

Carboidratos e seu metabolismo

Os carboidratos, para peixes representam um grupo nutricional complexo. Isso se dá porque não há uma exigência estabelecida de carboidratos para peixes ou outros organismos aquáticos. Entretanto, sua ausência na dieta leva ao catabolismo de proteínas e lipídios para síntese de energia. Dessa forma, a inclusão adequada de carboidratos na dieta pode prevenir o uso de proteína para geração de energia e minimizar a excreção de compostos nitrogenados para a água (Fracalossi et al., 2012 – Nutriaqua). Com relação à sua utilização adequada nas dietas, é dito que os carboidratos apresentam efeito poupador de proteína, pois vão fazer com que a energia seja retirada dos alimentos ricos em carboidratos e não dos proteicos. (se você estiver com dúvida, verifique a aula de “Proteínas e seu metabolismo”, há mais explicações).

Os ingredientes de origem vegetal (Veja mais na aula de “Alimentos e aditivos”), ricos em carboidratos apresentam grande potencial de utilização em dietas para a maioria dos peixes (salmão é uma das exceções), visto sua alta disponibilidade como produto e subproduto da agroindústria (milho, trigo, trigoilho, sorgo, etc.), e consequente baixo custo (R\$ 41,62 saca de 60 kg de milho no dia 20/03/2018 – Notícias agrícolas.com.br). Porém, ingredientes vegetais contêm uma alta proporção de amido e fibras, além de fatores antinutricionais que podem provocar efeitos adversos sobre o valor nutricional e palatabilidade, assim como reduzir a digestibilidade da dieta e dos macronutrientes (Fracalossi et al., 2012 – Nutriaqua).

Caracterização dos carboidratos nos ingredientes de origem vegetal

Classificados geralmente em duas categorias: polissacarídeos de reserva (amido) e polissacarídeos estruturais ou não amiláceos (PNA's ou NSP do inglês *non-starch polysacharides*). Os PNA's são polímeros de pentoses (arabinose e xilose) e hexoses (glicose, frutose e galactose), unidades básicas que se combinam dando origem a dois grupos principais: β -glicanos e heteroglicanos. A celulose está no primeiro grupo, formando a fração insolúvel (fibra insolúvel em água), as pectinas e hemiceluloses estão no segundo grupo, e formam a fração solúvel (fibras solúveis em água). Estes carboidratos, junto com a lignina, constituem a principal fração das fibras.

Nota: Pentoses e hexoses são monossacarídeos formados por uma cadeia contendo cinco ou seis átomos de carbono, respectivamente.

A fibra alimentar é definida como qualquer material comestível que não seja hidrolisado pelas enzimas endógenas do trato digestório humano (no final desse resumo haverá mais descrição sobre as fibras).

Tabela 1. Composição química, valores energéticos e área superficial específica dos grânulos de amido de algumas fontes de carboidrato (Fonte: Rostagno et al., 2005).

Nutriente	Fontes de carboidrato			
	Quirera de arroz	Milho moído	Farelo de trigo	Fécula de mandioca
	------(%)-----			
Matéria seca	88,04	87,11	88,00	86,54 ³
Proteína bruta	8,47	8,26	15,52	0,61 ³
Extrato etéreo	1,22	3,61	3,46	0,08 ³
Amido	74,45	62,48	31,35	85,79 ³
Amilose	20,00 ¹	28,00 ¹	26,00 ¹	16,00 ²
Fibra bruta	0,55	1,73	9,66	-
Fibra em detergente neutro	4,28	11,75	40,59	-
Fibra em detergente ácido	7,43	3,54	13,85	-
Extrato não nitrogenado	76,83	72,24	54,56	-
Cinzas	0,97	1,27	4,79	0,06 ³
Energia bruta (kcal kg ⁻¹)	3846	3925	3919	3471 ³
Área superficial específica dos grânulos de amido [área (10 ⁻³ cm ² g ⁻¹) ⁻¹] ⁴	8,3	3,3	2,9	2,9

¹ International Starch Institute (2008) e Sagum e Arcot (2000).

² Schmitz et al. (2006).

³ Laboratório de Nutrição de Espécies Aquícolas (LABNUTRI), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

⁴ Tatsumi et al. (2007).

Tipos de carboidratos

Monossacarídeos → açúcares simples (glicose, frutose e galactose).

Dissacarídeos → são compostos formados por duas moléculas de monossacarídeos. Exemplos de dissacarídeos: sacarose (glicose + frutose), maltose (glicose + glicose) e lactose (glicose + galactose).

Oligossacarídeos → compostos formados pela união de 3 a 10 monossacarídeos (mais comuns são 6 monossacarídeos unidos).

Polissacarídeos → são compostos formados pela união de mais de 10 monossacarídeos (pode ter mais de 100). Exemplo de polissacarídeos são: glicogênio (muitas glicoses), amido (principal fonte de energia em dietas de organismos aquáticos) e celulose (não utilizada por organismos aquáticos de forma eficiente).

Portanto, o amido é uma fonte de carboidrato utilizada por peixes e camarões com boa eficiência.

Amido x celulose

Tanto o amido como a celulose são polímeros de glicose (C₆H₁₂O₆), mas entre esses dois compostos há diferenças no tipo de ligação entre a glicose, o que faz toda diferença em termos nutricionais, ou seja, essas ligações podem ou não ser quebradas, dependendo do tipo de enzima que o animal possui (Figura 1).

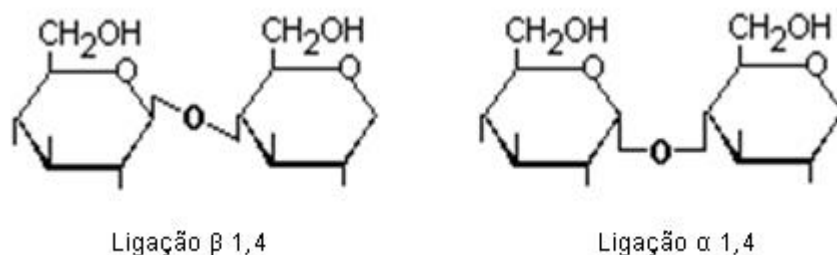


Figura1 . Representação das moléculas de celulose e de amido.

Repare que unindo as moléculas, ocorre uma diferença na ligação, enquanto no desenho, as moléculas de glicose da celulose são unidas por uma ligação transversal, nas moléculas de glicose do amido, essa representação se dá de forma reta (isso é só para representar a diferença). Isso quer dizer que no amido há ligações do tipo α -1,4, e para ser degradada, necessariamente precisará de uma enzima chamada amilase (os peixes e camarões possuem essa enzima). Para liberar a glicose da celulose, será necessário a enzima celulase que degrada a ligação β -1,4, e os peixes e camarões não possuem essa enzima.

Enzimas – carboidrases

Tabela 2. Enzimas que degradam os carboidratos

Enzima	Substrato	Produto
α -amilase	Amido	Maltose
Maltase	Oligossacarídeos	Glicose
Sacarase	Sacarose	Frutose
Sacarase	Oligossacarídeos	Glicose
Isomaltase	Isomaltose	Glicose
Isomaltase	Dextrina	Glicose
Lactase	Lactose	Galactose ou glicose

A enzima α -amilase é produzida no hepatopâncreas e liberada no intestino da maioria dos peixes, em alguns também no estômago, essa liberação ocorre em pH próximo ao neutro, por isso não é possível encontrar em todas as espécies.

Carboidratos na nutrição de organismos aquáticos

Como já dito anteriormente, organismos aquáticos não apresentam exigência nutricional por carboidratos, mas este nutriente é frequentemente utilizado como fonte de energia. Vários estudos mostram o efeito poupador de proteína, quando carboidratos são utilizados em dietas de peixes (digite no Google “Carboidratos e seu efeito poupador de proteína em peixes”).

O fornecimento de carboidratos de forma adequada é importante porque reduz o catabolismo de proteínas, para energia e gliconeogênese, o qual diminui a retenção de proteína e aumenta excreção de amônia para o ambiente (o que no fim das contas representará aumento dos custos).

O carboidrato absorvido, primariamente como glicose, pode ser (a) uma fonte imediata de energia, (b) estocado como reserva de energia na forma de glicogênio, (c) utilizado para síntese de outros compostos triacilgliceróis e aminoácidos não essenciais ou (d) excretado.

Lembrando da primeira aula, os aminoácidos não são armazenados ou estocados pelo animal, se não forem utilizados logo, eles serão excretados devido à rápida deaminação e então seus resíduos de carbono serão oxidados ou convertidos em lipídios, carboidratos ou outros compostos (resultando em acúmulo de gordura visceral, excreção nitrogenada e aumento do custo alimentar). Portanto, deve-se fornecer proteínas para atender as exigências metabólicas, assim haverá o efeito poupador da proteína dos carboidratos, uma vez que os peixes têm mais facilidade em utilizar para energia, os aminoácidos deaminados.

Se a inclusão de carboidrato na dieta for de forma excessiva aquela utilizada para a produção de energia, ocorrerá deposição de gordura visceral e baixa utilização dos outros nutrientes da dieta, pois haverá redução no consumo.

Digestibilidade

Os principais fatores que afetam a digestibilidade do amido em organismos aquáticos são:

- Origem (espécie vegetal);
- Estado físico (grau de gelatinização, peso molecular);
- Níveis de inclusão na dieta.

