

# Bioenergética

Profa. Kalyne de Menezes Bezerra Cavalcanti

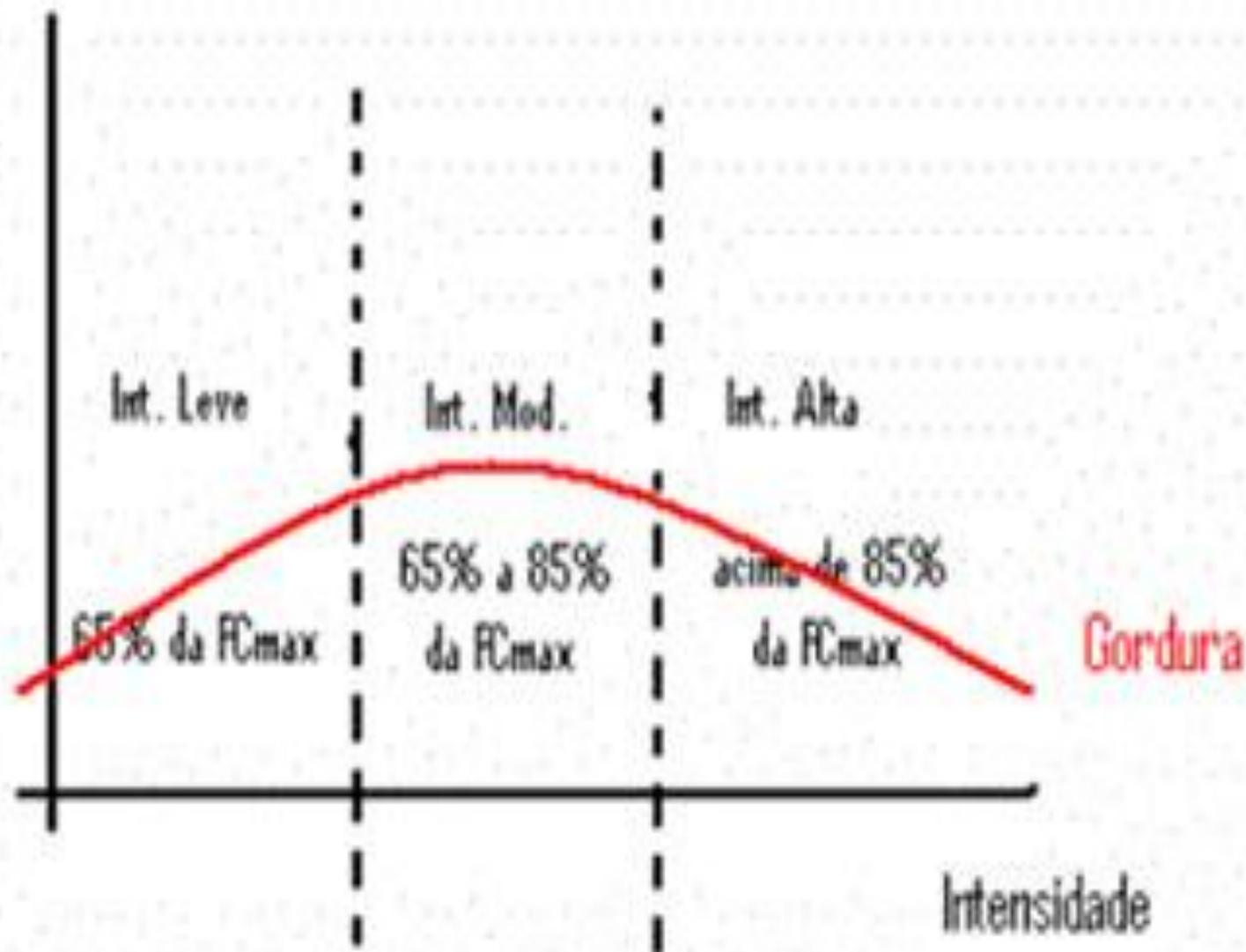
Natal/RN  
Fevereiro de 2011

# Substratos para o exercício

- O corpo utiliza nutrientes – carboidratos, gorduras e proteínas – consumidos diariamente para fornecer a energia necessária para manter as atividades celulares, tanto em repouso quanto durante o exercício.
- No exercício os principais nutrientes para obter energia são as gorduras e os carboidratos com a proteína contribuindo para uma pequena quantidade da energia total utilizada.



Utilização  
de  
Substratos

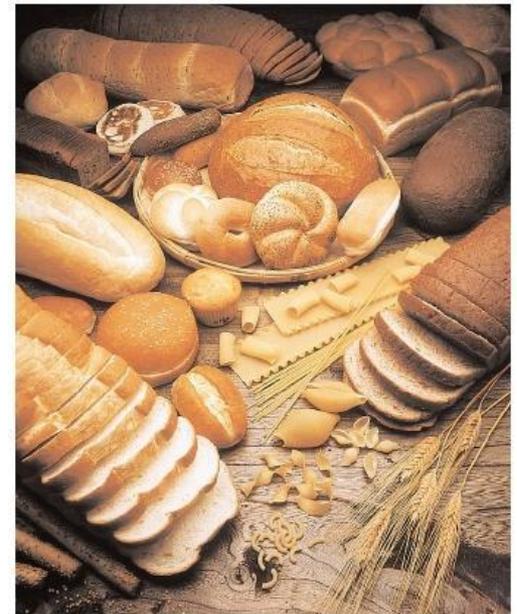


# Carboidratos

- São compostos de átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio.
- Estes existem em três formas: monossacarídeos, dissacarídeos e polissacarídeos.
- Os monossacarídeos são açúcares simples como a glicose e a frutose.
- Os dissacarídeos são formados pela combinação de dois monossacarídeos:

sacarose = glicose + frutose

maltose = glicose + glicose



# Carboidratos

- Os polissacarídeos são carboidratos complexos que contêm três ou mais monossacarídeos. Podem conter de 3 a centenas moléculas de monossacarídeos.
- As duas formas mais comuns de polissacarídeos vegetais: a celulose e o amido.



# Carboidratos

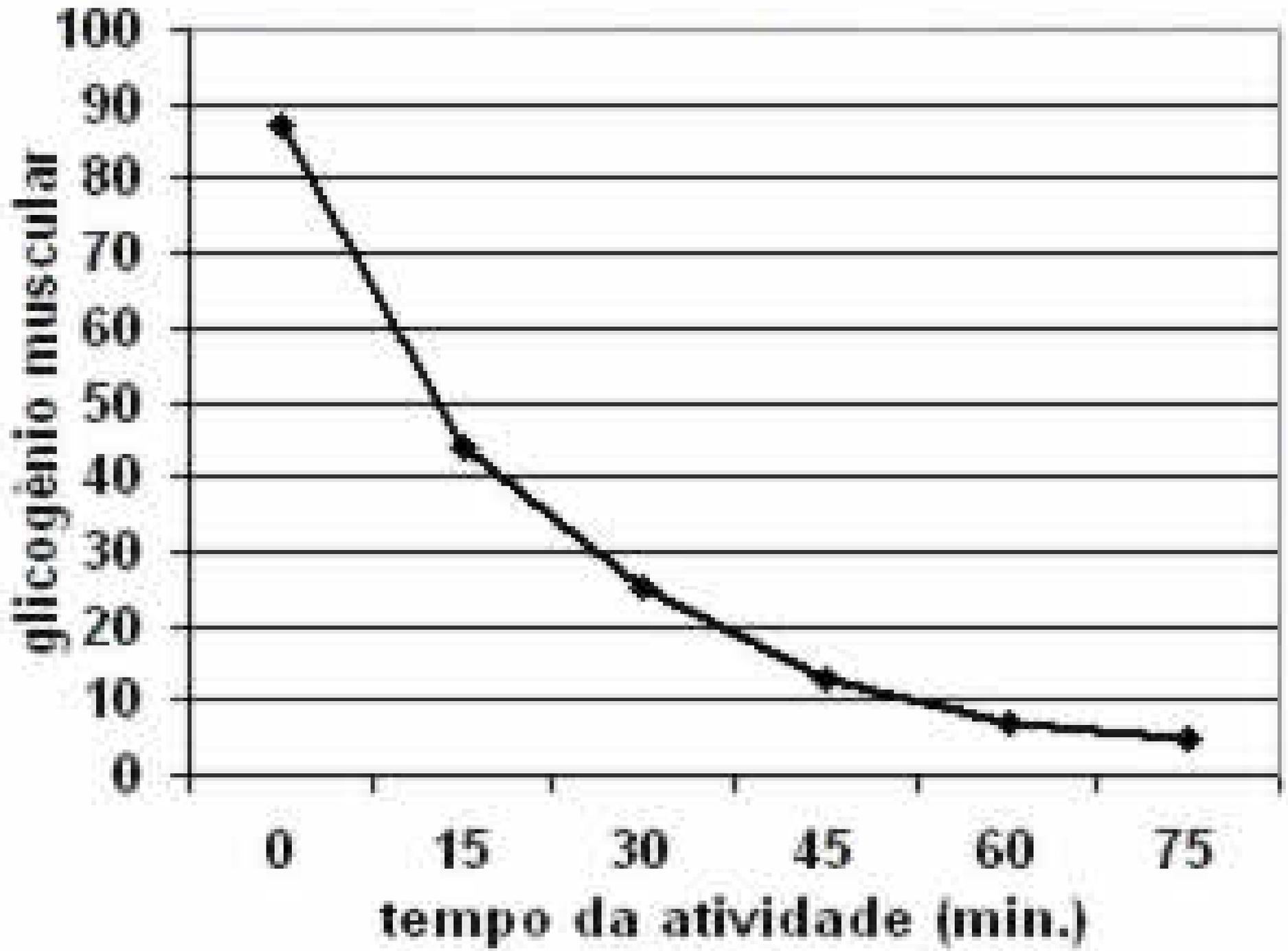
- O glicogênio e o polissacarídeo armazenado no tecido animal.
- As moléculas de glicogênio geralmente são grandes e podem consistir em centenas a milhares de moléculas de glicose.
- As células armazenam glicogênio como um meio de suprir carboidratos como fonte energética.

