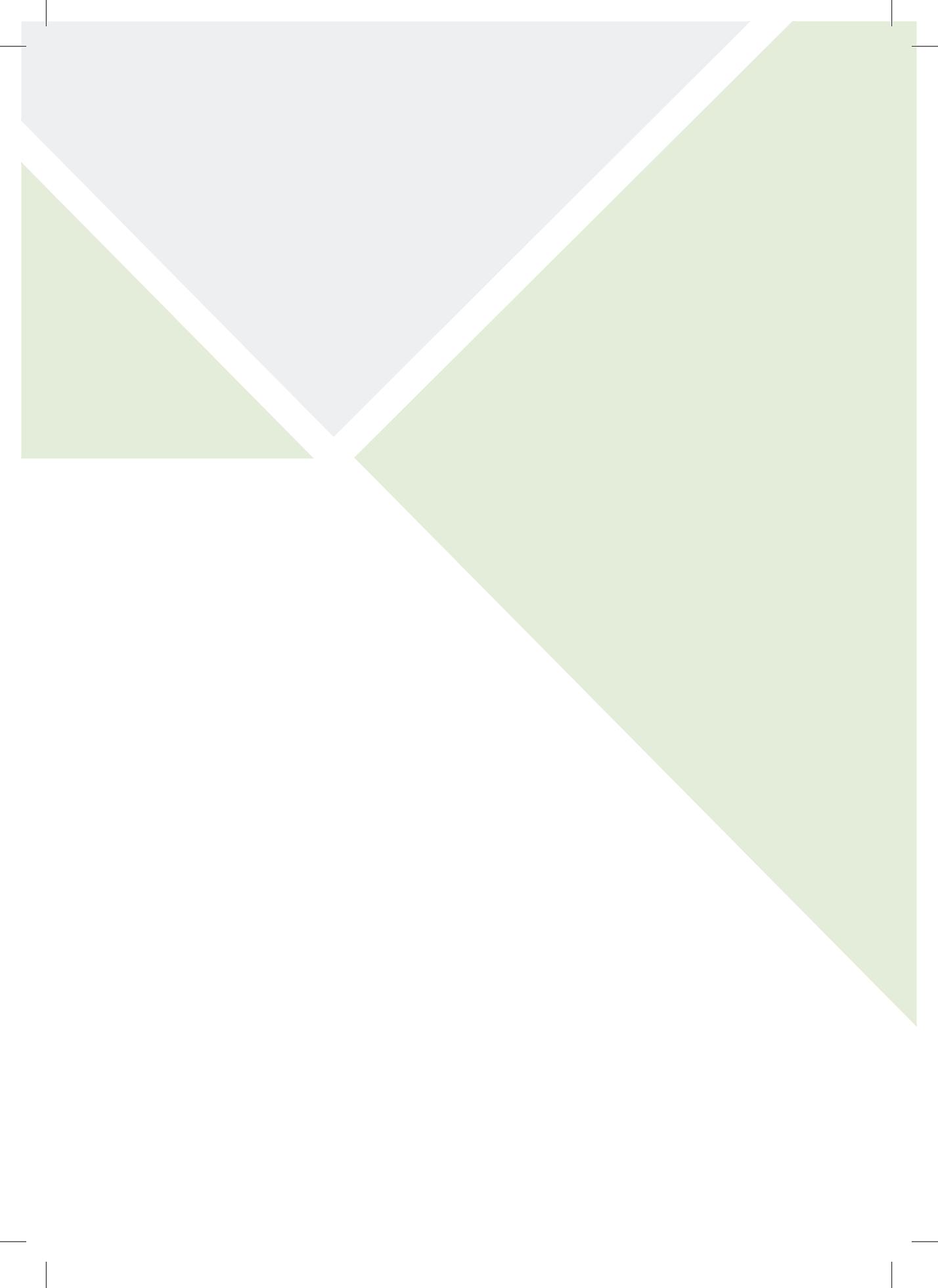


4

CAPÍTULO

Carboidratos na nutrição de gado de corte

*Sérgio Raposo de Medeiros
Carolina Tobias Marino*



INTRODUÇÃO

Carboidratos (CHO) são compostos formados por carbono, hidrogênio e oxigênio que representam a categoria mais abundante em termos de nutrientes nas plantas. São divididos em CHO estruturais (fazem parte da parede vegetal) e não estruturais (não fazem parte da parede celular das plantas e aproveitados como fonte de energia por meio de uma relação mutualística com bactérias, fungos e protozoários que habitam o rúmen.

As forragens são o alimento preponderante para ruminantes em condições naturais, o que confere a estes animais uma grande vantagem competitiva. Mas os ruminantes aproveitariam muito pouco se dependessem apenas de suas próprias enzimas, incapazes de quebrarem as ligações químicas formadoras dos carboidratos estruturais.

Neste ponto é que entra a retribuição dos microrganismos que habitam o rúmen. São eles que degradam os carboidratos estruturais, concomitantemente com os carboidratos não estruturais, transformando-os em açúcares simples, retirando destes a energia que precisam através da fermentação. O ruminante, por sua vez, fornece para esses microrganismos o ambiente ruminal com condições relativamente estáveis (umidade, calor, pH, osmolaridade, anaerobiose) e substrato (alimento) periodicamente renovado.

FUNÇÃO DOS CARBOIDRATOS

A principal função dos carboidratos é ser fonte de energia para os animais. No caso dos ruminantes, a maior parte da digestão ocorre no rúmen, apesar de que, dependendo dos ingredientes da dieta, digestão de porção considerável de CHOs pode ocorrer pós-ruminalmente.

A fermentação é um processo muito menos eficaz do que a respiração, em termos de utilização de energia. Graças a isso, os resíduos da fermentação ainda contêm energia para ser aproveitada pelo hospedeiro. Os resíduos da fermentação ruminal dos carboidratos são os ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), principalmente acético, propiônico e butírico, que são absorvidos pelas papilas ruminais e passam à circulação sanguínea. Os AGCC podem ser usados para geração de energia ou como precursores de gordura (acético e butírico) ou de glicose (propiônico).

