

A Fórmula Especial da Força Máxima de Impacto

P. P. de Lima-e-Silva
www.ceu-aberto.com
21 de setembro de 2019

RESUMO

Este artigo introduz melhorias na fórmula clássica da força máxima de impacto sobre um(a) escalador(a) de rocha em queda (F_{MAX}). A fórmula é dita especial porque o escopo é apenas a queda livre. O Modelo Experimental 1, ou ME1, é um modelo semi-empírico, que busca ser mais realista porque considera dois fatores ignorados pelo modelo clássico de Wexler: a segurança dinâmica (SD) e o atrito no último mosquetão (AUM). O ME1 também introduz uma fórmula para a força máxima de impacto na última âncora (F_{GRA}), uma preocupação da atualidade. O estudo procurou explicar o aparente paradoxo entre valores estimados de F_{GRA} supostamente maiores do que a resistência dos grampos-P usados no Brasil. A metodologia incluiu um resumo histórico da fórmula clássica, análise da literatura publicada, observações da experiência e análises de sensibilidade. A comparação de F_{MAX} e F_{GRA} calculadas pela fórmula clássica e pelo ME1 revelou fortes diferenças, e pode explicar a ausência de acidentes graves no Brasil por falha de grampos. A conclusão é que as equações do ME1, ao considerarem fatores existentes antes desprezados, revelaram uma realidade diferente da intuitiva, resultando em valores de F_{GRA} e F_{MAX} surpreendentemente baixos, o que deve levar a uma reavaliação do dimensionamento dos sistemas de segurança.

ABSTRACT

This paper introduces improvements to the classic formula of maximum impact force on a falling rock climber (F_{MAX}). The formula is said to be special because the scope is just free fall without contact with the rock. The so-called Experimental Model 1, or EM1, is a semi-empirical model that seeks to be more realistic because it considers two factors ignored by Wexler's classic model, the dynamic belay (DB) and the last carabiner friction (LCF). O EM1 also introduces a formula for maximum impact force onto the last anchorage (F_{GRA}), a concern of today. The study sought to explain the apparent paradox between estimated F_{GRA} values supposedly higher than the resistance of P-bolts used in Brazil. The methodology included a historical summary of the classical formula, analysis of published literature, observations of the experiment, and sensitivity analyses. The comparison of F_{MAX} and F_{GRA} calculated by the classic formula and the ME1 revealed strong differences. It may explain the absence of serious accidents in Brazil due to P-bolts failure. The conclusion is that the EM1 equations, when considering existing factors previously neglected, reveal a different reality than the intuitive one, resulting in surprisingly low F_{GRA} and F_{MAX} values, which should lead to a reevaluation of the safety systems dimensioning.

Palavras-chave:

escalada em rocha, força máxima de impacto, segurança, asseguração, atrito no mosquetão, segurança dinâmica

1.0 CONTEXTO

1.1 Introito

Escalar é uma atividade de risco. A escalada livre em rocha impõe riscos inerentes, e é impossível controlar todas as variáveis. O estado mental e físico do(a) escalador(a), os elementos de distração, as condições ambientais mutantes, o estado da rocha, o grau de dificuldade da via, a qualidade do material usado, todos são elementos de difícil controle. O propósito deste estudo não é eliminar os riscos que fazem parte da alma do esporte, mas possibilitar aos(as) escaladores(as) brasileiros(as) maior consciência deles através de um conhecimento básico da Física da escalada e das forças que atuam nesse esporte técnico e assim os tornar mais capazes de controlar esses riscos.

A força máxima de impacto no(a) escalador(a)¹ que cai (F_{MAX}) é o parâmetro básico para estabelecer a segurança do sistema de proteção aos praticantes da escalada livre, o estilo de escalar no qual todo o equipamento de

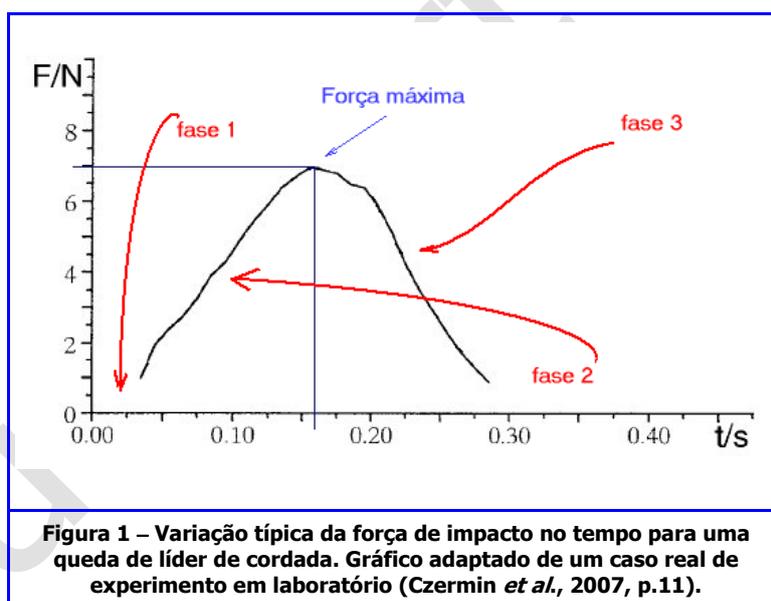
¹ Neste artigo o termo "escalador" vai substituir o termo "escalador". Na prática, como no Brasil não existem escaladas em neve e gelo, significam a mesma coisa, o escalador de rocha. Na língua inglesa, "alpinist" é o escalador de alta montanha, com neve e gelo, e "rock climber", o escalador brasileiro.

segurança utilizado, como corda, bodriê², fitas, mosquetões, dispositivos de frenagem têm a única função de operar se ocorrer uma falha ambiental ou humana causando a queda do(a) escalador(a). Nesse contexto, o escopo deste artigo são as cordas dinâmicas e as escaladas asseguradas.

A expressão "força máxima" vem da variação da força exercida na corda durante uma queda, começando com um valor mínimo, passando por um máximo e retrocedendo até o peso do(a) escalador(a). O gráfico da Figura 1 mostra essa variação durante a queda. Ele é uma adaptação de um gráfico de uma queda monitorada de laboratório onde a força sobre o(a) escalador(a) foi registrada com precisão de centésimos de segundo, desde a soltura do peso até sua imobilização final (Czermin *et al.*, 2007, p.11). Naquele teste, a força atingiu seu valor máximo de 7kN em 0,16s após a corda iniciar seu alongamento³.

Na primeira fase da queda o(a) escalador(a) está caindo, mas toda a corda aberta⁴ ainda não foi completamente estendida. A força sobre ela é apenas seu próprio peso. Na Fase 2, depois de já completamente estendida, a corda começa a ser esticada no seu atributo de "mola". O peso do(a) escalador(a) em queda, acelerado pela gravidade, continua atuando, mas a corda começa a resistir, progressivamente, o que causa um correspondente aumento da força sobre a corda (e em todo o sistema), até o ponto em que atinge seu alongamento máximo, quando toda a energia foi absorvida pela corda, e assim o momento em que o(a) escalador(a) para de cair. Nesse instante, a força exercida sobre a corda também é máxima.

O movimento entra na Fase 3; a energia elástica acumulada na corda puxa o(a) escalador(a) para cima em movimento de retorno a uma nova posição de equilíbrio, até que a força se iguale ao peso do(a) escalador(a), e este se tornar imóvel. Se a corda fosse de fato uma mola, o(a) escalador(a) entraria em movimento oscilatório para cima e para baixo até que os atritos consumissem a energia e ele se imobilizasse. Mas entra em cena outra característica da corda de escalada que é seu relevante amortecimento pelo atrito interno, que consome a energia elástica e conduz o(a) escalador(a) a um estado de repouso "dinâmico"⁵, usualmente sem uma segunda oscilação.



