações, denominadas  $\epsilon$ , que são uma medida de quanto o material se alongou ou contraiu. As principais propriedades mecânicas podem ser obtidas a partir da curva tensão-deformação.

O gráfico pequeno ao centro da figura ao lado mostra a curva tensão-deformação de um material sob  $\epsilon$  pequenos – no exemplo, menores que 0,5% (ele é um *zoom* do gráfico grande, na região próxima da origem). Repare que inicialmente o material tem comportamento linear elástico, ou seja, a relação entre  $\sigma$  e  $\epsilon$  é uma linha reta. A **rigidez** do material é quantificada pelo módulo de elasticidade  $E$ , ou módulo de Young, que é igual à inclinação desta reta (vide figura). Quanto maior a inclinação, mais rígido é o material.

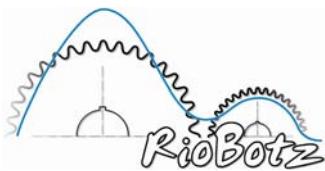


Ao aplicar cargas cada vez maiores, o gráfico deixa de ser uma reta e começa a se curvar. Isso ocorre quando o material começa a escoar, plastificar, “amassar”, sofrer deformações permanentes. Quando a tensão atinge a **resistência ao escoamento**  $S_E$ , o material já tem 0,2% de deformação permanente. No exemplo acima,  $S_E$  vale cerca de 250MPa.

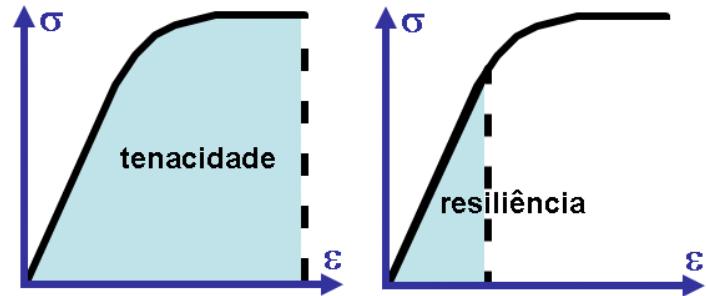
Olhando agora para o gráfico maior da figura, dá para perceber que o material continua plastificando até a tensão atingir um valor máximo  $S_R$ , a **resistência à ruptura**, quando ele se rompe (no exemplo acima,  $S_R$  vale cerca de 450MPa). A **deformação de ruptura**,  $\epsilon_R$ , é a máxima deformação que o material atinge antes de se romper (no caso acima,  $\epsilon_R$  é cerca de 36%, ou seja, o material estava 36% mais alongado no instante da ruptura). Quanto maior  $\epsilon_R$ , mais dúctil é o material.

A **dureza** de um material é a resistência à penetração de outros mais duros que ele. Se pressionarmos um identador muito duro (por exemplo a ponta de um diamante) sobre a superfície do material, quanto mais duro ele for menor será a mossa (amassado) residual. Uma unidade muito comum de dureza é a Rockwell C. Quanto maior, mais duro.

Outras duas propriedades de interesse são a **tenacidade** e a **resiliência**. As duas medem a resistência do material a impactos. Mas a tenacidade mede quanta energia de impacto o material consegue absorver antes de se *romper*. Já a resiliência mede a energia de impacto antes de *começar*



a plastificar. Dá para estimar a tenacidade pela área sob a curva tensão-deformação (figura ao lado, à esquerda): quanto maior a área, mais tenaz é o material. Uma estimativa muito aproximada dessa área sob a curva é obtida pelo produto  $S_R \cdot \epsilon_R$ . Já a resiliência pode ser estimada pela área sob a curva apenas na região linear elástica, com tensões menores que  $S_E$ , vide a figura ao lado, à direita. Essa área é estimada pela razão  $S_E / 2E$ . Um material tenaz não é necessariamente resiliente, e vice-versa.



Por exemplo, um aço inox 304, o mais comum, tolera grandes deformações mas se deforma facilmente. Desse modo, ele é muito tenaz (pois seu  $\epsilon_R$  é alto), sendo bom para a armadura do robô (apesar de pesado); porém ele é pouco resiliente (pois seu  $S_E$  é baixo), e por isso deve ser evitado em eixos (que não podem empenar) ou em rampas de *wedges* (que se amassarem muito nas bordas perdem sua funcionalidade). Já o aço de uma broca, por exemplo, é muito duro, tem resistência ao escoamento  $S_E$  muito alta, e por isso tem alta resiliência; no entanto seu  $\epsilon_R$  é pequeno e portanto a sua tenacidade é baixa – por isso brocas não são uma boa arma em combate de robôs pois quebram facilmente ao sofrerem impactos. O titânio é uma excelente escolha para uso em robôs de combate pois ele é muito tenaz e resiliente ao mesmo tempo, como será discutido mais adiante.

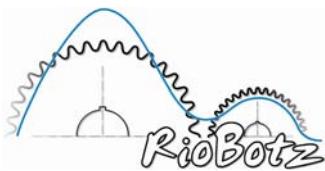
De todas as propriedades apresentadas acima, a mais importante em robôs de combate, assim como na maioria das aplicações em engenharia, é sem dúvida a **tenacidade**. Os robôs precisam tolerar impactos sem romper.

Uma vez apresentadas as principais propriedades mecânicas, podemos analisar os materiais mais usados na construção de robôs de combate, a seguir.

### 3.1. Aços e Ferros Fundidos

Aços são metais compostos basicamente de ferro e de alguns outros (em geral poucos) elementos de liga. Dependendo do tipo, eles podem ser extremamente resistentes, porém sua alta densidade faria um robô todo feito de aço ficar muito pesado. A densidade dos aços quase não varia, ficando em torno de 7,8 vezes a da água. A rigidez também varia pouco, ficando em torno de  $E = 200\text{GPa}$  (note que  $1\text{GPa} = 1000\text{MPa}$ ). Isto significa, por exemplo, que para deformar um aço em 0,1% seria preciso uma tensão mecânica de  $200\text{GPa} \times 0,001 = 0,2\text{GPa} = 200\text{MPa}$ , o equivalente a uma força de 200N a cada  $\text{mm}^2$  de seção reta do material. Por outro lado, as resistências dos aços podem variar muito – os melhores aços chegam a ser 10 vezes mais resistentes que os piores, por isso é bom conhecê-los.

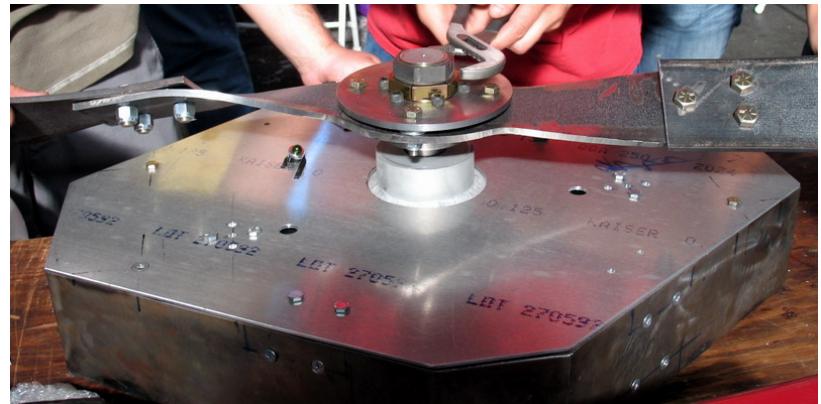
Os aços de baixa resistência estão prontos para serem usados logo após a usinagem. No entanto, muitos aços precisam sofrer um tratamento térmico (TT) após a usinagem para atingirem

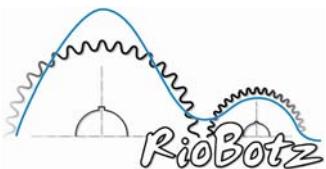


resistências elevadas. O TT consiste em aquecer o material até uma temperatura elevada (cerca de 800 a 900°C, mas varia muito com o aço) e resfriá-lo em água, óleo, pó ou ar (processo de têmpera), e depois aquecê-lo por algumas horas em uma temperatura menos alta (processo de revenimento). O TT pode ser feito de forma artesanal com um maçarico e água ou óleo, no entanto pode-se procurar uma empresa especializada em fazer tratamentos para uma maior confiabilidade. Custa cerca de US\$50 (R\$120) para tratar todas as peças de um robô, se for feito o mesmo tratamento para todas.

A seguir são listados alguns dos principais tipos de aço usados em robôs de combate.

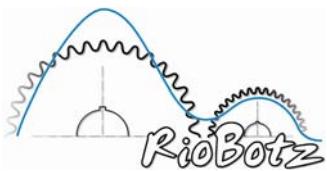
- aço 1018, aço 1020: são aços doces, possuem baixo teor de carbono, de 0,18% e 0,20% respectivamente; possuem baixa resistência, mas são facilmente conformáveis, usináveis, soldáveis e fabricáveis; usados geralmente em eixos, rodas dentadas e em uma variedade de peças e componentes; muito usados na estrutura do robô devido ao seu baixo custo, no entanto devido à baixa resistência ao escoamento  $S_E$  eles empenam facilmente (vide a lâmina na foto ao lado); o TT só consegue aumentar a resistência e dureza da superfície desses materiais, o interior continua com baixa resistência.
- aço 1045: aço de médio teor de carbono (0,45%), usado quando maiores resistência e dureza forem desejadas; usado em aplicações de alta velocidade, engrenagens, eixos e peças de máquinas; é uma solução barata para os eixos do robô, mas precisa sofrer um TT após a usinagem.
- aço 1095: liga de elevado teor de carbono (0,95%), com dureza e resistência elevadas após o TT, mas tende a ser frágil, com baixa resistência a impactos; usada tipicamente em molas ou ferramentas de corte que requerem bordas de corte afiadas.
- aço 4130: aço com 0,30% de carbono que contém cromo e molibdênio (os americanos chamam de *chromoly*) como agentes para aumentar a resistência; o baixo teor de carbono os torna excelentes do ponto de vista de soldabilidade, permitindo que alguns robôs tenham sua estrutura formada por barras ou tubos de 4130 soldados, e depois do TT atingem grande resistência.
- aço 4340: aço com 0,40% de carbono, que contém níquel além de cromo e molibdênio (*chromoly*), tornando-o após o TT ainda mais resistente a impactos que o 4130; as aplicações típicas são para o uso estrutural, tais como componentes do trem de pouso de aviões, engrenagens de transmissão de potência, eixos e outras peças estruturais; é um



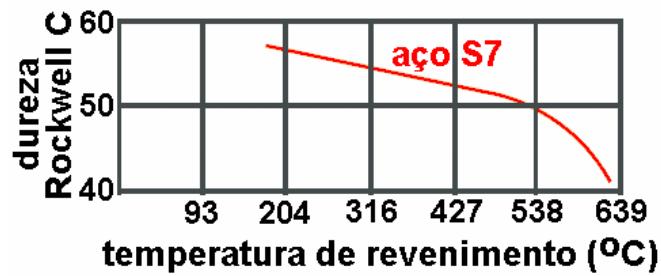


excelente material para eixos, o eixo do robô Ciclone é todo feito de 4340 temperado e revenido; procure fazer o TT do 4340 de modo a deixá-lo com dureza final entre 40 e 43 Rockwell C – muito mais que isso e o eixo fica frágil e pode quebrar em um impacto severo, e muito menos que isso deixará o eixo empinar; a “receita de bolo” da RioBotz para o aço 4340 é aquecer a 850°C, manter por 30 minutos, resfriar mergulhando em óleo até abaixo de 65°C (importante: no caso de eixos, mergulhar na *vertical* para não empinar), e logo em seguida revenir a 480°C por 2 horas.

- aço AR400: “misterioso” aço usado na rampa do lendário *wedge* Devil’s Plunger; na verdade não tem nenhum mistério, o AR400 (AR vem de *abrasion resistant*) é quase igual ao aço 4340 na dureza de 43 Rockwell C.
- aço 5160: aço com 0,60% de carbono, contém cromo e manganês; chamado de aço-mola, ele tem excelente resistência a impactos; empregado geralmente em aplicações pesadas para molas, especialmente na área automotiva, como feixes de molas de caminhões; as lâminas do Ciclone e do Titan são feitas de aço 5160 tratado termicamente; cuidado com o tratamento, quanto mais severo ele for, mais duro fica o aço, em compensação menos resistente a impactos e mais frágil ele fica – no Winter Challenge 2005 fizemos um tratamento muito severo nas lâminas do Ciclone, que ficaram muito duras, com dureza 53 Rockwell C, e uma delas quebrou contra o robô Panela; depois disso refizemos o tratamento e não tivemos mais problemas – a dureza ideal para o aço 5160 fica entre 44 e 46 Rockwell C, é a que usamos atualmente no Ciclone e no Titan; a nossa “receita de bolo” para o aço 5160 é aquecer a 860°C, manter por 30 minutos, resfriar mergulhando em óleo até abaixo de 65°C (importante: no caso de lâminas de *spinners*, mergulhar na *horizontal* para ficar simétrica e não desbalancear), e logo em seguida revenir a 480°C por 2 horas.
- aços inox: são aços com mais de 12% de cromo, o qual forma um filme protetor que dificulta a corrosão; existem 60 tipos de aço inox, o mais utilizado é o aço inox 304, também chamado de 18-8 por possuir 18% de cromo e 8% de níquel; possui uma combinação excelente de resistência mecânica, resistência à corrosão e fabricabilidade, e não precisa sofrer TT; é um bom material para a armadura dos robôs (apesar de pesado) pois, além de ser muito resistente a impactos (alta tenacidade), sua resistência mecânica aumenta quanto mais impactos e deformações sofrer; porém eles se deformam facilmente, e por isso sua resiliência é baixa, portanto evite usar em partes do robô que não podem empinar ou amassar, como eixos; existem aços inox bem mais resilientes, são os aços inox martensíticos, dos quais os mais famosos são o inox 420 e o inox 440: eles precisam sofrer TT, após o qual atingem alto S<sub>E</sub> e S<sub>R</sub>, porém a tenacidade pode ficar menor que a do inox 304.
- aços ferramenta: são aços que podem atingir durezas muito altas após o TT, são usados para fazer ferramentas, porém a maioria não resiste a impactos; a exceção são os aços ferramenta da série S (de *shock* em inglês), que são resistentes ao choque, usados em formões, martelos,

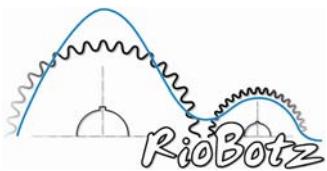


matrizes de estampagem, e aplicações com impactos repetitivos; os aços S1 e S7 são os mais usados nos robôs de combate, principalmente nas partes das armas que entram em contato com o adversário (os dentes do tambor do Touro são feitos de aço S7), mas são caros; o aço S1 pode ser encontrado no Brasil a cerca de US\$13/kg (R\$30/kg), já o aço S7 é mais difícil, costumam vender apenas em grandes quantidades; quanto ao TT, conversei com alguns construtores no Robogames 2006 e descobri diferentes durezas adotadas, variando entre 50 e 60 Rockwell C para o aço S7 – os mais conservadores ficaram em 50, já alguns mais agressivos fizeram um TT mais severo para deixar bem duro, até 60 Rockwell C, causando mais danos ao adversário mas arriscando muito quebrar a própria peça durante o impacto; a “receita de bolo” da RioBotz para os aços S1 e S7 é pré-aquecer a 760°C, equalizando a temperatura em toda a peça, continuar o aquecimento até 950°C, e manter por 30 minutos; em seguida resfriar em óleo (o S7 também pode ser resfriado em ar, o que é bom para evitar empenamentos devido ao choque térmico com o óleo) até 65°C, e imediatamente revenir na temperatura de revenimento por 2 horas; após resfriar, faça um segundo revenimento por 2 horas na mesma temperatura; a temperatura de revenimento depende da dureza desejada, veja o gráfico ao lado para o aço S7: para durezas perto de 60, use 200°C, e para durezas perto de 50 use 400°C; na prática esse gráfico também pode ser usado para o aço S1, sem muitas diferenças.



- aço AerMet 100: é um aço ferramenta especial com alto teor de cobalto e níquel, patenteado pela empresa Carpenter, provavelmente o metal mais resistente do mundo na atualidade; após TT atinge durezas de 53 a 55 Rockwell C com resistência a impactos ainda melhor que o aço S7; como era de se esperar, é muito caro, mais de US\$55/kg nos EUA.
- ferros fundidos: são basicamente aços com mais de 2,5% de carbono; o excesso de carbono acaba gerando grafita dentro da estrutura, que é muito frágil; em robôs de combate são muito usados nos mancais dos rolamentos e em algumas engrenagens; deve-se tomar cuidado com esse material, principalmente na presença de impactos – a versão 2004 do Ciclone usava mancais de ferro fundido (figura ao lado) no eixo da arma, que racharam devido ao próprio impacto exercido pelo robô, mas por sorte resistiram até o fim da competição – a partir de 2005 descartamos o mancal e passamos a embutir os rolamentos da arma nas próprias placas de alumínio da estrutura, e não tivemos mais problemas.





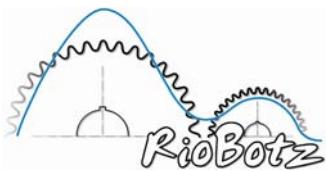
### 3.2. Alumínios

Alumínios são metais muito leves, possuem cerca de 1/3 da densidade dos aços, cerca de 2,8 vezes a da água, o que os torna muito atraentes para a estrutura dos robôs. Sua rigidez também está em torno de 1/3 da dos aços, cerca de  $E = 70\text{GPa}$ . Existem muitos tipos de alumínio, denominados normalmente por um número de 4 dígitos. Os alumínios das séries 1000, 3000 e 5000 (por exemplo o alumínio 1050, usado em equipamentos elétricos, o 3003, usado em utensílios de cozinha, e o 5052, resistente à corrosão marinha) são de baixa resistência e não devem ser usados estruturalmente. Alumínios fundidos são menos resistentes ainda e devem ser evitados, as rodas da versão 2004 do Ciclone eram desse material com exterior de borracha, mas por sorte não quebraram. Alguns alumínios da série 6000 (como o 6061) possuem média resistência e são muito usados na estrutura dos robôs. Já os das séries 2000 e 7000 (como o 2024 e o 7075) são alumínios aeronáuticos, de alta resistência, são os melhores e naturalmente os mais caros.

Os alumínios já vêm tratados termicamente de fábrica, isso nos poupa tempo e dinheiro na hora de construir o robô. Fique atento nas denominações com a letra T, o número depois dele indica qual tratamento veio de fábrica: por exemplo, o alumínio 6061-T6 é bem melhor e mais resistente que o 6061-T4, que sofreu outro TT. Seguem os principais tipos de alumínio:

- alumínio 6063-T5: é o alumínio usado em quase todas as esquadrias e perfis que se acham no mercado, porque possui alta resistência à corrosão, e é o mais barato; porém possui baixa resistência, portanto evite usá-lo na estrutura externa do robô; pode ser usados na estrutura interna, para enrijecer o robô ou para fazer apoios para prender baterias e eletrônica – como todos os alumínios possuem mesma rigidez, o 6063-T5 funciona tão bem como enrijecedor quanto qualquer alumínio mais caro, seu problema é apenas a resistência (não confunda rigidez com resistência: o vidro é muito mais rígido que o Lexan/policarbonato, no entanto o Lexan é muito mais resistente que o vidro!); todo o suporte da eletrônica do Titan e de várias peças internas do Touro são feitas de 6063-T5; como é quase impossível achar no Brasil perfis grandes de alumínio de melhor resistência, as paredes laterais do Ciclone acabaram sendo feitas de 6063-T5, em compensação reforçamos com titânio a frente do robô; custa cerca de US\$6/kg (R\$14/kg), porém em geral só vendem os perfis por unidades de 6 metros cada, por isso tente escolher apenas 1 perfil que sirva para todo o robô, para economizar.
- alumínio 6061-T6: conhecido como duralumínio, é a liga de alumínio de média resistência mais usada na prática, com aplicações na manufatura de quadros de bicicletas, estruturas, componentes navais e de caminhões; tem o dobro da resistência do 6063-T5, e também pode ser soldada; todos os famosos robôs do Team Plumb Crazy são feitos de perfis de 6061-T6 (figura ao lado), assim como os nossos hobbyweights





Tourinho e Puminha; perfis desse material podem ser comprados nos EUA na Online Metals ([www.onlinemetals.com](http://www.onlinemetals.com)), mas se alguém descobrir algum fornecedor no Brasil por favor nos avisem!

- alumínios 2024-T3, 7050, 7075-T6: resistência elevada, cerca de 3 vezes ou mais a resistência do 6063-T5; úteis para estruturas que exijam alta relação resistência/peso, usados geralmente na manufatura de rodas de caminhões, fuselagem de aviões, parafusos, cintas ortopédicas, e em rebites; são os melhores alumínios, e no Brasil o 7050 e o 7075 custam em torno de US\$17/kg (R\$40/kg) – considerando que um *middleweight* com estrutura toda em alumínio usa em torno de 15kg deste material, dá pra se orgulhar de ter um robô com qualidade aeronáutica e pronto para qualquer combate internacional com cerca de R\$600, um custo *relativamente* baixo!

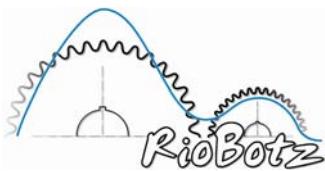
### 3.3. Titâniros

Titâniros são a Ferrari dos robôs de combate. Com pouco mais da metade da densidade dos aços (cerca de 4,6 vezes a da água), eles atingem resistências duas vezes e meia maiores que a do aço 1020 (ou até quatro vezes em algumas ligas de uso militar). Sua rigidez é  $E = 110\text{GPa}$ , cerca de metade da dos aços. São não-magnéticos, atóxicos, e extremamente resistentes à corrosão, inclusive na presença de fluidos biológicos, daí seu uso em próteses e implantes médicos. Titânio gera lindas faíscas brancas ao ser esmerilhado, que chegam a ofuscar a vista. Cuidado com o cavaco de titânio após a usinagem, ele é inflamável! Fizemos muitas mini-fogueiras de cavaco de titânio no laboratório, elas geram uma luz branca muito intensa.

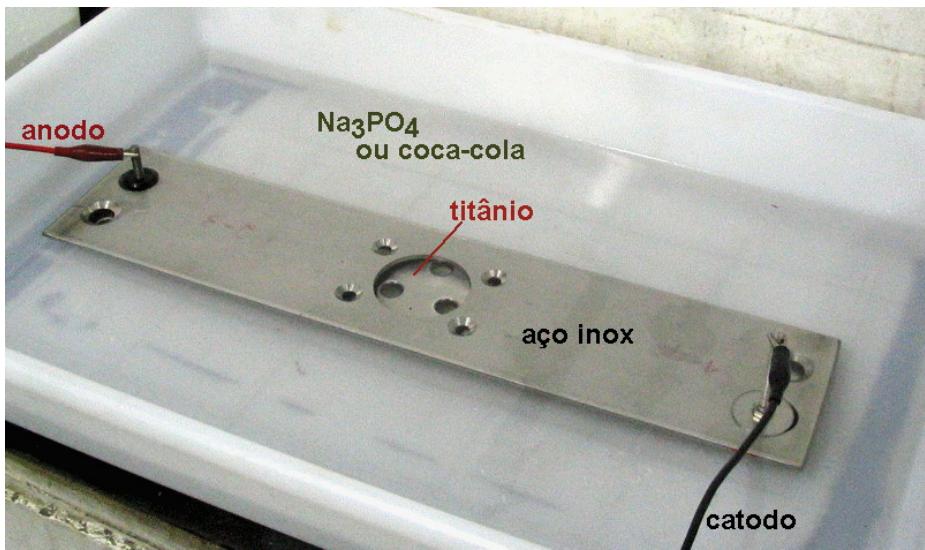
Os titâniros são difíceis de cortar e de furar. O segredo de furar é usar baixa rotação na broca e muita pressão sobre a peça (use sempre uma furadeira de bancada, nunca uma manual), e principalmente não deixar em hipótese alguma a peça esquentar – use bastante fluido. Ao esquentar, o titânio forma uma película de óxido que é mais dura que a broca, e daí várias brocas serão gastas no processo. Use brocas ao cobalto para furar titânio, elas resistem muito mais e furam melhor. A prática também é importante: no início nós gastávamos 1 hora para fazer um furo de diâmetro 8mm em uma placa de titânio de 8mm de espessura, e gastávamos 1 broca por furo – hoje em dia esse mesmo furo leva uns 10 minutos sem gastar muito a broca.

Uma curiosidade sobre o titânio (assim como o nióbio) é que podemos colorir sua superfície de diversas cores sem tintas ou pigmentos, usando apenas coca-cola, para anodizá-la. A figura ao lado mostra uma pintura artística feita em uma placa de titânio. Repare na gama de cores que é possível obter.





Para colori-lo, é preciso uma peça de aço inox de área igual ou maior que a do titânio a ser colorido, um parafuso de inox e um de titânio, coca-cola em uma bacia, e uma fonte de tensão (de pelo menos uns 30V). O esquema está na figura ao lado. Lixe bem a peça de titânio e limpe com álcool ou acetona, não pode ter nem impressão digital. Coloque a peça de titânio (que será o anodo) e a de aço inox (o catodo) mergulhadas na coca-cola (o eletrólito, que também pode ser  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , vide a figura ao lado), com as superfícies próximas mas sem se encostarem. Prenda o parafuso de titânio à peça de titânio a ser colorida, e o de aço inox à peça de inox. Conecte o positivo da fonte no parafuso de titânio e o negativo no de inox, sem que os jacarés encostem na coca-cola. Aplique uma certa tensão entre 15 e 75V por alguns segundos e pronto, o titânio está colorido!

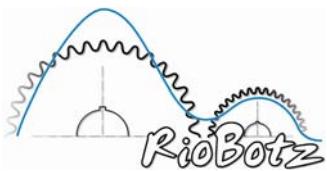


Algumas das cores que podem ser obtidas estão na figura ao lado. A cor do titânio obtida pela eletrólise depende da tensão aplicada.



Quanto maior tensão, mais espessa será a camada de óxido de titânio que é formada sobre a placa (anodo), mudando sua cor. Isso ocorre pois essa fina camada de óxido causa difração das ondas de luz. As cores são dourado (aplicando-se 15V), bronze (20V), púrpura (25V), azul-púrpura (30V), azul claro (35V), branco azulado (40 a 45V), branco esverdeado (50V), verde claro (55V), amarelo-esverdeado (60 a 65V), ouro esverdeado (70V) e cobre (75V). Há outras cores até 125V, mas elas ficam opacas, não ficam brilhantes.

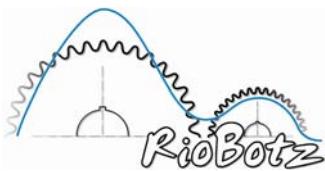
A coca-cola funciona mas não é o melhor eletrólito. Nós descobrimos que a coca-cola light é um pouco melhor pois não tem açúcar, que costuma se depositar nos contatos. Mas melhor ainda é o fosfato trisódico ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , conhecido como TSP), diluído a cerca de 100 gramas para cada litro de água destilada. Além de ser transparente (o que permite que você veja as cores à medida que sobe a tensão), ele é um detergente que ajuda a manter o titânio limpo durante a anodização, resultando em uma cor mais uniforme. Na figura abaixo estão paredes laterais do robô Titan, as duas de cima antes da anodização e a de baixo colorida em  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  com uma tensão de 30V. Repare na máscara que usamos na placa superior, escrita TiTAN, feita de adesivo impermeável (pode ser feito de adesivo tipo *contact* recortado). Ela protege a região para que, após o colorimento, sejam retiradas deixando letras com a cor original do titânio (como pode ser visto no "RioBotz" escrito na placa de baixo).



O titânio comercialmente puro (chamado de titânio grau 2) tem resistência menor e maior densidade que os alumínios aeronáuticos, e por isso não deve ser usado. Use apenas o titânio grau 5, conhecido como Ti-6Al-4V, este possui o dobro da resistência dos melhores alumínios aeronáuticos, com apenas 60% a mais de densidade.

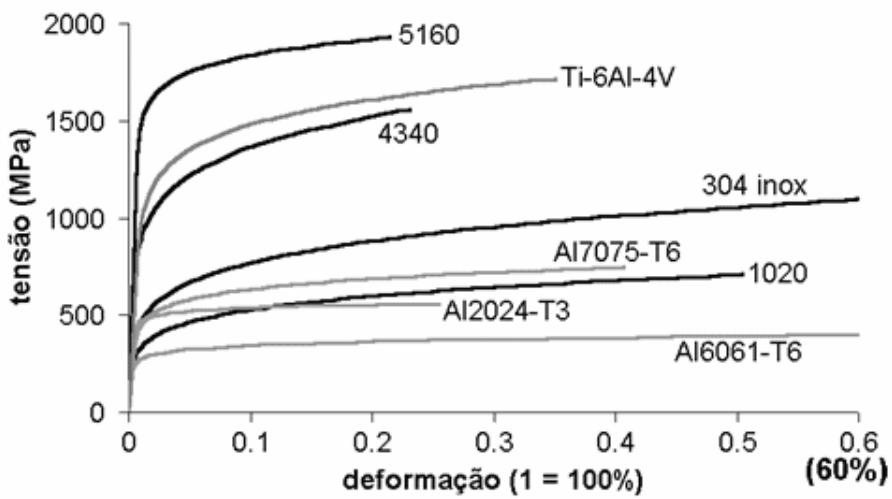
- titânio Ti-6Al-4V: conhecido também como Ti-6-4 (por possuir 6% de alumínio e 4% de vanádio, misturados em 90% de titânio), é a liga de titânio de alta resistência mais utilizada dentre todas as classes; combina excelentes resistências mecânicas e à corrosão com soldabilidade e fabricabilidade; usada extensivamente na indústria aeronáutica em uma variedade de aplicações em turbinas e componentes estruturais até 400°C; pode ser tratada termicamente, no entanto o ganho em resistência é pequeno – na prática os robôs de combate usam titânio sem tratamento térmico, o material já é muito resistente dessa forma; infelizmente o titânio grau 5 é difícil de achar no Brasil e custa muitas vezes mais que nos EUA; mesmo nos EUA é caro, cerca de US\$55/kg a US\$80/kg; alguns fornecedores são President Titanium ([www.presidenttitanium.com](http://www.presidenttitanium.com)), Tico Titanium ([www.ticotitanium.com](http://www.ticotitanium.com)) e Titanium Joe ([www.titaniumjoe.com](http://www.titaniumjoe.com)); titânio tem uma resistência a impactos inacreditável, usamos em todas as paredes laterais e no fundo do Titan, como revestimento para as paredes do Touro e do Ciclone, e nas rampas do Titan e do Puminha.

A figura a seguir mostra uma comparação entre alguns aços, alumínios e titâniros usados em robôs de combate, através de suas curvas tensão-deformação. As curvas terminam no ponto em que o material se rompe. Lembre-se que quanto mais alto chegar a curva, maior a resistência  $S_R$  a cargas estáticas até a ruptura. E quanto mais à direita chegar, mais o material consegue se deformar



(amassar) antes de romper, ou seja, maior o  $\epsilon_R$ . Note que os alumínios 7075 e 2024 se comportam de forma similar ao aço 1020, no entanto com apenas 1/3 do peso. O inox 304 tem uma área grande sob a curva, gerando alta tenacidade, no entanto ele começa a escoar (empenar) em tensões muito baixas.

Repare pelas áreas sob as curvas que o titânio Ti-6Al-4V tem tenacidade similar à do aço 5160, mas com quase a metade do peso.



### 3.4. Outros Metais

Alguns metais menos comuns que podem ter aplicação estrutural são:

- ligas de magnésio: as ligas ZK60A-T5 e AZ31B-H24 são excelentes para a estrutura dos robôs, pois possuem resistência similar à do alumínio 6061-T6 porém com apenas 65% do seu peso (a densidade das ligas de magnésio é cerca de apenas 1,8 vezes a da água, ao invés de 2,8 dos alumínios); sua rigidez no entanto é  $E = 45\text{GPa}$ , menos da metade da dos alumínios; use placas com no mínimo 3mm de espessura, pois placas muito finas correm o risco de entrar em combustão (o magnésio pode ser inflamável); a ZK60A-T5 (US\$62/kg) é a liga de magnésio mais resistente que existe, no entanto é difícil achar placas grandes desse material; a liga AZ31B-H24 (US\$42/kg) é um pouco menos resistente, mas menos difícil de encontrar; o *lifter* BioHazard, provavelmente o robô de combate de maior sucesso da história, usa essas ligas de magnésio para se manter no limite de peso; se alguém descobrir essas ligas no Brasil por um preço razoável por favor nos avisem!
- ligas de berílio: teoricamente são de longe os melhores metais do mundo para fazer uma estrutura leve e rígida – as ligas possuem rigidez  $E = 288\text{GPa}$  (4 vezes a rigidez dos alumínios!) com densidade de apenas 1,9; seria uma maravilha se não fosse por um “pequeno” detalhe: partículas de óxido de berílio geradas na usinagem, no desgaste, ou durante um combate, são altamente cancerígenas, por isso todas as competições nos EUA proíbem o uso desse material; não use esse material, a beriliose mata!
- ligas de cobre: cobre é um excelente condutor elétrico, e os bronzes por ele formados são ótimos para fazer estátuas – mas não robôs de combate, pois além de terem menos resistência que os aços, as ligas de cobre são mais pesadas, com densidade em torno de 9,0; buchas de



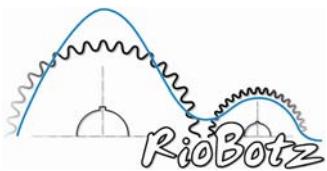
bronze (uma liga de cobre com, normalmente, estanho), por outro lado, são uma boa opção para usar nos eixos das rodas e das armas, pois permitem um bom deslizamento; o latão (uma liga de cobre com zinco) tem baixa resistência, mas quando em folhas (figura ao lado) é um excelente espaçador, para ser inserido entre peças para evitar folgas.

- superligas de níquel: são um pouco mais pesadas que os aços, e só apresentam vantagens sobre eles se usadas em altas temperaturas – as melhores ligas trabalham bem mesmo sob 700 a 1000°C, o que é ótimo para peças dentro de turbinas de aviões, mas inútil para robôs de combate (a menos que a competição seja em Vênus ou Mercúrio).

### 3.5. Não-Metais

Muitos não-metais merecem ser mencionados no projeto de robôs de combate. Os principais são:

- policarbonato: também conhecido como Lexan, é um polímero termoplástico (que amolece ao ser aquecido) transparente à luz e aos sinais de rádio-controle, tem alta tenacidade, e é leve (densidade 1,2); muito usado nas armaduras dos robôs de combate, ele absorve muita energia ao se deformar durante um impacto; apesar disso, cada vez menos robôs nos Estados Unidos têm usado esse material, por causa de suas desvantagens: ele possui rigidez muito baixa ( $E = 2,2\text{GPa}$ , cerca de 1% da rigidez dos aços, deixando o robô muito flexível se usado em demasia na estrutura), ele trinca facilmente (as rachaduras surgem a partir dos furos, e se propagam facilmente sem absorver muita energia de impacto), e ele é fácil de ser cortado (se tornando vulnerável a robôs tipo *saws*); para evitar o trincamento, chanfre todos os furos para tirar cantos vivos e arestas afiadas, e prenda o Lexan com algum amortecimento, por exemplo sobre uma fina camada de borracha ou neoprene; se for fazer rosca em Lexan, garanta que o furo rosulado seja bem fundo para o parafuso entrar com muitos fios, senão há o risco de espanar; nunca use fluido trava roscas como o Loctite 242 em Lexan, pois além de não travar, ele provoca uma reação que fragiliza o material; acetona também reage com Lexan, evite usá-la.
- acrílico: bom para fazer aquários, mas não use em combate, pois possui a mesma densidade do Lexan mas é 20 a 35 vezes menos resistente a impactos.
- nylon, delrin, acetal, polietileno: são polímeros termoplásticos de alta resistência, leves e relativamente tenazes, bons para espaçadores internos nos robôs, podem servir até para prender motores.

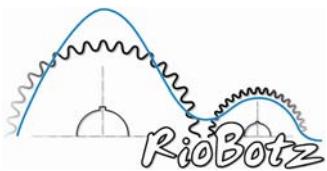


- teflon (PTFE, politetrafluoretíleno): baixíssimo coeficiente de atrito, pode ser usado como bucha de deslizamento para cargas moderadas, ou como apoio no fundo do robô para deslizar na arena; seu problema é o alto custo, e por isso muitos o substituem por UHMW (*Ultra High Molecular Weight polyethylene*), conhecido como o “teflon dos pobres”, que é um polietileno de alta densidade que também desliza bem – ele não desliza tanto quanto o teflon, mas é barato e mais resistente; muitos *shell spinners* como o Megabyte usam espaçadores internos de UHMW entre a arma-concha e a estrutura do robô (destacados em vermelho na foto ao lado), garantindo que mesmo que a concha empene ou amasse ela não encoste na estrutura interna de metal do robô, deslizando com relativamente pouco atrito sobre os apoios/espaçadores.



- epóxi: excelente adesivo, bom para colar fibras de vidro, kevlar e carbono em metais; limpe as peças com álcool ou acetona antes de aplicá-lo, para maximizar a resistência; use sempre o epóxi profissional (cura em 24 horas).
- borracha, neoprene, velcro: excelentes materiais para amortecer as partes internas críticas do robô, como eletrônica e baterias.
- fenolite: é um laminado industrial, muito duro e denso, feito por aplicação de calor e pressão em camadas de celulose impregnadas com resinas sintéticas fenólicas, aglomerando-as em uma massa sólida e compacta; conhecido também por celeron, é um excelente isolante elétrico; nós prendemos toda a eletrônica do robô em uma placa de fenolite, e ela é presa por coxins (vide o capítulo 4) na estrutura do robô, obtendo assim ótimo isolamento mecânico (contra vibrações e impactos) e elétrico; fenolite é relativamente frágil, mas existe uma versão de alta resistência chamada de garolite, que já foi até usada na estrutura de vários *antweights* e *beetleweights*; a tampa superior do *beetleweight* Mini-Touro é feita de garolite; o primeiro protótipo que fizemos do *hobbyweight* Tourinho era todo em garolite (verde nas paredes e preta nas tampas, vide a foto ao lado), muito resistente e transparente aos sinais do rádio, no entanto acabamos optando por alumínio por dois motivos: as rosas feitas na garolite, ou em qualquer outra fenolite, são frágeis e espanham facilmente, e o peso do robô não ficou tão menor que com alumínio, que é bem mais resistente (alumínio tem densidade 2,8 e a garolite 1,8).



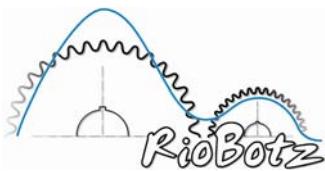


- madeira: possui baixa resistência a impactos se comparado com os metais, não deve ser usada na estrutura; no entanto, alguns construtores prendem uma tira de madeira na frente do robô para se defenderem de *spinners* – o *shell spinner* Megabyte, por exemplo, ao dilacerar aos poucos a tira de madeira do adversário, vai perdendo velocidade de rotação, ficando vulnerável.
- fibra de vidro: conhecida como GFRP (*glass fiber reinforced polymer*), é muito usada em embarcações, e é um material com potencial para uso na estrutura dos robôs por ser rígido e leve, no entanto sua resistência a impactos não é muito alta se comparada com a dos metais.
- fibra de carbono: conhecida como CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*), disponível em diversas cores (figura ao lado), é muito cara mas extremamente rígida e leve, e por isso usada em carros de Fórmula 1 e na fuselagem dos novos Boeing 787 (figura abaixo à esquerda) e Airbus A350 (figura abaixo à direita); são excelentes para prender as partes internas do robô, mas não devem ser usadas na armadura pois são muito frágeis, não resistem a impactos (a menos que as fibras sejam combinadas com kevlar)!



- fibra de kevlar: conhecida como KFRP (*kevlar fiber reinforced polymer*), é um tecido amarelo feito de fibras de aramida (um tipo de nylon, veja a figura ao lado) 5 vezes mais resistentes que fibras de aço de mesmo peso; usada em coletes à prova de balas, possui extraordinária resistência a impactos; o Touro usa uma camada de kevlar ensanduíchada entre as paredes de alumínio da estrutura e as placas de titânio externas da armadura, para aumentar sua





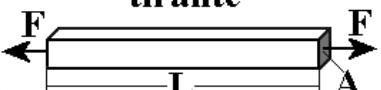
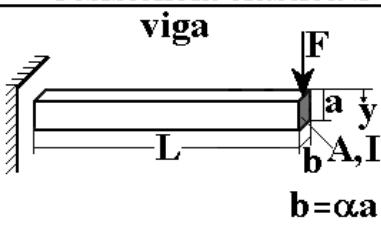
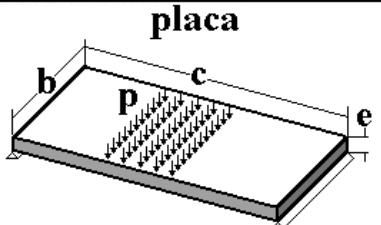
resistência a impactos; o tecido é muito difícil de ser cortado, é preciso usar uma tesoura especial que nós só achamos nos EUA; ele não é caro, usamos menos de R\$30 em kevlar em todo o robô Touro – mais especificamente, nós usamos o “tecido de aramida KK475”, que custa cerca de US\$60/m<sup>2</sup> (R\$136/m<sup>2</sup>) no Brasil.

- cerâmicas: são muito frágeis se tracionadas, mas sob compressão são os materiais mais resistentes do mundo, tanto que são usadas sob as armaduras de tanques de guerra para absorverem impactos; são também extremamente resistentes à abrasão, o famoso *lifter* BioHazard usa azulejos de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que quando pura forma as safiras) colados sob o seu fundo para se proteger de serras que emergiam do chão das arenas da liga Battlebots.

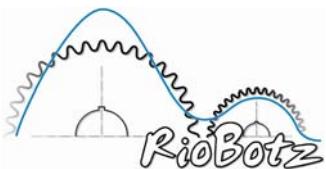
### 3.6. Seleção de Materiais

Depois de apresentar os principais materiais usados (ou não) em robôs de combate, vem a pergunta: qual material usar? Errou quem respondeu “o mais resistente”. Os materiais mais resistentes são os aços, mas um robô todo de aço ficaria muito pesado. Por exemplo, uma placa de 4mm de espessura de aço pesa o mesmo que uma similar de 11mm de alumínio. O que é melhor, 4mm de aço ou 11mm de alumínio?

A resposta não é tão simples. Ela depende da função que o material vai ter. Por exemplo, cálculos de mecânica dos sólidos (resumidos na tabela ao lado) mostram que uma barra tracionada, funcionando como um tirante (como numa estrutura treliçada de um robô), tem maior rigidez com menor massa se o material possuir a maior razão possível entre a rigidez (módulo de Young) E e a densidade  $\rho$ . Os aços possuem em média  $E = 200\text{GPa}$  e  $\rho = 7,8$  logo  $E/\rho \approx 26$ , já nos alumínios  $E = 70\text{GPa}$  e  $\rho = 2,8$ , logo  $E/\rho \approx 25$ , e nos titâniros  $E = 110\text{GPa}$  e  $\rho = 4,6$  logo  $E/\rho \approx 24$ . Ou seja, quase não faz diferença entre usar aços, alumínios ou titâniros se o quesito for rigidez de tirantes.

tipo ou função do elemento estrutural	massa mínima c/ máxima rigidez	resistência
<b>tirante</b> 	$\Delta L = \frac{FL}{EA}$ $m = \rho LA = \frac{FL^2 \rho}{\Delta L E} \therefore$ maximize $\frac{E}{\rho}$	$\sigma = \frac{F}{A}$ $m = \rho LA = \frac{FL \rho}{\sigma} \therefore$ maximize $\frac{S}{\rho}$
<b>módulo de Young E</b> <b>massa específica <math>\rho</math></b> <b>resistência elástica S</b> 	$y = \frac{4FL^3}{E\alpha a^4}$ $m = \rho L \alpha a^2 = 2\sqrt{\alpha FL^5} \frac{\rho}{\sqrt{E}}$ maximize $\frac{\sqrt{E}}{\rho}$	$\sigma = \frac{6FL}{\alpha a^3}$ $m = \rho L \alpha a^2 = L\alpha \left[ \frac{6FL}{\alpha} \right]^{\frac{2}{3}} \frac{\rho}{\sigma^{2/3}}$ maximize $\frac{S^{\frac{2}{3}}}{\rho}$
<b>placa</b> 	$y = \frac{5pc^4}{32Ee^3}$ $m = \rho e \alpha c^2 = \alpha c^3 \left[ \frac{5pc}{32y} \right]^{\frac{1}{3}} \rho$ maximize $\frac{\sqrt{E}}{\rho}$	$\sigma = \frac{3pc^2}{4e^2}$ $m = \rho e \alpha c^2 = \frac{\alpha c^3 \sqrt{3p}}{2} \frac{\rho}{\sqrt{\sigma}}$ maximize $\frac{\sqrt{S}}{\rho}$

$$S = S_E \text{ se o material for dúctil ou } S = S_R \text{ se frágil}$$



Porém, se o quesito for flexão numa placa (o que ocorre nas tampas dos robôs), a rigidez é maximizada com peso mínimo se o material tiver a maior razão  $E^{1/3}/\rho$  possível. Nesse caso, os alumínios são muito melhores, com razão 1,5, contra 0,75 dos aços e 1,0 dos titâniros. Os resultados estão na tabela ao lado.

As fibras de carbono (CFRP), kevlar (KFRP) e vidro (GFRP) ganham na maior rigidez em todos os casos, porém continuam os problemas de baixa resistência ao impacto para o carbono e vidro, e da dificuldade de se fazer uma estrutura toda a partir de mantas (tecidos) de kevlar. O Lexan (PC na tabela ao lado, de policarbonato) é péssimo quanto à rigidez de tirantes, seu  $E/\rho$  vale apenas 2. Os alumínios ganham dos aços, titâniros e Lexan em rigidez tanto para uso em vigas sob flexão (paredes laterais de um robô), maximizando  $E^{1/2}/\rho$ , quanto para uso em placas sob flexão (tampas do robô), maximizando  $E^{1/3}/\rho$ .

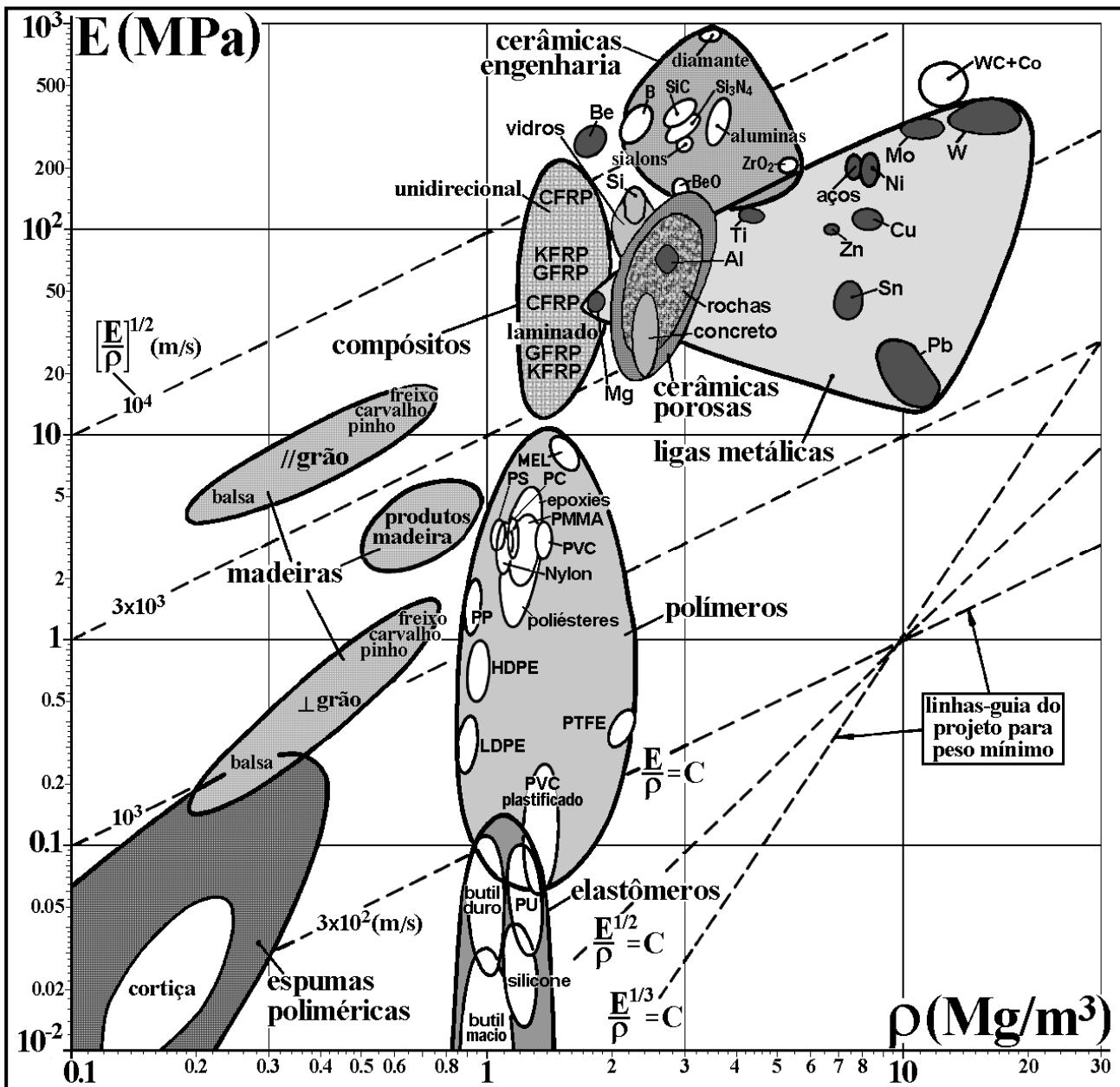
Como tanto  $E$  quanto  $\rho$  variam pouco dentro de cada família de materiais, dá pra gerar um grande diagrama comparando a aplicabilidade de cada um. Para isso, geramos um gráfico em escala logarítmica (log-log) para diversos tipos de materiais, cujo  $\rho$  é representado no eixo horizontal e  $E$  no vertical. Com a escala log-log, obtemos linhas-guia que mostram materiais com mesmo fator  $E/\rho$ ,  $E^{1/2}/\rho$  e  $E^{1/3}/\rho$ , veja a figura da página seguinte.

Para escolher materiais para serem usados em tirantes leves e rígidos, coloque um esquadro sobre a linha-guia (tracejada) de  $E/\rho$  constante. Todos os materiais nesta reta são equivalentes, ou seja, tirantes de mesmo peso feitos destes materiais teriam mesma rigidez. Agora vá subindo o esquadro paralelamente a essa linha-guia. Quanto mais alto subir, melhor será o material. Por exemplo, na linha-guia mais baixa de  $E/\rho$  constante, dá pra ver que PVC plastificado é equivalente a cortiça. Subindo até a próxima linha-guia, cruzamos os poliésteres. A próxima linha passa um pouco abaixo das ligas de cobre (Cu). A linha mais alta passa pelas fibras de carbono (CFRP) unidirecionais. Um pouco mais alto ainda estão as ligas de berílio (Be). Isso significa que, para fazer um tirante leve e rígido, o berílio é um pouco melhor que o CFRP, que é muito melhor que o cobre, que por sua vez é muito melhor que os poliésteres, que são muito melhores que as cortiças (as quais possuem rigidez muito baixa por serem espumas).

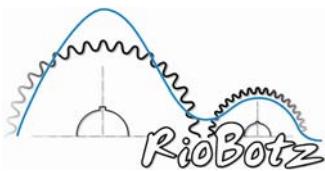
Para escolher os materiais para fazer vigas sob flexão leves e rígidas, o procedimento é análogo, exceto que o esquadro subirá paralelamente à linha-guia  $E^{1/2}/\rho$ . E para placas sob flexão, suba paralelamente à linha-guia  $E^{1/3}/\rho$ .

Repare que os aços, as ligas de alumínio (Al), e as ligas de titânio (Ti) estão praticamente em linha reta, paralela à linha-guia dos tirantes ( $E/\rho$  constante), logo são similares para essa aplicação, como tínhamos verificado anteriormente. No entanto, ao traçar paralelas à linha-guia das placas ( $E^{1/3}/\rho$  constante), o alumínio fica um pouco acima do titânio, e ambos ficam bem acima dos aços – portanto não é eficiente usar aço para obter placas leves e rígidas, como tínhamos verificado.

material	$E/\rho$	$E^{1/2}/\rho$	$E^{1/3}/\rho$
<b>aços</b>	<b>26</b>	<b>1.8</b>	<b>0.75</b>
<b>ligas Al</b>	<b>25</b>	<b>3.0</b>	<b>1.5</b>
<b>ligas Ti</b>	<b>24</b>	<b>2.3</b>	<b>1.0</b>
<b>PC</b>	<b>2</b>	<b>1.2</b>	<b>1.1</b>
<b>CFRP</b>	<b>126</b>	<b>9</b>	<b>3.8</b>
<b>KFRP</b>	<b>54</b>	<b>6.2</b>	<b>3.0</b>
<b>GFRP</b>	<b>24</b>	<b>3.5</b>	<b>1.8</b>



Um resultado interessante é que a madeira tipo balsa pode ser o melhor material para fazer placas leves e rígidas (pelo menos numa direção paralela aos seus grãos) – melhor até que ligas de titânio ou fibras de carbono, basta verificar com um esquadro no diagrama acima. Quem gosta de aeromodelismo sabe muito bem disso. Os aviões de passageiros seriam muito mais rígidos e leves se fossem feitos de balsa, no entanto prefere-se usar alumínio pois a resistência da balsa é relativamente baixa. Fazer um robô de combate todo de balsa é suicídio, ele seria extremamente rígido, mas quebraria ao primeiro impacto. Portanto, temos que levar em conta outras propriedades, não só a rigidez.



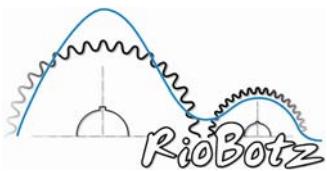
A resistência ao escoamento  $S_E$  também é importante e precisa ser considerada. Como a resistência (denominada pela letra  $S$ ) varia muito entre as ligas, não dá pra generalizar para todos os aços, alumínios, etc, é preciso estudar cada um em separado. Estes resultados estão na tabela ao lado, para vários materiais representativos.

Tirando as fibras CFRP, KFRP e GFRP, dá pra notar que um tirante sob tração (que poderia ser usado como treliça na estrutura de um robô) tem a maior combinação de resistência ao escoamento e leveza se feito de titânio Ti-6Al-4V (razão  $S/\rho = 270$ , vide a tabela), seguido do aço S1 ( $S/\rho = 224$ , similar à do aço S7). Surpreendentemente, os aços 1020 e inox 304 são piores até que Lexan nesse quesito, pois escoam muito facilmente. Vigas sob flexão (como as paredes do robô) também são otimizadas contra escoamento se feitas de titânio Ti-6Al-4V (razão  $S^{2/3}/\rho = 25,5$ ), seguidas de perto pelo alumínio 7075-T6 ( $S^{2/3}/\rho = 22,4$ , similar ao alumínio 7050). E placas sob flexão (as tampas do robô) têm máxima resistência com mínimo peso se feitas de alumínio 7075-T6 ou de Ti-6Al-4V (razão  $S^{1/2}/\rho = 8,0$  e 7,8 respectivamente). O Lexan não ficou muito atrás, com 6,6, e ficou à frente até dos aços ferramenta S1 e S7, que têm 5,4.

As conclusões de toda essa análise são:

- os alumínios em geral, especialmente os aeronáuticos, são muito bons para todas as paredes e tampas do robô, tanto em relação à rigidez quanto resistência;
- titânio Ti-6Al-4V é melhor que a maioria dos alumínios nas paredes e tampas no quesito resistência; como os alumínios são muito vulneráveis a ataques de *spinners*, costumando serem cortados como “manteiga” nesses casos, é interessante considerar no mínimo uma armadura externa fina de titânio sobre o alumínio;
- aços, mesmo os ferramenta S1 e S7, não são bons para as paredes e tampas, pois resultam em robôs muito pesados; armaduras externas de aço sobre o alumínio, apesar de pesadas, são uma boa proteção contra *spinners* caso não haja a disponibilidade de titânio, mas não exagere na espessura para não ultrapassar o limite de peso do robô;
- como eixos são basicamente vigas sob flexão (e torção), teoricamente os alumínios seriam melhores candidatos do que aços para sua confecção – no entanto, um eixo de alumínio precisaria ter um diâmetro muito maior que um eixo equivalente de aço, e isso implicaria em maiores rolamentos, maiores engrenagens e polias, e maiores caixas de redução, aumentando o peso do robô – portanto eixos de aço temperado são melhores que eixos de

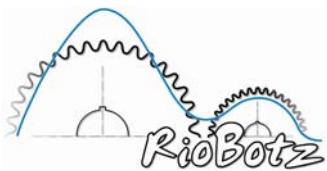
material	$S/\rho$	$S^{2/3}/\rho$	$S^{1/2}/\rho$
<b>aço 1020</b>	<b>37</b>	<b>5.6</b>	<b>2.2</b>
<b>inox 304</b>	<b>37</b>	<b>5.6</b>	<b>2.2</b>
<b>aço 4340</b>	<b>176</b>	<b>15.8</b>	<b>4.8</b>
<b>aço 5160</b>	<b>196</b>	<b>17</b>	<b>5</b>
<b>aço S1</b>	<b>224</b>	<b>18.6</b>	<b>5.4</b>
<b>Al2024 T3</b>	<b>140</b>	<b>19.4</b>	<b>7.2</b>
<b>Al6061 T6</b>	<b>102</b>	<b>15.7</b>	<b>6.2</b>
<b>Al7075 T6</b>	<b>174</b>	<b>22.4</b>	<b>8</b>
<b>Ti 6Al 4V</b>	<b>270</b>	<b>25.5</b>	<b>7.8</b>
<b>PC</b>	<b>52</b>	<b>13</b>	<b>6.6</b>
<b>CFRP</b>	<b>700</b>	<b>69</b>	<b>22</b>
<b>KFRP</b>	<b>886</b>	<b>82</b>	<b>25</b>
<b>GFRP</b>	<b>620</b>	<b>58</b>	<b>18</b>



alumínio aeronáutico; como referência, eixos de aço das rodas de um *middleweight* resistente costumam ter entre 15 e 20mm de diâmetro (mas depende muito do tipo de robô e do número de rodas que ele usa), e eixos de aço das armas variam entre 25 e 40mm de diâmetro (mas depende, é claro, do tipo de arma);

- Lexan deve ser evitado na estrutura do robô para uso como viga ou tirante, mas é um bom material para placas da armadura (mas não o melhor); a maior vantagem do Lexan nesses casos é a transparência aos sinais de rádio, pois um robô todo metálico sofre do efeito da gaiola de Faraday.

Na seção a seguir são estudados os elementos de fixação, necessários para unir os materiais apresentados de forma rígida e resistente.



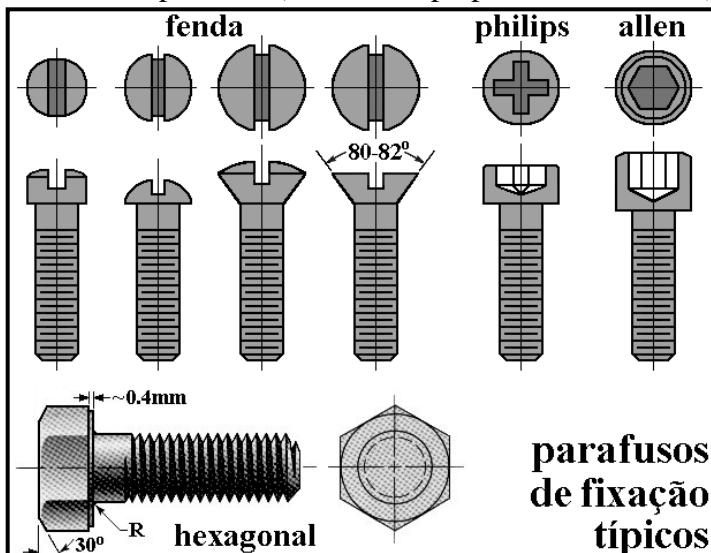
## 4. Elementos de Fixação

Elementos de fixação são usados para manter a estrutura do robô unida de forma resistente. Os principais tipos são descritos abaixo.

### 4.1. Parafusos

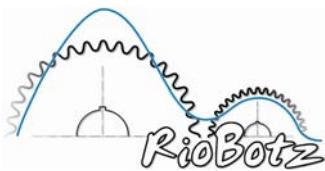
Os parafusos são elementos quase sempre cilíndricos que têm em torno de seu perímetro um ou mais filetes formando roscas helicoidais. Os parafusos são usados em inúmeros tipos de aplicações para aplicar forças, fixar juntas desmontáveis, transmitir potência (redutores tipo parafusos sem fim) e/ou acionar movimentos lineares. As rosas helicoidais, em geral enroladas segundo a regra da mão direita, são planos inclinados que convertem os torques aplicados nos parafusos em forças axiais. Os principais tipos de parafusos são apresentados à direita.

Os parafusos da estrutura devem ser todos sextavados (com cabeça hexagonal) ou com cabeça allen, pois são os que permitem os maiores torques de aperto. Parafusos usados na eletrônica podem ser tipo fenda ou phillips.



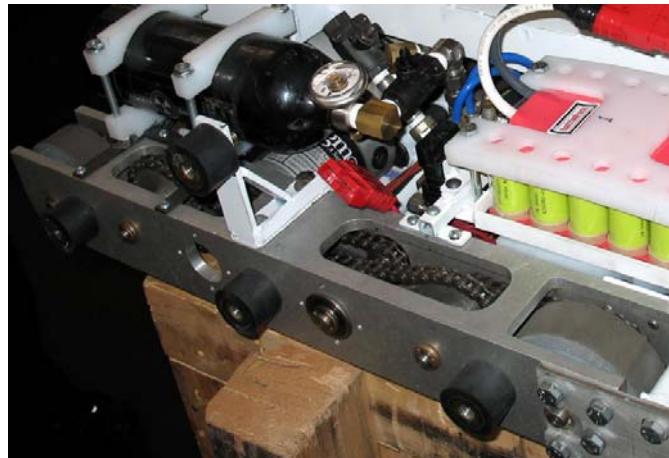
parafusos  
de fixação  
típicos

	Sextavados – fáceis de serem apertados com chaves de boca; use os de classe 8.8 (feitos de aço temperado), são 2 vezes mais resistentes que os sextavados comuns (feitos de aço doce) – tirando os centavos a mais que custam, é um ganho de resistência gratuito pois o peso não se altera; os de aço inox são mais resistentes que os comuns, mas bem menos que os de classe 8.8, por isso devem ser evitados (sem contar que são caros).
	Allen – os mais resistentes, use os da classe 12.9 (feitos de aço-liga temperado), são 3 vezes melhores que os parafusos comuns, e evite usar os inox; na figura, da esquerda para a direita, estão os de cabeça arredondada, padrão e escariada; os escariados são bons para chapas grossas no exterior do robô, eles ficam embutidos nas placas faceando a superfície, com menos chance de serem decepados por <i>spinners</i> ; evite usar os escariados para prender chapas finas, nesse caso use os de cabeça arredondada, eles também se defendem bem dos <i>spinners</i> resvalando os impactos.



	Auto-atarrachantes – não requerem furos roscados já que cortam sua própria rosca, sendo práticos de instalar e bons para prender madeira e folhas de metal, mas são <i>muito ruins</i> para a estrutura de robôs de combate – além de serem de aço de baixa resistência, eles não usam porcas, sendo arrancados facilmente por um <i>spinner</i> .
	Coxins – são basicamente 2 parafusos unidos por uma base de borracha; são excelentes amortecedores para aparafusar a eletrônica no robô, deixando-a isolada de choques mecânicos e de curtos elétricos (velcro também é uma boa opção para peças leves).

Alguns robôs possuem a armadura externa e a estrutura em peças separadas, unidas por vários coxins para amortecer os impactos de *spinners*. O *launcher* Sub-Zero usa esse tipo de amortecimento: veja, na foto ao lado, 4 de seus coxins presos à estrutura. No entanto, metade de sua armadura foi arrancada pelo *spinner* The Mortician no Robogames 2006 – lembre-se que borrachas não são muito resistentes, por isso se for trilhar esse caminho use muitos coxins!



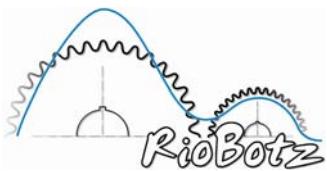
Para prender os parafusos, normalmente são usadas porcas e arruelas. As arruelas são importantes para distribuirem a força dos parafusos pela peça. As porcas possuem o inconveniente de precisarem de 2 chaves para serem apertadas, uma de boca para segurar a porca, e outra de boca ou allen para apertar o parafuso. Para contornar isso, alguns robôs fazem uso de furos roscados. É feito um furo na peça a ser fixada com diâmetro um pouco menor que o do parafuso, e um macho rosqueador (figura ao lado) é usado para fazer roscas no furo, guiado por um desandador (figura ao lado). Isso facilita muito na hora da montagem: o Touro, tirando sua eletrônica, possui 285 parafusos, mas nenhuma porca.



Mas cuidado para não espanar a rosca: a espessura a ser roscada na peça precisa ser no mínimo igual à espessura da porca que seria usada no parafuso. Além disso, evite fazer roscas no alumínio 6063-T5, elas espanam facilmente. Evite também rosas em titânio, elas são muito difíceis de fazer, e a chance de o macho rosqueador quebrar dentro da peça é muito grande.

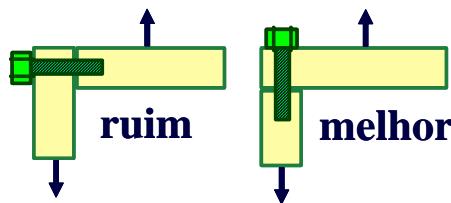
Um valor empírico para um bom diâmetro do parafuso é um pouco menor que a soma das espessuras das placas a serem unidas. Assim, para unir uma placa de 5mm de espessura a outra de 4mm ( $5 + 4 = 9$ ), um parafuso M8 (de diâmetro 8mm) é uma escolha razoável.