Os principais exemplos de carboidratos não estruturais (CNEs) nas plantas são o amido dos grãos e os açúcares solúveis das forragens. Eles também têm elevada importância por serem fontes concentradas de energia de rápida disponibilidade. Quando se pretende elevar o teor de energia das dietas de ruminantes se aumenta a inclusão de fontes destes CHOs, o que pode levar a aumento no desempenho animal.

O desafio é usá-los de maneira a aproveitar sua energia, sem atrapalhar a degradação do restante da dieta – particularmente da fibra. Na verdade, em dietas fibrosas, a inclusão de pequenas quantidades de CNEs pode ser benéfica para a degradação da fibra, fornecendo energia que ajuda os microrganismos a diminuírem o tempo de colonização das partículas fibrosas.

Todavia, havendo intensa produção de ácidos graxos de cadeia curta pela fermentação dos CNEs, uma sobrecarga ao sistema tampão ruminal, pode levar ao abaixamento do pH ruminal. As bactérias celulolíticas são extremamente sensíveis a redução no pH. Portanto, os CNEs podem reduzir a degradação da fibra principalmente pelo abaixamento do pH ruminal. Os CNEs podem causar também a repressão catabólica – que seria a capacidade de certas bactérias pararem de usar um substrato (como a celulose) para usarem outro de mais fácil degradação (como a glicose). Aparentemente, esse efeito seria secundário em importância na redução da degradação de carboidratos estruturais.

Para que o efeito da fermentação dos CNE não venha a causar problemas metabólicos, que veremos mais a frente, é preciso que haja carboidratos estruturais (CE) na quantidade e no tipo que garanta a estimulação da ruminação, da salivação e da motilidade ruminal. Os CE conferem estimulação física a sensores ruminais responsáveis pela motilidade deste compartimento, necessária para a execução de uma das principais atividades do bovino, que é a ruminação. A propriedade de troca catiônica da fibra também é importante na capacidade de tamponamento do rúmen. Portanto, os carboidratos (estruturais) são importantes também para a manutenção da saúde do animal.

Por mais que exista uma condição ótima para a fermentação ruminal, havendo forragem envolvida, sempre haverá um resíduo indegradável. Isto está ligado ao fato de que a função dos carboidratos estruturais é formar e manter a estrutura da planta. Portanto, é de se esperar que precise haver um agente que dê mais resistência a esta estrutura. Nas plantas, o papel principal para a resistência é desempenhado pela lignina. O processo de lignificação das paredes celulósicas com o avançar da idade (ver Tabela 4.6) é que confere ao pasto com muitos dias de crescimento (“pasto passado”) a característica de maior rigidez das plantas. A lignina reduz o acesso dos microrganismos aos CE.

A indegradabilidade da fibra pode influenciar a capacidade ingestiva do animal. Portanto, os carboidratos estruturais podem afetar o consumo voluntário do animal. Isso ocorre na medida em que o animal pode até ainda não ter ingerido toda a energia de que necessita, mas não consegue ingerir mais alimento por causa do limite físico do rúmen. É, portanto, um efeito de enchimento ruminal para o qual muitas vezes é usado o termo em inglês “rumen fill”.

OS CARBOIDRATOS E SUAS FRAÇÕES DE INTERESSE NA NUTRIÇÃO

Separam-se os CHO em duas frações, diferenciadas pelas funções que desempenham em:

- a) *Carboidratos não estruturais*: ligados à reserva e translocação de energia e síntese de outros produtos.
- b) *Carboidratos estruturais*: responsáveis por dar forma e manter a estrutura da planta. Resiste às enzimas digestivas de mamíferos.

Carboidratos não estruturais

Os carboidratos não estruturais (CNE) são definidos como o conjunto de CHO determinados através de ensaio enzimático proposto por Smith (1981). Sob essa definição, CNE consistem, além de amido, em açúcares simples, frutanas, ácidos orgânicos e outros compostos de menor ocorrência. Eles estão localizados principalmente nas sementes, mas podem ser encontrados também nas folhas, caules e raízes, principalmente como carboidratos de reserva.

Os açúcares solúveis de maior ocorrência nas forragens são a glicose e frutose, como monossacarídeos ou participando da formação dos dissacarídeos, sacarose e maltose.

Os CNE são, normalmente, rapidamente fermentados pelos microrganismos ruminais e, portanto, são fontes mais prontamente disponíveis de energia para o meio ruminal. Por outro lado, a intensa produção de ácidos graxos de cadeia curta em pouco tempo (quando comparada com os carboidratos estruturais), pode causar abaixamento do pH ruminal, com implicações negativas no aproveitamento da dieta, como já comentado.

Carboidratos não fibrosos

O sistema mais usual de análise de alimentos, sistema de Weende ou sistema proximal, não tem a determinação específica de carboidratos não estruturais, mas tem uma aproximação que é o extrativo não nitrogenado (ENN). Na verdade, o ENN é a MS total subtraída da somatória dos valores determinados de Proteína Bruta (PB), Extrato Etéreo (EE), fibra bruta (FB) e cinzas (CZ):

$$\text{ENN} = 100\% \text{ MS} - (\% \text{ PB} + \% \text{ EE} + \% \text{ FB} + \% \text{ CZ})$$

O ENN inclui todos os erros destas análises. O maior deles estaria na fração Fibra Bruta, que resulta em uma superestimativa do ENN. A fibra bruta está sendo substituída praticamente em todos laboratórios de nutrição animal pela fibra em detergente neutro (FDN), de Van Soest. Assim, de maneira análoga, estima-se os carboidratos não fibrosos (CNF) pela fórmula:

$$\text{CNF} = 100\% \text{ MS} - (\% \text{ PB} + \% \text{ EE} + \% \text{ FDN}_{\text{livre de PB}} + \% \text{ CZ})$$

Faz parte do CNF um grupo de compostos denominados **polissacarídeos não amiláceos hidrossolúveis** (PNA hidrossolúveis). Eles seriam constituídos pelas frações não recuperadas no resíduo de FDN (solúveis em detergente neutro), mas que seriam resistentes às enzimas digestivas de mamíferos. Os PNA hidrossolúveis contêm vários componentes que são componentes da parede celular (beta-glucanas, pectinas, etc.), polissacarídeos de reserva, como galactanas, e outros.