ALIMENTO	IG
<i>Müsli</i> <sup>®</sup>	80
Banana	83
Arroz branco	81
Laranja	62
Manga	80
Macarrão	64
Feijão cozido	69
Batata-doce	77
Chocolate	84
Pipoca	79

# Carboidratos

- Por exemplo: durante o exercício, as células musculares individuais quebram o glicogênio em glicose (glicogenólise) e a utilizam como fonte de energia para a contração. Por outro lado, a glicogenólise também ocorre no fígado, com a glicose livre sendo liberada na corrente sanguínea e transportada aos tecidos por todo o corpo.
- O importante para o metabolismo do exercício é que o glicogênio é armazenado tanto nas fibras musculares quanto no fígado.

<b>Carboidratos Rapidamente Oxidados (~ 60g/h)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>■ Glicose (açúcar formado pela quebra do amido)</li><li>■ Sacarose (açúcar de mesa – glicose mais frutose)</li><li>■ Maltose (duas moléculas de glicose)</li><li>■ Maltodextrinas (proveniente da quebra do amido)</li><li>■ Amilopectina (proveniente da quebra do amido)</li></ul>
<b>Carboidratos Oxidados Lentamente (~ 30g/h)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>■ Frutose (açúcar encontrado no mel, frutas, etc.)</li><li>■ Galactose (açúcar encontrado na beterraba)</li><li>■ Isomaltulose (açúcar encontrado no mel e cana de açúcar)</li><li>■ Trealose (açúcar encontrado em microorganismos)</li><li>■ Amilose (obtido a partir da quebra do amido)</li></ul>



# Gorduras

- A gordura corporal armazenada é um combustível ideal para o exercício prolongado, já que estas moléculas contêm grandes quantidades de energia por unidade de peso.
- São insolúveis em água e podem ser encontradas tanto em vegetais como em animais, podem ser classificadas quanto a 4 grupos:

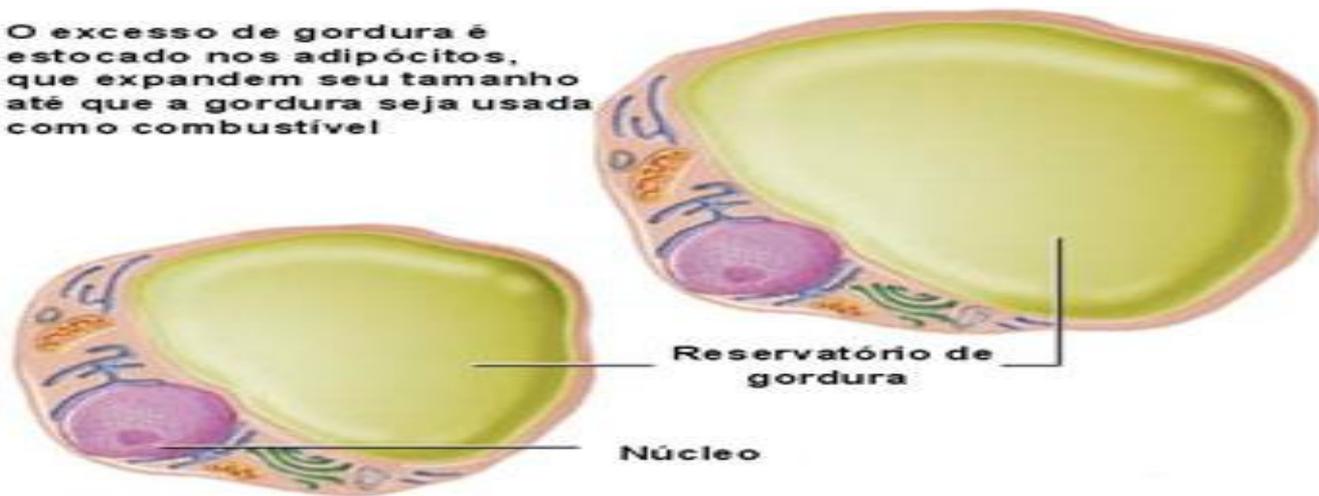
ácidos graxos  
triglicerídeos  
fosfolipídeos  
esteróides

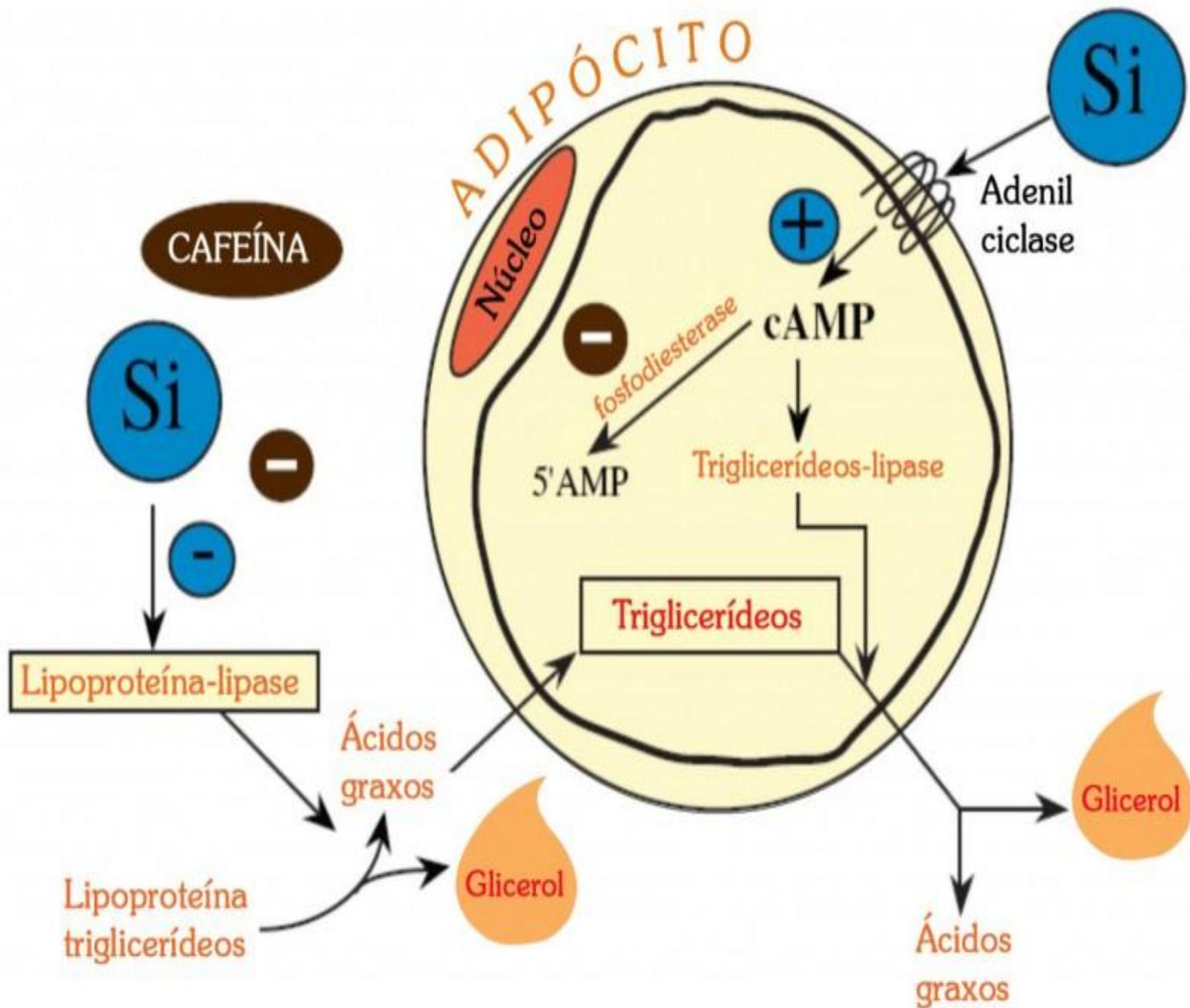


# Gorduras

- Os ácidos graxos são o principal tipo de gordura utilizada pelas células musculares para o fornecimento de energia. Estes são armazenados no corpo como triglicerídeos, que são compostos por três moléculas de ácido graxo e uma de glicerol (tipo de álcool).
- O maior local de armazenagem do triglicerídeo é a célula adiposa, mas elas também são armazenadas em muitos tipos de células incluindo o músculo esquelético.

O excesso de gordura é estocado nos adipócitos, que expandem seu tamanho até que a gordura seja usada como combustível



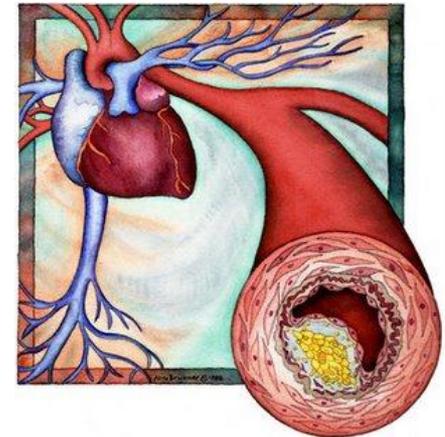


# Gorduras

- Em momentos de necessidade, os triglicerídeos podem ser quebrados em ácidos graxos sendo utilizado como substrato energético pelo músculo e outros tecidos.
- O processo de degradação de triglicerídeo em ácidos graxos e glicerol é denominado lipólise e é regulado pela enzima lipase.
- O glicerol liberado pela lipólise não é uma fonte direta de utilização para o músculo mas, pode ser utilizado pelo fígado para sintetizar glicose.
- Os fosfolipídeos não são utilizados como fonte energética pelo músculo esquelético durante o exercício.