E quanto ao número de parafusos? Em combate de robôs não existe a palavra “super-dimensional”, basta que um adversário super-dimensione uma arma para que a sua armadura fique



sub-dimensionada. Por isso, nas partes mais críticas tente colocar o maior número possível de parafusos, usando o bom senso. Se colocar furos demais, suas placas parecerão um queijo suíço e ficarão frágeis. Uma regra empírica é deixar pelo menos uma arruela de espaçamento entre as arruelas de 2 parafusos consecutivos, ou seja, a distância entre os centros dos furos deve ser no mínimo duas vezes o diâmetro da arruela.

Parafusos cisalham muito mais facilmente do que rompem por tração. Por isso, fique atento às forças que nele atuariam. Por exemplo, na figura ao lado à esquerda, duas peças são unidas por um parafuso para transmitir uma força na vertical. Esse parafuso sofrerá cisalhamento, portanto evite essa configuração. Mude o projeto de forma que ele seja montado sob tração, como na figura ao lado à direita.

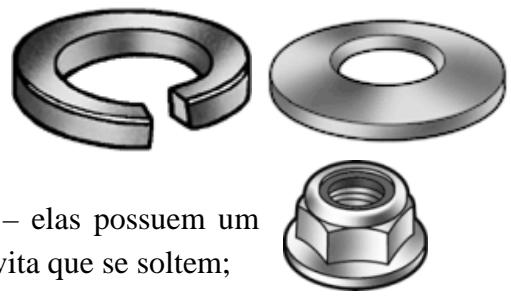


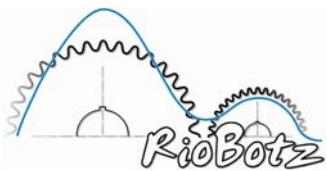
Outro ponto importante é o aperto do parafuso. Forças de impacto são transmitidas inteiramente através de um parafuso mal apertado, que acabará rompendo. Um parafuso bem apertado, por outro lado, distribui as cargas sofridas pelo material à sua volta, sofrendo apenas uma parcela menor do impacto e deixando a estrutura mais resistente e rígida. Sempre confira em um *pitstop* o aperto de parafusos críticos do robô. Normalmente as chaves de boca e allen possuem um comprimento (braço de alavanca) adequado para que uma pessoa consiga sozinha gerar torques adequados de aperto, sem conseguir romper o parafuso.

Um bom investimento é comprar uma furadeira/parafusadeira manual à bateria. Elas fazem toda a diferença em um *pitstop*, retirando ou apertando os parafusos rapidamente. Compre uma de 18V, evite as de 12V ou menos. Na Casa e Vídeo dá para comprar uma de 18V por R\$100 (porém de qualidade, digamos, um pouco duvidosa). Mas o melhor investimento mesmo é comprar uma DeWalt de 18V. Nós compramos uma no fim de 2003, temos usado para fazer furos em todos os nossos robôs e para aparafusá-los, e ela continua intacta e funcionando bem. A propósito, a locomoção do Ciclone e a arma do Tourinho usam os motores DeWalt dessas furadeiras.

E como garantir que o parafuso não vai soltar durante um round? O aperto em si não é suficiente em combate de robôs, as vibrações e os impactos sofridos são muito altos e acabam afrouxando os parafusos. Um parafuso bem apertado da tampa do nosso *spinner* Titan conseguiu dar mais de 4 voltas se soltando sozinho durante um teste violento, até ser arrancado pela própria lâmina. Para evitar que isso aconteça, há 5 métodos:

- arruelas de pressão (figura ao lado à esquerda) ou cônica (tipo Belleville, ao lado à direita) – elas garantem que o parafuso fique bem apertado e não se solte;
- porcas auto-travantes (tipo *parlock*, figura ao lado) – elas possuem um anel de nylon que agarra nas roscas dos parafusos e evita que se soltem;
- contra-porcas – se no meio de um *pitstop* agitado você não achar nenhuma arruela de pressão ou porca *parlock*, simplesmente adicione uma segunda porca ao parafuso (contra-





porca), e aperte-a bem firme sobre a primeira; o aperto relativo entre as 2 porcas não deixará que nenhuma se solte;

- fluidos trava-roscas – literalmente colam o parafuso nas porcas ou furos roscados; nós usamos o Loctite 242 (azul), ele tem média resistência e agarra muito bem, basta colocar uma gota sobre a rosca do parafuso antes de apertá-lo; existem também o Loctite 222 (roxo), mas é um pouco fraco, e o Loctite 262 (vermelho), de alta resistência, que não sai “nunca mais” (imagine se você precisar desmontar o robô...); é bom limpar o parafuso e a porca/rosca com álcool antes de usar o fluido, para melhorar a aderência, mas na prática a gente sempre se esquece disso, ainda mais na correria de um *pitstop*; não use trava-roscas em Lexan, pois além de não travar ele fragiliza o material;
- colares roscados – são porcas especiais que possuem um pequeno parafuso para travá-las (figura ao lado); são a forma mais segura de prender um parafuso ou eixo roscado, mas são difíceis de achar para comprar; as lâminas do Ciclone e do Titan são presas no eixo da arma com colares roscados; colares lisos, usados em eixos lisos sem roscas, também são úteis.



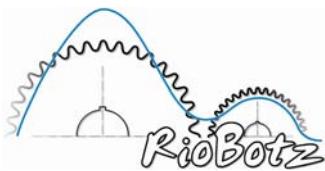
## 4.2. Soldas

Muitos robôs são feitos de estruturas soldadas. Seu principal atrativo é a rapidez de construção, sem a necessidade de se preocupar com a alta precisão requerida em estruturas aparafusadas para garantir o alinhamento dos furos. Os reparos em um *pitstop* também são mais rápidos, a solda funciona como uma cola-tudo para fixar peças, mesmo que desalinhadas, e preencher buracos. Podem ser resistentes se bem feitas, e são uma boa opção para aços doces e aços inox. A figura ao lado mostra um sistema oxi-acetileno.

No entanto, robôs soldados apresentam alguns problemas. As soldas costumam ser o ponto fraco da estrutura, e para garantir uma solda robusta acaba-se usando muito material, aumentando o peso do robô. Além disso, em muitas competições o acesso a equipamentos de solda durante os *pitstops* é limitado.

As soldas são depositadas a uma temperatura muito mais alta que a do material de base. Ao resfriarem, o efeito da dilatação térmica faz as soldas contraírem e tenderem a comprimir a peça. Com a peça resistindo a essa compressão, as soldas acabam ficando tracionadas, com tensões residuais trativas. Essa tensão trativa é tão alta que as soldas chegam a





deformar plasticamente. Essas tensões residuais diminuem em muito a resistência principalmente à fadiga. Algumas formas de diminuir estes efeitos são pré-aquecer o material de base antes de depositar a solda (para que a diferença de temperatura entre o material e a solda não seja tão alta) ou fazer um tratamento térmico para aliviar tensões (aquecendo todo o conjunto após a soldagem). Esmerilhar a solda para gerar um bom acabamento superficial também aumenta a vida da peça, pois as trincas (fissuras) normalmente se iniciam junto às rugosidades mal-acabadas das soldas.

Outro problema é que a maioria dos materiais de alta resistência não é soldável, ou apresenta problemas se tiver que ser soldado durante um *pitstop*. Por exemplo, os alumínios aeronáuticos de maior resistência não são soldáveis, e estruturas de aço 4130 soldadas só adquirem alta resistência após o tratamento térmico (TT), portanto se alguma solda quebrar e tiver que ser reparada num *pitstop*, sua resistência ficará prejudicada pois não haverá tempo nem condições de fazer outro TT na hora.

As soldas em alumínio precisam ser feitas com equipamento MIG (*Metal Inert Gas*, figura ao lado à esquerda), e em titânio preferencialmente com TIG (*Tungsten Inert Gas*, figura ao lado à direita), que exigem grande experiência para não comprometer a resistência. Eu inspecionei o *launcher Sub-Zero*

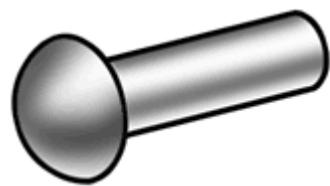


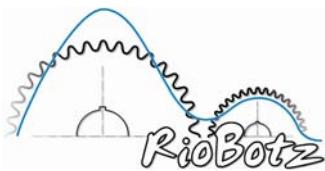
após ter sido detonado pelo *spinner* The Mortician, e constatei que todas as rupturas na sua armadura de titânio foram nas soldas. Além disso, o titânio ao redor das soldas nem estava amassado, um sinal de que o material aguentaria muito mais impactos se não fosse pela ruptura prematura dessas soldas, que foram seu ponto fraco.

### 4.3. Rebites

Não há muito o que dizer: simplesmente não use rebites! São fáceis de instalar e são usados em aviões, mas vocês sabem o que acontece quando um avião se choca com o solo: ele se desintegra.

*Spinners* adoram adversários rebitados. Rebites só são aplicáveis para unir folhas de metal, não para placas. Lembre-se que a pequena flange que segura os rebites é feita de um material que você conseguiu deformar na mão, ou com uma ferramenta manual! Além disso, para desmontar o robô, é necessário furar o rebite para retirá-lo, o que consome tanto ou mais tempo do que desapertar um parafuso.





#### 4.4. Fixação em Eixos

Para fixar polias, engrenagens, coroas e rodas nos eixos do robô, é altamente recomendável o uso de chavetas. Chavetas são normalmente barras quadradas de aço que são encaixadas entre um rasgo no eixo e outro na peça a ser fixada, e são uma forma eficiente de se transmitir torque. Elas funcionam também como um fusível mecânico, quebrando se necessário para poupar o eixo e a peça. Os rasgos de chaveta podem dar algum trabalho para serem feitos, em especial os rasgos no eixo, que são externos (figura ao lado à esquerda). Os rasgos internos (como o da polia à direita) podem ser mais simples de serem feitos usando uma ferramenta especial chamada de brocha de chaveta.



Evite fixar componentes em eixos usando parafusos. Estes são em geral parafusos allen sem cabeça, aparafusados radialmente através do componente a ser fixado (como na coroa da figura ao lado). Esta forma de fixação não resiste bem a impactos, e o parafuso pode facilmente quebrar.



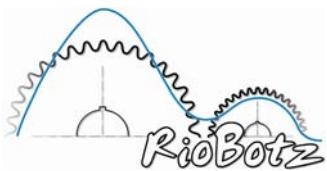
Para garantir que as peças fixadas não irão deslizar ao longo do eixo, você pode utilizar anéis retentores ou colares.

Anéis retentores (figura ao lado, à esquerda) são fixados em um sulco de diâmetro externo A torneado no eixo. Já os colares são mais resistentes que os anéis, porém são mais pesados. Basta inserir o colar no eixo e apertar seu(s) parafuso(s) para que seja gerada uma força de fixação tipicamente da ordem de toneladas. Os dois principais tipos são os colares de um parafuso (figura do meio), mais difíceis de instalar no eixo, e os de dois parafusos (figura da direita), cujas metades se separam para serem instalados mais facilmente.



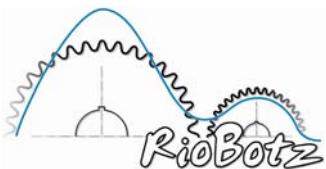
Outro elemento de fixação muito usado é a abraçadeira de metal (figura ao lado). Elas são práticas, rápidas de montar e desmontar, e funcionam bem para prenderem objetos cilíndricos, como tanques de ar e motores, ou mesmo componentes de outros formatos como baterias. No caso de baterias, é aconselhável passar fita isolante na abraçadeira para evitar curtos. Use várias abraçadeiras para distribuir bem a carga e evitar que ela se rompa. Teste bastante o robô para garantir que as abraçadeiras resistirão aos impactos dos combates.





Note no entanto que colares são muito mais resistentes e confiáveis do que abraçadeiras para prender objetos cilíndricos, em especial motores. O motor da arma do robô Touro, por exemplo, é preso por dois colares de alumínio, de dois parafusos cada (figura ao lado). Esse método, além de muito mais resistente, é tão prático como o das abraçadeiras, pois pode-se trocar o motor bastando desapertar 4 parafusos.





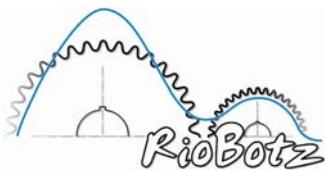
## 5. Motores e Transmissões

Os motores são provavelmente a parte mais importante de um robô de combate. O tipo mais usado é o de corrente contínua (DC), pois estes motores podem atingir altos torques, serem acionados facilmente por baterias, e seu controle de velocidade é relativamente simples. Existem também outros tipos de motores elétricos, mas que não costumam ser usados em combate. Por exemplo, os motores de passo possuem em geral torque relativamente baixo, os motores AC são mais difíceis de controlar a velocidade e acionar por baterias, e os motores *brushless* são muito caros e exigem uma eletrônica especial para o seu acionamento (comutação). Os motores *brushless*, no entanto, têm tido algum sucesso acionando as armas dos “insetos” (*beetleweights*, *antweights*, e menores). No futuro próximo, quando seu custo e o de sua eletrônica de acionamento baratearem, eles deverão ser a melhor escolha para todas as classes.

Os três principais tipos de motores DC são os de ímã permanente, *shunt* (em paralelo), e em série. Os em série são os motores de arranque, possuem alto torque inicial e alta velocidade máxima. Se não houver carga em seu eixo, os motores de arranque aceleram cada vez mais até se auto destruírem, por isso são perigosos. Em algumas competições podem ser proibidos por esse motivo. Eles não são usados na locomoção do robô pois não é fácil reverter o sentido de seu movimento, porém são bons para serem usados em armas que girem em um só sentido.

Os motores DC de ímã permanente e os *shunt* possuem comportamento similar entre si, mas bastante diferente dos de arranque. Os de ímã permanente são os mais usados, tanto para a locomoção quanto para acionar armas. Estes possuem ímãs permanentes fixos a uma carcaça (figura abaixo à esquerda), que forma o estator, e um rotor que possui vários enrolamentos (abaixo ao centro). Esses enrolamentos geram um campo magnético que, em conjunto com o campo dos imãs, gera um torque no rotor. Para que se tenha uma saída com torque aproximadamente constante, os enrolamentos devem ser comutados continuamente, tarefa feita pelo comutador presente no rotor e pelas escovas (abaixo à direita), presa na carcaça do motor. Eletricamente, o motor DC pode ser modelado por uma resistência, uma indutância e uma fonte de tensão, cujo valor é diretamente proporcional à velocidade do motor, todos em série. A escolha do melhor motor depende de vários parâmetros, modelados a seguir.





## 5.1. Motores DC

Para se descobrir o comportamento de um motor DC (seja ele de ímã permanente ou tipo *shunt*), é preciso conhecer 4 parâmetros:

- $V_{\text{input}}$  – a tensão aplicada aos terminais (medida em V);
- $K_t$  – a constante de torque do motor, que é a razão entre o torque gerado pelo motor e a corrente elétrica nele aplicada (medida em N·m/A);
- $R_{\text{motor}}$  – resistência elétrica entre os terminais do motor (medida em  $\Omega$ ), quanto menor o seu valor maiores são as correntes que o motor consegue puxar, e maior seu torque;
- $I_{\text{no\_load}}$  – corrente elétrica requerida para o motor girar sem nenhuma carga no seu eixo (medida em A), quanto menor o seu valor menos atrito existe nos rolamentos/buchas do motor.

As equações para um motor DC são:

$$\begin{aligned}\tau &= K_t \times (I_{\text{input}} - I_{\text{no\_load}}) \\ \omega &= K_v \times (V_{\text{input}} - R_{\text{motor}} \times I_{\text{input}})\end{aligned}$$

onde:

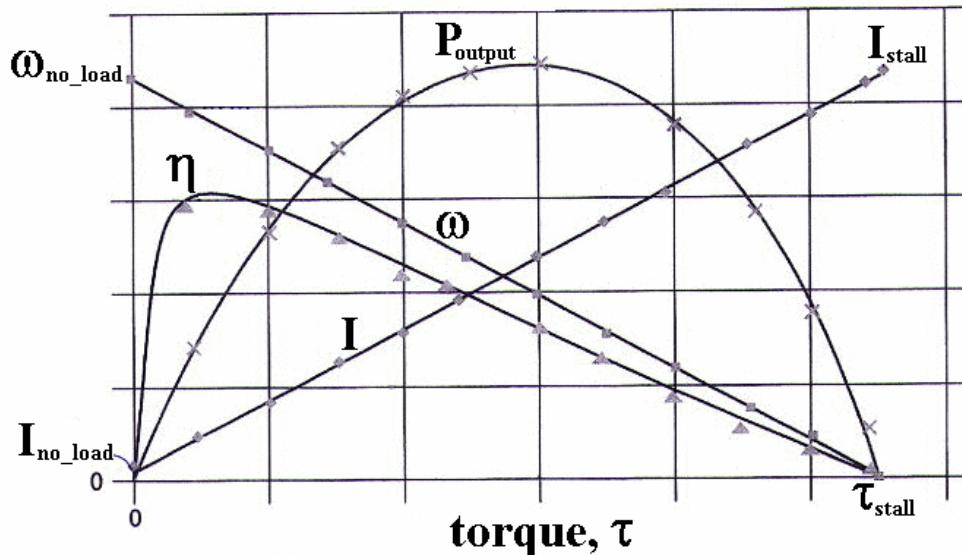
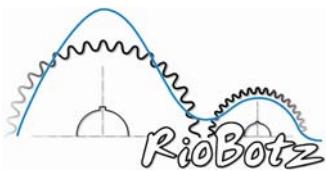
- $\tau$  – torque aplicado pelo motor em um dado instante (em N·m);
- $\omega$  – velocidade angular do motor (em rad/s, multiplique por 9,55 para obter RPM);
- $I_{\text{input}}$  – corrente elétrica que atua no motor (em A);
- $K_v$  – a constante de velocidade do motor, é a razão entre a velocidade do motor e a tensão nele aplicada, medida em (rad/s)/V, é calculada por  $K_v = 1 / K_t$ ;

Apesar de desprezarem a indutância do motor, as equações acima são boas aproximações se a corrente não variar bruscamente. A potência elétrica consumida vale  $P_{\text{input}} = V_{\text{input}} \times I_{\text{input}}$ , e a potência mecânica gerada pelo motor é  $P_{\text{output}} = \tau \times \omega$ . Queremos a maior potência mecânica possível gastando o mínimo de potência elétrica, isso pode ser quantificado pela eficiência  $\eta = P_{\text{input}} / P_{\text{output}}$ , que resulta em um número entre 0 e 1. Lembrando que  $K_t \times K_v = 1$ , as equações anteriores resultam em:

$$\eta = \frac{P_{\text{input}}}{P_{\text{output}}} = \frac{V_{\text{input}} \cdot I_{\text{input}}}{(I_{\text{input}} - I_{\text{no\_load}}) \cdot (V_{\text{input}} - R_{\text{motor}} \cdot I_{\text{input}})}$$

Em um motor ideal (que não existe na prática), não há nenhuma perda por atrito no motor, logo  $I_{\text{no\_load}} = 0$ , e sua resistência elétrica é zero, logo  $R_{\text{motor}} = 0$ , e nesse caso  $\eta = 1$  (eficiência de 100%). Motores reais possuem  $0 \leq \eta < 1$  (eficiência entre 0 e 100%).

As curvas de corrente  $I$  ( $I_{\text{input}}$ ), velocidade angular  $\omega$ ,  $P_{\text{output}}$  e  $\eta$  em função do torque  $\tau$  aplicado pelo motor em um dado instante estão na figura abaixo.



Pelo gráfico dá pra notar que a velocidade máxima  $\omega_{no\_load}$  do motor ocorre quando seu eixo está livre, com  $\tau = 0$ , resultando em  $I_{input} = I_{no\_load}$ , e assim

$$\omega_{no\_load} = K_v \times (V_{input} - R_{motor} \times I_{no\_load})$$

A corrente máxima  $I_{stall}$  ocorre quando o motor está todo travado, com velocidade  $\omega = 0$ , logo  $I_{stall} = V_{input} / R_{motor}$ , gerando o torque máximo possível para esse motor  $\tau_{stall} = K_t \times (I_{stall} - I_{no\_load})$ . Na prática, o seu motor não vai ver tanta corrente assim, pois além da resistência do motor haverá as resistências da bateria e da eletrônica. A corrente máxima real será

$$I_{stall} = V_{input} / (R_{motor} + R_{bateria} + R_{eletrônica})$$

Dá pra ver no gráfico que o valor máximo da potência mecânica  $P_{output}$  ocorre para  $\omega$  aproximadamente igual à metade de  $\omega_{no\_load}$ . Mais precisamente, diferenciando-se as equações anteriores, pode-se mostrar que  $P_{output}$  máximo ocorre quando

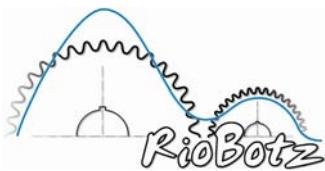
$$I_{input} = V_{input} / (2 \times R_{motor}) + I_{no\_load}$$

Já a eficiência máxima ocorre normalmente entre 80% e 90% da  $\omega_{no\_load}$ , mais precisamente quando  $I_{input} = \sqrt{V_{input} \cdot I_{no\_load} / R_{motor}}$ .

### 5.1.1. Exemplo: Magmotor S28-150

Vamos fazer um exemplo para fixar os conceitos. Considere um motor Magmotor S28-150 (ao lado) conectado a um pack de baterias de NiCd de 24V. Temos  $V_{input} = 24V$ , e esse motor tem  $K_t = 0,03757 N \cdot m/A$ ,  $R_{motor} = 0,064 \Omega$ , e  $I_{no\_load} = 3,4A$ . Temos  $K_v = 1/K_t = 26,62$  (rad/s)/V = 254 RPM/V. A resistência do motor, na verdade, precisa ser somada à resistência da bateria (0,080Ω nesse caso) e da eletrônica (cerca de 0,004Ω), resultando em  $R_{circuito} = 0,064 + 0,080 + 0,004 = 0,148 \Omega$ .

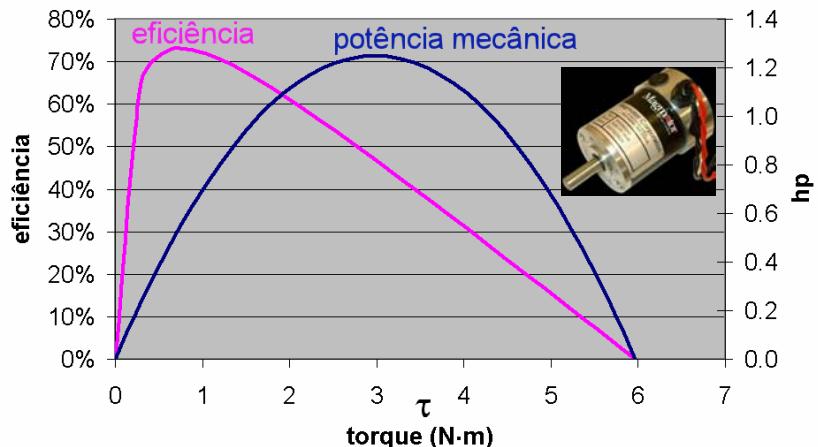




A velocidade máxima do motor (sem carga no eixo) é  $\omega_{no\_load} = 254 \times (24 - 0,148 \times 3,4) = 5968\text{RPM}$ . A corrente máxima (com o motor travado) é  $I_{stall} = 24 / 0,148 = 162\text{A}$ , gerando o torque máximo  $\tau_{stall} = 0,03757 \times (162 - 3,4) \approx 6,0 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Nesse caso, com o motor travado, a potência mecânica é zero e portanto a eficiência é nula, porém a potência elétrica é máxima,  $P_{input\_max} = V_{input} \times I_{stall} = 24 \times 162 = 3888\text{W} = 5,2\text{HP}$ . Toda essa potência está sendo desperdiçada, convertida em calor pela resistência do circuito, por isso evite deixar um motor travado por muito tempo, ele pode acabar superaquecendo.

A potência mecânica máxima ocorre quando  $I_{input} = 24/(2 \times 0,148) + 3,4 = 84,5\text{A}$ , e vale  $P_{output\_max} = (84,5 - 3,4) \times (24 - 0,148 \times 84,5) = 932\text{W} = 1,25\text{HP}$ . Note que o fabricante diz que a potência máxima é 3HP para esse motor, você só conseguiria isso se a resistência da bateria e da eletrônica fossem iguais a zero, só sobrando a resistência do motor. Refazendo as contas usando apenas a resistência do motor  $0,064\Omega$  ao invés de  $0,148\Omega$  dá 3HP, mas esse é um valor apenas teórico. A potência mecânica máxima de 1,25HP ocorre quando  $\omega = 254 \times (24 - 0,148 \times 84,5) = 2919\text{RPM}$ , bem próximo da metade de  $\omega_{no\_load}$ , como esperado. Cuidado pois esse  $P_{output\_max}$  ocorre para  $P_{input} = 24 \times 84,5 = 2028\text{W} = 2,72\text{HP}$ , uma eficiência de apenas  $\eta = 1,25\text{HP}/2,72\text{HP} = 0,46 = 46\%$ , logo a máxima potência dos motores se dá numa velocidade em que não são muito eficientes, como pode ser visto no gráfico abaixo para esse motor.

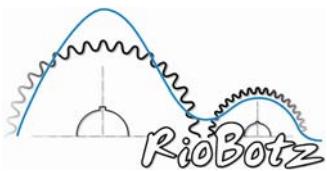
A eficiência máxima ocorre se  $I_{input} = \sqrt{24 \cdot 3,4 / 0,148} = 23,5\text{A}$ , associada a uma velocidade  $\omega = 254 \times (24 - 0,148 \times 23,5) = 5213\text{RPM}$  (cerca de 87% de  $\omega_{no\_load}$ ). Fazendo as contas, a eficiência máxima resulta em 73%. Se utopicamente a bateria e eletrônica não tivessem resistência, a eficiência máxima chegaria a 82%, o valor que o fabricante (orgulhosamente) exibe, mas que não é real.



### 5.1.2. Motores DC mais usados

Esse exemplo pode ser repetido para diversos outros motores. A tabela a seguir mostra alguns dos motores mais usados em robôs de combate, e seus principais parâmetros. Infelizmente apenas os motores GPA, GPB, e DeWalt 18V são encontrados no Brasil.

Nos *middleweights*, os motores GPA e GPB, mostrados na tabela, são muito usados na locomoção, no entanto possuem uma baixa relação potência máxima / peso. O GPA em particular gera muito ruído, o que pode ser minimizado instalando-se capacitores em sua carcaça.



				
<b>Nome</b>	<b>Bosch GPA</b>	<b>Bosch GPB</b>	<b>D-Pack</b>	<b>DeWalt 18V</b>
<b>Robô que usa</b>	<b>Orion (Triton)</b>	<b>Lacraia (RioBotz)</b>	<b>Wedgie (Soh Toskeira)</b>	<b>Ciclone (RioBotz)</b>
<b>Tensão (V)</b>	<b>24</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>24</b>
<b>Pot.Máx. (W)</b>	<b>1175</b>	<b>282</b>	<b>3561</b>	<b>946</b>
<b>Peso (kg)</b>	<b>3,8</b>	<b>1,5</b>	<b>3,5</b>	<b>0,5</b>
<b>Potência/Peso</b>	<b>309</b>	<b>188</b>	<b>1017</b>	<b>1892</b>
<b>I<sub>stall</sub> / I<sub>no_load</sub></b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>63</b>	<b>128</b>
<b>K<sub>t</sub> (N·m/A)</b>	<b>0,061</b>	<b>0,042</b>	<b>0,020</b>	<b>0,0085</b>
<b>K<sub>v</sub> (RPM/V)</b>	<b>167</b>	<b>229</b>	<b>485</b>	<b>1100</b>
<b>R<sub>motor</sub> (Ω)</b>	<b>0,13</b>	<b>0,121</b>	<b>0,00969</b>	<b>0,072</b>
<b>I<sub>no_load</sub> (A)</b>	<b>8,0</b>	<b>3,9</b>	<b>19,6</b>	<b>2,6</b>

				
<b>Nome</b>	<b>Etek</b>	<b>Magmotor S28-150</b>	<b>Magmotor S28-400</b>	<b>NPC T64 (c/ redução)</b>
<b>Robô que usa</b>	<b>Ciclone (RioBotz)</b>	<b>Titan/Touro(RioBotz)</b>	<b>Touro (RioBotz)</b>	<b>Anúbis (RioBotz)</b>
<b>Tensão (V)</b>	<b>48</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>
<b>Pot.Máx. (W)</b>	<b>11185</b>	<b>2183</b>	<b>3367</b>	<b>834</b>
<b>Peso (kg)</b>	<b>9,4</b>	<b>1,7</b>	<b>3,1</b>	<b>5,9</b>
<b>Potência/Peso</b>	<b>1190</b>	<b>1284</b>	<b>1086</b>	<b>141</b>
<b>I<sub>stall</sub> / I<sub>no_load</sub></b>	<b>526</b>	<b>110</b>	<b>127</b>	<b>27</b>
<b>K<sub>t</sub> (N·m/A)</b>	<b>0,13</b>	<b>0,03757</b>	<b>0,0464</b>	<b>0,86</b>
<b>K<sub>v</sub> (RPM/V)</b>	<b>72</b>	<b>254</b>	<b>206</b>	<b>10</b>
<b>R<sub>motor</sub> (Ω)</b>	<b>0,016</b>	<b>0,064</b>	<b>0,042</b>	<b>0,16</b>
<b>I<sub>no_load</sub> (A)</b>	<b>5,7</b>	<b>3,4</b>	<b>4,5</b>	<b>5,5</b>

O motor DeWalt 18V é uma boa escolha para locomoção, usada no Ciclone. Ele possui uma excelente relação potência / peso. Suas desvantagens são: ser difícil de ser montado no robô, possuir uma engrenagem de plástico dentre as de metal de sua caixa de redução, e esquentar muito, podendo derreter sua ventoinha de plástico.



O NPC T64 já inclui uma redução feita por engrenagens de 20:1, que já está embutida nos valores de  $K_t$  (já multiplicado por 20) e  $K_v$  (já dividido por 20) e no seu peso. Os dados incluem a perda de potência e o aumento de peso devido à redução, o que explica a relação tão baixa de potência / peso. Mas, mesmo descontando isso, o desempenho desse motor ainda é relativamente baixo. O motivo de muitos construtores o usarem é sua praticidade, pois são raros os motores de média ou alta potência que já vêm com redução. Há também uma versão desse motor com quase o mesmo peso mas o dobro da potência, o NPC T74, porém ele é muito difícil de se achar. Cuidado com as engrenagens do NPC T64 e do NPC T74 (figura ao lado, com graxa vermelha), elas são aparentemente de ferro fundido usinado (o dono da NPC Robotics não quis me dizer qual era o material usado, mas ele é frágil) e não toleram muitos impactos, portanto não os use para acionar armas, nem para a locomoção de *thwacks* ou *overhead thwacks* – quebramos as engrenagens de 2 motores NPC T74 com os impactos violentos do nosso *overhead thwack* Anúbis, tivemos que colocar vários coxins entre os motores e a estrutura do robô para amortecer e evitar novas fraturas. Tanto que a NPC agora explicitamente diz que esses motores não devem ser usados para acionar as armas, somente a locomoção. Faltou especificar que também não devem ser usados na locomoção de *overhead thwacks* (cuja arma é acionada pela própria locomoção).



Um motor excelente para a locomoção de *middleweights* é o Magmotor S28-150, ele é usado tanto no Titan quanto no Touro. Já um bom motor para a arma é o Magmotor S28-400, com maior torque e potência. O D-Pack é um concorrente à altura e bem mais barato, no entanto a sua resistência elétrica é tão baixa que ele funciona quase que como um curto nas baterias e eletrônica, por isso deve-se tomar cuidado e limitar sua corrente. Além disso ele não é mais produzido, portanto é difícil achá-lo mesmo nos EUA.

O motor Etek é algo impressionante. Ele chega a 15HP (1HP = 745,7W), e tem altos torque e velocidade ao mesmo tempo. Ele é um pouco pesado demais para um *middleweight*, conseguimos usá-lo no Ciclone tendo que limitar sua tensão para 24V, senão os packs de baterias necessários para os 48V ultrapassariam o limite de peso. Esse motor a 48V aciona *sozinho* a arma do *shell spinner super-heavyweight* Super Megabyte. Alguns malucos chegaram a colocar 96V nesse motor, não sei se estão vivos para contar a história, ou se viraram lenda.

Além da relação potência máxima / peso, um parâmetro que indica a qualidade de um motor é a razão  $I_{stall} / I_{no\_load}$  entre as correntes máxima e a em vazio. Quanto maior a razão, mais corrente e portanto mais torque o motor é capaz de exercer, e menos perdas por atrito ele tem em vazio. Motores muito bons possuem razão acima de 50. O NPC T64 tem apenas 27, mas é preciso levar em conta que o seu  $I_{no\_load}$  foi medido junto com a caixa de redução, cujo atrito eleva o seu valor – sem a caixa a razão  $I_{stall} / I_{no\_load}$  provavelmente atingiria 50. Os GPA e GPB da Bosch são pouco eficientes, ficam em torno de 24. Os melhores são o D-Pack com 63, os Magmotors e DeWalt na casa dos 110 a 130, e o Etek com a assustadora razão de 526.



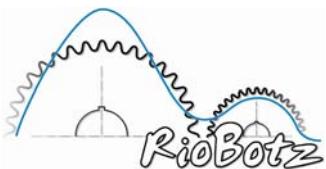
Alguns motores DC permitem que os ímãs permanentes presos na carcaça sejam ligeiramente girados em relação às escovas (cerca de 10 a 20 graus, depende do motor), isso permite ajustar a sua fase. Se o motor será usado na locomoção do robô, você quer fase neutra, ou seja, que ele gire com mesma velocidade nos 2 sentidos (facilitando o robô andar em linha reta). Mas se for usado em uma arma que gira em um só sentido, você pode fazer o avanço de fase para ganhar até algumas centenas de RPM (em compensação, no sentido contrário a rotação diminuiria). Para avançar a fase, ligue o motor em aberto (sem carga no eixo) e vá girando a carcaça com os ímãs até que a corrente  $I_{no\_load}$  medida por um amperímetro seja *máxima*, e então fixe os ímãs nessa posição. Para a fase neutra, gire a carcaça até garantir que  $I_{no\_load}$  seja idêntico ao rodar o motor nos 2 sentidos, revertendo a polaridade na bateria, e então fixe os ímãs.

### 5.1.3. Identificando Motores Desconhecidos

Existem muitos outros motores além dos aqui apresentados, é útil descobrir quais estão sendo usados pelos melhores robôs internacionais para se manter atualizado. Caso você tenha comprado ou achado o seu motor em um ferro-velho, ou perdido no laboratório, e não tenha a menor idéia de suas características, seguem algumas dicas:

- procure qualquer identificação no motor, para tentar procurar seu *datasheet* na internet;
- certifique-se de que é um motor DC – se só houver 2 fios conectando-o há uma boa chance de ser, se houver mais possivelmente é um motor AC, *brushless* ou de passo;
- meça com um multímetro a resistência entre os terminais, obtendo assim  $R_{motor}$ ;
- aplique tensões cada vez maiores, como 6V, 9V, 12V, 18V, 24V, esperando alguns minutos em cada nível de tensão, e verifique se o motor esquenta muito – se começar a esquentar muito você provavelmente ultrapassou a tensão nominal de trabalho, diminua seu valor;
- repare que a maioria dos motores *de boa qualidade* consegue funcionar bem durante um round de 3 minutos com até o dobro de sua tensão nominal, essa é uma técnica muito usada em robôs de combate (como o Etek de 48V sendo usado a 96V) – uma exceção são os Magmotors, de 24V, que por já serem otimizados só tolerariam 36V, e mesmo assim deve-se limitar a corrente nesse caso;
- uma vez escolhida a tensão de trabalho  $V_{input}$ , conecte o motor (com seu eixo totalmente livre, sem carga) à bateria apropriada (a mesma que será usada em combate) através de um amperímetro, e meça  $I_{no\_load}$ ; note que o valor de  $I_{no\_load}$  quase não varia com  $V_{input}$ , mas é sempre mais preciso e não custa nada medi-lo na tensão de trabalho; se você tiver algum tacômetro óptico (por efeito estroboscópico, figura ao lado), você pode medir também a rotação máxima em aberto do motor  $\omega_{no\_load}$ ; uma opção mais barata é prender um carretel leve no eixo do motor, e contar quanto tempo leva para ele enrolar, por exemplo, 10 metros de fio de nylon – a velocidade angular em rad/s será o comprimento do fio dividido pelo raio do carretel, tudo isso dividido pelo intervalo de tempo medido (o fio precisa ser fino, para que o raio de enrolamento no carretel não varie significativamente durante o processo);





- agora segure o eixo do motor com um alicate de pressão, prenda bem tanto o motor quanto o alicate, e reconecte na bateria – cuidado pois o tranco pode ser grande; a corrente medida será o  $I_{stall}$  associado à resistência do circuito  $R_{circuito} = R_{bateria} + R_{motor}$ , logo  $I_{stall} = V_{input}/R_{circuito}$  e assim calcule  $R_{bateria} = V_{input}/I_{stall} - R_{motor}$ ; não deixe o motor ficar ligado e travado (em *stall*) por muito tempo, ele irá esquentar muito e poderá ser danificado; cuidado também para não amassar a carcaça do motor ao prendê-lo;
- repita o procedimento acima, mas apoiando a outra extremidade do alicate de pressão em uma balança ou dinamômetro de mola (com o alicate na horizontal, veja a figura ao lado), e meça a diferença entre o peso na balança com o motor ligado travado e desligado, e multiplique pelo braço de alavanca do alicate para obter o torque máximo do motor  $\tau_{stall}$ ; por exemplo, se a balança lê 0,1kg com o motor desligado (por causa do peso do alicate) e 0,8kg com ele ligado, e o braço de alavanca (distância entre o eixo do motor e o ponto de apoio na balança) é 150mm, então  $\tau_{stall} = (0,8\text{kg} - 0,1\text{kg}) \cdot 9,81\text{m/s}^2 \cdot 0,150\text{m} = 1,03\text{N}\cdot\text{m}$ ;
- como  $\tau_{stall} = K_t \times (I_{stall} - I_{no\_load})$ , você pode obter a constante de torque do motor calculando  $K_t = \tau_{stall} / (I_{stall} - I_{no\_load})$ ;
- opcionalmente, se você conseguiu medir  $\omega_{no\_load}$  com um tacômetro ou carretel, então você pode obter a constante de velocidade usando  $K_v = \omega_{no\_load} / (V_{input} - R_{circuito} \times I_{no\_load})$ ; confira se o produto  $K_t \times K_v$  realmente dá 1, com  $K_t$  em  $\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$  e  $K_v$  em  $(\text{rad}/\text{s})/\text{V}$ , é uma medida redundante que diminui os erros de medição; se você não conseguiu medir  $\omega_{no\_load}$ , não há problema, calcule diretamente usando  $K_v = 1 / K_t$ ;
- finalmente, de posse dos valores de  $V_{input}$ ,  $K_t$  (e/ou  $K_v$ ),  $R_{circuito}$  e  $I_{no\_load}$ , você pode extrair toda a curva característica do seu sistema motor + bateria usando as equações apresentadas anteriormente.



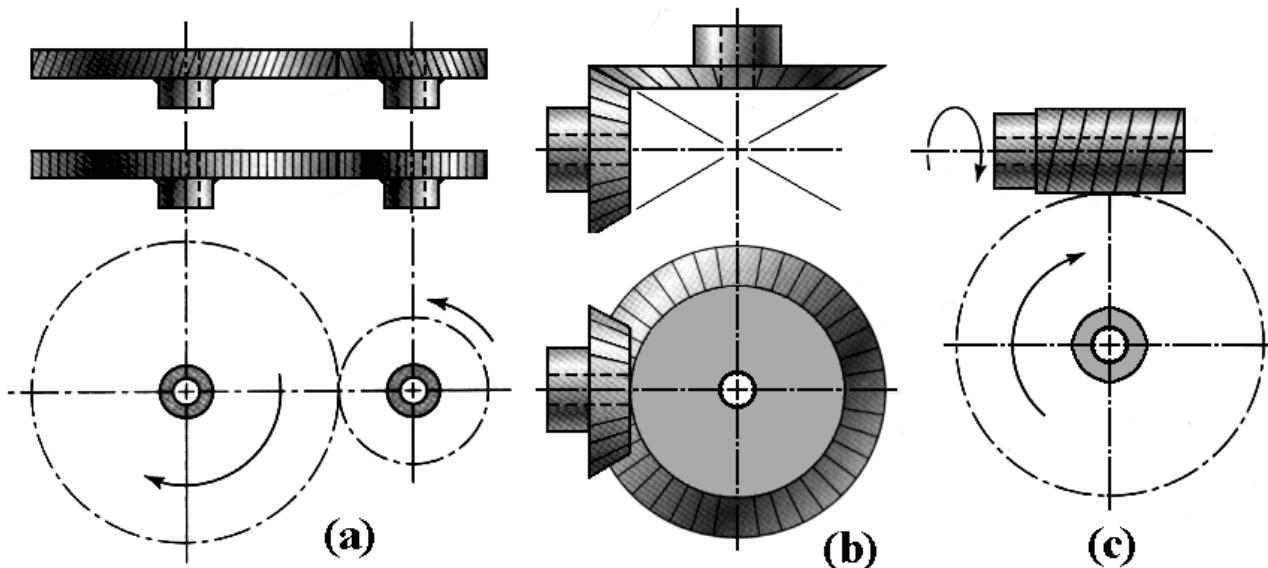
Mais especificamente, quanto a *hobbyweights* (12lbs, cerca de 5,5kg), em lojas de ferro-velho e sucata é possível achar muitos motores usados, já com redutores (chamados de motoredutores), principalmente dos fabricantes Pittman e Buehler. O *drum* Tourinho usa 2 motoredutores Buehler (com 300 gramas cada), e o *wedge* Puminha usa 4 motoredutores Pittman (com 500 gramas cada). Cada um saiu cerca de R\$25 a R\$30 (após chorar descontos, é claro), comprados usados. Muitos deles possuem tensão nominal 12V, no entanto estes costumam suportar 24V durante 3 minutos sem esquentar muito. Dobrando a tensão você quadruplica a potência do motor! O único problema é quanto às pequenas engrenagens que ficam dentro do motoredutor, que podem quebrar devido aos maiores torques em 24V. O jeito é testar caso a caso, e ter sempre motores reserva.

## 5.2. Transmissão de Potência

Para transmitir a potência dos motores para as rodas ou para a arma do robô, é necessário utilizar engrenagens, correias ou correntes. A seguir cada um desses elementos é descrito.

### 5.2.1. Engrenagens

Existem 3 principais tipos de engrenagens, representados na figura a seguir:

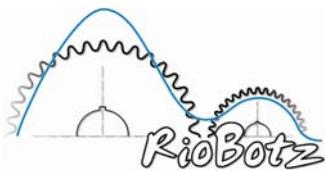


- (a) engrenagens cilíndricas (de dentes retos ou helicoidais);
- (b) engrenagens cônicas, com eixos perpendiculares e convergentes; e
- (c) sem fim e coroa, com eixos perpendiculares mas não convergentes.

Dentre as engrenagens cilíndricas, as de dentes retos não geram cargas axiais, mas são mais ruidosas que as helicoidais. As de dentes helicoidais são mais resistentes, porém geram cargas axiais, exceto as em dupla hélice (ou espinha de peixe), que cancelam estas cargas. Engraxe-as bem antes do uso para aumentar a vida útil. As caixas de redução da locomoção do Titan e Ciclone usam apenas engrenagens cilíndricas de dentes retos, em dois estágios. As engrenagens são de aço temperado para resistirem aos impactos dos combates. Evite usar engrenagens de ferro fundido ou aço doce usinado: veja na figura ao lado como ficou “banguela” a engrenagem do induzido do motor NPC T74 do nosso robô Anúbis.



As engrenagens cônicas são uma opção eficiente para transmitir potência a 90 graus. A caixa de redução da arma do Titan usa uma engrenagem cônica grande presa ao eixo da arma, acionada por 2 motores, cada um deles com uma engrenagem cônica menor. Note que nesse caso os dois motores acionam a mesma engrenagem grande da arma, duplicando a potência. Assim como nas cilíndricas,



a razão de redução entre duas engrenagens cônicas só depende da razão entre o número de dentes de cada uma.

Os redutores tipo sem fim e coroa são muito usados em motoredutores, pois possuem um grande potencial de redução (a razão de redução é igual ao número de dentes da coroa, que pode ser grande). Muitos possuem auto-travamento, ou seja, a coroa pode ser projetada para não conseguir girar o sem fim. Isso é perigoso em robôs de combate, pois um grande impacto na roda pode forçar a coroa e acabar quebrando seus dentes devido ao travamento no sem fim. Outra desvantagem está no rendimento baixo (perda de potência) devido ao deslizamento funcional entre o sem fim e a coroa. Por esse motivo, evite usar motores de vidro elétrico de automóveis: não só eles possuem baixa potência, como as perdas no sem fim são muito altas.

Nossos primeiros robôs, Lacrainha e Lacraia, usam redutores sem fim acionados por motores GPB. Além do baixo rendimento, as caixas de redução são muito pesadas por serem feitas de ferro fundido. É muito difícil achar no mercado nacional caixas de redução leves e eficientes. Para acionar as rodas, o ideal é utilizar uma caixa de redução fresada a partir de um bloco sólido de alumínio aeronáutico, com engrenagens cilíndricas de dentes retos ou helicoidais feitas de aço temperado. Usinar esse bloco sólido é muito difícil sem uma fresadora de controle numérico, pois qualquer pequeno erro (da ordem de 0,1mm) ou desalinhamento nos apoios dos eixos e rolamentos irá causar desgaste prematuro das engrenagens, sem contar perda de eficiência ou até travamento. Além disso, qualquer falha na fresadora durante a usinagem pode inutilizar este bloco sólido de alumínio aeronáutico, que não é barato.

Após algumas tentativas com a nossa fresadora manual, demos o braço a torcer e chegamos à conclusão que a caixa de redução TWM3M, na figura ao lado, apesar de cara (custa US\$360, sem o motor, no website [www.robotmarketplace.com](http://www.robotmarketplace.com)), vale cada centavo. Ela é feita a partir de um bloco sólido de alumínio aeronáutico fresado em CNC, as engrenagens são todas de aço temperado, e o eixo de saída para a roda é de titânio grau 5 (Ti-6Al-4V). Só as engrenagens e o material quase que pagam o seu valor. Nós usamos a TWM3M para acionar as rodas do Titan e do Touro.



### 5.2.2. Correias

Correias são elementos de máquinas flexíveis usados para transmitir força ou potência em distâncias relativamente longas, acionadas por polias. Estes elementos muitas vezes podem substituir com vantagens engrenagens e eixos pois, além de relativamente silenciosas, as correias ajudam a absorver choques e vibrações através de sua flexibilidade, e toleram algum desalinhamento entre as polias.



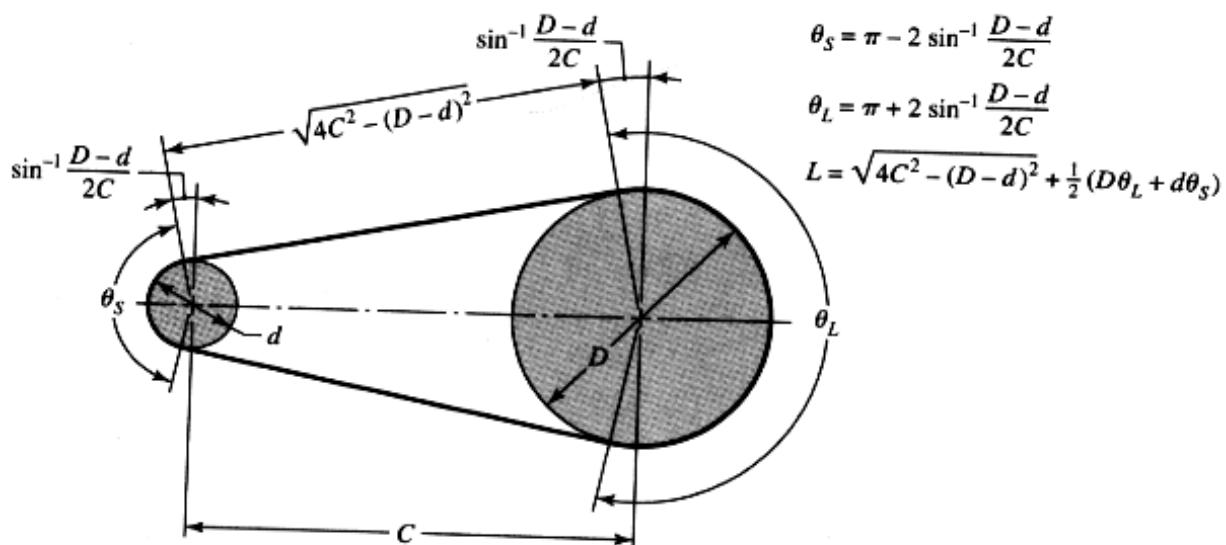
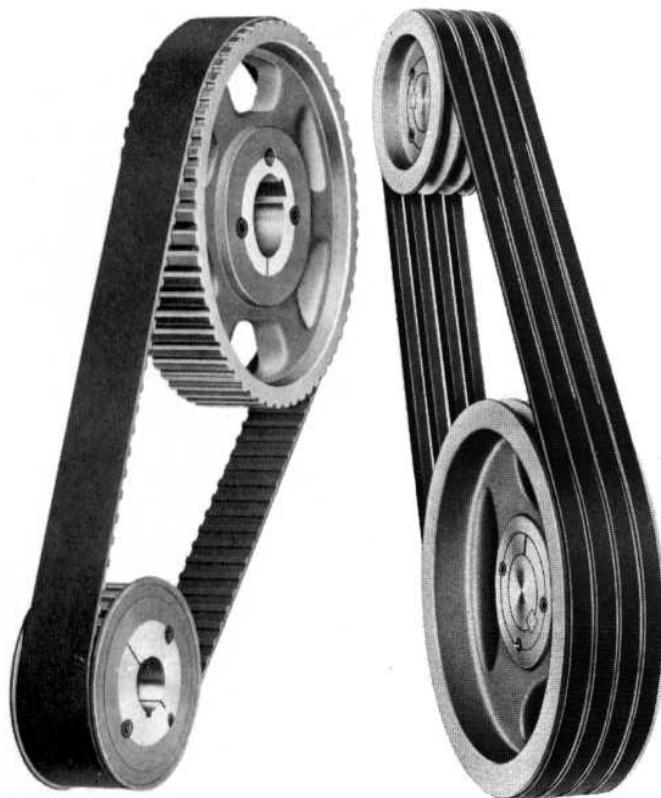
Os principais tipos de correias são as dentadas (ou síncronas, na figura à esquerda) e as em V (à direita), fabricadas em tamanhos padrão em tecido emborrachado ou base polimérica, em geral reforçadas com fibras de alta resistência.

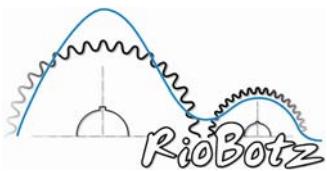
As correias dentadas mantêm a posição relativa entre as polias, sincronizando os movimentos e impedindo deslizamentos. São muito usadas para transmitir potência para as rodas dos robôs. Podem também ser usadas na arma do robô, mas nesse caso é necessário usar algum tipo de limitador de torque (discutido adiante) para suportar os impactos.

As correias em V, por outro lado, permitem que as polias tenham algum deslizamento relativo, com efeito similar ao de uma embreagem. Isso é muito útil nas armas dos robôs de combate, permitindo que haja deslizamento no instante do impacto contra o adversário, poupando o motor. O *drum Touro* usa um par de correias em V para acionar seu tambor.

Há ainda correias redondas (de seção reta circular), mas em geral só são usadas para transmitir potências pequenas, como numa máquina de costura, mas não em um robô *middleweight*.

O cálculo do comprimento nominal L da circunferência da correia é feito a partir da distância C entre os centros das polias e dos diâmetros primitivos da polia menor d e da maior D, usando as equações abaixo (note que  $\theta_S$  e  $\theta_L$  abaixo precisam estar em radianos).





Note também que diâmetros primitivos não podem ser medidos com paquímetro, eles são valores “imaginários” que precisam ser consultados em tabelas específicas, obtidos do catálogo do fabricante.

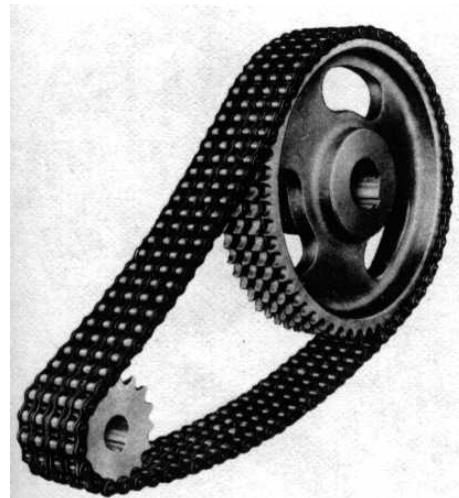
Um parâmetro importante na escolha de polias e correias dentadas é o passo, que é a distância entre dois dentes consecutivos. Quanto maior o passo, maiores são os dentes, e mais torque o sistema é capaz de transmitir. Para se ter uma idéia de escala, o *middleweight* Ciclone de 120lbs usa correias dentadas 8M (passo de 8mm), o *hobbyweight* Tourinho de 12lbs usa correias dentadas 5M (passo de 5mm), e o *beetleweight* Mini-Touro usa 3M (passo de 3mm) nos seus respectivos tambores.

### 5.2.3. Correntes

Correntes também são elementos flexíveis usados para transmitir força ou potência. São uma boa opção pois são baratas e podem ter qualquer comprimento, bastando regular seu tamanho com ferramentas específicas.

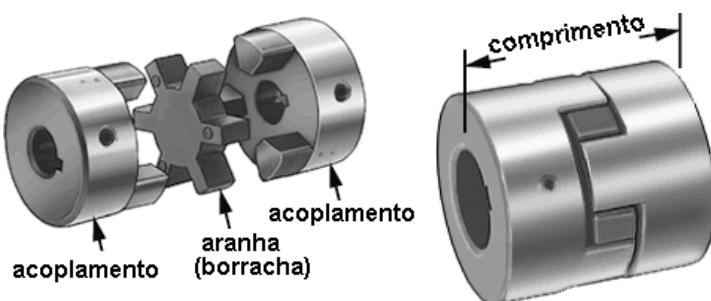
Suas desvantagens são:

- são menos eficientes que as correias, resultam em certa perda de potência;
- são barulhentas;
- podem requerer a instalação de tensionadores para manter as correntes esticadas;
- podem sair das coroas se houver algum desalinhamento, empenamento, ou se sofrerem um impacto muito grande – como robôs de combate costumam receber muitos impactos, deve-se tomar cuidado com esse tipo de transmissão.

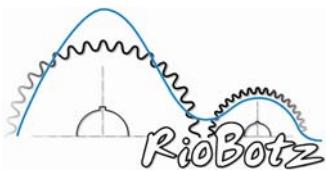


### 5.2.4. Acoplamentos Elásticos

Acoplamentos elásticos permitem que um eixo transmita potência a outro mesmo na presença de desalinhamentos. Eles consistem de 2 peças rígidas, normalmente de ferro fundido, uma presa em cada eixo, e de um elemento elástico (aranha de borracha) entre eles, veja a figura ao lado. São normalmente usados para acoplar o eixo do motor ao eixo da roda. Além de tolerarem desalinhamentos, eles absorvem impactos e vibrações, o que é altamente recomendável se as engrenagens do seu motor não forem muito resistentes.



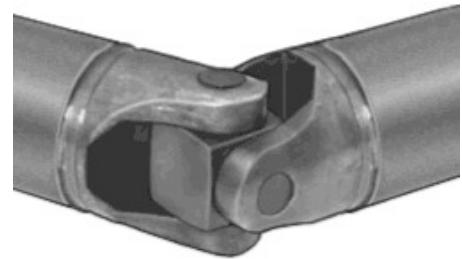
O Ciclone usa estes acoplamentos entre as rodas e os motores da furadeira DeWalt que as acionam, o que ajuda a evitar que uma infame engrenagem de plástico que existe em sua redução



venha a quebrar. Um inconveniente dos acoplamentos é seu comprimento relativamente grande, que aumenta a distância entre o motor e a roda e pode forçar seu robô a ficar mais largo.

Não use estes acoplamentos para acionar armas violentas, provavelmente a aranha de borracha não resistirá aos altos torques e impactos.

Uma outra forma de unir eixos desalinhados é através de juntas universais (figura ao lado). Evite ao máximo usá-las: elas são pesadas, sua resistência é relativamente baixa (basta comparar o diâmetro do eixo original com o pequeno diâmetro do pino que tem que transmitir os torques), e a eficiência energética é ruim, e piora quanto mais desalinhados estiverem os eixos. Tente usar correias ou correntes ao invés de juntas universais para conectar eixos desalinhados.



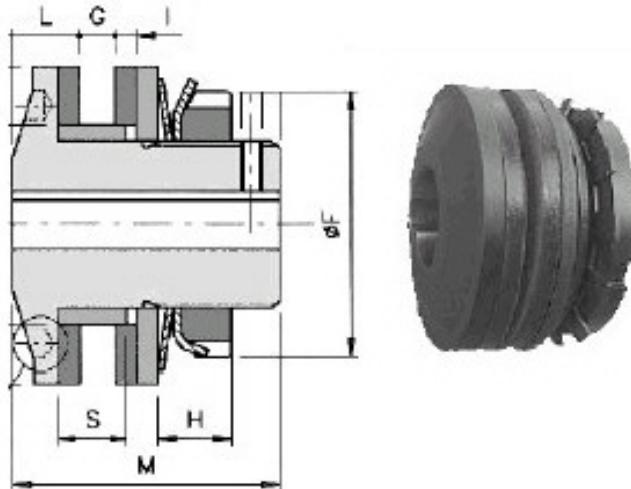
### 5.2.5. Limitadores de Torque

Limitadores de torque são elementos de transmissão de potência que permitem deslizamento relativo entre as peças acionadas, funcionando como uma embreagem.

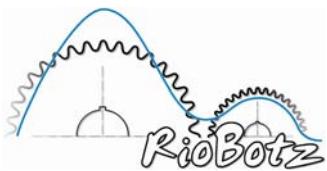
São muito importantes no acionamento de armas que sofram muitos impactos e que não usem correias em V ou algum outro tipo de embreagem para limitar os torques transmitidos de volta ao próprio robô.

A figura ao lado mostra o limitador de torque usado pelo robô Ciclone, o

DSF/EX 2.90, fabricado pela empresa italiana Comintec. A lâmina da arma fica ensanduichada entre 2 flanges, uma fixa e outra móvel. A flange móvel é apertada sobre a lâmina, com o auxílio de uma arruela de Belleville (vide capítulo 4) para garantir o aperto, de modo a transmitir torque por atrito para acelerar a arma. As flanges permitem que a lâmina deslize no evento de um impacto, de forma similar a uma embreagem.



Não é preciso comprar um limitador pronto. É possível fabricar seus próprios limitadores de torque menores, mais leves, mais resistentes e mais baratos que o da figura acima, bastando ficar atento ao seu princípio de funcionamento. O limitador de torque do Titan é muito menor que o do Ciclone e já está embutido no eixo da arma, economizando peso e aumentando a resistência. Além do eixo, que já contém uma flange em sua geometria, precisamos apenas de uma arruela de Belleville e de um colar rosulado para prender a lâmina do Titan.



## 5.3. Projeto do Acionamento das Rodas e da Arma

Com as informações sobre o funcionamento de motores DC e dos principais elementos de transmissão de potência, já podemos projetar o sistema de locomoção e de ataque do robô. Vamos apresentar a seguir alguns exemplos.

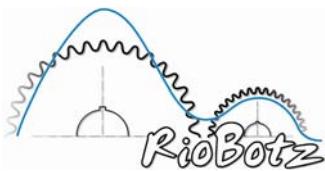
### 5.3.1. Exemplo: Projeto do Sistema de Locomoção do Touro

Vamos calcular o tempo de aceleração do nosso robô Touro e sua velocidade final. O Touro usa dois Magmotors S28-150, um para cada uma das duas rodas. As caixas de redução possuem razão  $n = 7,14$ , ou seja, a roda gira 7,14 vezes mais devagar que o motor, e com 7,14 vezes mais torque. A massa do Touro é cerca de 54kg, no entanto estimamos que as 2 rodas suportam cerca de 50kg ou menos, por não estarem exatamente alinhadas com o centro de gravidade do robô. Assim, cada roda suporta normalmente cerca de 25kg, o equivalente a  $25 \times 9,81 = 245\text{N}$ .



Vamos assumir que o coeficiente de atrito entre as rodas e o chão da arena é 0,9. Esse é um bom número para rodas com borracha de dureza 65 Shore A (vide capítulo 2) sobre o chão de aço de uma arena limpa. A maior força de tração que cada roda consegue gerar sem derrapar é então  $0,9 \times 245\text{N} = 220,5\text{N}$ . As rodas do Touro possuem 6" de diâmetro, logo seu raio vale  $r = 76,2\text{mm}$ . O torque que faz as rodas derraparem ("cantar pneu") é portanto  $220,5\text{N} \times 0,0762\text{m} = 16,8\text{N}\cdot\text{m}$ , e o torque que o Magmotor precisa fazer sobre a redução é  $\tau_{\max} = 16,8\text{N}\cdot\text{m} / 7,14 = 2,35\text{N}\cdot\text{m}$ . Como vimos na seção 5.1, esse motor consegue gerar torques de até  $6,0\text{N}\cdot\text{m}$ , portanto o Touro deverá "cantar pneu" na arrancada e só depois parar de deslizar. A corrente elétrica máxima em cada motor enquanto ele "cantar pneu" é  $I_{\max} = \tau_{\max} / K_t + I_{ho\_load} = 2,35/0,03757 + 3,4 = 66\text{A}$ . Se você for um piloto agressivo e passar 50% do round cantando pneu, então em 3 minutos (0,05 horas) gastaria nos 2 motores:  $2 \times 66\text{A} \times 0,05\text{h} \times 50\% = 3,3\text{A}\cdot\text{h}$  (aproximadamente, desprezando o consumo quando o robô não estiver acelerando). Assim, só para a locomoção, 1 pack de 24V e  $3,6\text{A}\cdot\text{h}$  provavelmente seria suficiente (mais detalhes sobre baterias estão no capítulo 7).

Mas cuidado com o limite de validade das contas: tínhamos calculado  $I_{stall} = 162\text{A}$  para cada motor, mas um pack de NiCd apenas não seria capaz de fornecer  $2 \times 162 = 324\text{A}$  para ambos os motores. Como na prática nós usamos 2 packs de baterias de 24V em paralelo no Touro, então não há esse problema, ambos conseguem gerar juntos 324A (pelo menos com o tambor desligado). Repare também que se usássemos dois packs em paralelo para acionar um único motor, teríamos uma resistência equivalente igual à metade de um pack,  $0,080\Omega / 2 = 0,040\Omega$  nesse caso, o que alteraria as contas acima. Porém, como usamos 2 packs para acionar 2 motores, as contas usando  $0,080\Omega$  continuam válidas.



A velocidade máxima teórica do Touro, se não houvesse perdas por atrito na caixa de redução, ocorreria quando o motor girasse a  $\omega_{no\_load} = 5968\text{RPM} = 625\text{rad/s}$ , gerando  $v_{max} = (\omega_{no\_load} / n) \times r = (625 / 7,14) \times 0,0762\text{m} = 6,67\text{m/s} = 24\text{km/h}$ , uma velocidade relativamente alta para *middleweights*.

O Touro “canta pneu” enquanto o sistema conseguir gerar  $I_{max} = 66\text{A}$ , o que ocorre apenas para rotações baixas do motor de zero até  $\omega_1 = K_v \times (V_{input} - R_{circuito} \times I_{max}) = 254 \times (24 - 0,148 \times 66) = 3615\text{RPM} = 379\text{rad/s}$ . A velocidade do robô na qual as rodas páram de deslizar é  $v_1 = (\omega_1 / n) \times r = (379 / 7,14) \times 0,0762\text{m} = 4,04\text{m/s} = 14,5\text{km/h}$ . Nesse intervalo, com as rodas deslizando, a aceleração do robô é igual ao coeficiente de atrito vezes a aceleração da gravidade, e vale  $a_1 = 0,9 \times 9,81 = 8,83\text{m/s}^2$ . Esse movimento uniformemente acelerado ocorre então num intervalo de tempo  $\Delta t_1 = v_1 / a_1 = 4,04 / 8,83 = 0,46\text{s}$ .

Após esse intervalo, a corrente no motor começa a diminuir, ficando abaixo de 66A. A corrente a cada instante é  $I_{input} = [V_{input} / R_{circuito}] - [\omega / (K_v \times R_{circuito})] = I_{stall} - [\omega / (K_v \times R_{circuito})]$ , e o torque do motor resulta em

$$\tau = K_t \cdot (I_{input} - I_{no\_load}) = K_t \cdot (I_{stall} - I_{no\_load} - \frac{\omega}{K_v \cdot R_{circuito}})$$

logo o torque de cada roda é  $\tau \times n$ , e a força de tração de cada uma é  $\tau \times n / r$ . As 2 rodas geram juntas então o dobro dessa força, e daí pela segunda lei de Newton  $2 \times \tau \times n / r = 55\text{kg} \times a_2$ . A aceleração  $a_2$  do robô varia pois depende da velocidade  $\omega$  dos motores:

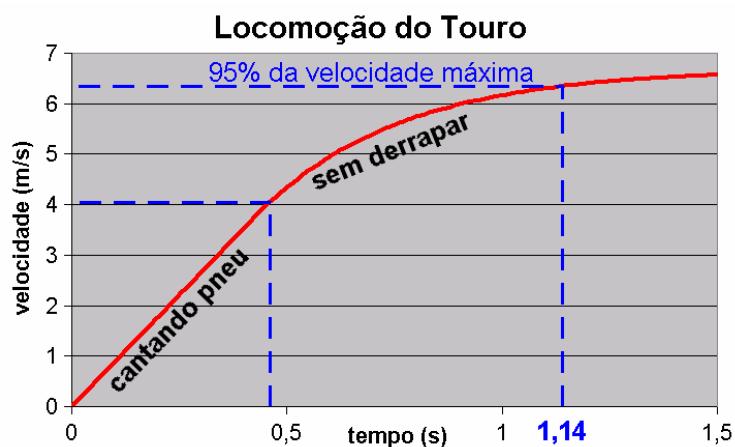
$$a_2 = \frac{2 \cdot n}{r \cdot 55} \cdot K_t \cdot (I_{stall} - I_{no\_load} - \frac{\omega}{K_v \cdot R_{circuito}}) = \frac{2 \cdot 7,14}{0,0762 \cdot 55} \cdot 0,03757 \cdot (162 - 3,4 - \frac{\omega}{26,62 \cdot 0,148})$$

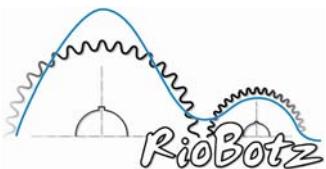
e assim  $a_2 = 20,3 - 0,0325 \cdot \omega$  (cuidado pois  $K_v$  precisa estar em  $(\text{rad/s})/\text{V}$ , e não  $\text{RPM/V}$ ). Como as rodas pararam de deslizar, a velocidade do robô é  $v = (\omega / n) \times r = \omega / 93,7$ , logo  $a_2 = 20,3 - 3,04 \cdot v$ .