Assim, a força máxima não é a maior força que pode ser exercida numa queda, mas a maior força que é exercida sobre o(a) escalador(a) entre o momento em que cai e o momento em que para de se mover. O gráfico da Figura 1, apesar de ser resultado de um experimento específico, é representativo do padrão geral de comportamento da força numa queda, saindo de um valor mínimo, subindo até um máximo e retornando a outro mínimo. Porém, a força pode atingir máximos maiores ou menores numa queda livre, dependendo principalmente da massa do(a)

² Aportuguesado do francês *baudrier*, adotado pelos escaladores nas décadas de 1970/80/90 no Brasil, mas que tem sido substituído por "cadeirinha" (*harness* em inglês, *baudrier* em francês).

³ A palavra "alongamento" (também usadas "deformação", "alongamento", "elongação") designa a fase do movimento da corda em que ela se comporta como uma mola (fase elástica); todo o seu comprimento foi estendido, não há mais folgas, e ela é forçada a se esticar para além de seu comprimento nominal. As palavras "extensão" e derivadas (e.g. "estendido") neste artigo designam a fase anterior, quando se comporta como um cabo não elástico.

⁴ Expressão adotada para a quantidade de corda envolvida na dinâmica da queda, a metragem de corda entre o líder e seu assegurador.

⁵ Na verdade, existe sempre alguma oscilação mesmo depois da estabilização, porque o escalador se mexe e a elasticidade existe. A expressão 'repouso dinâmico' se refere ao repouso das grandes oscilações que, para os escaladores que já tiveram grandes quedas, é um conforto notável.

escalador(a), do fator de queda, dos atritos em jogo, dos fatores de atenuação dinâmica na finalização e da capacidade de alongamento da corda. Em relação ao fator de queda, o símbolo usado nos trabalhos em inglês é quase sempre "f", e em português "Q", naturalmente as letras iniciais das palavras nas respectivas línguas. Assim, neste artigo esses símbolos aparecerão alternativamente para representar o fator de queda. Em situações que isso poderia ficar confuso, a grandeza aparecerá também por extenso.

1.2 Objetivos

• Objetivo principal

O objetivo último deste artigo é obter uma fórmula para a força máxima de impacto na última ancoragem (F_{GRA}), uma preocupação dos tempos atuais, porque é esse valor que vai determinar a força que as ancoragens devem suportar. Porém, como a literatura do tema é maciçamente concentrada em F_{MAX} , o estudo começa por ela, lembrando que F_{GRA} é construída sobre a fórmula de F_{MAX} , com acréscimos. Os aprimoramentos alvos são, primeiro, a consideração da atenuação da segurança dinâmica (SD), que afeta significativamente ambas F_{MAX} e F_{GRA} , e segundo, a consideração do atrito no último mosquetão (AUM), que afeta marginalmente F_{MAX} e fortemente F_{GRA} . Esses dois modelos matemáticos compõem o que é denominado aqui de Modelo Experimental 1, ou ME1.

Todas as cordas de escalada fabricadas hoje que detêm o selo da UIAA⁶ necessariamente atendem o requisito de não causar uma força de impacto em qualquer queda maior do que 12kN sobre o corpo do(a) escalador(a), i.e. $F_{MAX} \leq 12\text{kN}$. Este valor tem origem em estudos da década de 1950 do exército americano sobre a força máxima que um pára-quadras deve exercer sobre o corpo de um saltador. Na prática, as cordas fabricadas atualmente, com raras exceções, exercem uma F_{MAX} menor do que 9kN, e a imensa maioria no intervalo 7-9kN. Como as cordas têm resistência a tensões muito mais altas⁷, no intervalo 18-23kN, é impossível, em condições normais de uma escalada, com uma corda em razoável estado de conservação, haver um rompimento da corda apenas pela força da queda, mesmo na mais severa queda fator-2⁸ (V. esquema do teste UIAA para cordas na Figura 2).

Esse fato é do conhecimento dos Físicos e Engenheiros que escalam, como Leuthäusser (2016a, p.5), cujas avaliações da resistência das cordas e capacidades de alongamento o fizeram reafirmar que:

*"A maior força máxima possível (com $m=80\text{kg}$ e o maior fator de queda teórico possível $Q=2$) é somente 6% maior do que a força de impacto numa queda padrão UIAA. Com uma resistência a tensão de cerca de 20kN, i.e. mais do que duas vezes o necessário, uma corda de escalada não pode ser rompida apenas por pura extensão numa queda normal (sem uma borda cortante para cortar a corda)."*⁹

Este artigo se restringiu à análise do fenômeno da queda em cordas únicas, porque as duplas causam forças menores que elas, e as gêmeas são raramente usadas no Brasil. Ele também não aborda casos especiais, como acidentes de rompimento de corda por cisão numa fenda ou outras razões incidentais, focalizando-se em F_{MAX} para obter em última instância F_{GRA} , pois é esta última que pode causar a falha da ancoragem e impor risco de morte.

• Objetivos secundários

Além do objetivo principal, este artigo propõe-se a mais três objetivos secundários: [a] fazer uma breve revisão histórico-bibliográfica em português sobre a Física da escalada de textos publicados fora do país e nunca traduzidos, disponibilizando na nossa língua importantes estudos sobre o tema; [b] confrontar os modelos de cálculo propostos, na verdade variações da fórmula clássica, com o fenômeno real, buscando explicações das aparentes contradições entre os valores calculados pela fórmula clássica, a resistência das ancoragens como divulgadas em alguns documentos em português e a ausência de acidentes com falha dessas ancoragens; [c] identificar os fato-

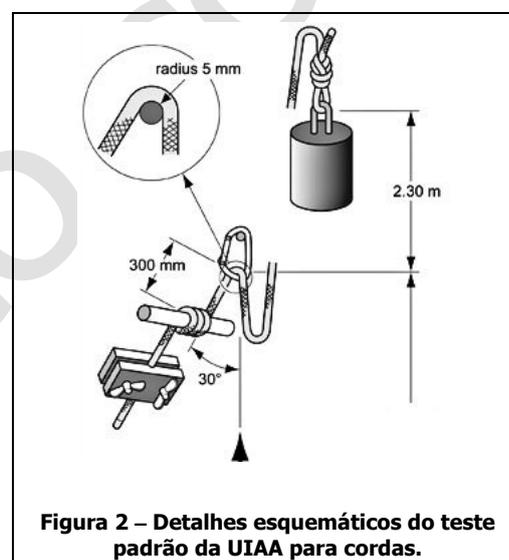


Figura 2 – Detalhes esquemáticos do teste padrão da UIAA para cordas.

⁶ Union Internationale des Associations D'Alpinisme, órgão internacional de normatização do esporte e certificação de material, com sede na Suíça (Url:theuiaa.org).

⁷ Referências de testes: Mumford, R. (2017); Tregoweth, R. (2011); Richards, D. (2005); [4] Brown, A. (2008).

⁸ Na vida real, verdade, não há quedas fator-2 em condições normais; isso é explicado mais adiante neste artigo.

⁹ No original: "The largest possible F_{max} (with $m=80\text{kg}$ and the maximum possible fall factor $f=2$) is only 6% larger than the impact force in a standard UIAA fall. With a typical tensile strength of about 20kN, i.e. more than twice as much, a climbing rope cannot break by pure stretch in a normal fall (without a sharp edge to cut the rope)."

res importantes que estejam ausentes da teoria clássica, analisar as possibilidades de quantificação desses fatores, e propor formulações teóricas ou semi-empíricas que possam considerar esses fatores de forma prática.