# Gorduras

- Eles mantêm a integridade estrutural das membranas celulares e provisão de uma bainha de isolamento em torno das fibras nervosas.
- Os esteróides são utilizados como fonte energética. Dentre eles o colesterol, o mais comum.
- O colesterol é um componente de todas as membranas celulares. Pode ser consumidos em alimentos, é sintetizado em qualquer célula do corpo, têm um papel estrutural na membrana e é necessário para a síntese de hormônios sexuais (progesterona, estrogênio e testosterona).



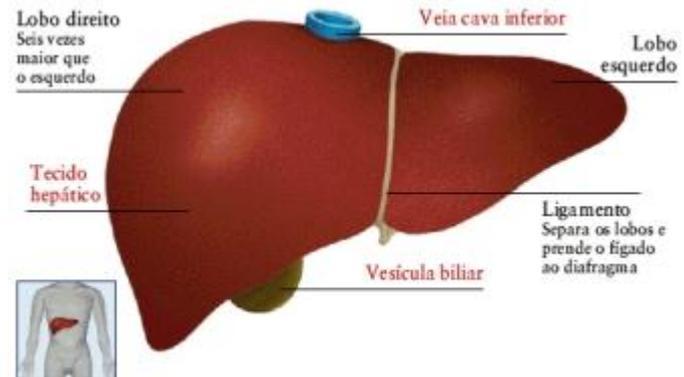
# Proteínas

- As proteínas são compostas de muitas subunidades chamadas aminoácidos.
- Nove aminoácidos chamados essenciais não podem ser sintetizados pelo corpo e, desta forma, consumidos em alimentos.



# Proteínas

- As proteínas podem contribuir com energia para o exercício de duas maneiras:
- O aminoácido alanina pode ser convertido no fígado em glicose, que pode ser então utilizada para sintetizar glicogênio. O glicogênio hepático pode ser degradado em glicose e transportado para o músculo esquelético.
- Muitos aminoácidos (isoleucina, valina, alanina, leucina...) podem ser convertidos em intermediários metabólicos (compostos que podem participar diretamente da bioenergética) nas células musculares e contribuir diretamente como combustível.

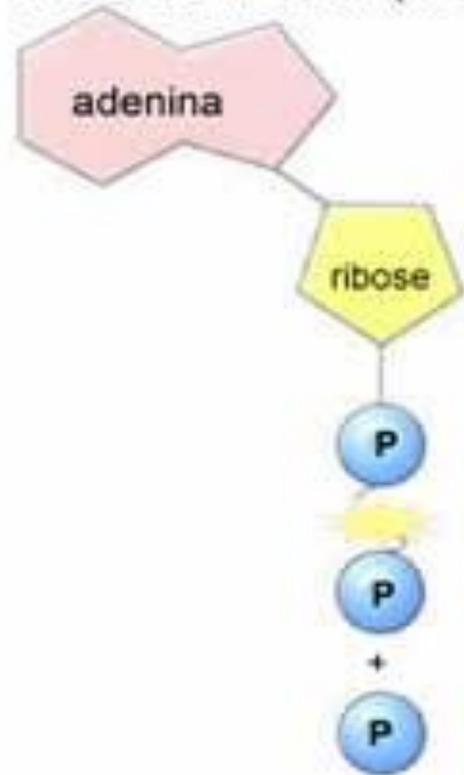


		2. <sup>a</sup> BASE					
		U	C	A	G		
1. <sup>a</sup> BASE	U	<b>UUU</b> } Fenilalanina (Fen) <b>UUC</b> } <b>UUA</b> } Leucina (Leu) <b>UUG</b> }	<b>UCU</b> } <b>UCC</b> } Serina (Ser) <b>UCA</b> } <b>UCG</b> }	<b>UAU</b> } Tirosina (Tir) <b>UAC</b> } <b>UAA</b> Codão de finalização <b>UAG</b> Codão de finalização	<b>UGU</b> } Cisteína (Cis) <b>UGC</b> } <b>UGA</b> Codão de finalização <b>UGG</b> Triptofano (Trp)	U C A G	3. <sup>a</sup> BASE
	C	<b>CUU</b> } <b>CUC</b> } Leucina (Leu) <b>CUA</b> } <b>CUG</b> }	<b>CCU</b> } <b>CCC</b> } Prolina (Pro) <b>CCA</b> } <b>CCG</b> }	<b>CAU</b> } Histidina (His) <b>CAC</b> } <b>CAA</b> } Glutamina (Glu) <b>CAG</b> }	<b>CGU</b> } <b>CGC</b> } Arginina (Arg) <b>CGA</b> } <b>CGG</b> }		
	A	<b>AUU</b> } <b>AUC</b> } Isoleucina (Ile) <b>AUA</b> } <b>AUG</b> Metionina (Met) codão de iniciação	<b>ACU</b> } <b>ACC</b> } Treonina (Tre) <b>ACA</b> } <b>ACG</b> }	<b>AAU</b> } Asparagina (Asn) <b>AAC</b> } <b>AAA</b> } Lisina (Lis) <b>AAG</b> }	<b>AGU</b> } Serina (Ser) <b>AGC</b> } <b>AGA</b> } Arginina (Arg) <b>AGG</b> }		
	G	<b>GUU</b> } <b>GUC</b> } Valina (Val) <b>GUA</b> } <b>GUG</b> }	<b>GCU</b> } <b>GCC</b> } Alanina (Ala) <b>GCA</b> } <b>GCG</b> }	<b>GAU</b> } Ácido aspártico (Asp) <b>GAC</b> } <b>GAA</b> } Ácido glutâmico (Glu) <b>GAG</b> }	<b>GGU</b> } <b>GGC</b> } Glicina (Gli) <b>GGA</b> } <b>GGG</b> }		

# Fosfatos de alta energia

- A fonte imediata de energia para a contração muscular é o composto de fosfato de alta energia: trifosfato de adenosina (ATP).
- Ela é a mais importante molécula transportadora de energia da célula.
- Estrutura do ATP:
  - Adenina
  - Ribose
  - 3 fosfatos ligados
- A formação do ATP ocorre a partir da combinação de difosfato de adenosina (ADP) e do fosfato inorgânico (Pi), exigindo uma grande quantidade de energia.
- Ligação de alta energia, que une o ADP e o Pi.

adenosina difosfato (ADP)

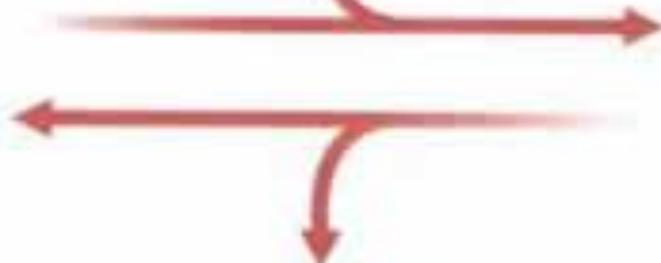
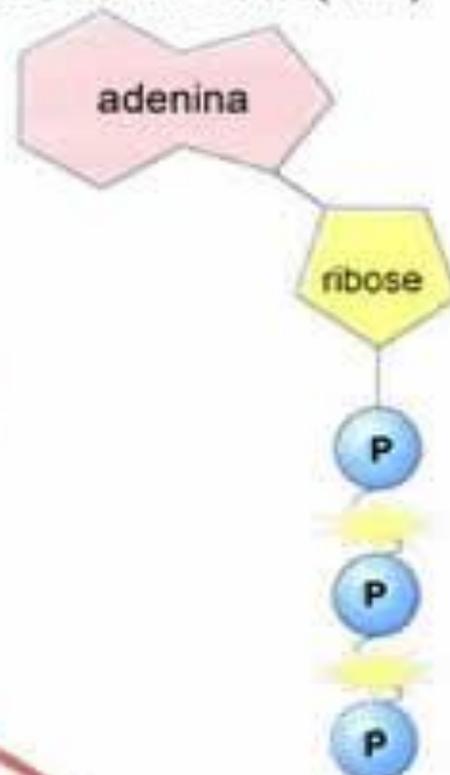


respiração



energia

adenosina trifosfato (ATP)