O robô nunca chega à velocidade máxima teórica, pois o comportamento é assintótico. Mas o intervalo de tempo entre o instante que deixou de deslizar (quando  $v = 4,04\text{m/s}$ ) até atingir por exemplo 95% da velocidade máxima ( $v = 0,95 \times 6,67\text{m/s} = 6,34\text{m/s}$ ) pode ser calculado:

$$\Delta t_2 = \int dt = \int_{4,04}^{6,34} \frac{dv}{20,3 - 3,04 \cdot v} = \frac{1}{3,04} \cdot \ln \left( \frac{20,3 - 3,04 \cdot 4,04}{20,3 - 3,04 \cdot 6,34} \right) = 0,68\text{s}$$

Assim, o tempo total de aceleração do Touro, desde o repouso até 95% de sua velocidade máxima é  $\Delta t_1 + \Delta t_2 = 0,46 + 0,68 = 1,14\text{s}$ , um valor bem próximo ao medido na prática. O gráfico ao lado resume os resultados. Se o seu robô não conseguir “cantar pneu”, então basta calcular a integral acima saindo da velocidade  $v = 0$  (ou seja,  $\Delta t_1 = 0$ , e só haverá  $\Delta t_2$ ).





Note que para o robô ser ágil é importante que esse tempo seja pequeno, como no Touro – de nada adianta uma velocidade final muito alta se você não conseguir alcançá-la rapidamente ou antes de atravessar toda a arena.

É importante frisar que as contas acima também valeriam se o robô tivesse 4 rodas ativas acionadas pelos mesmos 2 motores. O torque de cada motor seria dividido por 2 rodas, em compensação o impulso das 2 rodas de cada lado seria somado, e no final o resultado seria o mesmo. Se houvesse 4 motores para as 4 rodas, aí sim o resultado das contas mudaria, pois estariam dobrando a potência do sistema.

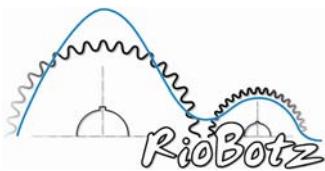
### 5.3.2. Exemplo: Projeto da Arma do Touro

Vamos calcular o tempo de aceleração do tambor do Touro, e a energia nele armazenada. O tambor do Touro pode ser aproximado por um cilindro de aço de raios externo  $R = 65\text{mm}$  e interno  $r = 40\text{mm}$ , com comprimento  $L = 180\text{mm}$ . Sendo 7,8 a densidade do aço, a massa do tambor é  $m = \pi \cdot (0,065^2 - 40^2) \cdot 180 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} \text{kg/mm}^2 = 11,6\text{kg}$ . O momento de inércia de rotação em relação ao eixo horizontal é  $I_{zz} = m \cdot (R^2 + r^2)/2 = 11,6 \cdot (65^2 + 40^2)/2 = 33785\text{kg}\cdot\text{mm}^2 = 0,0338\text{kg}\cdot\text{m}^2$ .



O motor da arma é o Magmotor S28-400 (vide figura ao lado) conectado a 2 packs de baterias de NiCd em paralelo. Temos  $V_{\text{input}} = 24\text{V}$ , e esse motor tem  $K_t = 0,0464\text{N}\cdot\text{m/A}$ ,  $R_{\text{motor}} = 0,042\Omega$ , e  $I_{\text{no\_load}} = 4,5\text{A}$ . Temos  $K_v = 1/K_t = 21,55 (\text{rad/s})/\text{V} = 206 \text{ RPM/V}$ . A resistência do motor precisa ser somada à resistência da eletrônica/solenóide (cerca de  $0,004\Omega$ ) e das baterias, que por estarem em paralelo têm resistência equivalente igual à metade da de 1 pack ( $0,080\Omega / 2 = 0,040\Omega$  nesse caso), resultando em  $R_{\text{circuito}} = 0,042 + 0,004 + 0,040 = 0,086\Omega$ . Repare que esses 2 packs são os mesmos usados no acionamento das rodas do Touro, por isso vamos assumir nessas contas da arma que o robô não está se locomovendo.

As polias em V da arma do Touro possuem mesmo diâmetro, portanto não há redução de velocidade ( $n = 1$ ). A velocidade final teórica do tambor é então  $\omega_{\text{no\_load}} = 206 \times (24 - 0,086 \times 4,5) = 4864\text{RPM} = 509\text{rad/s}$ . Na prática, por causa das perdas por atrito no sistema, o tambor gira a um pouco mais de 4750RPM, que medimos usando um tacômetro estroboscópico. Já a corrente de pico no começo da aceleração é  $I_{\text{stall}} = 24 / 0,086 = 279\text{A}$ . Repare que o ideal é que as correias em V não deslizem durante a aceleração, mas sim no instante do impacto. Para isso é importante que elas estejam bem tensionadas. Assumindo que elas não deslizem na aceleração, a questão que resta é saber se as baterias conseguem fornecer os 279A. Se isso não for verdade, precisaríamos dividir as contas em 2 etapas: num intervalo de tempo inicial em que as baterias estejam fornecendo sua máxima capacidade (no caso, uma certa corrente menor que 279A) e em outro em que as baterias já consigam suprir as necessidades do motor. A solução desse problema não é difícil, as contas são parecidas com aquelas feitas no projeto da locomoção, somando os intervalos de tempo obtidos nas 2 etapas.



No caso do Touro, as baterias conseguem fornecer juntas os 279A, o que facilita os cálculos. O torque do motor é função da sua velocidade angular  $\omega$ :

$$\tau = K_t \cdot (I_{\text{input}} - I_{\text{no\_load}}) = K_t \cdot (I_{\text{stall}} - I_{\text{no\_load}} - \frac{\omega}{K_v \cdot R_{\text{círculo}}}) = 12,74 - 0,025 \cdot \omega$$

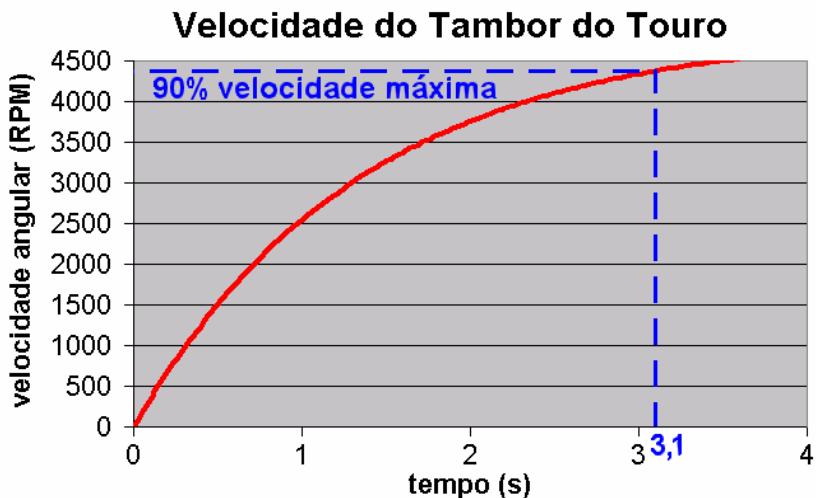
Como a redução  $n = 1$ , esse torque é diretamente aplicado ao tambor para acelerá-lo:

$$\tau = I_{zz} \cdot \frac{d\omega}{dt} \Rightarrow 12,74 - 0,025 \cdot \omega = 0,0338 \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

O tempo de aceleração do tambor desde o repouso até 90% de sua velocidade máxima ( $0,90 \times 509 = 458 \text{ rad/s}$ ) é então

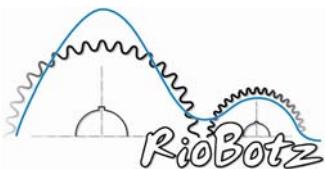
$$\Delta t = \int dt = \int_0^{458} \frac{0,0338 \cdot d\omega}{12,74 - 0,025 \cdot \omega} = \frac{0,0338}{0,025} \cdot \ln \left( \frac{12,74 - 0,025 \cdot 0,0}{12,74 - 0,025 \cdot 458} \right) = 3,1 \text{ s}$$

O gráfico ao lado resume os resultados. Considerando as perdas por atrito, espera-se na prática que o valor real seja um pouco acima de 3,1s. Em compensação, baterias de NiCd de 24V quando totalmente carregadas chegam a até 28V, o que reduz um pouco o tempo de aceleração. De qualquer forma, a estimativa acima é razoável, o tempo medido experimentalmente foi cerca de



3s. Em geral é bom que esse intervalo de tempo seja menor que 4 segundos (como discutido no capítulo 2), portanto 3s é um valor satisfatório. Repare que essas contas assumiram que o robô não está se locomovendo, e portanto os 2 packs de bateria estão sendo usados exclusivamente para acelerar a arma. Se ele estivesse “cantando pneu” durante toda a aceleração da arma, então naturalmente o tempo calculado seria maior que 3s.

A energia cinética acumulada no tambor após esse intervalo de tempo é  $E = I_{zz} \cdot \omega^2 / 2 = 0,0338 \cdot 458^2 / 2 = 3545 \text{ J}$  (para 90% da rotação máxima), o equivalente a cerca de 10 tiros de calibre 38 ou 1 tiro de fuzil. A energia cinética máxima real, para os 4750RPM (497 rad/s) medidos, é  $E = I_{zz} \cdot \omega^2 / 2 = 0,0338 \cdot 497^2 / 2 = 4174 \text{ J}$ . Essa energia seria teoricamente capaz de arremessar um adversário de 55kg a uma altura de  $h = E / (m \cdot g) = 4174 / (55 \cdot 9,81) \approx 7,7 \text{ metros}$ . Na prática a altura é bem menor pois o impacto não é totalmente transmitido ao adversário, e muita da energia é dissipada na forma de deformação do outro robô (ou seja, destruição!).



### 5.3.3. Consumo de Energia de Armas Giratórias

Calcular o consumo do motor de uma arma giratória também é importante, para que se dimensione a capacidade das baterias. O consumo é formado basicamente por 2 parcelas: uma para acelerar a arma após cada impacto, e outra para vencer os atritos nela presentes.

Pode-se estimar o consumo da bateria durante a aceleração de uma arma giratória (de momento de inércia  $I_{zz}$  na direção de giro) assumindo que  $I_{no\_load}$  seja muito menor que  $I_{stall}$  (o que é verdade para quase todos os motores DC). Nesse caso, o torque do motor seria  $\tau = K_t \times I_{input}$ . O torque transmitido à arma após uma redução de n:1 é  $\tau_{arma} = (\tau \times n)$ , e a velocidade angular da arma fica reduzida para  $\omega_{arma} = (\omega / n)$ . Na equação  $\omega = K_v \times (V_{input} - R_{circuito} \times I_{input})$ , os únicos termos que variam são  $\omega$  e  $I_{input}$ , os outros são todos constantes, portanto  $d\omega/dt = -K_v \times R_{circuito} \times dI_{input}/dt$ . A equação da dinâmica fica então:

$$\tau_{arma} = I_{zz} \cdot \frac{d\omega_{arma}}{dt} \Rightarrow \tau \cdot n = \frac{I_{zz}}{n} \cdot \frac{d\omega}{dt} \Rightarrow K_t \cdot I_{input} \cdot n = -\frac{I_{zz} \cdot K_v \cdot R_{circuito}}{n} \cdot \frac{dI_{input}}{dt}$$

e assim

$$I_{input} dt = -\frac{I_{zz} \cdot K_v \cdot R_{circuito}}{K_t \cdot n^2} \cdot dI_{input}$$

O consumo da bateria é obtido integrando-se a corrente ao longo do tempo, desde o seu valor inicial  $I_{stall}$  (no início da aceleração da arma) até o valor final zero (pois aproximou-se  $I_{no\_load} = 0$ ), logo

$$\text{Consumo} = \int I_{input} dt = -\frac{I_{zz} \cdot K_v \cdot R_{circuito}}{K_t \cdot n^2} \cdot \int_{I_{stall}}^0 dI_{input} = \frac{I_{zz} \cdot K_v \cdot R_{circuito}}{K_t \cdot n^2} \cdot I_{stall}$$

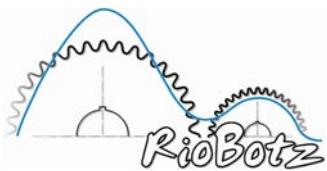
Essa equação é válida para qualquer arma giratória acionada por motores DC (tome cuidado com as unidades,  $K_v$  deve estar em rad/s e o resultado sai em A·s). No caso do Touro, o consumo a cada aceleração do tambor é

$$\text{Consumo} = \frac{0,0338 \cdot 21,55 \cdot 0,086}{0,0464 \cdot 1^2} \cdot 279 = 377 \text{ A} \cdot \text{s} = 0,104 \text{ A} \cdot \text{h}$$

No entanto, falta considerar a parcela do consumo devida aos atritos da arma. Isso precisa ser medido experimentalmente. Nós ligamos o tambor do Touro e, na sua velocidade máxima, a corrente no motor medida com um amperímetro é cerca de 40A. Esse valor é consumido constantemente durante todo o tempo em que o tambor estiver ligado.

Vamos considerar que o tambor fique ligado durante todo o round, e que ele provoque cerca de 10 grandes impactos no adversário (precisando acelerar completamente 10 vezes). O consumo total da arma em um round de 3 minutos (180 segundos) é então aproximadamente:

$$\text{Consumo Total da Arma} = 40 \text{ A} \times 180 \text{ s} + 10 \times 377 \text{ A} \cdot \text{s} = 7200 \text{ A} \cdot \text{s} + 3770 \text{ A} \cdot \text{s} = 10970 \text{ A} \cdot \text{s} \approx 3,1 \text{ A} \cdot \text{h}$$



Note que a maioria do consumo da arma (quase 66% no caso) é para vencer o atrito, portanto use sempre na arma rolamentos bem lubrificados e se possível blindados para não entrar detritos, minimizando as perdas. Buchas de bronze também podem ser usadas como mancais de deslizamento, mas seu atrito costuma ser maior, e elas podem esquentar muito em altas rotações.

O consumo final do Touro em 3 minutos, somando a locomoção (com um piloto agressivo “cantando pneu” metade do round, como calculado anteriormente) e a arma (acionada o tempo todo e causando 10 grandes impactos) é  $3,3A \cdot h + 3,1A \cdot h = 6,4A \cdot h$ , portanto 2 packs de bateria de 24V de 3,6A·h cada (total 7,2A·h) são mais que suficientes.

Com essas contas também dá para planejar a estratégia do piloto em caso de contingência. Por exemplo, se for preciso usar 2 packs de apenas 2,4A·h cada (total 4,8A·h), o piloto pode “cantar pneu” só 25% do tempo, desligar a arma durante 30% do round (atacando como um robô tipo *ram* nesse período), e ainda assim ser capaz de causar 10 grandes impactos, pois refazendo as contas o consumo seria cerca de  $1,65A \cdot h$  (locomoção) +  $2,45A \cdot h$  (arma) =  $4,1A \cdot h$ , o que seria suficiente com alguma folga.

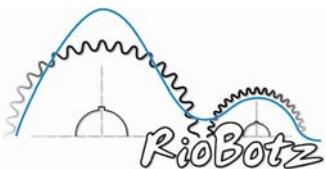
#### 5.3.4. Efeito Giroscópico

Uma característica interessante dos robôs com arma giratória é o efeito giroscópico. *Vertical spinners* e *drums* tendem a empinar a lateral quando fazem curvas com a arma ligada, como na foto ao lado do Touro, onde ele chega a girar com apenas 1 roda no chão. Essa empinada, além de impressionar os juízes, funciona como uma excelente “dança da vitória” ao final do round. No entanto, se o robô empinar demais isso pode ser prejudicial durante um round, pois ele terá mais dificuldade em fazer curvas e manobras rápidas e precisas. Mas o que causa o efeito giroscópico?



O efeito giroscópico vem da tendência dos corpos de manterem seu movimento, no caso manterem seu momento angular. Quando o Touro tenta fazer uma curva com a arma ligada, ele está forçando o tambor a alterar a sua direção de rotação, e por isso é mais difícil fazer a manobra.

*Spinners* não têm esse problema, pois ao fazer uma curva eles não alteram a direção de rotação da arma, que continua girando em um eixo vertical. Porém os *spinners* costumam ter uma pequena dificuldade em fazer curvas no sentido oposto ao que a arma gira, e fazem curvas mais facilmente no mesmo sentido. Isso não tem nada a ver com efeito giroscópico, é simplesmente causado pelo atrito entre a lâmina e a estrutura, que tende a girar o robô no mesmo sentido da arma. Esse efeito normalmente é pequeno. O efeito giroscópico nos *spinners* aparece quando alguém tenta virá-los, capotá-los, pois o alto giro da arma garante uma certa estabilidade no robô e o ajuda a se manter horizontal. O Ciclone escapou de muitas potenciais capotagens por causa desse efeito.



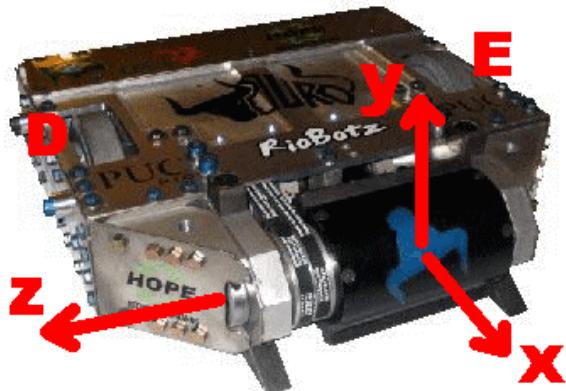
Existem *spinners* cujo eixo de rotação da arma não é vertical, ele possui uma pequena inclinação para frente, para que a lâmina passe mais perto do chão na parte da frente do robô (figura ao lado). Esses *spinners* sofrem um pouco do efeito giroscópico, proporcional ao seno do ângulo entre o eixo de rotação da arma e a vertical. Quanto menor o ângulo, menos efeito. Esse tipo de *spinner* tem um problema sério: há a chance de o robô ser arremessado para o alto e capotar. Isso porque, se por exemplo a lâmina girar no sentido mostrado na figura, ele não terá problemas ao acertar de frente ou pelo seu lado esquerdo (o lado “bom” mostrado na figura, que bate de baixo para cima) um adversário, mas pelo lado direito (o lado “ruim”) o princípio da ação e reação poderá causar a sua própria capotagem ao bater de cima para baixo.



O efeito giroscópico, além de dificultar as curvas de *vertical spinners* e *drums*, causa também o fenômeno da precessão, o mesmo que garante que um pião possa ficar girando inclinado sem cair. Esse fenômeno faz com que o robô empine a lateral. A precessão da arma de um robô pode ser calculada pelo princípio do momento angular (que gera as equações de Euler), que depende do momento de inércia de rotação da arma em relação ao eixo em que ela gira (no caso o horizontal)  $I_{zz}$ , e dos momentos nas 2 outras direções,  $I_{xx}$  e  $I_{yy}$ .

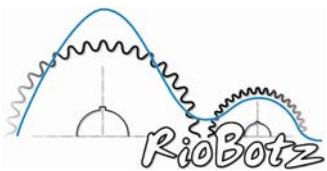
As armas desses robôs normalmente têm simetria axial (como nos discos dos *vertical spinners* e nos cilindros dos *drums*), e portanto  $I_{xx} = I_{yy}$ . Na figura ao lado, o sentido do eixo z foi arbitrado na direção em que a arma gira de modo a arremessar os adversários para o alto, com velocidade angular  $\omega_z$ . Note que as rodas esquerda e direita do robô estão representadas pelas letras E e D respectivamente. O eixo y foi escolhido como o vertical e o x aponta horizontalmente para a frente. Quando o robô está girando em torno do próprio eixo (fazendo uma curva) com velocidade angular  $\omega_y$  e com a arma ligada com  $\omega_z$ , o princípio do momento angular resulta em

$$\tau_x \cong I_{zz} \cdot \omega_z \cdot \omega_y$$

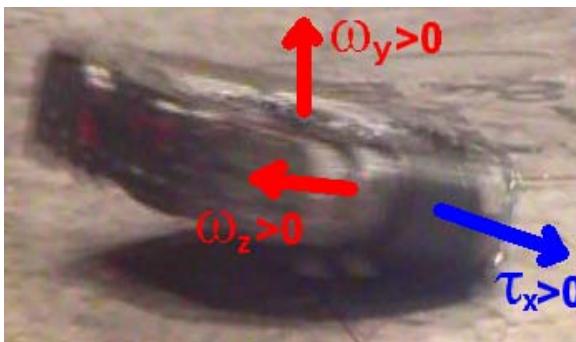


onde  $\tau_x$  é um torque externo aplicado na direção de x. Essa equação é uma boa aproximação se o ângulo da “empinada” do robô em relação à horizontal for pequeno.

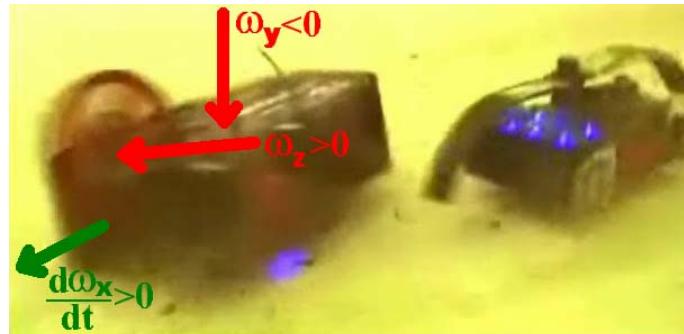
Se o robô fizer uma curva para a esquerda, então  $\omega_y > 0$ , e assim pela equação acima  $\tau_x > 0$ . Isso significa que a força da gravidade precisa fazer um torque positivo em x para manter o sistema em equilíbrio, que é o que ocorre quando a roda direita (D) levanta do chão, veja a figura a seguir à esquerda. Analogamente, se o robô faz uma curva para a direita, então  $\omega_y < 0$ , e assim  $\tau_x < 0$ , torque



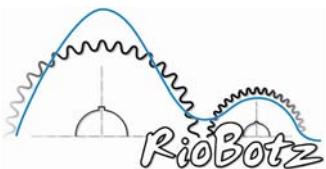
esse que a força da gravidade consegue exercer quando a roda esquerda (E) levanta do chão, veja a figura à direita.



Esses resultados são os mesmos tanto para *drums* quanto para *vertical spinners*. Por exemplo, na primeira final do Winter Challenge 2005, o *vertical spinner* Vingador girava sua arma (disco) com  $\omega_z > 0$ . Ao receber um impacto do *spinner* Ciclone, o Vingador começou a rodopiar com velocidade  $\omega_y < 0$  (no sentido horário). Para manter esse movimento em equilíbrio seria necessário um torque  $\tau_x < 0$ , no entanto mesmo levantando a roda esquerda a gravidade não conseguiu gerar torque suficiente para compensar o movimento. O vingador continuou então empinando ( $d\omega_x/dt > 0$ ) até terminar virado com o seu lado direito apoiado no chão.



*Vertical spinners* costumam ter muito mais problema com o efeito giroscópico que *drums*. O motivo é porque o efeito giroscópico é proporcional à velocidade angular da arma  $\omega_z$ , enquanto que a energia cinética depende de  $\omega_z^2$ . *Vertical spinners* costumam ter  $\omega_z$  mais baixo e momento de inércia da arma  $I_{zz}$  mais alto que os *drums*. Assim, por exemplo, um *vertical spinner* que gira um disco sólido de massa  $m = 10\text{kg}$  e raio  $R = 0,3\text{m}$  a  $\omega_z = 1000\text{RPM} = 105\text{rad/s}$  tem  $I_{zz} = m \cdot R^2 / 2 = 10 \cdot 0,3^2 / 2 = 0,45\text{kg} \cdot \text{m}^2$  e energia cinética da arma  $E = I_{zz} \cdot \omega_z^2 / 2 = 0,45 \cdot 105^2 / 2 = 2481\text{J}$ . Um *drum* que gira um cilindro de massa  $m = 10\text{kg}$  de raios externo e interno  $R = 0,06\text{m}$  e  $r = 0,04\text{m}$  a  $\omega_z = 4173\text{RPM} = 437\text{rad/s}$  tem  $I_{zz} = m \cdot (R^2 + r^2) / 2 = 10 \cdot (0,06^2 + 0,04^2) / 2 = 0,026\text{kg} \cdot \text{m}^2$  e energia cinética da arma  $E = I_{zz} \cdot \omega_z^2 / 2 = 0,026 \cdot 437^2 / 2 = 2483\text{J}$ , praticamente a mesma energia do *vertical spinner*, logo são robôs com poderio bélico equivalente. No entanto, o momento angular da arma do *vertical spinner* é  $I_{zz} \cdot \omega_z = 0,45 \cdot 105 = 47,25$ , muito maior que o do *drum*  $I_{zz} \cdot \omega_z = 0,026 \cdot 437 = 11,36$ . Como o efeito giroscópico depende do fator  $I_{zz} \cdot \omega_z$ , um *drum* vai sofrer muito menos influência e assim empinar menos que um *vertical spinner* de energia equivalente.



Dá para fazer uma estimativa um pouco melhor sobre o efeito giroscópico, considerando a inclinação  $\alpha$  em relação à horizontal (figura ao lado), que antes era assumida muito pequena. Ao girar no próprio eixo com velocidade  $\omega_y$  e com a arma ligada girando a  $\omega_z$ , o robô se inclina de  $\alpha$ . A projeção do vetor  $\omega_z$  na vertical,  $\omega_z \cdot \text{sen}\alpha$ , não muda de direção, mas a projeção horizontal  $\omega_z \cdot \cos\alpha$  gira ao redor do eixo y com velocidade  $\omega_y$ , sendo responsável pelo efeito giroscópico. O torque  $\tau_x$  que a gravidade exerce sobre o robô é igual a  $M \cdot g \cdot d \cdot \cos\alpha$  onde  $M$  é a massa de todo o robô,  $g$  a aceleração da gravidade, e  $d$  é a distância entre cada roda e o centro do robô (vide a figura). Assumindo que  $\omega_z$  é muito maior que  $\omega_y$  (pois a arma gira muito mais rapidamente que o robô), o princípio do momento angular diz que a “empinada” está em equilíbrio se  $\omega_y = \omega_{y,\text{crítico}}$ , onde:

$$\tau_x = M \cdot g \cdot d \cdot \cos\alpha = I_{zz} \cdot (\omega_z \cos\alpha) \cdot \omega_{y,\text{crítico}}$$

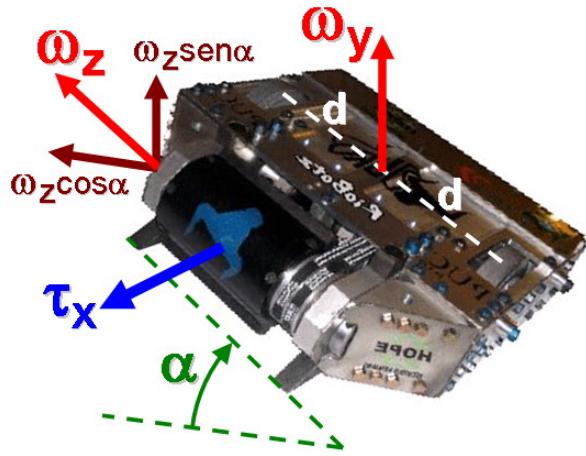
Cancelando o  $\cos\alpha$  da equação, descobrimos que

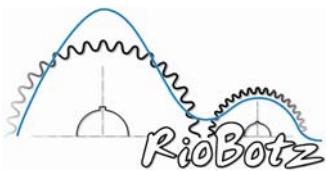
$$\omega_{y,\text{crítico}} = \frac{M \cdot g \cdot d}{I_{zz} \cdot \omega_z}$$

ou seja, se você fizer uma curva com velocidade  $\omega_y$  aproximadamente igual a  $\omega_{y,\text{crítico}}$ , o robô vai empinar, num ângulo  $\alpha$  que pode ser qualquer (a estabilidade independe de  $\alpha$ , pelo menos nessa aproximação do modelo). Se  $\omega_y$  for menor que  $\omega_{y,\text{crítico}}$ , o robô não levanta a roda. E se  $\omega_y$  for maior que  $\omega_{y,\text{crítico}}$ , o robô empina totalmente, ficando virado de lado. Na final do Winter Challenge 2005, o impacto do Ciclone com certeza fez o Vingador girar com uma velocidade  $\omega_y$  maior que o seu valor  $\omega_{y,\text{crítico}}$ , causando a virada.

No exemplo anterior comparando um *vertical spinner* e um *drum* de mesma energia, assumindo que  $M = 55\text{kg}$  e  $d = 0,2\text{m}$ , teríamos pela equação acima que o *vertical spinner* não poderia fazer curvas a mais de  $\omega_{y,\text{crítico}} = 2,28\text{rad/s} = 21,8\text{RPM}$  sem levantar a roda e arriscar virar de lado. Já o *drum* poderia fazer curvas a até  $\omega_{y,\text{crítico}} = 9,5\text{rad/s} = 90,7\text{RPM}$  sem sair do chão, um valor muito mais razoável.

Enfim, para evitar que o robô vire de lado, é preciso que o seu valor  $\omega_{y,\text{crítico}}$  seja o maior possível. Por isso é importante que a base de um *vertical spinner* ou *drum* seja larga, pois quanto maior a distância entre as rodas, maior o valor de  $d$ , e pela equação acima maior fica o  $\omega_{y,\text{crítico}}$ . Se o *vertical spinner* do exemplo acima tivesse base mais larga, por exemplo com  $d = 0,3\text{m}$  (distância de 600mm entre as rodas), refazendo as contas ele poderia fazer curvas a quase 33RPM, ou seja, podendo girar 180 graus em menos de 1 segundo, um valor mais razoável para conseguir se manter de frente para o adversário.





## 5.4. Sistemas Pneumáticos, Hidráulicos e à Combustão

Até agora focamos basicamente em motores DC, por serem os atuadores mais usados em combate. No entanto há outras formas de acionamento tão boas ou até melhores que sistemas elétricos, que pecam apenas pela sua maior complexidade e em muitas vezes pela falta de confiabilidade.

### 5.4.1. Sistemas Pneumáticos

Sistemas pneumáticos são capazes de gerar uma grande quantidade de energia em um curto espaço de tempo, o que é fundamental para robôs com armas intermitentes como *launchers* (foto ao lado) e *hammers*. São normalmente acionados por ar ou nitrogênio ( $N_2$ ) sob alta pressão, ou gás carbônico ( $CO_2$ ) líquido.

$CO_2$  tem a vantagem de ser armazenado nos tanques em forma líquida, permitindo uma grande quantidade de gás em um espaço pequeno. A pressão de armazenamento fica em torno de 850 a 1000psi (cerca de 60 a 70 atmosferas). Por ser usado em armas de paintball, muitos componentes para  $CO_2$  são fáceis de serem achados. O problema do  $CO_2$  é que a mudança de fase de líquido para gás é um processo endotérmico, o que pode fazer os seus tanques congelarem durante um round.

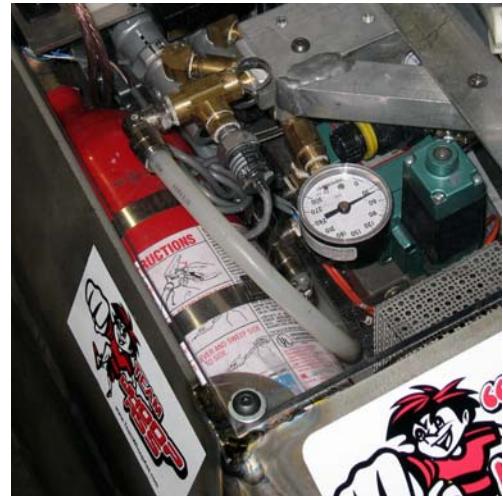
Ar ou  $N_2$  podem ser comprimidos até pressões muito altas, como 3000psi (cerca de 200 atmosferas). As vantagens sobre o  $CO_2$  são não terem o problema de congelamento, e serem gases mais leves (poupando até 0,5kg em *middleweights* típicos com o tanque cheio). A desvantagem está na necessidade de componentes que suportem pressões mais altas, que são mais caros. Além disso, algumas competições limitam a pressão que pode ser armazenada nos robôs.

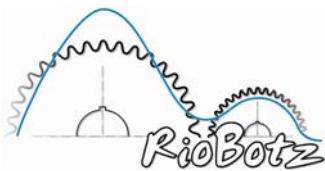
De forma simplificada, os sistemas pneumáticos consistem de um ou mais tanques de armazenamento, conectados a um regulador de pressão, acumulador, válvula solenóide, e cilindro pneumático, além de válvulas de segurança.

Tanques são necessários pois não é prático usar compressores de ar. Além de pesados, compressores não teriam potência suficiente para suprir a tempo as necessidades de um robô durante um round.

Reguladores são componentes que transformam as altas pressões dos tanques (cerca de 1000psi para  $CO_2$  e 2000 a 3000psi para ar ou  $N_2$ ) em pressões menores que possam ser usadas no sistema, tipicamente 150 a 250psi.

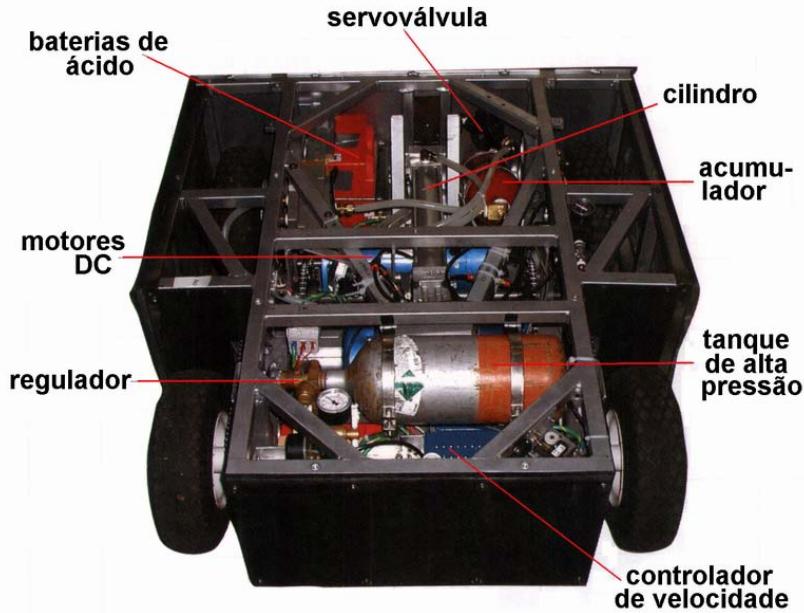
Acumuladores são *buffers*, pequenos reservatórios que armazenam o gás já na pressão requerida pela arma do robô. Eles são necessários apenas se o seu regulador não gerar vazão suficiente para um ataque da arma. Eles normalmente armazenam o suficiente para um ataque, garantindo vazão





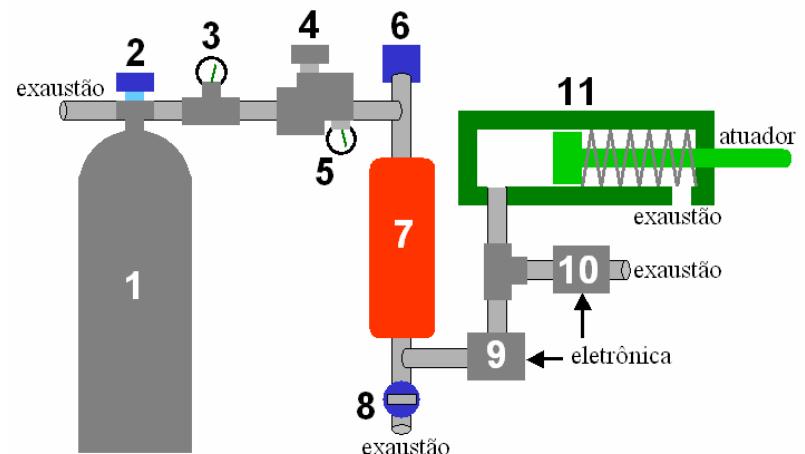
durante todo o curso do cilindro, sem sofrer o “gargalo” do regulador ou das válvulas de segurança do tanque.

Os cilindros são acionados pelas servoválvulas tipo solenóide (vide figura ao lado), e podem ser de simples ou dupla ação. Os de simples ação são acionados pneumáticamente em apenas um sentido, precisando de uma mola ou do peso próprio da arma para retornarem à posição original após o disparo. Os de dupla ação, por outro lado, são acionados pneumáticamente nas duas direções. Quanto maior a área do pistão do cilindro, maior a força gerada na arma.

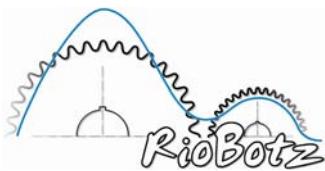


A figura abaixo mostra o desenho esquemático do acionamento de um cilindro de simples ação. Os itens 1, 2, 3 e 4 do diagrama representam a linha de alta pressão, e os elementos restantes constituem a linha de pressão de operação.

1. tanque de alta pressão;
2. válvula de purga de alta pressão;
3. manômetro de alta pressão;
4. regulador;
5. manômetro de baixa pressão;
6. válvula de segurança;
7. acumulador;
8. válvula de purga de baixa pressão;
9. servo-válvula pneumática de 2 vias normalmente fechada;
10. servo-válvula pneumática de 2 vias normalmente aberta;
11. cilindro pneumático de simples ação.

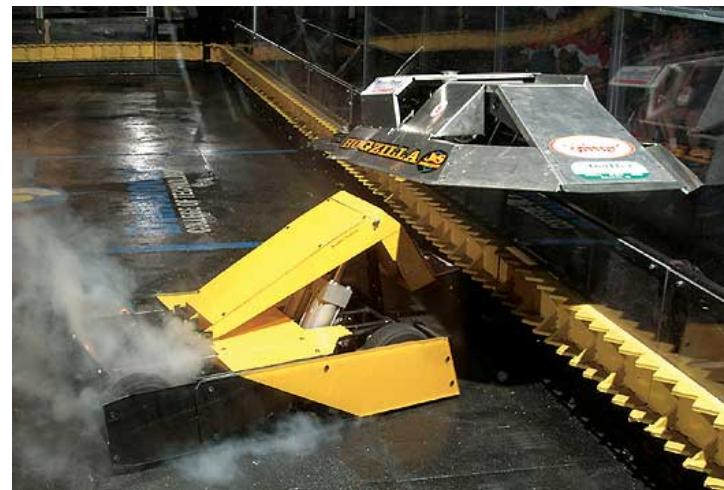
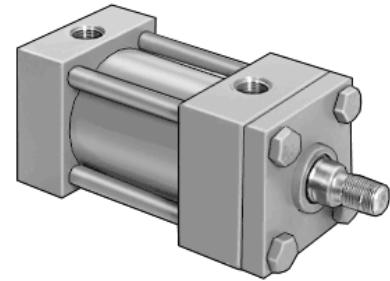


Alguns construtores mais ousados usam tanques de CO<sub>2</sub> sem reguladores, enviando alta pressão diretamente aos cilindros. Para isso é preciso eliminar qualquer “gargalo” na linha de pressão, retirando, por exemplo, qualquer válvula com ponta tipo agulha, e evitando curvas acentuadas nas mangueiras. Deixando todo o fluxo livre e sem gargalos, não é necessário usar o acumulador. O esquema fica similar ao do diagrama acima, exceto que os itens 4, 5, 6 e 7 são eliminados. Mas muito cuidado: ao invés de lidar com 150 a 250psi, os itens 8, 9, 10 e 11 estarão sendo submetidos diretamente a cerca de 1000psi, eles normalmente não tolerariam esse nível de pressão.

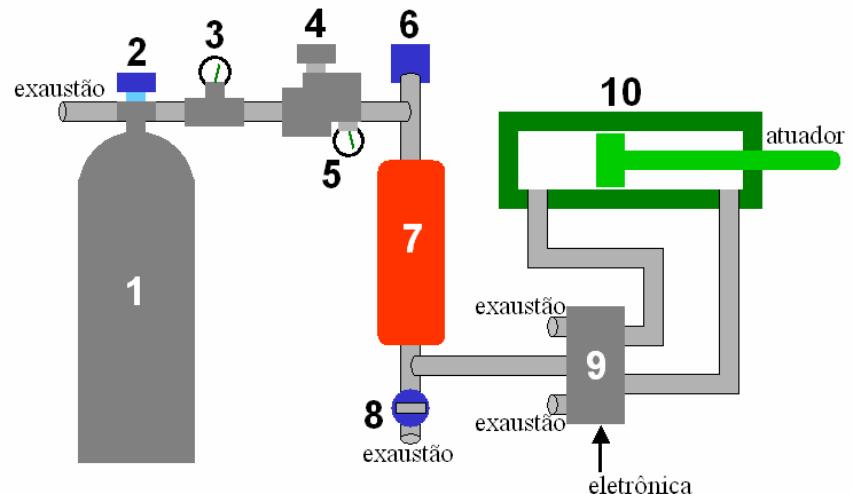


Para suportar essa pressão você precisará de componentes hidráulicos, em especial cilindros hidráulicos (alguns suportam até 2500psi, veja a figura ao lado), porém acionados pneumáticamente. Os *launchers* Bounty Hunter (em amarelo na figura abaixo) e Sub-Zero usam cilindros hidráulicos acionados por CO<sub>2</sub>. Mas tome muito cuidado com esses sistemas, pois além de serem experimentais, são potencialmente auto-destrutivos! Os cilindros hidráulicos não foram projetados para as altas velocidades dos sistemas pneumáticos, há a chance de o pistão romper no impacto ao final de seu curso. Use sistemas certificados para 2500psi hidráulicos, para que possa ser usado sem problemas a 1000psi pneumáticos. E verifique se os organizadores da competição permitem o uso de pressões tão altas.

Voltando aos sistemas com pressão regulada, para o acionamento de um cilindro de dupla ação é preciso de um esquema um pouco diferente do de simples ação. A figura abaixo mostra o desenho esquemático deste acionamento.



1. tanque de alta pressão;
2. válvula de purga de alta pressão;
3. manômetro de alta pressão;
4. regulador;
5. manômetro de baixa pressão;
6. válvula de segurança;
7. acumulador;
8. válvula de purga de baixa pressão;
9. servo-válvula pneumática de 4 vias;
10. cilindro pneumático de dupla ação.

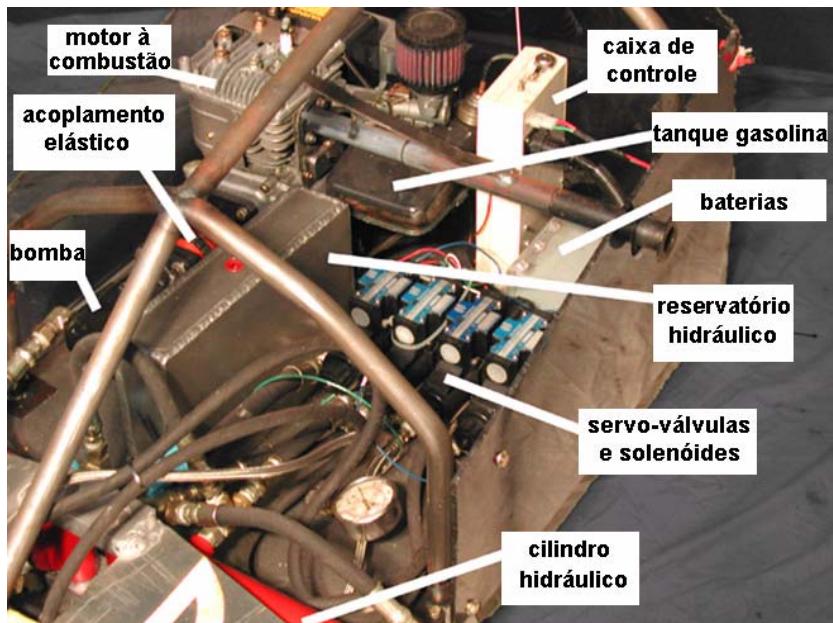


Algumas dicas para aumentar a velocidade do seu cilindro são: use um acumulador maior; use as mangueiras e conexões de maior diâmetro possível; evite curvas acentuadas no caminho das mangueiras; deixe o caminho de exaustão do cilindro o mais livre possível e direcionado para fora do robô.

#### 5.4.2. Sistemas Hidráulicos

São os atuadores capazes de gerar as maiores forças. Seu inconveniente está na baixa velocidade da arma, o que o torna não atrativo em combate. Um acionamento hidráulico em dois estágios resolveria o problema, no entanto sua implementação é muito complexa. O cilindro hidráulico é acionado por servo-válvulas hidráulicas através de solenóides. Estes sistemas ainda requerem um compressor (bomba hidráulica), que precisa ser acionado eletricamente ou a combustão, e sofrem muito com problemas de vazamento do fluido hidráulico.

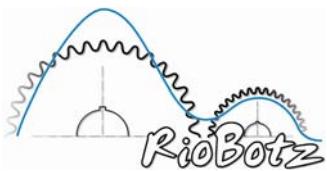
Só foi utilizado com sucesso em robôs *crushers* (figura ao lado), ainda assim sua complexidade fez com que quase não sejam mais usados. Reparem na figura a necessidade de um sistema elétrico (eletrônica e locomoção), hidráulico (arma), e à combustão (para acionar a bomba hidráulica). São tantos componentes que normalmente só se adequariam a um *super-heavyweight*, e não a um *middleweight*.



#### 5.4.3. Motores à Combustão

São capazes de armazenar muita energia – a densidade de energia da gasolina, por exemplo, é cerca de 100 vezes maior que de baterias. Conseguem acionar armas com potência maior que os motores elétricos, e além disso o seu torque aumenta (até certo ponto) com a rotação, ao contrário dos motores DC, que tendem a torque zero em altas velocidades. Além disso, o grande barulho pode impressionar bem os juízes em um round. Seu projeto é relativamente simples, precisando apenas de um servo-motor de boa qualidade e uma embreagem centrífuga (como as usadas em kart). Estas embreagens garantem que a arma ficará imóvel até o início do round, como exigido no regulamento das competições, mesmo com o motor à combustão estando ligado.

Um grande desafio é garantir que o motor funcione de cabeça para baixo, caso o robô seja inversível, garantindo que o fluxo de gasolina continue constante e sem vazamentos. Motores de serras elétricas são bons candidatos, pois seu carburador pode operar em qualquer orientação. Motores usados em aviões também funcionam de cabeça para baixo – já chegaram até a usar turbinas para acionar *spinners* – no entanto normalmente seriam muito pesados para um *middleweight*, às vezes até mesmo para um *heavyweight*.



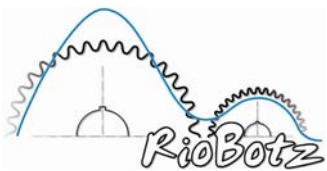
Os motores à combustão, por só girarem em um sentido, normalmente só são usados para acionar armas. O acionamento das rodas precisaria de um complexo sistema de marchas para poder reverter o sentido.

Um grave problema dos motores à combustão é a grande interferência que as velas causam nos sistemas de rádio frequência. Por isso coloque o receptor e eletrônica o mais longe possível do motor. Uma forma de contornar o problema é usar velas resistivas (*resistor spark plugs*), que causam ignição por resistência elétrica e não interferem nas ondas de rádio.

A maior desvantagem de um robô à combustão é a falta de confiabilidade. A técnica para ligá-lo no início do round é normalmente a conhecida internacionalmente como “puxa e reze” (“*pull and pray*”) – você puxa a cordinha e reza para que ligue. Se o motor “morrer” durante um round, será impossível religá-lo, a menos que ele possua um sistema de ignição próprio, controlado por um canal adicional do rádio-controle. Esse sistema adiciona peso ao robô e também sofre problemas de confiabilidade. Além disso, você vai acabar precisando usar 4 canais do rádio-controle para acionar um único motor à combustão. Enfim, robôs à combustão são extremamente perigosos, mas devido à baixa confiabilidade dependem muito da sorte para avançarem até as finais sem problemas.

Uma curiosidade: o robô Blendo (ao lado) foi o primeiro *spinner* à combustão do mundo, e usava um motor de cortador de grama. Ele foi construído por Jamie Hyneman, e sua eletrônica foi montada por Adam Savage. A exposição de Jamie e Adam na mídia ao competirem no BattleBots chamou a atenção do Discovery Channel, o que levou à criação de um famoso programa: *MythBusters*, os caçadores de mitos.





## 6. Eletrônica

Existem inúmeras opções de componentes eletrônicos e elétricos para acionar um robô de combate, que poderiam gerar um livro inteiro por si só. Por esse motivo, neste capítulo vamos apresentar apenas os componentes cuja eficácia foi comprovada na prática, nas arenas, além de alguns fundamentos básicos de eletrônica.

O acionamento de um robô exige um grande número de componentes, dentre eles: rádio transmissor, receptor, sistema eletrônico para interpretar os sinais do receptor (“eletrônica de sinal”), controladores de velocidade, relés ou solenóides, e chaves liga/desliga (*on/off*), conectados por conectores, terminais e fios, descritos a seguir.

### 6.1. Rádio Transmissor e Receptor

#### 6.1.1. Transmissor

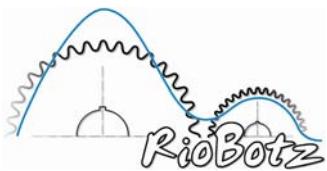
O rádio transmissor permite que o piloto envie comandos para um receptor instalado no robô de combate. Existem muitos fabricantes de rádios, como Futaba, GWS, Airtronics, JR, Hitec e Spektrum. Há também soluções mais econômicas como rádios adaptados de brinquedos de controle remoto, controles de videogames, etc, mas deve-se tomar cuidado para garantir o sistema tenha potência suficiente para evitar perda de sinal com o robô dentro da arena.

Um dos rádios mais utilizados é o da marca Futaba. Existem diversos modelos, com números diferentes de canais. Normalmente o robô de combate usa apenas 3 canais – 1 para ir para frente, 1 para fazer curvas, e 1 para acionar a arma (se houver). Rádios de 3 ou 4 canais são mais baratos e são em geral suficientes. No entanto, rádios de 7 (figura ao lado) ou 9 canais costumam ter mais funções e serem programáveis, incluindo uma memória interna, e podem ser uma melhor opção.

A maioria dos rádios utiliza a banda de frequência de 72MHz. Essa banda é exclusiva para uso aeronáutico, e por isso é proibida em todas as competições internacionais de combate de robôs. O melhor é comprar um rádio de 75MHz, que é a banda terrestre. Outras bandas também são usadas, como 27MHz e 50MHz. Há ainda a banda de 900MHz, que permite comunicação bi-direcional entre o rádio e o receptor. Esses sistemas de 900MHz, como o IFI, permitem que seja feita uma telemetria do robô durante a competição, no entanto são grandes e caros.

Outro ponto importante é o canal do rádio. Existem apenas 30 canais para a banda de 75MHz, desde o canal 61 (75,410MHz) até o canal 90 (75,990MHz). A banda de 72MHz tem 50 canais, do canal 11 (72,010MHz) ao 60 (72,990MHz). Já a banda de 27MHz possui 6 canais e a de 50MHz tem 10 canais. Em uma competição, é proibido que dois rádios de mesmo canal estejam ligados ao





mesmo tempo. Essa é uma medida de segurança, pois o rádio de uma equipe poderia acionar o robô de outra inadvertidamente, o que pode causar acidentes. Por esse motivo, nas competições nos Estados Unidos é preciso estar com um “clip” indicativo da sua frequência preso ao seu rádio para poder usá-lo. Como só há um clip disponível para os competidores para cada canal, o problema fica resolvido.

A banda de 900MHz não tem esse problema: ela usa uma única frequência, um único canal, que é compartilhado por todos os competidores. Cada conjunto rádio-receptor se comunica de forma codificada, cada receptor só obedece ao sinal enviado pelo seu rádio, e portanto não há problema de interferência nem necessidade de clips. Esse compartilhamento só é possível devido à alta frequência do sistema, 900MHz, mais de 10 vezes maior que a das outras bandas usadas.

Nos sistemas de 72 e 75MHz, os canais são definidos através de um par de cristais (figura ao lado), normalmente vendidos em conjunto. O cristal Tx precisa ser encaixado no transmissor e o seu par Rx no receptor. Tenha sempre um par de cristais de reserva, de um canal diferente ao par do seu rádio original, caso você tenha que enfrentar um adversário que use o mesmo canal que você. Compre apenas cristais da mesma banda do seu rádio. Cristais de 75MHz não funcionam em rádios de 72MHz. Para isso seria preciso converter o rádio em si de 72MHz para 75MHz, um procedimento que custa cerca de US\$20 a US\$50 se feito por profissionais.

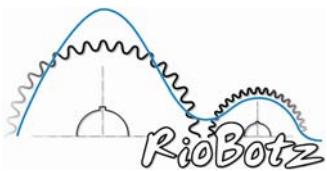


Quanto ao sistema de transmissão, os rádios podem ser também AM, FM (ou PPM) e PCM. AM significa modulação da amplitude (*Amplitude Modulation*), a informação para controlar o sistema é transmitida variando-se a amplitude do sinal de rádio.

FM significa modulação da freqüência (*Frequency Modulation*), é um sistema menos propenso à interferência do que o AM. A informação de controle é transmitida variando-se a freqüência do sinal de rádio. Nesse caso, o sinal enviado ao receptor é um trem de pulsos de cerca de 20ms de período. Cada pulso do trem é associado ao comando de um canal, e possui uma largura de 1 a 2ms, dependendo do valor a ser enviado. Se o pulso fosse de 1ms, por exemplo, o manche do rádio estaria todo para a esquerda (ou para baixo), se ele fosse de 1,5ms estaria centrado, e se fosse 2ms estaria todo à direita (ou para cima). No caso de um *switch*, 1ms estaria associado a ele desligado e 2ms a ele ligado. Esse sistema de trem de pulsos é chamado de PPM (*Pulse Position Modulation*).

O terceiro tipo de rádio é o PCM, que significa modulação de código de pulso (*Pulse Code Modulation*). Tecnicamente, a transmissão também é em FM, a diferença é que no PCM a transmissão da informação para os canais é feita digitalmente, enviando uma palavra binária codificada, ao contrário dos pulsos do PPM que usam valores analógicos (os períodos entre 1 e 2ms). Sinais enviados de forma digital, codificada, são muito mais confiáveis. A modulação PCM possui desse modo uma maior imunidade ao ruído que a PPM. Assim, dê preferência ao sistema PCM.

Os receptores PCM recebem a palavra codificada, em forma digital, e convertem os sinais para o trem de pulsos analógicos do PPM. Com isso, os servos usados em sistemas PPM funcionam também em PCM, uma vez que o sinal transmitido pelo receptor é sempre PPM.



Além disso, os rádios PCM em geral permitem que se programe facilmente o *failsafe*. *Failsafe* é um sistema que permite pré-programar os sinais a serem transmitidos por cada canal do receptor caso haja perda de sinal. Programe o *failsafe* de modo que caso haja perda de sinal o robô não se locomova (manches centrados, codificados por um pulso de 1,5ms) e a arma esteja desligada (*switch* da arma desligado, codificado normalmente por um pulso de 1ms). Este procedimento é obrigatório para que o robô passe na inspeção de segurança das competições. Para rádios AM ou FM/PPM, o *failsafe* precisa ser implementado na eletrônica de sinal do sistema, por exemplo com módulos como o *Micro Failsafe Dynamite* (figura ao lado), que pode ser encontrado em lojas de aeromodelismo.



Segue abaixo um resumo das principais características e funcionalidades que o seu rádio pode (ou não) possuir:

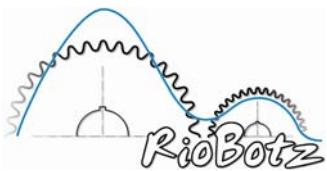
- número de canais de saída: em geral de 4 a 9 nos rádios de aeromodelismo, ou 3 em rádios tipo pistola usados em carrinhos de controle remoto; você precisará de no mínimo 3 canais;
- reversão de servos: habilidade de inverter o sentido dos comandos de um canal;
- ATV/EPA: ajuste dos valores máximos e mínimos que um canal pode enviar;
- dual rate/exponential: ajuste da sensibilidade e linearidade dos comandos de um canal;
- mixagem: habilidade de mixar canais, pode ser programável ou vir pré-programada de fábrica;
- múltiplos modelos: permite que você tenha diversos programas distintos armazenados, um para cada robô;
- *failsafe*: os canais enviarão sinais pré-programados caso haja perda de sinal; somente rádios PCM possuem esse tipo de funcionalidade embutida, os rádios PPM precisam de um módulo eletrônico especial;
- redesignação de controle: habilidade de trocar canais entre o transmissor e receptor.

### 6.1.2. Receptor

Um receptor típico pode ser visto na figura à direita. É muito importante que o cristal esteja bem preso nele. Passe uma fita adesiva resistente ao redor do receptor que impossibilite o cristal de se soltar. Muitos rounds já foram perdidos porque o cristal se soltou após o robô receber um impacto, deixando-o sem controle. Passe também a fita adesiva sobre todos os conectores, para evitar que se desprendam. Tape também com a fita os encaixes de todos os canais não utilizados, para evitar que algum pedaço de metal ali se deposite e cause um curto durante um round.



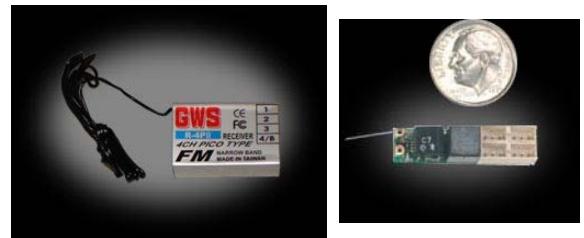
Normalmente existe um pequeno pack de baterias usado exclusivamente pelo receptor. Se os seus motores elétricos gerarem muito ruído, essa realmente é a melhor opção, para evitar interferências ou perda de sinal. No entanto, se os seus motores tiverem capacitores para diminuir o ruído ou então se sua carcaça for blindada, é útil considerar a possibilidade de usar as mesmas baterias que acionam os motores para alimentar o receptor, e descartar o pequeno pack. Esse



pequeno pack só cria problemas: ele pode se soltar, é mais peso e volume para o robô, e é mais uma bateria que você precisa carregar, ocupando suas fontes e carregadores. Sem contar que na turbulência de um dia de competição você pode se esquecer de carregá-lo. Mas para eliminá-lo, é preciso ter um BEC (*Battery-Elimination Circuit*, figura ao lado), que nada mais é que um regulador de tensão para garantir um suprimento constante de (normalmente) 5V para o receptor. Você pode desenvolver o seu próprio BEC. Todos os nossos robôs usam BECs próprios que desenvolvemos, e eles funcionam muito bem.



Para robôs “insetos” como os *antweights* (1lb) e *beetleweights* (3lb), é uma boa opção utilizar micro ou nano-receptores (figuras ao lado). Eles são muito pequenos e pesam apenas entre 3 e 8 gramas sem o cristal. Mas cuidado pois todos eles precisam de cristais especiais, não funcionam com os cristais comuns.

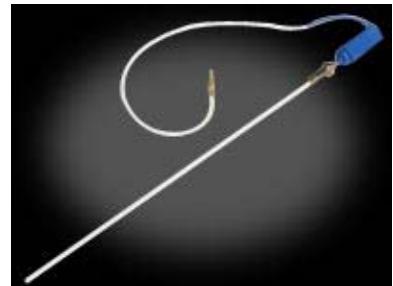


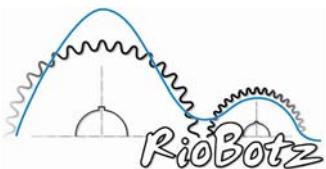
### 6.1.3. Antena

Um grande problema que ocorre nos combates de robôs é a perda de sinal. Os robôs são feitos de metal, e portanto uma antena em seu interior sofre o efeito da gaiola de Faraday, e o sinal não é recebido. Robôs com tampas de Lexan não sofrem deste problema, pois o policarbonato é transparente às ondas de rádio. Prenda a antena do receptor na tampa de Lexan, evitando o contato com qualquer parte metálica. No caso de robôs com armadura toda em metal, a solução é deixar a antena para fora do robô. Há o risco de a antena ser atingida, prejudicando a recepção, no entanto é uma melhor opção do que deixá-la dentro do robô e perder completamente o sinal.

A antena dos receptores é um fio de 1/4 do comprimento de onda do sinal. Assim, um sinal de 75MHz viajando à velocidade da luz (cerca de 300.000 km/s) tem um comprimento de onda de  $(3 \cdot 10^8 \text{ m/s}) / (75 \cdot 10^6 \text{ Hz}) = 4$  metros. Como 4 metros seria um fio muito longo, utiliza-se 1/4 do comprimento, 1 metro de fio. A forma de montagem ideal seria se este fio estivesse na vertical, no entanto isso exigiria um robô com espaço interno de 1 metro de altura. Na prática, arrume o fio da antena de modo que faça um zigue-zague no robô. Evite que o fio da antena esteja apoiado sobre metal, o ideal é que haja pelo menos 6mm de distância entre o fio e qualquer chapa metálica. Usar um pouco de Lexan entre o fio e a estrutura metálica é uma boa opção.

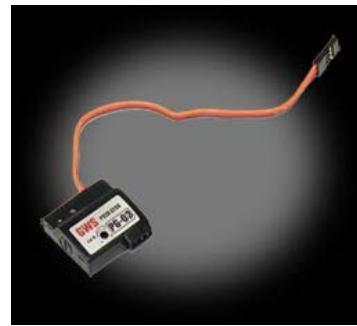
Você pode também substituir o fio de 1 metro do receptor por uma mini-antena de menos de 200mm de comprimento. Essa é uma solução muito usada nos EUA. Mas precisa ser uma antena com um sistema eletrônico que amplifique o sinal. Nós usamos a antena *Deans Base-Loaded Whip* (figura ao lado) no Touro sem problemas de recepção. No entanto, ela teve que ser montada do lado de fora do robô, devido ao efeito da gaiola de Faraday.





### 6.1.4. Giroscópios

Para garantir que o robô ande em linha reta, uma boa opção é usar giroscópios (figura ao lado), sensores que medem o ângulo de orientação do robô. Eles são fáceis de usar e compatíveis com a maioria dos receptores, podem ser conectados diretamente a eles. Muitas lojas de aeromodelismo os possuem, são normalmente usados em helicópteros rádio-controlados. O modelo mais barato é o *GWS PG-03 Micro Gyro*, que pode ser comprado por US\$38 no site [www.robotmarketplace.com](http://www.robotmarketplace.com), o que é um ótimo custo-benefício. O segredo do uso dos giroscópios em combate de robôs é ajustar o ganho de feedback em no máximo 20% do seu fundo de escala. Ganhos maiores podem deixar o sistema instável, pois o giroscópio começa a captar as vibrações dos motores e tentar compensá-las. Os problemas do giroscópio são: precisar estar muito bem amortecido para não quebrar, e precisar estar muito bem preso ao robô (pois se ele se soltar o robô fica louco). Ele não deve ser usado em robôs inversíveis (que funcionam de cabeça para baixo), pois quando o robô inverte o ganho do controle fica negativo e o robô gira descontroladamente. Para contornar isso seria preciso um sistema eletrônico para desligar o giroscópio caso o robô inverta, ou melhor, um sistema que inverta o seu ganho nesse caso.



### 6.1.5. Servos

Nos aeromodelos, os receptores são conectados diretamente aos servos, que são pequenos motores (servo-motores, figura ao lado) com controle de posição embutido. Servos são muito práticos e baratos, alguns robôs de combate os utilizam para acionarem motores a combustão, ou para ligarem ou desligarem circuitos de forma mecânica. O problema desta abordagem é que servos têm grande risco de quebrar ou se soltar na presença de impactos. Sempre que possível implemente acionamentos de forma eletrônica, sem partes mecânicas móveis, evitando o uso dos servos.