A formulação simplificada de F_{MAX} (porque ignora folgas na corda e outras variáveis) em uma corda de escalada devido a um corpo que cai não envolve matemática e física sofisticadas, e pode ser compreendida por qualquer pessoa com um treinamento básico em mecânica (Física) e álgebra. Mas há complexidades dentro da simplicidade, uma característica da realidade objetiva. Alguns fatores dessas complexidades serão abordados na parte final do artigo, pois assumem papel relevante na intensificação e atenuação das forças intervenientes, as quais devem ser conhecidas dos praticantes do esporte para serem capazes de gerenciar seus riscos.

Não tem este artigo a intenção de ser preciso na determinação das forças que atuam durante uma queda, uma aproximação razoável é aceitável. O propósito subjacente a essas descrições e análises é trazer esse conhecimento aos(as) escaladores(as) brasileiros(as), usando neste primeiro artigo de uma série, a Física da força máxima de impacto como um fio condutor para expor fatores importantes para a segurança da escalada em rocha no Brasil, e buscando quebrar o vácuo de artigos científicos nesse tema em português do Brasil.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão bibliográfica mostra que, desde a primeira publicação de Arnold Wexler em 1950, pouco avanço aconteceu. Como a Física da escalada é, grosso modo, relativamente simples, era esperado que fosse assim. Mas a complexidade de modelar o comportamento não-linear do módulo¹⁰ da corda (que determina sua capacidade de alongamento) impõe desafios. Além disso, há fatores externos de difícil padronização que exercem forte influência em F_{GRA} . Esses aspectos tornam difícil a modelagem de diversas variáveis, como o atrito da corda com o último mosquetão, quando há centenas de modelos de mosquetões usados, e das técnicas da segurança dinâmica, quando há inúmeras formas de assegurar, para citar a enorme diversidade de apenas duas importantes variáveis.

2.1 Wexler (1950): *The Theory of Belaying* (“A Teoria do Asseguramento”)

Arnold Wexler é o pesquisador de registro mais antigo que analisou e publicou sobre a Física da escalada, pela introdução do cálculo de F_{MAX} e do conceito de fator de queda (sem essa denominação, então). Seu artigo publicado na revista *American Alpine Journal*, de 1950 (Wexler, 1950), só é precedido por ensaios do próprio Wexler de 1946, publicados num boletim do Sierra Club, não mais disponível (Jarvis, 2017). O interessante é que Wexler não estava tentando avaliar F_{MAX} , ele desenvolveu a fórmula (Figura 3) porque queria mostrar que a segurança dinâmica era importante para reduzir F_{MAX} , e assim eliminar o risco de romper a corda, a grande preocupação de então.

$$P = W + W \sqrt{1 + \frac{2kH}{WL}}$$

[Eq.2-1]

Figura 3 – Fórmula de F_{MAX} segundo Wexler (1950, p.4). P=força máxima, W=peso do(a) escalador(a), H=altura da queda, L=quantidade de corda aberta, e k=módulo da corda (módulo de Young e seção transversal. Alerta o autor que desconsiderou a segurança dinâmica.

Naquela época, as cordas eram semi-elásticas, com menos resistência dinâmica e amortecimento, e assim se justificava a preocupação. Para deduzir a fórmula, ele assumiu que a corda obedece à Lei de Hooke (elasticidade), produzindo a formulação da Figura 3, cuja dedução é mostrada na Tabela 1.

Wexler foi pioneiro em apontar o valor máximo do fator de queda¹¹ (Q), que ocorre quando a relação entre altura da queda e corda aberta é teoricamente máxima, i.e., quando a energia por unidade de corda é maximizada. Essa situação acontece quando o(a) escalador(a) cai antes da primeira costura; se ele(a) sobe uma altura de H metros e cai, sua queda será de $2H$ metros, e a quantidade de corda aberta será de H metros (na realidade, ainda há

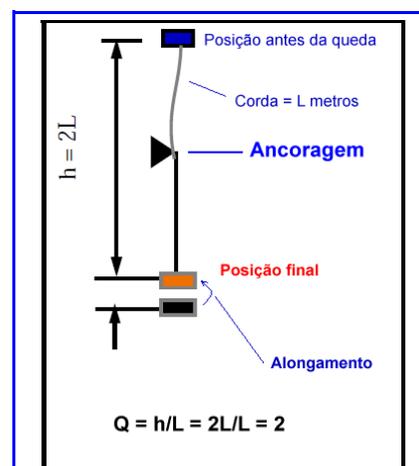


Figura 4 – O fator de queda Q (=f) é a razão entre a altura de queda e a metragem de corda. Adaptada de Attaway (1996, p.6).

¹⁰ Diferentes autores nomeiam “módulo” grandezas diferentes. Leuthäusser e a Beal (Leuthäusser, 2016a; Beal, 2004) atribuem a palavra ao módulo de Young, a constante material da corda que descreve suas características físicas (N/m²); outros (e.g. Attaway, 1996; Wexler, 1950) atribuem “módulo” ou “módulo da corda”, ao produto do módulo de Young pela sua seção (E·A). Para evitar confusão, este artigo usa “módulo de Young” (E) para o próprio, e “módulo da corda” para o produto E·A, simbolizado por K ou M.

¹¹ Uma curiosidade é sobre a força máxima para uma queda fator zero. Nas escaladas esportivas, o escalador está suspenso pela corda de cima que é recolhida. Assumindo que não há folga, se ele cair, qual será a F_{max} na corda? Basta fazer $K=0$ na fórmula, $F_{MAX}=2mg$, i.e. duas vezes o seu próprio peso.

uma folga da corda, mas vamos desprezá-la neste contexto). Dividindo-se a altura da queda pela metragem de corda aberta, obtém-se $2H/H=2$, o maior fator de queda em condições normais teoricamente possível¹² (Figura 4).

Wexler alertou que sua fórmula não considerava a SD e nem a folga da corda. Ele desconsiderou também a força de atrito na última costura, o que pode ser explicado pela sua preocupação com a resistência das cordas de então, e não com a das ancoragens. De qualquer forma, foi um trabalho notável ao considerar fatores discutidos até hoje, 68 anos depois, como a SD e o atrito seco, especulando inclusive que o atrito seco poderia provocar um fator de queda (**Q**) que atingisse ou ultrapassasse o valor 2, fato já corroborado por outros pesquisadores (Leuthäusser, 2016a, p.9; Lima-e-Silva, 2019c, no prelo).

Contudo, na vida real, rigorosamente, um queda fator-2 não é possível. Um conjunto de fenômenos conspira para reduzir esse fator 2, reduzindo F_{MAX} : as folgas na corda; o atrito desta com as costuras e rocha (atrito seco), que rouba energia do sistema; os amortecimentos no sistema de frenagem; nas fitas das costuras; no baudrier do assegurado; da segurança dinâmica; no corpo do líder que cai, e até de suas roupas. Essas são as razões pelas quais a UIAA aplica atualmente no seu teste padrão um fator de queda de 1,77 (UIAA, 2016), tomado como o maior valor possível numa escalada real. Há muitos outros detalhes sobre o fator de queda, e em especial sobre o valor 1,77, que serão tratados em artigo a ser publicado ainda este ano na www.ceu-aberto-com.