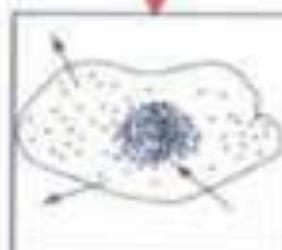
energia



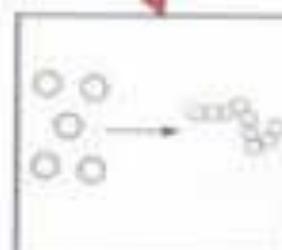
produção de calor



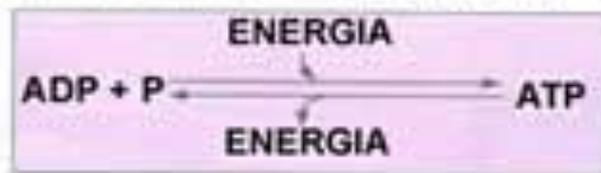
contração muscular



transporte ativo

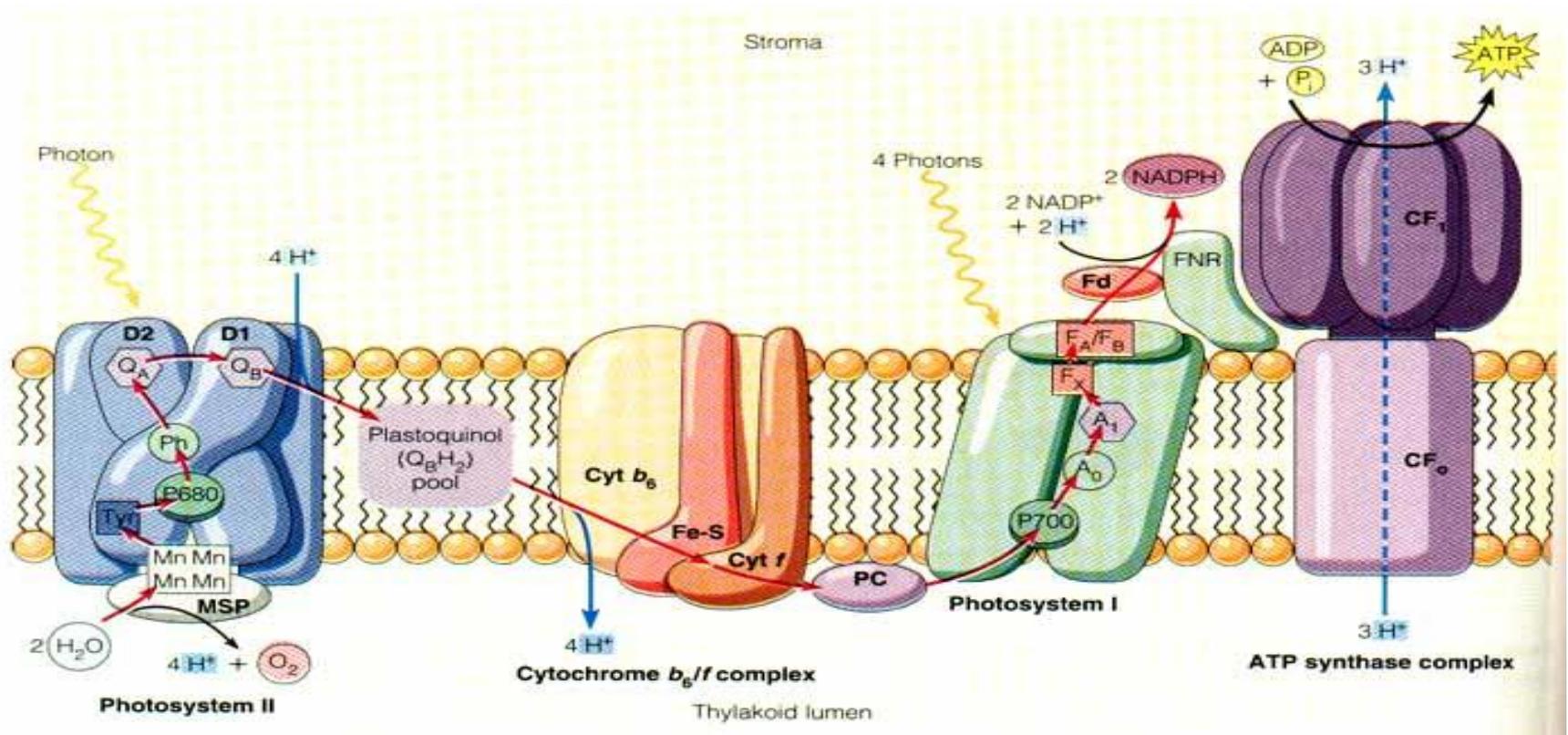


síntese de substâncias



# ATP

- Quando a enzima ATPase rompe essa ligação, a energia é liberada e pode ser utilizada para realizar o trabalho.



# Bioenergética

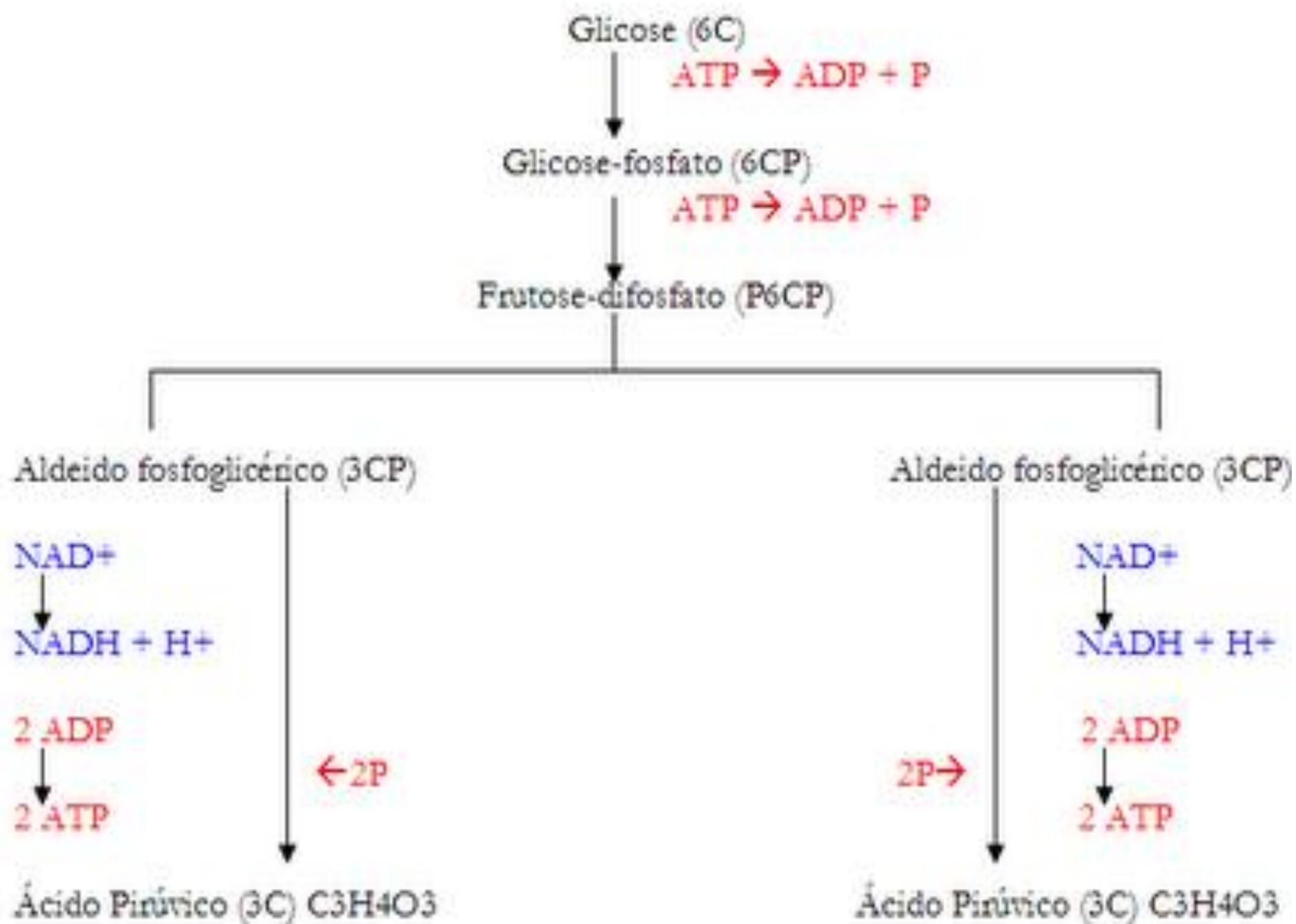
- As células musculares armazenam quantidades limitadas de ATP, como o exercício muscular exige um suprimento constante de ATP para fornecer energia necessária à contração, devem existir vias metabólicas com capacidade de produzir ATP rapidamente.
- A formação de ATP pode ser por três vias metabólicas:
  - Degradação da fosfocreatina
  - Degradação da glicose ou do glicogênio
  - Pela via da CP e da glicólise, não envolve a utilização de  $O_2$
- Estas são as vias anaeróbicas
- A formação de ATP por meio do uso de  $O_2$  é denominada metabolismo aeróbio.