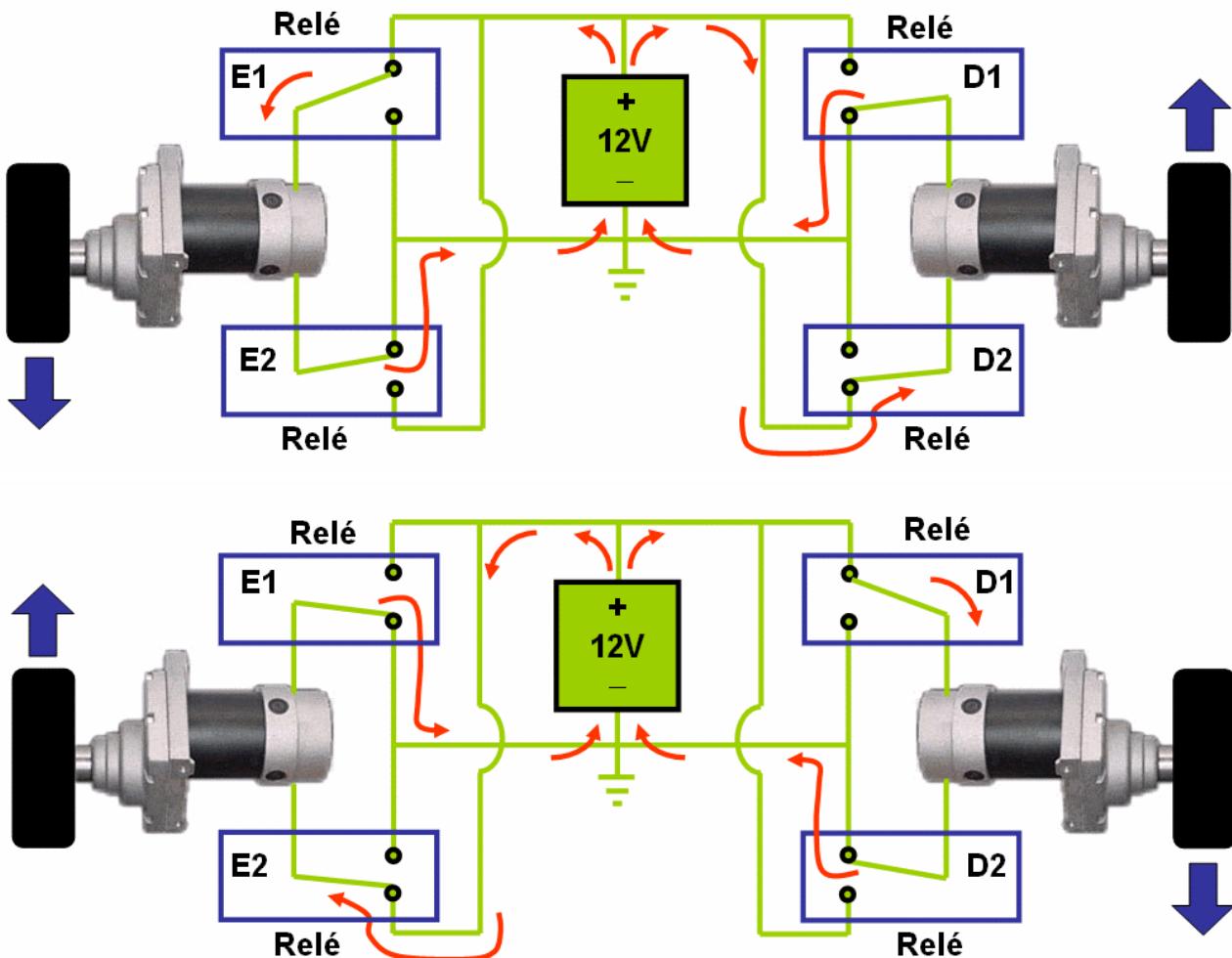


Os servos que acompanham os rádios e receptores não possuem rotação contínua, e nem têm potência suficiente para acionar um robô *middleweight*. Para isso, precisamos usar outros motores, como os discutidos no capítulo anterior. Vamos a seguir discutir o acionamento dos atuadores mais usados em robôs de combate, os motores DC.

## 6.2. Acionamento de Motores DC

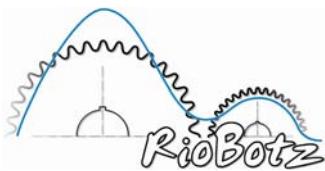
A forma mais primitiva de se acionar motores DC é através do controle *bang-bang*. Ele consiste em usar relés conectados de forma a acionar o motor com velocidade máxima para frente, para trás, ou deixando-o parado. As figuras abaixo mostram como seria possível conectar 4 relés para fazer o controle *bang-bang* de 2 motores de acionamento das rodas. Na figura superior, ao ligar os relés E1 e E2 e desligar D1 e D2, o robô faz uma curva para a esquerda. Na figura inferior, ao ligar D1 e D2

e desligar E1 e E2 ele faria uma curva para a direita. De forma análoga, é possível andar em linha reta para frente (desligar os 4 relés), para trás (ligar os 4 relés), ou deixá-lo parado (ligar, por exemplo, E2 e D2 e desligar E1 e D1).



No exemplo acima, ao usar uma bateria de 12V, os motores somente poderão receber +12V, 0V ou -12V. Evite usar esse tipo de controle, você estará jogando sempre o máximo de tensão em seus motores e revertendo bruscamente seu sentido. Isso desgasta muito os motores e pode quebrar suas engrenagens pelos impactos causados na reversão (daí o nome *bang-bang*), além de encurtarem a vida dos relés. Esse tipo de controle só seria aceitável em um motor de baixa rotação, que provavelmente não teria aplicação em combate de robôs.

Uma versão um pouco melhorada seria através do uso de relés em conjunto com um regulador de tensão linear. Ao analisar a modelagem dos motores DC, fica claro que variando a tensão nos terminais do motor, varia-se sua velocidade. Caso seja necessário mudar a direção do motor, é necessário inverter seus terminais ou gerar uma tensão negativa entre eles. Desse modo, um controle simples pode ser implementado, com um conjunto de relés encarregados de inverter os terminais do motor, como no exemplo anterior, enquanto que um regulador de tensão linear geraria a tensão necessária para o acionamento, que poderia variar continuamente.



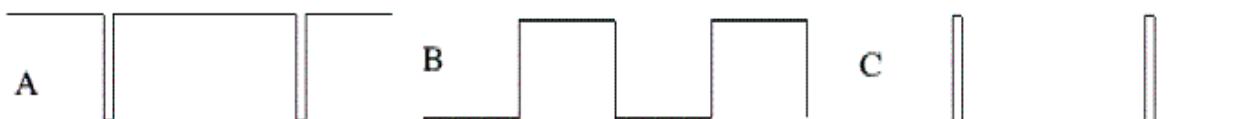
Apesar de bem simples, essa abordagem tem problemas sérios, sendo o principal deles a baixa eficiência do circuito, especialmente em baixas tensões de acionamento, já que toda a energia que não é utilizada pelo motor é dissipada no regulador linear. Essa energia seria desperdiçada em forma de calor, e além disso provavelmente queimaria o regulador de tensão caso ele não fosse grande o suficiente. Na prática, esta técnica com regulador linear só funcionaria para motores pequenos, de classes de peso menores (*hobbyweight* ou menor).

Esse método ainda possui outro problema, este devido à indutância do motor. Ao utilizar o relé para inverter os terminais do motor, a corrente estará sendo desligada quase que instantaneamente e, devido a isso, uma tensão muito grande será gerada pela indutância, gerando arcos nos terminais do relé, o que diminui sua vida útil. Para conseguir uma eficiência maior e circuitos menores, é necessário utilizar um método diferente para variar a velocidade do motor, conhecido pela sigla em inglês de PWM (*Pulse Width Modulation*, Modulação por Largura de Pulso), descrito a seguir.

### 6.2.1. Modulação por Largura de Pulso (PWM)

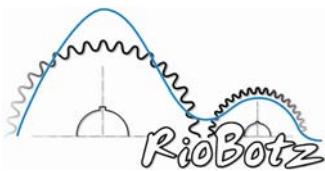
O método PWM consiste em ligar e desligar o motor, numa freqüência fixa, através de uma chave (normalmente algum tipo de transistor – Bipolar ou MOSFET), fazendo com que o motor gire numa velocidade proporcional à relação entre o intervalo de tempo ligado ( $T_{on}$ ) e o período do pulso ( $T$ ). Essa relação é chamada de *Duty Cycle* (D) e, se multiplicada pela tensão de pico (tensão de alimentação do motor), temos uma tensão média que equivale à tensão DC que teria que ser aplicada para fazer o motor girar à mesma velocidade.

Na figura abaixo, temos três formas de ondas geradas com PWM, numa freqüência fixa. A da esquerda (A) mostra o PWM com um D de quase 100%, ou seja, o motor se comporta como se estivesse recebendo quase toda a sua tensão nominal. Já na figura (B), o motor estaria recebendo em média metade da tensão nominal, girando portanto à aproximadamente metade de sua velocidade máxima, pois nesse caso ele recebe sua tensão nominal durante um intervalo  $T_{on}$  igual à metade de  $T$ , e é desligado durante a outra metade. Na figura (C), ele estaria em uma velocidade muito baixa, pois seu intervalo de tempo  $T_{off}$  em que fica desligado (onde  $T_{off} = T - T_{on}$ ) é muito alto.



A eficiência do circuito é, idealmente, 100%, já que a chave que acionaria o motor não teria perdas. Na prática, isto não ocorre devido às perdas, tanto estática quanto dinâmicas, nos transistores utilizados. Apesar disso, a eficiência de um controlador bem projetado está normalmente acima dos 90%.

Cuidado para não confundir PWM com PPM (ou PCM), muitos misturam esses dois conceitos, dizendo que o sinal que sai do receptor é PWM. Apesar de parecidos, isso não é exatamente verdade. Ambos o PWM e o PPM são trens de pulso analógicos, no entanto suas funcionalidades são completamente diferentes. Uma das diferenças é que o período entre os pulsos do PWM pode



ser qualquer, o que interessa é o *Duty Cycle*, enquanto que o PPM usa um sinal que precisa ter período bem definido.

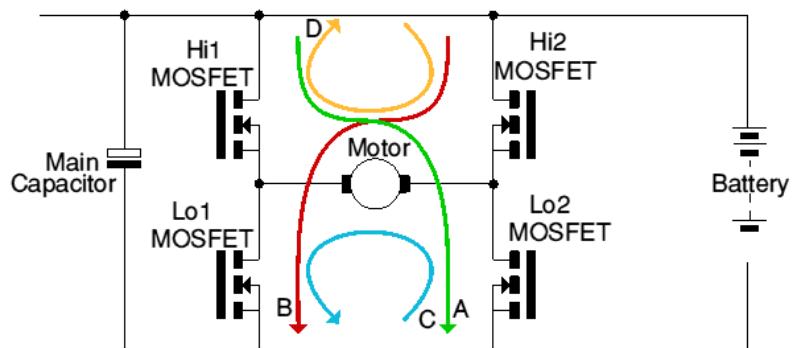
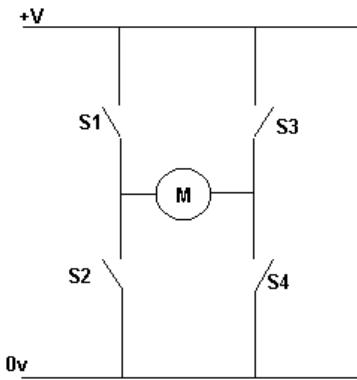
### 6.2.2. Ponte H

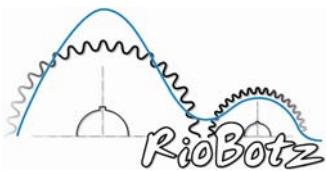
A reversão do motor ainda é um problema utilizando os métodos citados anteriormente. Duas formas para implementar a reversão são inverter os terminais do motor ou gerar uma tensão negativa para acioná-lo. Inverter os terminais é muito complexo, envolvendo a utilização de chaves ou relés, o que é não é prático nem confiável em combate. Há também o problema do alto preço de componentes qualificados para suportar altas correntes, além do fato de ser necessário desconectar os fios momentaneamente para que os terminais sejam trocados. Já a opção de gerar tensão negativa também é inviável devido à complexidade do circuito necessário para isto, tendo uma bateria como alimentação principal do circuito.

Uma terceira opção é a utilização de uma ponte H. Ela possui este nome devido à forma em que as chaves e a carga estão dispostas no circuito. Ela é a melhor escolha por não ser necessário criar tensões negativas e nem desconectar os terminais para que eles sejam trocados.

A figura ao lado mostra uma ponte H básica. Fechando as chaves S1 a S4 numa ordem fixa, pode-se fazer o motor girar para frente (fechando apenas S1 e S4), para trás (fechando apenas S2 e S3), ou então freá-lo (fechando apenas S2 e S4, ou apenas S1 e S3). Outra vantagem é o fato de as chaves poderem ser transistores que podem ser chaveados rapidamente, suportam facilmente altas correntes, sendo baratos e acessíveis. Na prática, este chaveamento é feito com o uso de transistores.

Na figura ao lado as chaves já foram substituídas por transistores tipo MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*), mostrando um circuito básico da ponte H. Para fazer o motor girar para frente, a corrente sai da bateria, passa pelo MOSFET Hi1, passa pelo motor e por Lo2, como mostrado na curva A. Para girar para trás, os MOSFETs Hi1 e Lo2 devem ser desativados, ativando-se o Hi2 e Lo1, fazendo a corrente percorrer o caminho B. Para frear o motor há duas opções, ou usar os MOSFETs Lo1 e Lo2 (curva C), ou usar Hi1 e Hi2 (curva D). Em ambas as opções os terminais do motor são curtados. Esse efeito de frenagem ao curtir os terminais é chamado de freio motor e acontece devido ao fato de toda a energia do motor estar sendo dissipada somente na resistência interna deste, que é, normalmente, muito pequena, fazendo com que a





energia se dissipe rapidamente, parando efetivamente o motor. Cuidado pois motores de resistência interna muito baixa podem esquentar muito neste processo de frenagem.

Um grande problema de pontes H é um efeito chamado *shoot-through*, que acontece ao acionar as duas chaves de um mesmo lado da ponte (por exemplo, Hi1 e Lo1). Quando isso acontece, a bateria sofre um curto, gerando uma descarga muito grande de corrente que, em geral, faz com que as chaves sejam destruídas completamente. Mais adiante serão discutidas técnicas para evitar esse efeito.

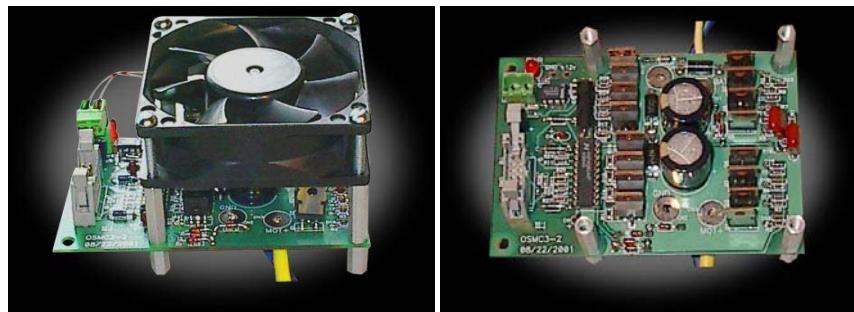
Adicionar PWM à ponte H é bastante simples. Ao girar para frente, basta manter Hi1 permanentemente ligado, e Lo2 ligado durante o intervalo de tempo  $T_{on}$  e desligado durante o resto do período, não se esquecendo de manter Hi2 e Lo1 sempre desligados. Contudo, devido à indutância existente no motor, a corrente tenta se manter fluindo de forma constante enquanto Lo2 estiver desligado e, para isso, Hi2 deve ser acionado neste intervalo de tempo (caminho D da figura acima). Apesar de estarmos ligando os dois terminais do motor juntos, este caminho D mantém um trajeto de baixa impedância para a corrente do motor, com perdas mínimas de energia. Apesar de isso frear momentaneamente o motor, é exatamente esse efeito de ligar e desligar (frear) que gera a tensão média vista por ele e, com isso, a velocidade variável. Algo similar deve ser feito para que o motor gire para trás, acionando Hi2 e Lo1 durante o  $T_{on}$ , e durante o resto do período desligando Lo1 e ligando Hi1.

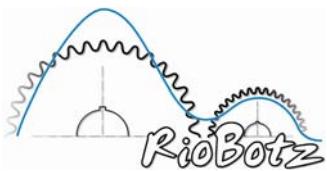
## 6.3. Controladores de Velocidade

Os controladores de velocidade são sistemas eletrônicos de potência que implementam a ponte H acima descrita, incorporando PWM para que a velocidade de um motor possa ser controlada. Existem diversos sistemas no mercado com essa funcionalidade. Vamos apresentar a seguir três dos mais usados: OSMC, Victor e Scorpion, que podem ser comprados no [www.robotmarketplace.com](http://www.robotmarketplace.com). Na seção 6.8, iremos entrar em mais detalhes no funcionamento destes sistemas, para que você possa construir o seu próprio controlador de velocidade e a placa de sinal necessária para acioná-lo.

### 6.3.1. OSMC (*Open Source Motor Controller*)

OSMC é uma placa de potência capaz de acionar um único motor entre 13 e 50V sob correntes contínuas de até 160A e picos de até 400A. São muito robustas, usam 16 MOSFETs na ponte H resfriados por um *fan* (figuras ao lado, com e sem o *fan*). No entanto, são um pouco grandes se comparadas com outras soluções disponíveis no mercado. Nós usamos a OSMC nos nossos robôs Anúbis, Ciclone e Titan, e elas são muito confiáveis.





A OSMC é o resultado de um esforço colaborativo de diversos construtores de robôs de combate. Todos os seus componentes e diagramas são gratuitos, e estão disponíveis no endereço [www.robotpower.com/osmc\\_info](http://www.robotpower.com/osmc_info). Nesse mesmo site, é possível comprar a OSMC pronta, montada e testada (US\$199), ou a placa vazia com todos os componentes a serem soldados (US\$159), ou apenas a placa sem os componentes (US\$29). Para economizar, a nossa equipe comprou várias placas vazias a US\$29 e buscou, através do forum da OSMC ([groups.yahoo.com/group/osmc](http://groups.yahoo.com/group/osmc)), informações sobre opções de componentes. Montamos e soldamos as placas dessa forma. A economia não foi muito grande, acabou saindo não muito menos que os US\$159, mas em compensação aprendemos muito sobre todo o funcionamento da placa.

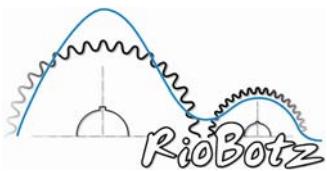
Uma desvantagem é que elas precisam de uma eletrônica de sinal separada para seu acionamento, chamada MOB (*Modular OSMC Brain*). O MOB nem sempre está disponível para venda, muitas vezes é preciso que você mesmo o monte. Nós resolvemos não usar o MOB, e desenvolver a nossa própria placa de sinal, para que com uma única placa pudéssemos acionar 2 OSMC e mais o solenóide da arma (no caso do Ciclone e do Titan). Com isso ganhamos espaço no robô. Alguns detalhes sobre ela estão na seção 6.8.

### 6.3.2. Victor

Os Victors são controladores de velocidade extremamente compactos, e quase tão robustos quanto a OSMC. Você precisará de pelo menos dois Victors para acionar a locomoção do robô. Nós usamos Victors no robô Touro e com isso ganhamos espaço precioso para outros componentes. Existem vários modelos, todos eles externamente muito parecidos, e com um *fan* (ventoinha) para resfriar seus MOSFETs:

- Victor 883 (US\$139): aciona motores de 6V a 30V, fornecendo 60A contínuos, 100A por menos de 2 segundos, e 200A por menos de 1 segundo, usando 12 MOSFETs (as OSMC usam 16);
- Victor 885 (US\$179): similar ao Victor 883, mas fornece o dobro de corrente, cerca de 120A contínuos, 200A por menos de 2 segundos, e 300A por menos de 1 segundo;
- Thor 883 (US\$185): virtualmente idêntico ao Victor 885;
- Victor-HV 36V (US\$199): versão para tensões maiores, aciona motores de 12V a 43V, fornecendo 120A contínuos, e 330A por menos de 3 segundos, usando 16 MOSFETs;
- Victor-HV 48V (US\$199): versão para tensões ainda maiores, porém suporta menos corrente que o Victor-HV 36V, aciona motores de 12V a 60V, fornecendo 90A contínuos, e 220A por menos de 3 segundos, usando 16 MOSFETs.





Uma grande vantagem dos Victors é que você pode conectar o receptor diretamente a eles, sem a necessidade de uma placa de sinal intermediária (como a MOB no caso do OSMC). Alguns receptores muito antigos podem precisar de um cabo especial, chamado de *signal booster* (US\$15, figura ao lado). Nossos receptores Futaba nunca precisaram deles. No entanto, eles podem ser muito úteis em robôs que estejam com problemas de ruídos ou perda de sinal, em especial causados por motores de combustão interna.



Há também controladores de velocidade específicos para uso no acionamento de armas giratórias. Eles não revertem o sentido da rotação, em compensação geram uma rampa suave de aceleração e de frenagem, para poupar as baterias, evitando picos de corrente muito altos. Com eles é possível variar a velocidade da arma. Isso pode ser útil em 3 situações:

- se suas baterias não estiverem durando um round inteiro, você poderá deixar a arma em uma rotação intermediária, consumindo menos, e acelerar até a velocidade máxima na hora de cada investida contra o adversário;
- se a arma tiver sido danificada ou trincada em outros rounds, é possível diminuir a velocidade para poupá-la e não arriscar quebrá-la durante a luta;
- se o robô estiver vibrando muito na velocidade máxima, baixando-a um pouco pode diminuir o problema ao se afastar das frequências naturais do sistema.

Os modelos específicos para armas são os tipo SC (*Spin Controller*):

- Victor 883 SC (US\$169): aciona motores de 6V a 30V, fornecendo 90A contínuos, 100A por menos de 2 segundos, e 200A por menos de 1 segundo, usando 12 MOSFETs;
- Thor SC (US\$219): similar ao Victor 883 SC, mas fornece mais corrente, cerca de 150A contínuos, 200A por menos de 2 segundos, e 300A por menos de 1 segundo.

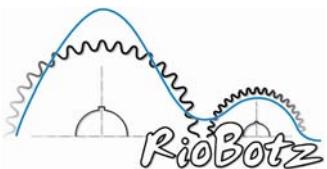
Apesar das vantagens das rampas de aceleração e de frenagem, muitos construtores preferem usar solenóides por serem mais baratos e suportarem correntes mais altas.

Como os *fans* são muito importantes para o arrefecimento dos MOSFETs, é recomendável protegê-los. Destroços ou mesmo os próprios fios do robô podem encostar nos rotores do *fan*, fazendo-o parar. Para evitar isso, use uma proteção feita de folha de alumínio (figura ao lado). Você pode fazer sua própria, ou comprar por cerca de US\$2 no website [www.robotmarketplace.com](http://www.robotmarketplace.com).



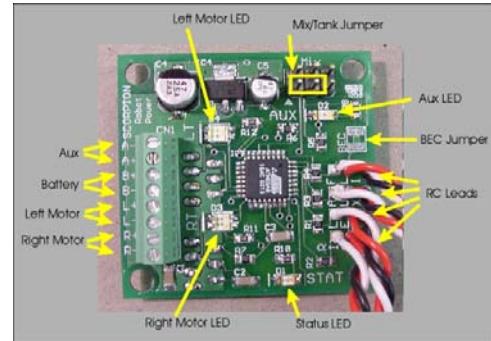
### 6.3.3. Scorpion

Os Victors e OSMC são apropriados para robôs maiores, tipicamente de 60lb ou mais. Eles são muito caros e relativamente grandes para serem usados em robôs de classes de 12lb ou menos. Existem 2 placas que suprem essas necessidades, a Scorpion HX e a Scorpion XL.



A Scorpion HX (US\$80) é uma placa ideal para acionar *antweights* (1lb) e *beetleweights* (3lb). Possuem 3 canais, sendo 2 deles com controle de velocidade PWM, para acionar a locomoção do robô, e 1 canal para acionar a arma (se houver) em apenas um sentido. Os canais PWM aceitam motores entre 4,8V e 22V, com 2,5A contínuos e 6A de pico. Os canais do motor da arma fornecem maiores correntes, 12A contínuos e 35A de pico. Essa é a placa que usamos no nosso *beetleweight* Mini-Touro.

A Scorpion XL (US\$110) é excelente para acionar *hobbyweights* (12lb), tendo sido usada até em *featherweights* (30lb). Ao contrário da Scorpion HX, elas possuem apenas 2 canais. Estes 2 canais, com controle de velocidade PWM, são usados para acionar a locomoção do robô com motores entre 4,8V e 28V, com 12,5A contínuos e 45A de pico. Usamos essa placa nos *hobbyweights* Tourinho e Puminha. Apesar do custo, essas placas são uma ótima escolha, principalmente pelo seu pequeno tamanho. As placas próprias que havíamos desenvolvido inicialmente acabaram ficando maiores que a Scorpion XL, e assim não caberiam no pequeno espaço disponível nesses robôs. No caso do Tourinho, nós tivemos ainda que desenvolver uma placa própria separada somente para acionar o relé da arma.



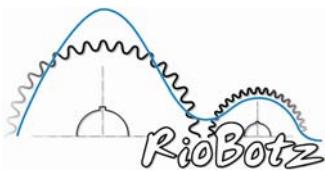
## 6.4. Solenóides

As armas de pequenos robôs, como os “insetos”, podem ser acionadas por relés ou até diretamente a partir de suas placas de potência, como no caso da Scorpion HX. No entanto, robôs maiores precisam de solenóides. Os solenóides são versões maiores de relés, necessários para acionar armas potentes. Dois dos solenóides mais usados em combate são o 586 SPDT e o TW C1, também à venda no site [www.robotmarketplace.com](http://www.robotmarketplace.com).

### 6.4.1. White-Rodgers 586 SPDT

O *White-Rodgers 586 SPDT* (US\$96) suporta 200A contínuos a mais de 600A de pico, sendo portanto apropriado para acionar praticamente qualquer arma de um *middleweight*. Ele é o solenóide usado no Ciclone. O DT do seu nome significa *Double Throw*, ou seja, ele possui tanto contatos normalmente abertos (NA) quanto normalmente fechados (NF). Isso é necessário para que a arma possa ser freiada. Todas as





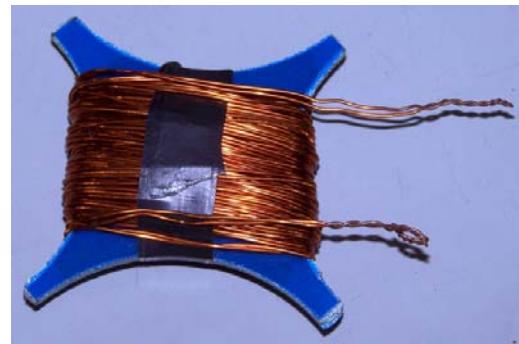
competições exigem que a arma de um robô pare em até um certo tempo, tipicamente 1 minuto. A inércia de muitas armas giratórias é tão grande que ela não conseguiria parar nesse tempo se apenas desligássemos o motor. Existem grandes rotores que podem levar até 2 horas para parar após desligado o motor. Para evitar isso é preciso usar o freio motor.

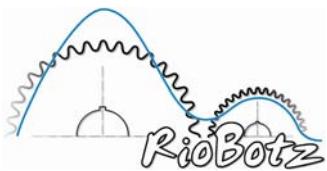
O princípio do freio motor é muito simples: ao colocar um motor DC em curto, ele se transforma em um gerador. Sua rotação gera uma corrente que é dissipada em sua resistência interna, causando frenagem. Experimente girar o eixo de um motor com as mãos, e você verá que o torque que você precisa aplicar com os contatos abertos é muito menor do que quando estão em curto, com freio motor.

Bastaria então conectar o motor ao NA do solenóide, e fazer um curto nos terminais NF passando pelo motor. Ao acionar o solenóide, a corrente passa pelo NA e o motor acelera. Ao desligá-lo, ocorre um curto através do NF que freia o motor.

Mas a energia cinética de muitas armas é tão alta, que ao freiar o motor ele “fritaria”. Isso porque toda a energia da arma estaria sendo dissipada na forma de calor na resistência interna do motor. Para evitar isso, é preciso colocar um resistor de potência conectando os terminais NF. A sua resistência pode ser, por exemplo, 9 vezes a resistência interna do motor. Assim, durante a frenagem, 90% da energia da arma estaria sendo dissipada nesse resistor, e apenas 10% no motor. Porém, quanto mais alta a resistência, maior será o tempo de frenagem. Por isso, se com essa resistência 9 vezes maior a arma do robô demorar mais de 1 minuto para parar, será preciso diminuí-la.

Ao invés de um resistor de potência, você pode usar também um fio de cobre muito longo enrolado (figura ao lado). Conhecendo a resistividade do fio de cobre, calcule quantos metros seriam necessários para a resistência desejada, e o enrole em uma espécie de carretel para manter o freio compacto. A vantagem desse freio é que ele é muito barato, relativamente leve, e o grande comprimento dos fios permite uma dissipação de calor eficiente. Além disso, se a arma do seu robô estiver parando em mais de 1 minuto, basta ir cortando alguns metros do carretel até que a resistência fique baixa o suficiente. Nós usamos este freio de fio de cobre nos robôs Ciclone e Titan, e eles funcionam muito bem. O Touro não precisou de freio motor, pois apesar da alta energia do tambor, seu momento angular é pequeno, e ele consegue freiar sozinho em poucos segundos. Isso vale para *drums* em geral. Mas *spinners* e *vertical spinners*, cujas armas têm grande momento angular, certamente precisarão de um freio motor como esse. Mas é preciso ter cuidado pois o fio esquenta muito durante uma frenagem, e pode derreter qualquer plástico que estiver em sua volta, portanto deixe-o longe da eletrônica ou de qualquer material inflamável. Nós usamos sucata de fenolite (em azul na figura acima) para fazer o carretel.





## 6.4.2. TW-C1

O TW-C1 (US\$44) também é um solenóide *Double Throw*, que permite frenagem, no entanto é bem menor, mais leve, e mais barato que o White-Rodgers 586 SPDT. Ele tolera, a 48V, correntes de 80A contínuas, 240A por 3 minutos, e 500A por 25 segundos. Ele é usado nas armas do Titan e do Touro. O único problema de ambos o TW-C1 e o *White-Rodgers 586 SPDT* é o encapsulamento de plástico, que pode quebrar se sofrer impactos. Por isso, use coxins ou algum outro tipo de amortecimento entre eles e a estrutura do robô.



## 6.5. Fios e Conectores

Para unir os componentes vistos anteriormente, é preciso usar fios e conectores de boa qualidade, que suportem as altas correntes, e que não se soltem devido a impactos.

### 6.5.1. Fios

Os fios precisam ser bastante flexíveis, para que sejam fáceis de serem serpenteados por dentro do robô, e não tendam a romper as soldas durante impactos. Portanto nunca use cabos com núcleo metálico sólido, e sim núcleos com múltiplos fios. Um exemplo de fio flexível é o *Deans Wet Noodle* (figura ao lado), ele é formado por literalmente milhares de fios extremamente finos. É importante também sempre usar fios um pouco mais compridos que o necessário, para evitar que fiquem esticados e possam se romper ou se soltar durante um round, especialmente se o robô sofrer empenamentos ou peças internas se moverem.

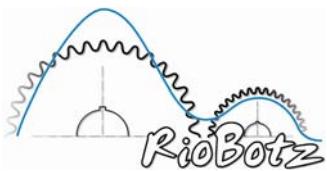


É preciso ficar atento à sua capacidade de corrente, que depende do seu diâmetro (bitola) e do tipo de isolamento. As bitolas mais comuns de fios para uso em *middleweights* são as 8, 10, 12 e 14 AWG. Quanto maior o AWG, menor é o diâmetro do fio. Quanto ao isolamento que recobre os fios, há dois tipos principais: os de PVC, que resistem a até cerca de 105°C, e os de silicone, que podem trabalhar a até 200°C. As maiores correntes toleradas por cada fio são:

- 8 AWG: 70A a 80A contínuos (PVC), 100 a 110A contínuos e pico de 500A (silicone);
- 10 AWG: 50 a 60A contínuos (PVC), 75 a 85A contínuos e pico de 350A (silicone);
- 12 AWG: 35 a 45A contínuos (PVC), 55 a 65A contínuos e pico de 200A (silicone);
- 14 AWG: 30 a 35A contínuos (PVC), 45 a 50A contínuos (silicone).

Note que as correntes de pico, ou aquelas que ocorram esporadicamente e por poucos segundos, podem passar do quádruplo dos valores contínuos sem problemas.

Use abraçadeiras para prender e organizar os fios, isso ajuda muito em um *pitstop*.



Use passa-fios de borracha (figura ao lado) no robô quando precisar que algum fio atravesse uma parede metálica. O atrito entre os fios e um furo em uma placa de metal pode cortar o isolamento e causar curtos. Os passa-fios ficam presos às paredes, e os fios passam pelo seu interior.

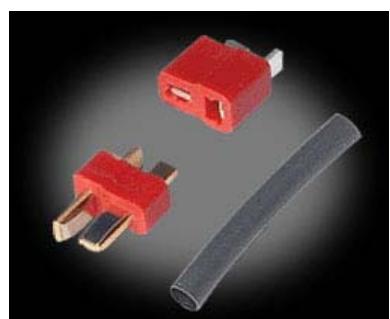


### 6.5.2. Terminais e Conectores

Use sempre terminais do tipo olhal (figura ao lado à esquerda). Evite os terminais tipo garfo ou os de conexão rápida, eles estão propensos a se soltarem devido aos impactos. Prenda sempre o conector usando uma porca bem apertada com uma arruela de pressão. Passe fita isolante líquida no sistema (figura da direita) para evitar que destroços de metal se alojem e causem curtos. Outra dica é prender vários pedaços de fita adesiva dupla-face no interior do robô, em especial perto da eletrônica. Essa fita funciona como um “papa-moscas”, coletando pequenos pedaços de metal que entram no seu robô e que podem causar curtos. Nós sempre usamos essa técnica, ao final de uma competição os “papa-moscas” estão repletos de destroços de metal, pequenos parafusos, e sujeira em geral.



Os conectores precisam ter baixa resistência elétrica e prender bem. Um conector excelente é o *Deans Ultra* (figura ao lado), que tolera 80A contínuos. Nós o usamos para conectar os motores ao controlador de velocidade. Eles suportam correntes de pico muito maiores, o motor da arma do Touro chega a picos de quase 300A, e o *Deans Ultra* que nele usamos aguenta bem. Uma proteção extra é, após conectá-los, passar uma fita isolante sobre eles para garantir que não soltem.

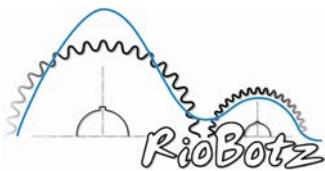


Para correntes mais baixas, nós usamos o *Deans Micro Plug* (figura ao lado), que apesar de muito pequeno suporta correntes de mais de 20A. Nós o usamos para conectar os *fans* das baterias dos nossos middleweights, assim como para conectar os motores dos nossos *hobbyweights*.



Outros conectores muito usados são os Anderson PowerPole. Os mais comuns são os de 45A (figura ao lado) e os de 75A. Os de 75A, apesar de um pouco grandes, toleram picos de corrente ainda mais altos que o *Deans Ultra*. Nós o usamos nas nossas baterias.





## 6.6. Chaves Liga/Desliga

As chaves liga/desliga (*on/off*) são obrigatórias nos robôs. A maioria das competições exige que essa chave interrompa todo e qualquer fluxo de corrente do robô. Não é suficiente desligar a placa de sinal ou o receptor, é preciso interromper também a conexão entre a(s) bateria(s) e o restante do robô. Por esse motivo, estas chaves precisam suportar toda a corrente que passa pelo robô, incluindo a requerida pela locomoção e pela arma. No caso do Touro, por exemplo, essa corrente pode chegar a até 400A.

Existem chaves de alta corrente no mercado nacional, usadas por exemplo em caminhões, no entanto elas são relativamente grandes e pesadas. Duas chaves, pequenas e leves, são muito usadas em competições internacionais: a chave Hella, e a MS-2.

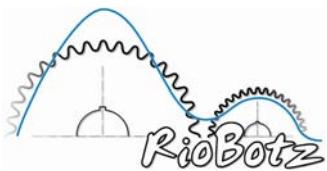
A chave Hella (US\$18) é a mais usada, suporta 100A contínuos, 500A por 10 segundos, e picos de até 1000A. Ela vem com uma chave vermelha (figura ao lado à esquerda) que não é muito conveniente para ser usada em combate. Muitos cortam fora a aba dessa chave vermelha e fazem um pequeno rasgo para girá-la usando uma chave de fenda (veja a figura da direita). Nós usamos a Hella no Ciclone e no Titan.



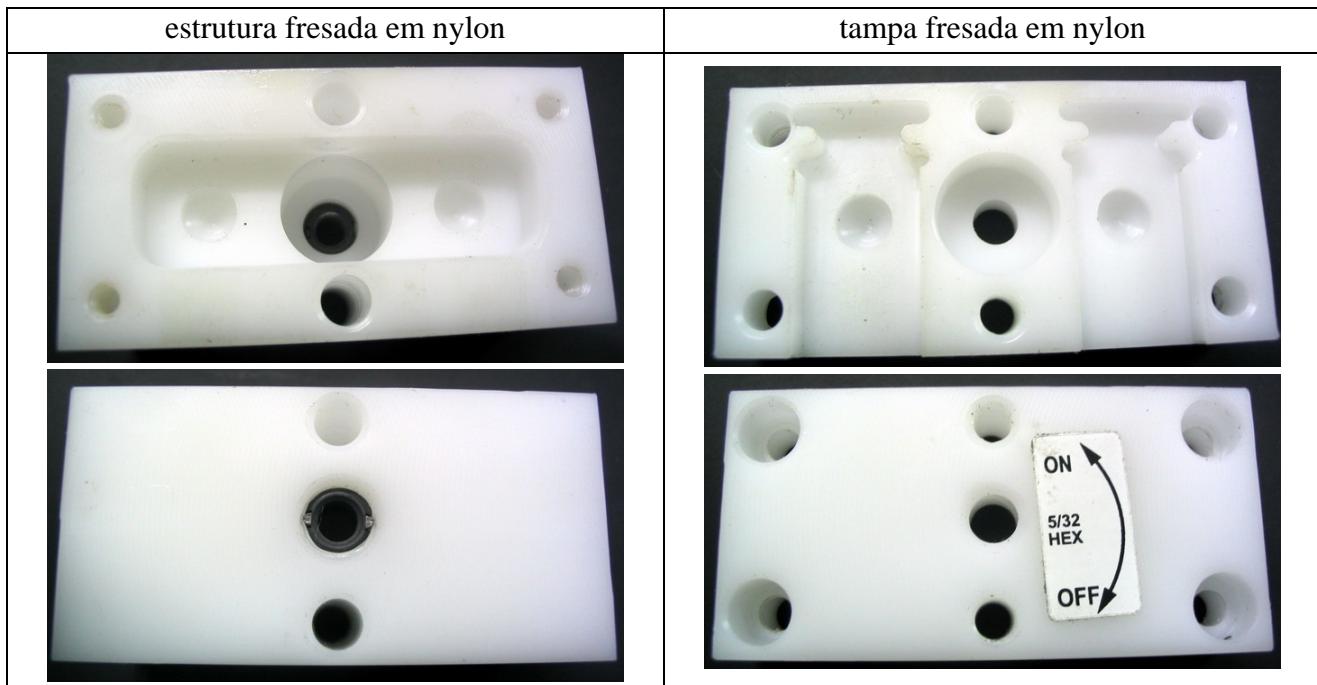
A chave MS-2 (figura ao lado) é melhor e menor que a Hella, no entanto é bem mais cara (US\$69). Ela tolera 175A contínuos, 500A por 3 minutos, e 1000A por 25 segundos. Para ligar ou desligar o robô, você precisa inserir uma chave allen (figura ao lado à direita) e dar 4 voltas completas no sentido apropriado. Essas 4 voltas tornam quase impossível a chave desligar sozinha devido a vibrações durante um round. Além disso, uma mola em seu interior garante que o robô continuará ligado se ela for quebrada. Isso nos salvou no Robogames 2006: o *spinner* The Mortician conseguiu quebrar a MS-2 que usamos no Touro, no entanto o nosso robô continuou funcionando por causa desta mola, e com isso acabamos ganhando o round. Existem versões que toleram menos corrente mas não são muito menos caras, como a MS-1 (US\$58) e a MS-05 (US\$48).



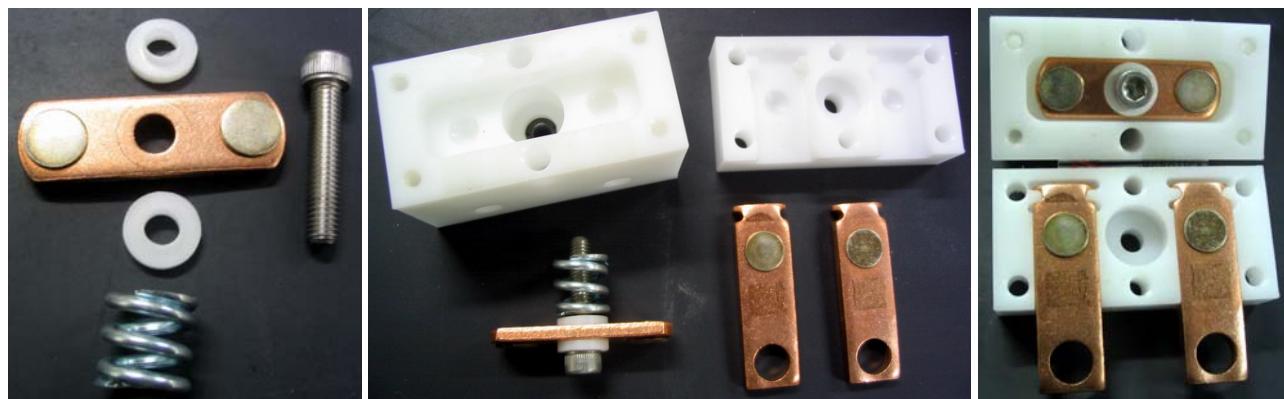
Essas chaves são muito boas, porém são caras. Uma sugestão é construir sua própria versão, vamos mostrar aqui como fazer isso. Você vai precisar de dois blocos de nylon (um para a estrutura e outro para a tampa), 1 parafuso allen longo e 4 curtos, uma mola, duas arruelas de nylon, dois terminais tipo olhal e uma barra de cobre de preferência todos com contatos banhados a ouro.



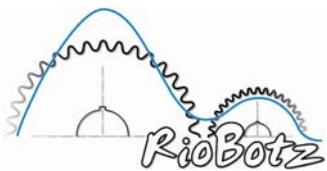
A estrutura em nylon (figura abaixo à esquerda) precisa ser fresada para acomodar uma fêmea rosada ou porca (em preto ao centro) e o conjunto parafuso-arruelas-barra-mola, e terá pelo menos 4 furos roscados para prender a tampa. A tampa em nylon (figura abaixo à direita) é fresada para encaixar os dois terminais, e possui o mesmo número de furos da estrutura, mas passantes.



Em seguida, monte o parafuso longo passando pela arruela de nylon, barra de cobre, outra arruela e mola (figura abaixo à esquerda). Em seguida, encaixe o parafuso na estrutura, aparafusando-o na fêmea rosada, e insira os dois terminais na tampa (figuras ao centro e à direita). Agora encaixe a tampa na estrutura, e use 4 parafusos menores para prendê-la melhor no seu robô. Você pode fazer mais furos na estrutura para poder prendê-la melhor no seu robô.

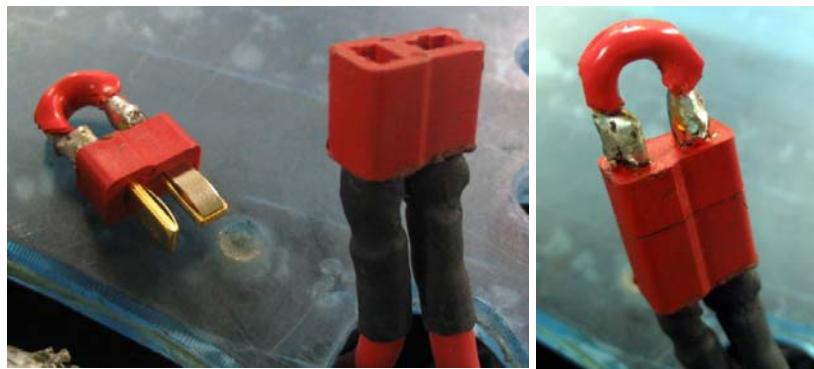


O princípio de funcionamento é simples. O parafuso longo fica escondido dentro da estrutura. Para desligar o robô, uma chave allen é usada para apertar o parafuso, o que fará a barra de cobre descer e deixar de encostar nos terminais. Para ligar, basta desapertar o parafuso, e a barra de cobre

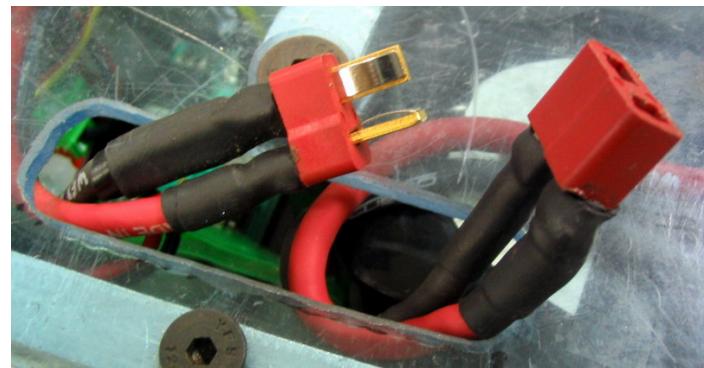


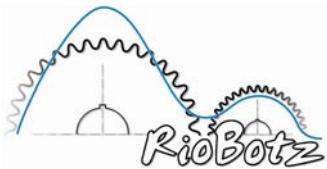
sobe até fazer contato. A mola é importante para garantir que os contatos estão bem encostados um contra o outro, e é uma segurança caso a chave quebre, mantendo o robô ligado para não perder o round. As arruelas de nylon isolam eletricamente o parafuso longo da barra de cobre.

Existem chaves ainda mais simples e baratas de serem feitas. Uma delas é a que usamos na locomoção do Ciclone. A chave Hella desliga a arma, acionada a 24V, mas como a locomoção usa uma bateria de furadeira de 18V, temos que ter uma segunda chave liga/desliga. A solução que adotamos custou apenas US\$3,25. Usamos um par de conectores Deans Ultra, veja as figuras ao lado, com o robô desligado (figura da esquerda) e ligado (figura da direita). Cortamos em dois o fio que liga ao positivo da bateria, abrindo o circuito, e soldamos as duas metades em um mesmo conector fêmea. Em seguida, soldamos um pequeno fio provocando curto no conector macho (não esqueça de passar fita isolante, na foto acima ele está sem). Ao conectar macho e fêmea, o circuito é fechado e o robô liga. O conector Deans Ultra prende de maneira muito firme, e tolera 80A contínuos e, pelos nossos testes, pelo menos 300A de pico. O piloto guarda no bolso o macho, e na hora do round o conecta no robô e esconde o conjunto inserindo-o para dentro da carcaça (para evitar que seja arrancado pelo adversário, como o *spinner* The Mortician conseguiu fazer numa chave muito parecida do *launcher* Sub-Zero, que estava exposta).



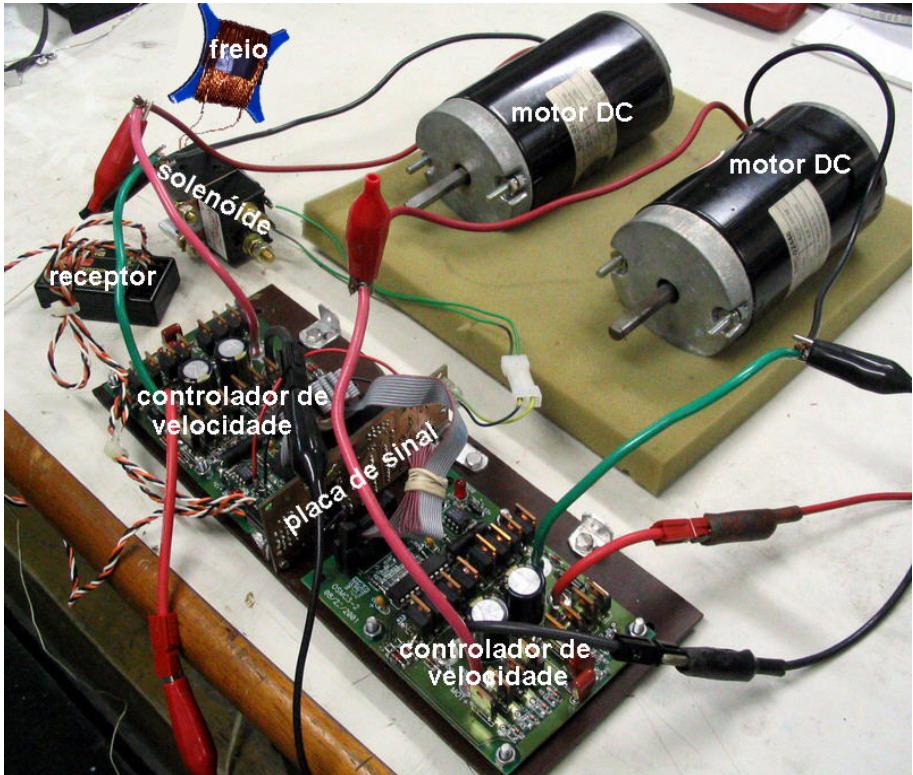
Outra solução ainda mais simples é não usar chaves liga/desliga. Para isso, o robô precisa ter um buraco ou vão em sua estrutura por onde o piloto entra com os dedos ou as mãos e conecta ou desconecta diretamente a(s) bateria(s). Essa é a solução que usamos nos nossos *hobbyweights* (figura ao lado). Um conector Deans Ultra fêmea é soldado aos terminais da bateria (jamais solde um macho em baterias, pois se encostarem em algum metal ela entra em curto), e a eletrônica e o relé da arma se conectam em paralelo usando um macho. Para ligar o robô, os Deans são conectados e inseridos para dentro do buraco da tampa, e usamos silver tape para vedar (para não entrar pedaços de metal no robô que possam provocar curtos). Uma vantagem dessa técnica é que não é preciso abrir o robô nem trocar a bateria, ela pode ser recarregada dentro dele. Só será necessário abrir o robô para trocar a bateria se o intervalo de tempo até a próxima luta for muito curto e não der tempo de recarregá-la dentro dele.





## 6.7. Diagramas de Conexão

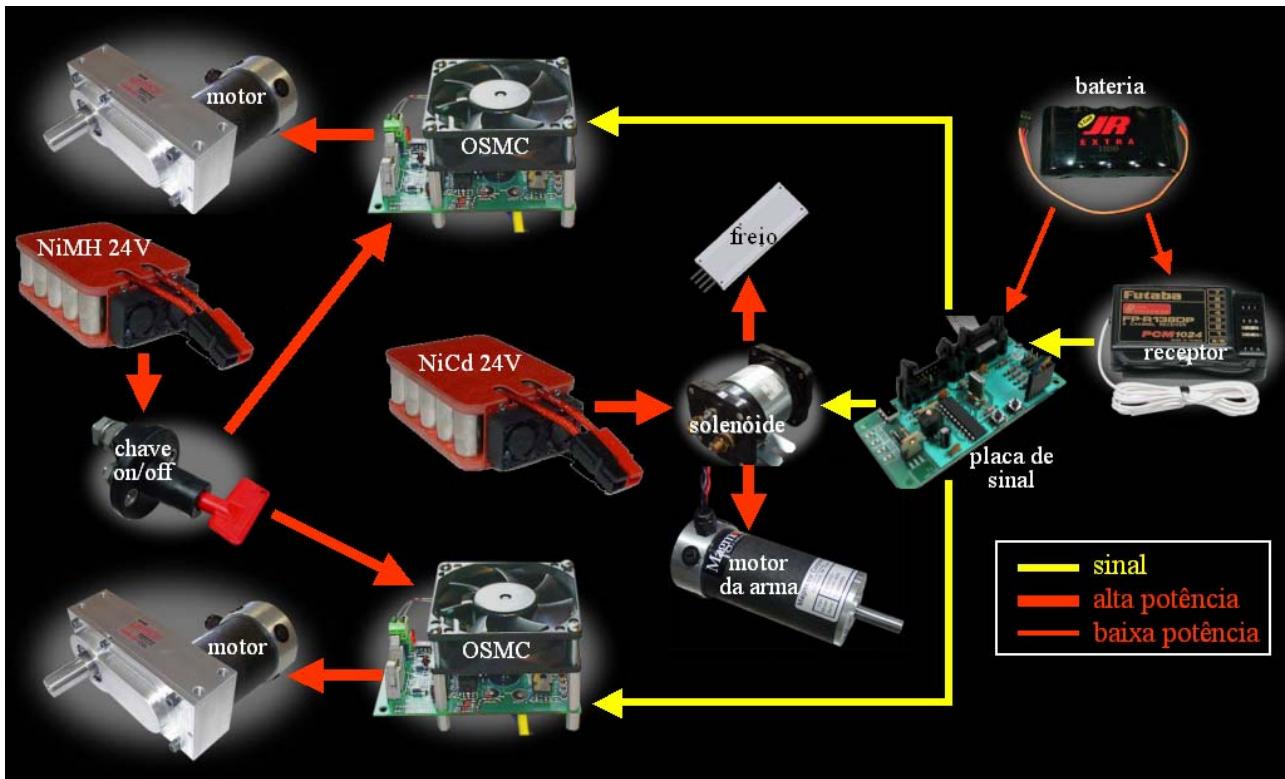
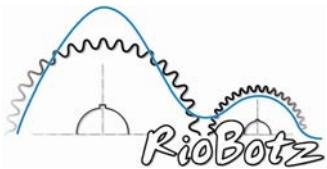
Nesta seção vamos mostrar como fazer para conectar todos os componentes vistos acima. Uma configuração típica pode ser vista na foto ao lado. O receptor recebe os sinais do rádio e os envia em forma PPM para a placa de sinal. Essa placa envia então sinais PWM apropriados para cada um dos controladores de velocidade, que os amplificam e enviam para os motores DC que acionam as rodas. A placa de sinal também aciona o solenóide, que liga o motor da arma (não representado na figura), e usa o carretel de fios de cobre para frenagem.



Vamos apresentar a seguir dois diagramas típicos. O primeiro é um diagrama clássico, muito parecido com o que usávamos no robô Ciclone em 2004. Em seguida apresentaremos um diagrama melhorado, que cobre as deficiências do primeiro.

### 6.7.1. Diagrama Clássico

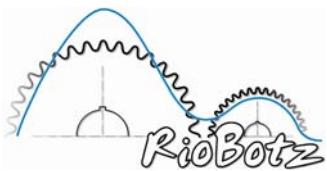
A figura a seguir apresenta um exemplo de um diagrama clássico de conexão. São usados dois packs de baterias de níquel, um de níquel hidreto metálico (NiMH) e outro de níquel cádmio (NiCd). Como será discutido no capítulo 7, as baterias de NiCd fornecem correntes mais altas, e portanto são apropriadas para acionar a arma do robô, enquanto que as de NiMH têm mais capacidade (duram mais), sendo ideais para a locomoção. Nesse exemplo, o pack de NiMH é ligado a uma chave *on/off* Hella, que fornece energia para os controladores de velocidade OSMC. O pack de NiCd é ligado ao solenóide *White-Rodgers 586 SPDT* da arma, e um resistor de potência é usado para frenagem. Um pequeno pack de baterias fornece energia o receptor a à placa de sinal. A placa de sinal interpreta o sinal PPM do receptor e envia PWM aos OSMC para acionar a locomoção do robô, assim como liga ou desliga o solenóide para acionar a arma.



O diagrama acima é muito usado na prática, e parece ser muito bom, inclusive otimizando o uso das baterias – NiCd para arma e NiMH para a locomoção. No entanto, ele tem sérias falhas:

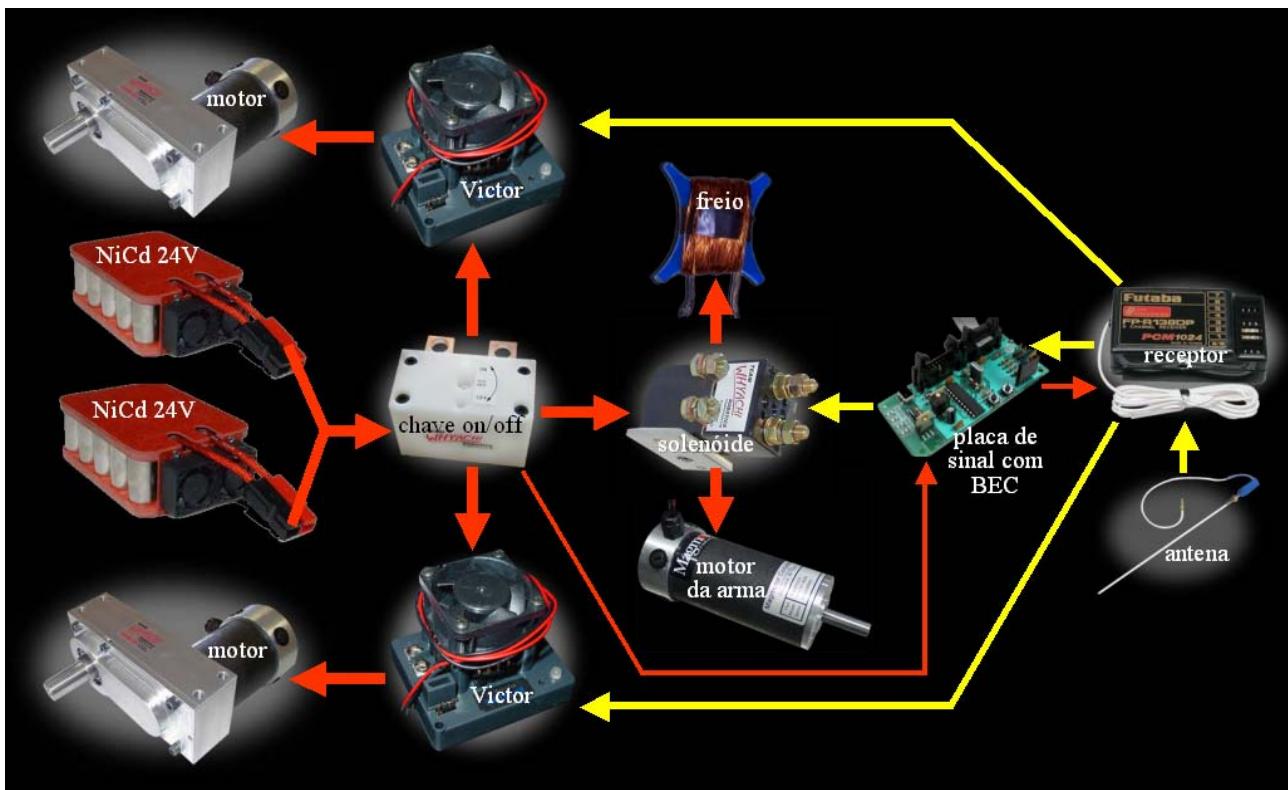
- se houver algum problema com a bateria de NiMH, o robô pára de se locomover, e portanto perde o round;
- se o pequeno pack de baterias do receptor estiver descarregado, o robô não responderá;
- se a placa de sinal funcionar em 12V e o receptor em 5V, como é usual, poderia ser preciso usar dois packs pequenos, um de 12V e outro de 5V, ao invés de apenas um;
- não há chave *on/off* entre o pack de NiCd e o solenóide, portanto se devido a um pico de corrente os terminais desse solenóide soldarem com ele conduzindo, a arma não parará de funcionar – isso é proibido em todas as competições nos EUA e mais recentemente no Brasil, seria preciso ter mais uma chave *on/off*, antes do solenóide, o que significa mais peso, menos espaço, e mais trabalho para ligar o robô;
- não há chave *on/off* entre o pack pequeno e o receptor e placa de sinal – muitas competições exigem que tudo, inclusive o receptor e qualquer *fan* do robô, seja desligado pela chave; o robô precisaria de 3 chaves *on/off* ao total, que o piloto não poderia esquecer de ligar no início do round;
- o solenóide *White-Rodgers 586 SPDT* é relativamente grande e pesado;
- o controlador de velocidade OSMC é um pouco grande, ocupa muito espaço interno;
- um resistor de potência de baixa resistência elétrica (da ordem de frações de ohm) e alta potência (alguns kW para *middleweights*), necessário para a frenagem da arma, não é barato, e corre o risco de queimar.

Para corrigir todas essas deficiências, nós utilizamos um diagrama melhorado.



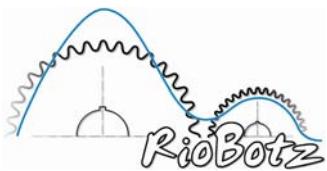
### 6.7.2. Diagrama Melhorado

A figura abaixo apresenta um diagrama melhorado, que usamos no robô Touro. São usados dois packs de baterias de níquel, conectados à chave *on/off* em paralelo. Ambos precisam ser de NiCd para poderem ser conectados em paralelo sem problemas. A mesma chave alimenta os controladores de velocidade Victor, o solenóide TW C1, e a placa de sinal (que possui um regulador de tensão para poder ser conectada em 24V). A placa de sinal é quem alimenta o receptor, através de um regulador nela embutido que faz papel de BEC (*Battery-Elimination Circuit*). O receptor pode ser conectado diretamente aos Victors, sem precisar passar pela placa de sinal. A placa de sinal só precisa então interpretar o canal do receptor que controla a arma, para poder acionar o solenóide. Uma antena *Deans Base-Loaded Whip* é acoplada ao receptor, melhorando a qualidade da recepção do sinal do rádio. Um fio de cobre enrolado é usado como freio da arma.



Esse diagrama melhorado supre todos os problemas do esquema clássico, pois:

- se uma das baterias parar de funcionar (alguma solda se soltando ou algum mal contato), o robô continua se locomovendo e sua arma funcionando, o pack restante cuidará disso, apesar de poder ficar sobrecarregado;
- a arma do robô acelerará mais rapidamente, pois os 2 packs em paralelo vão poder fornecer o dobro da corrente de 1 pack único, assumindo que o acionamento das rodas não esteja exigindo demais desses packs;
- não há necessidade do pequeno pack de baterias do receptor, ele é alimentado pela placa de sinal, que por sua vez é alimentada pelos próprios 2 packs;



- a única chave *on/off* do sistema funciona para o robô inteiro, se ela for desligada nada recebe energia, nem a locomoção, nem a arma, nem a placa de sinal, e nem o receptor; além de ser prático, isso garante que o robô passará na inspeção de segurança mesmo nas competições mais rigorosas;
- o solenóide TW C1 é bem menor, mais leve, e mais barato que o *White-Rodgers 586 SPDT*;
- o controlador de velocidade Victor, além de ser menor que o OSMC, pode ser conectado diretamente ao receptor sem passar pela placa de sinal;
- a placa de sinal pode ter seu tamanho reduzido, pois só precisa acionar a arma e fornecer energia para o receptor, sem ser necessária para a locomoção;
- o fio de cobre enrolado é barato e dissipava melhor o calor do que o resistor de potência.

## 6.8. Desenvolvendo sua Própria Eletrônica

Os controladores de velocidade apresentados acima e suas placas de sinal não são baratos, apesar de serem uma solução pronta e terem uma boa relação custo-benefício. Ao montarmos a partir do zero as placas OSMC e desenvolvermos nossa própria eletrônica de sinal, nós não só economizamos como aprendemos vários aspectos desse sistema. Esperamos que as informações abaixo ajudem no desenvolvimento de sistemas eletrônicos próprios.

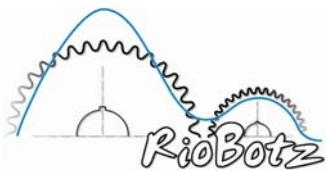
### 6.8.1. Controlador de Velocidade

Para o acionamento da ponte H, não use Transistores Bipolares de Junção (BJT), eles não são eficientes nas altas correntes elétricas necessárias em combate. Use transistores MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*), ou abreviadamente FET. Suas vantagens são muitas, apesar de seu custo relativamente alto. A primeira delas é o fato de ele ser acionado por tensão (e não por corrente como nos BJT), facilitando muito o seu acionamento. Basta que a tensão na sua entrada (*gate*) seja maior que a tensão de limiar ( $V_{th}$ ) do dispositivo, para que seja permitida a passagem de corrente entre seus terminais (*drain* e *source*).

Quando o FET está conduzindo, ele se comporta como um resistor ( $R_{on}$ ). Os melhores FETs disponíveis possuem  $R_{on}$  de cerca de  $5\text{ m}\Omega$ . Para fornecer, por exemplo, 160A contínuos a um motor, são necessários mais de um FET. Utilizando 4 FETs em paralelo, a potência dissipada por cada um deles é de cerca de

$$P = I^2 \cdot R_{on} = \left( \frac{160\text{A}}{4} \right)^2 \cdot 5\text{m}\Omega = 8\text{W}$$

o que está dentro de uma faixa aceitável para o uso com pequenos dissipadores, juntamente com ventilação ativa proporcionada por um *fan*. Caso não se utilizem dissipadores, a corrente máxima contínua aceitável num sistema de 4 FETs em paralelo fica em aproximadamente 100A. Outra grande vantagem do FET é que ele não possui limitação de corrente, desde que a temperatura do silício fique dentro da máxima permitida, ou seja, que a corrente não seja grande demais por muito tempo (tolerando assim grandes picos de corrente, uma segurança a mais para o circuito). O seu



tempo de comutação é de apenas algumas dezenas de nano segundos, fazendo com que as perdas neste processo sejam muito pequenas.

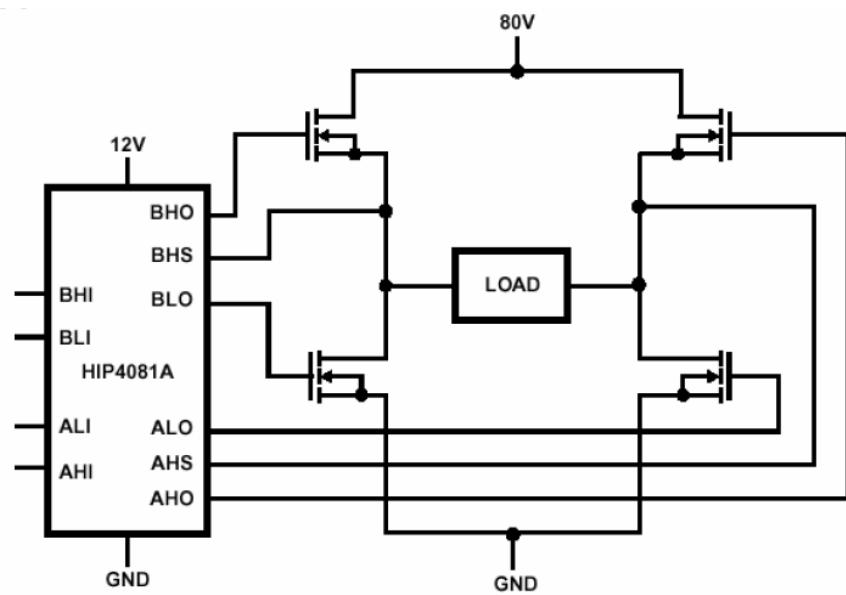
O fato de FETs serem acionados por tensão facilita muito o desenvolvimento de um circuito para seu acionamento, mas uma característica não ideal existente gera alguns problemas. Para o FET entrar em condução, uma carga elétrica deve ser injetada no *gate* do FET para que a tensão entre o *gate* e o *source* chegue a um valor de aproximadamente 10V, que é, em geral, a tensão em que eles entram em condução máxima, ou seja, menores valores de  $R_{on}$ . Essa necessidade de injetar cargas no FET pode ser modelada como um capacitor em paralelo com o *gate* do FET (efeito chamado de capacidade parasitária).