O grau de influência desses fatores sobre a digestibilidade em uma dada espécie está diretamente relacionado com a atividade de enzimas digestivas endógenas.

O tratamento pelo calor modifica a composição e disponibilidade de nutrientes e outros componentes da matéria-prima devido alguns fatores principais:

- Gelatinização do amido;
- Desnaturação das proteínas
- Inativação de fatores antinutricionais.

No processo de extrusão, ocorre a combinação de umidade, pressão, temperatura e corte mecânico, fazendo com que ocorra algumas mudanças na estrutura do amido.

O cozimento (extrusão) modifica todos os níveis estruturais do amido: a estrutura granular do amido desaparece, os cristais se dissolvem e as macromoléculas se despolimerizam, fazendo com que o peixe aproveite mais a dieta, aumentando a digestibilidade aparente do amido e/ou energia, e reduzindo a conversão alimentar.

No ambiente natural aquático, as fontes de carboidratos são relativamente escassas, por isso os sistemas digestório e metabólico dos peixes se adaptaram para utilizar proteína e

lipídio como fonte energética (veja o modelo do bacalhau – Figura 2). Entretanto, algumas espécies de peixes, como o pacu e a tilápia, utilizam o carboidrato dos alimentos de maneira eficiente, e essa é uma característica que diferencia os hábitos alimentares. De maneira geral, as espécies onívoras e herbívoras utilizam melhor o carboidrato que espécies carnívoras, isso porque as carboidrases tem menor atividade em carnívoros.

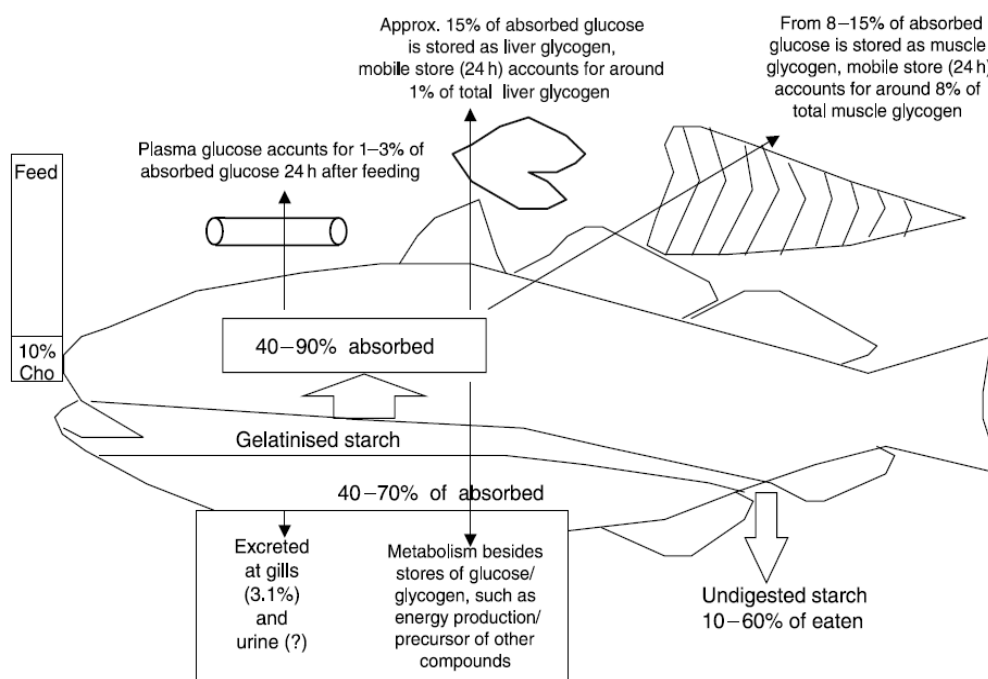


Figure 1 Distribution of an ingested carbohydrate load in Atlantic cod (*Gadus morhua*). The figure shows the relative flow radiolabelled ^{14}C -glucose into different compartments and compounds based on observation by Hemre and Kahrs (1997).

Figura 2. Modelo do bacalhau. Distribuição de um carboidrato consumido pelo bacalhau do Atlântico. A figura mostra o fluxo relativo de isótopos rotulados com ^{14}C -glicose em diferentes compartimentos e componentes baseados na observação de Hemre e Kahrs (1997).

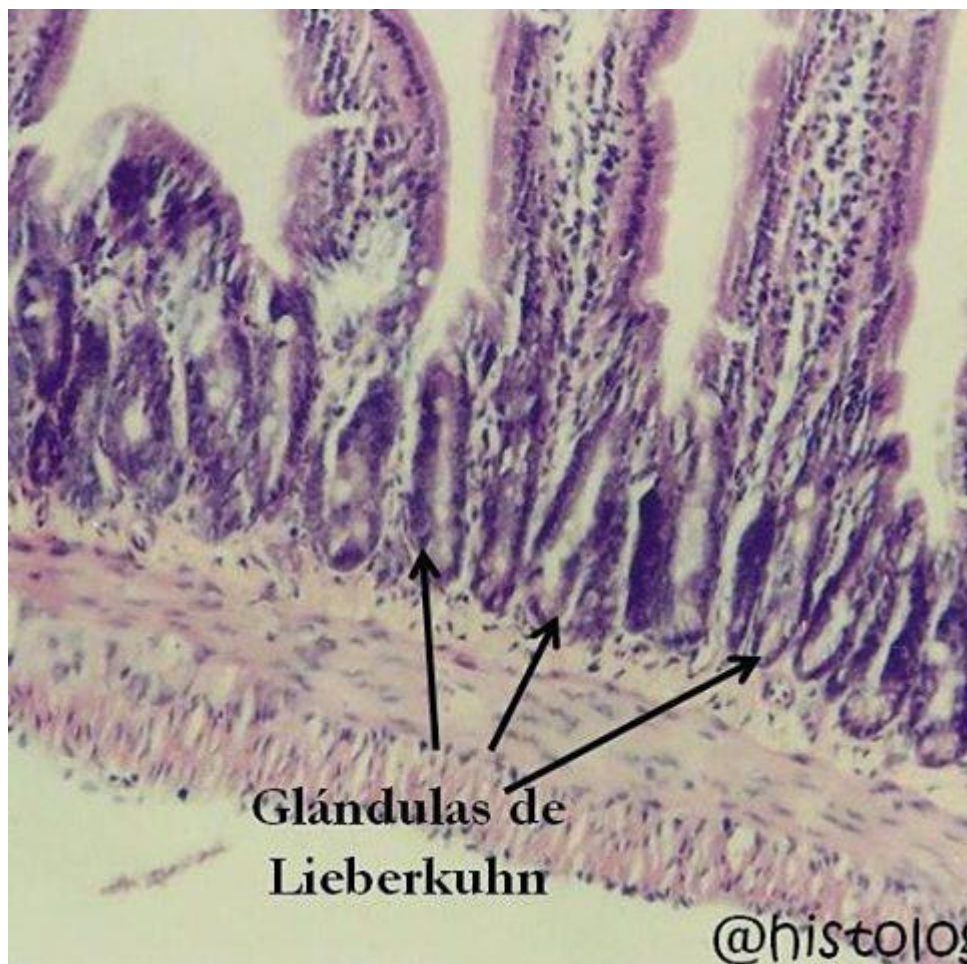
Morfologia intestinal e digestão de carboidratos

As diferenças na capacidade de utilização do carboidrato entre as espécies de peixes são reflexos da diversidade anatômica e funcional do trato digestório e órgãos associados. O comprimento do intestino repercute de modo importante em aspectos quantitativos da digestão e da absorção de alimento.

Uma explicação funcional para o longo intestino dos peixes herbívoros é que alguns dos itens da dieta, devido a sua composição, são digeridos devagar exigindo um longo tempo e extensiva exposição à mucosa intestinal para sua digestão. Já os peixes carnívoros processam uma dieta altamente digestível e densa em nutrientes, ricas em proteínas e pobre em carboidratos.

A digestão dos carboidratos é relativamente rápida nos peixes. A produção da enzima α -amilase ocorre no pâncreas (hepatopâncreas) e intestino, principalmente em espécies onívoras e herbívoras. A maior parte da digestão ocorre no intestino e cecos pilóricos. As secreções intestinais contêm um grande número de enzimas, incluindo as três maiores classes: Lipases, proteases e carboidrases.

As glândulas de Lieberkühn (glândulas tubulares simples que se encontram entre as vilosidades do intestino delgado e contêm as células caliciformes – responsáveis pela produção de muco -, células de Paneth – responsáveis pela produção de lisozimas e defensinas que podem permeabilizar e digerir a parede de bactérias – e células enteroendócrinas – produtoras de hormônios como a secretina, colecistoquinina e peptídio inibidor gástrico, que controlam a secreção e motilidade intestinal) secretam muco para proteger e lubrificar a superfície intestinal – secretando enzimas intracelulares como a sacarase, maltase, oligo-1,6-glicosidase, entre outras (Figura 3).



Glândulas de Lieberkühn. Imagem: www.pictame.com

Um grande número de diferentes carboidratos e enzimas digestivas (carboidrases), cada qual com sua ação específica, estão presentes na membrana do intestino dos peixes. Estas carboidrases, como as lipases, aparecem também no suco pancreático, estômago, intestino e bile, mas não necessariamente em todas essas partes de todas as espécies. O pâncreas (hepatopâncreas) é o maior produtor das enzimas carboidrases.