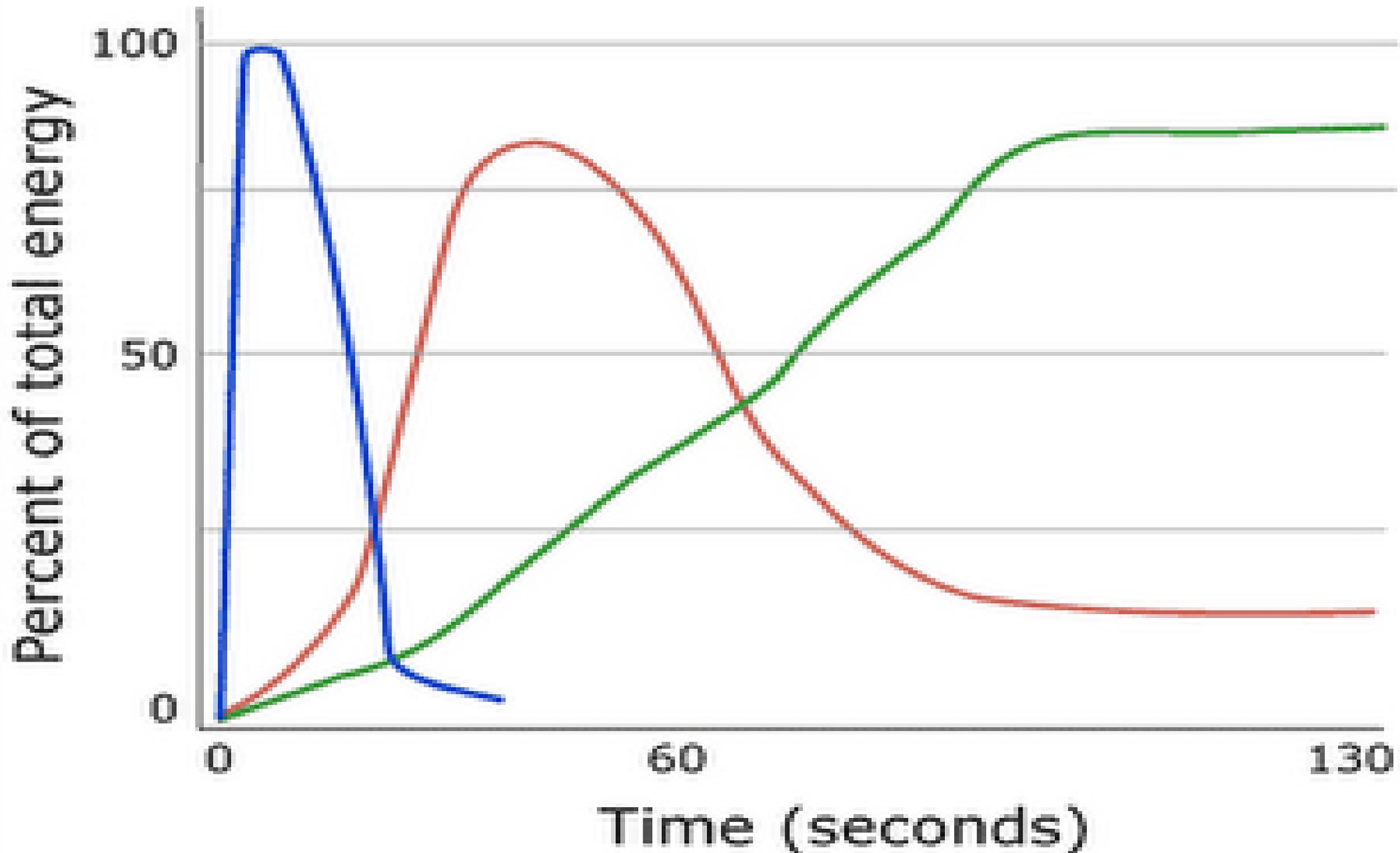
# Produção anaeróbica de ATP

- $CP + ADP \xrightarrow{\text{creatina cinase}} ATP + C$
- As células musculares armazenam somente pequenas quantidades de fosfocreatina e, conseqüentemente, a quantidade total de ATP que pode ser formado por essa reação é limitado.
- A combinação de ATP e da fosfocreatina armazenados é denominado sistema ATP – CP ou sistema fosfagênio. Esse sistema provê energia para a contração muscular no início do exercício e durante o exercício de curta duração e alta intensidade. Atividades que exijam alguns segundos para serem completadas, que necessitam de um suprimento rápido de ATP.
- Uma segunda via metabólica capaz de produzir ATP rapidamente sem o envolvimento de  $O_2$  é denominada glicólise.

# Produção anaeróbia de ATP

- A glicólise envolve a degradação de glicose ou glicogênio para formar moléculas de ácido pirúvico ou ácido láctico.
- Tanto o NAD quanto o FAD transportam hidrogênios e seus elétrons associados para serem utilizados para a geração posterior de ATP na mitocôndria por processos aeróbios.
- Primeiro, se houver  $O_2$  suficiente disponível, os hidrogênios do NADH podem ser lançados para a produção aeróbia de ATP.
- Segundo, se o  $O_2$  não estiver disponível para aceitar hidrogênios nas mitocôndrias, o ácido pirúvico pode aceitá-los para formar ácido láctico.
- Portanto a razão da formação do ácido láctico é a reciclagem no NAD de maneira que a glicólise possa continuar.