Relação entre CNE e CNF

Há grande variação quanto aos valores de CNF e CNE entre os alimentos. A maior parte da diferença é causada pela pectina e ácidos orgânicos.

A pectina faz parte dos CNF, mas não faz parte do CNE. A equação abaixo define a relação entre eles.

$$\text{CNF} = \text{CNE} + \text{PNA hidrossolúveis}$$

O valor de CNF é próximo ao teor de açúcares + amido em alimentos que tem pouco PNA e, as gramíneas de modo geral assim como os grãos destas, atendem bem a esse critério. Outros alimentos, todavia, têm considerável presença de PNA. Por exemplo, polpa de citrus, polpa de beterraba e leguminosas são ricas em pectina. A pectina, apesar de ser estrutural, isto é, ser parte da parede celular, nutricionalmente atende os critérios de PNA. Já aveia, centeio, cevada e triticale, por sua vez, contêm quantidades apreciáveis de beta-glucanas. Na Tabela 4.1, abaixo, algumas dessas diferenças podem ser observadas.

A vantagem dos PNA hidrossolúveis é que, apesar da grande extensão de degradação, semelhante ao amido, sua fermentação não produz ácido láctico, o mais forte ácido orgânico. Havendo menor produção de ácido láctico, existe um menor desafio para o sistema tampão ruminal e o pH ruminal fica mais estável. Isso ajuda na eficiência ruminal, pois melhores condições são mantidas para os microrganismos ruminais.

TABELA 4.1. Valores de carboidratos não fibrosos (CNF) e carboidratos não estruturais (CNE) para vários alimentos

ALIMENTO	CNF ¹ , %MS	CNE ² , %MS	PNA HIDROSSOLÚVEIS ³ , %MS
Silagem de alfafa	18,4	7,5	10,9
Feno de alfafa	22,0	12,5	9,5
Silagem de milho	41,0	34,7	6,3
Milho moído	67,5	68,7	-1,2
Polpa de beterraba	36,2	19,5	16,7
Caroço de algodão	10,0	6,4	3,6
Cevada, grão	60,7	62,0	-1,3
Glutenose	17,3	12,0	5,3
Casca de soja	14,1	5,3	8,8
Farelo de soja, 45%	34,4	17,2	17,2

¹ CNF = 100% MS - (% PB + % EE + %NDF_{livre de PB} + % CZ);

² CNE determinados conforme o método enzimático (Smith, 1981);

³ PNA hidross. = CNF - CNE.

Fonte: NRC, 2001.

Amido é o principal CNE para ruminantes

O amido corresponde a 50-100% do CNE na maioria dos alimentos. Como qualquer outro CNE, tem como características a alta taxa de fermentação, produção de ácido lático como subproduto e redução do pH ruminal com consequente possibilidade de atrapalhar a degradação da fibra. Por outro lado, em pequenas quantidades podem ajudar no crescimento inicial das bactérias ruminais, reduzindo o tempo de colonização das partículas de alimentos pelas bactérias. O tempo de colonização, ou lag-time, é o tempo entre o início da colonização até o início da degradação.

A velocidade com que o amido é degradado varia em função do seu grau de cristalização e também de eventuais processamentos (moagem, floculação, laminação). Os grânulos de amido do milho são bastante cristalizados e, portanto, menos acessíveis às enzimas, em oposição aos grânulos de amido na cevada, que são muito mais acessíveis e resultam em fermentação ruminal mais intensa. A taxa de fermentação de várias fontes de amido foi assim classificada: aveia > trigo > cevada > milho > sorgo.

Digestibilidade do amido

A digestibilidade ruminal do amido pode ser elevada com o processamento do grão. Há vários tipos de tratamentos:

- **Moagem:** É o tratamento mais simples, pois há apenas uma redução do tamanho de partícula e, assim, maior exposição de partes do grão menos resistentes à digestão. Apesar da maior exposição do substrato às enzimas, a menor granulometria faz com que o milho moído permaneça menos tempo no rúmen, passando uma maior quantidade de amido para o trato digestivo posterior, onde seu aproveitamento, em caso de alta ingestão de amido, pode ser menos interessante para o bovino.
- **Laminação:** Consiste simplesmente no amassamento do grão umedecido, com uso de vapor. Semelhante à moagem, aumenta a superfície de exposição do grão, porém em uma menor extensão.
- **Floculação:** É o mais intenso dos processamentos e o que resulta no maior aumento de degradação ruminal do amido. Além do amassamento, a laminação envolve o uso de umidade com calor no momento de amassamento. A umidade e o calor ajudam a transformar a estrutura cristalina dos grânulos de amido em grânulos amorfos, processo conhecido como gelatinização do amido. A gelatinização do amido é o mesmo processo que ocorre quando cozinhamos batatas, por exemplo. As diferenças entre os tratamentos com relação a esta variável pode ser vista na Tabela 4.2, abaixo:

A moagem altera, relativamente, mais o local de digestão do que a própria digestibilidade total. A digestibilidade ruminal do amido do milho quebrado é de 44%, ao passo que a do milho moído fica em torno de 60-65%, uma vez que este escapa mais facilmente do rúmen. Assim, o milho moído tem uma taxa de passagem ruminal maior, portanto, sofrendo por menos tempo a ação fermentativa neste compartimento. Todavia, independente

TABELA 4.2. Valores de digestibilidade ruminal de amido de milho e sorgo em função do efeito do processamento

DIGESTIBILIDADE RUMINAL DO AMIDO	MILHO (%)	SORGO (%)
Inteiro	62,6	-
Laminado à seco	65,0	64,0
Móido	76,4	67,3
Laminado à vapor	76,8	-
Floculado	85,6	82,6

Fonte: Nocek e Taminga, 1991.

das proporções degradadas ruminalmente ou pós-ruminalmente, a digestibilidade total no trato gastrointestinal é semelhante e fica próxima aos 90%.