Os carboidratos possuem uma grande tolerância a temperaturas (20-40 °C) e suas atividades ótimas ocorrem em pH 6-8.

As enzimas necessárias para a degradação da maioria dos carboidratos da dieta são as dissacaridasas, endoglicosidasas e oligossacaridasas (veja a seção enzimas).

A enzima celulase, quando presente, está associada à microflora intestinal, ou ao conteúdo estomacal e intestinal de algumas presas ingeridas. As celulasas foram encontradas no trato digestivo de diversos peixes, mas aparentemente toda sua produção é originária de bactérias simbióticas.

Os peixes carnívoros e de águas frias apresentam secreção e atividade de amilase limitada no trato intestinal, sendo suficiente apenas para digerir uma pequena quantidade de carboidratos (por isso, a pequena inclusão de carboidratos é interessante nas dietas dessas espécies). Outro aspecto que dificulta a digestão desse nutriente nos peixes carnívoros é que seu trato gastro intestinal é bastante curto, o que pode impossibilitar a adequada digestão e absorção dos carboidratos mais complexos (carboidratos de baixo índice glicêmico, que são absorvidos de forma lenta).

O curto tempo em que ocorre o trânsito de alimento no intestino limita a capacidade hidrolítica, limitando a digestão e absorção de carboidratos complexos.

Os processos digestivos finais dos carboidratos ocorrem no epitélio mucoso anterior do intestino, diminuindo à medida que avançam em direção ao reto, e incluem a ação de vários dissacarídeos e oligossacarídeos. Essas enzimas são secretadas através dos enterócitos e permanecem associadas a borda em escova da mucosa intestinal.

Resumindo:

A digestão de carboidratos em peixes inicia com a hidrólise extracelular de carboidratos complexos no estômago, intestino e cecos pilóricos (se existirem) e por uma variedade de carbohidrases ligadas à borda da membrana do intestino anterior e dos cecos pilóricos. A enzima α -amilase hidrolisa especificamente as ligações glicosídicas α -1-4 do amido e moléculas similares, resultando em monossacarídeos e cadeias mais curtas de oligossacarídeos, sendo localizada em todo trato gastrointestinal de várias espécies.

A subsequente hidrólise de oligossacarídeos por dissacaridasas (ou glucosidasas), geralmente resulta em unidades de monossacarídeos, os quais podem ser transportados através das vilosidades do intestino.

Vale lembrar: alguns pesquisadores encontraram a enzima α -amilase no estômago de peixes e nos três segmentos do intestino, enquanto outros encontraram apenas no intestino. Isso pode ocorrer devido ao valor de pH estomacal de uma ou outra espécie. Em jundiá, Melo et al. (2004) encontraram em ambos os órgãos, para tilápia Moreau et al. (2001) não verificaram no estômago.

Absorção e transporte de glicose

A absorção é um processo pelo qual os vários nutrientes presentes no alimento são transferidos da luz do intestino para o sangue ou linfa. Os mecanismos de absorção não são bem conhecidos nos peixes, ao contrário de mamíferos que possuem duas rotas de absorção.

Nos mamíferos, os carboidratos e os aminoácidos passam através do epitélio do intestino e vão para a corrente sanguínea. Nos peixes, existe um sistema linfático, porém a sua presença no intestino é reduzida e em algumas espécies, até mesmo inexistente. A porção inicial do intestino absorve a maior parte dos carboidratos da dieta, sendo a insulina não requerida para a captação da glicose pelas células intestinais.

Os carboidratos são absorvidos pelos peixes na forma de monossacarídeos, através do mesmo processo descrito para os aminoácidos, ou seja, por um transportador específico dependente do gradiente de sódio. Esse cotransporte é mediado por um transportador, no qual o movimento da glicose é acoplado ao gradiente de concentração do sódio, que é transportado à célula ao mesmo tempo (Figuras 4 e 5).

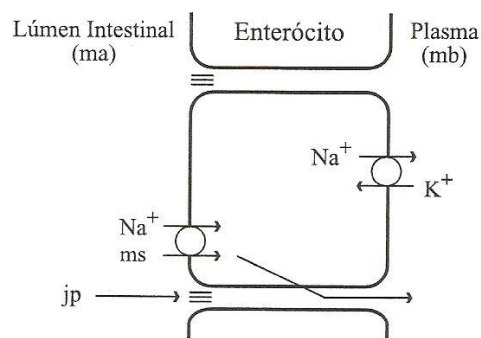


Figura 2.5 – Esquema geral do sistema de transporte relacionado com a absorção de monossacarídeos (ms) no intestino de teleósteos. Os círculos representam sistemas de transporte. jp – junções proteicas ligando os enterócitos; ma – membrana apical; mb – membrana basolateral.

Figura 4. Esquema geral do transporte de monossacarídeos.

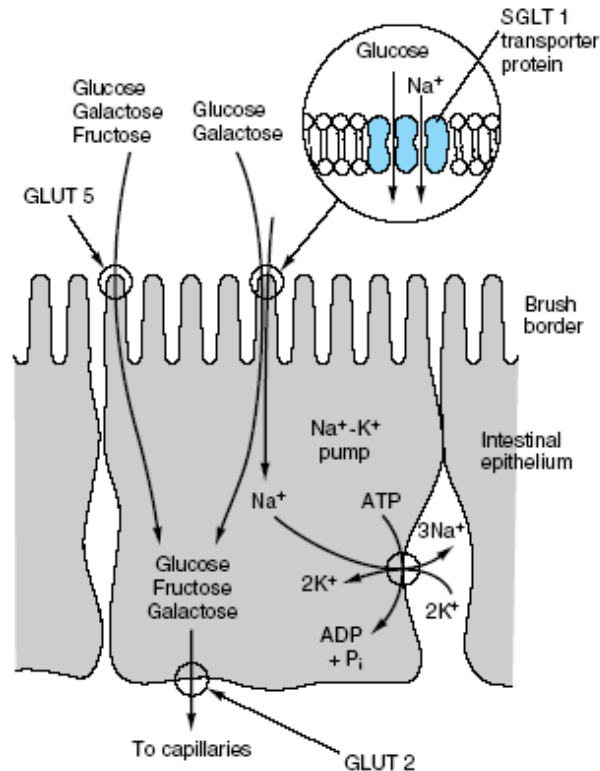


Figura 5. Entrada de monossacarídeos nos enterócitos.

A taxa de transporte dos carboidratos é menor em peixes carnívoros do que nos herbívoros e onívoros, podendo refletir uma adaptação dos peixes carnívoros à baixa concentração de carboidratos presentes na sua dieta.

Vieira e Baldisserotto (2001) também determinaram que os cecos pilóricos devessem ser o principal sítio de absorção de carboidratos no intestino de peixes teleósteos e que existem transportadores de sódio dependentes para a absorção da glicose e não da frutose, que se processa via transporte ativo.

Altas concentrações de carboidratos digestíveis na dieta de peixes podem causar hiperglicemia pós-prandial prolongada. Em mamíferos, a insulina, hormônio secretado em resposta a altas concentrações de glicose no sangue, atua em tecidos periféricos, principalmente no músculo esquelético, promovendo a assimilação celular da glicose e regulando a glicemia.

A insulina e os fatores de crescimento semelhantes à insulina I e II (IGF-I e IGF-II) são peptídeos pertencentes a mesma família de proteínas e suas estruturas são similares.

Em mamíferos, o IGF-I estimula a tomada de glicose e de aminoácidos e as sínteses de glicogênio e proteína. Há relatos de alguns pesquisadores que há predominância de receptores de IGF-I sobre os de insulina no tecido muscular esquelético de peixes, situação contrária àquela apresentada por mamíferos. Outros pesquisadores sugerem que o IGF-I tem um papel importante no metabolismo e na adaptação de peixes a dietas ricas em carboidrato.

Vários autores observaram que um aumento na ingestão de carboidratos resulta em um aumento dos níveis de insulina plasmática em peixes. Baños et al. (1998) verificaram que, além dos níveis de insulina plasmática, o número de receptores de insulina e IGF-I no músculo esquelético de trutas, aumentaram em resposta à dieta rica em carboidrato, favorecendo a tomada e metabolização da glicose pelo tecido e, consequentemente, um melhor controle da glicemia.

O número de receptores de insulina no tecido muscular de peixes é regulado pelo status nutricional, portanto pode ser alterado de acordo com a necessidade fisiológica. Por exemplo, o baixo número de receptores de insulina aumenta depois da ingestão de alimento, ou da injeção de substâncias que causam a secreção de insulina, o que leva a um aumento nos níveis circulantes de insulina a fim de aumentar a resposta do tecido à insulina. Em mamíferos, a tomada de glicose em tecidos periféricos, tais como tecido muscular esquelético, cardíaco e adiposo, é mediada por transportadores de glicose GLUT-1 e GLUT-4.

No tecido muscular esquelético, GLUT-1 é insulina-independente e facilita o transporte basal de glicose, enquanto GLUT-4 é transportado para a superfície celular devido à ação da insulina, portanto esse é o transportador sensível à insulina, responsável pelo efeito hipoglicêmico da insulina.

Quando a insulina se liga a seu receptor na membrana celular, GLUT-4 se move a partir de uma posição intracelular para uma posição na membrana celular, promovendo o transporte de glicose para dentro da célula muscular (Figura 6), porém, não está claro se este sistema ocorre em peixes.