Para carregar essa grande capacidade, o chip HIP4081A pode ser utilizado. Ele é capaz de fornecer até 2A para os quatro FETs que se encontram em cada saída, em paralelo. Para evitar o *shoot-through* (ou seja, um FET entrar em condução enquanto o outro no mesmo lado da ponte H ainda estiver conduzindo), foi colocado um resistor em série com o *gate* de cada FET, o que limita a corrente total e faz com que eles demorem mais para conduzirem. Com isso, os resistores ajudam a balancear o tempo de  $T_{on}$  e  $T_{off}$  de todos os FETs em paralelo, ao fazer com que as constantes RC do conjunto resistor - capacidade sejam semelhantes.

Apesar dos resistores, ainda haveria a chance de ocorrer um *shoot-through*. Duas proteções existem para evitar essa condição. A primeira é um tempo programável no HIP4081A que faz com que ambos os FETs fiquem em estado de corte. A segunda é a adição de diodos extremamente rápidos em paralelo com os resistores, de forma que durante o  $T_{off}$  toda a corrente seja descarregada por eles, eliminando qualquer chance de ocorrer *shoot-through* no circuito.

Uma última preocupação é o fato de os *gates* dos FETs serem muito sensíveis a tensões muito altas, que podem destruir o FET, mesmo caso ocorram muito rapidamente. Para proteger os FETs, dois diodos zener são colocados para cortar qualquer ruído que ultrapasse o valor da tensão do zener (15V).

O chip HIP4081A tem portanto a função de acionar os FETs, tanto os inferiores quanto os superiores, já incluindo um circuito que aumenta a tensão para acionar estes últimos. No exemplo da figura ao lado, o HIP4081A está sendo alimentado por uma tensão de 12V, e uma tensão de bateria de 80V está sendo aplicada à carga. O chip aceita tensões de bateria de 12V até 80V, gerando todos os sinais e tensões necessários para acionar os FETs. Para funcionar corretamente, o HIP4081A precisa de uma tensão de alimentação nominal de 12V, podendo variar de 9,5V até 15V. Caso a tensão de





alimentação seja menor que o valor mínimo, uma proteção interna desliga as saídas para os FETs superiores, desligando efetivamente o circuito. Deve ser lembrado que caso a tensão de alimentação exceda 16V, o chip pode ser danificado.

O HIP4081A tem quatro entradas digitais, AHI, ALI, BHI e BLI, cada uma correspondendo às saídas que acionam cada conjunto de FETs, AHO, ALO, BHO e BLO, respectivamente (figura acima). Ou seja, quando uma entrada for ativada, a sua saída correspondente faz com que os FETs entrem em condução. Uma eletrônica externa deve enviar os sinais de PWM e direção para o HIP4081A de forma a acionar a ponte H. Esses sinais digitais são compatíveis com a lógica TTL, mas qualquer tensão na entrada acima de 3V é reconhecida como sinal de nível alto.

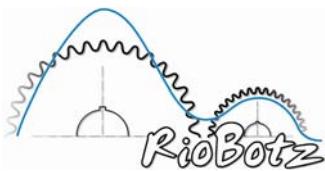
Além disso, o HIP4081A possui uma proteção na lógica interna contra *shoot-through*, que desliga os FETs superiores quando os FETs inferiores do mesmo lado da ponte forem acionados, independentemente do estado da entrada superior. Essa proteção é feita com portas lógicas AND em todas as entradas do HIP4081A. As portas têm como entrada os valores de entrada de AHI, ALI, BHI e BLI, o complemento do pino DIS (Disable, ou desabilitar), fazendo com que ao ter um nível baixo, desliga todos os FETs.

Além dessas, as portas superiores, de AHI e BHI, têm outras duas entradas, uma para a proteção contra tensões de alimentação baixas, e outra sendo o complemento das entradas inferiores, o que faz com que as saídas superiores AHO e BHO sejam desligadas caso as entradas inferiores respectivas estejam ativadas.

Resistores também são colocados no HIP4081A, entre os pinos de entrada e o terra, forçando o chip a um estado padrão, de forma que, caso não exista nada conectado à placa de potência, todos os FETs estejam desligados, formando uma proteção adicional contra o acionamento não desejado dos motores.

Devido à natureza dos FETs utilizados, a tensão no *gate* deve ser aproximadamente 10V maior do que a tensão de bateria para acionar os FETs superiores. Para gerar essa tensão maior, o HIP4081A possui um sistema de *charge-pump* que, com a ajuda de um diodo e um capacitor externo, gera a tensão necessária nas saídas AHO e BHO, possibilitando o acionamento dos respectivos FETs. Devido à existência desse sistema, não é necessário mais nada para acionar os FETs.

Para proteger o circuito de picos de tensões causados pelas escovas e comutadores de motores DC, é utilizado um componente chamado Supressor de Transientes de Tensão (TVS – *Transient Voltage Supressor*, em inglês). Eles funcionam exatamente como um diodo zener, ou seja, quando a tensão entre o dispositivo ultrapassa um valor especificado ele entra em condução, “absorvendo” toda a tensão excedente. Além disso, o TVS é otimizado para agüentar picos de tensão com altas correntes. O TVS é colocado no circuito de forma a absorver os picos de tensão entre os terminais da bateria e proteger os FETs de tensões que possam vir a superar o limite entre os terminais *drain* e *source*. Além dos TVS, uma rede RC entre os terminais do motor provê uma proteção adicional contra picos de alta freqüência gerados pelas escovas do motor e, finalmente, grandes capacitores eletrolíticos são colocados o mais próximo possível da ponte H para reduzir os efeitos causados pelas impedâncias dos fios da bateria até o circuito.



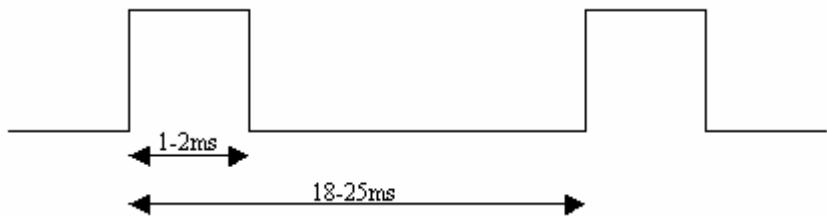
A última parte do circuito é composta pela fonte de alimentação chaveada, que converte a tensão da bateria para 12V, através de um regulador chaveado de alta eficiência, fazendo com que não seja necessário o uso de um dissipador para o regulador. Esses 12V também alimentam o circuito externo à placa de potência, o que elimina a necessidade de uma alimentação externa para a placa de sinal.

### 6.8.2. Placa de Sinal

O circuito de potência discutido acima não é capaz de receber diretamente os sinais de um receptor de rádio-controle sem que estes sejam primeiramente tratados. Esse tratamento de sinais é feito pelo circuito de controle (placa de sinal), formado principalmente por um micro-controlador PIC capaz de executar 1 milhão de instruções por segundo, caso esteja funcionando com um cristal de 4MHz.

A eletrônica de sinal é portanto a interface entre o controlador de velocidade (ou o solenóide) e o receptor. O circuito da placa de sinal que a nossa equipe desenvolveu é capaz de decodificar até quatro sinais do receptor e, de acordo com estes, acionar duas eletrônicas de potência – um sinal de entrada para cada – com controle de velocidade e direção, além de poder acionar um solenóide ou relé auxiliar utilizando uma lógica com um ou os dois sinais restantes.

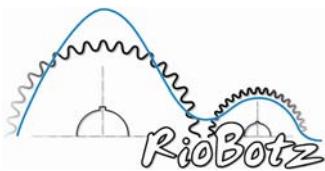
Antes de analisar o projeto da placa de sinal, vamos relembrar quais sinais devem entrar e sair deste circuito. O único sinal de entrada do circuito é o que se origina no receptor, um trem de pulsos seguindo o padrão PPM (figura ao lado). Esse trem de pulsos possui um período que pode variar entre 18 e 25ms, com cada pulso variando entre 1ms (*low*) e 2ms (*high*).



Quanto aos sinais de saída, há cinco sinais que devem ser enviados à placa de potência, o AHI, ALI, BHI, BLI e o sinal de *Disable*. Esses sinais correspondem a cada um dos sinais de entrada do HIP4081A da placa de potência. Devido à proteção contra *shoot-through* do HIP4081A, pode-se fazer uma simplificação, mantendo tanto o sinal AHI quanto o BHI em nível lógico alto. Já o *Disable* só é usado caso se queira desligar a ponte H. Com isso, a tabela abaixo mostra os sinais sugeridos para o correto funcionamento do circuito de potência.

AHI	BHI	ALI	BLI	Disable	Função
1	1	0	PWM	0	Para frente
1	1	PWM	0	0	Para trás
1	1	0	0	0	Freio
1	1	1	1	0	Freio
X	X	X	X	1	Desligado

X: não importa; 1: 5V; 0: 0V;



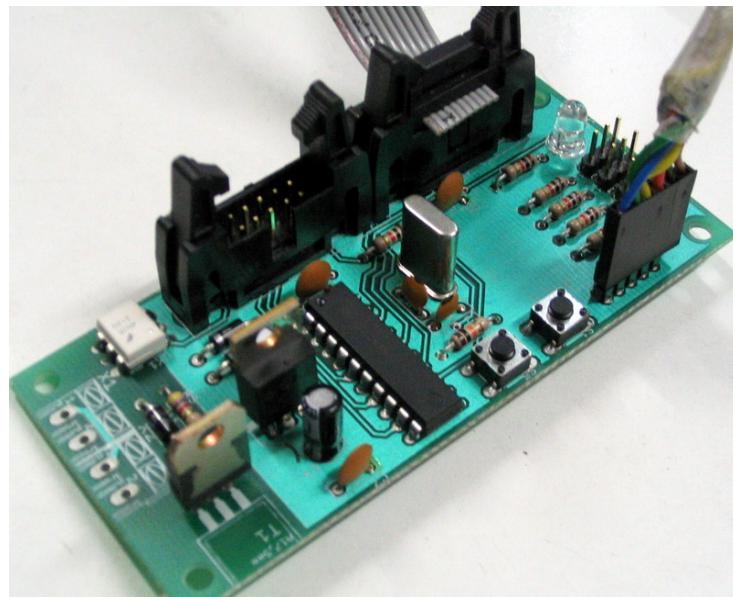
Apesar de já ser necessário utilizar somente dois sinais, já que o AHI e o BHI são fixos em nível lógico 1, ainda não há no circuito um sinal somente para o PWM e outro independente somente para a direção, o que seria necessário já que o sinal gerado pelo PIC estaria fixo num pino específico. A melhor solução é modificar a tabela para que os sinais fiquem fixos numa única posição. Essa modificação é mostrada na tabela abaixo.

AHI	BHI	ALI	BLI	Disable	Função
1	1	0	PWM	0	Para frente
1	1	1	$\overline{\text{PWM}}$	0	Para trás
1	1	0	0	0	Freio
1	1	1	1	0	Freio
X	X	X	X	1	Desligado

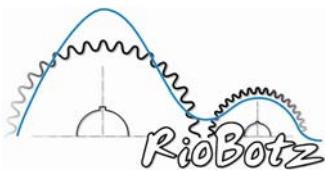
X: não importa; 1: 5V; 0: 0V;

Com essa nova tabela, fica claro que o sinal BLI será o sinal de PWM, apesar de ser necessário alguma medida (seja por *software* ou por *hardware*) para inverter o sinal caso o motor esteja girando para trás. Nesse caso, o sinal ALI será o sinal de direção, sendo de nível baixo (“0”) quando se deseja ir para frente e de nível alto (“1”) quando se deseja ir para trás. Com isso, considerando o PWM em 100%, ou seja, em “1” sempre, no caso para frente a corrente passa pelos FETs conectados em AHO e BLO. Como no caso para trás o PWM está invertido (em “0”), a corrente passa pelos FETs em BHO e ALO.

O *hardware* da placa de sinal desenvolvida pela nossa equipe é bastante simples, vide a figura ao lado. É composto de um micro-controlador PIC16F876A, e de um *buffer* para isolar os sinais gerados pelo PIC em relação aos sinais da placa de potência, protegendo-o de quaisquer problemas que possam ocorrer. Há também um circuito (opcional) de acionamento de relé de alta potência, também isolado, mas dessa vez por um optoacoplador, que provê um isolamento completo entre o relé e o circuito de controle em si.



Além disso, ainda existe um circuito regulador de tensão que utiliza os 12V disponíveis através da placa de potência e os transforma em 5V através de um regulador linear. Esses 5V são utilizados para alimentar todo o circuito de controle, incluindo o receptor de rádio controle. O circuito ainda inclui dois botões, um para *reset* do PIC e outro para o acionamento do modo de calibragem.



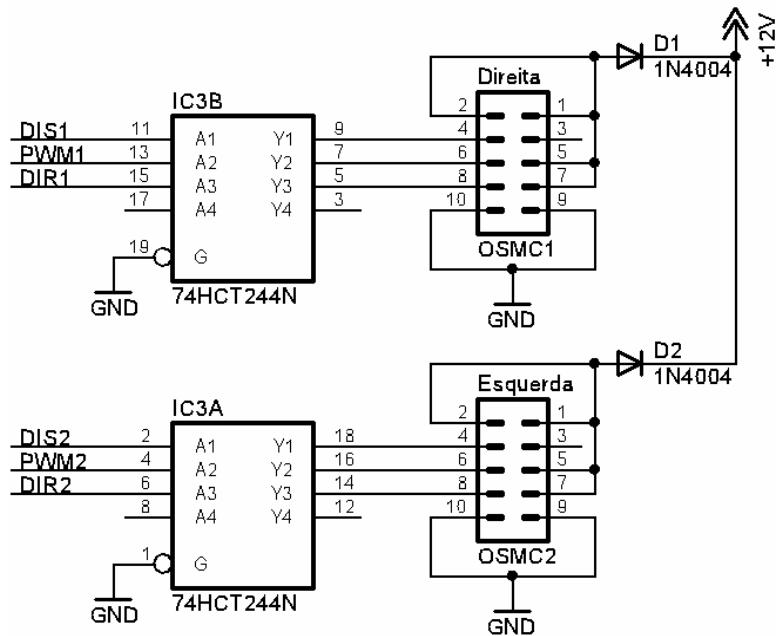
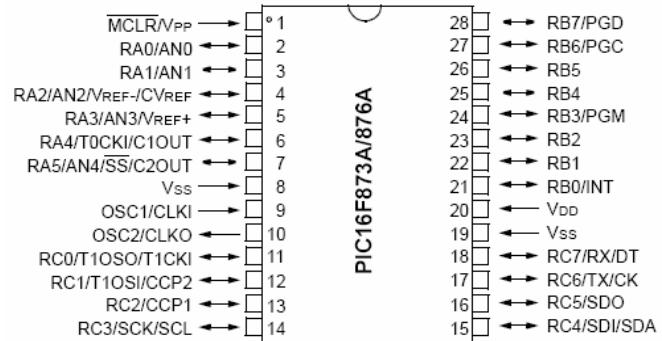
O micro-controlador PIC16F876A (figura ao lado) possui opção de gravação *in circuit*, ou seja, não é necessário retirar o chip para gravar o software de controle. Para isso, basta conectar o gravador no conector disponível no circuito.

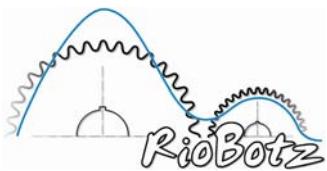
As entradas dos sinais do receptor do rádio-controle são conectadas através de resistores para os pinos RB4 até o RB7 do PIC. Esses pinos geram uma interrupção (desvio de programa) quando a entrada muda de estado, sendo assim perfeitos para a leitura do sinal do receptor.

O buffer utilizado em ambas as saídas é o chip 74HCT244, composto por dois conjuntos de quatro buffers. É possível também utilizar outros chips equivalentes ao 74HCT244, como o 74HC244, mas deve-se atentar aos valores de tensão de saída que estes apresentam, caso se utilize algum outro além desses dois apresentados, já que existem valores mínimos a serem aplicados às entradas do HIP4081A da placa de potência.

Por exemplo, o chip da série LS (74LS244) possui uma saída em nível lógico alto com a tensão mínima especificada de 2V, enquanto a tensão mínima de entrada do HIP4081A para reconhecimento de nível lógico alto é de 2,5V. Apesar disso, o 74LS244 pode ser utilizado, mas não é recomendado, já que a tensão mínima de saída só é alcançada com altas correntes de saída, que não ocorrem no circuito.

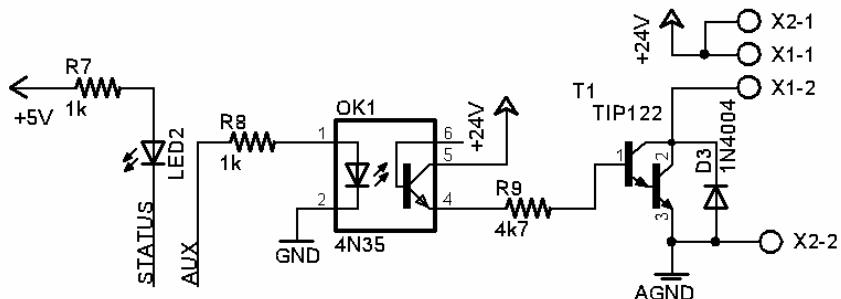
Na figura ao lado estão mostrados dois conectores chamados OSMC1 e OSMC2, que podem ser usados para conectar a placa de sinal desenvolvida aos controladores de velocidade OSMC. Os sinais de saída AHI e BHI dos conectores das placas de potência, pinos 5 e 7 respectivamente, já estão conectados na linha de 12V da placa de potência, pinos 1 e 2, ou seja, serão reconhecidos pelo HIP4081A como sendo nível lógico 1, exatamente como descrito na tabela mostrada anteriormente. Outro detalhe que pode ser visto nesta figura é o fato de termos diodos entre a linha de 12V que vem dos conectores e a linha de 12V da placa de sinal. Isso é feito para se utilizar a alimentação das duas eletrônicas de potência e, com isso, ganhar confiabilidade, já que existirá alimentação no circuito de controle mesmo caso uma das eletrônicas de potência queime.





Além do acionamento dos controladores de velocidade, a placa de sinal desenvolvida também pode acionar um relé (ou solenóide) usado na arma, e inclui um LED de *status*, como pode ser visto no circuito da figura ao lado. Ele é formado por um optoacoplador que, ao ser ativado, faz com que o transistor T1 entre em condução, acionando o relé. Para isso, os terminais do relé devem ser posicionados nos terminais X1-1 e X1-2 e uma alimentação de 24V deve ser colocada nos terminais X2-1 e X2-2 (assumindo-se que o relé seja de 24V). O transistor T1 pode conduzir até 3,5A, caso se utilize um dissipador de calor, ou até 1,0A caso contrário. Os transistores TIP120, TIP121 e TIP122 podem ser utilizados nesse circuito. Na figura também é mostrado o LED de *status*, que serve para mostrar o estado do programa que está sendo executado pelo PIC. No caso ele só foi utilizado para indicar se o circuito está no modo de calibragem ou no modo normal.

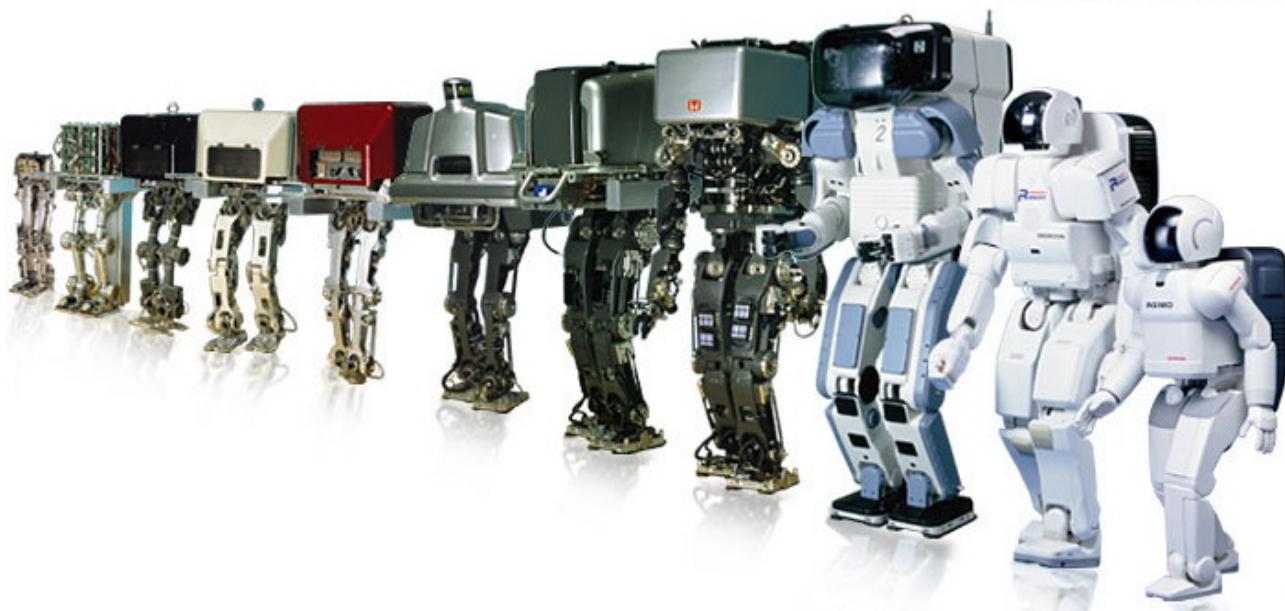
Todo o *software* usado pelo PIC da placa de sinal foi escrito na linguagem de programação C. O programa em si é relativamente extenso e muito específico da nossa placa, por isso não o incluímos neste tutorial. No entanto, qualquer pessoa com alguma familiaridade em programar PICs pode desenvolver sua própria versão sem dificuldades.





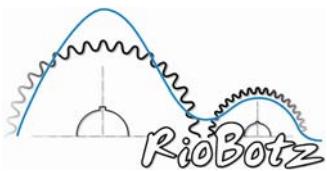
## 7. Baterias

Baterias são componentes que limitam muito a autonomia de um robô móvel, além de constituírem uma parte significativa de seu peso. Na maioria dos casos as baterias são o seu maior componente. Robôs humanóides, por exemplo, atingiram um grau de sofisticação impressionante desde que a Honda iniciou seu pioneiro projeto em 1986. Motores potentes foram miniaturizados, sistemas computacionais de alto desempenho se tornaram cada vez mais compactos, no entanto os componentes que menos evoluíram foram as baterias. Veja na figura abaixo a evolução dos protótipos da Honda de 1986 a 2000, da esquerda para a direita: E0, E1, E2, E3, E4, E5, E6, P1, P2, P3, e o famoso robô Asimo. Note que os modelos P e o Asimo precisam de “mochilas”, necessárias para acomodar as baterias (além do sistema computacional, que no entanto é muito menor e mais leve). O Asimo conseguiu reduzir sua “mochila” usando baterias de níquel, no entanto teve sua autonomia prejudicada: ele precisa ser recarregado a cada 30 minutos. E, mesmo assim, estas baterias de autonomia relativamente baixa constituem significativos 15% de seu peso. A tecnologia de baterias ainda precisa evoluir muito para que tenhamos, por exemplo, robôs humanóides que trabalhem num turno de 8 horas sem recarregar. Ou mesmo em turnos de 4 horas, com intervalo para “almoço”.



Felizmente, robôs de combate só precisam de autonomia de cerca de 3 minutos. Os nossos robôs ainda precisam de cerca de 15% de seu peso em baterias, iguais ao Asimo, no entanto podemos extrair delas muito mais potência nesse curto intervalo de tempo. É aí que começam os problemas: muitas baterias foram projetadas para serem descarregadas de forma mais lenta e suave, em 20 horas, em 1 hora, mas não em 3 minutos. É preciso conhecer as vantagens e desvantagens de cada tipo.

Os principais tipos de baterias são: chumbo-ácido (*Sealed Lead Acid*, SLA), níquel-cádmio (NiCd), níquel-hidreto metálico (NiMH), alcalina, e de lítio (lítio-ion e lítio-polímero), apresentados a seguir.



## 7.1. Tipos de Baterias

### 7.1.1. Chumbo-Ácido (*Sealed Lead Acid, SLA*)

As baterias SLA possuem eletrodos à base de chumbo, e seu eletrólito é composto de ácido sulfúrico. Cada eletrodo no interior da bateria contribui com cerca de 2V, portanto uma bateria típica de 12V possui 6 células conectadas em série. As baterias normalmente usadas em automóveis não podem ser usadas em combate, pois o ácido pode derramar caso sejam viradas de cabeça para baixo ou perfuradas pela arma de um adversário.



Somente são permitidas as SLA nas quais o eletrólito encontra-se imobilizado, podendo até funcionar de cabeça para baixo sem risco de derramar. As tecnologias mais comuns para imobilizar o eletrólito são gel, onde sílica é adicionada para gerar um gel semi-sólido, e AGM (*Absorbed Glass Matte*), onde um material fibroso e poroso absorve o ácido e o mantém suspenso.

Normalmente estão disponíveis em até 12V, por isso é preciso usar pelo menos 2 conectadas em série para atingir 24V. Elas são as mais baratas, porém são as mais pesadas, por isso normalmente é vantajoso substituí-las por baterias de NiCd ou NiMH, que serão discutidas a seguir. Outra desvantagem é que elas demoram várias horas para carregar.

### 7.1.2. Níquel-Cádmio (NiCd)

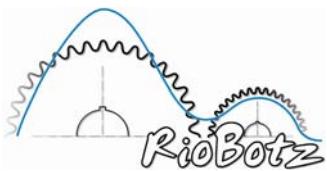
As baterias de NiCd usam níquel como catodo, e cádmio como anodo. Elas fornecem altas correntes sem quedas de tensão significativas, e por isso são a escolha ideal para acionar as armas dos robôs. São mais caras que as SLA, porém se tratadas com cuidado podem durar até 20 anos, compensando seu investimento. Cada célula possui cerca de 1,2V (figura ao lado à esquerda), e são normalmente soldadas em série para formar packs de baterias (figura ao lado à direita) com tensões múltiplas desse valor. Os packs utilizados em combate normalmente possuem 12V, 18V, 24V e 36V, com respectivamente 10, 15, 20 e 30 células.



### 7.1.3. Níquel-Hidreto Metálico (NiMH)

Também utilizam níquel como catodo, porém o anodo é composto por uma liga metálica capaz de absorver hidretos, substituindo o cádmio, que é tóxico. As baterias de NiMH armazenam 30% mais energia que as de NiCd, no entanto suas correntes de pico são cerca de metade daquelas de uma de NiCd





equivalente. São boas para serem usadas na locomoção do robô, que necessita mais de alta energia total armazenada do que de altos picos de corrente. Um grande problema é que chegam a perder naturalmente cerca de 5% de sua carga ao dia, portanto não são apropriadas para aplicações de uso esporádico, como por exemplo controles remotos de televisões. Mesmo sem usar o controle, em menos de 1 mês a bateria precisaria ser recarregada novamente.

#### 7.1.4. Alcalinas

As pilhas alcalinas são as mais comuns, e armazemam grande quantidade de energia. Elas não sofrem o problema da perda de carga natural das baterias de NiMH, portanto são a melhor opção para uso esporádico (apesar de elas serem propensas a sofrer corrosão a longo prazo, gerando risco de ruptura e vazamento do eletrólito, portanto retire-as do aparelho se não for usá-las por muitos meses). O problema das alcalinas é que elas não conseguem fornecer altas correntes, e por isso não são usadas em combate. Além disso, elas não são recarregáveis, e portanto sairia muito caro ter que usar novas baterias a cada combate. Existe uma versão recarregável, chamada RAM (*Rechargeable Alkaline Manganese*, figura ao lado), no entanto ela também não consegue fornecer altas correntes, e o número de recargas a que pode ser submetida é relativamente baixo.



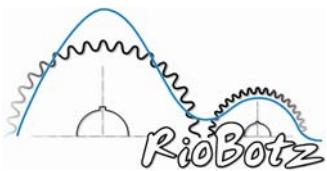
#### 7.1.5. Lítio

Muito usadas em telefones celulares, as baterias de lítio (figura ao lado) possuem a mais alta capacidade de carga com baixo peso, porém são as mais caras. As de lítio-ion são as mais antigas, e sofrem risco de explosão caso perfuradas ao entrarem em contato com o oxigênio. As de lítio-ion-polímero (ou abreviadamente lítio-polímero) possuem uma camada polimérica que elimina este risco. Os principais problemas são: os modelos que são capazes de fornecer altas correntes são muito caros, e elas precisam de um sistema eletrônico para garantir que não serão descarregadas durante um round abaixo de um limite crítico (para não danificarem). Em função destes problemas, elas têm sido usadas quase que exclusivamente nas classes mais leves (até 3lb), nas quais o custo ainda é acessível.



À medida que a tecnologia for melhorada, estas baterias têm um grande potencial de serem a melhor escolha mesmo para as classes mais pesadas. Algumas baterias de lítio possuem capacidade de descarga de 20C, ou seja, é possível descarregá-la completamente em apenas 1/20 de hora, exatamente os 3 minutos de que precisamos em um round! Um incoveniente é que, apesar do curto tempo de descarga, a carga precisa ser feita em pelo menos 1 hora, o que pode ser crítico entre rounds de uma competição. No entanto, a Toshiba anunciou em 2005 o desenvolvimento de uma bateria de lítio (figura ao lado) capaz de ser carregada em apenas 1 minuto!





## 7.2. Propriedades das Baterias

Existem várias características de uma bateria que precisam ser consideradas: preço, peso, tempo de vida, número de ciclos de recarga, tempo de carga, auto-descarga (*self-discharge*), tensão, curva de descarga, resistência interna (que determina o pico de corrente e a queda de tensão), capacidade, perda de capacidade (*de-rating factor*), e capacidade de descarga, descritas a seguir.

### 7.2.1. Preço

O *preço* é o primeiro fator na escolha das baterias. As SLA são as mais baratas, seguidas das alcalinas, NiCd, NiMH, e finalmente as caras baterias de lítio.

### 7.2.2. Peso

O *peso* das baterias é crucial em combate de robôs. Mais especificamente, é importante conhecer a relação potência/peso, energia/peso, ou capacidade/peso, quanto maior melhor. As SLA são as piores nesse quesito, armazenam menos energia por quilo do que qualquer outro tipo. As de NiCd e NiMH são intermediárias. As mais leves são as de lítio.

### 7.2.3. Tempo de Vida

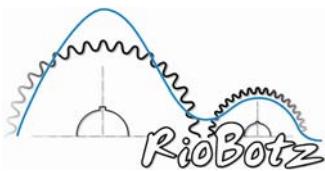
O *tempo de vida* depende muito do uso e principalmente da temperatura de armazenamento. Em alguns casos as baterias podem durar mais de 20 anos sem perda de desempenho, como as de NiCd armazenadas a 5°C em uma geladeira. Já a 40°C, estas mesmas baterias durariam menos de 2 anos.

### 7.2.4. Número de Ciclos de Recarga

O *número de ciclos de recarga* indica quantas vezes a bateria pode ser recarregada antes de esgotar sua vida útil. Esse número vai desde zero (alcalinas), passando por 300 (SLA e NiMH), 500 (as de lítio), 1500 (NiCd) e chegando até a 10.000 recargas em algumas baterias especiais de lítio-polímero. Note que, à medida que a tecnologia evolui, estes números podem ficar ultrapassados, no entanto são uma boa referência para efeito de comparação.

### 7.2.5. Tempo de Carga

O *tempo de carga* é outro fator importante, que determina qual o tempo mínimo necessário para carregar completamente uma bateria sem danificá-la. Quanto maior ele for, de mais baterias reserva você irá precisar em uma competição. As SLA são as piores nesse sentido, sua carga pode demorar várias horas. As de lítio necessitam normalmente de pelo menos 1 hora (com exceção da bateria da Toshiba mencionada anteriormente). As de NiCd são as melhores nesse quesito, podem levar bem menos de 1 hora para carregar, em alguns casos chegando a apenas 15 minutos. Algumas baterias de NiMH mais recentes estão conseguindo alcançar o tempo de carga das de NiCd.



### 7.2.6. Auto-Descarga

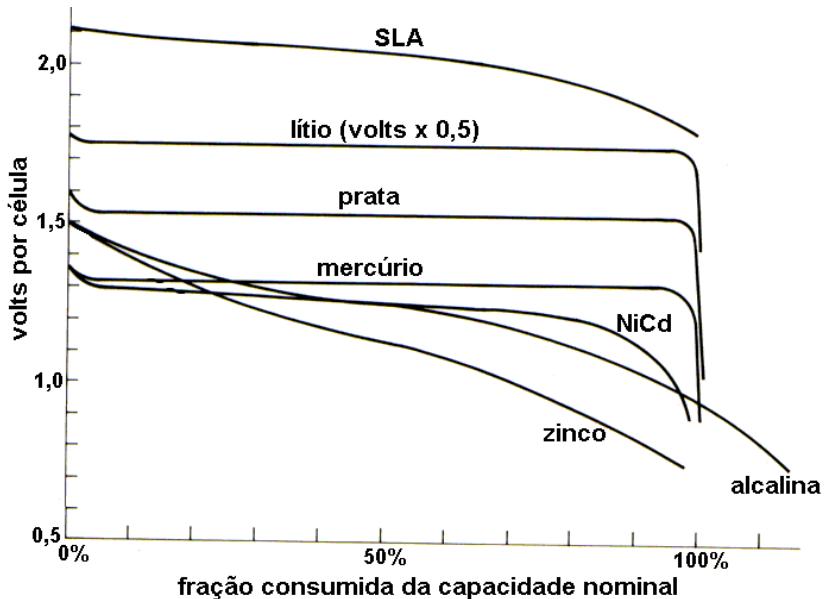
A *auto-descarga* (*self-discharge*) quantifica qual percentagem de sua capacidade uma bateria perde naturalmente por dia durante seu armazenamento. As baterias de NiCd e SLA, se armazenadas a 25°C, perdem menos de 1% de sua capacidade por dia, enquanto que as de NiMH chegam a perder em média 5%. Portanto, se você usar NiMH em um robô de combate, dê sempre uma última carga no dia da competição. Baterias de NiMH carregadas na véspera podem ter perdido até preciosos 10% de sua capacidade.

### 7.2.7. Tensão

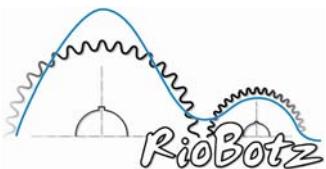
A *tensão* da bateria é um valor nominal que ela fornece durante seu uso. Na prática, a tensão pode ser maior que esse valor (com a bateria completamente carregada) ou menor (se estiver fornecendo correntes muito altas, que provocariam queda de tensão significativa na sua resistência interna). A maioria das SLA são de 12V (com 2V para cada eletrodo de chumbo), as alcalinas 1,5V, as de NiCd e NiMH são múltiplos de 1,2V (a tensão de cada célula de um pack) e as de lítio normalmente múltiplos de 3,7V.

### 7.2.8. Curva de Descarga

A tensão da bateria tende a cair à medida que é descarregada. Esse comportamento gera a *curva de descarga* (gráfico ao lado), que representa a tensão ao longo do tempo. Por exemplo, veja no gráfico que cada eletrodo (célula) de uma bateria SLA fornece 2,1V (podendo chegar a 2,2V) quando totalmente carregada, um valor que é reduzido gradativamente até atingir cerca de 1,7V. Assim, uma bateria de tensão nominal 12V (6 eletrodos de chumbo),



teria até  $6 \times 2,2V = 13,2V$  quando cheia, e  $6 \times 1,7V = 10,2V$  quando vazia. Isso pode ser bom por um lado, pois a bateria “avisa” quando está chegando ao fim, basta medir a tensão e comparar com 10,2V. Por outro lado, essa curva de descarga inclinada é ruim, pois o sistema vai perdendo velocidade e potência ao longo do tempo. Isso ocorre também com as baterias (descartáveis) de zinco e alcalinas, veja o gráfico acima. Já as de lítio e NiCd apresentam uma curva de descarga quase horizontal, mantendo constante a tensão durante todo o combate (exceto se a bateria estiver se esgotando, quando há uma queda brusca de tensão). As curvas das baterias de NiMH não são tão boas assim, elas são um pouco mais inclinadas que as de NiCd, porém não tanto quanto as SLA.



### 7.2.9. Resistência Interna

A resistência interna da bateria é somada à do circuito que ela aciona. Portanto, quanto menor ela for, maiores serão os picos de corrente que a bateria poderá gerar. As baterias SLA e NiCd possuem resistência interna muito baixa, permitindo gerar correntes muito altas (o problema da SLA é que esses picos de corrente diminuem muito sua capacidade, como será visto adiante). As primeiras baterias de lítio possuíam alta resistência interna, no entanto nas versões mais recentes esse valor caiu muito. As de NiMH possuem resistência maior que as de NiCd, e portanto não conseguem fornecer picos de corrente tão altos.

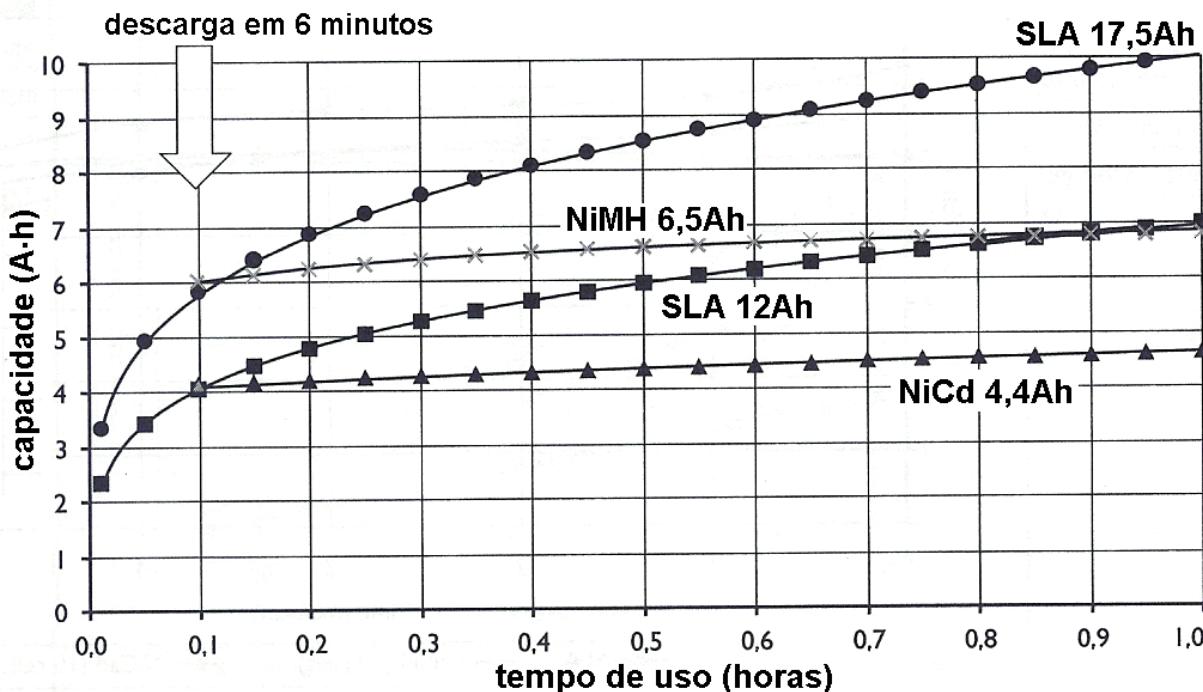
A resistência interna também está relacionada com a queda de tensão na bateria provocada por correntes muito altas. Isso nada mais é do que a perda de potencial causada pela resistência, perda essa que se torna significativa sob altas correntes.

### 7.2.10. Capacidade

A *capacidade* quantifica a quantidade de corrente total que a bateria consegue fornecer até descarregar completamente. Medida em A·h, pode ser calculada pelo produto entre o tempo total de descarga da bateria e a corrente fornecida por ela (se a corrente não for constante, então ela é calculada integrando-se a corrente ao longo do tempo). Assim, por exemplo, uma bateria de 3,6A·h conseguiria *teoricamente* fornecer uma corrente de 3,6A continuamente durante 1 hora, ou 36A durante 1/10 hora, ou seja, 6 minutos (obs.: se duas baterias idênticas forem conectadas em paralelo, a capacidade total será dobrada). Além disso, *teoricamente*, a capacidade de um pack de 24V de SLA seria cerca de 1,25A·h para cada quilo de bateria. É uma capacidade relativamente baixa. O mesmo pack feito de NiCd teria de 1,7 a 2,5A·h/kg, de NiMH teria 2,5 a 3,3A·h/kg, e finalmente de lítio chegaria a mais de 4,2A·h/kg. Mas esses números são teóricos, pois na prática não é tão simples, por causa do efeito do *de-rating factor*, discutido a seguir.

### 7.2.11. De-Rating Factor

A capacidade das baterias depende do tempo total de descarga. O valor nominal que vem escrito nas baterias de ácido, por exemplo, é referente a um tempo de descarga de 20 horas. Assim, se você solicitar de uma bateria de ácido de 12A·h uma corrente de apenas  $12/20 = 0,6A$ , ela realmente durará 20 horas. Mas se você solicitar 12A ela não durará 1 hora. Isso porque a sua capacidade real em 1 hora é de apenas 7A·h (veja o gráfico abaixo), e portanto o valor correto é 7A e não 12A. À medida que ela for descarregada mais rapidamente (menor tempo de uso), sua capacidade vai diminuindo. Essa mesma bateria forneceria apenas 4A·h se descarregada totalmente em 6 minutos, e menos de 3,5A·h em um round de 3 minutos. Esses valores são obtidos experimentalmente, e estão representados no gráfico a seguir.

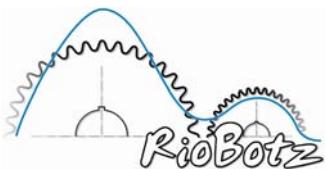


Repare no gráfico que a capacidade das baterias de ácido (SLA) depende muito do tempo total de descarga (tempo de uso). Se a bateria estiver sendo solicitada a ponto de durar apenas 6 minutos, a sua capacidade real será o valor nominal vezes um fator de conversão, chamado de *de-rating factor*, que nesse caso vale 0,33, o que daria  $0,33 \times 12 = 4,0\text{A}\cdot\text{h}$  para a bateria SLA de  $12\text{A}\cdot\text{h}$ , e  $0,33 \times 17,5 = 5,8\text{A}\cdot\text{h}$  para a bateria SLA de  $17,5\text{A}\cdot\text{h}$ , valores compatíveis com o gráfico acima. Se você solicitar ainda mais corrente, a ponto de descarregá-la totalmente em 3 minutos, o *de-rating factor* baixará ainda mais para cerca de 0,28. As baterias de ácido especiais Hawker-Odyssey (também conhecidas como Hawker-Genesis, vide a figura ao lado) não são tão ruins quanto as SLA comuns, elas atingem um *de-rating factor* entre 0,4 e 0,5 em 6 minutos (ao invés de 0,33).



Uma das grandes vantagens das baterias de níquel (NiCd e NiMH) é que sua capacidade de carga é quase insensível ao tempo total de descarga (tempo de uso), basta notar nos gráficos acima como suas curvas são quase horizontais. Além disso, a sua capacidade nominal é medida em 1 hora (ao invés de 20 horas como nas SLA). Mesmo assim existe um *de-rating factor*, ele vale cerca de 0,9 tanto para 6 quanto para 3 minutos. Esse *de-rating factor* é 3 vezes melhor que o das de ácido comuns, e quase 2 vezes melhor que o das melhores de ácido que existem.

A consequência disto pode ser vista nesse exemplo: 2 baterias de chumbo comuns de 12V e  $18\text{A}\cdot\text{h}$  cada, colocadas em série, fornecem 24V, e pesam juntas  $6,2\text{kg} \times 2 = 12,4\text{kg}$ . Se o seu tempo de uso for 3 minutos (na prática projete para pelo menos 4 minutos, para o robô não parar no fim do round), a sua capacidade real é  $0,28 \times 18 = 5\text{A}\cdot\text{h}$ . Agora 2 packs de NiCd de 24V e  $3\text{A}\cdot\text{h}$ , colocados em paralelo, fornecem os mesmos 24V e têm uma capacidade nominal de  $3\text{A}\cdot\text{h} \times 2 = 6\text{A}\cdot\text{h}$ . Sua



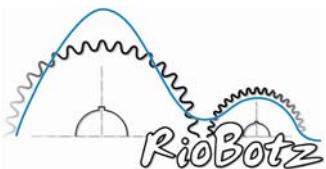
capacidade real em 3 minutos é  $0,9 \times 6 = 5,4\text{A}\cdot\text{h}$ , maior que as de ácido, e seu peso total é de apenas  $1,8\text{kg} \times 2 = 3,6\text{kg}$ . Isso é menos de um terço do peso das SLA de capacidade equivalente!

O desempenho das de ácido só se aproxima daquele das de níquel quando precisamos de pelo menos  $10\text{A}\cdot\text{h}$  no robô, como no caso de *heavyweights* e *super-heavyweights*, e mesmo assim se forem usadas baterias especiais como a Hawker-Odyssey. Por exemplo, 2 baterias Hawker-Odyssey de 12V e  $26\text{A}\cdot\text{h}$  cada (colocadas em série) fornecem 24V, pesam juntas  $6,1\text{kg} \times 2 = 12,2\text{kg}$ , e sua capacidade real é  $0,42 \times 26 = 10,9\text{A}\cdot\text{h}$  (o *de-rating factor* 0,42 foi medido experimentalmente). Seriam necessários 4 packs de NiCd de 24V e  $3\text{A}\cdot\text{h}$  em paralelo para igualar esses valores, num total de  $7,2\text{kg}$ . Os packs de NiCd continuam sendo mais leves, no entanto a diferença de peso diminuiu para  $5\text{kg}$ , um valor percentualmente pequeno em relação ao peso de, por exemplo, um *super-heavyweight*. As vantagens de usar as SLA especiais são seu preço (cerca de um terço do preço que sairia a solução em NiCd) e o pico de corrente disponível, que nas de NiCd seria ao total cerca de  $800\text{A}$  mas na Hawker-Odyssey chegaria a  $2400\text{A}$  (cuidado para não fritar os seus motores e eletrônica!).

Para estimar com melhor precisão o consumo de uma bateria de ácido, você precisa usar diferentes valores do *de-rating factor*. Por exemplo, considere a bateria SLA de  $17,5\text{A}\cdot\text{h}$  do gráfico anterior, e assuma que o seu robô necessita de  $15\text{A}$  com a arma desligada e  $100\text{A}$  com ela ligada. Quantos minutos ele duraria com essa bateria, assumindo que passa 80% do tempo com a arma ligada? A pergunta a princípio não é fácil de resolver, pois as contas anteriores sempre assumiam uma corrente constante. A solução é calcular o consumo de forma ponderada, considerando os diferentes valores do *de-rating factor*. Pelo gráfico, um tempo de uso de 0,6 horas (36 minutos) resultaria em  $9\text{A}\cdot\text{h}$ , com uma corrente contínua de  $9\text{A}\cdot\text{h}/0,6\text{h} = 15\text{A}$ . Já um tempo de uso de 0,05 horas (3 minutos) resultaria em apenas  $5\text{A}\cdot\text{h}$ , com uma corrente contínua de  $5\text{A}\cdot\text{h}/0,05\text{h} = 100\text{A}$ . Se o número de minutos a ser calculado é  $t$ , então o robô passa  $0,8 \cdot t$  minutos consumindo  $100\text{A}$  (tempo de uso de 3 minutos), e  $0,2 \cdot t$  minutos consumindo  $15\text{A}$  (tempo de uso de 36 minutos), logo para consumir 100% da bateria teríamos  $(0,2 \cdot t)/36 + (0,8 \cdot t)/3 = 1$ , e assim  $t = 3,67$  minutos. Conferindo as contas, nos  $0,2 \cdot t = 0,734$  minutos a  $15\text{A}$  o robô consome  $0,734\text{min}/36\text{min} = 2\%$  da bateria, e nos  $0,8 \cdot t = 2,936$  minutos restantes a  $100\text{A}$  o robô consome os outros  $2,936\text{min}/3\text{min} = 98\%$  da bateria. Estas contas mais sofisticadas não são necessárias para baterias de níquel, porque seu *de-rating factor* varia muito pouco, entre 0,9 e 1,0.

### 7.2.12. Capacidade de Descarga

Finalmente, a última propriedade relevante das baterias é a *capacidade de descarga*, que quantifica quanta corrente pode ser solicitada da bateria continuamente *sem que ela se aqueça significativamente*. Ela é representada por um número seguido da letra C. Por exemplo, 8C significa que ela tolera sem problemas uma corrente de 8 vezes a sua capacidade (C, daí o nome 8C) medida em  $\text{A}\cdot\text{h}$ . Por exemplo, uma bateria 8C de  $3,6\text{A}\cdot\text{h}$  tolera  $8 \cdot 3,6 = 28,8\text{A}$  contínuos. Isso é o mesmo que dizer que ela pode ser descarregada em 1/8 de hora (pois  $28,8\text{A} \times 1/8 \text{ h} = 3,6\text{A}\cdot\text{h}$ ), o que dá 7,5 minutos. Na prática, elas podem suportar continuamente mais que o dobro disso, porém a bateria irá



esquentar (mas ainda de forma tolerável). Ou seja, uma bateria 8C poderia ser descarregada em apenas 3,75 minutos, compatível com a duração de um round. Evite usar baterias abaixo de 8C, elas esquentariam demais se descarregadas tão rapidamente. Algumas baterias de lítio chegam a impressionantes 28C.

### 7.3. Dicas e Cuidados com as Baterias

Para que as baterias tenham uma vida longa, é importante que sejam adotados diversos procedimentos, descritos a seguir.

Sempre armazene baterias SLA carregadas. Se ficarem descarregadas por muito tempo elas podem ser danificadas. Recarregue completamente as baterias a cada 6 meses de armazenamento.

Ao contrário das SLA, as baterias de NiCd, NiMH e lítio devem ser armazenadas descarregadas. Cuidado para não descarregá-las demais, as de níquel não devem ficar abaixo de 0,9V por célula. Além disso, tenha em mente que calor mata: mesmo se você cuidar bem dessas baterias, elas podem durar menos de 2 anos se armazenadas a 40°C. A 25°C elas podem durar 5 anos, a 15°C chegam a 10 anos, e a 5°C até 20 anos. Portanto, armazene estas baterias na geladeira. Coloque-as dentro de um plástico vedado tipo zip-lock para não entrar umidade. Nunca congele as baterias. A cada 6 meses ou menos carregue e descarregue completamente as baterias e as recoloque na geladeira.

Tome muito cuidado com curtos nas baterias. Cuidado ao manusear parafusos perto do pack, eles podem cair dentro dele e causar curtos que danifarão permanentemente a bateria. Há ainda o risco de destroços metálicos entrarem no pack durante um combate. Esse curto durante o round fará aparecer a famosa “fumacinha mágica” (figura ao lado), que é um indício de que o robô não tem mais condições, de que a luta terminou. Alguns dizem que a fumacinha mágica é a “alma do robô indo para o céu”.

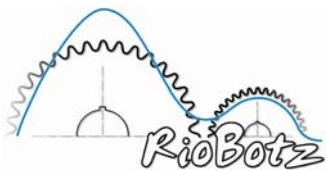


Para evitar esse problema, pode-se envolver cada bateria do pack com um filme de Kapton, um polímero (poliimida) que resiste a altas temperaturas (até 400°C) e é um bom isolante elétrico.

Se o seu pack estiver esquentando muito, uma opção é instalar um ou dois fans que enchem ar para dentro dele, ajudando no arrefecimento. Há algumas soluções prontas no mercado. Os melhores packs de NiCd e NiMH que existem para combate são os da *Robotic Power Solutions* ([www.battlepack.com](http://www.battlepack.com)), eles vendem tanto os packs tradicionais quanto os *intercooled* (figura ao lado), que já vêm com dois fans montados.



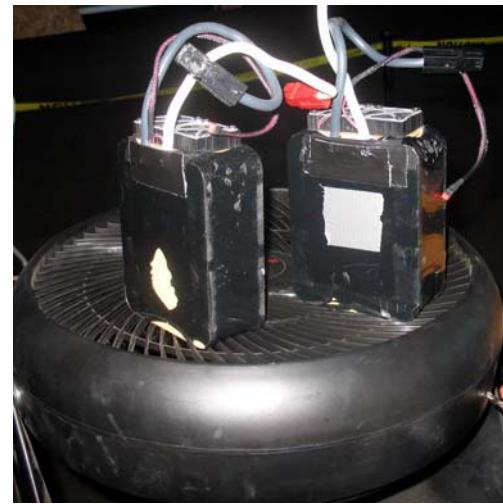
Garanta que as baterias estão muito bem presas no seu robô, e isoladas de choque. Na liga *Robot Wars* foram feitas medições cuidadosas de acelerações típicas que um robô sofre no instante do impacto com um *spinner* violento, e descobriu-se que os picos chegam a 800G, ou seja, 800 vezes a

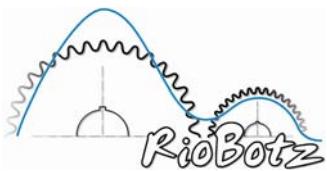


aceleração da gravidade. Só por referência, a 10G um ser humano desmaia, e a 100G seu cérebro descola do crânio, causando morte instantânea. Portanto 800G é algo assustador, mesmo considerando que sua duração é de apenas uma fração de segundo. Contas rápidas mostram que uma bateria de 2kg exerceira uma força inercial equivalente a  $2\text{kg} \times 800 = 1600\text{kg} = 1,6$  toneladas em seu suporte. É claro que esse seria um caso extremo, mas mesmo para impactos muito menores fica evidente que abraçadeiras de plástico não são adequadas (a menos que seja um pack muito leve como os usados nos receptores). Sem contar que abraçadeiras de plástico, além de não serem resistentes, podem derreter devido às altas temperaturas que a bateria pode atingir. Aparafuse bem as baterias ao robô, ou use várias abraçadeiras *de metal*. Cuidado para não provocar curtos, isole bem a partes metálicas. E garanta também que as baterias possam ser trocadas rapidamente, para facilitar os *pitstops*.

Outra dica importante é: nunca carregue packs quentes. A sua vida útil é muito reduzida se isso for feito. Assim que um round terminar, retire os packs imediatamente e os coloque para resfriar sobre um grande ventilador (figura ao lado). Só comece a carregá-los após resfriados até próximo da temperatura ambiente.

Para carregar baterias, principalmente as de níquel e de lítio, você deve usar um carregador eletrônico. Eles são um investimento indispensável, pois sem eles as chances de danificar as baterias são muito grandes. O Triton (figura ao lado) é um dos melhores e mais fáceis de usar. Ele carrega ou descarrega automaticamente qualquer tipo de bateria, tem várias opções de programação, e elimina o famoso “efeito de memória” das baterias de NiCd. Ele custa menos de US\$100 nos EUA. Vale mais a pena investir em um carregador como o Triton do que arriscar danificar um pack, que normalmente custa mais de US\$100. Se o seu robô usa mais de um pack, é aconselhável ter mais de um Triton, para poder carregar todo o conjunto de baterias ao mesmo tempo. Nós construímos uma caixa de madeira, que é bom isolante elétrico, para acomodar os nossos Tritons (figura ao lado), e usamos fontes de 12V de micros velhos para alimentá-los. A caixa ainda acomoda todos os nossos packs, sendo uma solução prática para o transporte e uso em competições.





Tenha sempre pelo menos 2 conjuntos de baterias para o seu robô. As de níquel e lítio podem demorar cerca de 1 hora para carregar, porém o intervalo entre os rounds pode ser bem menor que isso. Ter 3 conjuntos é bom porque, além de resolver esse problema do intervalo, também é uma segurança adicional caso algum pack quebre ou entre em curto durante a competição. Se as baterias forem SLA, você poderá precisar de até 6 ou 7 conjuntos em uma competição, pois elas carregam muito lentamente, demorando várias horas.

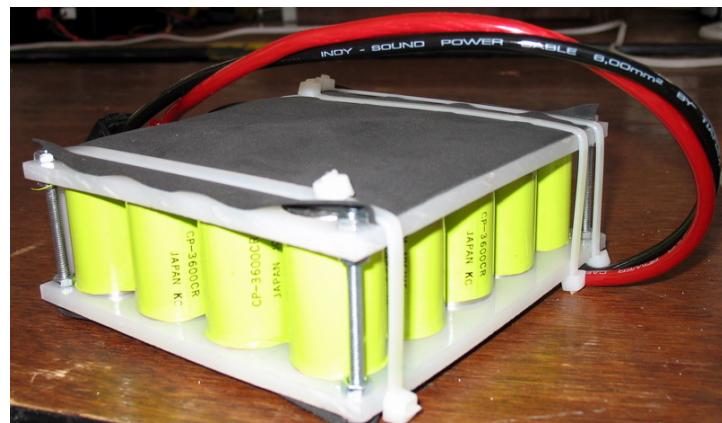
Os packs de baterias de NiCd e NiMH são caros, no entanto é possível economizar se você montar o seu próprio. Primeiro, compre células avulsas, mas fique atento à capacidade de descarga da bateria. Evite baterias abaixo de 8C.

Para montar o pack, solde as baterias (células) usando fios/cordoalhas flexíveis. Conexões rígidas podem quebrar em combate. Passe uma lixa bem fina nos contatos da bateria para retirar a oxidação, que prejudica a resistência mecânica e elétrica da solda. Use um ferro de solda potente, de pelo menos 100W, e não se esqueça da pasta de solda. Estanhe tanto o fio quanto a bateria, e solde aquecendo por pouco tempo para não danificar a célula. Uma dica importante é, antes de soldar, colocar espaçadores entre as células (figura ao lado), que podem ser por exemplo anéis de papelão colados entre si e nas baterias com cola de sapateiro. Com isso você deixará uma fresta entre as células que permitirá o fluxo de ar, tornando a troca de calor muito mais eficiente e evitando que elas esquentem demais.

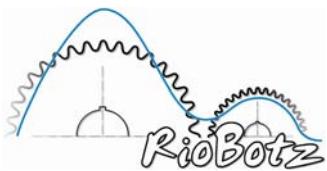


Após ter soldado todas as células, solde o conector e seus fios. O conector pode ser por exemplo o Deans Ultra ou o Anderson Powerpole. Lembre-se que a bateria deve sempre utilizar a fêmea do conector, nunca o macho, para não haver chance de entrar em curto caso o conector encoste acidentalmente em alguma parte metálica.

Opcionalmente, você pode usar placas de nylon (ou outro material isolante e resistente) ensanduichando o pack, como mostra a figura ao lado. Para isso será preciso fresar nas placas rebaixos que acomodem cada uma das células do pack. Prenda o sanduíche com parafusos longos e/ou abraçadeiras (figura ao lado).



Usando ou não as placas de nylon, é aconselhável envolver o pack com um plástico termo-retrátil, fazendo furos nele para garantir a ventilação.



## 8. Competição

Este capítulo apresenta uma série de dicas de como se preparar e proceder em uma competição, antes, durante e depois.

### 8.1. Antes da Competição

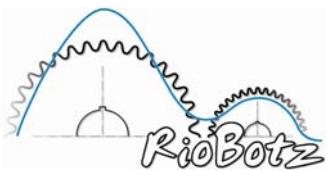
O primeiro passo é descobrir uma competição. Para as brasileiras, você vai encontrar todas as informações no site [www.guerraderobos.com.br](http://www.guerraderobos.com.br). Para as norte-americanas e internacionais, o melhor endereço é [www.buildersdb.com](http://www.buildersdb.com). Lá você poderá registrar sua equipe, construtores e robôs, e descobrirá todos os eventos locais, nacionais e internacionais. As competições da *Robot Fighting League* também podem ser vistas no endereço <http://botleague.net>. Se inscreva com antecedência nos eventos, os organizadores precisam saber o quanto antes quantas equipes participarão para planejar, por exemplo, quantas mesas (*pits*) serão necessárias. Leia com cuidado todo o regulamento da competição, para garantir que não há nenhum problema com o seu robô.

Não deixe de testar os robôs. Teste em condições reais, dirija o seu robô contra a parede, bata diversas vezes, use *sparrings* com peso da mesma ordem de grandeza para testar as armas. Use a técnica do bata-quebre-conserte, até o seu robô não quebrar mais. Por isso é bom testar com antecedência, para garantir que haverá tempo para consertar.

Levante o seu robô a 1 metro de altura e o jogue no chão: ele precisa resistir a essa queda de 1 metro, não importa a sua classe de peso. Jogue várias vezes e verifique se algo quebrou ou se soltou. Se você tiver muita confiança na resistência do robô, jogue-o de 2 metros de altura. Essa é a altura usada por muitas equipes americanas. Quem esteve no Robogames 2006 viu que isso não é exagero: o *super-heavyweight* Sewer Snake (figura ao lado) teve que resistir a uma queda de mais de quatro metros de altura após ser arremessado pelo *launcher* Ziggy!

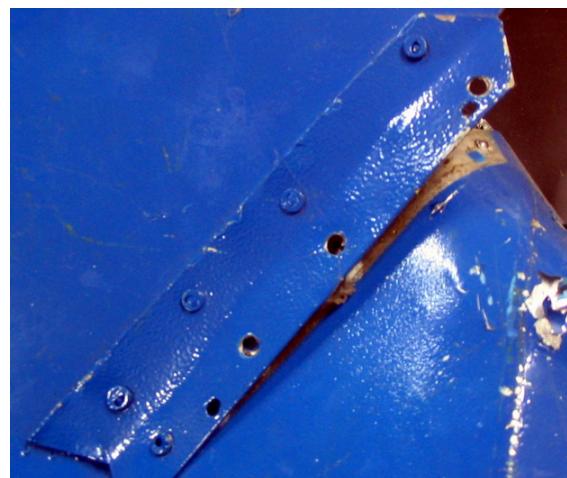
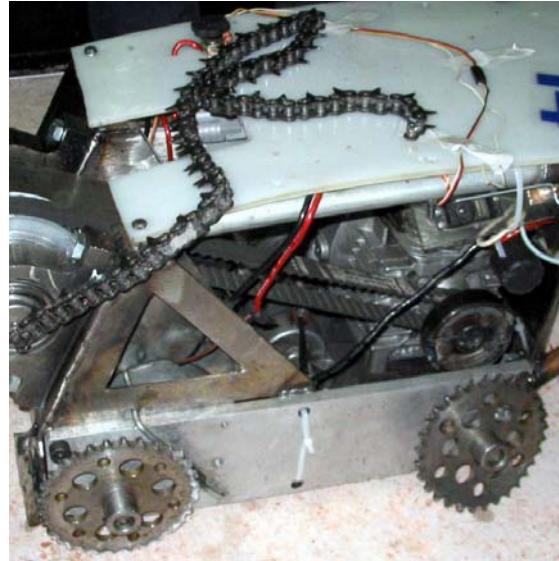


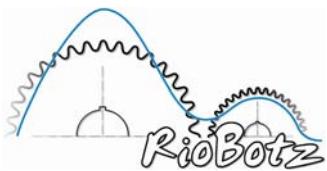
Os testes mostrarão os pontos fracos do robô, e na maioria das vezes é possível contorná-los sem alterar muito o projeto. Basta uma pequena falha ocorrer no robô durante um combate para que o round seja perdido. Por isso é importante que haja **redundância**. Se o seu robô usa 2 ou mais baterias em paralelo, garanta que ele continuará funcionando mesmo se uma delas falhar. Se ele tem 4 rodas ativas, garanta que se uma for destruída todas as outras 3 continuarão com tração. Se usar correias ou correntes num componente crítico como a arma, considere a possibilidade de usar uma polia ou coroa dupla. Logo no primeiro round do Touro no Robogames 2006, o adversário conseguiu romper umas das correias da arma, no entanto ela continuou funcionando pela redundância da segunda correia.