Como uma alta digestibilidade no rúmen pode fazer com que o pH ruminal fique abaixo do ideal para o crescimento microbiano, o que pode reduzir digestibilidade da dieta como um todo, em determinadas situações, o processamento mais intenso pode ser menos interessante do que um processamento menos efetivo.

Esse é o caso de dietas com alto teor de cereais (milho, sorgo, cevada) na matéria seca e que tenha outros ingredientes da dieta com pouca efetividade da fibra. Nesse caso, apenas quebrar o milho pode ser mais interessante do que moer finamente, pois a maior taxa de degradação ruminal deste último pode fazer com que o pH ruminal fique mais facilmente abaixo do ideal para a degradação da fibra. Há uma recomendação prática para, ao se usar valores maiores do que 30% da MS da dieta como milho, apenas quebrá-lo e, valores abaixo destes, deveriam ser moídos grosseiramente.

Atualmente, a recomendação tem sido maximizar a fermentação do amido no rúmen, pois, dessa forma, seria obtido maior crescimento microbiano e, conseqüentemente, maior degradação da dieta e maior aporte de proteína microbiana no intestino delgado. O pH ruminal, neste caso, é crítico e alternativas para reduzir seu abaixamento excessivo são utilizadas: uso de tamponantes (bicarbonato de sódio), alcalinizantes (calcário tipo filler), ingredientes com bom poder tampão (polpa de citrus, leguminosas, etc.), aditivos (ionóforos, leveduras) e manejo alimentar (oferecimento da dieta em várias refeições).

Outro fator que pode diminuir efeito do processamento no aumento de energia de fontes de amido é que, além da redução do pH ruminal em função da alta digestibilidade ruminal, a glicose absorvida no intestino tem maior eficiência energética, pois não ocorrem perdas por fermentação.

Dessa forma, maior parte da energia conseguida pelo processamento é perdida no processo fermentativo (perdas como metano, CO₂ e calor) que é mais intenso. O grão menos processado resulta em uma maior quantidade digerida no intestino delgado, sem essas perdas. Esse maior aporte pode deixar de ser vantagem quando a quantidade de amido que chega

TABELA 4.3. Valores de digestibilidade ruminal de amido de milho e sorgo em função do efeito do processamento

ALIMENTO	FATOR DE PROCESSAMENTO
Milho, grão quebrado	0,95
Milho, grão moído	1,00
Milho, grão alta umidade	1,04
Milho, grão floculado	1,04
Sorgo, grão laminado	0,92
Sorgo, grão floculado	1,04
Demais alimentos	1,00

Fonte: NRC, 2001.

ao intestino delgado for muito elevada, ultrapassando a capacidade de absorção. Alguns dados de literatura apontam que, para bovinos, aportes de mais de 1 kg de amido pós-ruminal já começam a ser menos eficientemente absorvidos, resultando em mais amido perdido nas fezes.

A capacidade reduzida de aproveitamento do amido do ruminante está de acordo com a sua história evolutiva, com o hábito alimentar baseado em forragens que, praticamente, não tem amido em sua composição. As duas principais causas para isso são a baixa produção de amilases e capacidade de absorver glicose.

Mais recentemente constatou-se que é possível que haja aumento da capacidade de produção de enzimas e da capacidade de absorver glicose, por adaptação à dieta com mais amido, mas, ainda há certa controvérsia se isso seria algo que se poderia contar.

Há uma relação interessante entre proteína dietética e estímulo à produção de amilase pancreática devido a um peptídeo de liberação de colecistoquinina (CCK) que é sensível à estimulação por proteases. A CCK seria responsável, por sua vez, pelo estímulo no pâncreas.

Há uma sugestão para uso prático na correção da energia, estimada como NDT, para incluir o adicional obtido com o processamento. Os valores mostrados na Tabela 4.3, abaixo, estão na tabela de composição de alimentos do NRC para Gado de Leite (2001) e servem para multiplicar valores estimados de NDT pela fórmula de Weiss.

Carboidratos estruturais

Os carboidratos estruturais são aqueles que fazem parte da parede celular das plantas, basicamente representados pela celulose, hemicelulose e pectina. Nas dietas usuais de ruminantes, eles são a principal fonte de energia.

A pectina, apesar de ser um carboidrato estrutural, é praticamente toda utilizada no rúmen, de maneira semelhante aos carboidratos não estruturais, conforme já comentado acima.

Provenientes de alimentos vegetais, normalmente a hemicelulose tem a degradabilidade ruminal entre 45-90% e a celulose, entre 25-90%. Isto porque elas estão associadas com outros compostos que reduzem sua degradabilidade, particularmente, a lignina. O algodão, que é celulose isenta de lignina, é totalmente degradado no rúmen. Há até o caso curioso de sacolinhas de “nylon” que foram colocadas no rúmen, mas que após a incubação foram encontradas totalmente descosturadas, pois havia sido usada, inadvertidamente, linha de algodão para costurá-las e o algodão havia sido totalmente degradado pelos microrganismos ruminais.