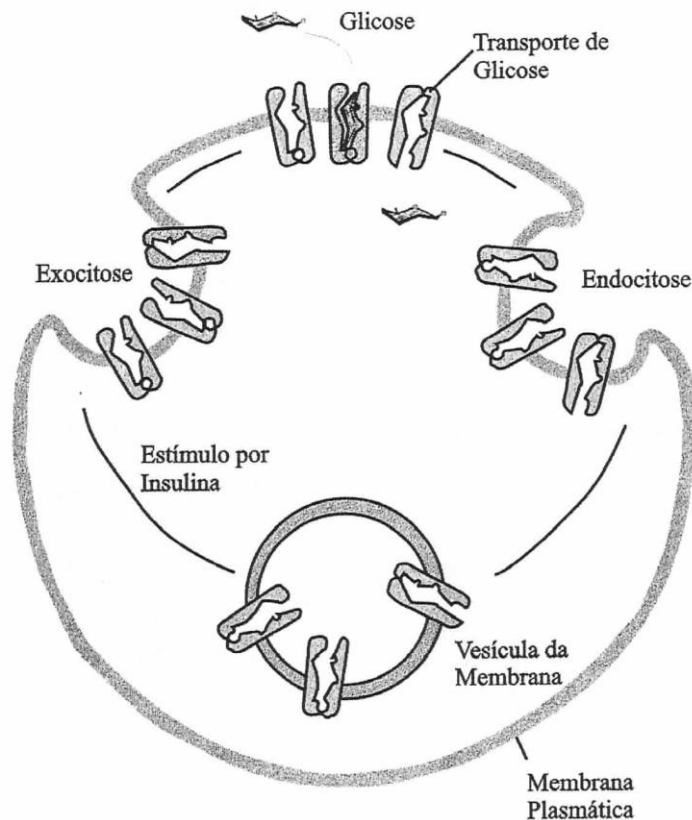


Figura 2. Tomada de glicose regulada pela insulina em células musculares e adiposas por exocitose das vesículas membranosas contendo GLUT-4 (à esquerda). Depois que a insulina é retirada, o processo se reverte através da endocitose (à direita). Adaptado de Voet eVoet (2006)

Figura 6. Tomada de glicose regulada por insulina em células.

Há evidências de que a intolerância ao carboidrato em peixes se deve à ausência de transportadores de glicose sensíveis a insulina (GLUT-4) no tecido muscular periférico.

A insulina estimula a formação do glicogênio e triacilgliceróis, enquanto o glucagon e a epinefrina (adrenalina) têm o efeito contrário, assim a taxa de glucagon:insulina é importante para determinar a taxa e a direção do metabolismo energético.

Metabolismo da glicose nos peixes

Assim como ocorre nos mamíferos, a glicose é a principal fonte de energia par aos peixes, quando ingerida acima das necessidades a glicose é polimerizada à glicogênio, sendo armazenada no fígado e no músculo, e sua mobilização é controlada pela ação de hormônios e enzimas, ou convertida a gordura.

Para manter a homeostase energética, o glicogênio é mobilizado e transportado como glicose (Figura 7), e seus valores, no sangue, são mantidos constantes, garantindo o suprimento de energia às células nas várias situações em que os peixes estejam submetidos.

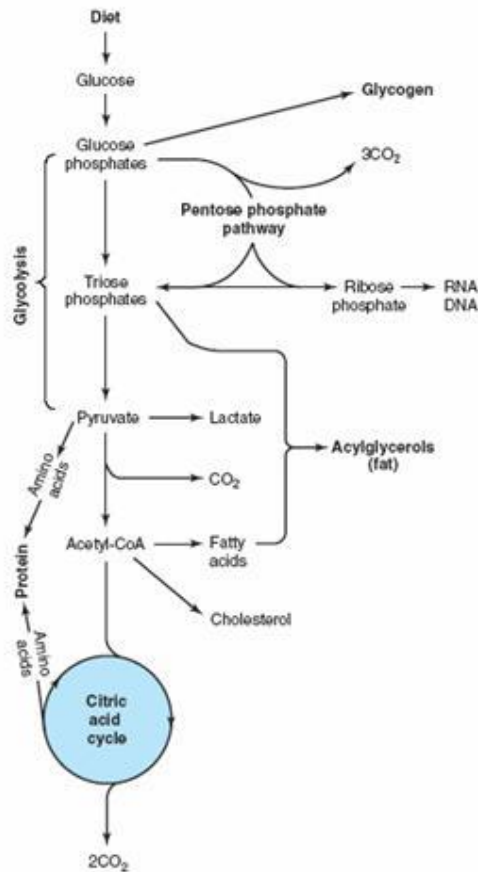


Figura 7. Visão geral do metabolismo da glicose.

A homeostase da glicemia é um mecanismo no qual o fígado, tecidos extra hepáticos e diversos hormônios desempenham um papel fundamental. A glicose do sangue pode originar-se de:

- Fontes dietéticas;
- Através da mobilização do glicogênio originário da polimerização do excesso de glicose;
- Da gliconeogênese a partir do lactato, aminoácidos e glicerol.

O nível de glicose sanguínea depende, entre outras coisas, do tempo de alimentação e qualidade da dieta que o peixeingere.

Ciclo ácido cítrico (ácidos tricarboxílicos ou Krebs)

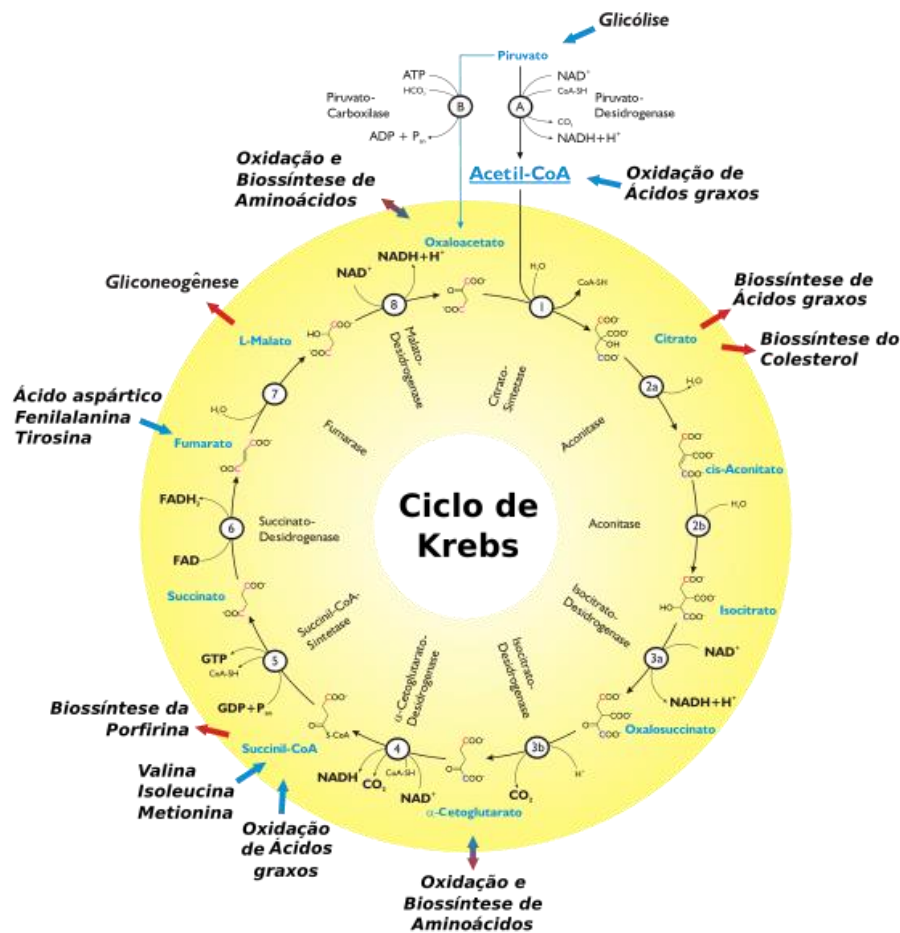


Figura 8. Representação do ciclo dos ácidos tricarboxílicos. Fonte: Wikipédia.

Glicólise

Glicólise é a via central do catabolismo da glicose, em uma sequência de 10 reações enzimáticas que ocorrem no citosol de todas as células. Cada molécula de glicose é convertida em duas moléculas de piruvato. Parte da energia livre liberada da glicose é conservada na forma de ATP e de NADH.

Compreende dois estágios:

Fase preparatória: compreende 5 reações, nas quais a glicose é fosforilada por dois ATP e convertida em duas moléculas de gliceraldeído-3-fosfato.

Fase de pagamento: as duas moléculas de gliceraldeído-3-fosfato são oxidadas pelo NAD e fosforiladas em reação que emprega o fosfato inorgânico. O resultado líquido do processo total de glicose é a formação de 2 ATP, 2 NADH, e 2 piruvato, às custas de 1 molécula de glicose.

Todas as reações de glicólise com formação de piruvato (ou lactato em hipóxia) são catalisadas por enzimas presentes no citoplasma. Para cada molécula de glicose, são consumidas duas moléculas de ATP na fase preparatória e são produzidas 4 ATP e 2 NADH na fase de pagamento.