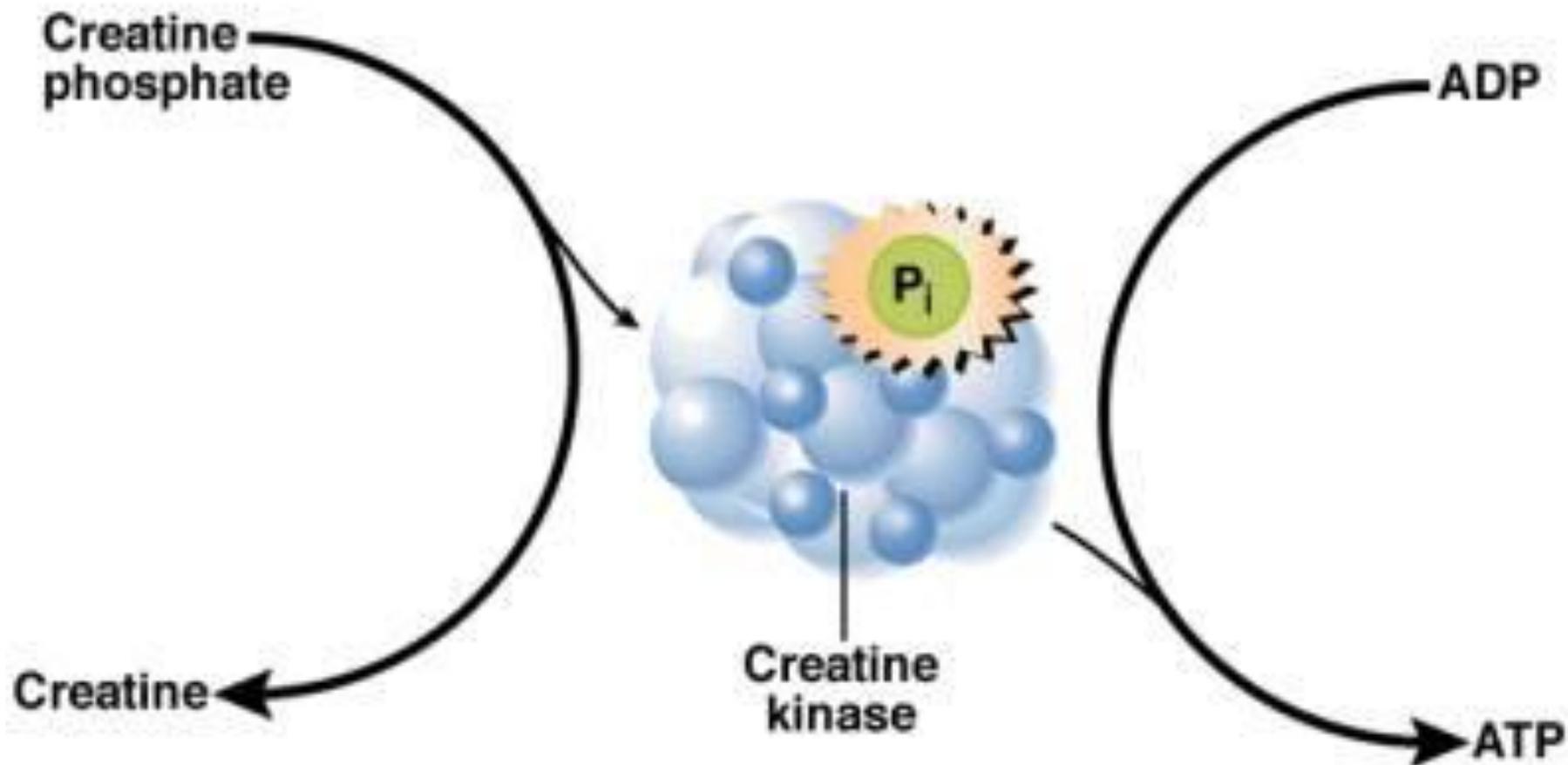


Phosphagen —————  
Glycolytic —————  
Oxidative —————

# Creatina

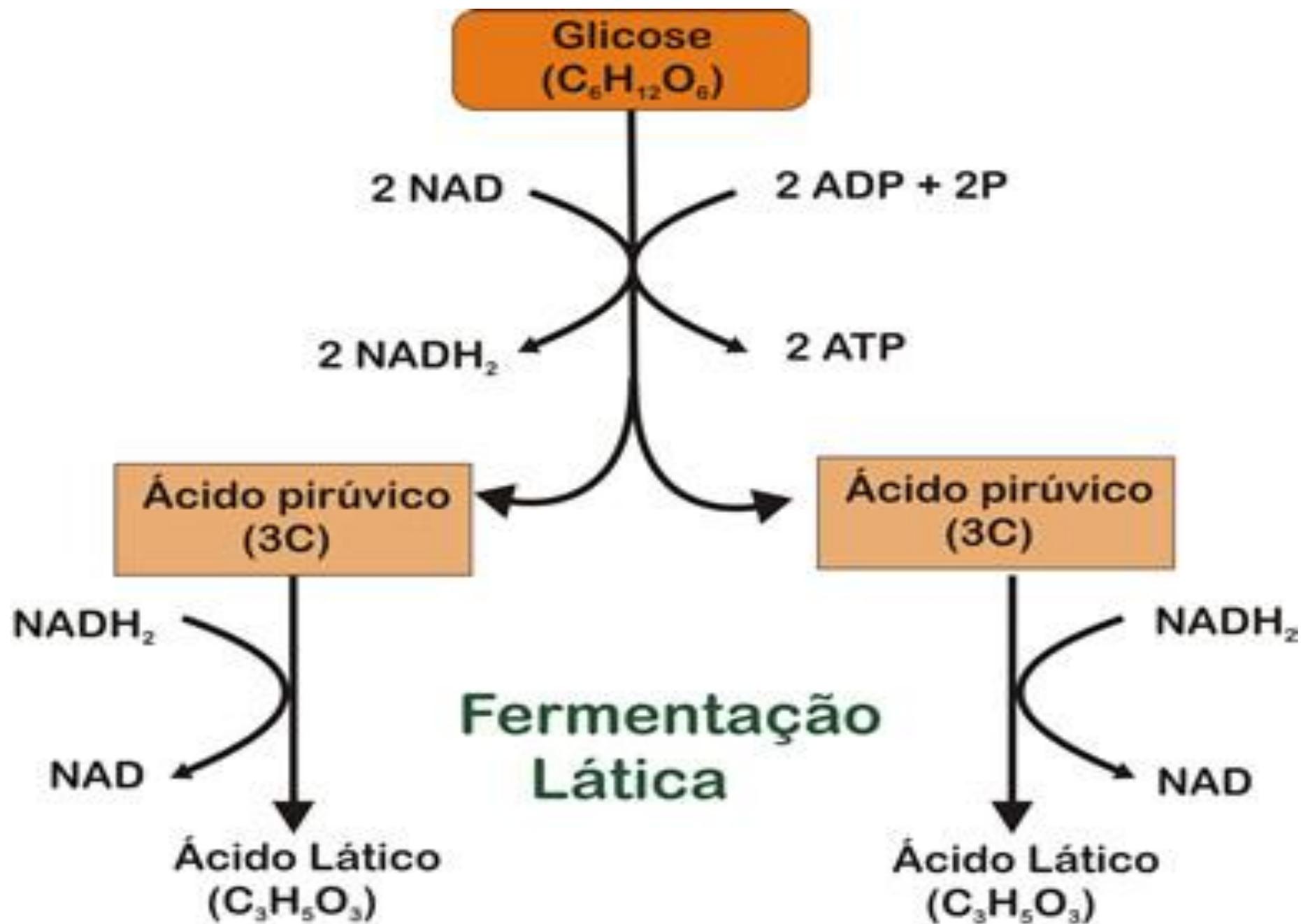
- A depleção de fosfocreatina (CP) pode limitar o desempenho durante o exercício de curta duração e alta intensidade porque ela acarreta uma redução da taxa de produção de ATP pelo sistema ATP-CP.
- A suplementação de creatina acarreta ganho de peso por causa da retenção líquida, comprometendo o desempenho em atividades de sustentação de peso, como a corrida.
- Efeitos colaterais – Não existe uma resposta definitiva, embora relatos indiquem que possa estar associado a efeitos negativos como náuseas, disfunção neurológica, desconforto gastrointestinal, câimbras, comprometimento renal.
- Possibilidade de contaminação do produto – pode conter outros compostos químicos além da creatina.

# Phosphagen System — Creatine Kinase



# Ácido láctico ou lactato?

- Estão relacionados mas são moléculas tecnicamente diferentes.
- Os músculos esqueléticos em atividade podem produzir ácido láctico. No entanto, este ácido é instável e é rapidamente convertido em sua base conjugada, o lactato. Por essa razão, o ácido láctico é a molécula mãe e o lactato é o descendente.
- A ionização do ácido láctico forma a base conjugada denominada lactato. No pH normal, o ácido láctico rapidamente dissocia-se para formar lactato. Por essa razão, embora o músculo esquelético produza ácido láctico, este raramente existe no corpo por ser convertido em sua base conjugada, o lactato.



# Produção aeróbia de ATP

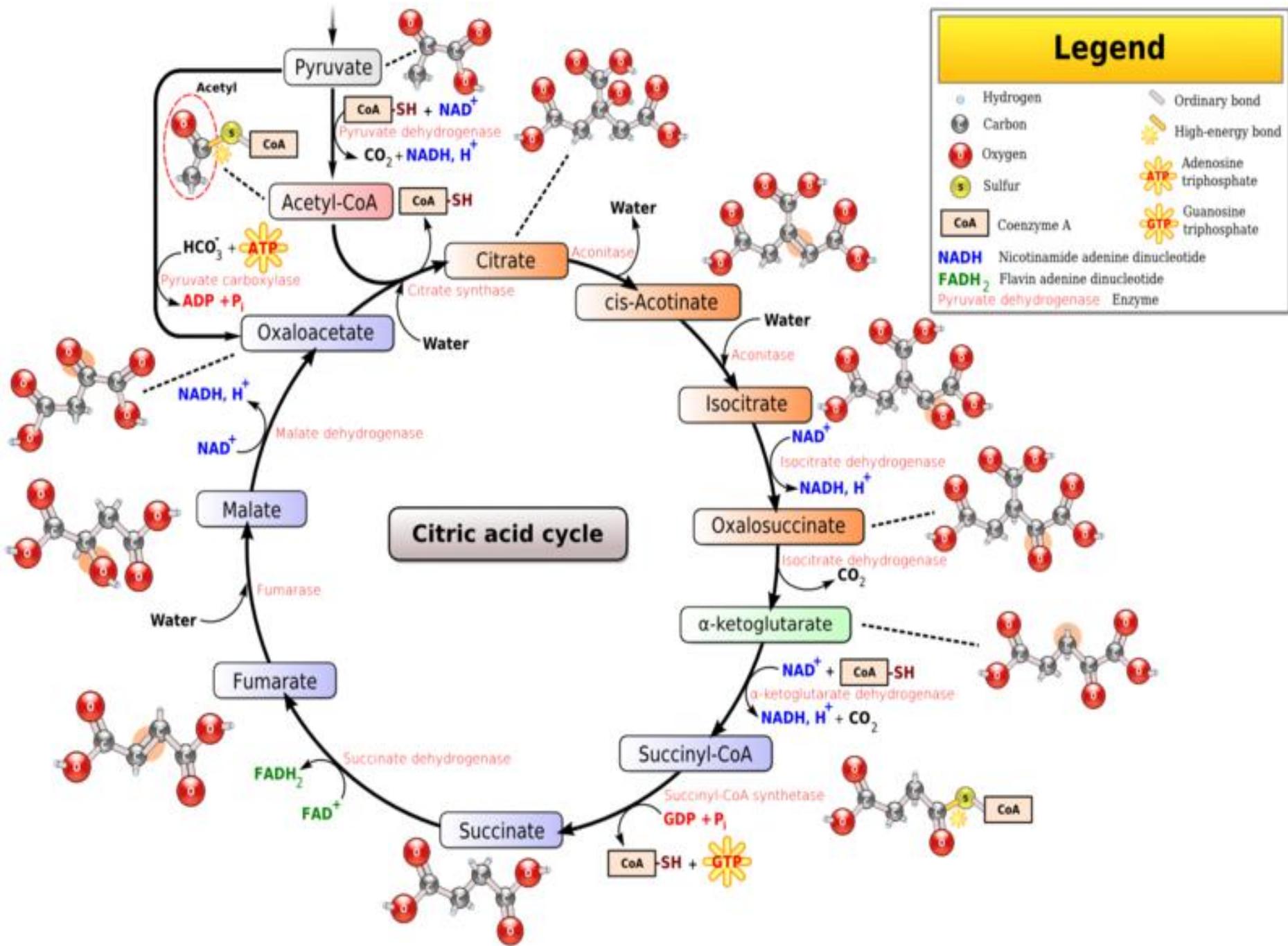
- A produção aeróbia de ATP ocorre no interior das mitocôndrias e envolve a interação de duas vias metabólicas: o ciclo de Krebs e a cadeia de transporte de elétrons.
- A principal função do ciclo de Krebs (ciclo do ácido cítrico) é completar a oxidação de carboidratos, gorduras ou proteínas, utilizando NAD e FAD como transportadores de hidrogênio.
- O oxigênio não participa das reações do ciclo mas é o acceptor final de hidrogênio no fim da cadeia de transporte de elétrons.
- O processo de produção aeróbia de ATP é denominado fosforilação oxidativa, onde existem três estágios:
  1. Geração de uma molécula fundamental com dois carbonos, o acetil-CoA.

# Produção aeróbia de ATP

2. Oxidação do acetil-CoA no ciclo de Krebs.

3. Processo de fosforilação oxidativa (formação de ATP) na cadeia de transporte de elétrons (cadeia respiratória).

- Ciclo de Krebs - a principal função é remover hidrogênios e a energia associada a a esses hidrogênios de vários substratos envolvidos no ciclo.
- Além da produção de NADH e FADH, o ciclo de Krebs acarreta a formação direta de um composto rico em energia, a guanosina trifosfato (GTP).
- Cadeia de Transporte de Elétrons (cadeia respiratória ou cadeia do citocromo) – via responsável pela fosforilação oxidativa nas mitocôndrias.