Na média, a FDN (parede celular) é menos digestível que o CNF (principalmente conteúdo celular), portanto, a concentração de FDN na dieta está negativamente correlacionada com a concentração de energia, ou seja, quanto maior o FDN, menor o teor de energia do alimento. É comum, portanto, um alimento “A”, com FDN superior ter menos energia que o alimento “B” com FDN menor (e, conseqüentemente, maior CNF). Todavia, o alimento “B”, com FDN inferior pode ter maior teor de lignina que pode reduzir contribuição da fibra para a energia, eventualmente, não compensando sua maior quantidade de CNF, e tendo menor teor de energia que o alimento “A”. Enfim, as proporções relativas dos componentes da parede celular e, especialmente, o teor de lignina e suas interações (químicas e estruturais) com celulose e hemicelulose, são responsáveis pela porção da fibra que potencialmente pode fornecer energia ao animal. Na Tabela 4.4, abaixo, encontra-se descrita a concentração típica de carboidratos em 3 categorias de forragens.

TABELA 4.4. Concentração típica de carboidratos em leguminosas de clima temperado, gramíneas de inverno e gramíneas de verão.

CATEGORIA	LEGUMINOSAS DE CLIMA TEMPERADO	GRAMÍNEAS DE INVERNO	GRAMÍNEAS DE VERÃO
	g/kg MS CNE		
Açúcares solúveis	20-50	30-60	10-50
Amido	10-110	0-20	10-50
Frutanas	-	30-100	-
	CE		
Celulose	200-350	150-450	220-400
Hemicelulose	40-170	120-270	250-400
Pectina	40-120	10-20	10-20

Fonte: Moore e Hatfield (1994), adaptado de Van Soest, 1994.

FDN fisicamente efetivo

O FDN fisicamente efetivo (FDNfe) é a porção da fibra do alimento, ou da dieta, que efetivamente estimula a ruminação e a motilidade ruminal. O principal fator do alimento que afeta essa característica é o tamanho de partícula, associado à baixa taxa de degradação. Apenas partículas grandes requerem mastigação para serem reduzidas e saírem do rúmen. O valor 1,18 mm corresponderia ao tamanho médio das partículas para deixarem o rúmen pelo orifício retículo-omasal. As maiores partículas nas fezes de vacas ficam retidas em peneiras de 3 mm, mas as partículas médias ficam retidas em peneiras de 1 mm.

O FDNfe é medido, simplesmente, como a porcentagem do alimento que é retido em uma peneira de 1,18 mm, após ser submetido a vibração vertical. A importância do sentido vertical é que, usando-se vibradores com movimento horizontal, partículas um pouco mais longas, mas com largura menor que 1,18 mm acabam não passando pelas peneiras, superestimando o valor de FDNfe.

Na Tabela 4.5, abaixo são apresentados alguns valores de FDNfe para algumas forragens, bem como o efeito do processamento. O tamanho de partícula e o grau de lignificação afetam FDNfe.

De maneira esperada, o FDNfe diminui à medida que se processa mais o alimento. Importante observar que esse conceito implica que todas as partículas maiores do que 1,18 mm teriam a mesma efetividade. Essa é uma simplificação e muitos outros fatores, como grau de hidratação e de lignificação, devem ser consideradas. Também surgiu nos últimos anos o conceito de FDN efetivo (FDNe) que levaria em conta outras características

TABELA 4.5. Valores de FDN fisicamente efeito para algumas forragens e o efeito do processamento

FORMATO FÍSICO	COMPRIMENTO (CM)	FENO DE GRAMÍNEA	SILAGEM DE GRAMÍNEA	SILAGEM DE MILHO	FENO DE ALFAFA	SILAGEM DE ALFAFA
% de FDN fisicamente efetivo						
Longa	–	100	–	–	100	–
Picada – Partículas Grossas	4,8 a 8,0	95	95	90	-	85
Picada – Partículas Médias	1,2 a 2,0	90	90	85	85	80
Picada – Partículas Finas	0,3 a 0,5	85	85	80	80	70
Moída	0,15 a 0,25	40	–	–	40	–

Fonte: Mertens, 1997.

dos alimentos que tenham implicação no funcionamento normal do rúmen e a manutenção do pH, como tamponamento intrínseco, teor e tipo de CHO, teor de gordura e outros.

Quantidade mínima de fibra

Há uma quantidade mínima de carboidratos estruturais que é crítica para a efetiva estimulação da ruminação, da salivação e da motilidade ruminal. Na falta de estímulo de fibra no retículo, o bovino não ruma, o que reduz a produção de saliva. Esta, por sua vez, é rica em elementos tamponantes e, portanto, sua falta resulta em queda de pH que, sendo intensa, pode levar a acidose. O quadro de acidose pode desdobrar em timpanismo espumoso e laminite. Essa primeira doença metabólica decorre da estabilidade das bolhas, em função do aumento da viscosidade do fluido ruminal, que não deixam os gases da fermentação serem eructados, podendo até causar a morte por asfixia, uma vez que o rúmen inflado acaba por comprimir os pulmões. No caso da laminite, o problema é de edema nos membros inferiores do animal, causando desconforto, perda de apetite e imobilidade.

É comum haver casos de acidose subclínica, ou seja, que existe mas que não mostra sinais evidentes. Um bom indicativo de que ela pode estar ocorrendo é consumo de matéria seca muito variável (Owens et al., 1998).

A fibra também estimula a motilidade, que é importante por aumentar o contato do substrato com as enzimas extracelulares dos microrganismos do rúmen, auxiliar na ruminação e na renovação de conteúdo ruminal, ajudando a aumentar a taxa de passagem. A taxa de passagem tem importantes consequências. Ela altera a eficiência da produção microbiana uma vez que taxas de passagem mais rápidas favorecem maior eficiência no crescimento microbiano. Todavia, caso a taxa de passagem seja muito maior que taxa de renovação dos microrganismos (o tempo que leva para uma população nova substituir uma anterior), essa população de microrganismos vai se reduzindo até desaparecer.