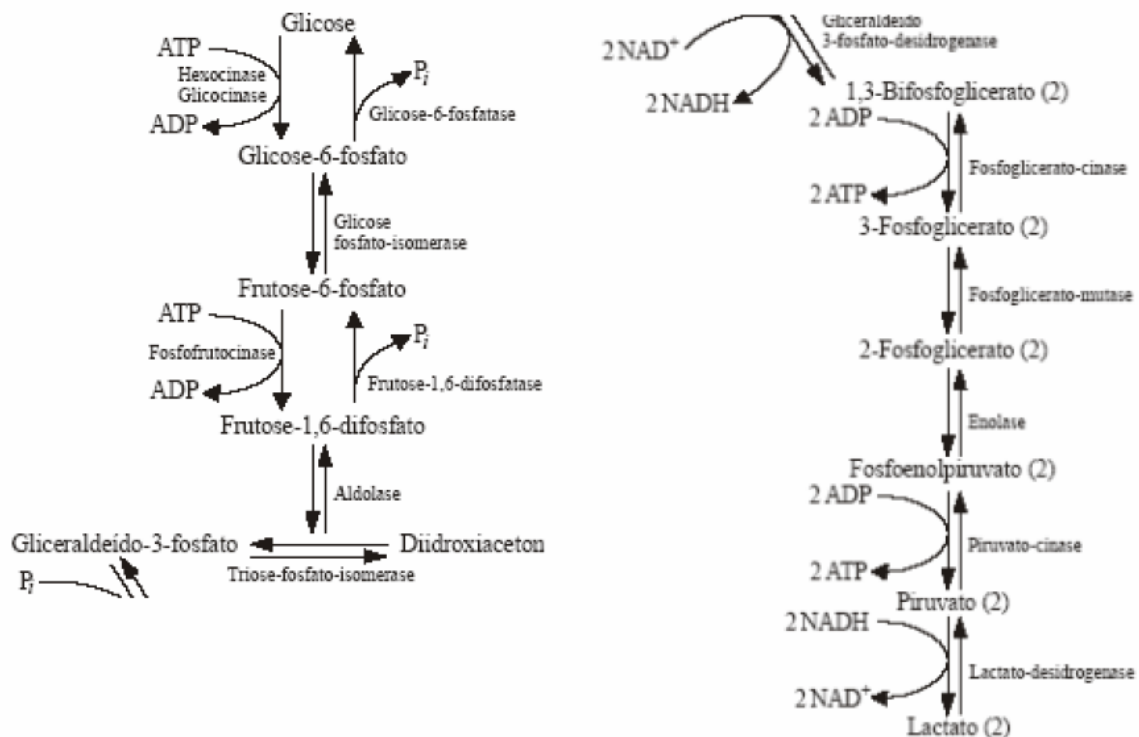


Figura 9. Esquema representativo da glicólise

Reações da glicólise

A glicose-6-fosfato é um importante intermediário central para várias rotas metabólicas. A via alternativa predominante depende do estado metabólico do organismo e varia em diferentes condições. A glicose-6-fosfato pode ser utilizada como:

- Combustível pelo metabolismo anaeróbico ou aeróbico no músculo;
- Ser convertida em glicose livre no fígado e, subsequentemente, ser liberada no sangue;
- Ser processada pela via da pentose fosfato para gerar NADPH ou ribose em vários tecidos;
- Formar compostos de grande importância metabólica.

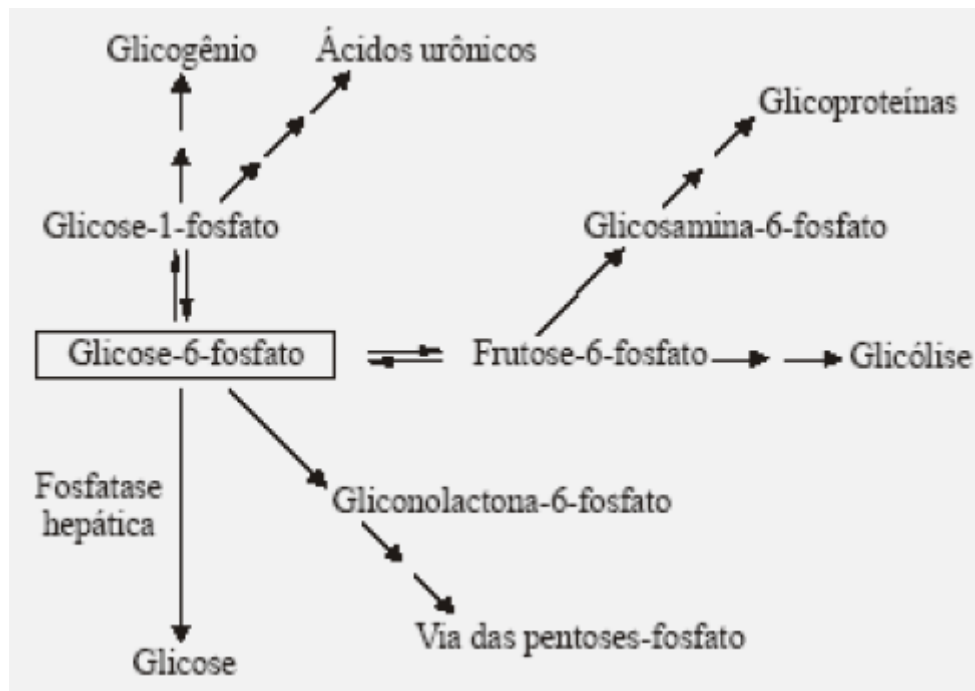


Figura 10. Rotas metabólicas da glicose-6-fosfato.

Destino do piruvato

O piruvato formado da glicose e de outras fontes é utilizado em diferentes vias metabólicas dependendo de vários fatores e as necessidades momentâneas de certos metabólitos-chaves. Os principais destinos são:

- Síntese de lactato em condições anaeróbias;
- Acetil-CoA (ciclo dos ácidos tricarboxílicos);
- Oxaloacetato (gliconeogênese);
- Alanina (síntese de aminoácidos).

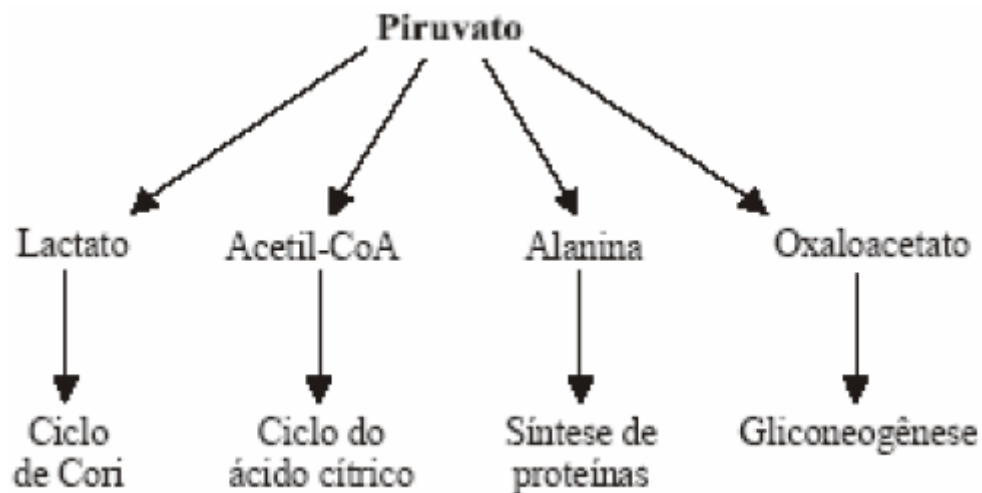


Figura 11. Rotas metabólicas do piruvato

Gliconeogênese

É a síntese intracelular do glicogênio, principal forma de reserva de polissacarídeos nos tecidos animais. O glicogênio é sintetizado em quase todos os tecidos animais, mas os maiores depósitos estão presentes no fígado e músculos e destina-se a diferentes funções:

Glicogênio hepático: atua como reservatório de glicose para a corrente sanguínea com a distribuição para outros tecidos. A quantidade varia amplamente em resposta a ingestão de alimentos. As reservas apresentam importante papel como fonte glicose no período pré e pós prandial.

Glicogênio muscular: serve como fonte de glicose às células dos músculos para gerar ATP durante a atividade muscular, sendo formado durante o repouso, após as refeições. Os níveis de glicogênio muscular apresentam menor variabilidade que os teores hepáticos em resposta a ingestão de carboidratos.

O catabolismo e o anabolismo ocorrem simultaneamente em estado dinâmico, sendo que a liberação de energia através da degradação de componentes celulares é contrabalanceada pelos processos biossistêmicos que recriam e mantêm o ordenamento das células.

A síntese de glicose a partir de compostos não glicídicos é também chamado de gliconeogênese, ocorrendo no fígado e satisfazendo as necessidades de glicose do organismo em situações onde o carboidrato dietético não é suficiente para manter a homeostasia glicêmica (jejum). Entre as refeições, os teores adequados de glicose sanguínea são mantidos pela hidrólise do glicogênio hepático. Quando o fígado esgota seu suprimento de glicogênio (jejum ou exercícios), a gliconeogênese fornece a quantidade adequada de glicose para o organismo. Assim, o processo de gliconeogênese assume um papel fundamental durante o período de jejum, quando o glicogênio hepático esgotou suas reservas no fígado.

Insulina x Glucagon

O pâncreas produz dois hormônios importantes na regulação da taxa de glicose (açúcar) no sangue: a insulina e o glucagon.