# *Ciclo de Krebs Como Fator Limitante na Utilização de Ácidos Graxos Durante o Exercício Aeróbico*

---

## RESUMO

Os ácidos graxos (AG) representam uma fonte importante de energia durante exercícios de intensidade leve ou moderada, e principalmente naqueles de duração prolongada. A utilização dos AG pelos músculos esqueléticos depende de passos importantes como a mobilização, transporte via corrente sanguínea, passagem pelas membranas plasmática e mitocondrial,  $\beta$ -oxidação e, finalmente, a oxidação no ciclo de Krebs e atividade da cadeia respiratória. O exercício agudo e o treinamento induzem adaptações que possibilitam maior aproveitamento dos AG como fonte de energia, ao mesmo tempo em que o glicogênio muscular é preservado. Contudo, as tentativas de manipulação da dieta e suplementação com agentes ativos para aumentar a mobilização e utilização dos AG durante o exercício não apresentam resultados conclusivos. Nesse trabalho, a hipótese de que o ciclo de Krebs é o fator limitante da utilização de ácidos graxos pelo tecido muscular no exercício prolongado é apresentada. (*Arq Bras Endocrinol Metab* 2003;47/2:135-143)

**Descritores:** Exercício; Oxidação de ácidos graxos; Agentes lipolíticos; Ciclo de Krebs; Glicogênio

---

revisão

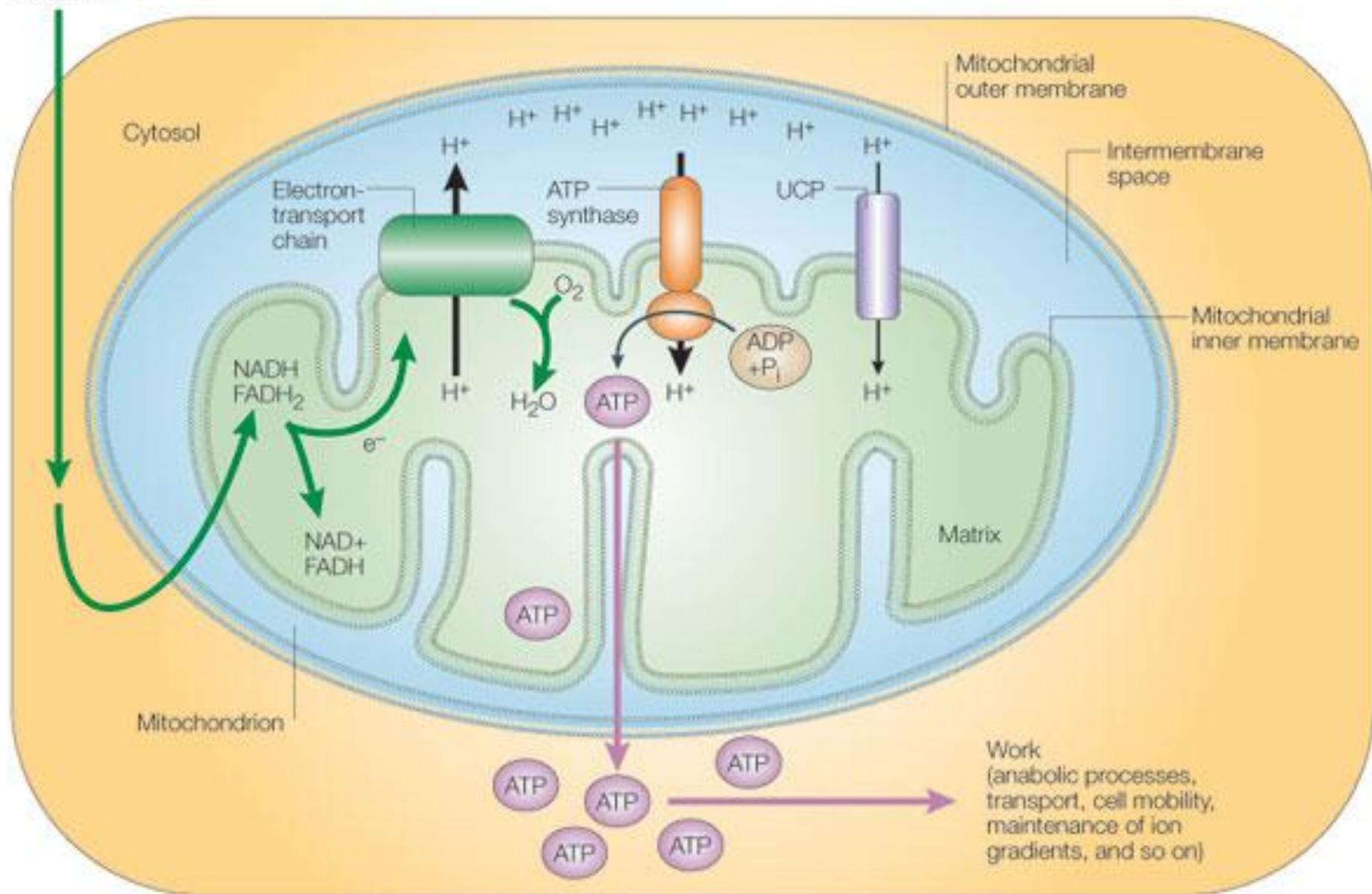
*Rui Curi  
Cláudia J. Lagranha  
Jair Rodrigues G. Jr  
Tania Cristina Pithon-Curi  
Antonio Herbert Lancha Jr  
Ídico L. Pellegrinotti  
Joaquim Procopio*

*Laboratório de Fisiologia Celular  
(RC, CJL, JP), Departamento de  
Fisiologia e Biofísica, Instituto de  
Ciências Biomédicas,  
Universidade de São Paulo;  
Departamento de Educação Física*

# Produção aeróbia de ATP

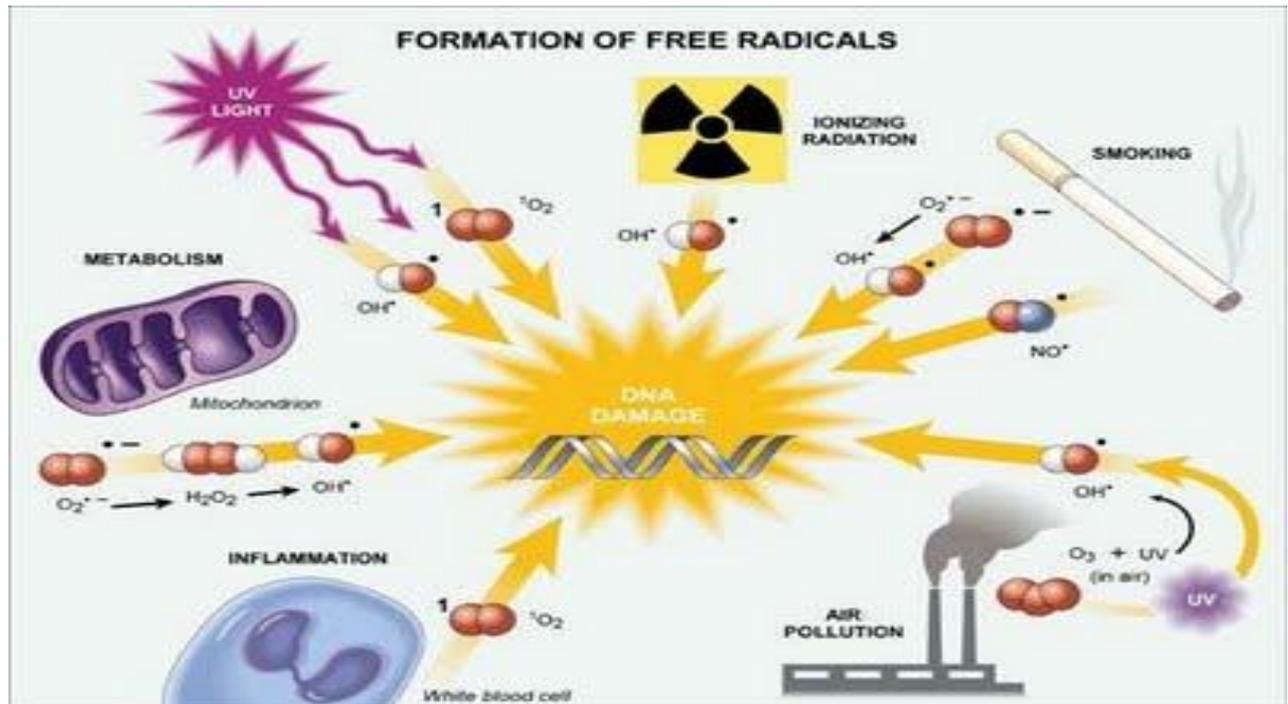
- Os transportadores de hidrogênio reduzidos (NADH e FADH) não reagem diretamente com o oxigênio. Em vez disso, os elétrons removidos dos átomos de hidrogênio são passados por uma série de transportadores de elétrons conhecidos como citocromos. Durante essa passagem é liberada uma quantidade suficiente de energia para refosforilar o ADP em ATP em três locais diferentes. A medida que os elétrons passam pela cadeia transporte de elétrons são formadas moléculas altamente reativas denominadas radicais livres.

Fatty acids  
Glucose



# Produção aeróbica de ATP

- Os radicais livres se ligam a moléculas e essa combinação causa dano a molécula que se liga ao radical. No músculo pode contribuir para a fadiga muscular e redução da atividade de várias enzimas no ciclo de Krebs. Estes são formados em maiores taxas durante o exercício de alta intensidade ou prolongado.