Outro efeito da taxa de passagem, igualmente importante, e que pode ter grande impacto na utilização dos alimentos, é que ela pode alterar a degradação efetiva do alimento. Assim, um alimento que tenha 70% de digestibilidade com incubação por 24h, pode ter sua digestibilidade reduzida, caso ele permaneça menos do que 24h no rúmen.

Na determinação do nível mínimo de fibra na dieta é importante que seja considerada a porção da fibra que efetivamente estimula a ruminação. Em dietas com bagaço de cana-de-açúcar tratado a pressão e vapor, por exemplo, o valor calculado de fibra, como FDN, pode ser bastante elevado (50%, por exemplo), mas, ainda assim, é provável que o animal não apresente ruminação, pois no tratamento a fibra é totalmente pulverizada, perdendo sua efetividade. Para contornar situações como essa que foi estabelecido o parâmetro de *FDN_fisicamente efetivo* (FDNfe), discutido anteriormente.

Valores mínimos de FDNfe para bovinos de corte

Ao contrário de bovinos de leite, uma vez que a falha em provê-lo é facilmente identificável por mudanças na produção e composição de leite, bovinos de corte não têm bem definidos os valores mínimos de fibra.

Em bovinos de corte, alguns sistemas de formulação de rações têm estipulado como nível crítico o de 15%. O que se sabe é que em zebuínos essa exigência de FDNfe é mais crítica.

Dependendo das fontes de energia, dos outros ingredientes, da adaptação à dieta, da fonte de fibra, da presença de aditivos e do manejo alimentar, valores menores podem não resultar em problema. Isso fica claro nos dados de Bulle et al. (2002), no qual bovinos Nelore consumindo dietas com apenas 15% de FDN tiveram excelente desempenho, com GDP maior do que 1,5 kg. Neste caso, a fonte de fibra foi bagaço de cana-de-açúcar *in natura*, uma fonte de fibra efetiva excelente, pois é fibra altamente indigestível.

Os grãos também tem alguma efetividade como fibra. Em dietas com grãos de milho inteiro como maior parte da dieta, pode haver estímulo para ruminância, ainda que insuficiente para essa situação. Nas dietas sem uso de volumoso, a recomendação de usar o grão inteiro ocorre exatamente por conta deste estímulo e, também, de uma redução na taxa de degradação ruminal do milho. Ainda assim, neste tipo de dieta são utilizados aditivos e tamponantes para reduzir o risco de problemas metabólicos.

Importância da manutenção do pH ruminal

O pH ruminal é a mais importante variável ruminal na degradação da fibra. A manutenção dele acima de 6,2 é altamente desejável, pois esse é um valor considerado crítico para a atividade das bactérias celulolíticas e boa produção microbiana. Por serem preferencialmente afetadas as bactérias celulolíticas, a manutenção do pH acima do valor crítico é tão mais importante, quanto maior for o teor de fibra da dieta.

Além do valor mínimo de FDNfe, o manejo da alimentação pode ser uma importante estratégia para minimizar problemas com o pH ruminal:

- 1) *Homogeneizar bem a dieta*: para evitar que o animal selecione parte das dietas com maiores taxas de fermentação. Isso ocorre, por exemplo, quando o animal seleciona o concentrado em detrimento do volumoso ou algum ingrediente do concentrado mais fermentescível.
- 2) *Fracionar a dieta em várias refeições*: pois a produção de ácidos graxos da fermentação dos alimentos fica menos intensa em cada alimentação, simplesmente porque há menos alimento de cada vez para ser fermentado.
- 3) *Maximizar o espaçamento entre refeições*: de forma que tenha havido possibilidade do pH ruminal já ter retornado a valores mais elevados quanto se oferta novamente a dieta. Quando as refeições são muito pouco espaçadas no tempo, o pH ruminal pode estar ainda baixo por influência da fermentação da refeição anterior, o que faz com que a nova redução do pH, pela nova ingestão de alimentos, mais facilmente deixe o pH fora da faixa ideal.

Fibra e valor nutritivo das forragens

O teor de FDN na forragem está negativamente correlacionado com a concentração de energia, mas um alimento com FDN superior a outro, pode ter maior teor de energia em função das diferentes proporções de celulose, hemicelulose e lignina, bem como aspectos estruturais também podem afetar a digestibilidade da fibra. Na Tabela 4.6, foi relacionado o aumento de FDN e lignina com o valor estimado de NDT pela fórmula de Weiss.

Quanto maior o FDN, menor o conteúdo celular, o qual tem componentes com mais alta digestibilidade, como os carboidratos não estruturais. Com o passar do tempo, além de aumentar a proporção do FDN, ele vai se tornando mais lignificado. Há uma relação segundo a qual para cada unidade percentual de lignina, há a redução em 2,4% na digestibilidade da forragem. No caso da Tabela 4.6, a redução de NDT é bem consistente com essa relação, quando comparamos o valor de 1-14 dias com o de 155-168 dias.

Os valores de desempenho entre estes dois extremos, em uma simulação considerando bovinos mestiços, de tamanho médio, condição corporal média, castrados e pesando 450 kg seria de 767 g/cab.dia e 246 g/cab.dia, para o NDT de 66,8% e 55,7%, respectivamente. No caso do valor de desempenho mais baixo, haveria necessidade de correção com alguma fonte de nitrogênio não proteico, pois, sem isso o que ocorreria seria uma ingestão de matéria seca deprimida pelo baixo teor de PB e perda de peso, realidade comum em pastagens da seca sem suplementação.