Tabela 1 – Dedução da primeira fórmula publicada em 1950 da força máxima exercida num escalador numa queda por Arnold Wexler, do Sierra Club, Califórnia, replicando um artigo escrito em 1946 num boletim do clube (Wexler, 1950).			
0	<p>Fórmula de F_{MAX} segundo Wexler (1950), publicada na revista científica American Alpine Journal.</p> <p>Segundo Wexler, no fim da queda o alpinista tem $v=0$, logo as forças estão equilibradas. Como o escalador tinha a energia potencial da altura H, a energia agora está armazenada na corda tensionada.</p> <p>Energia potencial = energia armazenada na mola, ou</p> <p>$W(H + x) = (1/2) Px$ [Eq.T1a]</p> <p>P = força máxima, x = alongamento da corda</p>	0	
1	<p>$P = \frac{K}{L} \cdot x$ [Eq.T1b]</p>	2	<p>Substituindo a Eq.T1a na Eq.T1b:</p> $W(H + x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{K}{L} \cdot x^2$
3	<p>Desenvolvendo a equação</p> $WH + Wx = \frac{1}{2} \cdot \frac{K}{L} \cdot x^2$	4	<p>Rearrmando os termos</p> $\frac{1}{2} \cdot \frac{K}{L} \cdot x^2 - Wx - WH = 0$
5	<p>Rearranjando para isolar "x²"</p> $x^2 - \frac{2WLx}{K} - \frac{2WHL}{K} = 0$	6	<p>Resolvendo a equação quadrática para x</p> $x = \frac{WL}{K} + \frac{WL}{K} \cdot \sqrt{1 + \frac{2KH}{WL}}$
7	<p>Da Lei de Hooke,</p> $P = \frac{K}{L} \cdot x$	8	<p>Logo,</p> $P = W + W \sqrt{1 + \frac{2KH}{WL}}$ [Eq.2-1]

2.2 Attaway (1996): Rope System Analysis (“Análise do Sistema da Corda”)

Stephen W. Attaway (1996) analisa F_{MAX} com foco no alongamento, chegando a formas diferentes da equação. Usa a letra grega δ para representar o alongamento, em lugar dos comuns “x” e “y”, e o índice “st” para qualificar o deslocamento estático. Usa a letra “K” maiúscula para o módulo e assume que essa constante não muda quando a

¹² Na verdade, em qualquer declividade, não há como cair uma distância mais de duas vezes a corda aberta. A 90°, a distância de queda é igual à altura de queda..

mola sofre uma tensão estática ou dinâmica, para concluir o formato da Eq.2-2, Figura 5 (lembrar que Attaway trabalhou com cordas estáticas). Esse formato aparenta uma dependência de F_{MAX} com a altura h , que sabemos não existir. Ele está implícito na dependência do alongamento estático com o comprimento da corda considerado; quanto maior a metragem de corda, maior δ , mantendo constante a relação entre h e L .

Mais adiante no texto deriva o alongamento em função do módulo da corda, e o substitui, fazendo a fórmula retornar à sua expressão conhecida (Eq.2-3). A desvantagem do artigo de Attaway para a escalada no Brasil é que, por ter estado envolvido com operações de resgate, Attaway se concentrou nas cordas estáticas, e principalmente as de fabricação e maior uso nos EUA, que são de tipos e origens não mais usadas para escalada em rocha. As cordas estáticas são usadas por cavernistas e espeleólogos para se locomover em cavernas abismais seja para baixo ou para cima. Escaladores(as) que já subiram numa corda dinâmica sabem como é difícil lutar contra a elasticidade das cordas dinâmicas que consomem energia para subir, tornando esse tipo de ascensão exaustivo.

$\frac{F}{W} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_{st}}} \quad [\text{Eq.2-2}]$	$\frac{F}{W} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2hM}{WL}} \quad [\text{Eq.2-3}]$
<p>Figura 5 – Fórmulas de F_{MAX} segundo Attaway (1996). Primeiro (Eq.2-2), com dois problemas, aparenta dependência de F_{MAX} com h e assume módulo igual nos casos estático e dinâmico, o que não é verdade; depois (Eq.2-3), retirando a dependência e introduzindo dados fornecidos pelos fabricantes. F=força máxima; W=peso do(a) escalador(a); h=metragem da queda; δ_{st}=alongamento estático; M=módulo da corda; L=metragem de corda aberta.</p>	

2.3 Jimenez e Freitas (1999) ("JF"): Estudo sobre as Proteções Fixas utilizadas no Brasil

Jimenez e Freitas (1999) escreveram um relatório sobre um experimento sem metodologia científica, nem na execução e nem na publicação, resultando mais num relatório informal. Ainda assim, foi incluído neste artigo como parte da resenha histórica do Capítulo 2 e 3, como parte das análises gráficas de sensibilidade porque é um dos raros experimentos, que, mesmo sem ser científico, foi documentado e publicado no site do Clube Excursionista Carioca, RJ, tratando da resistência de grampos e de F_{MAX} .

O documento é a única referência até o momento em português encontrada no levantamento bibliográfico para este artigo que aborda uma formulação para F_{MAX} . Os autores deduzem uma fórmula fazendo hipóteses semelhantes às de outros autores (Wexler, 1950; Leuthäusser, 2016a), porém com uma terminologia diferente e simplificações em excesso, cujas condições de contorno não são exploradas (Figura 6).

Eles apresentam dois formatos da equação de F_{MAX} . A Eq.2-4 (Figura 6) é dita uma forma "simplificada", pois despreza o deslocamento durante o alongamento, sob o argumento de supor "...que o deslocamento Δx devido à elasticidade da corda é bem menor que a distância que o guia caiu." Para as cordas de escalar dinâmicas, escopo do referido estudo, "bem menor" é indefinido e nesse caso questionável, dado que o alongamento dinâmico dessas cordas vale em média 35%, um valor longe de ser "bem menor".

Ela tem um termo suprimido com a justificativa de que se mantém como boa aproximação. Simplificações são usadas frequentemente em ciências e especialmente na engenharia, desde que cuidados sejam tomados, como delimitar o escopo de validade, apontar restrições e avaliar o erro provável, aspectos inexistentes no trabalho.

$F = \sqrt{2K \cdot (mg) \cdot \left(\frac{2H}{L}\right)} \quad [\text{Eq.2-4}]$	$F = P + \sqrt{2K \cdot P \cdot Q} \quad [\text{Eq.2-5}]$
--	---

Figura 6 – A Eq.2-4 é, segundo JF (1999), para o caso "simplificado". F=força máxima; m=massa do(a) escalador(a); g=gravidade; H=metragem da queda; L=metragem de corda aberta; K=módulo da corda. A Eq.2-5 é F_{MAX} em JF (1999) para o caso "mais completo". Q=fator de queda; P=mg.