A insulina facilita a entrada da glicose nas células (onde ela será utilizada para a produção de energia) e o armazenamento no fígado, na forma de glicogênio. Ela retira o excesso de glicose do sangue, mandando-o para dentro das células ou do fígado. Isso ocorre, logo após as refeições, quando a taxa de açúcar sobe no sangue (Figura 12).

Já o glucagon funciona de maneira oposta à insulina. Quando o organismo fica muitas horas sem se alimentar, a taxa de açúcar no sangue cai muito. Quando ocorre a hipoglicemia o pâncreas produz o glucagon, que age no fígado, estimulando-o a “quebrar” o glicogênio em moléculas de glicose. A glicose é, então, enviada para o sangue, normalizando a taxa de açúcar (Figura 12).

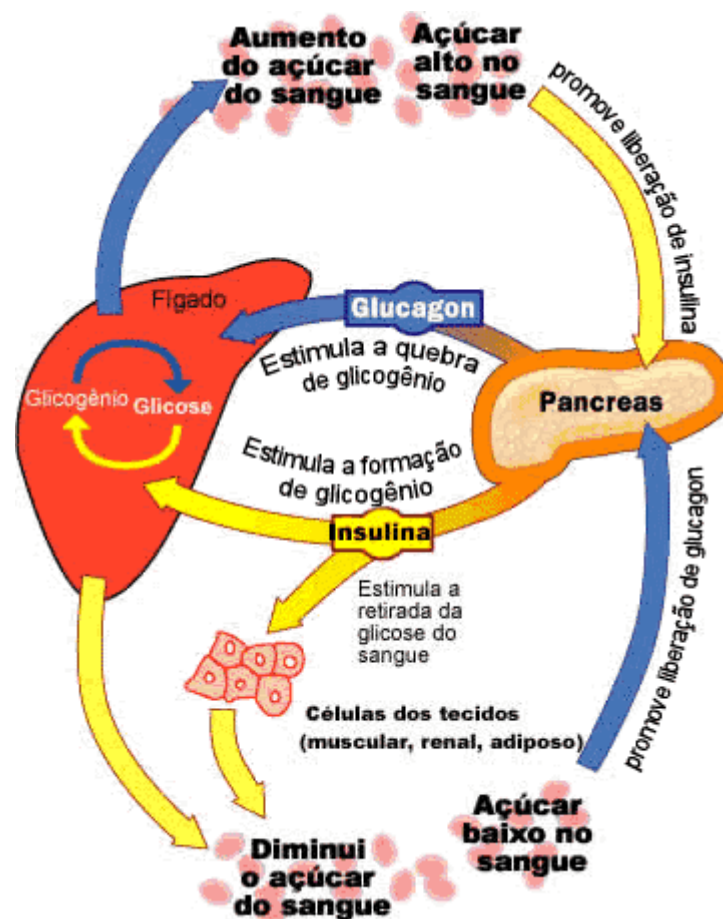
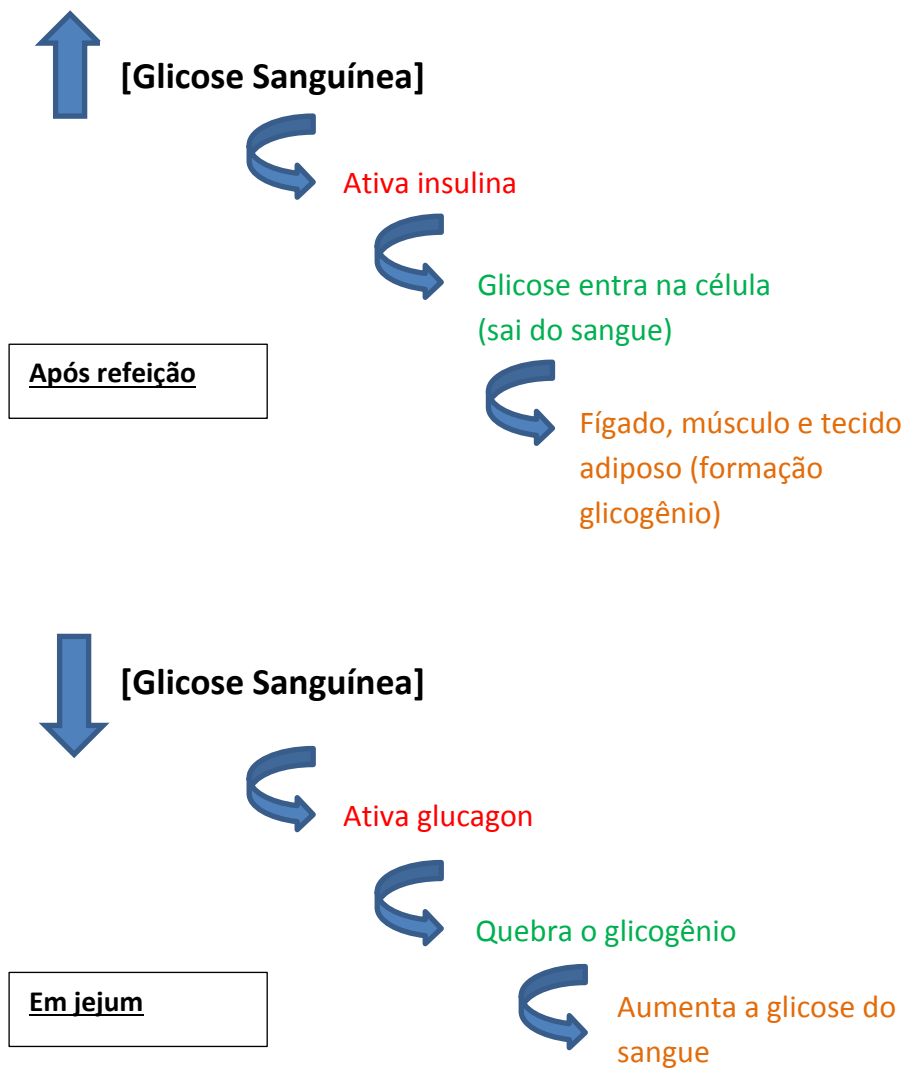


Figura 12. Esquema demonstrando o papel da insulina e do glucagon.

Resumindo:



Humanos: A falta ou a baixa produção de insulina provoca o diabetes, doença caracterizada pelo excesso de glicose no sangue (hiperglicemia). Por outro lado, quando a pessoa tem hipoglicemia, ocorre a sensação de fraqueza, tontura, podendo até desmaiar.

Visão geral do metabolismo da glicose em várias células

O metabolismo da glicose em diversos tecidos ocorre do seguinte modo:

Eritrócitos: glicólise (lactato como produto final);

Cérebro: glicólise (piruvato como produto final);

Células musculares: glicólise (piruvato e lactato como produto final), glicogênese e glicogenólise;

Tecido adiposo: glicólise, glicogênese, glicogenólise e lipogênese;

Fígado: glicólise, glicogênese, glicogenólise, gliconeogênese, liberação de glicose para o sangue e formação de glicuronídeos (excreção de fármacos e bilirrubina).

Roteiro geral do metabolismo dos carboidratos

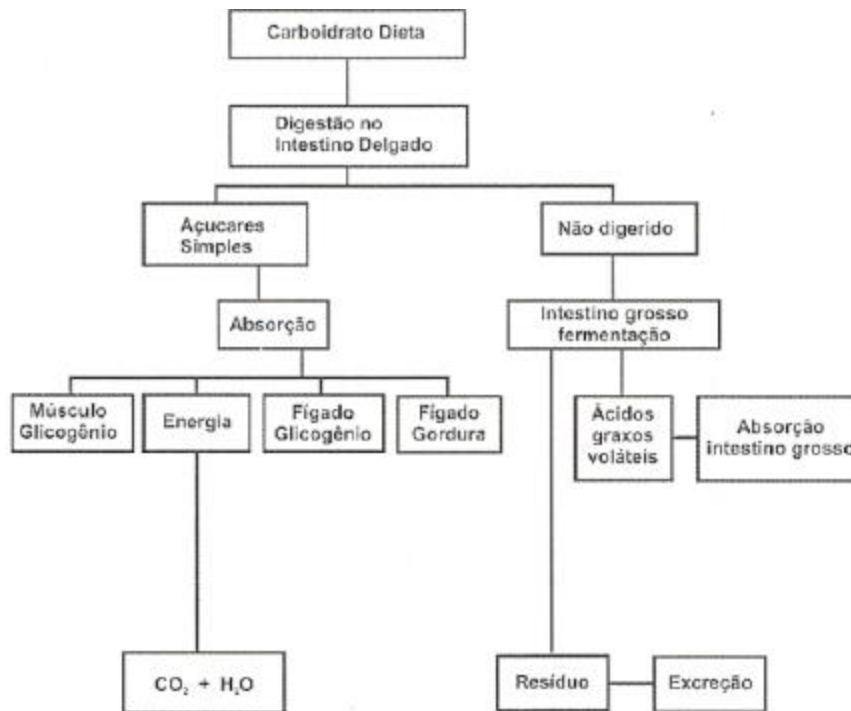


FIGURA 4.1. Destinos metabólicos dos carboidratos dietéticos.

Figura 13. Visão geral dos destinos metabólicos dos carboidratos.

Assista ao vídeo no youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=RZlpk9nrml8> para entender mais sobre gliconeogênese.