Fatores anatômicos que influem na qualidade da forragem (digestibilidade e ingestão)

Não apenas os componentes químicos, mas a maneira como eles são organizados influenciam qualidade do alimento. Pode ser afetado apenas

TABELA 4.6. Composição e valor nutritivo de Capim Elefante “Napier” em função da idade e Energia (Estimada)

IDADE (DIAS)	TEOR DO COMPONENTE, % NA MATÉRIA SECA				
	FDN	FDA	LIGNINA	PB	NDT ESTIMADO
1 – 14	49,9	30,0	2,8	16,7	66,8
29 – 41	58,4	36,7	3,0	11,4	64,1
57 – 70	65,5	39,8	3,5	5,3	62,0
85 – 98	69,2	43,4	4,5	3,7	59,4
113 – 126	70,8	44,2	5,3	3,3	57,5
155 – 168	71,7	45,6	6,2	3,0	55,7

Adaptado dos Roteiros do Curso de Formulação de Ração, Prof. Dante Lanna (ESALQ/USP).

valor nutritivo, quando o efeito se restringe a reduzir a digestibilidade do alimento, ou também o valor alimentar, quando a ingestão voluntária é também comprometida.

A anatomia da planta tem significativa influência na facilidade e padrão de fragmentação e, conseqüentemente, no tamanho e forma da partícula resultante. O padrão de vascularização das gramíneas, com os feixes de vasos dispostos ao longo da folha e paralelos entre si, ajuda a explicar porque ela quebra mais dificilmente que as leguminosas, que têm os feixes de vasos com aspecto reticulado e, portanto, com muito mais pontos de quebra.

As formas das partículas resultantes da redução de leguminosas são mais parecidas com a de um quadrado e a das gramíneas, ao contrário são mais finas, mas bem mais longas. Estas duas características das partículas das leguminosas facilitam a saída do rúmen. Em gramíneas, o acesso dos microrganismos é reduzido, as partículas são mais lentamente reduzidas em tamanho e ficam com um formato de mais difícil escape ruminal. Esses são fatores predisponentes, mas não necessariamente decisivos para a redução da ingestão voluntária pelo efeito de enchimento ruminal.

Valores elevados de FDN não deveriam limitar a ingestão de MS caso esse FDN seja composto por células com parede delgada do mesófilo ou células do parênquima das hastes, pois essas células são rapidamente particionadas à tamanhos menores que 0,15 mm (em geral, o menor tamanho medido em experimentos) e, assim, escaparem facilmente do rúmen. O valor crítico para a as partículas deixarem o rúmen, como já citado, estaria próximo a 1,18 mm.

Os feixes de fibra vascular e do esclerênquima são os principais responsáveis pelas partículas de tamanho maior que o valor crítico e que permanecem mais tempo no rúmen. A quantidade de vasos para serem cortados pela mastigação (mg/mm) de uma gramínea tropical (com 300 mm de comprimento) é cerca de 10 vezes maior que a de uma gramínea temperada (com 150 mm de comprimento) e 15 à 50 vezes maior que a quantidade de vasos de folhas de leguminosas (com 19-45 mm de comprimento).

A epiderme e os feixes de fibra vascular são as estruturas que mantém a integridade da folha e da haste. São elas que requerem mastigação durante a ingestão e a ruminação para serem reduzidas em tamanho. As células destas estruturas são unidas sem espaço intercelular pela lamela média que é altamente lignificada, com ligações químicas fortes e sem pontos de quebra.

Essa lamela média parece totalmente indigestível e faz com que a digestão ocorra apenas do lúmen das células para as paredes celulares, isto é, de dentro para fora, em lugares onde tenha havido ruptura do tecido para expor o lúmen. É por causa disso que os feixes vasculares não se dividem em células individuais.

No caso da epiderme é notável a diferença entre leguminosas e gramíneas C3 e C4. Ela é a primeira barreira que deve ser cortada para reduzir o tamanho e foi feita para resistir aos estresses físicos e contra agentes biológicos (insetos, fungos, etc.). As plantas C4 têm células vizinhas que se ligam por fortes estruturas sinuosas, que dá grande reforço à estrutura e dificulta a separação. Nas gramíneas C3, as células vizinhas se unem de maneira

reta (como tijolos), mas ainda são mais resistentes às separações do que as leguminosas, que tem uma estrutura em lóbulos e são facilmente separadas. Nas hastes, as epidermes das gramíneas têm paredes mais lignificadas que produzem uma forte lamela média entre as células.

Nas leguminosas, a epiderme está aderida ao mesófilo de forma débil, bem como nas gramíneas C3, o que facilita a ruptura pela mastigação e, conseqüentemente, o acesso dos microrganismos. As C4, por sua vez, têm a epiderme firmemente fixada aos vasos vasculares, tendo uma resistência muito maior. Nelas, a epiderme está ligada aos feixes vasculares por uma estrutura que é chamada de Estrutura Girder. Ela pode ser do tipo "I", que une as duas faces da epiderme da folha ou do tipo "T" em que apenas um lado da epiderme tem essa ligação. Esta estrutura evita, ou atrasa, a remoção da epiderme pela digestão ou força física leve e reduz o acesso dos microrganismos ruminais ao mesófilo e ao parênquima.

Enfim, a estrutura das partículas, das células contidas nela e das paredes celulares desta célula podem atrapalhar o acesso dos microrganismos ruminais às paredes secundárias. Uma das confirmações disso foi o que ao serem destruídas as estruturas anatômicas constatou-se que células altamente lignificadas do esclerênquima tiveram inesperada elevada digestibilidade. Essa seria, para gramíneas, a principal limitação de digestibilidade e não a composição da parede celular. Ainda que isso seja verdade, não temos meios, ainda, de mensurar ou mesmo incluir esses fatores estruturais em modelos para predição de valor nutritivo ou alimentar.

PRINCIPAL FORMA DE METABOLISMO DE CARBOIDRATOS EM RUMINANTES: FERMENTAÇÃO

Os carboidratos no ruminante são em sua maioria fermentados e têm como produtos dessas fermentações os seguintes compostos:

- 1) Produção de Ácidos Graxos de Cadeia Curta
 - a) Acético (C2)
 - b) Propiônico (C3)
 - c) Butírico (C4)
 - d) Outros (valérico, isovalérico, etc.)
- 2) Produção de Metano (CH₄)
- 3) Produção de Dióxido de Carbono (CO₂)

Os gases escapam o rúmen, principalmente, por eructação (boca e narina), mas parte também pela parede do rúmen e pulmões. Havendo problemas com a saída deles, pode ocorrer timpanismo.