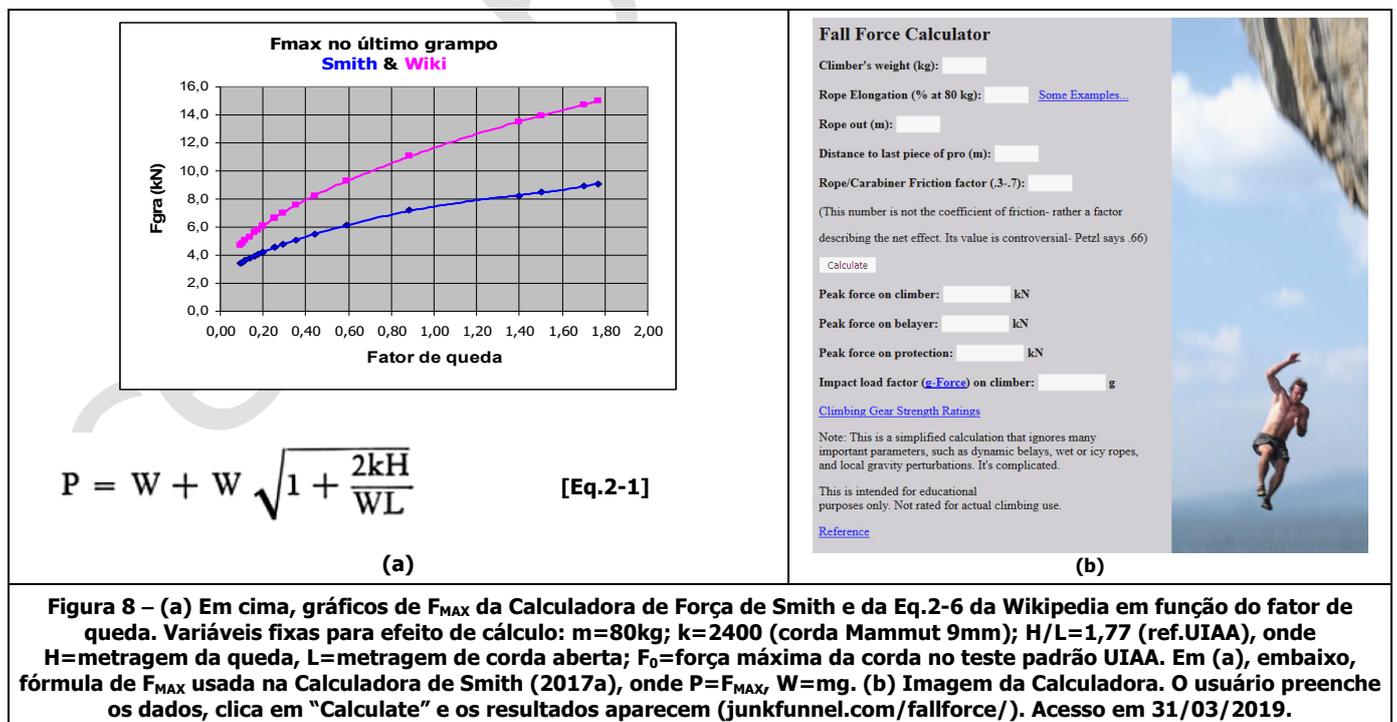
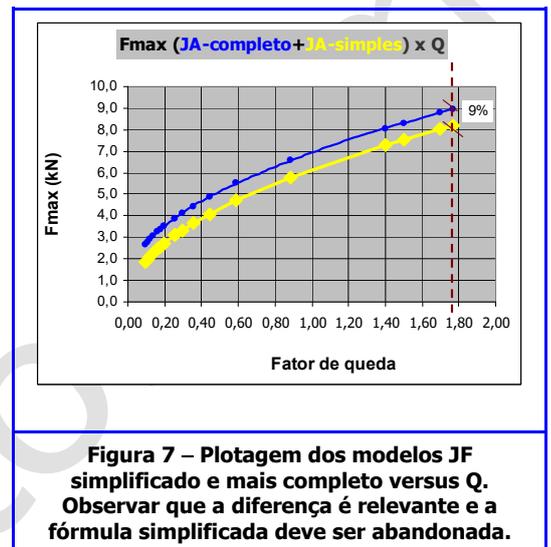
Também as variáveis e ferramentas da Física não são sempre explicitadas. Usaram a Lei de Hooke (p.5), mas ela não é citada, bem como a explicitação das características da corda não acontece; a constante elástica da corda – no artigo representada por “c”, em vez do clássico “k” – também não recebe essa denominação, mas “constante de proporcionalidade”. A utilizada letra “K” maiúscula é atribuída a “...uma constante que depende apenas da corda utilizada”, sem explicitar seu significado, que na verdade é o módulo da corda citado na pág. 3/29 (Nota 9).

Comparando-se as análises de outros autores (Wexler, 1950; Leuthäusser, 2016a; Attaway, 1996) com o desenvolvimento de JF, é fácil verificar que “K” (dimensão de força) é na verdade “E•A”, o produto do módulo de Young (dimensão de pressão) pela sua seção transversal (dimensão de área). Voltando à Figura 6, a Eq.2-5 é dita a “mais completa”, por não desprezar, corretamente, o deslocamento durante o alongamento como na dedução da Eq.2-4. Essa diferença aparece quando plotamos os valores de F_{MAX} para ambas as equações (Figura 7).

Jimenez e Freitas tiveram o mérito do pioneirismo de registrar uma busca de respostas quanto à resistência dos grampos-P usados no Brasil. Esperamos que continuem essa busca, acrescentando orientação acadêmica e consulta à literatura, o que teria lhes economizado tempo e imprimido robustez ao trabalho. Apesar de algumas conclusões questionáveis, há acertos meritórios, discutidos no Capítulo 3.

2.4 Smith (2017a): Fall Force Calculator

O Físico Casey Smith (2017a), criou uma calculadora numa *webpage* (junkfunnel.com/fallforce), chamada de *Fall Force Calculator* (“Calculadora da Força de Queda”). O modelo de cálculo não é mostrado, apenas uma tela de entrada de dados (Figura 8b). Após os dados serem fornecidos, clica-se no botão “Calculate” e uma rotina subjacente calcula e apresenta os resultados na tela do navegador, que incluem F_{MAX}, F_{GRA}, F_{SEG} (força máxima no assegurador) e fator de impacto no(a) escalador(a), F_{MAX}/mg, chamado de “fator g”, a aceleração da gravidade suportada pelo(a) escalador(a) na frenagem. A falta de explicitação do modelo deixa dúvidas, mas variando-se os dados convenientemente, os resultados e as variáveis solicitadas fornecem pistas significativas.



O usuário deve entrar com: peso do(a) escalador(a), alongamento estático da corda (fornecido pelos fabricantes), metragem de corda aberta, distância até a última costura, e fator de atrito na última costura¹³. A solicitação do alongamento estático (para $m=80\text{kg}$) indicava que o módulo da corda no modelo de cálculo deveria estar sendo estimado via comportamento estático, como comprovado posteriormente. Uma novidade positiva é a consideração do atrito na última costura, fator relevante e presente numa escalada real, em geral desconsiderado nas equações de vários autores (e.g. Wikipedia, 2017a; Beal, 2004; Wexler, 1950). Realizando-se cálculos com essa Calculadora, e comparando-se com o modelo da Wikipedia, obtém-se o gráfico da Figura 8a.

Embora não disponível na *webpage*, um contato com Casey Smith resultou no seu gentil envio do modelo de cálculo, confirmando as deduções iniciais deste estudo (Smith, 2017b). A rotina de cálculo da Calculadora de Smith usa a Eq.2-1 da Figura 8a para fazer os cálculos, similar à de Wexler (1950). Porém, calcula o módulo da corda (K , na fórmula) usando a Lei de Hooke com o alongamento estático informado pelo usuário, e substituindo a constante elástica pelo módulo da corda ($F=K(x/L)$; logo $K=mg/e$). Importante lembrar que a corda de escalar é mais complexa, e deduzir a constante elástica pelo alongamento estático não é consistente com seu comportamento dinâmico. Isso explica a diferença entre os resultados da fórmula da Wikipedia (com alongamento dinâmico) e os valores obtidos da Eq. 1 usando o K via alongamento estático (Figura 8b).

Registre-se dois atributos positivos da calculadora de Smith, a praticidade de uso, direta e rápida na obtenção de resultados, e a consideração de F_{GRA} , a força máxima no último grampo. Se imperfeita na modelagem, a apresentação e disponibilidade dos resultados leva o usuário a considerar a questão como importante parte do sistema de segurança que o mantém vivo, e estimula o estudo do tema, assim como fez com este autor.

2.5 Wikipedia (2017)¹⁴: verbete *Fall factor* Leuthäusser (2016a)¹⁵: *The omnipresent impact force formula for a climbing rope*

Essas duas referências aparecem juntas porque o conteúdo da Wikipedia (2017a) é baseado também em Leuthäusser (2016a), embora as duas fontes apresentem a fórmula com aspectos diferentes, relevantes para esta análise (Figura 9). A Wikipedia não é fonte de informação científica, porque usa uma arquitetura aberta de colaboração, recebendo contribuições públicas e contendo termos não verificados e validados cientificamente. Mas se impôs como uma fonte consagrada de informação de acesso irrestrito. Uma avaliação da revista científica Nature concluiu surpreendentemente que o índice de erros da Wikipedia é apenas um pouco maior do que o da também famosa Enciclopédia Britannica (Nature, 2005).