As 20 causas mais comuns que fazem um robô perder um combate, e suas soluções, são:

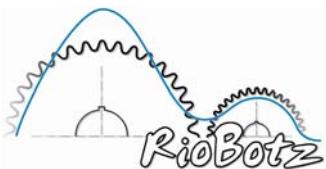
1. Conectores das baterias ou outros fios se soltando – use conectores de boa qualidade, arruelas de pressão em terminais tipo olhal (nunca garfos), fita isolante líquida e cola quente;
2. Motores, baterias e outros componentes se soltando – evite usar abraçadeiras, mesmo as de metal, e sempre verifique a fixação das peças e o aperto dos parafusos antes de cada round;
3. Correntes saindo das coroas – garanta o alinhamento das coroas, evite coroas expostas (como no acionamento da locomoção na foto ao lado), se possível troque todo o sistema por correias e polias síncronas/dentadas (como no acionamento da arma na foto ao lado), que toleram maior desalinhamento;
4. Interferência no rádio ou baixo alcance – deixe a antena externa ao robô, sem encostar em metais, ou interna se a tampa não for de metal, e use uma antena amplificada como a *Deans Base-Loaded Whip* (capítulo 6);
5. Baterias carregadas inapropriadamente ou sub-dimensionadas para a locomoção e a arma – use carregadores eletrônicos como o Triton, verifique a tensão nas baterias antes de cada round, calcule previamente e teste o consumo do robô sob condições reais;
6. Controladores de velocidade que “fumam” – compare sempre a corrente máxima aceitável no controlador com a do motor, e caso a roda ou arma acionada seja travada durante o round, desligue-a para não sobrecarregar a eletrônica com a corrente  $I_{stall}$ ;
7. Ruptura de rebites, parafusos, porcas – nunca use rebites (foto ao lado), e sim parafusos e porcas de aço temperado, de classes altas como 8.8 (para os sextavados) e 12.9 (para Allen), e com diâmetro adequado calculado por uma análise de tensões;
8. Robôs muito baixos, sem distância suficiente do chão, ficando presos na arena – deixe no mínimo uns 6mm entre o fundo do robô e o chão, de preferência 10mm ou mais, sem se esquecer de considerar o desgaste das rodas, e use parafusos escariados no fundo para não arrastarem no chão;
9. Motores de baixa potência na roda e armas – use motores de potência apropriada para garantir que o seu robô tenha velocidade máxima suficiente para a sua estratégia, e que ela seja atingida acelerando-se em menos de 2 segundos; garanta que uma eventual arma rotativa possa adquirir poder destrutivo significativo em menos de 4 segundos;





10. Fusíveis queimando – use fusíveis apropriados, ou de preferência não use fusíveis para não correr o risco de perder o round por causa de um breve pico de corrente;
11. Fios e componentes elétricos entrando em curto – sempre isole os terminais com fita isolante (normal ou líquida, vide foto ao lado), termo-retráteis e/ou cola quente, e sempre proteja contatos que possam entrar em curto caso algum destroço de metal entre no robô;
12. Motores subdimensionados que esquentam demais – evite ultrapassar a tensão nominal do motor, e se o fizer use um limitador de corrente; muitos motores possuem um pequeno eixo giratório saindo de sua traseira (usado normalmente para montar sensores como *encoders* ou *tacômetros*), você pode instalar nele pás de um ventilador para ajudar no seu próprio arrefecimento;
13. Engrenagens sub-dimensionadas ou desalinhadas que rompem seus dentes – as caixas de redução precisam ser muito bem feitas, use engrenagens apropriadas para a potência do seu robô e de preferência feitas de aço temperado ao invés de aço doce ou ferro fundido;
14. Motores à combustão que morrem ou não dão partida – use um sistema de ignição automático controlado pelo rádio (capítulo 5);
15. Componentes se soltando de eixos, principalmente aqueles presos por parafusos allen sem cabeça (*set screw*) – não use parafusos para acoplar eixos (foto ao lado), use chavetas para transmitir torque, e use colares bem apertados para impedir o movimento axial;
16. Eixos se rompendo ou empenando – não use eixos de aço doce (também na foto ao lado) ou alumínio, use sempre aço temperado ou titânio grau 5, com diâmetro compatível com as tensões calculadas em projeto;
17. Rodas travando na estrutura do robô devido a armadura ou estrutura amassadas (também na foto ao lado) – deixe uma boa folga (vão) entre as rodas e qualquer placa ou parede do robô caso ele “entorte” durante um round ou algum destroço tente se alojar neste vão;
18. Furos em rodas infláveis – use rodas maciças como a Colson, ou substitua o ar que enche sua roda inflável por espuma de poliuretano;
19. Falta de proteção contra armadilhas na arena – isso só se aplica a arenas contendo serras saindo do chão (garanta que o fundo do robô não seja de chapas finas de alumínio), martelos gigantes (use uma tampa superior rígida e robusta), ou outras armadilhas;
20. Eletrônica e controladores de velocidade caseiros e mal projetados – construir uma eletrônica robusta e confiável que tolere correntes da ordem de centenas de ampères não é uma tarefa simples, por isso pesquise e teste bastante se for usar eletrônicas próprias.





Além das falhas de engenharia, existem as falhas humanas por imperícia. Por isso, treine bastante dirigir o seu robô. Muitas disputas são ganhas ou perdidas por causa da habilidade do piloto. Use cones para fazer um *slalom*, e compre um carrinho de controle remoto barato para brincar de gato e rato (pensando bem, compre mais de um carrinho e dos bem baratos, os ratos costumam sair esmagados).

Garanta que seu robô passará na inspeção de segurança. Tente terminar o robô antes da viagem. Nada mais estressante do que virar a noite da véspera da competição sem dormir terminando o robô e acordando todos do hotel com o barulho e, como aconteceu conosco na competição de 2003, com cheiro de borracha queimada pela Dremel.

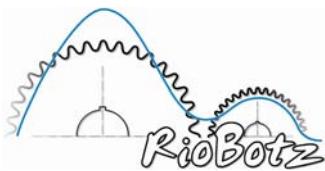
Garanta também que seu robô não está ultrapassando o limite de peso. Ao projetá-lo, faça estimativas do peso de todos os componentes, para não se surpreender ao final. E não se esqueça de incluir o peso dos parafusos. Nós desprezamos os parafusos ao estimarmos o peso do Touro, e tivemos uma surpresa: eles pesavam no total quase 3kg! Para perder peso, use as técnicas de emagrecimento a seguir.

Primeiro, tente emagrecer os eixos do robô. Confira se há excessos nas extremidades dos eixos que possam ser cortados. Outra técnica é, usando um torno e uma broca, fazer um furo interno axial atravessando todo o eixo, transformando-o em um cilindro. Se o eixo tiver diâmetro D e o furo d, o peso diminuirá de um fator  $d^2/D^2$ , enquanto as resistências à flexão e torção (que normalmente são as mais importantes) irão diminuir de um fator de apenas  $d^3/D^3$ . Assim, se você fizer por exemplo um furo com  $d = D/2$ , seu peso diminuirá em  $(D/2)^2/D^2 = 0,25 = 25\%$ , enquanto que a resistência à flexão só ficará menor em  $(D/2)^3/D^3 = 0,125 = 12,5\%$ .

Em último caso, uma técnica excelente mas muito cara é trocar eixos de aço por feitos de titânio grau 5 (Ti-6Al-4V). Nós tivemos que fazer isso no Touro, o eixo da arma originalmente era de aço 4340 temperado, pesando 2,7kg. Como ele já estava temperado, seria muito difícil furá-lo. A solução foi então substitui-lo por um de Ti-6Al-4V, que pesa 1,6kg, emagrecendo assim 1,1kg. E a resistência nem foi prejudicada, pois esse titânio é tão bom ou melhor que os melhores aços para eixos. O custo foi caro mas não absurdo, considerando que é uma parte crítica do robô: cerca de US\$150 pelo material, nos EUA. Fuja da tentação de trocar por eixos de alumínio: os comuns irão empinar facilmente, e os aeronáuticos possivelmente romperão devido à sua tenacidade relativamente baixa.

Uma regra geral, não só para eixos, é trocar todas as peças de aço do robô por de titânio grau 5. É uma solução cara, porém o peso dessas peças será reduzido em cerca de 40%, e a resistência será igual ou até maior (exceto para algum eventual aço ferramenta usado na arma, que pode ser 2 vezes mais duro que o titânio e não deve ser substituído para não perder desempenho). Se houver alguma peça de aço que esteja sofrendo baixos carregamentos, então considere a sua troca por alumínio, mas de preferência aeronáutico.

O próximo passo é emagrecer as placas. A primeira idéia é fazer furos nela, transformá-la em um queijo suíço. Isso só deve ser feito em caso de emergência, durante a competição. Furos são uma má escolha, pois eles deixam entrar destroços metálicos no robô, que podem provocar curtos, e aumentam o risco de um robô tipo *hammer*, *spear* ou *overhead thwack* mais sortudo atingir as partes internas. Além disso, furos têm um fator de concentração de tensão de cerca de 3,0 sob tração



e 2,0 sob flexão (valores aproximados, há um apêndice com gráficos desse fator ao final do tutorial). Ou seja, mesmo um pequeno furo irá multiplicar as tensões mecânicas de tração por 3,0 e de flexão por 2,0 em alguns pontos de sua borda. Isso favorece o surgimento de trincas (fissuras). Além disso, são precisos muitos furos para se perder peso significativamente. Vamos fazer um exemplo a seguir.

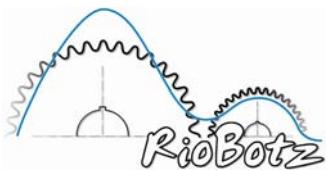
Considere, por exemplo, a tampa de um robô feita de uma placa de alumínio de 0,5m por 0,5m, com espessura de 1/4" (6,35mm). Sua massa é  $2800\text{kg/m}^3 \times 0,5\text{m} \times 0,5\text{m} \times 0,00635\text{m} = 4,445\text{kg}$ . Vamos reduzir sua massa em 25%, para 3,334kg, usando uma serra copo para fazer diversos furos de 1" (25,4mm) de diâmetro. Cada furo aliviaria apenas  $2800\text{kg/m}^3 \times \pi \times (0,0254\text{m})^2/4 \times 0,00635\text{m} = 0,009\text{kg}$ . Ou seja, para perder  $4,445 - 3,334 = 1,111\text{kg}$ , seriam precisos  $1,111/0,009 \cong 123$  furos! Além de trabalhoso, o robô ficaria sujeito aos problemas discutidos acima.

Uma melhor solução é fresar a placa de alumínio. Nesse caso, fresaríamos toda a placa até sua espessura diminuir em 25%, ficando com um valor uniforme de 3/16" (4,76mm). A tensão de flexão de uma placa depende do quadrado de sua espessura, portanto ela seria multiplicada por  $(6,35/4,76)^2 = 1,78$ , um fator menor que o 2 que seria obtido furando-a. E a tensão de tração ao longo da placa depende diretamente da espessura, portanto ela seria multiplicada por  $6,35/4,76 = 1,33$ , muito menor que o fator 3 dos furos. A resistência seria portanto menos prejudicada fresando do que furando, sem contar que a placa continuaria vedada (para não entrar destroços), e não seria necessário ter o trabalho de marcar e furar 123 vezes.

Uma solução ainda melhor é fresar seletivamente. Ou seja, diminuir a espessura apenas em parte das placas, deixando a espessura original em alguns pontos para fazerem papel de reforços estruturais. Essa foi a solução adotada nas placas do Touro. Fresamos até cerca de metade da espessura em algumas regiões, formando "banheiras" na superfície, veja a foto ao lado. Não fresamos a região entre as 2 banheiras mostradas da figura (desse modo prejudicando menos a rigidez da placa, deixando uma "coluna vertebral" rígida) e regiões críticas onde os motores são fixados (sob o logotipo da RioBotz na foto). Fizemos isso em todas as paredes e nas tampas superior e inferior do Touro (deixando-o mais magro e com aspecto "sarado").



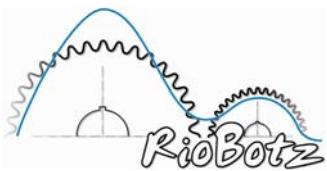
Uma última opção é trocar o material da placa, de alumínio para Lexan. As resistências e rigidez serão prejudicadas, porém a placa ficará com apenas cerca de 43% do peso original.



Outro recurso de emagrecimento é trocar de tipo de bateria. Troque de SLA (chumbo-ácido) para NiCd ou NiMH. Um conjunto de baterias de SLA que forneça 24V possui capacidade de  $1,25\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ , porém é preciso considerar o seu *de-rating factor* (vide capítulo 7) em um round de 3 minutos, cerca de 0,28, o que daria  $0,28 \times 1,25\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg} = 0,35\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ . O *de-rating factor* das baterias de níquel em 3 minutos é muito melhor, cerca de 0,9, logo o mesmo pack de 24V de NiCd teria em média  $0,9 \times 2,1\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg} \approx 1,9\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ , e de NiMH teria  $0,9 \times 2,9\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg} \approx 2,6\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ . Assim, sem prejudicar a capacidade do robô, pode-se perder até 80% do peso da bateria ao trocar de SLA para NiCd. Trocando de NiCd para NiMH, a perda adicional é de cerca de 30%. Mas cuidado nesta última troca pois as de NiCd são capazes de fornecer picos de corrente bem maiores que as de NiMH, que podem fazer muita diferença em especial na aceleração de uma arma. Para emagrecer ainda mais, seria preciso usar baterias de lítio (de preferência do tipo lítio-polímero), porém seu preço ainda é muito alto.

Com o robô testado e dentro do peso, pode-se partir para os preparamentos da viagem.

Antes da viagem, faça uma lista de ferramentas. Evite a tentação, que eu costumo ter, de levar o seu laboratório inteiro. As principais ferramentas já foram enumeradas e ilustradas no capítulo 2. Alguns itens muito úteis mas muitas vezes esquecidos são um aspirador de pó portátil (para limpar o robô entre os rounds, pois pequenos destroços de metal podem gerar curtos), um ventilador grande (para esfriar as baterias após cada round antes de carregá-las), transformador bivolt de 220V/110V (com potência de no mínimo 1kVA), extensão elétrica, régua de tomadas, lanterna (para reparos na eletrônica dentro do robô), espelho de dentista (para inspecionar o robô por dentro sem desmontá-lo), ímã telescópico (para apanhar parafusos ou porcas que caiam dentro do robô), e finalmente silver tape, muita silver tape, para fazer reparos de emergência no robô.



## 8.2. Durante a Competição

Finalmente chegou o grande dia (ou os grandes dias). Como será a competição? Vamos descrever os procedimentos típicos, baseando-se na nossa experiência no Robogames, nos EUA.

Após conseguir seu crachá e os da equipe, você receberá uma mesa (*pit*) onde colocará suas ferramentas e robôs. A menos que você esteja competindo por exemplo com apenas um *hobbyweight*, essas mesas não serão suficientes para todos os robôs e ferramentas (foto ao lado). Tente deixar os robôs, ferramentas mais importantes, rádios, baterias e carregadores sobre a mesa, e o restante do material sob ela da forma mais organizada possível. Evite invadir as mesas das outras equipes (olha quem fala...)!



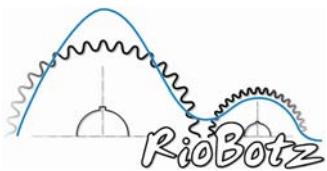
Organize os membros da equipe de modo que todos tenham sua função bem definida, e saibam onde conseguir cada ferramenta na hora de um pitstop conturbado. Tenha um bloco de notas para anotar todas as idéias que tiver durante o evento, seja em função do que você aprendeu conversando com outras equipes, ou do que seu robô aprendeu lutando na arena. Essas informações serão muito úteis depois. Não se esqueça de filmar e fotografar todo o evento, muitas idéias surgem ao rever as fotos e vídeos.

Nos eventos é importante lembrar que a rivalidade não deve sair de dentro da arena. Ao contrário da foto ao lado, **não provoquem** seus adversários! Conversem com as outras equipes, mostrem os seus robôs aos outros, troquem informações, emprestem ferramentas. Esse é um esporte ainda relativamente pequeno, se não nos ajudarmos não iremos crescer e melhorar o nível da competição, atrairindo público e patrocinadores.



Não tenha medo de mostrar o interior do robô aos seus adversários, mesmo que você vá enfrentá-los no próximo round.

Não existem muitos segredos ainda não revelados nesse esporte, há um número muito grande de *websites* e livros que contêm todas essas informações. Esse tutorial é um exemplo disso. Ao esconder o seu robô, as outras equipes provavelmente não mostrarão os delas para você, e você perderá a chance única de troca de experiência e informações.



Deixe que as outras equipes tirem fotos do seu robô. Isso é bom para os seus patrocinadores, são mais fotos divulgadas com o logotipo. Deixe tirarem fotos de dentro do robô. Mesmo que o seu adversário descubra um pequeno ponto fraco, ele não vai conseguir acertá-lo em cheio no meio das luzes e sons de um round. Seria uma questão de sorte, os robôs não têm precisão a esse nível. E se o seu ponto fraco for grande, pode ter certeza que o adversário perceberá mesmo que você tente esconder o seu robô.

Passeie pelos *pits* das outras equipes (foto acima), mas sempre peça permissão para tirar fotos dos robôs ou para tocar neles. Se você precisar de alguma ferramenta emprestada, com certeza estas equipes serão muito mais prestativas se você tiver sido cordial.

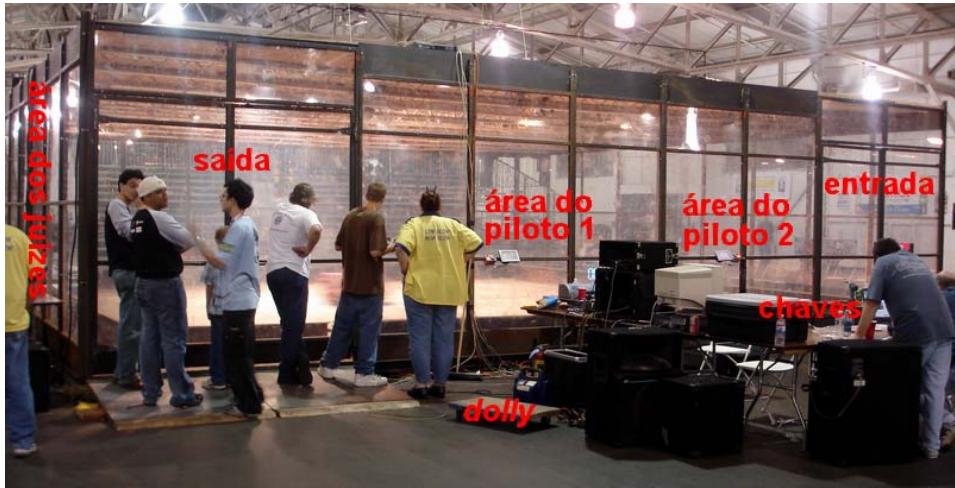
Fique atento ao horário de sua próxima luta, para não ser pego desprevenido. Dê uma última checada na tensão das baterias e feche o robô. Pegue próximo da mesa dos juízes o *clip* (foto ao lado) referente à frequência do seu rádio (é proibido ligar qualquer rádio sem o *clip*), faça um rápido teste com as rodas do robô levantadas (por questão de segurança), e vá para a fila. A maioria dos eventos exige que o robô seja carregado com um carrinho (*dolly*), pode até ser aqueles portáteis usados para transportar malas (foto ao lado). Não é permitido carregar o robô com as mãos por entre os *pits*, para evitar que caia no pé de alguém. Você chegará numa fila de competidores, e será colocado lado a lado com o seu adversário (também na foto ao lado). converse com ele e deixe-o olhar o seu robô. Não tenha medo de responder perguntas sobre o seu robô. A essa altura isso não fará a menor diferença, é apenas uma forma de conversar e relaxar.

Se um adversário pedir que um round contra ele seja adiado, e a organização do evento permitir, conceda. Afinal você veio para a competição para lutar, não para ganhar por WO. Todos na platéia querem ver combates (foto ao lado). No passado, nas poucas vezes em que alguém nos EUA não concedeu um breve adiamento, para forçar a vitória por WO, a platéia vaiou sem piedade.





Uma arena típica dos EUA possui duas portas: uma entrada e outra saída (foto ao lado). Perto da arena há uma mesa com um computador no qual podem ser consultadas em tempo real as chaves e horários da luta. Nessa mesa também ficam os *clips*.



Na lateral da arena fica outra mesa, a dos juízes. Entre na arena (pela porta de entrada, é claro) na hora em que for chamado, carregando o robô sobre o carrinho (*dolly*).

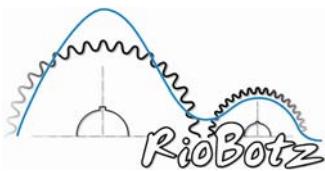
Após entrar na arena, você levará o seu robô até a posição definida pelos organizadores (foto ao lado), e esperará junto a ele. Quando solicitado, ligue o robô e tire a trava de segurança da arma, se houver. Saia da arena e se posicione no local reservado ao



piloto (área do piloto 1 ou 2). Dê um rápido e leve toque no rádio para testar se o robô está respondendo. Quando estiver preparado, aperte o botão “Ready/Surrender” (foto ao lado), para informar que você está pronto. Alguns segundos após ambos os pilotos terem apertado o botão (que parecem eternos), acenderão uma série de luzes, até a luz verde acender.



Os rounds duram até 3 minutos. Se o adversário não conseguir se locomover após 10 segundos, ele perde a luta. Se você conseguir arremessá-lo além das vigas I que cercam a arena, ele também perde. No entanto, se ele prender accidentalmente nas vigas I da arena, ele tem uma única chance de desprendê-lo, enquanto o round é paralisado. Para desistir durante a luta, aperte de novo o botão “Ready/Surrender”, e a luz vermelha se acenderá. Consulte o regulamento da sua competição para detalhes mais específicos.

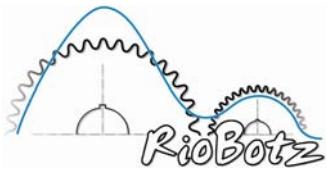


Ao final de um round, cumprimente o adversário, independentemente do resultado. Mesmo que você julgue ter perdido injustamente, lembre-se que o seu adversário estava tentando fazer o mesmo que você: ganhar. Vá ao *pit* do seu adversário após o round para checar os danos causados, conversar, tirar fotos, e o convide a ver os danos que ele causou em seu robô. É muito comum dar ao seu adversário peças do seu robô que foram destruídas por ele e que não podem ser reaproveitadas. Esses são os chamados “troféus”, são lembranças para se guardar dos combates. É uma honra receberê-los, e dá-los é mais uma forma de ser cordial e criar amizades. Na foto ao lado estão alguns dos troféus que tivemos a honra de receber ao longo dos anos (exceto o pedaço da roda vermelha do Devil’s Plunger, que não foi conquistado e sim gentilmente doado por Matt e Wendy do Team PlumbCrazy após um round contra o temido Megabyte).

Entre os rounds, evite fazer trabalhos sujos no meio dos pits, como esmerilhar peças grandes, espalhando faíscas para todos os lados. Faça como o Jamie Hyneman ao lado, o bigodudo dos caçadores de mitos, arranje um canto isolado para esmerilhar, ou então peça para alguém da equipe fazer uma barreira de proteção para não atingir os outros. Muitas equipes já estão tensas tentando deixar seu robô pronto para o combate, evite criar motivos de conflito.

Nunca teste a arma do seu robô nos *pits* sem a trava de segurança. Não há problema em testar a locomoção com as rodas levantadas do chão, ou ligar e desligar rapidamente a arma para ver se está funcionando, mas sempre com a trava colocada. As armas dos robôs podem ser letais. Sem contar que todas as outras equipes vão ficar olhando para você com cara feia (em especial nos EUA).

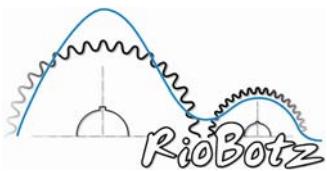




Um acessório muito útil é um rádio comunicador de 2 vias (*2-way radio*, foto ao lado), que pode ser usado por 2 ou mais membros da equipe, em especial pelo piloto. Isso dá mais liberdade aos integrantes para circular pelos *pits*, e agiliza reunir todos em caso de emergência. Use um *headset* (fone + microfone) para ficar com as mãos livres. É importante que o sistema tenha função de vibrar, pois com a música e o barulho da competição será difícil escutar os chamados.

Mesmo que você tenha sido eliminado, tente assistir a competição até o final. Além de não perder o espetáculo, e assistir aos combates de uma posição privilegiada, é uma forma de prestigiar os seus colegas. Competir em um combate de robôs é uma experiência indescritível, não dá para explicar só com palavras. Mas se eu tivesse que resumir as emoções em uma palavra, seria “adrenalina”. Muita adrenalina. E ao final do evento você terá feito muitos amigos, sejam eles humanos ou robôs. Veja a foto ao lado. Quem diria que a gente ficaria amigo do Megabyte?





### 8.3. Após a Competição

Após cada competição, junte todas as suas anotações para implementá-las em melhorias do robô ou em um projeto totalmente novo.

Se você não usará o robô nos próximos meses, sugiro que armazene apropriadamente as baterias. Para as de chumbo-ácido (SLA), deixe-as completamente *carregadas*, e guarde-as com os terminais isolados para evitar curtos. Carregue-as completamente no mínimo de 6 em 6 meses. Não as guarde em geladeira.

Para as de NiCd, NiMH ou de lítio, o procedimento é inverso, é preciso *descarregá-las*. Mas nunca abaixo de 0,9V por célula para as de níquel, para evitar isso descarregue-as usando de preferência um carregador eletrônico como o Triton (capítulo 7). Coloque-as na geladeira (foto ao lado) a 5°C, dentro de um plástico tipo *zip-lock* para não entrar umidade, elas durarão até 20 anos dessa forma (mas para isso, no mínimo de 6 em 6 meses, retire-as da geladeira, carregue-as e descarregue-as completamente). Nunca congele as baterias.



Desmonte o robô para inspecionar os danos sofridos, muitos deles não são aparentes. Troque os parafusos que estiverem em pior estado, eles podem ter danos acumulados ou fissuras embutidas. Parafusos decepados podem ser um problema. Se a haste que ficou presa no robô não sair girando com um alicate, use uma dremel (foto ao lado à esquerda) para fazer dois chanfros retos paralelos, em lados opostos da parte quebrada, e neles use uma chave de boca para soltar (ao lado à direita). Não tente usar uma broca para furar a haste, nem mesmo aquelas especiais extratoras de parafusos, elas só funcionam em parafusos de latão ou de classe muito baixa, algo altamente não recomendável em combate de robôs, vide o capítulo 4.



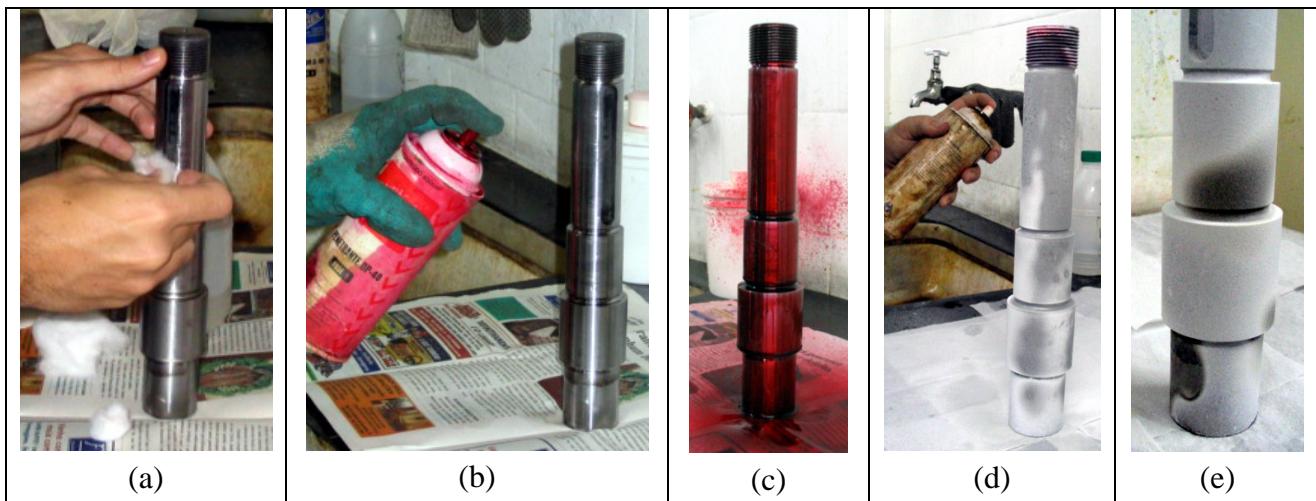
Outra dica é soldar uma porca na haste quebrada do parafuso (foto ao lado) e usar uma chave de boca. Se a protuberância quebrada for muito pequena, será difícil soldar a porca, por isso solde primeiro uma arruela na haste, e depois solde a porca nesta arruela.



Verifique o estado das correias ou correntes, essa é uma boa hora para trocá-las. Faça uma boa limpeza no robô.

Para inspecionar se há trincas (fissuras) em componentes críticos como eixos, muitas vezes a inspeção visual não é bem sucedida: as trincas costumam ficar com sua boca fechada, e dessa forma

são quase imperceptíveis a olho nú. Para contornar esse problema, você pode usar a técnica do líquido penetrante (LP). Essa técnica utiliza dois sprays disponíveis comercialmente, um contendo o LP e outro contendo um líquido revelador. As etapas desta técnica estão descritas a seguir, aplicadas ao eixo da arma do Ciclone:



- (a) desengraxe a peça (no caso o eixo) e passe acetona até ficar bem limpa, sem impressões digitais;
- (b) aplique o spray de LP, usualmente de cor vermelha ou outra cor berrante, em toda a peça, em especial nos entalhes (mudanças de geometria), onde é mais provável o surgimento de trincas;
- (c) espere cerca de 20 minutos para o LP, que possui capilaridade muito baixa, penetrar em eventuais trincas, caso haja; sempre use luvas, a capilaridade do LP é tão baixa que se ele encostar em seu dedo ele entrará por debaixo de sua unha, deixando-a pintada de vermelho por dentro (uma manicure instantânea, que só sairá depois de a unha crescer);
- (d) limpe bem a peça com um pano seco até desaparecer todo o vermelho (não use acetona agora, ela pode retirar o LP das fissuras antes da hora), e aplique o spray revelador – a peça ficará esbranquiçada, parecendo que foi “congelada”;
- (e) espere alguns minutos e inspecione visualmente toda a peça, em especial nos entalhes – se houver trincas, elas aparecerão na forma de riscos vermelhos na superfície, que são o LP que estava nelas impregnado e que foi “sugado” de volta pelo revelador; cuidado com falsos alarmes, riscos muito pequenos podem ser apenas arranhões inofensivos causados pela própria usinagem ou em combate; o Ciclone ficou muito feliz quando foi informado que o seu eixo estava isento de trincas.

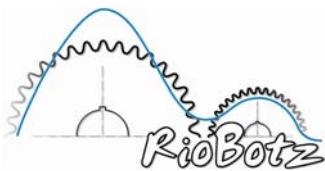
Atualize o quanto antes a sua *homepage*. Logo após uma competição é provavelmente quando haverá mais acessos à sua página, independentemente do seu resultado no evento. Nessa época todas as equipes ficam ávidas procurando por fotos e vídeos. Se você não tiver uma página, faça uma. Isso é importante também para mostrar a potenciais patrocinadores.

Se você participou de alguma competição internacional, você poderá verificar o *ranking* dos seus robôs no site [www.botrank.com](http://www.botrank.com).



Finalmente, monte o robô assim que terminar a inspeção e a troca de peças quebradas ou desgastadas. Com o robô todo montado, fica impossível perder peças pequenas, das quais você só sentirá falta no ano seguinte, desesperadamente, às vésperas de uma nova competição. Agora relaxe, e reveja as fotos e vídeos do evento. Ganhando ou perdendo, saia para celebrar com a equipe e relembrar o evento. Saúde!





## 9. Anatomia dos Robôs da RioBotz

Neste capítulo vamos estudar a anatomia dos robôs da equipe RioBotz, em especial dos três *middleweights* que competiram em 2006: os *spinners* Ciclone e Titan, e o *drum* Touro. Vamos também falar sobre os primórdios da nossa equipe, desde o nosso primeiro robô Lacrainha.

### 9.1. Lacrainha

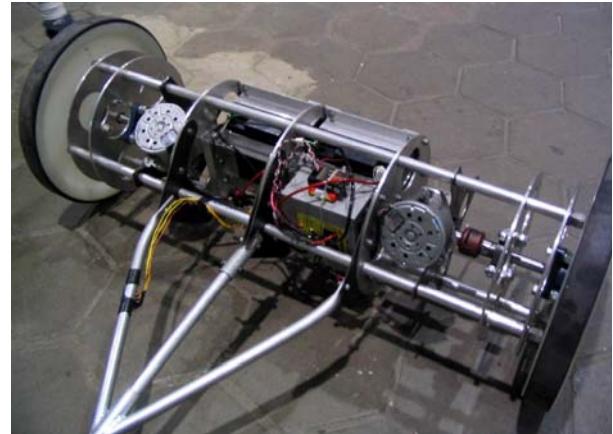
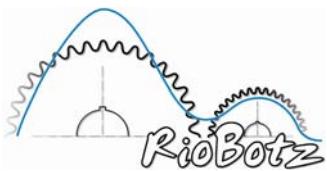
A RioBotz foi fundada em janeiro de 2003, e na época construimos o *overhead thwack* Lacrainha (foto ao lado), um *middleweight* com estrutura quase toda de sucata. Note os suportes de bateria feitos de sucata de canaletas perfuradas usadas na PUC-Rio. Seu formato cilíndrico foi uma questão financeira: nós conseguimos sucata na forma de vários discos de alumínio usados no desenvolvimento dos *pigs* da universidade. Os *pigs*, usados na inspeção e limpeza interna de oleodutos, possuem formato cilíndrico (foto ao lado) similar ao da estrutura do Lacrainha.

Conseguimos que a Bosch doasse os motores GPB, e choramos muito para conseguir comprar barato as pesadas reduções, de ferro fundido, tipo parafuso sem fim. Elaboramos toda a eletrônica, incluindo placas de sinal e de potência. Com o apoio da equipe de Aerodesign da universidade, que nos emprestou o rádio, nascia o nosso primeiro robô, o Lacrainha.



### 9.2. Lacraia

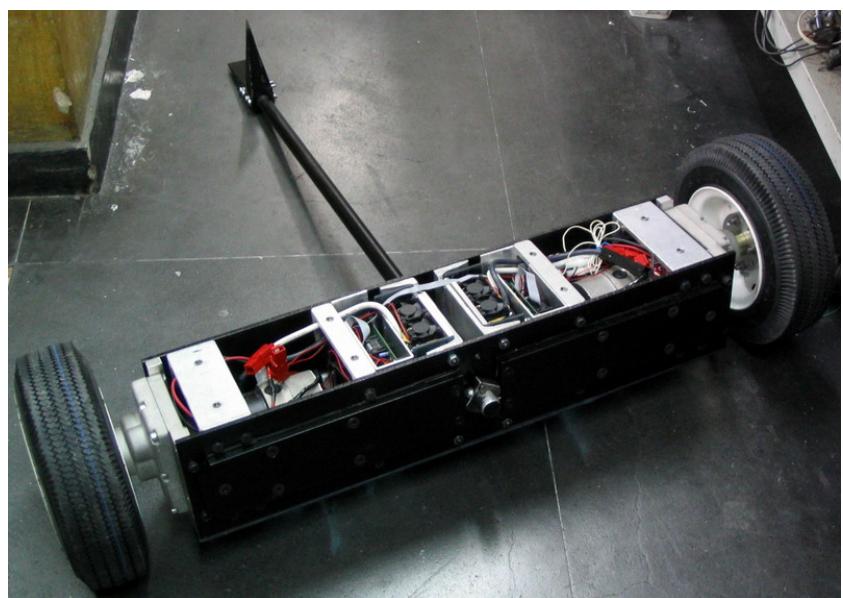
Agora com apoio do nosso primeiro patrocinador, a EPTCA Medical Devices, construímos uma versão melhorada do Lacrainha, o Lacraia (veja a foto a seguir). Apesar da melhor aparência, persistiam as deficiências do robô se comparado com o padrão das competições atuais: armadura de alumínio 6063-T5 de apenas 1mm de espessura, controle bang-bang usando relés e apenas 1 MOSFET por motor, e baterias de chumbo-ácido (gel) acionando GPBs com uma redução pesada e de baixa eficiência. Ainda assim, ele era um robô competitivo para as guerras brasileiras da época.

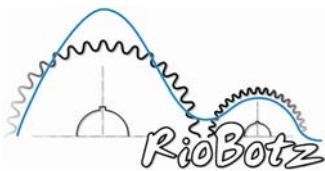


### 9.3. Anúbis

Em 2004 projetamos o nosso terceiro *middleweight*, Anúbis, outro *overhead thwack*. Com potência quase 10 vezes maior que o Lacraia, o Anúbis é um dos robôs mais rápidos que já fizemos (um dia temos que apostar uma corrida entre o Anúbis e o Touro). Sua estrutura foi toda feita com 2 placas de alumínio aeronáutico 7050, perfis de alumínio 6061-T6, e tampas de Lexan. A ponta de sua arma e suas duas placas de contra-peso foram feitas de aço S1. As duas rodas, preenchidas por dentro com espuma de poliuretano, são acionadas por motores NPC T74.

Confeccionamos e soldamos duas placas controladoras de velocidade do tipo OSMC, uma para cada motor, e usamos uma versão aprimorada da placa de sinal que havíamos desenvolvido para o Lacraia. O Anúbis foi o primeiro robô de combate brasileiro a usar baterias de NiCd de 24V, proporcionando altas correntes e torques suficientes para acelerar a arma e perfurar armaduras de adversários.





Ainda em 2004, resolvemos criar um robô reserva para a competição do ENECA daquele ano, que usasse um tipo de ataque diferente para termos mais opções de escolha em função dos adversários. Resolvemos trilhar o “caminho sombrio” conhecido como STW – *Spin To Win*.

Muitos consideram que os robôs de armas giratórias de impacto – *spinners*, *vertical spinners* e *drums* – constituem o “lado negro da Força” em combate de robôs, eles são o “caminho rápido e fácil” para a destruição (e portanto seguem a filosofia *Sith*).

Nada mais equivocado: eles podem gerar muita destruição rapidamente, mas são provavelmente os tipos de robôs mais difíceis de serem projetados, não há nada de fácil neste caminho. É fácil girar uma barra ou disco pesado usando um motor de alta potência, mas construir toda a estrutura necessária para causar imensos danos ao adversário, sem nada sofrer, é quase que desafiar a terceira lei de Newton. Além disso, os *vertical spinners* e *drums* possuem armas direcionais, e portanto precisam de tanta habilidade do piloto quanto em *wedges*, *hammers*, *lifters*, *launchers*. Mesmo os *spinners* envolvem estratégia, quando precisam manobrar para acertar partes menos protegidas do adversário, ou fugir na hora certa para terem tempo de acelerar a sua arma.

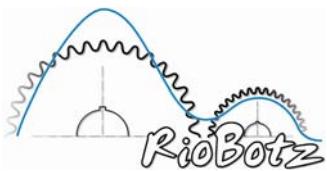
O resultado foi que o nosso primeiro *spinner*, que seria apenas o robô reserva, se mostrou tão destrutivo que se tornou o titular. Seu nome: Ciclone.

## 9.4. Ciclone

O Ciclone é, essencialmente, um motor Etek com um robô em volta! Esse motor, como já discutido no capítulo 5, é extremamente potente. Ele é uma excelente escolha para *heavyweights* e *super-heavyweights*. Nós tivemos muito trabalho para conseguir utilizá-lo em um *middleweight* sem ultrapassar o peso ou sem sacrificar a resistência da estrutura. O sistema completo da arma, incluindo lâmina, limitador de torque e colares, motor Etek e suporte, eixo e seus rolamentos e mancais, polias dentadas e correia, chegam a quase 50% do peso do robô. Isso começa a fugir bastante da regra 30-30-25-15, que diz que só 30% do peso do robô deveria ser gasto na arma (vide o capítulo 2).



Para compensar, tivemos que sacrificar um pouco os 30-25-15 restantes. Usamos apenas dois motores DeWalt de 18V com redução para comandar as rodas, o que permitiu que aplicássemos um pouco mais de 15% do peso do robô na locomoção, ao invés dos 30% da regra. Isso fez com que o Ciclone ficasse um pouco lento em relação ao padrão dos robôs dos EUA, no entanto ainda era uma boa velocidade para as competições nacionais da época. O conjunto motor-redução da DeWalt, acionado por controladores de velocidade OSMC e por uma placa de sinal própria, foi preso ao robô através de um colar de fixação na região mostrada na foto a seguir.



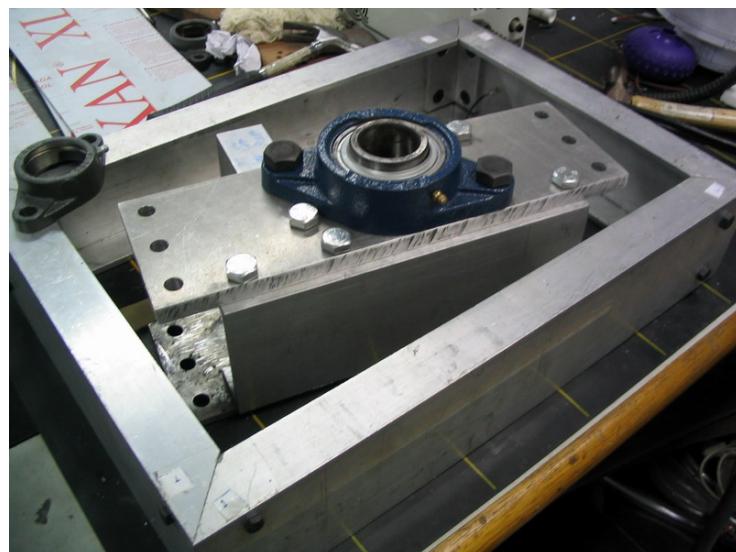
Para economizar no peso das baterias, foi preciso utilizar packs de NiCd. Com um pack de 18V da própria DeWalt para a locomoção, e outro de 24V para o Etek, conseguimos deixar o conjunto bateria-eletrônica com cerca de apenas 7% do peso do robô (ao invés de 15%). Assim, sobraram cerca de  $100\%-50\%-15\%-7\% = 28\%$  para a estrutura/armadura, um valor razoável e compatível com a regra 30-30-25-15.

Os motores da locomoção foram obtidos a partir de furadeiras DeWalt à bateria de 18V, que foram desmontadas. Foram aproveitados os motores (número 1 na figura ao lado), reduções planetárias (número 2), baterias (5) e carregadores (6). É um excelente custo-benefício pela quantidade de componentes que podem ser aproveitados.

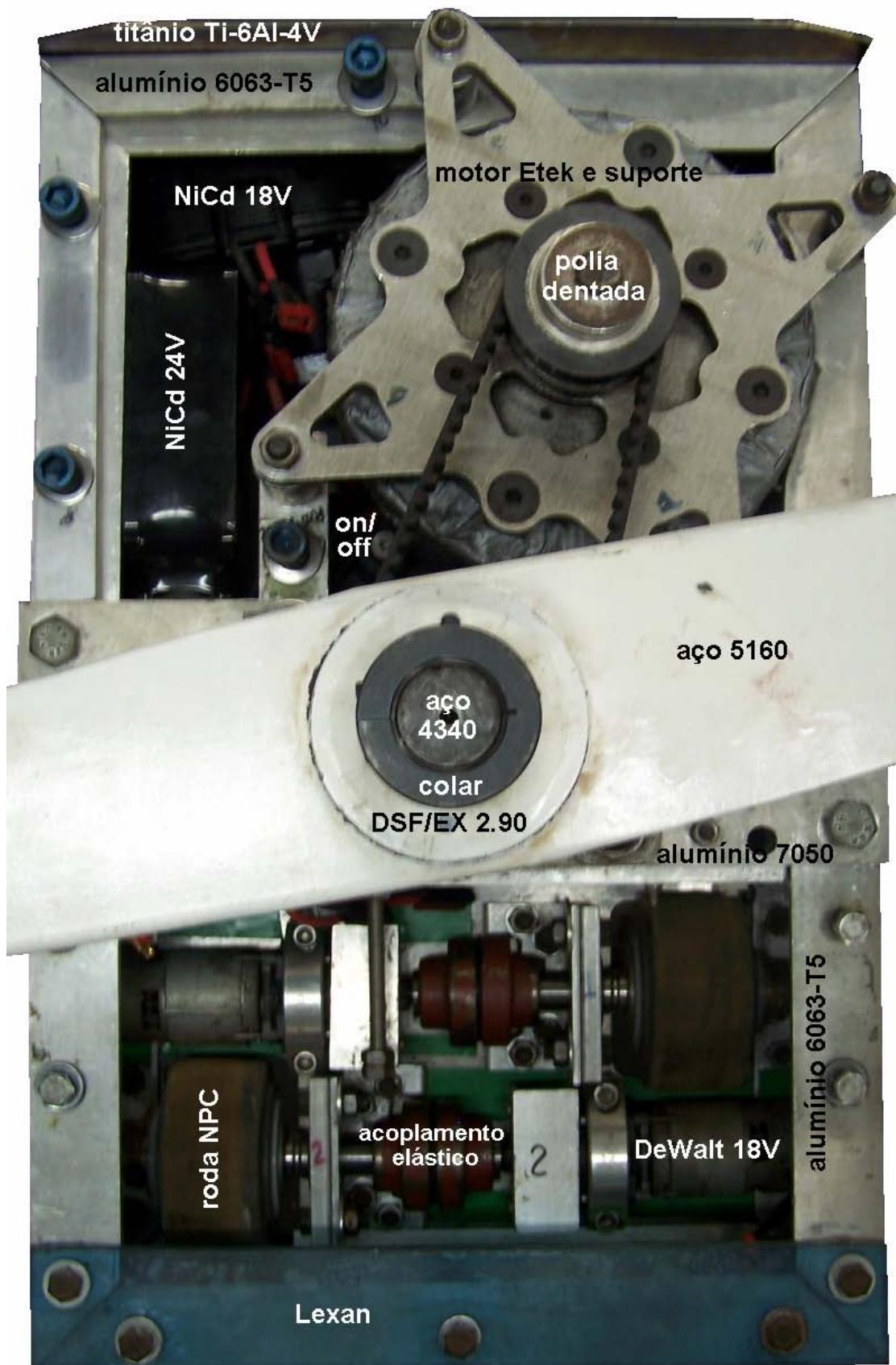
A estrutura do Ciclone foi toda feita em perfis e placas de alumínio. Infelizmente só conseguimos no mercado nacional perfis de alumínio 6063-T5, um dos menos resistentes. Em compensação, as placas que suportam os mancais e rolamentos da arma (ao centro na foto ao lado) foram em alumínio aeronáutico 7050. As tampas da eletrônica e bateria foram de Lexan.

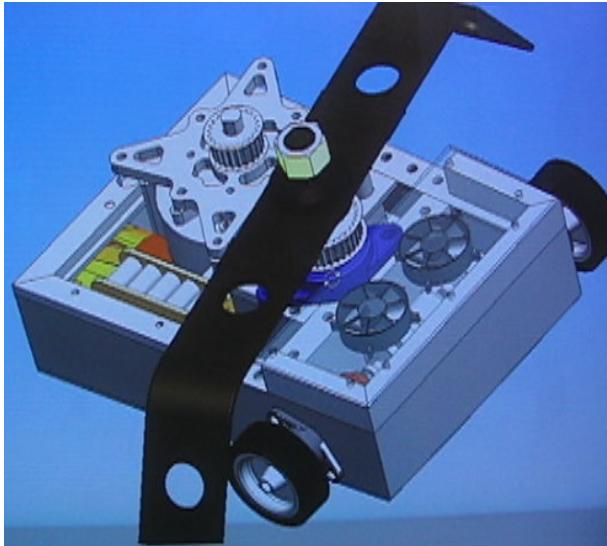
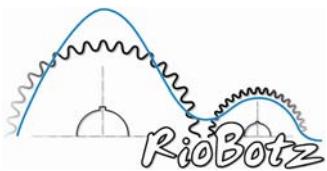
A arma é uma lâmina usada em feixes de molas de caminhões, de aço 5160, curvada e temperada. Adaptamos um limitador de torque modelo DSF/EX 2.90 (capítulo 5) para conectar a lâmina ao eixo de aço 4340 temperado da arma, permitindo deslizamento relativo no instante dos impactos, poupando assim o robô. O eixo é acionado por um par de polias dentadas, com uma correia tipo 8M.

Modificações posteriores incluíram uma armadura frontal de titânio grau 5, rodas internas, chave Hella para ligar/desligar o robô, e o embutimento dos rolamentos da arma nas placas de alumínio para eliminar os relativamente frágeis mancais de ferro fundido. As fotos a seguir mostram uma anatomia detalhada do Ciclone, assim como detalhes de sua construção.

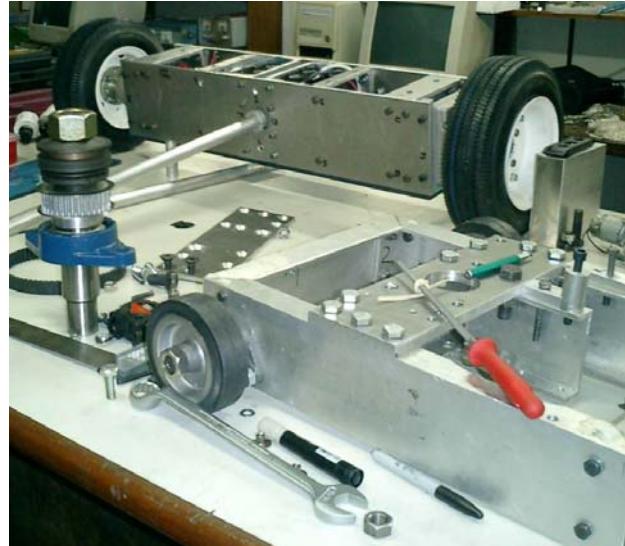


## Ciclone





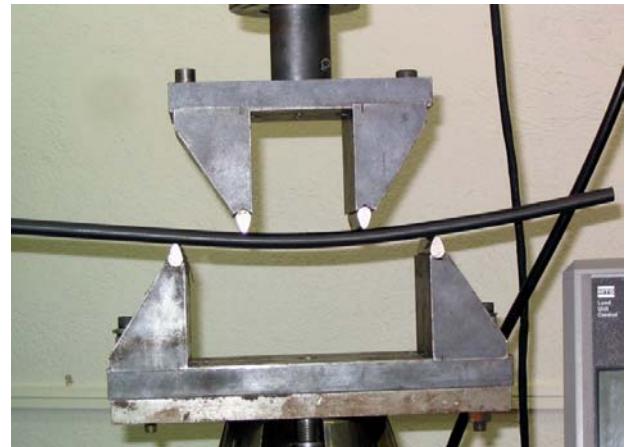
CAD em Solidworks da versão 2004



construção do Ciclone e do Anúbis



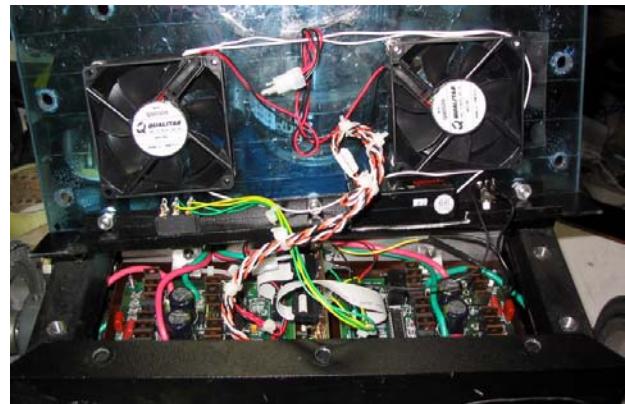
pintura eletrostática a pó



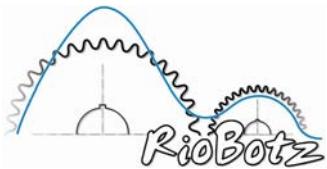
dobrando as lâminas em uma servo-hidráulica



soldando as controladoras de velocidade OSMC



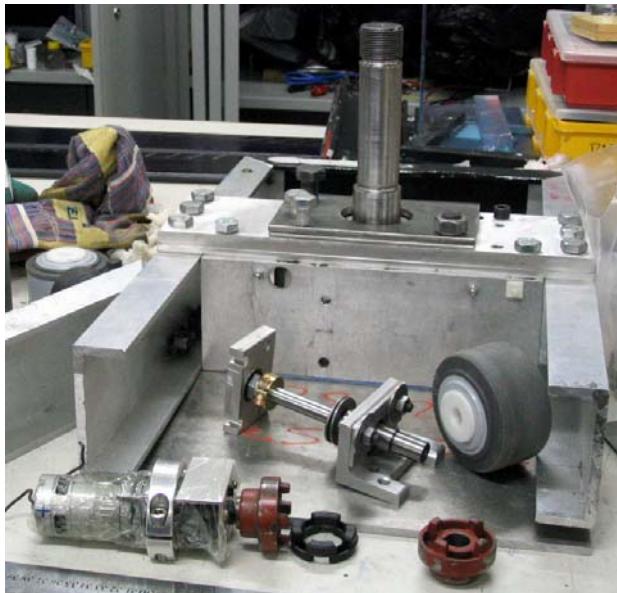
placa de sinal, OSMCs, e *fans* da eletrônica



Ciclone versão 2004



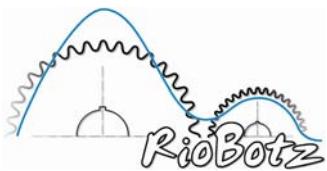
modificações em 2005 para a versão “ice”



modificações para deixar internas as rodas



Ciclone versão 2005/2006



## 9.5. Titan

Em 2005 projetamos o *middleweight* Titan, um *spinner* que incorporou uma série de melhorias em relação ao Ciclone. Com o patrocínio da HOPE Recursos Humanos, conseguimos adquirir titânio grau 5 e motores Magmotor.

Nossa primeira preocupação no projeto foi com a regra 30-30-25-15, que havia sido um tanto quanto violada pelo Ciclone. Dessa vez, projetamos todo o sistema da arma de modo que resultasse em menos de 25% do peso do robô. Usamos 2 Magmotors S28-150 acionando a 90° uma mesma engrenagem cônica presa ao eixo da arma. A lâmina, de aço 5160 temperado, foi presa ao eixo através de um colar apertado por uma grande arruela de Belleville. Na versão 2006, adicionamos uma rampa na sua frente, feita de titânio Ti-6Al-4V, para atuar em conjunto com a lâmina contra robôs muito baixos ou *wedges*. Somando a contribuição da rampa, que também é considerada como uma arma, chegamos aos 30% do peso do robô recomendados pela regra.

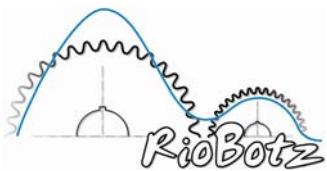
A locomoção do robô é feita por mais 2 Magmotors S28-150, conectados a caixas de redução TWM3M e rodas Colson de 4" de diâmetro. O sistema acabou ficando com apenas cerca de 15% do peso do robô, metade do valor da regra, no entanto sua velocidade ficou bem maior que a do Ciclone. A tração também foi melhorada, por ter suas duas rodas mais próximas ao centro de gravidade do robô.

Usamos OSMCs para controlar a velocidade das rodas, juntamente com a placa de sinal que havíamos desenvolvido para o Ciclone. Os motores da arma são acionados por um solenóide TW-C1, e uma chave Hella é usada para ligar/desligar todo o robô. Os 3 packs de baterias de 24V de NiCd que o Titan usa, juntamente com toda a sua eletrônica, resultaram em um pouco menos de 15% do peso do robô, bem de acordo com a regra 30-30-25-15.

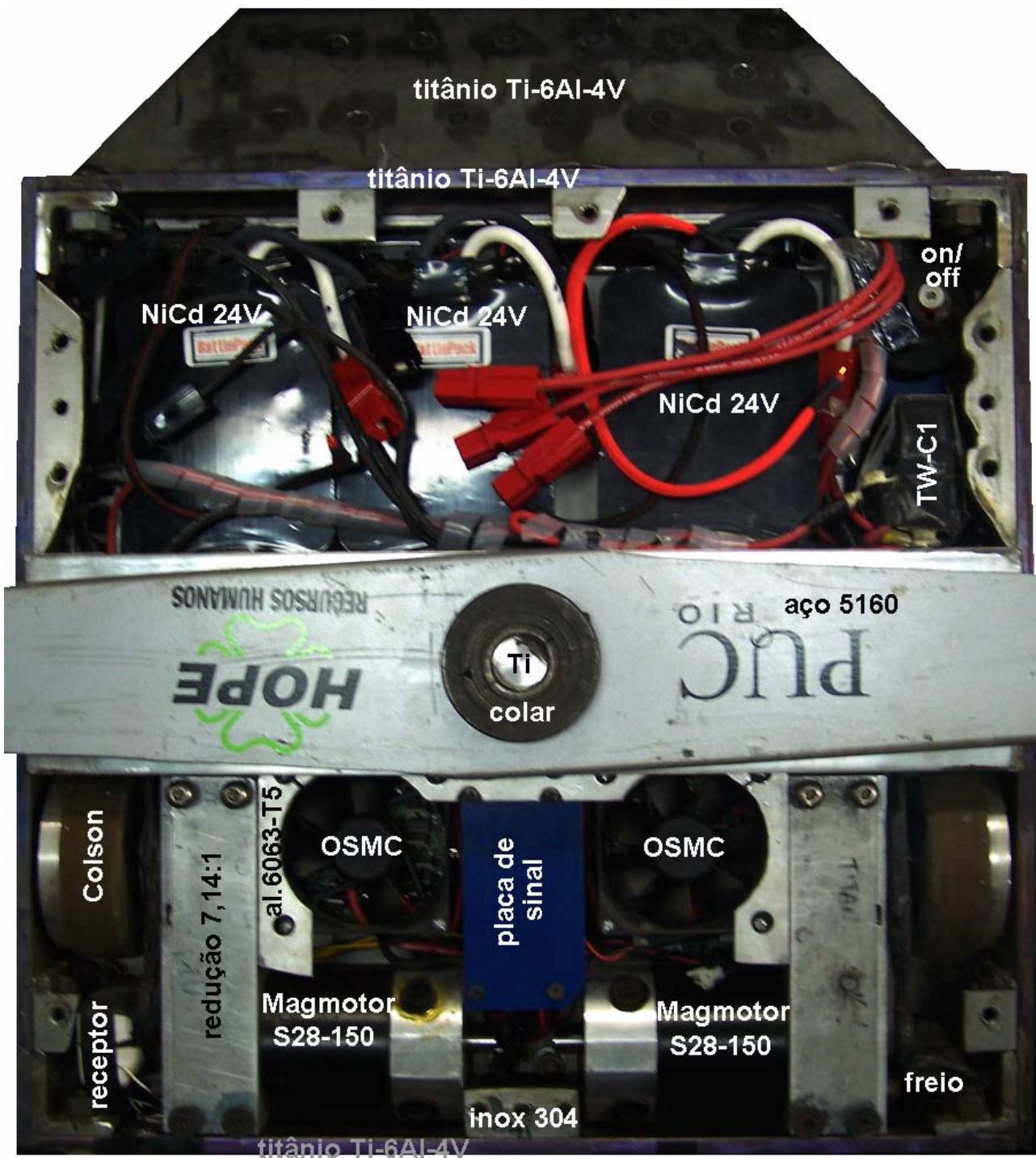
A estrutura/armadura integrada do Titan tem suas paredes e fundo toda em titânio Ti-6Al-4V, com tampas superiores de alumínio aeronáutico 7050. A placa de suporte do eixo da arma e as cantoneiras internas puderam ser todas feitas de aço inox 304, graças aos 15% de peso economizados na locomoção. Com isso, a estrutura/armadura ficou com respeitáveis 40% do peso do robô, um valor bem acima dos 25% da regra, possibilitando uma resistência ainda maior contra ataques adversários, e suportando as forças de reação dos impactos causados.

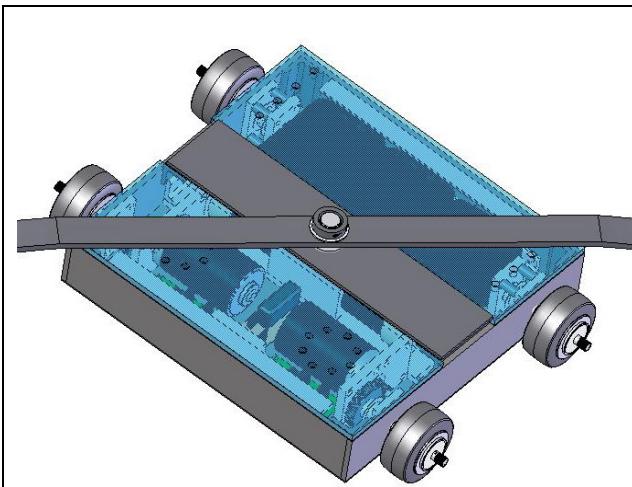
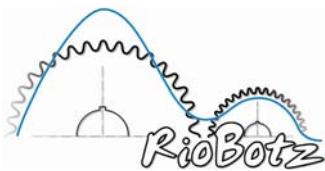
As fotos a seguir mostram uma anatomia detalhada do Titan, além de sua construção e testes.



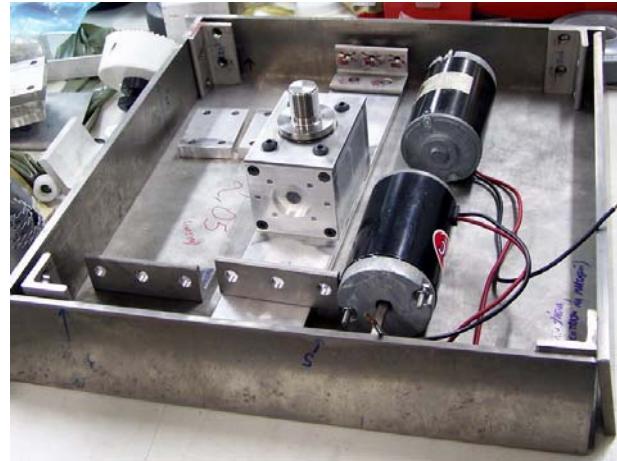


## Titan





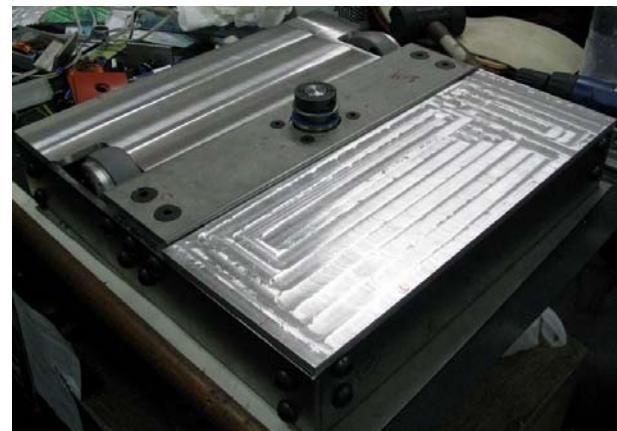
projeto original em Solidworks, com 4 rodas expostas: por algum motivo mudamos para 2 rodas protegidas após o WC2005!



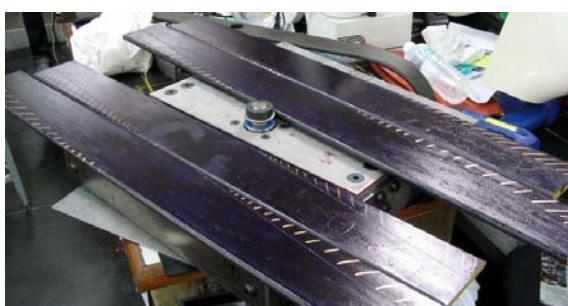
construção do Titan, com as paredes e fundo de titânio cortadas: originalmente seriam usados motores NPC-02446 para a locomoção



fresagem das tampas, para reduzir peso



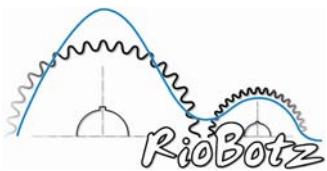
Titan com as tampas fresadas



barras de aço 5160 da arma, pintadas de azul de metileno, antes de serem cortadas, furadas e temperadas



equilibrando a lâmina sobre a ponta de um punção: a melhor forma de achar o centro de gravidade para marcar o furo do eixo da arma



Titan recém-nascido: sua lâmina originalmente incluía unhas em suas pontas, presas por parafusos projetados para “apenas” 7 toneladas



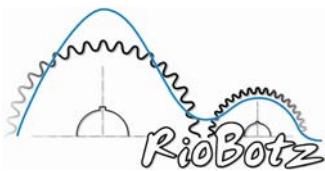
Michelangelo, Leonardo e Rafael: *sparrings* de 30kg cada, para treinos contra seu temido irmão Donatello, vulgo “Panela”



teste da arma: Titan × Michelangelo, de madrugada, no estacionamento da PUC-Rio



o indefeso Michelangelo após uma noitada de testes: “shell shock”



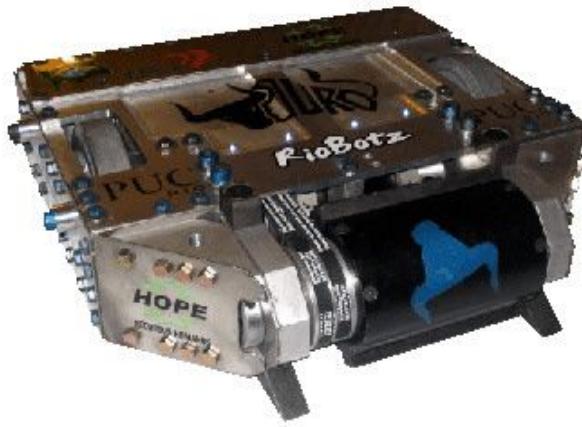
## 9.6. Touro

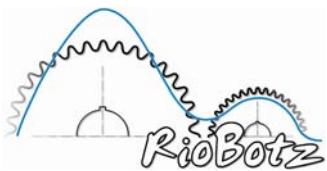
O projeto do *middleweight* Touro surgiu do desejo de criar um robô com arma giratória que fosse inversível. Ser inversível é um fator importante, pois sua estréia seria no Robogames 2006, contra robôs norte-americanos que facilmente conseguem virar os adversários. Optamos então por criar um *drum*, visando não apenas danificar os oponentes, mas também arremessá-los para o alto ou para fora das bordas da arena, podendo também funcionar de cabeça para baixo.

Iniciamos construindo o tambor, feito de um cilindro de aço doce (aço ST-52, similar a um 1025, com 0,25% de carbono). Aparafusamos 2 barras de aço S7 temperado para fazerem o papel de dentes que agarram no adversário. Torneamos uma polia dupla para ser aparafusada no tambor, permitindo que ele seja acionado por um par de correias V. Como discutido no capítulo 5, essas correias funcionam como uma embreagem, deslizando no instante do impacto. O conjunto foi montado em um eixo sólido de aço 4340 temperado, que depois foi substituído por titânio grau 5 para aliviar peso. O acionamento é feito por um Magmotor S28-400, uma versão mais longa e potente que o S28-150. Todo o sistema da arma representa cerca de 35% do peso do robô. Esse valor é um pouco acima dos 30% da regra 30-30-25-15, mas isso é normal em *drums*, pois o pequeno raio do tambor precisa ser compensado por um maior peso para gerar um momento de inércia significativo. Muitos *drums* de diversas classes de peso usam cerca de 20% do peso do robô no tambor giratório, e até 15% no seu acionamento (eixo, polias, correias, rolamentos, motor e seus suportes), totalizando até 35% como no caso do Touro.

A locomoção do robô é similar à do Titan, feita por 2 Magmotors S28-150 conectados a caixas de redução TWM3M. Usamos rodas Colson de 6" de diâmetro, ao invés das de 4" como no Titan, o que aumentou em 50% a velocidade final do Touro. O sistema de locomoção acabou ficando com cerca de 15% do peso do robô, bem abaixo do valor de 30% da regra. Pelo que pudemos observar, esse valor da regra de 30% para a locomoção realmente é o mais comum, os nossos 15% são uma exceção, pelo fato de usarmos apenas 2 rodas e termos conseguido motores e caixas de redução com relação potência/peso muito altas. Qualquer robô tipo *rammer*, *wedge*, *thwack* ou *overhead thwack*, que depende muito de um sistema de locomoção mais robusto e potente, assim como qualquer robô com 4 (ou mais) rodas ativas, precisa se aproximar mais dos 30% para ser eficiente do que dos nossos 15%. Desse modo, esses 15% seriam provavelmente um limite inferior para o peso do sistema de locomoção de um robô, com 30% sendo um valor mais comum.