A proporção com que ácidos graxos são produzidos varia de acordo com os substratos (provenientes da dieta ingerida). Na Tabela 4.7, são apresentadas as proporções esperadas para uma dieta rica em fibra teria e outra dieta com alto concentrado.

Enfim, a dieta rica em concentrado aumenta relativamente mais o teor de C3, particularmente, e de C4 em relação a uma dieta rica em fibra. A maior parte deste efeito seria devido à queda do pH que ocorre em dietas com alto concentrado, pois quando o pH foi mantido estável com o uso de

TABELA 4.7. Proporções de ocorrência dos ácidos graxos voláteis em dois tipos de dieta

DIETA	ACÉTICO (C2)	PROPIÔNICO (C3)	BUTÍRICO (C4)
Dieta com alta % de volumoso	70 %	20 %	10 %
Dieta com alta % de concentrado	50 %	35 %	15 %

Fonte: Bergman, 1990.

tamponantes, as proporções não se alteraram. Há importantes implicações da proporção de ácidos graxos de cadeia curta na eficiência do uso de energia:

- 1) Dietas ricas em concentrado têm menor perda de energia como Metano (CH₄) em função do maior teor de propiônico (C3).
- 2) Outra vantagem é que o C3 tem menor incremento calórico, sendo uma forma mais eficiente de utilização de energia, quando comparado ao acético.

Esses estariam entre os motivos da maior eficiência de dietas de alto concentrado. Outro fator muito importante é a diluição das exigências de manutenção. Quanto maior o nível de produção acima da manutenção, menor o peso desta por quilograma de peso produzido, semelhante à diluição de custos fixos que aprendemos em economia.

Absorção de AGCCs e uso nos tecidos

Os AGCCs, como ácidos que são, podem estar na forma associada com H⁺ ou dissociada. Estes são absorvidos em grandes quantidades na forma não dissociada (HA), mas, em pH normal, há apenas uma pequena quantidade na forma HA.



Forma não dissociada

Forma dissociada

A absorção de HA, “puxa” a equação para o seu lado, mantendo o sistema funcionando. O pH baixo, que significa alta concentração de H⁺ faz o mesmo. Isso ocorre porque, quando se aumenta um fator de um dos lados da equação, para ela manter o equilíbrio, aumenta-se a formação do produto do outro lado. Assim, quando aumenta-se o H⁺, aumenta-se a formação de HA, que é mais facilmente absorvido. Esse mecanismo ajuda com que o pH não abaixe ainda mais, porque reduz a concentração dos AGCCs no rúmen. O sangue tem pH mais alto do que o do rúmen, o que ajuda no transporte passivo, isto é sem gasto de energia.

Por fim, ao lado da mucosa do lúmen ruminal o CO₂ é liberado, formando H₂CO₃ e depois HCO₃⁻. O H⁺ formado “puxa” equação para o lado direito, também ajudando a absorção dos AGCCs. Os AGCCs não são usados indistintamente em cada tecido. O acético (C2) é metabolizado principalmente pelos *tecidos periféricos*. Já o propiônico (C3), é metabolizado principalmente no *fígado* para produzir glicose, através do processo de chamado

gluconeogênese. E o butírico (C4) é metabolizado principalmente (74-90%) no *epitélio ruminal*.

Absorção pós-ruminal de carboidratos

Os carboidratos que escapam a fermentação ruminal são absorvidos de maneira semelhante ao que ocorre com monogástricos. Eles são quebrados a seus monossacarídeos por enzimas presentes no lúmen intestinal e absorvidos pelas paredes do intestino, particularmente do intestino delgado proximal (mais perto da boca).

Há dissacaridases presentes nas pontas das microvilosidades das células epiteliais que quebram dissacarídeos (maltose, lactose, sacarose) produzindo os respectivos monossacarídeos (glicose, frutose, galactose). A maioria deles é transportada por difusão simples, isto é, sem necessidade de gasto de energia, pois vai a favor do gradiente (maior concentração dentro do intestino do que na célula epitelial do intestino). No caso da frutose essa difusão é mediada por carreador, mas é importante frisar que esse carreador apenas auxilia o transporte, sem gasto de energia. A transformação, na célula epitelial, da glicose em piruvato ajuda a manter o gradiente e manter o transporte por difusão.

Com relação à glicose e à galactose, estes monossacarídeos podem ser transportados ativamente, com gasto de energia, contra o gradiente de concentração. Um carreador une o sódio a um monossacarídeo que é bombeado para fora da célula com gasto de ATP.

Exigência de glicose pelos ruminantes

Os ruminantes criaram estratégias para economia de glicose, uma vez que a dieta básica com a qual evoluíram é pobre neste açúcar. Uma delas é a gluconeogênese na qual usa Propiônico (C3) como principal fonte para a produção de glicose, processo que ocorre no fígado. Por conta disso, o C3 pode representar de 27-59% do “pool” de C do corpo do animal.

A importância de encontrar meios para poupar glicose é que ela é fundamental para o sistema nervoso central, sendo que, no mínimo 10% de suas exigências energéticas devem vir desse substrato.

Outra estratégia de economia de Glicose do ruminante é ter o acético (C2) como principal fonte de energia para os tecidos, que não nervosos, e como principal fonte de carbono para a síntese de gordura (lipogênese).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compreensão dos aspectos relacionados à digestão dos carboidratos é essencial para intervenções no manejo nutricional dos ruminantes, já que esta classe nutricional representa sua principal fonte energética. Toda estratégia nutricional deve procurar maximizar o aproveitamento destes nutrientes, porém sem se esquecer da necessidade de se manter o ambiente ruminal estável, especialmente em condições de alta utilização de carboidratos não-estruturais.