$F_{\text{max}} = mg + \sqrt{2mgEaf + m^2g^2}$ <p>(a) [Eq.2-6]</p>	$F_{\text{max}} = mg + \sqrt{(mg)^2 + 2mghk} = mg + \sqrt{(mg)^2 + 2mgEqf}$ <p>(b) [Eq.2-7]</p>
--	---

Figura 9 – Fórmula da força máxima (a) como aparece em Leuthäusser (2016a, p.3), e (b) na Wikipedia (2017). É fácil perceber que são a mesma fórmula da Eq.2-1. Onde F_{MAX} =força máxima no(a) escalador(a) (N); m =massa do(a) escalador(a) (kg); g =aceleração da gravidade (m/s^2); E =módulo de Young (N/m^2); $A=q$ =seção transversal da corda (m^2); f =fator de queda; k =módulo da corda (N).

No entanto, críticos chamam a atenção de que a comparação não foi justa, porque foi baseada principalmente em entradas de cunho científico, e como essas na Wikipedia são em geral elaboradas por especialistas, ela levou vantagem. A comparação foi somente nas edições em inglês. Apesar da fraqueza da Wikipedia, com entradas não verificadas, no caso de conceituações sobre a Física da escalada tínhamos um aparente exemplo de conceitos de cunho científico, dos quais um em especial podemos verificar.

O conceito de fator de queda na Wikipedia-EN (*Fall factor*) traz um modelo de cálculo de F_{MAX} com as referências de Leuthäusser (2011 e 2016b), e Goldstone (2006), que usa em seu artigo a equação de 1950 de Wexler (Figura 3). Nesse caso a Wikipedia foi considerada para avaliação, e é preciso dizer que uma deficiência para situações específicas, descrita abaixo, foi detectada neste estudo. Nessa entrada, a Wikipedia apresenta primeiro um formato na Figura 9b equivalente ao de Leuthäusser (Figura 9a), e em seguida um segundo formato (Figura 10), no qual

¹³ “Fator” e não “coeficiente” porque representa o resultado líquido do AUM, e não o coeficiente de atrito entre a corda e a superfície do mosquetão. Lembro que o perfil dos mosquetões varia e o cálculo do atrito usa recursos que fogem ao escopo este artigo. Para detalhes, veja Leuthäusser (2016a).

¹⁴ “Fator de queda”.

¹⁵ “A onipresente fórmula da força de impacto para uma corda de escalada”.

substituíamos o módulo da corda, uma variável usualmente desconhecida, por grandezas do teste da UIAA publicadas pelos fabricantes. O segundo formato da Wikipedia então no saíte, no entanto deveria vir com um alerta de que só é válido para o valor de **g** padrão da superfície da Terra, 9,81m/s², o valor de **g** no teste da UIAA, de onde **K** é derivado. Se o caso a ser analisado ocorrer num ambiente em que **g** seja diferente, a Eq. 6 falha.

$$F_{MAX} = mg + \sqrt{(mg)^2 + F_0(F_0 - 2m_0g) \frac{m}{m_0} \frac{f}{f_0}} \quad \text{[Eq.2-8]}$$

Figura 10 – Fórmula de F_{MAX} segundo a Wikipedia-EN (2017; fall factor). F_{MAX}=força máxima de impacto; m=massa do(a) escalador(a); g=aceleração da gravidade; F₀=força máxima da corda no teste UIAA; m₀=massa de teste; f=fator de queda; f₀=fator de queda do teste. O índice "0" (zero) indica dados do teste UIAA. m₀=80kg; f₀=1,77; F₀ é resultado do teste. Observar que se fizermos g=0, F_{MAX}=9kN, o que não faz sentido. A fórmula constou da Wikipedia até ser retificada em decorrência deste estudo.

Por exemplo, obtém-se uma força máxima de 9kN (usando-se os dados do teste UIAA) mesmo se g=0, como num campo sem gravidade. Descobre-se o que ocorreu percorrendo-se o caminho da dedução da expressão para **K**. Para eliminar **K** da equação, aplica-se a equação de F_{MAX} ao teste da UIAA, e substitui-se a expressão encontrada de volta na fórmula de F_{MAX} (Tabela 2, passos P1 a P10; problema ocorre em P10).

Tabela 2 – Dedução da expressão de K para sua eliminação na fórmula de F _{MAX} . Todas as variáveis com o subíndice "0" (zero) referem-se aos valores dos testes da UIAA. F ₀ =força máxima de impacto; m ₀ =massa do(a) escalador(a); g ₀ =aceleração da gravidade no teste da UIAA (=9,807m/s ²); K=módulo da corda; f ₀ =fator de queda (=1,77).			
P01	Começamos pela aplicação da eq. de F _{MAX} ao teste da UIAA	P02	Desenvolvendo para isolar K
	$F_0 = m_0 \cdot g_0 + \sqrt{(m_0 \cdot g_0)^2 + 2 \cdot m_0 \cdot g_0 \cdot K \cdot f_0}$		$F_0 - m_0 \cdot g_0 = \sqrt{(m_0 \cdot g_0)^2 + 2 \cdot m_0 \cdot g_0 \cdot K \cdot f_0}$
P03	$(F_0 - m_0 \cdot g_0)^2 = (m_0 \cdot g_0)^2 + 2 \cdot m_0 \cdot g_0 \cdot f_0 \cdot K$	P04	$F_0^2 - 2 \cdot F_0 \cdot m_0 \cdot g_0 + (m_0 \cdot g_0)^2 = (m_0 \cdot g_0)^2 + 2 \cdot m_0 \cdot g_0 \cdot f_0 \cdot K$
P05	$F_0^2 - 2 \cdot F_0 \cdot m_0 \cdot g_0 = 2 \cdot m_0 \cdot g_0 \cdot f_0 \cdot K$	P06	$K = \frac{F_0(F_0 - 2 \cdot m_0 \cdot g_0)}{2 \cdot m_0 \cdot g_0 \cdot f_0} \quad \text{[Eq.2-9]}$
P07	Agora aplicamos a expressão de K na equação de F _{MAX} genérica ao lado	P08	$F_{max} = mg + \sqrt{(m \cdot g)^2 + 2 \cdot m \cdot g \cdot K \cdot f}$
P09	$F_{max} = mg + \sqrt{(mg)^2 + 2 \cdot m \cdot g \cdot \frac{F_0(F_0 - 2 \cdot m_0 \cdot g)}{2 \cdot m_0 \cdot g_0 \cdot f_0} \cdot f}$	P10	$F_{max} = mg + \sqrt{(mg)^2 + 2 \cdot m \cdot g \cdot \frac{F_0(F_0 - 2 \cdot m_0 \cdot g)}{2 \cdot m_0 \cdot g_0 \cdot f_0} \cdot f}$
P11	$F_{max} = mg + \sqrt{(mg)^2 + 2 \cdot m \cdot g \cdot \frac{F_0(F_0 - 2 \cdot m_0 \cdot g)}{2 \cdot m_0 \cdot f_0} \cdot f}$	P12	Como estava na Wikipedia: $F_{max} = mg + \sqrt{(mg)^2 + F_0(F_0 - 2m_0g) \cdot \frac{m}{m_0} \cdot \frac{f}{f_0}}$
C09	$F_{max} = mg + \sqrt{(mg)^2 + 2 \cdot m \cdot g \cdot \frac{F_0(F_0 - 2 \cdot m_0 \cdot g)}{2 \cdot m_0 \cdot g_0 \cdot f_0} \cdot f}$	C10	Como está agora corrigida (Eq.2-10): $F_{max} = mg + \sqrt{(mg)^2 + F_0(F_0 - 2 \cdot m_0 \cdot g_0) \cdot \frac{g}{g_0} \cdot \frac{m}{m_0} \cdot \frac{f}{f_0}}$

O teste da UIAA gera dados sobre as cordas, e todas as cordas comerciais virtualmente precisam ser submetidas a ele para a certificação. Os dados são usados para eliminar a variável "K" e apresentar um formato que permita entrar com valores arbitrários de massa do(a) escalador(a), fator de queda e F_{MAX} publicada pelo fabricante.