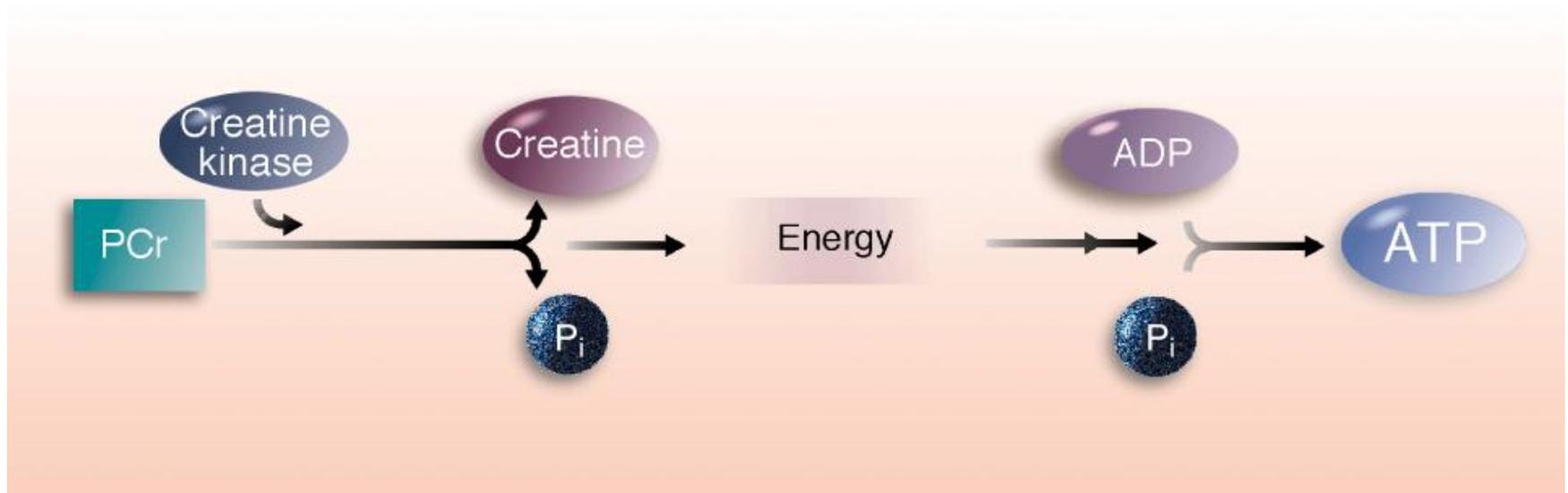


# Controle da bioenergética

- Controle do Sistema ATP-CP: A degradação da fosfocreatina é regulada pela atividade da creatina cinase. A creatina cinase é ativada quando as concentrações de ADP sarcoplasmático aumentam e é inibida por níveis elevados de ATP.
- No início do exercício, o ATP é clivado em ADP + Pi para fornecer energia à contração muscular. Esse aumento imediato da concentração de ADP estimula a creatina cinase a disparar a degradação da CP para ressintetizar ATP. Se o exercício continuar a glicólise e o metabolismo aeróbio começam a produzir a quantidade adequada de ATP para suprir as demandas energéticas dos músculos.

# Controle da bioenergética

- O aumento da concentração de ATP, associado à redução da concentração de ADP, inibe a atividade da creatina cinase.
- Exemplo de retroalimentação negativa.



# Controle da bioenergética

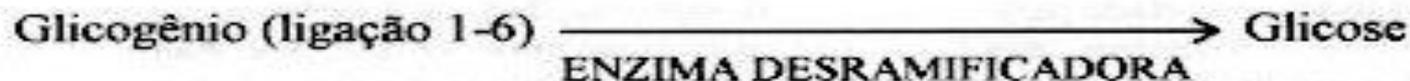
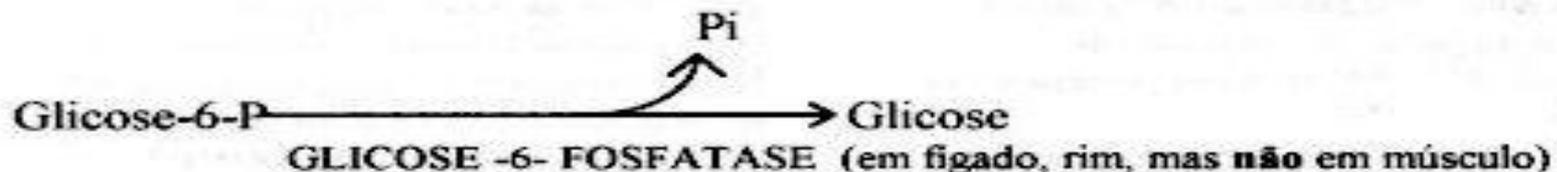
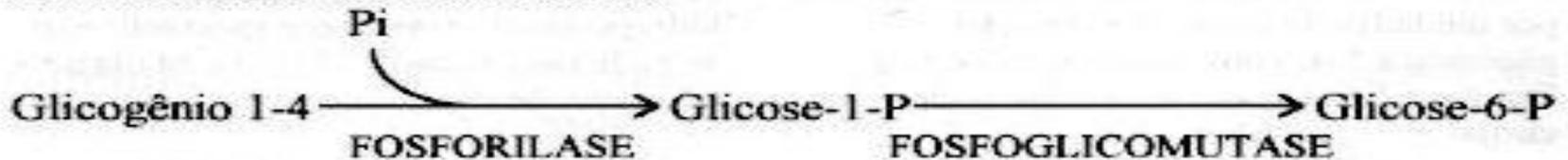
- Controle da Glicólise – A enzima limitadora da glicólise mais importante é a fosfofrutocinase (PFK).
- Quando o exercício é iniciado, os níveis de ADP+ Pi se elevam e aumentam a atividade da PFK, que serve para aumentar a velocidade da glicólise. Já em repouso, quando os níveis de ATP estão elevados a atividade da PFK é inibida, e a atividade glicolítica reduzida.

# Controle da bioenergética

- Fosforilase – responsável pela degradação de glicogênio em glicose.

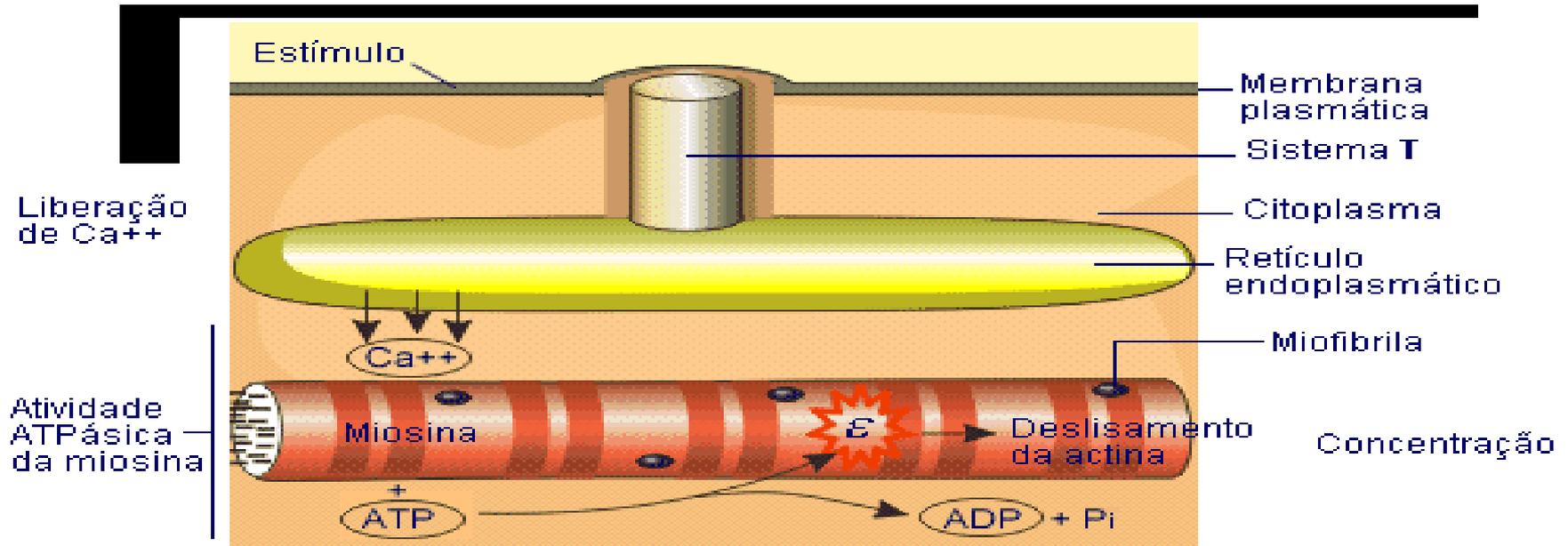
## Degradação do glicogênio: glicogenólise.

As fosforilases vão retirando glicose 1 P até sobrar uma cadeia com cerca de 4 resíduos antes da ramificação. Estes oligossacarídeos, chamados dextrina-limite, são substrato da enzima desramificadora.



# Controle da bioenergética

- Em cada contração muscular, o cálcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) é liberado no retículo sarcoplasmático do músculo. Esse aumento da concentração de  $\text{Ca}^{++}$  sarcoplasmático ativa de forma indireta a fosforilase, que começa imediatamente a degradar o glicogênio em glicose para entrar na glicólise.



# Controle da bioenergética

- Controle do ciclo de Krebs e da Cadeia de transporte de elétrons – A enzima isocitrato desidrogenase é limitadora da velocidade. Esta é inibida pelo ATP e estimulada pelos níveis elevados de ADP+Pi.
- Níveis elevados de cálcio nas mitocôndrias também estimulam a atividade da isocitrato desidrogenase. Este é o sinal para ativar o metabolismo energético nas células musculares, pois um aumento do cálcio livre no músculo é o sinal para começar a contração muscular.

# Controle da bioenergética

- Cadeia de transporte de elétrons – quando o exercício começa os níveis de ATP diminuem, os de ADP+Pi aumentam e a citocromo oxidase é estimulada a iniciar a produção aeróbia de ATP. Quando o exercício é interrompido os níveis celulares de ATP aumentam e as concentrações de ADP+Pi diminuem, e então a atividade da cadeia de transporte de elétrons é reduzida quando os níveis normais de ATP, ADP e Pi são atingidos.
- Quanto menor a duração das atividades máximas, maior a contribuição da produção anaeróbia de energia, e quanto maior for a duração da atividade, maior será a contribuição da produção aeróbia de energia.



## Sistema fosfato

**8-10 segundos** (100 m)

**Velocista**



## Sistema ácido láctico-glicólise

**1,3-1,6 minutos** (400 m)

**Nadador**



## Respiração aeróbica

**Maratonista**

**Tempo limitado** (15 Km)

©2000 How Stuff Works

# Fim

Pesquisa sobre resposta metabólica ao exercício/  
duração do exercício e seleção do substrato