Para deixar o robô mais compacto, usamos Victors ao invés de OSMCs para controlar a velocidade das rodas. Nós desenvolvemos uma pequena placa de sinal especificamente para acionar o solenóide do tambor, além de alimentar o receptor através de um BEC nela implementado usando um regulador de tensão (vide capítulo 6). O motor da arma é acionado por um solenóide TW-C1, e



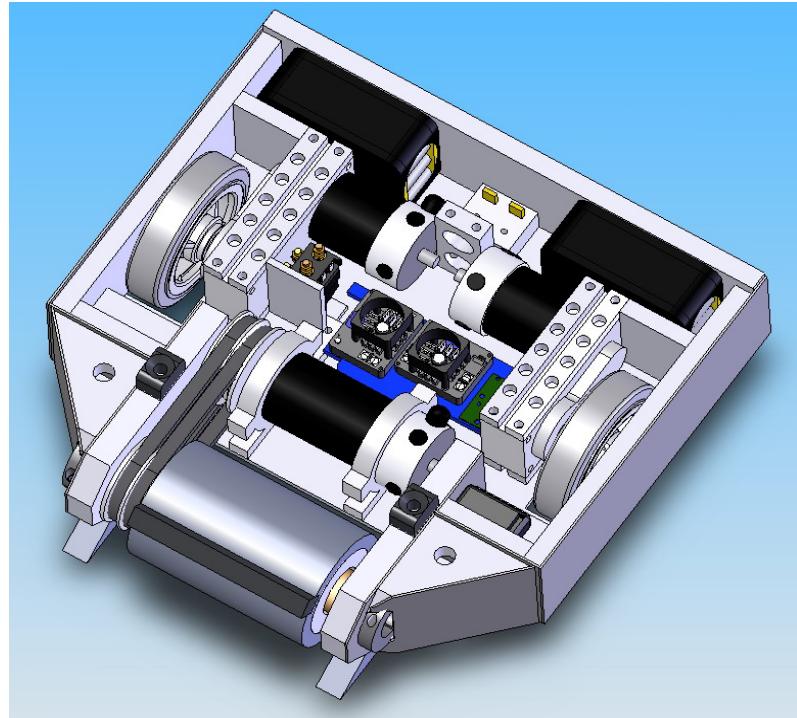


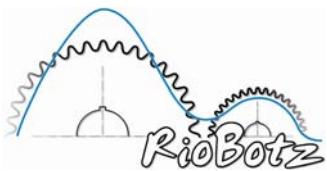
uma chave MS-2 (mais compacta que a chave Hella) é usada para ligar/desligar todo o robô. Repare na foto da página a seguir que usamos uma malha trançada (em vermelho claro, ao centro) para organizar e proteger os fios, evitando que seu isolamento seja cortado por atrito nas bordas de metal da estrutura. O acionamento de todo o robô é feito por 2 packs de baterias de 24V de NiCd, ligados em paralelo. O sistema completo da eletrônica e baterias constitui cerca de 10% do peso do Touro.

A estrutura/armadura integrada do Touro, vista na figura ao lado, tem suas paredes feitas de alumínio aeronáutico 7050, revestidas por uma camada de tecido de kevlar e outra de titânio Ti-6Al-4V (ou de aço inox 304, na parte frontal do robô). As tampas do topo e do fundo são de alumínio 7075-T6, que é fácil de achar comercialmente na forma de chapas mais finas. Todas as paredes e tampas precisaram ser fresadas seletivamente (capítulo 8), para aliviar peso. Alguns suportes internos, cuja rigidez é importante (mas não a resistência), são feitos de alumínio 6063-T5. A maioria dos parafusos foi presa através de furos rosados feitos ao longo da espessura das placas, o que simplifica muito a montagem, sem a necessidade de porcas. Assim como no Titan, a estrutura/armadura ficou com respeitáveis 40% do peso do robô, acima dos 25% da regra. Conseguir chegar nestes 40% de estrutura/armadura sem comprometer demais a locomoção, arma e baterias não é uma tarefa simples. Isto foi o que mais chamou a atenção das equipes norteamericanas para o Touro no Robogames 2006, acostumadas a usar em média 25%, e o que permitiu a nossa sobrevivência na violenta luta contra o *spinner* The Mortician.

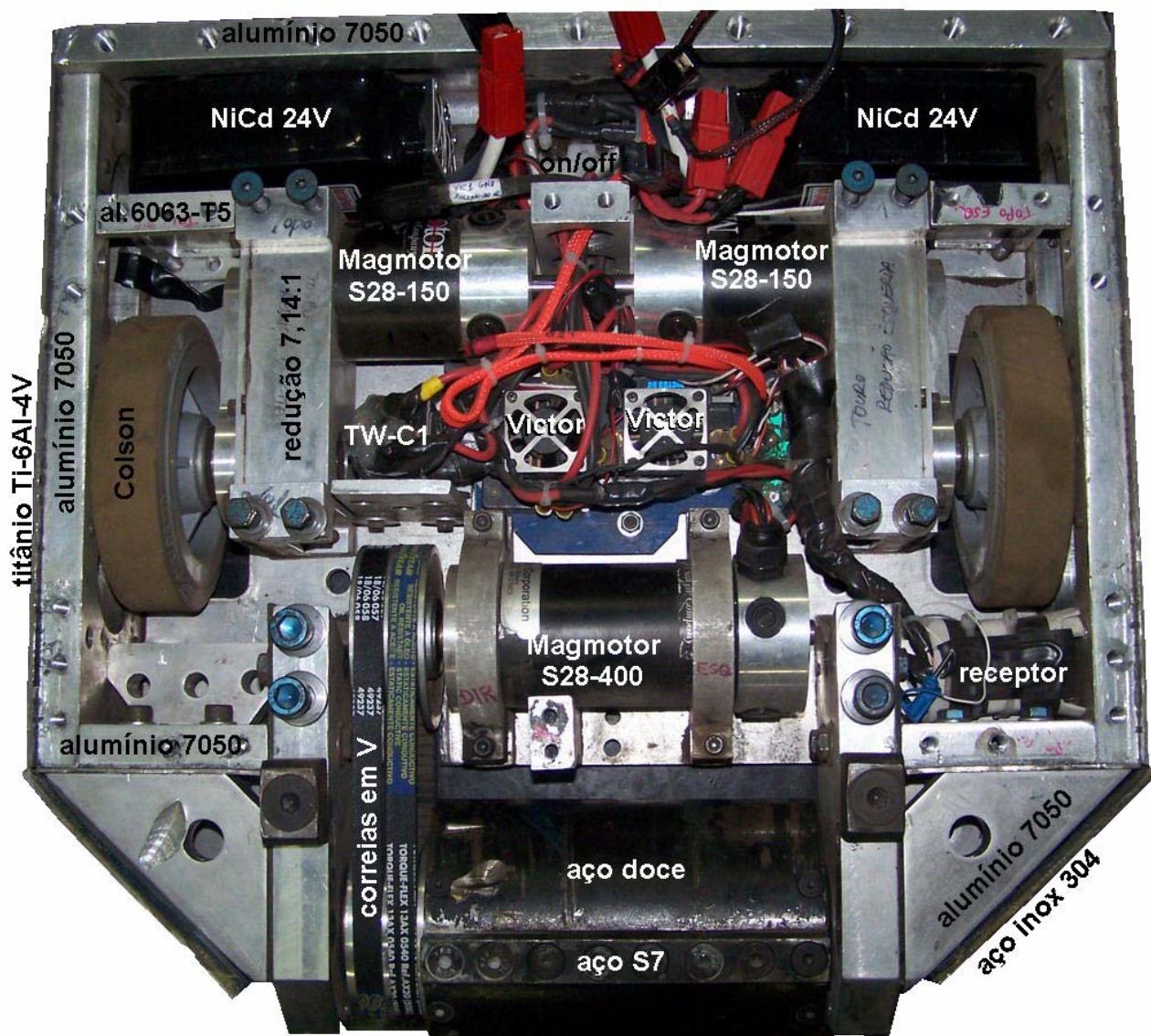
Após toda a experiência com o Touro, eu diria que para construir um bom *drum*, pode-se seguir uma pequena variação da regra, que seria 20-35-30-15: 20% do peso do robô no sistema de locomoção (um pouco mais que o Touro para permitir o uso de caixas de redução menos otimizadas), 35% nas armas (como já discutido), 30% na estrutura e armadura (ou um pouco mais, sendo um valor intermediário entre os 25% da regra original e os 40% do Touro), e 15% nas baterias e eletrônica (um pouco mais que os 10% do Touro para ter mais folga de energia além dos 3 minutos do round). Quanto a outros tipos de robôs, certamente outras regras mais específicas serão propostas ao longo do tempo, no entanto a regra original 30-30-25-15 é sempre um bom ponto de partida.

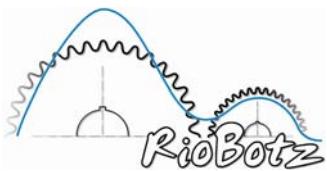
As fotos a seguir mostram uma anatomia detalhada do Touro, assim como sua participação no Robogames 2006.





## Touro





## Melhores momentos do Touro no Robogames 2006



testando a resistência das soldas do Wiz



infelizmente enfrentando o brasileiro Destroyer  
logo no início da competição



mandando o The Mortician de volta ao cemitério



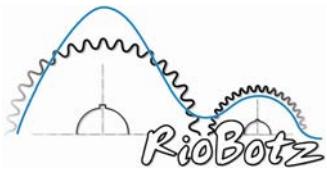
mostrando à Piranha2 que tamanho não é  
documento



transformando o Stewie em OVNI



brincando com o Ice Cube



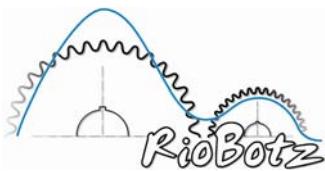
recém montado no hotel em São Francisco



reparos em um *pitstop*



ouro (Mini-Touro) e bronze (Touro) no Robogames 2006



## 9.8. Mini-Touro

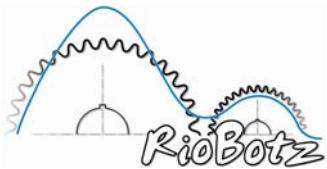
O Touro tem um pai. E ele pesa apenas 1,5kg. Essa foi a classe de peso (não-oficial) adotada na Guerra de Robôs que nossa equipe organizou entre 40 alunos do primeiro e segundo períodos da PUC-Rio, matriculados na matéria “Introdução à Engenharia” em 2005. Cada uma das 8 equipes formadas desenvolveu durante o semestre um robô de combate de 1,5kg controlado por rádio, usando perfis de alumínio, Lexan, componentes de brinquedos, e sucata. A competição reuniu o público em volta de uma pequena arena montada no pilotis do campus em novembro de 2005.

A RioBotz também desenvolveu um robô de 1,5kg, idealizado para fazer demonstrações no dia da competição, durante os intervalos entre os rounds. Nascia então, ao final de 2005, o *drum* de 1,5kg Tourinho (foto ao lado), feito de um perfil retangular de alumínio 6063-T5 com tampa de Lexan. O rádio-controle, eletrônica, bateria de NiCd e rodas foram todos adaptados de brinquedos. O eixo da arma é simplesmente um longo parafuso sextavado de classe 8.8, e seu tambor é um pedaço de sucata de cano com parafusos allen. O mesmo nome Tourinho foi usado depois no nosso *hobbyweight* desenvolvido em 2006.



O diferencial desse robô são os motores utilizados. Eles são motores DC especiais tipo *coreless* (ou *ironless*) da Faulhaber, cujo rotor não possui um núcleo de ferro. A integridade estrutural do rotor depende do próprio enrolamento, o que por enquanto só é viável em pequenos motores. Com isso, a armadura é oca, e é possível que os ímãs permanentes sejam montados por *dentro* do enrolamento do rotor (figura ao lado). Sem o núcleo de ferro, a indutância do motor é extremamente baixa, aumentando a vida das escovas e do comutador, e a inércia do rotor é tão reduzida que alguns modelos muito pequenos chegam a atingir acelerações de até 1 milhão de  $\text{rad/s}^2$  (sem carga no eixo, é claro). O consumo é muito baixo, sendo competitivo com motores *brushless*. Suas desvantagens são a tendência de super aquecimento, pois a ausência do núcleo de ferro dificulta a troca de calor, e o alto custo.

Felizmente, conseguimos esses motores sem custo para a equipe. Usados para acionar as rodas de um pequeno *rover* robótico em um projeto de pesquisa, esses motores iriam ser descartados pois

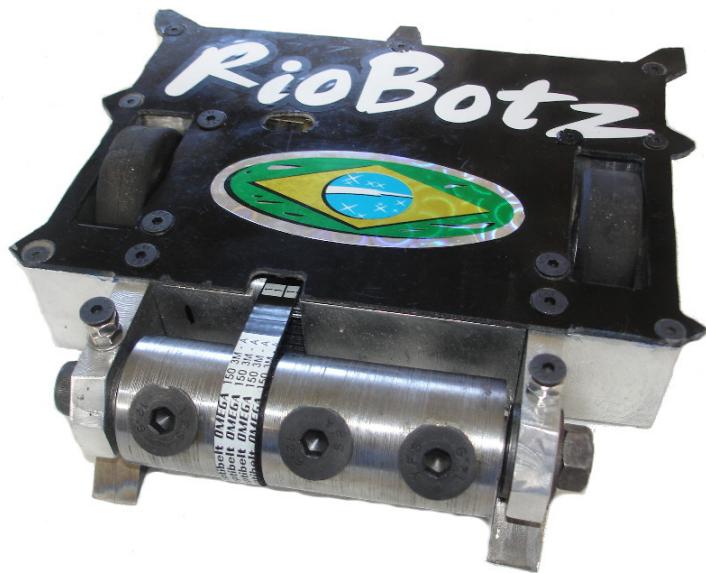


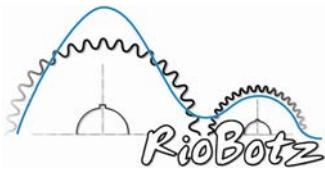
seus *encoders* haviam queimado, e seu conserto era mais caro que comprar um novo conjunto motor-*encoder*. Utilizamos então 2 deles para acionar as rodas do Tourinho de 1,5kg, e um terceiro para girar o tambor.

O robô foi um sucesso, e com as lições aprendidas nós pudemos desenvolver o Touro, usando os princípios de fator de escala descritos no capítulo 2. Com certeza foi muito mais barato e produtivo construir o nosso primeiro *drum* com apenas 1,5kg, aprender com ele, para em seguida enfrentar os custos e o desafio de criar uma versão *middleweight*.

Durante a construção do Touro, resolvemos gerar uma versão melhorada do seu pai de 1,5kg. Ao invés de perfis de 6063-T5, usamos um bloco sólido de alumínio aeronáutico 7050, que foi fresado gerando um *unibody* (capítulo 2), com uma tampa de garolite preta. Usinamos um tambor novo, e migramos para 2 packs de baterias de lítio-polímero de 11V cada, conectados em série para gerar 22V. Do Tourinho original, só aproveitamos os motores Faulhaber, para acionar as rodas e a arma. Com isso nasceu o *beetleweight* Mini-Touro (foto ao lado).

O Mini-Touro não se intimida ao enfrentar adversários bem maiores que ele, como foi o caso na final do Robogames 2006 contra o *spinner* Itsa (foto abaixo à esquerda). Mais tarde, o nosso convencido campeão foi visto dominando o *super-heavyweight* Ziggy.





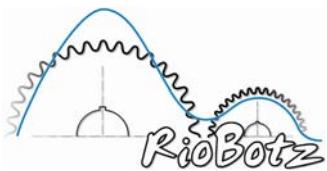
## 9.9. Tourinho e Puminha

Com o surgimento da classe *hobbyweight* no Winter Challenge 2006, resolvemos dar um irmão maior ao Mini-Touro. O Tourinho (vide a foto abaixo, no plano frontal à esquerda) é uma versão de 5,5kg do Touro, com paredes feitas de perfis de alumínio 6061-T6, tampa superior de Lexan, e tambor de um tubo de aço ST-52 torneado. O fundo do robô foi feito com uma sobra de alumínio aeronáutico 2024-T3, gentilmente doada pela equipe de Aerodesign da PUC-Rio. Dois motoredutores Buehler sucateados foram usados para acionar rodas Colson de 3" de diâmetro. O motor da arma é um DeWalt 18V, acionado por um relé automotivo de 40A. Uma bateria de NiCd de 16,8V foi obtida retirando-se a célula superior de um pack usado em furadeiras de 18V, para que ele ficasse com altura menor que 50mm e coubesse dentro do robô.



Para que o Tourinho tivesse um robô reserva no Winter Challenge 2006, construímos o nosso primeiro *wedge*, o Puminha (vide a foto acima, no plano frontal à direita). Quatro motoredutores Pittman, comprados usados, foram acoplados a rodas Colson de 3" de diâmetro, as mesmas do Tourinho. As paredes foram todas feitas de perfis de alumínio 6061-T6, e ambas as tampas do topo e fundo usaram Lexan. A rampa era uma sobra de titânio Ti-6Al-4V da armadura do Touro. Usamos a mesma bateria de NiCd de 16,8V que preparamos para o Tourinho.

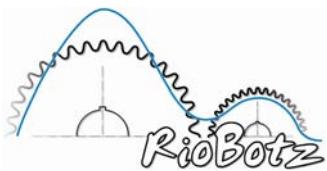
A foto acima ilustra o nosso time titular para as competições de 2006: ao fundo Titan, Touro e Ciclone, e no plano frontal Tourinho, Mini-Touro e Puminha.



## 10. Conclusões

Espero que este tutorial tenha sido útil para toda a nossa comunidade de guerra de robôs, assim como para outros construtores de robôs em geral. Um dos principais objetivos de eventos de estudantes como o ENECA é promover a troca de informações e o aprendizado, e foi com esse intuito que este texto foi criado. Todos os livros sobre robôs de combate estão em inglês, não é à toa que os Estados Unidos dominam esse esporte, seguidos do Reino Unido e do Canadá. Esse tutorial, em português, é um patrimônio de todas as equipes brasileiras, e portanto pode e deve ser divulgado e repassado livremente para todos que se interessarem por robôs. Peço apenas que o tutorial seja sempre repassado em sua íntegra e sem alterar seu conteúdo. Gostaria muito de receber críticas e sugestões para que o texto possa ser cada vez melhorado. Essa é apenas a versão 1.0, em função da receptividade da comunidade espero poder gerar outras versões mais aprofundadas e aprimoradas com as contribuições de vocês, que é claro serão reconhecidas nos agradecimentos. Espero que esse tutorial ou suas versões futuras possam ajudar o Brasil a ganhar internacionalmente, ao mesmo tempo, ouro, prata e bronze, fazendo com que as equipes estrangeiras nos temam, nos respeitem, e até queiram aprender português. Vamos conseguir. *Try not. Do, or do not. There is no try.*





## FAQ – Perguntas Freqüentes

As perguntas abaixo foram retiradas do Forum do [www.guerraderobos.com.br](http://www.guerraderobos.com.br).

### Fundamentos de Projeto

#### **Eu gostaria de saber o melhor jeito de construir um robô bem básico de guerra feito de Lego.**

Provavelmente, até por questão de custos, você só vai conseguir construir um *hobbyweight* ou mais leve. Você precisaria colar as peças com epóxi profissional (24h), fazendo uma montagem permanente, senão elas desmontariam ao primeiro impacto. Mesmo assim, o plástico não resistiria às armas de aço ferramenta e titânio que a maioria das equipes dos EUA usam. Quanto à eletrônica, seria preciso adaptar ao RCX do Mindstorms um sistema de rádio-controle. Se for usar motores diferentes e mais potentes que os do Lego, seria preciso uma eletrônica de potência para amplificar as saídas do RCX. Existe um kit chamado Vex, usado na competição FIRST, que é similar ao Lego, mas suas peças são de metal e parafusadas, e ele já vem com rádio e receptor. Mas, por exemplo, suas rodas e engrenagens são de plástico, o que poderia ser um ponto fraco.

#### **Como eu posso fazer uma esteira para locomoção do tipo de tanque de guerra?**

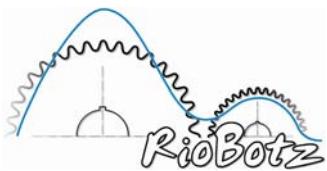
Existem dois tipos de esteira: as usadas em brinquedos (feitas de borracha) e as usadas em tanques de guerra (feitas de metal). Elas são completamente diferentes. Não use as de brinquedos, elas saem facilmente, e a esteira de borracha esticaria completamente ao aplicar torques altos. As de tanques de guerra não são de borracha, elas são compostas de muitas placas, todas metálicas, articuladas entre si. É necessário muita usinagem para construí-las. Elas saem muito caro, e mesmo assim um *spinner* poderia arrancá-las sem muita dificuldade. O melhor é usar rodas. Se quiser mais tração, use 6 rodas, com tração em todas elas, usando um sistema de polias ou coroas, ou então acionadas por 6 motores. Você terá ótima tração e ainda por cima redundância.

#### **Sendo o chassi um pneu, isso traz alguma vantagem?**

O pneu cria uma boa proteção contra *spinners*, funcionando como um amortecedor. Os outros tipos de robôs continuam perigosos contra um pneu, e os *wedges* costumam ter mais facilidade em entrar por baixo. Os *vertical spinners* e *drums* chegam até a levar vantagem, pois suas armas agarram melhor na borracha para arremessar o robô-pneu para o alto. Por segurança, tente colocar alguma proteção entre o pneu e o interior do robô, para se proteger de armas perfurantes.

#### **Qual é o peso máximo de uma arma que se pode colocar em um robô sem deixar ele lento?**

Siga a regra 30-30-25-15, que está no capítulo 2. O peso total da arma, incluindo seu motor e acessórios, não deve ficar muito acima nem muito abaixo que 30% do peso do robô. Não é uma regra exata pois depende do tipo de robô (por exemplo, 35% é um bom valor para *drums*), mas com certeza 10% do peso seria muito pouco, e 50% seria demais.



### **Existe alguma limitação para o número de armas que seu robô vai ter?**

Não, mas provavelmente é melhor ficar com apenas uma, costuma ser mais eficiente. A não ser que as armas funcionem em conjunto sobre o adversário, ao mesmo tempo, como foi discutido no capítulo 2.

### **Queria saber se já foi construído um robô com $2m \times 2m \times 2m$ ou perto disso.**

Nenhum *middleweight* chegaria nesse tamanho, ele seria muito frágil. Um cubo oco de alumínio com essas dimensões e apenas 1mm de espessura de parede teria 67kg! E isso sem nada dentro dele. Os robôs precisam ser compactos para que suas paredes possam ser mais grossas.

### **Qual o melhor *software* para desenhos dos robôs?**

Os mais usados nos EUA em robôs de combate são o Solidworks e o Rhyno3D. A modelagem 3D desses programas é mais fácil de usar do que no Autocad.

## **Motores e Transmissões**

### **Desejo saber como as outras equipes conseguem robôs tão rápidos com motores tão pequenos.**

### **Que motor vocês aconselham para movimentar meu robô?**

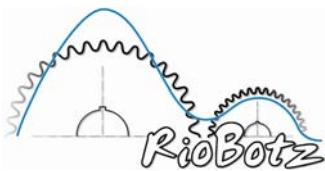
Fique de olho nos indicadores principais do desempenho do motor: a razão entre a potência máxima e o peso próprio é uma delas, e a razão entre  $I_{stall}$  e  $I_{no\_load}$  é outra, e compare com os motores do capítulo 5. Dependendo do motor, é possível dobrar sua tensão, e a potência será multiplicada por 4. Mas ele esquentará muito, só use em rounds de até 3 minutos, e cuidado para a eletrônica não queimar (principalmente se o motor travar durante um round), pois a corrente será também dobrada. O motor Magmotor não deve ter sua tensão dobrada para 48V, ele é uma exceção, use no máximo 36V, e mesmo assim limitando a corrente. Faça testes, e tenha pelo menos um motor reserva.

### **Alguém conhece um artifício mecânico para aumentar a potência oferecida por um motor?**

Não há como, a lei de conservação de energia não deixa você fazer isso. Você pode alinhar ou lubrificar bem o seu sistema de transmissão para diminuir os atritos, e assim diminuir as perdas de potência. Mas criar potência não dá. Você teria que, por exemplo, dobrar a tensão elétrica no motor, nesse caso sua potência multiplicaria por quatro (assim como o consumo da bateria).

### **Um motor da Bosch é bi-direcional, mas no datasheet dele está só R.**

Todos os motores DC de ímã permanente funcionam nos 2 sentidos sem problemas, basta inverter a alimentação nos terminais. O que acontece é que existe o avanço de fase, onde os ímãs permanentes da carcaça ficam defasados em relação às escovas, girando mais rápido em um sentido do que em outro (vide o capítulo 5). Em alguns casos, a diferença de velocidades é tão grande que o fabricante recomenda que se use em apenas 1 sentido. Dá pra usar no outro, mas ficará bem mais lento.



## Como teria de fazer para que uma arma tipo barra de aço igual à do Ciclone, Titan, gire em uma velocidade muito alta?

Você precisa de um motor potente, acionado de preferência por baterias de NiCd. A energia armazenada depende da barra, mas velocidades típicas para *spinners* de classe *middleweight* ficam acima de 1000RPM. O Ciclone gira a cerca de 1100RPM, e o Titan a quase 3000RPM (o que já é um exagero).

## Que motor posso usar pra locomoção de um *hobbyweight*?

Os motoredutores da Pittman e da Buehler são bons e podem ser comprados usados. Veja o capítulo 5. Motores de furadeira também são ótima escolha, principalmente para a arma. Desmonte uma furadeira de 18V e aproveite o motor, redução, bateria e carregador.

## Um servo de torque de 4kg×cm tem força para quê?

Ele consegue suportar, por exemplo, uma massa de 4kg fazendo um braço de alavanca de 1cm, ou uma de 2kg com um braço de 2cm.

## Eu estava querendo saber como usar um motor de passo.

Um motor de passo é parecido com um DC, exceto que a comutação é feita eletronicamente. Ele é muito usado em controle de posição, pois dispensa o uso de sensores de posição, mas não tanto em controle de velocidade, que é o que você precisa em combate. Seu torque e potência são relativamente baixos se comparados com os de um motor DC de mesmo peso. A maioria das eletrônicas de acionamento de motores de passo existentes no mercado não toleram correntes muito altas, você precisaria desenvolver a sua, e garantir que o motor suportaria essa maior potência. Quase todos os motores elétricos usados em combate são DC ou *brushless*.

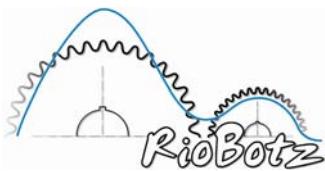
## Alguém pode me enviar um esquema/desenho de como construir um braço elevatório para a classe *hobbyweight*, mas usando um motor elétrico?

Para construir um *lifter* elétrico, você precisa de um sistema pinhão-cremalheira, para transformar rotação em movimento linear. Alguns motoredutores pequenos incluem um sistema de parafuso sem fim que aciona um cursor, transladando-o, que pode ser aproveitado. Há também a solução do mecanismo de 4 barras, usado no robô BioHazard, faça uma busca na internet em “*four-bar*” mechanism ou *linkage*.

## Eletrônica

### Com os relés que estou usando os motores só andam em um sentido.

Use uma ponte H. Ela pode ser implementada, para cada motor, com 4 relés de contatos simples ou com 2 relés de contatos duplos. O esquema está no capítulo 6. Tente implementar PWM (capítulo 6), será mais fácil de dirigir o robô e você poupará os motores e eletrônica dos “trancos”.



**Como vocês fazem para comandar um motor de 12V se a saída do receptor é menor?**

Você precisa de uma placa de sinal e de um controlador de velocidade, veja o capítulo 6.

**Estou usando dois motores GPBs para a locomoção do robô que estou fazendo, e gostaria de saber se eu preciso de um controlador de velocidade pra cada motor.**

Sim, é a única forma de fazer direção tipo tanque, veja o capítulo 2.

**Tenho muitas dúvidas a respeito de controladores de velocidade, qual o melhor?**

O capítulo 6 descreve o OSMC e os Victors, são provavelmente os de melhor custo-benefício. Mas é interessante você conhecer mais a fundo seu funcionamento, ou tentar fazer a sua própria placa, para aprender.

**O controlador Victor freia o motor?**

O Victor tem um *jumper* para escolher entre *coast* (sem freiar) ou *brake* (freiar). No *brake*, o Victor coloca os terminais do motor em curto transformando-o em gerador, o que o freia dissipando energia em sua resistência interna em forma de calor.

**A cola-quente afeta as placas RC, conduzindo eletricidade ou queimando-a?**

Não, e ela é uma boa proteção contra curtos ou fios se soltando.

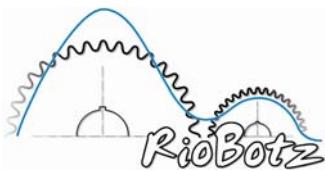
## **Baterias**

**Qual seria a combinação perfeita e barata para baterias que suportem motores potentes? Que tipo de baterias devo usar?**

A melhor solução é usar baterias de NiCd. A solução barata é usar de chumbo-ácido (AGM ou gel). Você pode conseguir altas correntes das baterias de chumbo, mas para que elas durem todo o round dessa forma você precisará de muitos A·h, acrescentando muito peso ao robô. Infelizmente não existe potente, barato e leve ao mesmo tempo, você tem que escolher dois deles: potente e barato (as de chumbo com alto A·h), leve e barato (chumbo com baixo A·h), ou potente e leve (as de NiCd ou NiMH).

**Em algumas fichas técnicas de baterias está escrito “alta taxa de descarga: até 3C”, o que é esse tal “C” na frente do numeral?**

Esse 3C quer dizer que ela tolera sem problemas uma corrente de 3 vezes a sua capacidade (C, daí o nome 3C) medida em A·h, como explicado no capítulo 7. Se sua bateria tem 3,6A·h, então ela tolera  $3 \times 3,6 = 10,8$ A. Isso é o mesmo que dizer que ela pode ser descarregada em 1/3 de hora (pois  $10,8\text{A} \times 1/3 \text{ h} = 3,6\text{A}\cdot\text{h}$ ). Mas os rounds não duram 20 minutos (1/3 h), eles duram 3, portanto alta taxa de descarga para combate seria pelo menos 8C, um valor que existe para NiCd. Isso significa que ela poderia descarregar sem esquentar muito em  $1/8 \text{ h} = 7,5$  minutos, o que na prática já dá pra



descarregar em 3 minutos com ela esquentando de forma tolerável. O ideal seria pelo menos 20C, descarregando em 1/20 horas = 3 minutos, mas por enquanto só as de lítio (as melhores e mais caras) conseguem isso.

### **Por que os carregadores de algumas baterias como NiMH, NiCd, são tão caros?**

Pois eles precisam de um sistema eletrônico “inteligente” para saber se os packs acabaram de carregar, além de uma eletrônica de potência refrigerada para poderem carregá-los rapidamente com maiores correntes.

### **É possível soldar baterias diretamente no terminal?**

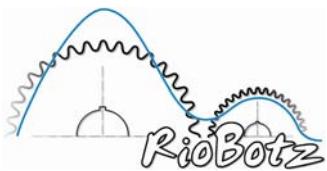
Sim, veja o capítulo 7. Mas cuidado para não super-aquecer as células, é preciso soldar rapidamente e com calor muito *localizado*.

### **Uma bateria 12V de carro de 45A·h segura quanto tempo mais ou menos um robô? É verdade que não pode usar baterias de chumbo-ácido?**

Para ela descarregar totalmente em um round de 3 minutos (1/20 horas), considerando que o *de-rating factor* (vide capítulo 7) das de chumbo-ácido nesse tempo é cerca de 0,28 e portanto sua capacidade real é  $0,28 \times 45 = 12,6\text{A}\cdot\text{h}$ , seus motores teriam que solicitar  $12,6\text{A}\cdot\text{h} / (1/20)\text{h} = 252\text{A}$  continuamente. Isso é muita corrente para um *middleweight* usar continuamente. Use uma bateria com menos capacidade. As baterias de chumbo-ácido de carro, que derramam, são proibidas, elas precisam ter o eletrólito imobilizado, como as de gel ou AGM.

### **Sou iniciante, preciso de apostilas passo a passo, conselhos para o material e as ferramentas a serem utilizadas. Alguém poderia me fazer um tutorial de como construir um robô?**

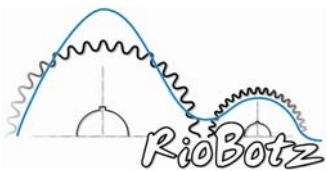
Aqui está! Espero que esse tutorial tenha ajudado.



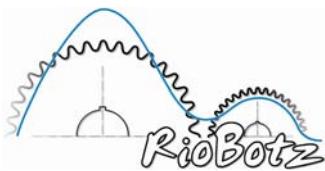
## Bibliografia

Todos os livros abaixo são recomendados para o projeto de robôs de combate. Muitas das informações neste tutorial foram retiradas deles.

	<b>Art of Electronics, The</b> – Horowitz, P., Hill, W., 1125 páginas, ed. Cambridge University Press, 1989 – esse é um dos livros mais completos sobre eletrônica em geral, com didática excelente.
	<b>BattleBots, The Official Guide</b> – Clarkson, M., 272 páginas, ed. McGraw-Hill, 2002 – guia informativo apresentando de forma ilustrada os robôs mais famosos da liga BattleBots e seus construtores, na forma de um almanaque. As fotos são muito interessantes. Há algumas dicas de construção mas muito rudimentares.
	<b>Build Your Own Combat Robot</b> – Miles, P., Carroll, T., 416 páginas, ed. McGraw-Hill, 2002 – excelente guia de construção de robôs, em especial com bons capítulos sobre baterias e sobre as principais dicas para o projeto da maioria dos tipos de robôs. Aborda até tópicos especiais como robôs autônomos e sumô de robôs.
	<b>Building Bots: Designing and Building Warrior Robots</b> – Gurstelle, W., 256 páginas, ed. Chicago Review Press, 2002 – livro bem básico sobre projeto de robôs de combate, voltado ao ensino médio, com boas seções sobre materiais, rádios e motores à combustão. O livro apresenta muitas equações de física do ensino médio para exemplificar os conceitos, tornando-o muito educativo. Ele inclui também dicas básicas de como organizar um evento.
	<b>Combat Robots Complete: Everything You Need to Build, Compete, and Win</b> – Hannold, C., 311 páginas, ed. McGraw-Hill/TAB Electronics, 2002 – aborda muitos assuntos em projeto de robôs, porém com pouca profundidade (há 22 capítulos, mas alguns com apenas 3 páginas). Inclui apêndices muito bons, e ensina passo a passo a construção de 3 robôs: um <i>antweight</i> , um <i>featherweight</i> , e um <i>heavyweight</i> .



	<p><b>Combat Robot Weapons</b> – Hannold, C., 288 páginas, ed. McGraw-Hill/TAB Electronics, 2003 – continuação do livro Combat Robots Complete, foca nos principais tipos de armas e como projetá-las. Ele também sugere estratégias de como lutar com ou contra robôs com cada tipo de arma. Por ser mais específico, esse livro consegue ir mais a fundo do que o anterior do mesmo autor.</p>
	<p><b>Electric Motors and their Controls: An Introduction</b> – Kenjo, T., 192 páginas, ed. Oxford University Press, 1991 – excelente livro introdutório sobre motores elétricos, apresenta de forma simples e didática o princípio de funcionamento de todos os tipos existentes, e como controlá-los.</p>
	<p><b>Fadiga Sob Cargas Reais de Serviço</b> – Castro, J.T.P., Meggiolaro, M.A., 1200 páginas, PUC-Rio (em fase de publicação), 2007 – aborda em profundidade o comportamento mecânico dos materiais, apresentando os principais tipos de materiais usados em engenharia, suas propriedades, como selecioná-los em projeto, e seus mecanismos de falha como fadiga, fratura, escoamento, colapso plástico, fluência e corrosão, dentre outros. Todo o capítulo 3, apêndice, e partes do capítulo 4 desse tutorial foram retirados desse livro.</p>
	<p><b>Gearheads: The Turbulent Rise of Robotic Sports</b> – Stone, B., 304 páginas, ed. Simon &amp; Schuster, 2003 – livro informativo contando toda a história dos combates de robôs, desde os seus primórdios.</p>
	<p><b>Kickin' Bot: An Illustrated Guide to Building Combat Robots</b> – Imahara, G., 528 páginas, ed. Wiley, 2003 – outro excelente guia de construção, aborda a fundo muitos assuntos desde a concepção até a competição. Possui ótimas seções sobre ferramentas em geral e como usá-las eficientemente.</p>
	<p><b>Robot Wars: Technical Manual</b> – Baker, A., 144 páginas, ed. Boxtree, 1998 – apesar do título, o livro é muito mais um almanaque ilustrado sobre os robôs da liga Robot Wars do que propriamente um texto técnico sobre construção de robôs. As fotos são muito interessantes, e mostram o sucesso que o combate de robôs atingiu no Reino Unido.</p>



# Apêndice:

## Revisão de Análise de Tensões

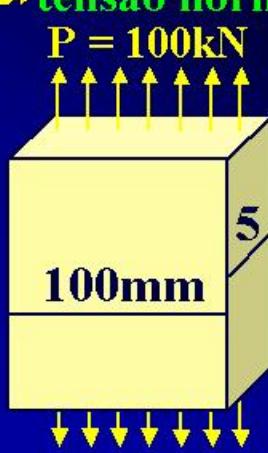
Extraído do livro:  
**FADIGA SOB CARGAS  
REIAIS DE SERVIÇO**  
©Jaime Tupiassú Pinho de Castro  
Marco Antonio Meggiolaro  
Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio



### Tensões

- mesma unidade de pressão, mas tensões podem ser trativas ou compressivas
- $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ,  $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$
- pressão atmosférica:  $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa}$  (quase 10 toneladas para cada metro quadrado!)

#### → tensão normal:



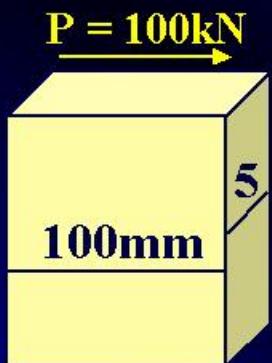
$$P = 100\text{kN} \quad \sigma = \frac{100000\text{N}}{100\text{mm} \times 5\text{mm}} = 200\text{N/mm}^2 = 200\text{MPa}$$

→ se a placa for feita de aço 1020, que escoa (plastifica) após  $S_E = 285\text{MPa}$ , calcule a carga máxima p/ não escoar:

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{100\text{mm} \times 5\text{mm}} = 285\text{MPa} \Rightarrow P_{\max} = 14250\text{N}$$



► **tensão cisalhante:**

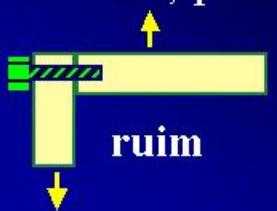


$$\tau = \frac{100000\text{N}}{100\text{mm} \times 5\text{mm}} = 200\text{N/mm}^2 = 200\text{MPa}$$

► porém para a placa escoar basta que  $\tau$  seja maior que **metade** de  $S_E$ , assim para o aço 1020 ( $S_E = 285\text{MPa}$ ), a carga máxima p/ não escoar é apenas:

$$\tau = \frac{P_{\max}}{100\text{mm} \times 5\text{mm}} = \frac{285\text{MPa}}{2} \Rightarrow P_{\max} = 71250\text{N}$$

► conclusão: evite trabalhar com parafusos sob cisalhamento, pois terão metade da resistência!



## Análise de Tensões

- considera-se nesta **análise** das **tensões** que o material da peça é sempre **linear**, **elástico**, **isotrópico** e **homogêneo**
- logo, assume que as tensões e deformações em qualquer ponto da peça seguem lei de **Hooke** que, na notação de engenharia, pode ser dada por:

- **E** é o módulo de elasticidade à tração e **G** o módulo elástico ao cisalhamento
- $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$  são as deformações e  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  as tensões normais
- $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{xz}$ ,  $\gamma_{yz}$  são as deformações e  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$  as tensões cisalhantes
- **v** é o coeficiente de Poisson (*aços*: **v** = 0.29; *Al*: **v** = 0.33)

$$\begin{cases} E\epsilon_x = \sigma_x - v(\sigma_y + \sigma_z) \\ E\epsilon_y = \sigma_y - v(\sigma_z + \sigma_x) \\ E\epsilon_z = \sigma_z - v(\sigma_x + \sigma_y) \\ G\gamma_{xy} = \tau_{xy} \\ G\gamma_{xz} = \tau_{xz} \\ G\gamma_{yz} = \tau_{yz} \end{cases}$$

## Tensões Principais

- $\sigma_1, \sigma_2$  e  $\sigma_3$  são as **tensões principais**, obtidas nas direções em que a tensão cisalhante é nula
- dados  $\sigma_x, \sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  em um plano **xy** qualquer, obtemos

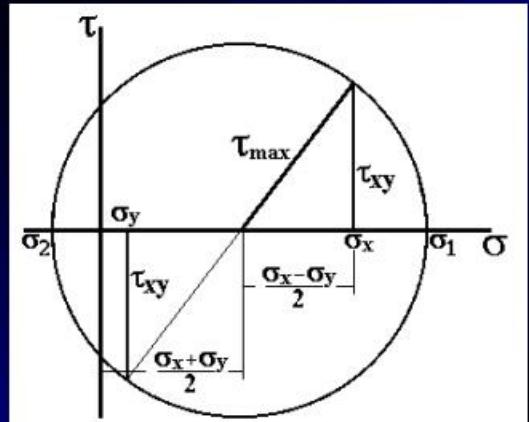
$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

- se  $\tau_{xy} = 0$ , então

$$\sigma_1 = \sigma_x, \quad \sigma_2 = \sigma_y$$

- e se  $\sigma_y = 0$ ,

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2}}{2}$$



## Tensões de Tresca e Mises

- as tensões de **Tresca** e **Mises** são:

$$\sigma_{\text{Tresca}} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (\sigma_1, \sigma_2 \text{ e } \sigma_3 \text{ são as tensões principais})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Mises}} &= \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]/2} = \\ &= \sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]/2} \end{aligned}$$

- no **caso plano** (com componentes  $\sigma_x, \sigma_y$  e  $\tau_{xy}$ ):

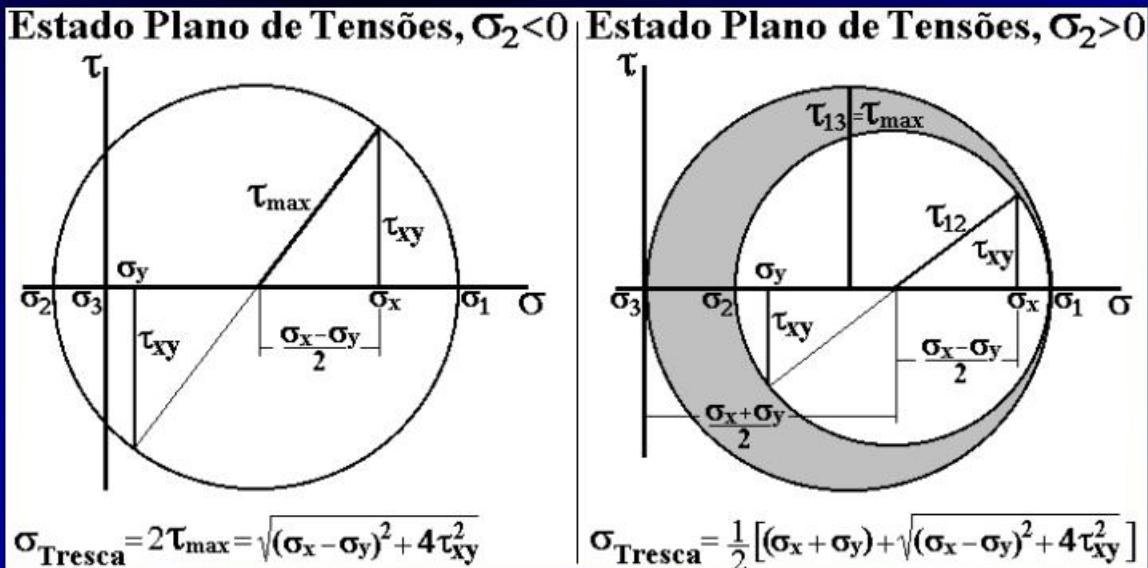
$$\sigma_{\text{Tresca}} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad \text{se } \sigma_2 < 0, \quad \text{ou}$$

$$\sigma_{\text{Tresca}} = [\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}] / 2 \quad \text{se } \sigma_2 > 0$$

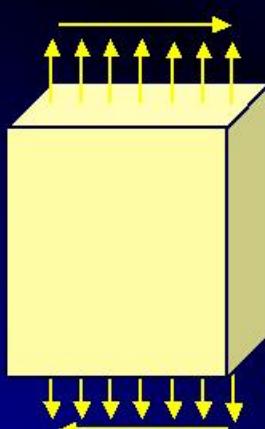
$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$



**muito cuidado** com o **sinal** de  $\sigma_2$  ao calcular a tensão de Tresca no caso de **tensões planas** (onde  $\sigma_3 = 0$ ): **se**  $\sigma_2 > 0$ ,  $\tau_{\max}$  **atuará no plano 1-3 e não no plano 1-2**, como ilustrado pelos círculos de Mohr abaixo



### ► combinação de tensões:



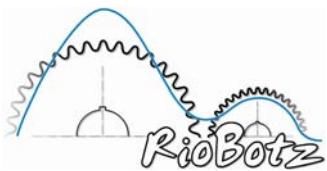
$$\tau = \frac{100000\text{N}}{100\text{mm} \times 5\text{mm}} = 200\text{N/mm}^2 = 200\text{MPa}$$

- tensões normais e cisalhantes não podem ser somadas diretamente: deve-se usar uma tensão equivalente
- segundo Tresca, a placa ao lado vai escoar quando

$$\sigma_{Tresca} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = S_E$$

► **nota**: escoamento só inutiliza uma peça se ela não puder empenar (como eixos); a carroceria de um carro é toda escoada devido à estampagem, mas ela é funcional

► o problema são as cargas cíclicas, que podem causar **fadiga** (o surgimento de **trincas** ou fissuras)



## Tração

► em uma viga de seção reta uniforme, temos:



$$\sigma_x = \frac{P}{A}$$

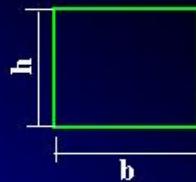
► seção reta circular:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad \sigma_x = \frac{4P}{\pi d^2}$$



► seção reta retangular:

$$A = bh \quad \sigma_x = \frac{P}{bh}$$



## Torção

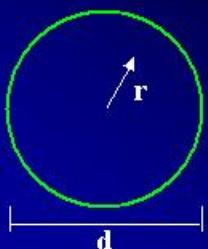
► em uma viga de seção reta uniforme, temos:  $T$



$$\tau_{xy} = \frac{T \cdot r}{I_z}$$

$$\text{o ângulo de torção } \phi(z) \text{ é: } \frac{d\phi}{dz} = \frac{T}{G \cdot I_z} \Rightarrow \phi(L) = \frac{TL}{GI_z}$$

► seção reta circular:



$$I_z = \frac{\pi \cdot d^4}{32} \quad \text{em } r = d/2$$

$$\tau_{xy\max} = \frac{T \cdot d/2}{\pi \cdot d^4 / 32} = \frac{16T}{\pi d^3}$$

► **torção** em viga com seção reta oca de **paredes finas**:



a tensão cisalhante na parede é aproximadamente:

$$\tau = \frac{T}{2 \cdot A \cdot t}$$

## Flexão

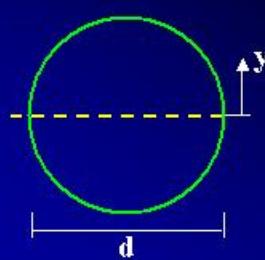
► em uma viga de seção reta uniforme, temos:



$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{I_{zz}} \quad \text{e, neste caso, no engaste: } M = P \cdot L$$

a deflexão  $w(x)$  é calculada por:  $\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M}{E \cdot I_{zz}}$

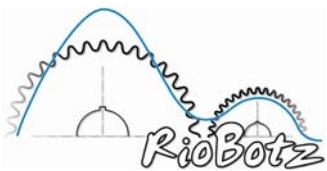
► seção reta circular:



$$I_{zz} = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$$

$$\sigma_{x_{\max}} = \frac{P \cdot L \cdot d / 2}{\pi \cdot d^4 / 64} = \frac{32 P L}{\pi d^3}$$

em  $y = d/2$



► seção reta retangular:

$$I_{zz} = \int_{-h/2}^{h/2} y^2 \cdot b \cdot dy = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$\sigma_{x_{\max}} = \frac{P \cdot L \cdot h/2}{b \cdot h^3 / 12} = \frac{6PL}{bh^2}$$

em  $y = h/2$

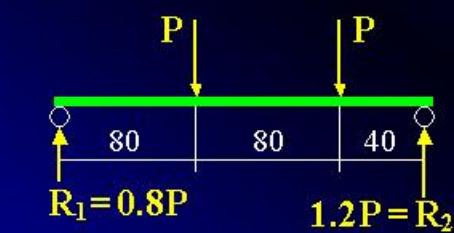
esforço cortante:  $\tau_{xy}(y) = \frac{P}{2I_{zz}} \left[ \left(\frac{h}{2}\right)^2 - y^2 \right]$

$$\tau_{xy_{\max}} = \frac{P}{2b \cdot h^3 / 12} \left( \frac{h}{2} \right)^2 = \frac{3P}{2bh}$$

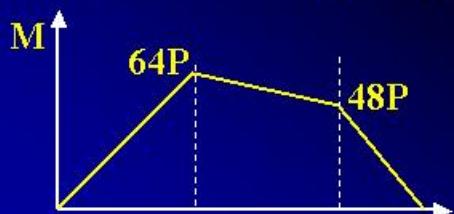
na linha neutra

e na seção circular:  $\tau_{xy_{\max}} = \frac{16P}{3\pi d^2}$

► ex.1: ache a maior tensão na viga bi-apoiada esquematizada abaixo com seção retangular de base **b = 20**, altura **h = 10**, comprimento **L = 200** (cotas em **mm**), quando submetida a duas cargas **P = 1kN**, uma a **80** e outra a **160mm** do apoio esquerdo



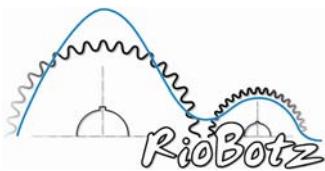
► pelo diagrama de momento fletor abaixo, o momento e a tensão máximos ocorrem na seção abaixo da carga a **80mm** da esquerda:



$$M = 80R_1 = 64P \text{ e}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{6M}{bh^2} = \frac{6 \cdot 64mm \cdot 1000N}{20mm \cdot (10mm)^2}$$

$$\sigma_{\max} = 192N/mm^2 = 192MPa \quad \checkmark$$



⇒ ex.2: calcule a tensão de **Tresca** no ponto crítico de um eixo circular de diâmetro **d**, sob **fletor M** e **torçor T**



na seção do engaste:

$$\text{a flexão causa no ponto superior da seção: } \sigma = \frac{32M}{\pi d^3}$$

$$\text{a torção causa na periferia da seção: } \tau = \frac{16T}{\pi d^3}$$

logo, por **Mises**:

$$\sigma_{\text{Tresca}} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$$

$$\sigma_{\text{Tresca}} = \sqrt{\left(\frac{32M}{\pi d^3}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2} \quad \checkmark$$

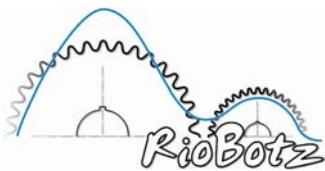
⇒ o problema é **linear elástico**, logo **vale** a **superposição**

## Concentração de Tensões

⇒ segundo o princípio de **S. Vénant**, as fórmulas clássicas da análise tradicional de tensões (ou da **resistência dos materiais**) só são válidas nas regiões da peça que fiquem **longe** das transições bruscas de geometria e dos pontos de aplicação das cargas concentradas

⇒ e.g., a fórmula  $\sigma = M \cdot y / I$ , usada para calcular as **tensões lineares elásticas** induzidas pelo fletor **M** no ponto que dista **y** do eixo neutro numa viga de momento de inércia **I**, só é válida nos trechos onde a seção reta permaneça **uniforme**

⇒ logo, as fórmulas clássicas só servem para se calcular as chamadas **tensões nominais**  $\sigma_n$ , as quais **desprezam** os **efeitos localizados** nas transições geométricas

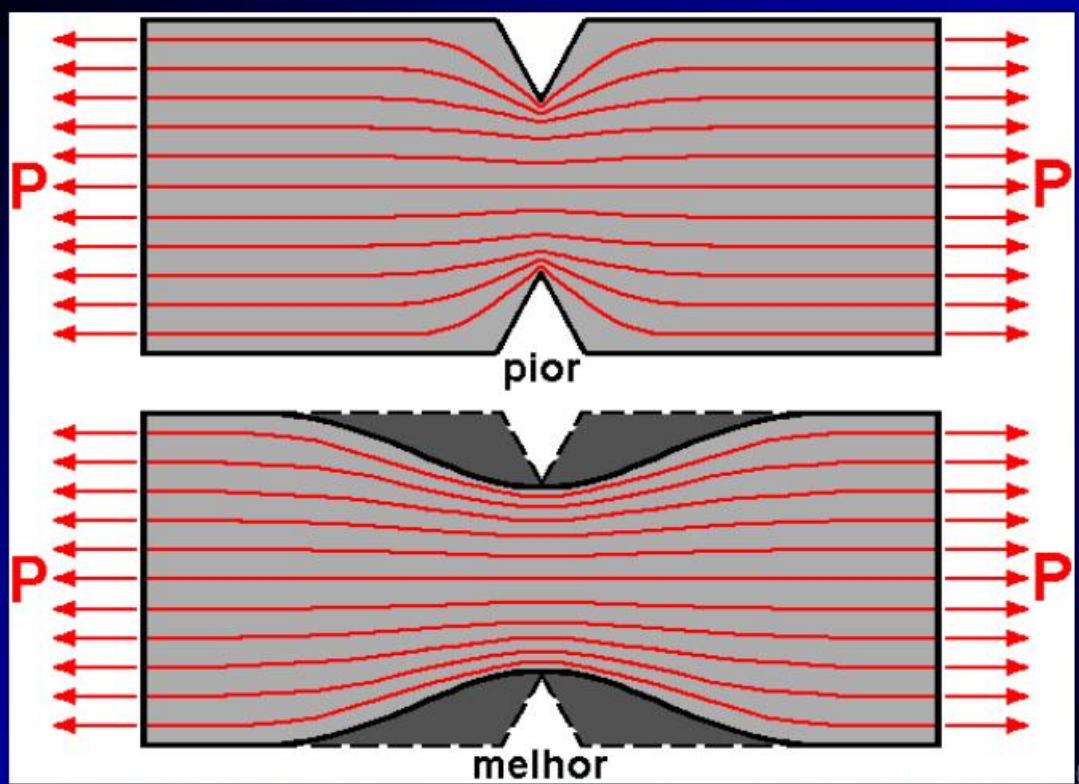


- ➡ mas a maioria das peças reais têm **entalhes** (como furos, rasgos, ombros ou outros detalhes geométricos similares, onde a seção varia de forma brusca), que são em geral indispensáveis para a fixação e/ou a operação da peça
- ➡ e estes entalhes **concentram** (**aumentam**) localmente as tensões nominais que atuam na peça
- ➡ o **fator de concentração de tensões**  $K_t$  é definido pela razão entre a máxima tensão que atua numa dada seção (entalhada)  $\sigma_{max}$  e a tensão nominal  $\sigma_n$  que atuaria naquela seção se o entalhe nela não causasse qualquer efeito:
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$$
- ➡ na modelagem dos problemas de **fadiga** (e também nos de **fratura** de peças **frágeis**), o efeito dos entalhes é de primordial importância e o uso dos  $K_t$ s é **indispensável**

## Linhas de Força

- ➡ as **linhas de força** indicam **qualitativamente** o **fluxo** dos **esforços** através de uma dada estrutura (i.e., como todas as cargas se distribuem ao atravessá-la)
  - ⌚ pode-se pensar nas **linhas de força** como sendo elásticos ou fios esticados sob **força constante**, **ligando** os pontos de **aplicação** das **cargas** na estrutura
- ➡ todos os **esforços que entram têm que sair** da estrutura
  - ⌚ a soma dos esforços (forças e momentos) que entram em qualquer estrutura em equilíbrio tem que ser zero (senão ela aceleraria)
  - ⌚ desta forma os **esforços** são **análogos** à **corrente elétrica**: ambos **se conservam** ao fluir através das estruturas que os contém
- ➡ logo, as **linhas de força não podem ser cortadas** pelos **entalhes**, elas **têm que contorná-los**

- assim, como as linhas de força são os caminhos de força constante que ligam os pontos de aplicação da carga, as **tensões** são proporcionais ao número de **linhas de força por unidade de área** e, portanto, quanto **mais próximas** as linhas de força, **maior** o  $K_t$
- pode-se também pensar nas **linhas de força** como sendo **análogas** ao **fluxo** de um **líquido** num duto e, da mesma forma que linhas de corrente são suavizadas eliminando as variações bruscas no diâmetro da tubulação, pode-se **diminuir** o  $K_t$  numa estrutura **retirando** os seus **cantos vivos**
  - ⦿ desta forma, a regra básica para se **diminuir** os efeitos de  $K_t$  em **qualquer** peça é **suavizar** o fluxo dos esforços que a atravessam, **retirando** material se necessário
- os **cantos vivos** devem ser sempre **evitados** no projeto estrutural

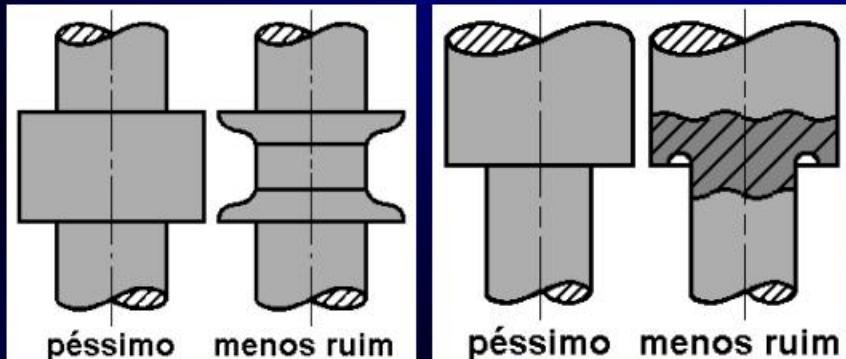


► o **fluxo** das linhas de força deve ser **suavizado**

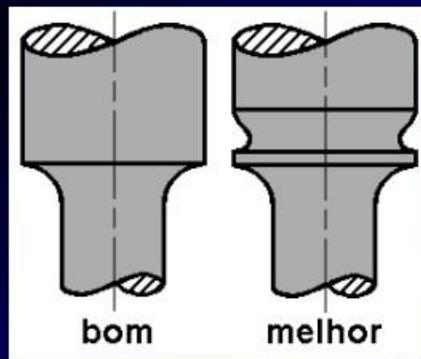
► cantos vivos têm  $K_t$  grande e devem sempre ser evitados



arredonde os  
cantos vivos!



► todas as peças à direita das figuras ilustram como alterando um pouco sua geometria, até mesmo pela **remoção** criteriosa de material, pode-se obter uma melhor distribuição das linhas de força, logo um  $K_t$  menor

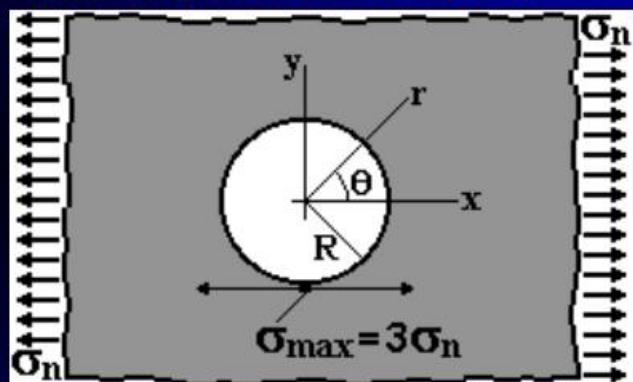


## Valores Numéricos para $K_t$

► a primeira solução **analítica** de um  $K_t$  (Kirsh, 1898) foi a do **furo circular** numa **placa infinita tracionada**:

► como (neste caso)  $\sigma_{\theta_{\max}}/\sigma_n = K_t = 3$ , pode-se concluir que **não se pode ignorar** o efeito dos  $K_t$ s!