O **g** desapareceu no passo P10 porque foram simplificados o **g** do numerador, originário da energia potencial da dedução de F_{MAX}, com o **g** do denominador, originário do teste da UIAA. Se uma queda em análise ocorrer num campo onde a aceleração da gravidade é diferente, como num plano inclinado, ela perde a validade. Este autor

colocou via Internet esse problema da Eq. 6 para dois outros pesquisadores, Casey Smith (2019), e David Reeve¹⁶ (Reeve, 2019). A discussão mostrou consenso acerca da incoerência da Eq.2-8 e Casey Smith propôs a solução apresentada na Eq.2-9.

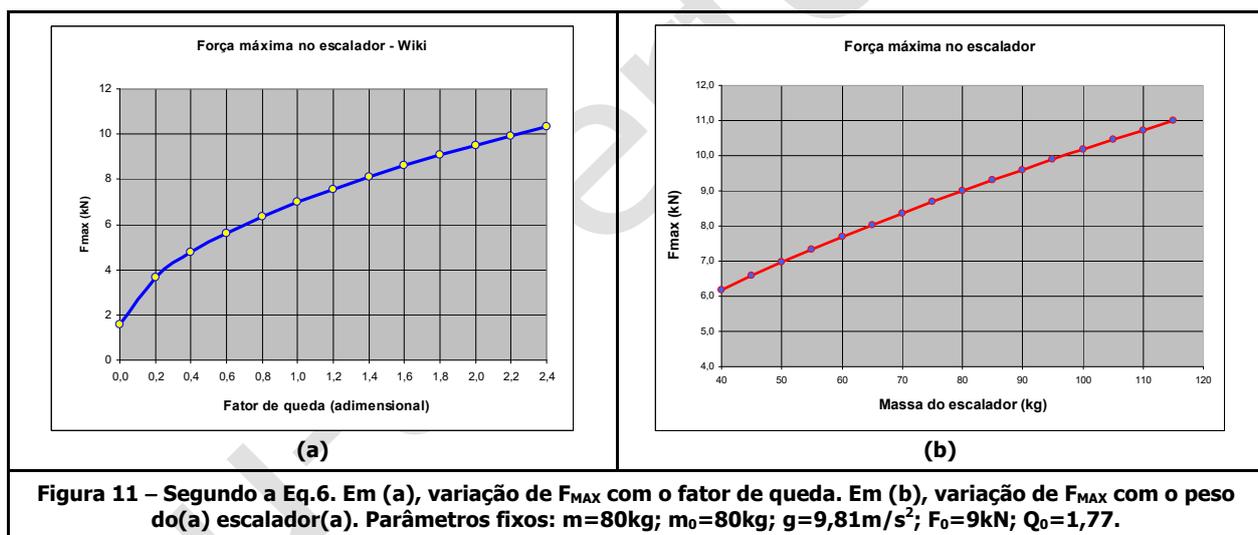
As variáveis com índice zero representam os parâmetros da corda no teste da UIAA. Mantendo ambos as g 's e explicitando suas origens, da mesma forma que foi feito na equação original da Wikipedia para f e para m , a equação pode ser aplicada em campos onde g pode ter valores diferentes do padrão. Assim, g_0 é a aceleração gravitacional no teste UIAA ($9,807\text{m/s}^2$) e g a aceleração no local da análise. É o caso, por exemplo, da análise da força máxima nas escaladas positivas, comuns no Brasil, onde a aceleração da gravidade muda¹⁷.

Na Tabela 2, o passo P10, onde ocorre a simplificação, acarreta na Fórmula do Passo **P12**, que era apresentada na Wikipedia-EN (English) até este ano de 2019. Os passos **C09** e **C10** corrigem a incoerência, igualmente corrigido na própria Wikipedia (verbete *Fall factor*).

3.0 ANÁLISE GRÁFICA DE SENSIBILIDADE

3.1 A Fórmula de Wexler no Formato da Wikipedia (*Fall factor*)

As cordas de escalada vêm ao longo do tempo se tornando cada vez mais elásticas, absorvendo mais energia da queda e reduzindo F_{MAX} imposta ao(à) escalador(a) e ao sistema de segurança. Essa tendência é observada na contínua redução de F_{MAX} das cordas ano a ano, se distanciando do limite máximo da UIAA (12kN). Esse estado da arte na fabricação contrasta com as cordas do tempo de Wexler, cuja preocupação era, justificadamente, a resistência das cordas e não das ancoragens. Um motivo para começar este capítulo com esse resultado.



A fórmula de F_{MAX} como aparece na Wikipedia (fórmula "Wiki") é fisicamente equivalente a de Wexler, mas com símbolos diferentes, e apresenta um segundo formato alternativo, no qual foi substituído o módulo da corda (K), normalmente desconhecido, por uma expressão com variáveis dos dados do teste UIAA, conhecidas porque publicadas. Essa fórmula é mais flexível, pois permite avaliar F_{MAX} em função da massa do(a) escalador(a), do fator de queda e, com a correção feita durante este estudo (V. Seção 2.5, Eq.7), em situações com acelerações gravitacionais arbitrárias. Esta última passa a permitir, em estudos em andamento, estimar e comparar valores de F_{MAX} no plano inclinado. Além disso, a fórmula permite que se calcule F_{MAX} para qualquer outro teste padrão que venha a ser criado. Assim, ela ganha independência do teste padrão da UIAA e mais uma variável (g) para a qual se pode arbitrar valores. As Figuras 11a e 11b mostram a variação de F_{MAX} para essas fórmulas em relação à massa do(a) escalador(a) (m) e ao fator de queda (Q).

¹⁶ Respectivamente, ex-pesquisador do MIT e atualmente na sua própria empresa, e o presidente da Associação Escalada de Queensland, Austrália.

¹⁷ Veja na Wikipedia em inglês, a expressão *fall factor* onde a equação já está corrigida.

Apesar dessa flexibilidade, é importante lembrar que os valores de F_{MAX} devem ser interpretados com restrições, porque a Eq. 7 desconsidera fatores intervenientes importantes, como o atrito no último mosquetão (AUM), a atenuação da segurança dinâmica (SD), o atrito seco e a folga na corda. Estes dois últimos fatores não serão considerados neste estudo. A primeira análise gráfica de F_{MAX} é sua variação com o fator de queda (Q), que apresenta um comportamento crescente e, a partir de $Q=0,5$, praticamente linear (Figura 11a). A força máxima da corda usada no cálculo foi de 9kN, porque é um limite para a maioria das cordas comercializadas atualmente.

O gráfico de F_{MAX} versus a massa do(a) escalador(a) mostra um comportamento semelhante àquele para com o fator de queda Q (Figuras 12a e 12b), o que era de se esperar, considerando que ambas as variáveis são determinantes das forças em jogo. Contudo, massa e fator de queda afetam a força por vias diversas. Um fator de queda maior mantém a quantidade de energia, mas reduz a metragem de corda para absorvê-la. Um peso maior mantém a quantidade de corda, mas aumenta a energia, o que afinal produz resultados semelhantes. Vê-se também que acima de 40kg, F_{MAX} tem uma variação praticamente linear com a massa do(a) escalador(a), se aproximando mais de uma reta em detrimento da raiz quadrada, o que contradiz o previsto por Jimenez e Freitas (1999, p.7), que afirmam que F_{MAX} seria proporcional à raiz quadrada do peso do guia (v. Seção 3.4).