Roteiro geral do metabolismo energético

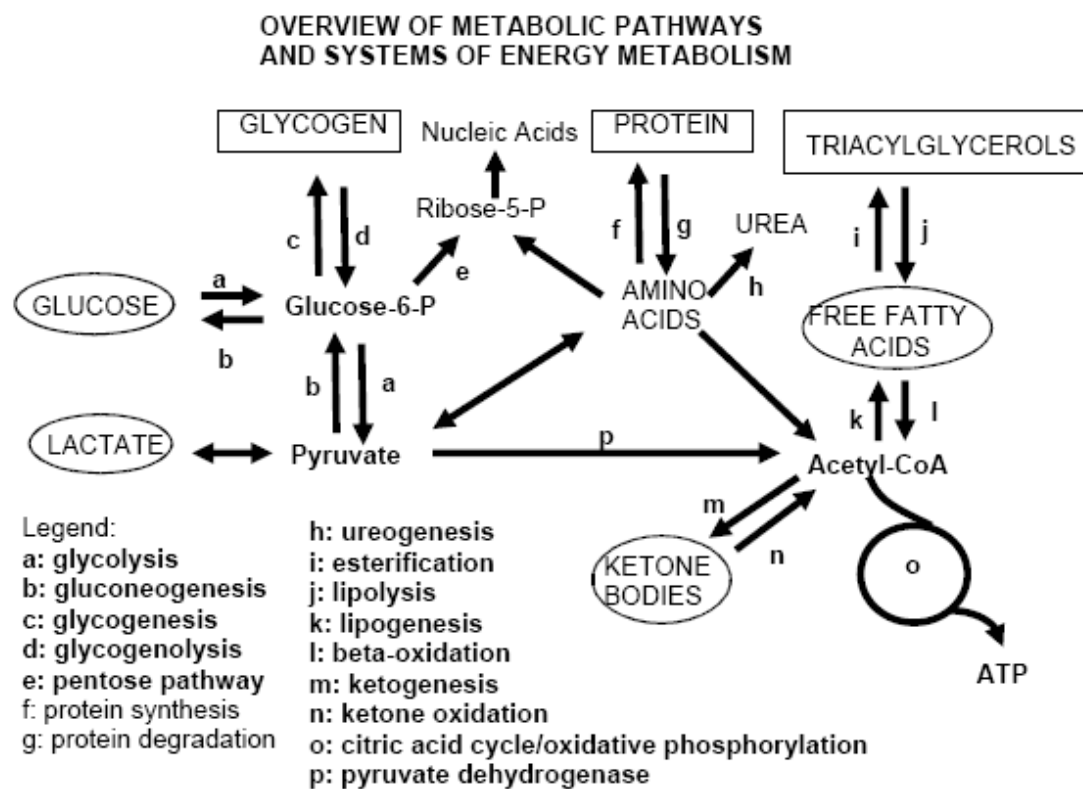


Figura 14. Vias metabólicas do metabolismo energético.

Fibras na nutrição de organismos aquáticos

Nem todos os carboidratos são bem aproveitados pelos peixes. Tais carboidratos compõem predominantemente a fibra alimentar, cujo conhecimento sobre os efeitos na nutrição e fisiologia digestiva de peixes ainda é relativamente escasso, quando comparado ao existente em animais domésticos terrestres.

O conceito de fibra alimentar evoluiu ao longo da história, em função do surgimento de metodologias analíticas mais apropriadas e dos conhecimentos adquiridos acerca de seus efeitos fisiológicos na nutrição humana. Atualmente, a definição de fibra alimentar engloba aspectos fisiológicos e químicos, consistindo nas partes comestíveis dos vegetais ou carboidratos análogos que são resistentes à hidrólise enzimática intestinal com completa ou parcial fermentação microbiana no intestino grosso. Compreende polissacarídeos, oligossacarídeos, lignina e substâncias vegetais associadas.

A fibra alimentar deriva predominantemente da parede celular vegetal, a qual é composta basicamente por celulose, polissacarídeos não celulósicos (pectinas, xilanos, β -

glicanos, etc.), proteínas estruturais e lignina. A composição da parede celular varia em função da espécie, tipo de tecido e idade da planta. Os polissacarídeos da parede celular constituem um grupo distinto de carboidratos que não contêm as ligações α -glucosídicas presentes no amido, o que explica as diferenças em sua digestibilidade, e a determinação de polissacarídeos não amiláceos.

Tabela 3. Componentes estruturais da parede celular vegetal (Adaptado de Taiz e Zeiger, 2004).

Componentes	Constituição química	Função
Microfibrilas de celulose	β 1,4 D-glucano	Conferem rigidez e estruturação à parede celular
Matriz de polissacarídeos	Homogalacturonano	Formam uma matriz geleificada extremamente hidratada que envolve as redes de celulose e hemicelulose
Pectinas	Ramnogalacturonano	
	Arabinano	
	Galactano	
Hemiceluloses	Xiloglucano	Polissacarídeos flexíveis que se ligam à celulose
	Xilano	
	Glucomanano	
	Arabinoxilano	
Lignina	β 1,3-1,4 glucano	Liga-se covalentemente à celulose e outros polissacarídeos. Confere suporte mecânico, proteção e impermeabilidade à parede celular
	Fenil-propano	
	Glicoproteínas ricas em hidroxiprolina.	
Proteínas estruturais	Proteínas ricas em prolina.	Adicionam rigidez à parede celular
	Proteínas ricas em glicina.	

Uma das dificuldades na determinação da fibra alimentar é que esta não é constituída por um único grupo químico definido, mas sim por uma combinação de substâncias quimicamente heterogêneas. O método de análise de fibra bruta é o mais antigo e comumente utilizado em nutrição animal. Este método mensura uma pequena e variável fração da fibra (você irá aprender a determinar a fibra quando fizerem a disciplina de análise de alimentos), uma vez que solubiliza muitos polissacarídeos estruturais e a lignina.

Inicialmente aplicado na nutrição de ruminantes, o método das fibras em detergente de Van Soest tem sido utilizado na nutrição de frangos e suínos em alternativa à metodologia de fibra bruta, visto que proporciona resultados mais satisfatórios para rações animais. Tal método determina a fração da fibra que é insolúvel em detergente neutro (celulose, hemicelulose e lignina) e outra, insolúvel em detergente ácido (celulose e lignina) (Figura 15). Outro método mais preciso são os métodos enzimáticos-gravimétricos e enzimáticos químicos, que isolam a fibra mediante tratamento enzimático do amido, quantificando-a por pesagem ou cromatografia e colorimetria.

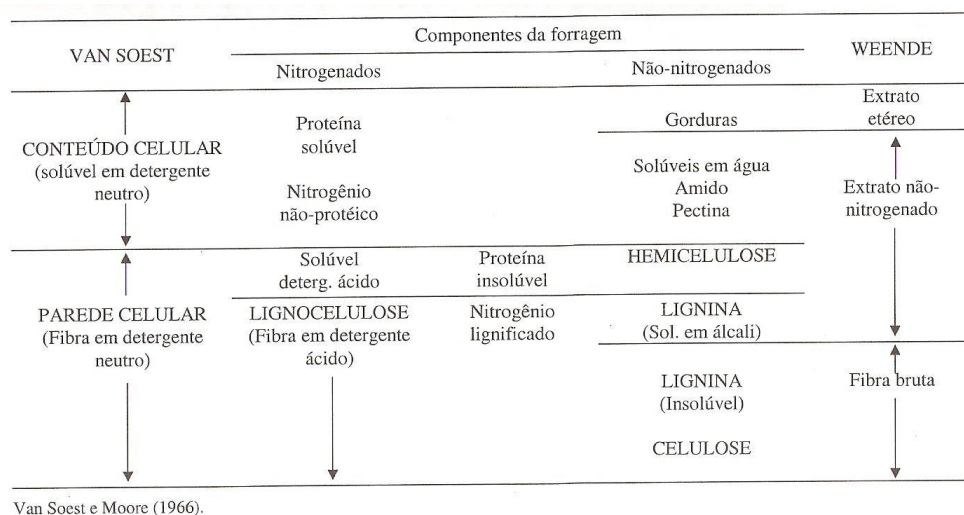


Figura 15. Comparação entre o método de Van Soest e de Wende.

A fibra é então classificada de acordo com sua solubilidade na água, tendo duas categorias:

FIBRA INSOLÚVEL EM ÁGUA

Composto por:
• Lignina; • Celulose; • Hemicelulose.
Aumenta a velocidade do trânsito gastrointestinal;
Reduz o tempo de digestão dos nutrientes

FIBRA SOLÚVEL EM ÁGUA

Composto por:
• Pectinas; • Gomas; • Mucilagens.
Aumento do potencial antinutricional;
Retarda o trânsito gastrointestinal pois possui propriedades gelificantes e adsorvente, fazendo com dificulte o contato enzima/substrato e, consequentemente, reduza a absorção.

Vimos, portanto, que as duas afetam a digestibilidade dos alimentos de forma negativa, contudo, parece que a fibra solúvel tem efeito mais deletério que a insolúvel.