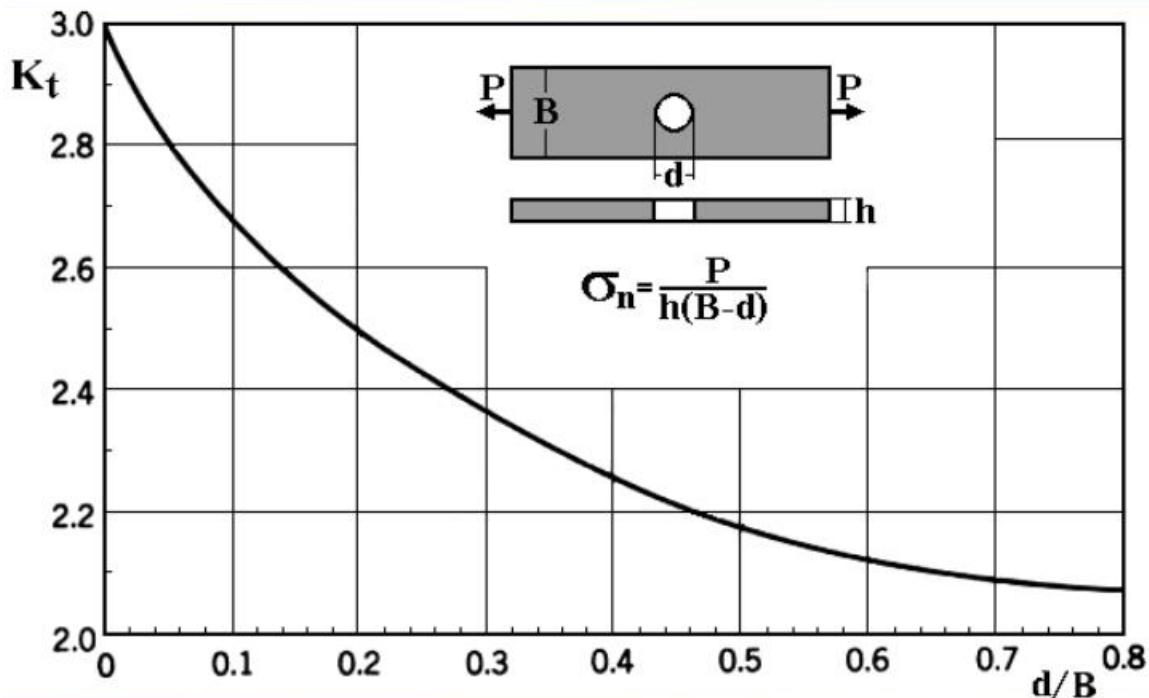
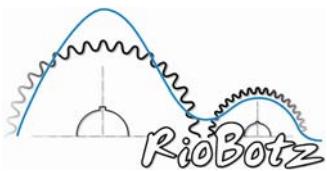
⇒ o escoamento localizado (junto ao entalhe) em geral não causa problemas, porém se as cargas variarem no tempo pode haver fadiga



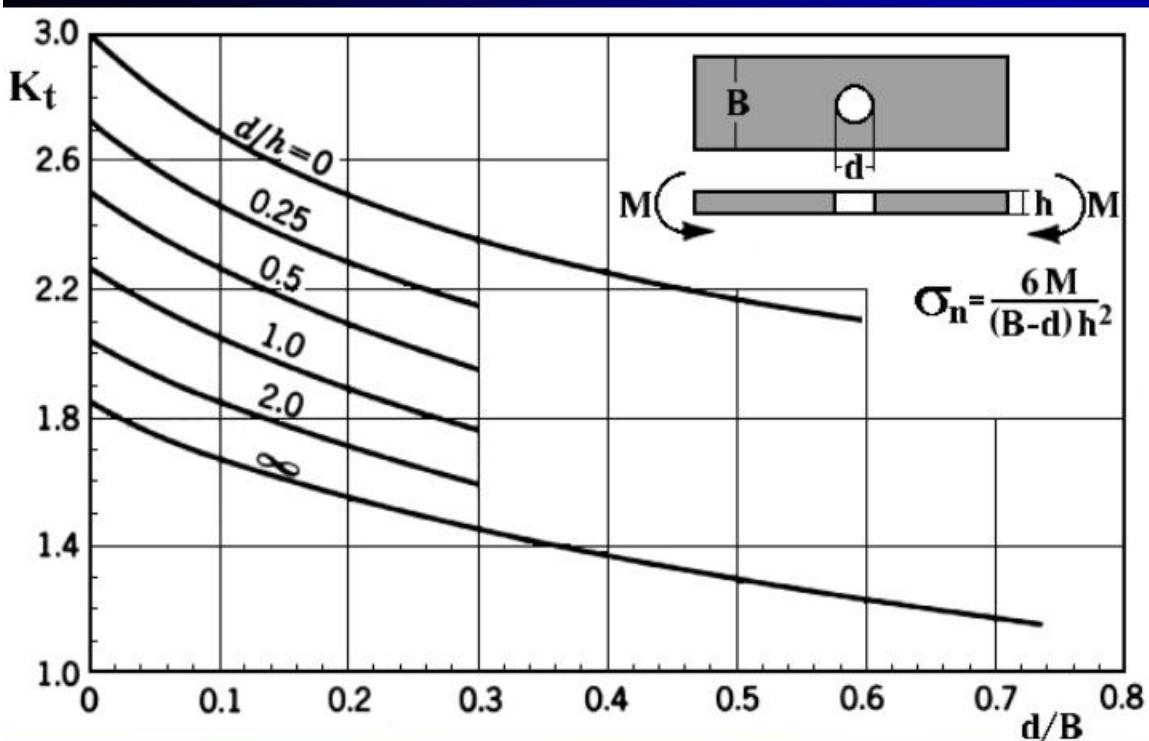
$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_n}{2} \left[ \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right] \therefore$$

$$\sigma_{\theta_{\max}} \Rightarrow \theta = \pm \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sigma_\theta = \sigma_x = 3 \cdot \sigma_n$$

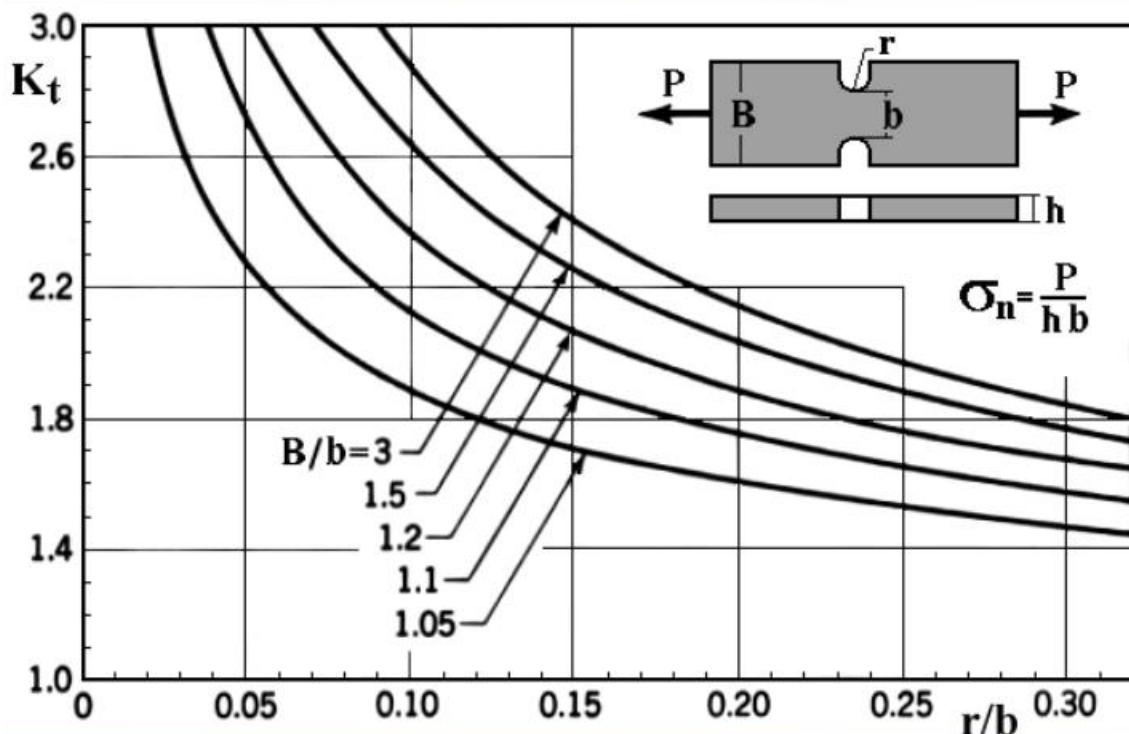
$$\sigma_{\theta_{\min}} \Rightarrow \theta = 0, \pi \Rightarrow \sigma_\theta = \sigma_y = -\sigma_n$$



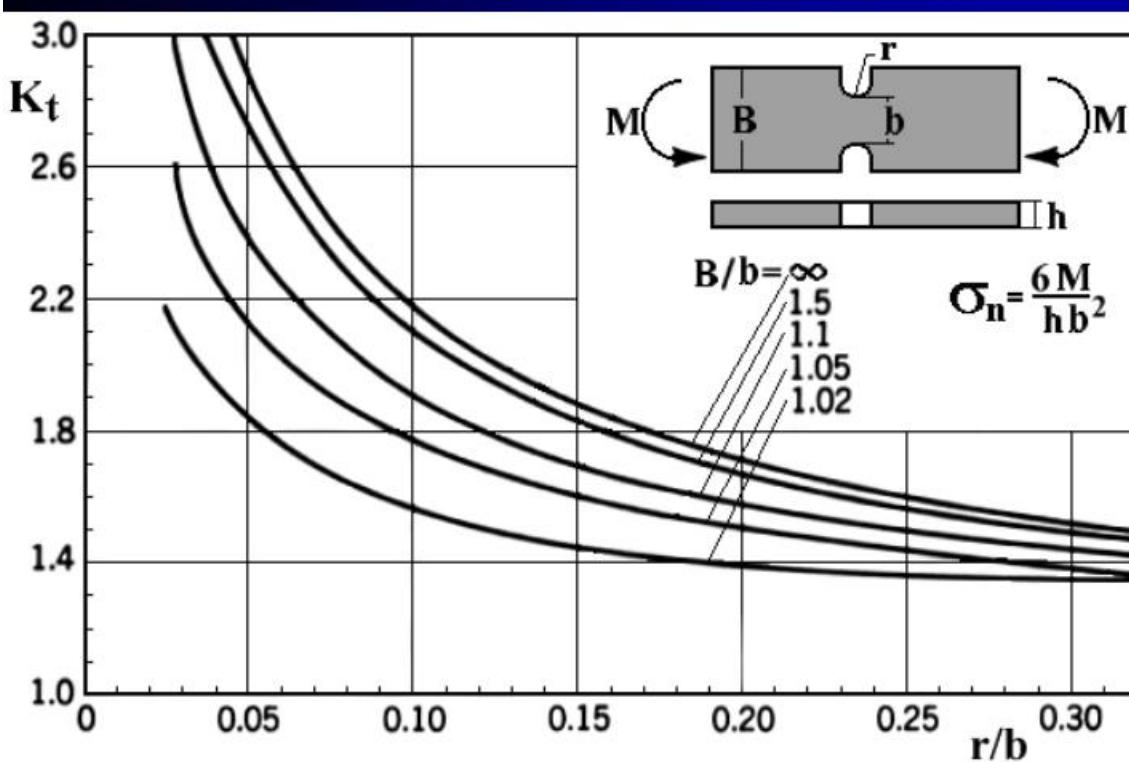
►  $K_t$  para **tração** em uma placa com furo: a tensão máxima é igual ao  $K_t$  multiplicado por  $\sigma_n$  (note que para uma placa infinita, com  $d/B$  tendendo a 0,  $K_t=3$ )



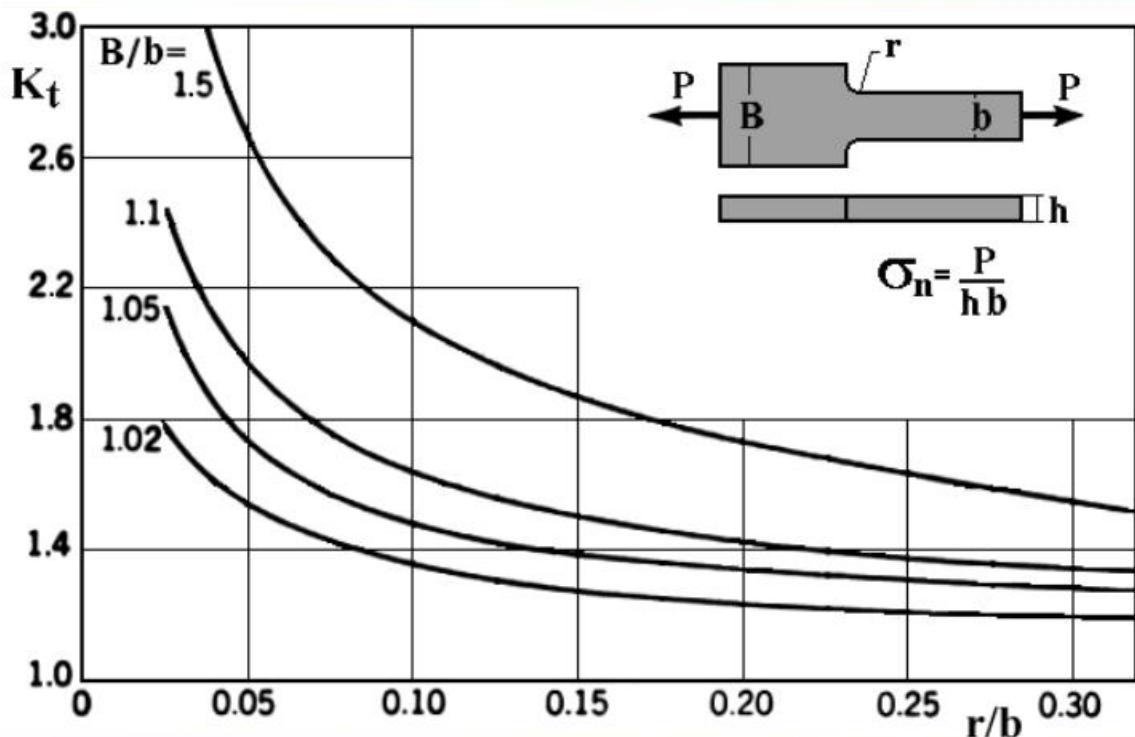
►  $K_t$  para **flexão** em uma placa com furo



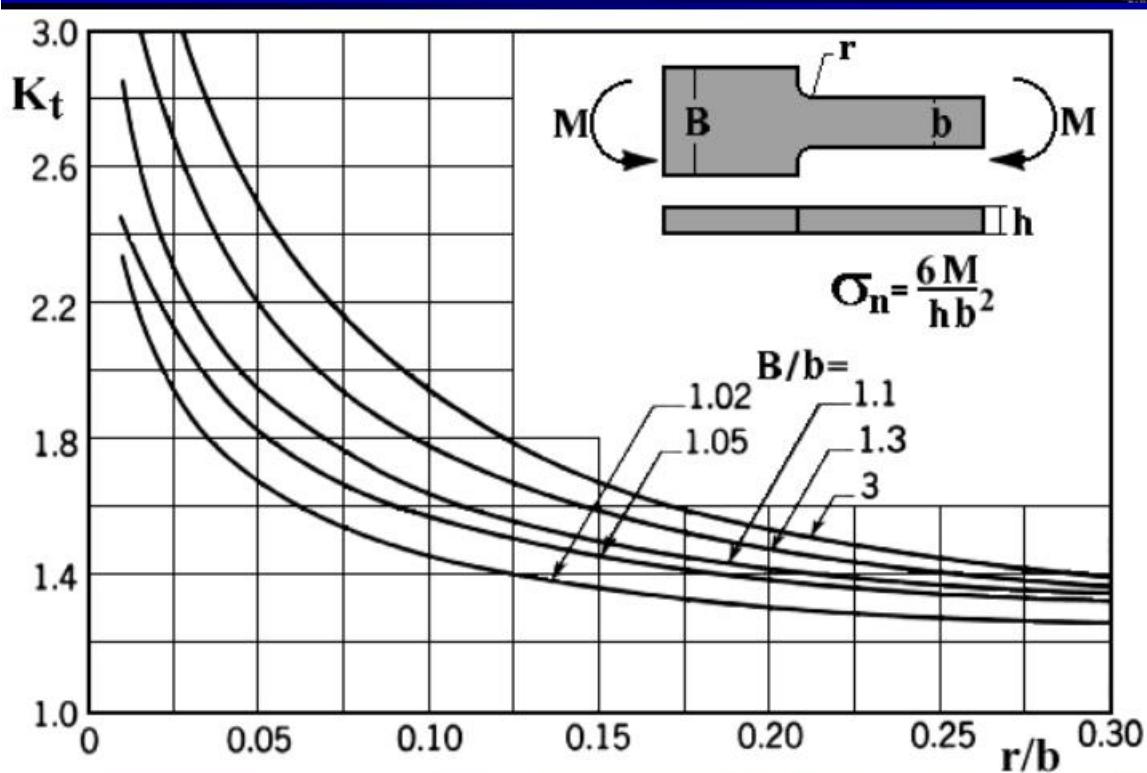
►  $K_t$  para **tração** em uma placa com duplo entalhe



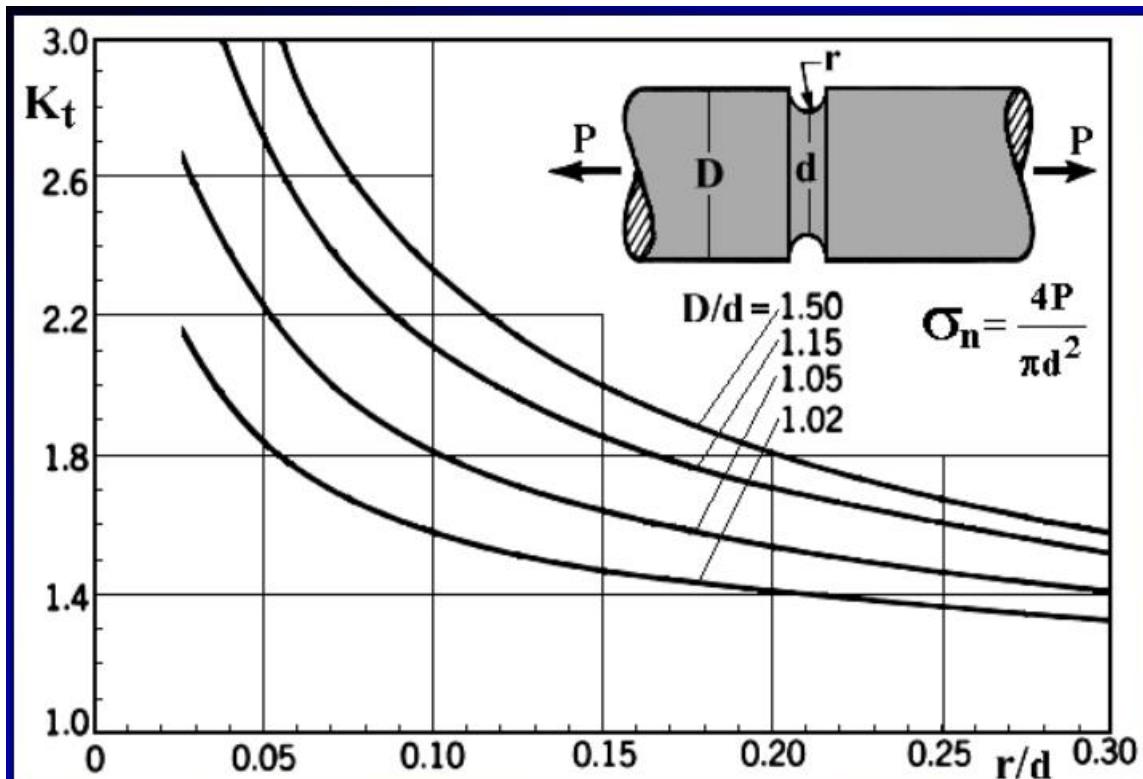
►  $K_t$  para **flexão** em uma placa com duplo entalhe



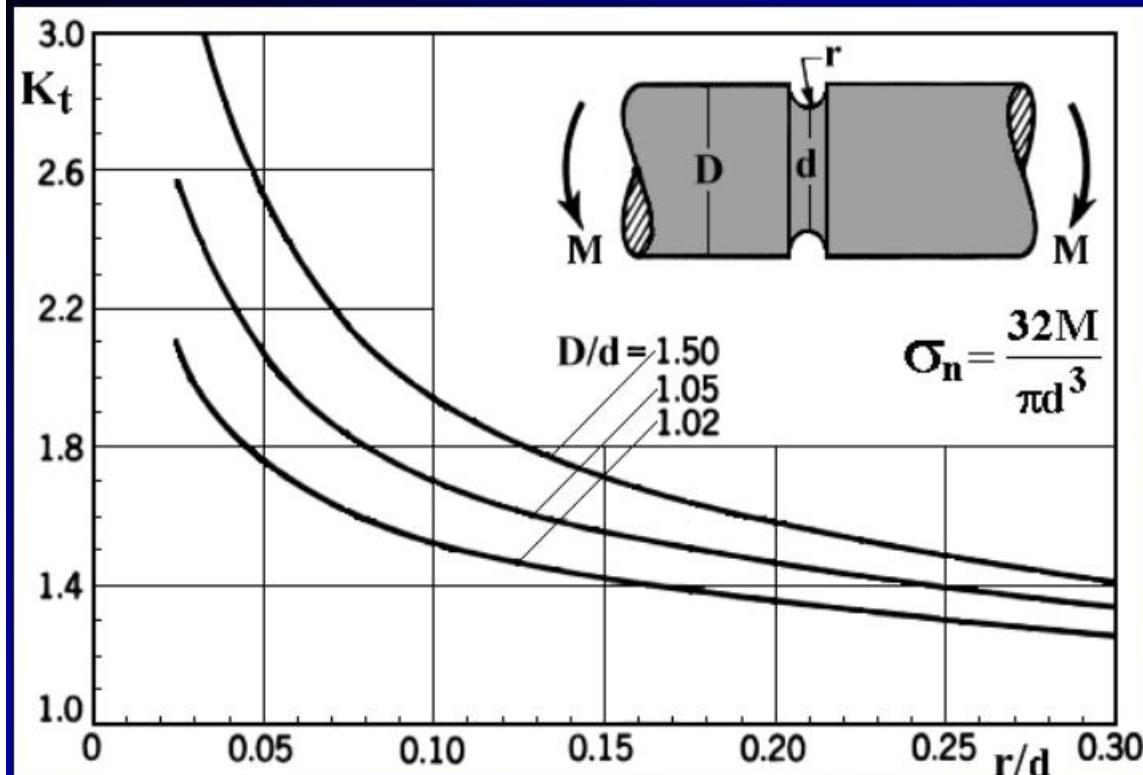
►  $K_t$  para **tração** em uma placa com ombro



►  $K_t$  para **flexão** em uma placa com ombro

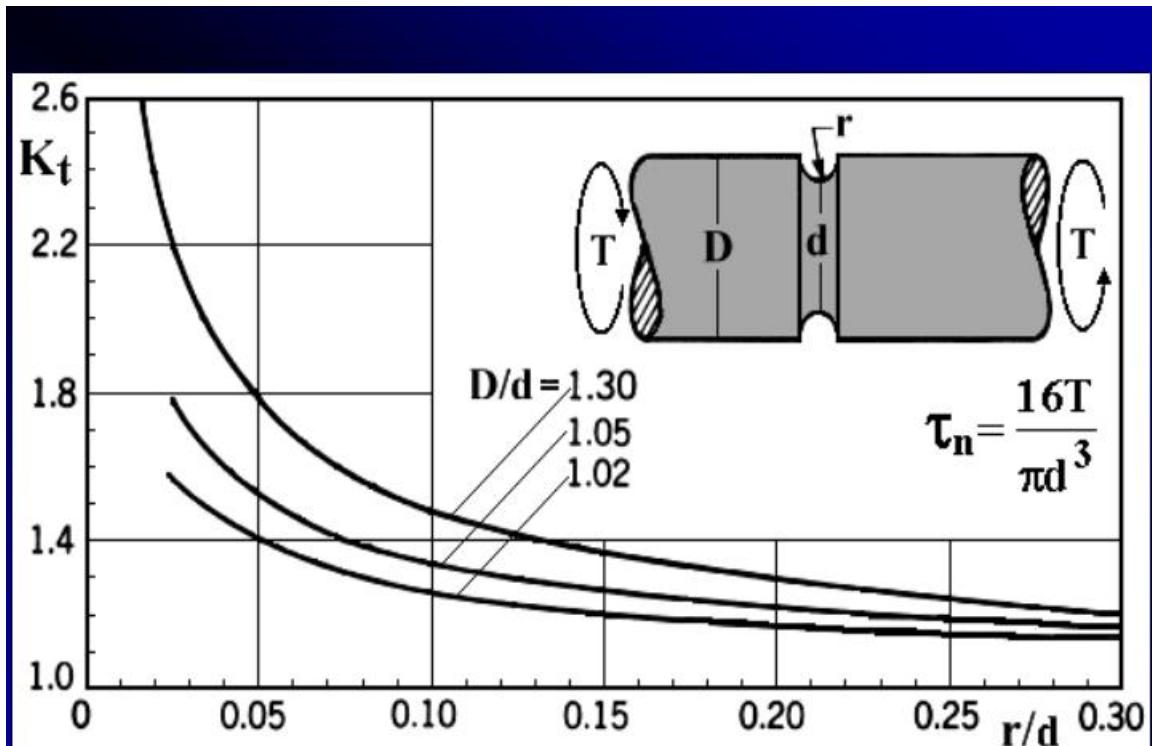


►  $K_t$ s para **tração** em um eixo circular com entalhe U

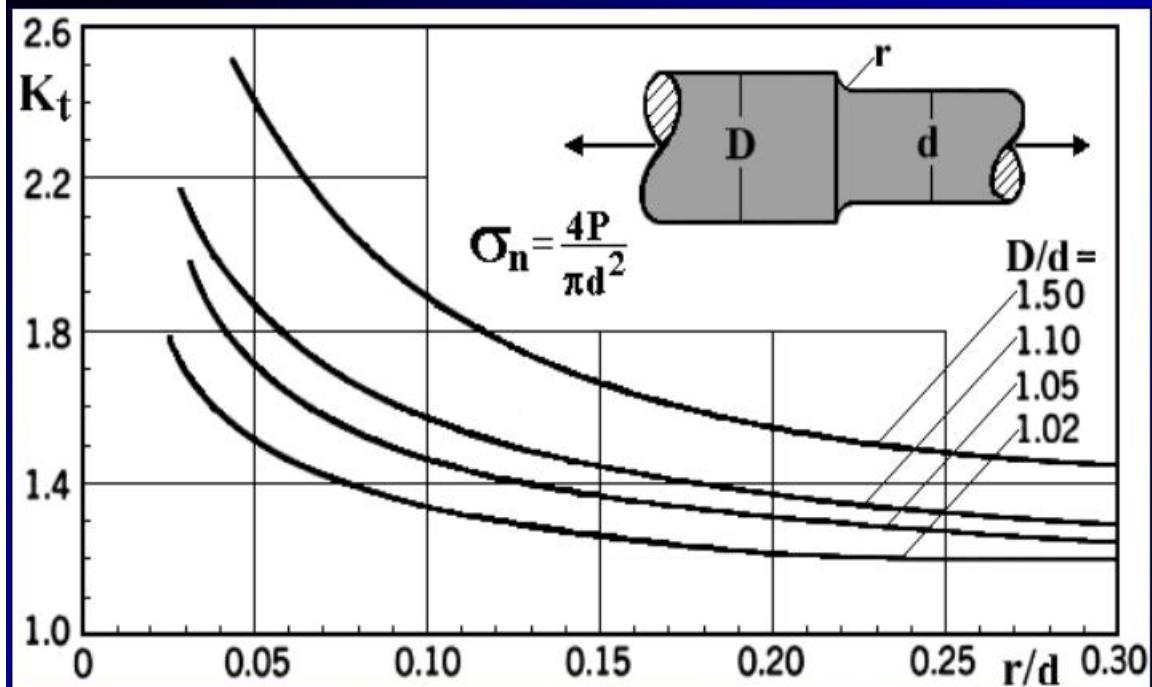


►  $K_t$ s para **flexão** em um eixo circular com entalhe U

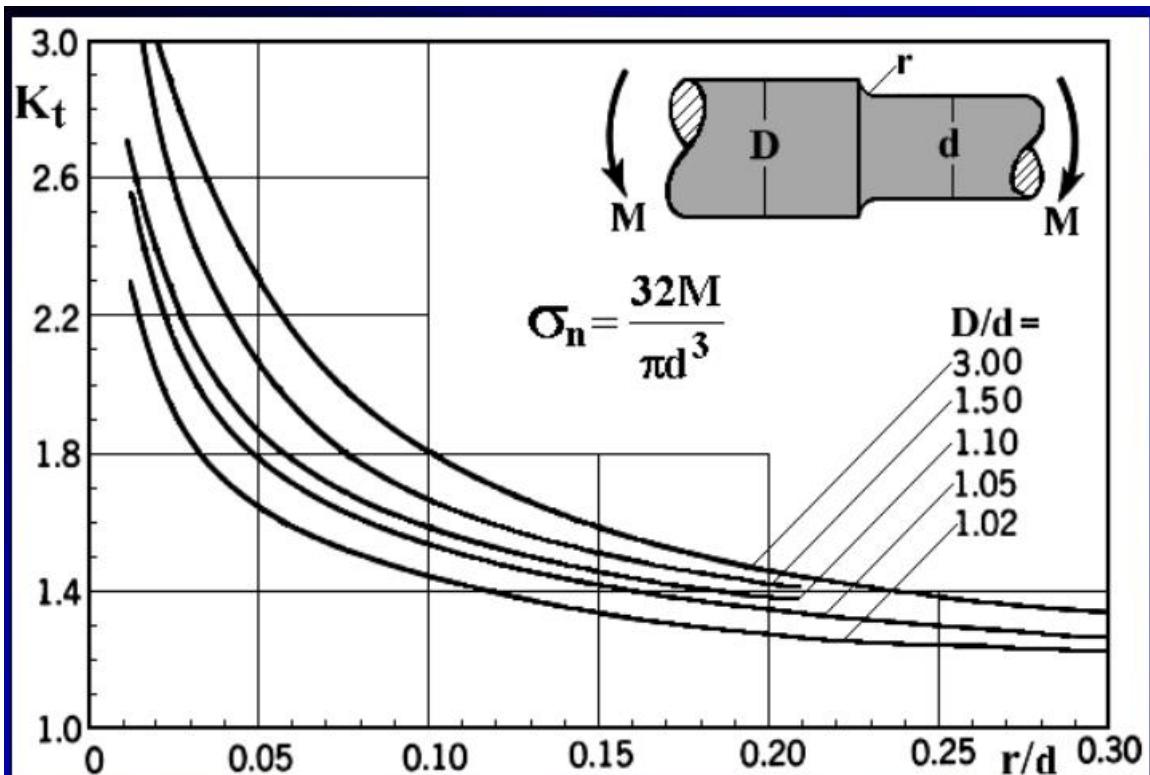




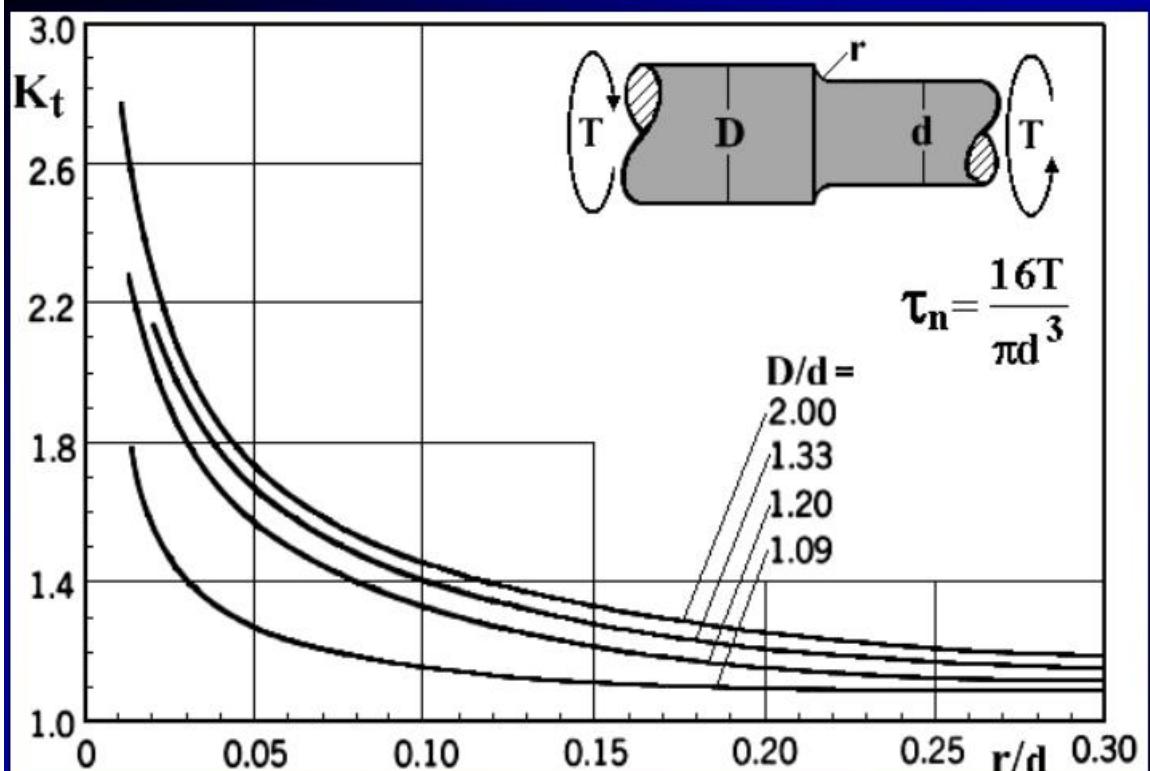
►  $K_t$ s para **torção** em um eixo circular com entalhe U



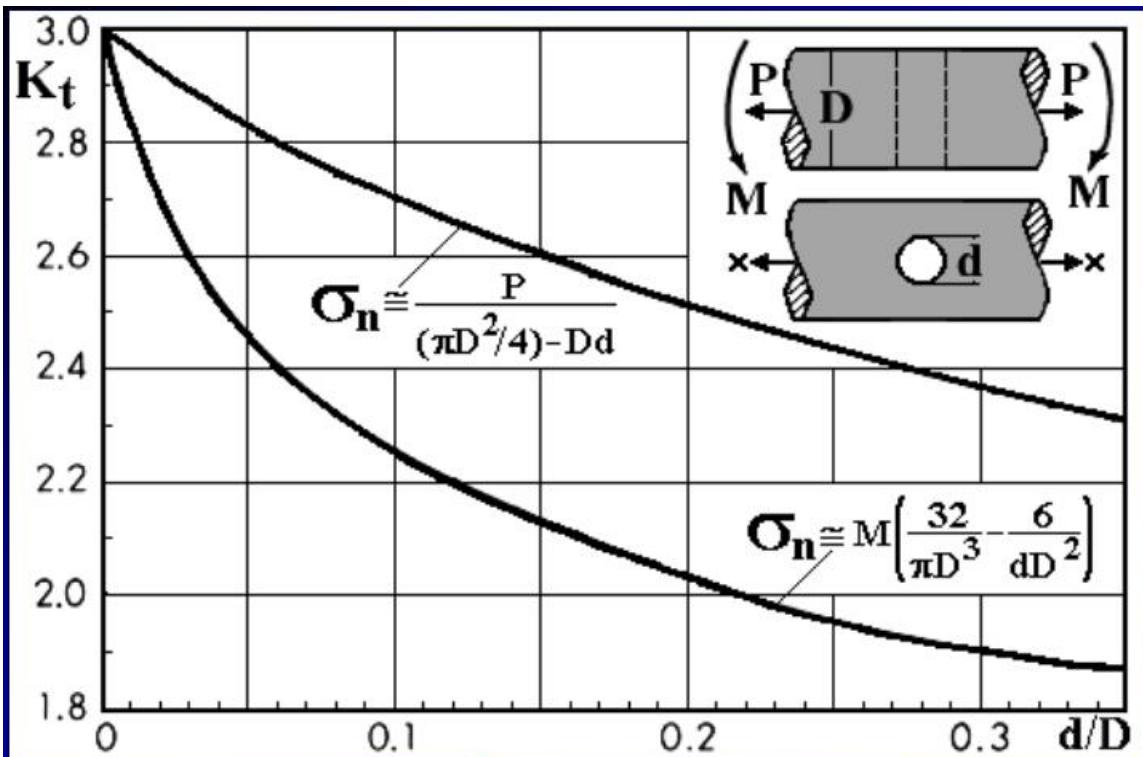
►  $K_t$ s para **tração** em um eixo circular filetado



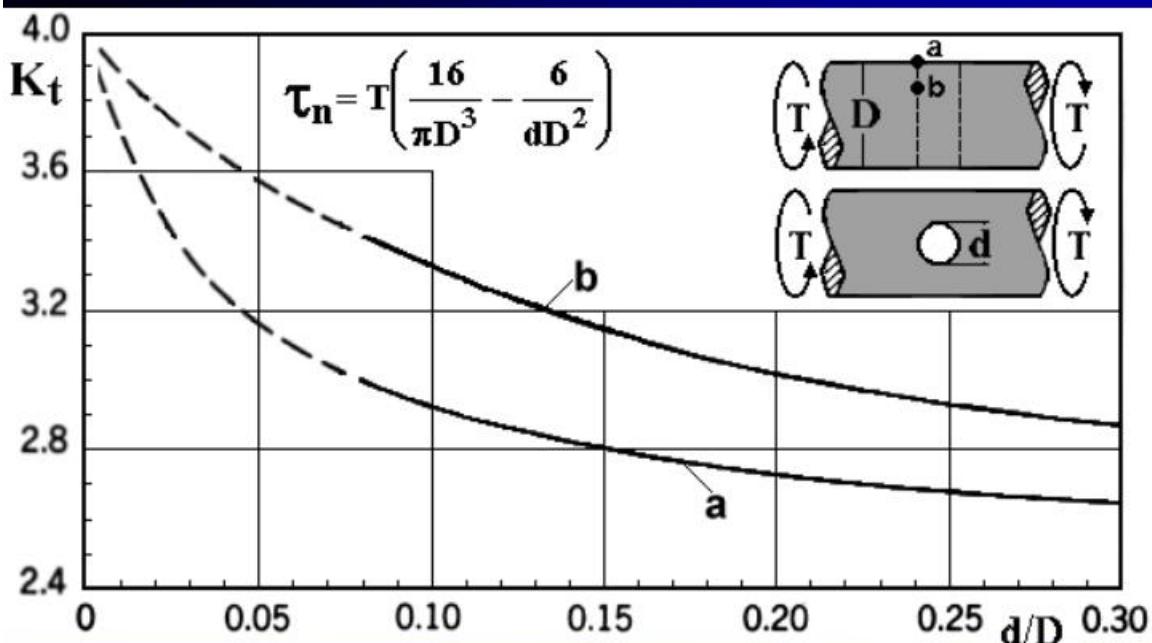
→  $K_t$ s para **flexão** em um eixo circular filetado



→  $K_t$ s para **torção** em um eixo circular filetado



→  $K_t$ s para **tração** e **flexão** em um eixo circular com furo radial ( $\sigma_n$  baseados na área **líquida** do eixo)



→  $K_t$ s para **torção** em um eixo circular com furo radial ( $\tau_n$  baseado na área **líquida** do eixo)

⇒ ex.3: calcule a força horizontal **P** máxima para não empenar o eixo da arma do Ciclone (despreze torção)

► o momento fletor na seção crítica é

**M = 150×P**, e a tensão **nominal**

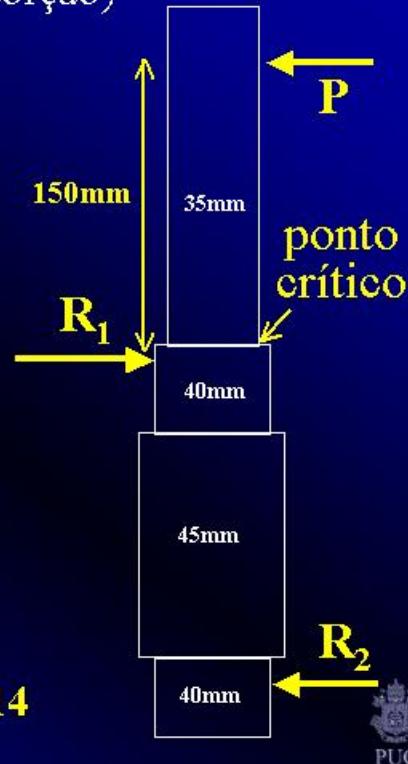
máxima de flexão é

$$\sigma_{n_{\max}} = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{32 \cdot 150P}{\pi \cdot 35^3} \approx \frac{P}{28}$$

► mas há um entalhe no ponto crítico, logo a tensão naquele ponto é mais alta que a nominal (existe um **K<sub>t</sub>**)

► considerando que o ombro tem um raio de arredondamento **r = 1mm**, e que **d = 35mm**, **D = 40mm**, então

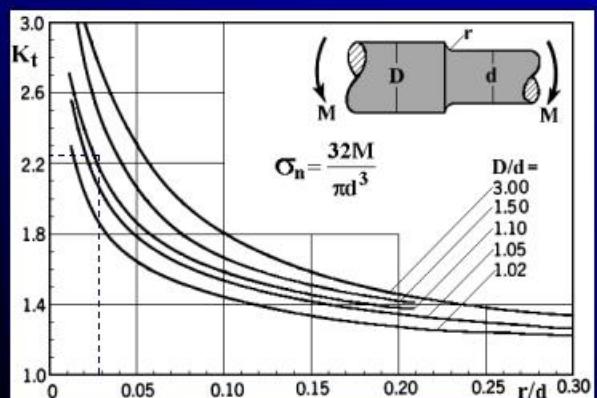
$$\frac{r}{d} = \frac{1\text{mm}}{35\text{mm}} = 0.0286, \quad \frac{D}{d} = \frac{40\text{mm}}{35\text{mm}} = 1.14$$



► no gráfico ao lado, para **r/d = 0.0286** e **D/d = 1.14** temos aproximadamente **K<sub>t</sub> = 2.25**

► assim, a tensão real no ponto crítico é

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_{n_{\max}} = 2.25 \cdot \frac{P}{28}$$



► para o eixo não empenar, é preciso que essa tensão seja menor que **S<sub>E</sub>** (que vale **1372MPa** para esse aço 4340 temperado), assim

$$2.25 \cdot \frac{P}{28} = 1372 \Rightarrow P = 17074\text{N}$$

► a força horizontal máxima que esse eixo suporta sem empenar é **17074N**, que equivale a  $17074/9.81 = 1740\text{kg}$

► se o raio do entalhe aumentar para **2mm**, pula para **2176kg**

## Resistências ao Escoamento e à Ruptura

► a resistência ao **escoamento**  $S_E$  (em MPa) quantifica a resistência do material ao início da deformação plástica (macroscópica e significativa) sob tração uniaxial

►  $S_E$  é medida num teste de tração uniaxial a partir de uma **pequena** (mas **não zero**) deformação plástica residual **arbitrária** (em geral **0.2%** nas ligas metálicas), logo  $S_E$  **não é** o limite do comportamento **elástico** do material

► a resistência à **ruptura** por tração  $S_R$  é medida em MPa dividindo a **maior força** que o corpo de prova suporta num teste uniaxial de tração pela sua **área original**

► **curva** σε típica de um metal (**latão**), que pode ser usada para medir:

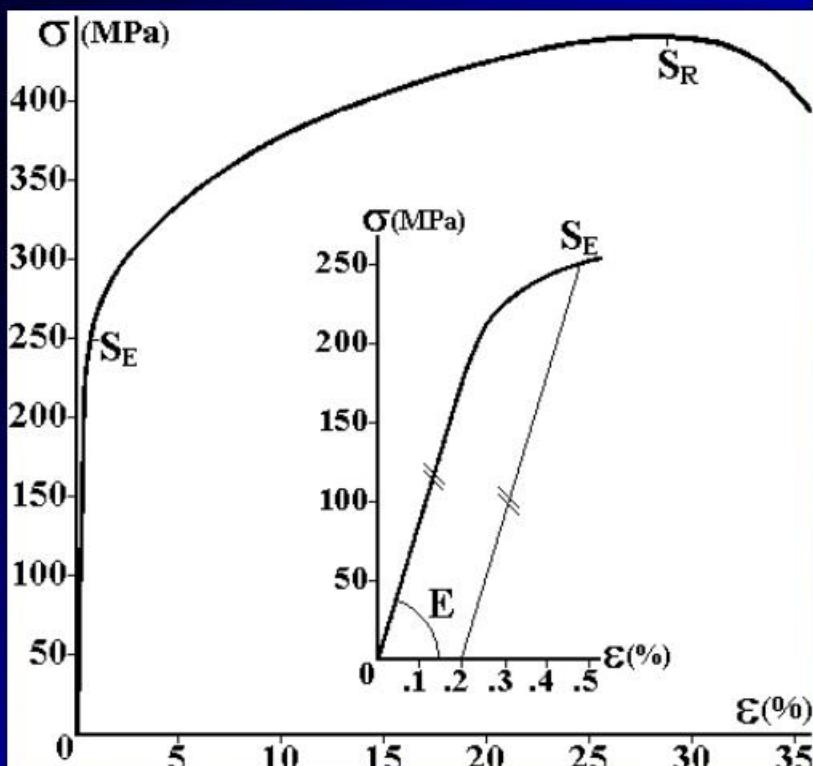
► o **módulo de elasticidade**  $E$

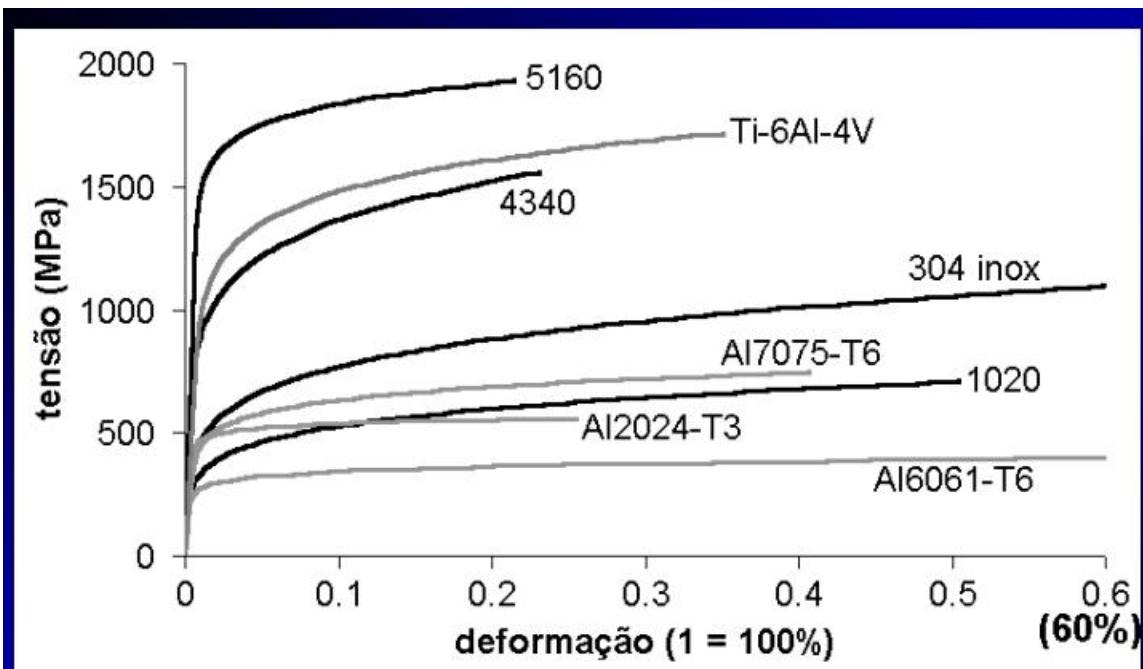
► a **resistência à ruptura**  $S_R$  e **ao escoamento**  $S_E$

► a **ductilidade**, pela **redução da área** do corpo de prova (CP):

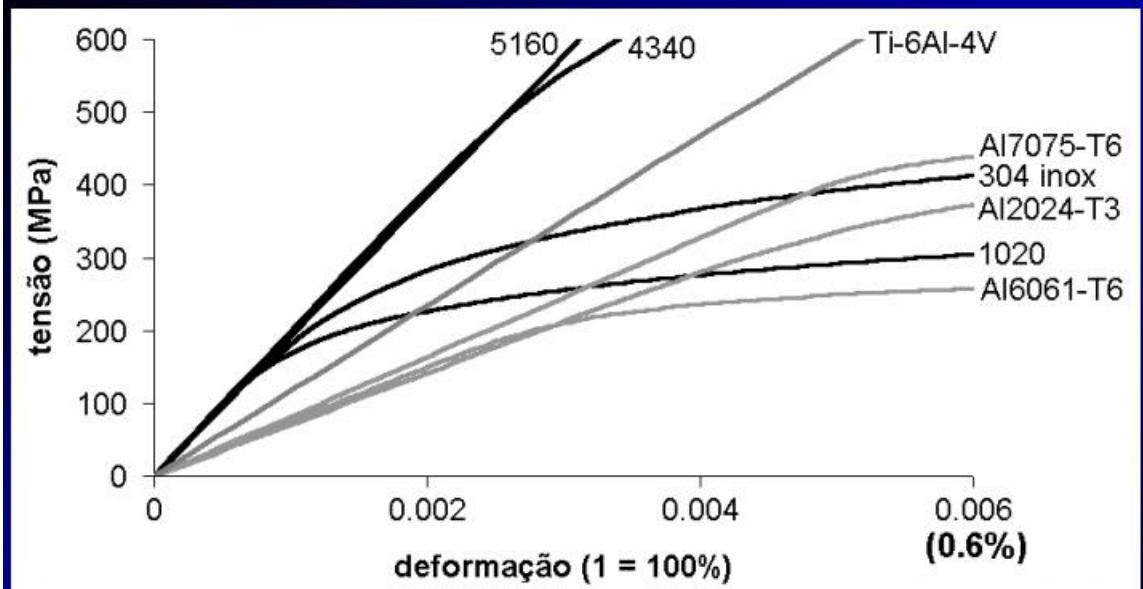
$$RA = \frac{(d_0^2 - d_f^2)}{d_0^2}$$

onde  $d_0$  e  $d_f$  são os diâmetros inicial e final do corpo de prova





► curvas tensão-deformação dos principais metais usados em robôs de combate: alta **resistência à ruptura** são as mais altas, alta **ductilidade** são as mais largas, e maior **tenacidade** (resistência a impactos) são as com maior área sob a curva



► zoom das curvas tensão-deformação na região elástica  
 ► repare as inclinações diferentes dos alumínios, titâniros e aços na região elástica  
 ► nota: **T3**: temperada, solubilizada e encruada, **T6**: temperada, solubilizada e envelhecida artificialmente

## Dureza

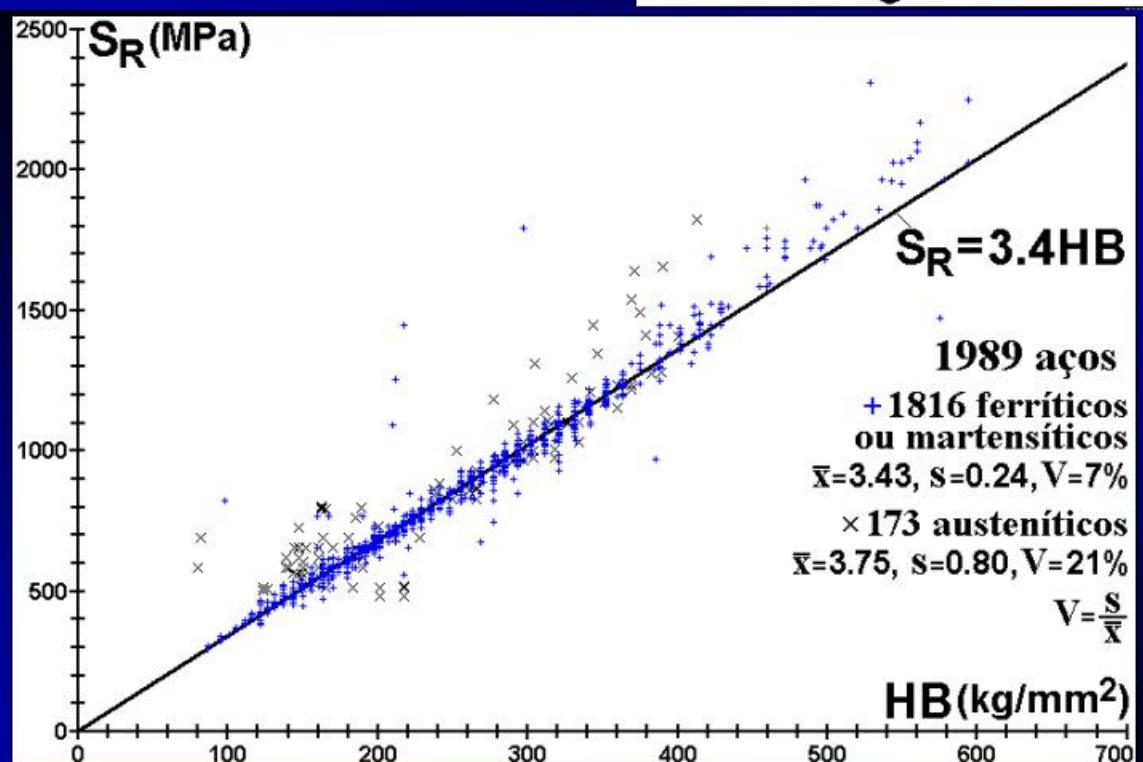
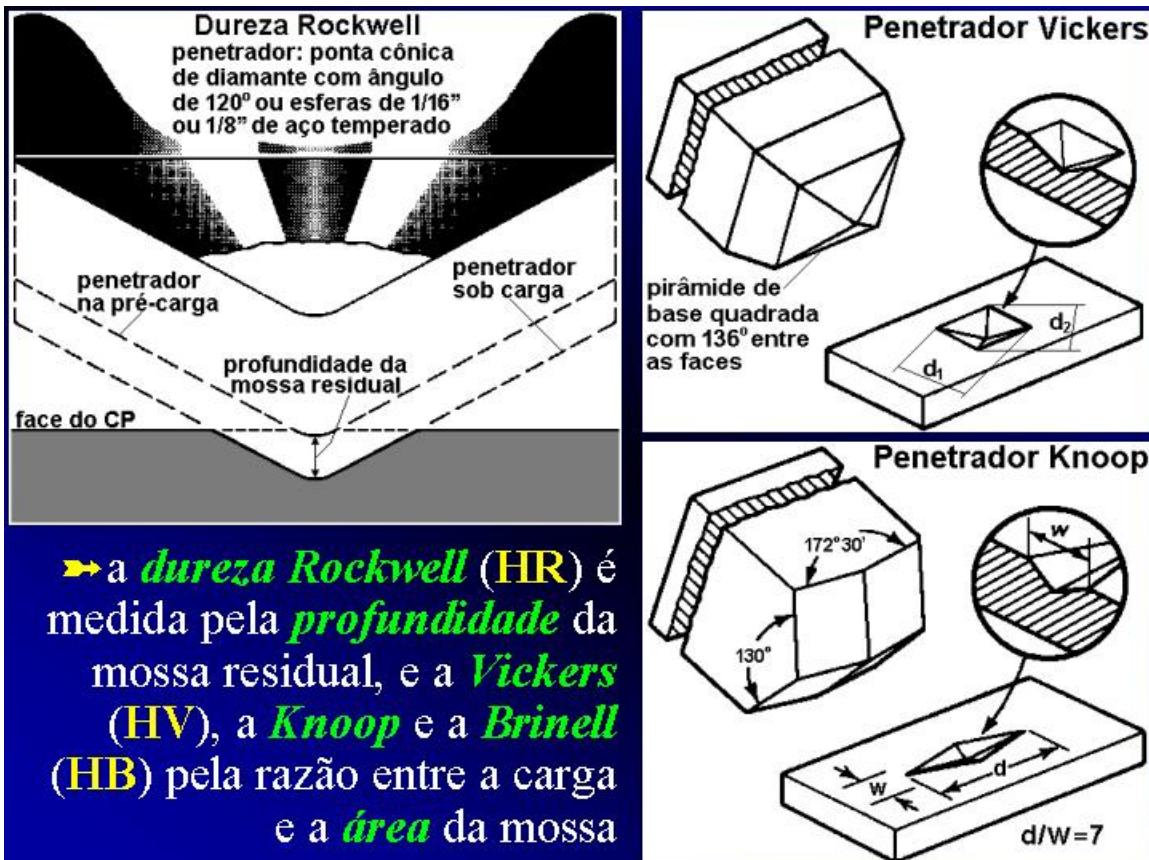
→ a **dureza H** quantifica a **resistência à penetração**, e pode ser medida de quatro maneiras básicas:

- ⦿ **H = F/A**, onde **F** é uma **força** aplicada via um **penetrador** padronizado e **A** a **área** da **mossa residual** por ele deixada sobre a peça (o penetrador é uma esfera de **aço** duro ou de **WC** no método **Brinell**, **HB**, ou pirâmides especiais de **diamante** nos métodos **Vickers**, **HV**, e **Knoop**, **HK**)
- ⦿ no método **Rockwell**, **HR**, primeiro aplica-se uma pré-carga pequena no penetrador (que pode ser um cone de **diamante** ou esferas de **aço**), a seguir a carga de teste e após retirá-la, mas mantendo a pré-carga no penetrador, por fim mede-se a **profundidade da mossa residual**
- ⦿ pela **altura** do **rebote** de um êmbolo solto de uma altura de referência, ambos padronizados (dureza **Shore**)
- ⦿ pelo **risco** feito por um material mais duro em outro mais mole na dureza **Mohs** (usada em **geologia**)

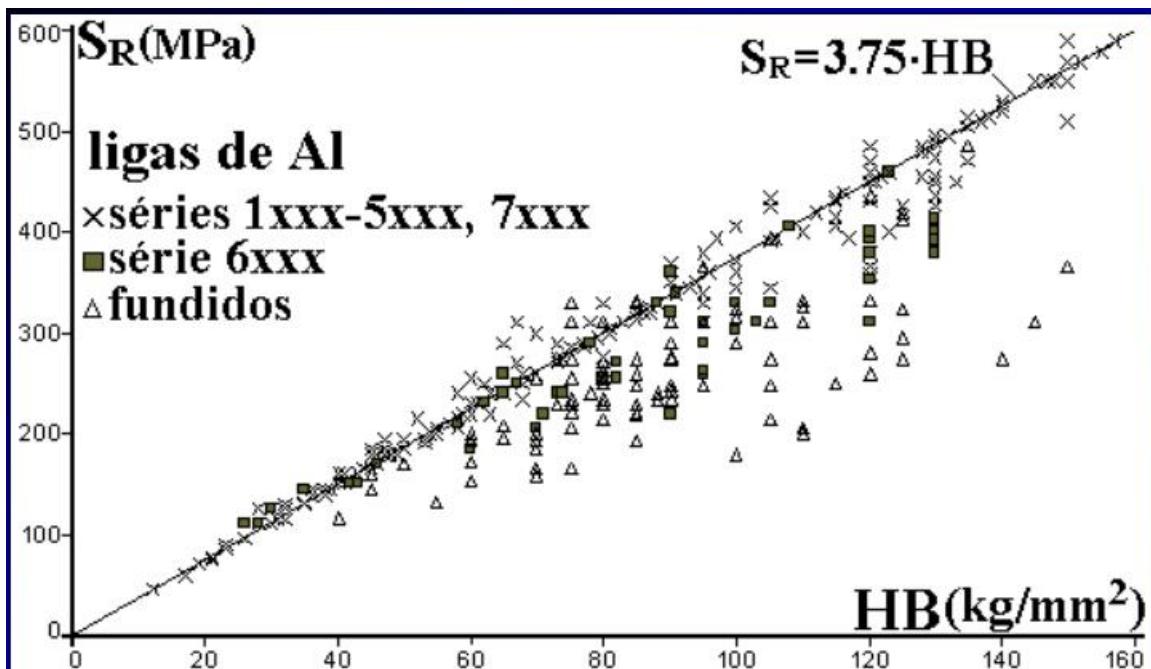
→ em mecânica é mais comum medir a **dureza** marcando a superfície da peça via um penetrador mais duro que ela

**Principais Medidas de Dureza (Resistência à Penetração)**

método	carga P(kg)	penetrador	mossa	fórmula	comentários
<b>Brinell</b> (carga/área da mossa residual, em kg/mm <sup>2</sup> )	1 a 3000	esfera c/ D=1, 2, 5 ou 10mm, de aço ou WC		$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	usar mossas com $D/4 < d < D/2$ , fazendo $P/D^2 = 30\text{kg}/\text{mm}^2$ nos materiais duros, 10 ou 5 nos médios e 2 ou 1 nos macios usar esfera de WC se HB > 500
<b>Vickers</b> (carga/área da mossa residual, em kg/mm <sup>2</sup> )	1 a 100	pirâmide de diamante de base quadrada 136° entre faces		$HV = \frac{2Psen(136/2)}{[(d_1 + d_2)/2]^2}$	$HV (\approx HB \approx 3S_E)$ usa só um penetrador, é quase independente da carga, serve para qualquer material e deixa mossas pequenas
<b>Rockwell A</b> (profundidade da mossa residual)	60	cone de 120°, de diamante		$HR = 100 - 500t$ (t em 0.01mm)	prática, dureza lida diretamente num dial com resolução de 0.01mm (uma pré-carga de 10kg garante o contato penetrador-peça na leitura)
<b>C</b>	150			$HR = 100 - 1000t$	$HR_C$ (de 20 a 70) e $HR_B$ (de 50 a 100) são as escalas mais usadas
<b>D</b>	100			$HR = 130 - 500t$ (t em 0.01mm)	$HR_N$ e $HR_T$ medem dureza superficial em máquinas especiais (pré-carga de 3kg e t em 0.001mm), a carga deve ser especificada: $HR_{30N}$ , e.g.
<b>N</b>	15, 30, 45			$HR = 100 - 1000t$	t é a profundidade da mossa residual convertida em dureza HR pelo dial
<b>B</b>	100			$HR = 130 - 500t$ (t em 0.01mm)	
<b>F</b>	60	esfera de aço com D=1/16"		$HR = 100 - 1000t$	
<b>G</b>	150			$HR = 130 - 500t$ (t em 0.01mm)	
<b>T</b>	15, 30, 45			$HR = 130 - 500t$ (t em 0.01mm)	
<b>E</b>	100	esfera de aço com D=1/8"		$HR = 130 - 500t$ (t em 0.01mm)	
<b>H</b>	60			$HR = 130 - 500t$ (t em 0.01mm)	
<b>K</b>	150			$HR = 130 - 500t$ (t em 0.01mm)	
<b>Knoop</b> (carga/área da mossa residual)	0.001 a 1	pirâmide de diamante alongada		$HK = \frac{14.229P}{d^2}$	usada em medições de microdureza: a razão de 7:1 entre as diagonais e a mossa rasa facilitam a medição



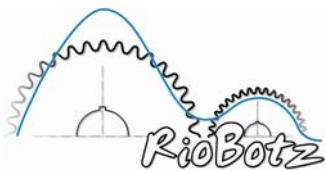
► a correlação  $S_R \approx 3.4 \cdot HB$  é melhor e menos dispersa para os aços com estrutura **ccc** ( $\bar{x}$  é a média e  $s$  o desvio padrão) 



► nas ligas de Al *laminadas*  $S_R \approx 3.75 \cdot HB$  (com  $V = 5.9\%$ ) exceto nas da série 6000, que seguem  $S_R \approx 3.4 \cdot HB$  (mas com dispersão bem maior,  $V = 12\%$ ), já a razão  $S_R/HB$  das ligas de Al fundidas é dispersa demais

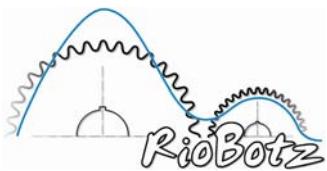
► preços aproximados em US\$/kg (no atacado):

cimento	0.10-0.15	ligas de alumínio	3.0-6.0
carvão	0.15-0.20	borracha natural	3.1-3.2
óleo combustível	0.45-0.50	vidros comuns	3.2-3.3
ferro fundido cinzento	0.55-0.60	ligas de cobre	4.0-7.7
concreto armado	0.60-0.70	fibra de vidro (GFRP)	5.2-7.2
madeiras macias	0.90-1.6	PC	5.5-5.7
aço C (1020) laminado	1.00	aços inox	6.0-13.0
aço C estrutural (A36)	1.08	aços ferramenta	6.0-31.0
aço C v.pressão (A515)	1.3	nylon	7.1-7.3
aços de baixa liga	1.0-3.0	PMMA	11.5-12.0
PVC	1.7-1.8	ligas de titânio	22.0-50.0
zincos	2.0-3.8	ligas CuNi	27.0-35.0
PE alta densidade	2.1-2.3	superligas de Ni	50+
alumina ( $Al_2O_3$ )	2.4-3.9	fibra de C (CFRP)	200+



## Conversão entre durezas Brinell, Vickers e Rockwell A, B e C

<b>HB</b> 3ton	<b>HV</b>	<b>HR<sub>A</sub></b> 60kg	<b>HR<sub>B</sub></b> 100kg	<b>HR<sub>C</sub></b> 150kg	<b>HB</b> 3ton	<b>HV</b>	<b>HR<sub>A</sub></b> 60kg	<b>HR<sub>B</sub></b> 100kg	<b>HR<sub>C</sub></b> 150kg
100	105	-	-	-	311	327	66,9	-	33,1
105	110	-	-	-	321	337	67,5	-	34,3
111	116	-	65,7	-	331	347	68,1	-	35,5
116	121	-	67,6	-	341	358	68,7	-	36,6
121	127	-	69,8	-	352	370	69,3	-	37,9
126	132	-	72	-	363	382	70	-	39,1
131	138	-	74	-	375	394	70,6	-	40,4
137	144	-	76,4	-	388	408	71,4	-	41,8
143	150	-	78,7	-	401	422	72	-	43,1
149	157	-	80,8	-	415	436	72,8	-	44,5
156	164	-	82,9	-	429	451	73,4	-	45,7
163	171	-	85	-	444	467	74,2	-	47,1
167	175	-	86	-	461	485	74,9	-	48,5
170	179	-	86,8	-	477	502	75,6	-	49,6
174	183	-	87,8	-	495	521	76,3	-	51
179	188	-	89	-	514	541	76,9	-	52,1
183	192	-	90	-	534	562	77,8	-	53,5
187	196	-	90,7	-	555	584	78,4	-	54,7
192	202	-	91,9	-	578	608	79,1	-	56
197	207	-	92,8	-	601	632	79,8	-	57,3
201	211	-	93,8	15	630	670	80,6	-	58,8
207	217	-	94,6	16	638	680	80,8	-	59,2
212	223	-	95,5	17	647	690	81,1	-	59,7
217	228	-	96,4	18	656	700	81,3	-	60,1
223	234	-	97,3	20	670	720	81,8	-	61
229	241	60,8	98,2	20,5	684	740	82,2	-	61,8
235	247	61,4	99	21,7	698	760	82,6	-	62,5
241	253	61,8	100	22,8	710	780	83	-	63,3
248	261	62,5	-	24,2	722	800	83,4	-	64
255	268	63	-	25,4	733	820	83,8	-	64,7
262	275	63,6	-	26,6	745	840	84,1	-	65,3
269	283	64,1	-	27,6	757	860	84,4	-	65,9
277	291	64,6	-	28,8	767	880	84,7	-	66,4
285	300	65,3	-	29,9	779	900	85	-	67
293	308	65,7	-	30,9	790	920	85,3	-	67,5
302	317	66,3	-	32,1	800	940	85,6	-	68



## Canais e Frequências de Rádio Controle

<b>banda 27 MHz (aviação/carros/barcos)</b>	<b>banda 72 MHz (continuação)</b>	<b>banda de 75 MHz (carros/barcos)</b>
26.995 MHz - Canal 1 – Marrom	72.270 MHz - Canal 24	75.410 MHz - Canal 61
27.045 MHz - Canal 2 – Vermelho	72.290 MHz - Canal 25	75.430 MHz - Canal 62
27.095 MHz - Canal 3 – Laranja	72.310 MHz - Canal 26	75.450 MHz - Canal 63
27.145 MHz - Canal 4 – Amarelo	72.330 MHz - Canal 27	75.470 MHz - Canal 64
27.195 MHz - Canal 5 – Verde	72.350 MHz - Canal 28	75.490 MHz - Canal 65
27.255 MHz - Canal 6 - Azul	72.370 MHz - Canal 29	75.510 MHz - Canal 66
	72.390 MHz - Canal 30	75.530 MHz - Canal 67
<b>banda 50 MHz (aviação/carros/barcos)</b>	<b>banda 72 MHz (continuação)</b>	<b>banda de 75 MHz (carros/barcos)</b>
50.800 MHz - Canal RC00	72.410 MHz - Canal 31	75.550 MHz - Canal 68
50.820 MHz - Canal RC01	72.430 MHz - Canal 32	75.570 MHz - Canal 69
50.840 MHz - Canal RC02	72.450 MHz - Canal 33	75.590 MHz - Canal 70
50.860 MHz - Canal RC03	72.470 MHz - Canal 34	75.610 MHz - Canal 71
50.880 MHz - Canal RC04	72.490 MHz - Canal 35	75.630 MHz - Canal 72
50.900 MHz - Canal RC05	72.510 MHz - Canal 36	75.650 MHz - Canal 73
50.920 MHz - Canal RC06	72.530 MHz - Canal 37	75.670 MHz - Canal 74
50.940 MHz - Canal RC07	72.550 MHz - Canal 38	75.690 MHz - Canal 75
50.960 MHz - Canal RC08	72.570 MHz - Canal 39	75.710 MHz - Canal 76
50.980 MHz - Canal RC09	72.590 MHz - Canal 40	75.730 MHz - Canal 77
<b>banda 72 MHz (somente aviação)</b>	<b>banda 72 MHz (continuação)</b>	<b>banda de 75 MHz (carros/barcos)</b>
72.010 MHz - Canal 11	72.610 MHz - Canal 41	75.750 MHz - Canal 78
72.030 MHz - Canal 12	72.630 MHz - Canal 42	75.770 MHz - Canal 79
72.050 MHz - Canal 13	72.650 MHz - Canal 43	75.790 MHz - Canal 80
72.070 MHz - Canal 14	72.670 MHz - Canal 44	75.810 MHz - Canal 81
72.090 MHz - Canal 15	72.690 MHz - Canal 45	75.830 MHz - Canal 82
72.110 MHz - Canal 16	72.710 MHz - Canal 46	75.850 MHz - Canal 83
72.130 MHz - Canal 17	72.730 MHz - Canal 47	75.870 MHz - Canal 84
72.150 MHz - Canal 18	72.750 MHz - Canal 48	75.890 MHz - Canal 85
72.170 MHz - Canal 19	72.770 MHz - Canal 49	75.910 MHz - Canal 86
72.190 MHz - Canal 20	72.790 MHz - Canal 50	75.930 MHz - Canal 87
72.210 MHz - Canal 21	72.810 MHz - Canal 51	75.950 MHz - Canal 88
72.230 MHz - Canal 22	72.830 MHz - Canal 52	75.970 MHz - Canal 89
72.250 MHz - Canal 23	72.850 MHz - Canal 53	75.990 MHz - Canal 90
	72.870 MHz - Canal 54	
	72.890 MHz - Canal 55	
	72.910 MHz - Canal 56	
	72.930 MHz - Canal 57	
	72.950 MHz - Canal 58	
	72.970 MHz - Canal 59	
	72.990 MHz - Canal 60	