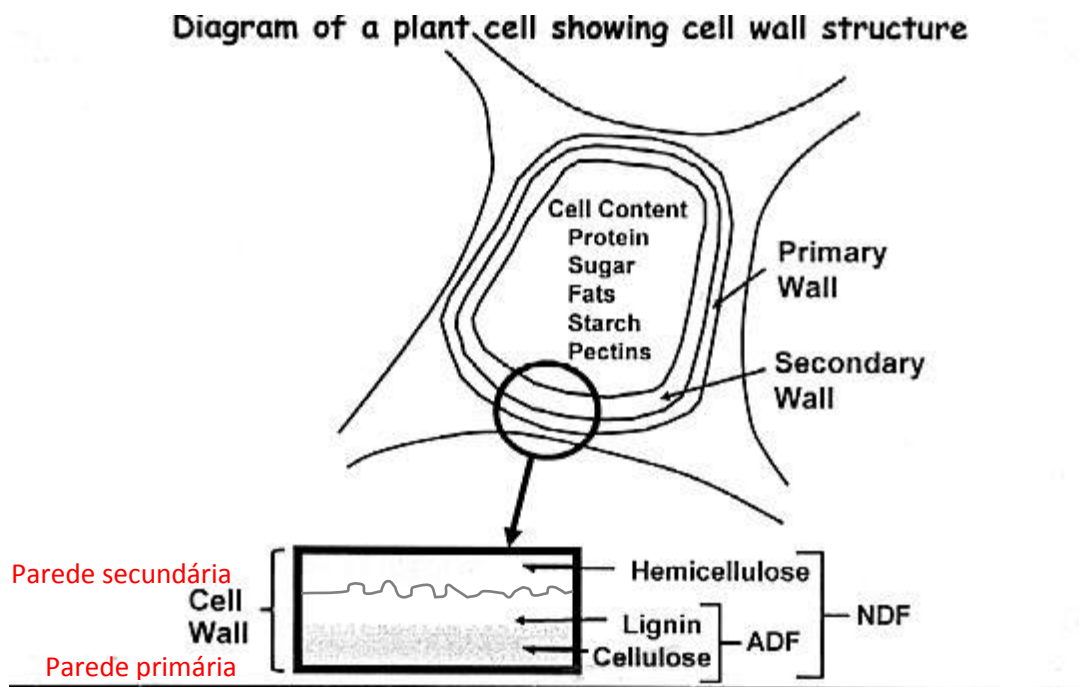


Figura 16. Diagrama de uma célula vegetal, mostrando a parede celular e suas particularidades.

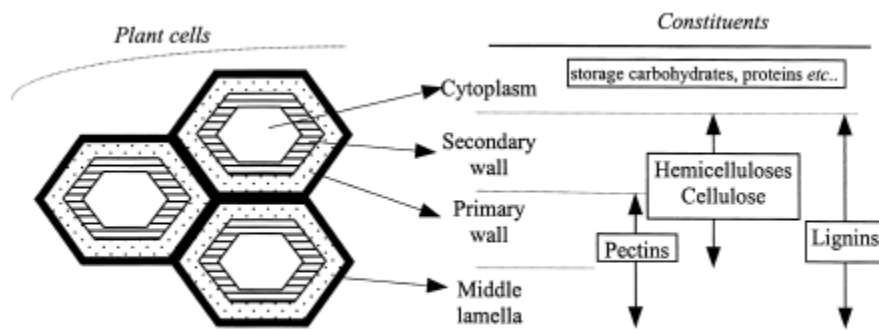


Fig. 1. Schematic representation of plant cell walls and their main constituents.

Figura 17. Representação esquemática da parede de uma célula vegetal.

Composição do milho

Milho grão

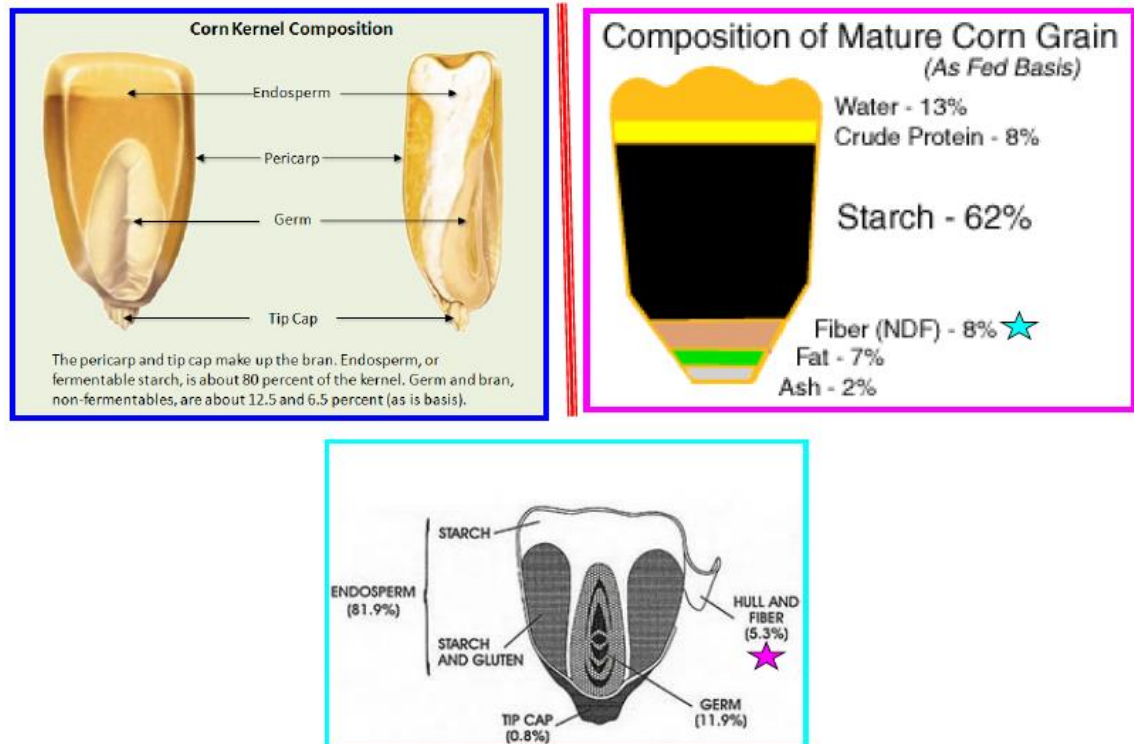


Figura 18. Composição do milho

Principais propriedades fisiológicas das fibras

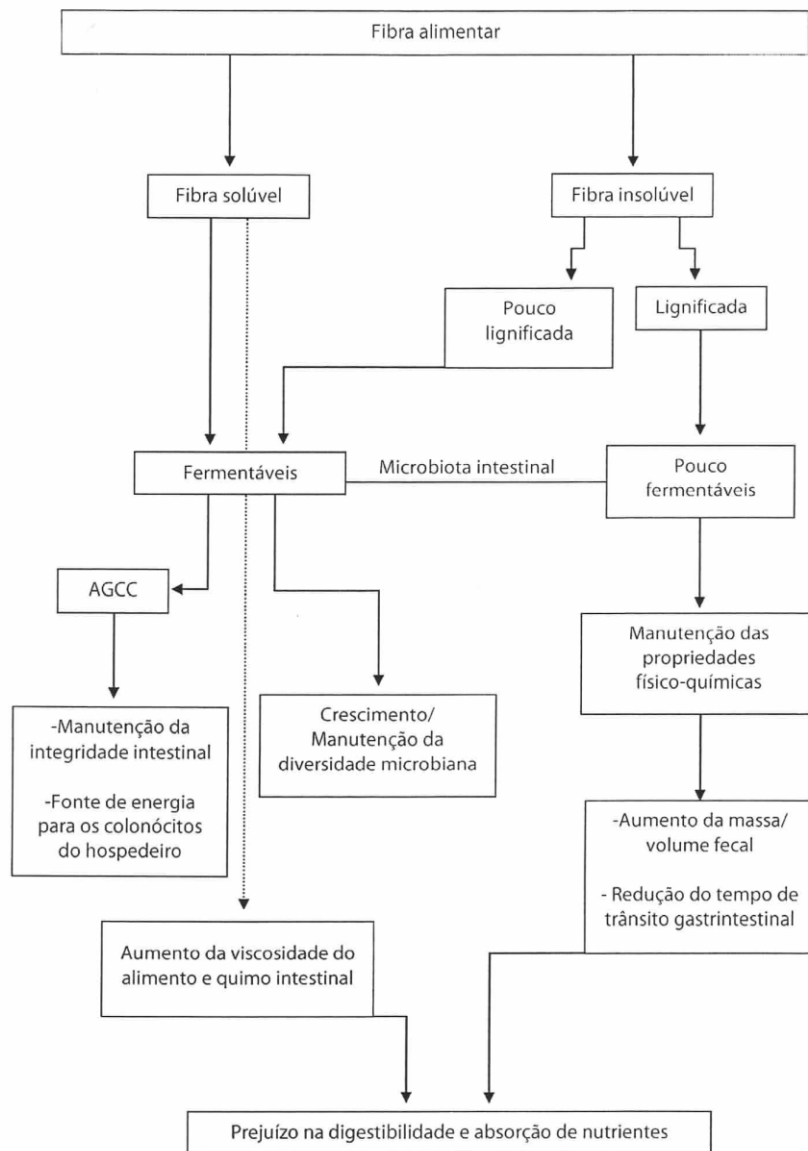


Figura 3. Principais propriedades fisiológicas da fibra alimentar solúvel e insolúvel. (NSP = polissacarídeo não amiláceo; AGCC = ácidos graxos de cadeia curta). Adaptado de Bach Knudsen (2001).

Figura 19. Visão geral do efeito das fibras em dietas para peixes