3.2 A Fórmula de Jimenez e Freitas (1999) – JF

Para a análise em pauta, apenas será considerado o formato denominado “mais completo”, como é apontado no artigo. Repetimos as equações já apresentadas no Capítulo 2, na Figura 12, para facilitar as comparações. Mesmo nessa forma, Jimenez e Freitas suprimem o termo do peso dentro do radical, sob o argumento de que “...na prática o termo $2.K.Q/P$ situa-se entre 10 e 100...”, logo muito maior do que o quadrado do peso explícito na Eq.9 (Ver comparação na Figura 13).

A primeira observação é quanto a expressão “na prática”. Assumindo que significa “na imensa maioria dos casos”, ela embute um erro. O valor de K varia de 8,0kN a 30,0kN¹⁸, e o de Q (fator de queda) de 1,77 a 0,00, se mantendo abaixo de 0,4 por mais de 90% de um esticção de 40m com lances de 4,0m (Lima-e-Silva, 2019c, no prelo). Com esses valores, o termo $2KQ/P$ varia entre 5 e 140. Para justificar a simplificação da fórmula, erros para cima no limite superior não importam, porque justificam a simplificação. A imprecisão relevante é a inferior, já que para valores de Q abaixo de 0,4 o erro chega a 20%, um variação não desprezível.

$F_{max} = mg + \sqrt{2mgEaf + m^2g^2} \quad \text{[Eq.3-1]}$ <p>(a)</p>	$F = P + \sqrt{2K.P.Q} \quad \text{[Eq.3-2]}$ <p>(b)</p>
<p>Figura 12 – As fórmulas brasileiras simbolizam o fator de queda por “Q”; na língua inglesa o símbolo é “f”. (a) Fórmula de F_{MAX} segundo a Wikipedia (2017, Fall factor). F_{MAX}=força máx. (N); m=massa do(a) escalador(a) (kg); g=gravidade (m/s^2); E=módulo de Young (N/cm^2); A=área transversal da corda (cm^2); f=fator de queda (adimensional). (b) Fórmula de F_{MAX} segundo Jimenez e Freitas (1999), formato mais completo. F=força máx. (N); P=mg (N); K=módulo da corda (N); Q=fator de queda (adimensional).</p>	

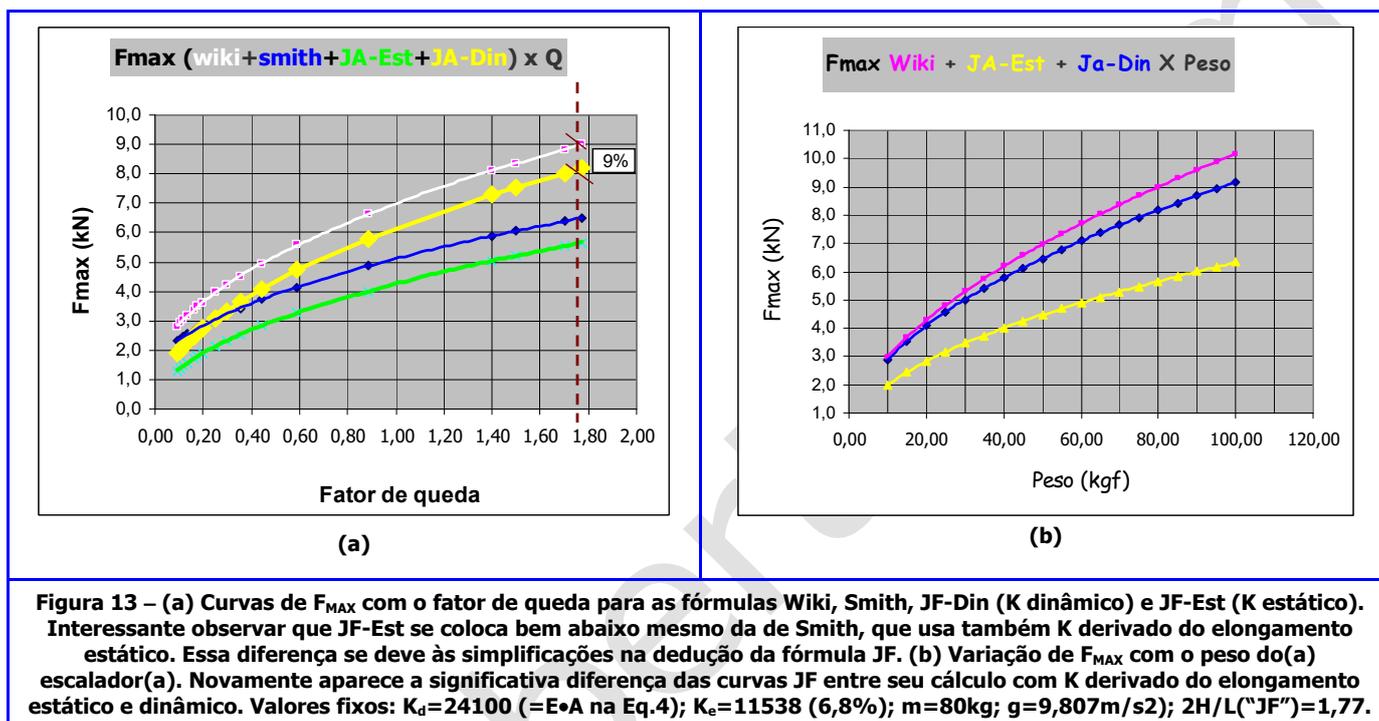
A Figura 12 coloca lado a lado as Equações 9 e 10, sendo a primeira (Figura 12a) semelhante para os outros autores, desde Wexler (1950) até Leuthäusser (2016a), e a segunda (Fig.12b) com a simplificação de Jimenez e Freitas (nos gráficos “JF”). A Figura 13 mostra em gráfico as diferenças entre as equações, variando F_{MAX} com Q e P . Podem ser claramente vistas as diferenças do modelo JF (Eqs.8-9) para com os de Smith (Eq.1) e Wikipedia (Eq.8), estes respectivamente com os módulos K do alongamento estático e dinâmico.

Pode-se ver que, usando a fórmula de JF com K estático (alongamento estático), $F_{MAX}(JF)$ fica significativamente abaixo mesmo dos valores de $F_{MAX}(Smith)$ com o mesmo K , resultando num erro de magnitude não desprezível (Figura 13a). Mesmo considerando que o K estático não é o correto para esse tipo de cálculo, pois o foco é o fenômeno dinâmico, a comparação traz à luz uma falha do modelo JF em explicar parte do fenômeno. Quando usamos o K dinâmico, $F_{MAX}(JF)$ fica cerca de 10% abaixo do $F_{MAX}(wiki)$.

¹⁸ Desde o K derivado do alongamento estático (9,2%) de uma corda de módulo baixo (Edelweiss Geos 10.5), até um K derivado do alongamento dinâmico (39%) de uma corda com módulo alto (Mammut 9.8 Transformer). Ver referência no texto para maiores informações.

Outros pontos de discordância existem, como o de que Jimenez e Freitas inferem que “*Esta força é proporcional a raiz quadrada do peso do guiã*” (sic), enquanto os demais autores mostram que F_{MAX} é aproximadamente proporcional ao peso. A discrepância é decorrência das simplificações inadequadas na dedução da fórmula.

As Figuras 13 mostram duas análises gráficas de sensibilidade com as fórmulas JF e Wiki. É interessante observar que, apesar de as simplificações na fórmula JF serem conceitualmente significativas, no resultado final, se aplicarmos um valor de K estimado do impacto dinâmico (e.g. Beal, 2004, p.2), com $F_{MAX}=9kN$ e $K=24.100N$, a diferença fica dentro de uma faixa de 10% para a fórmula Wiki. No entanto, se usarmos um K derivado de um alongamento estático, a diferença para $Q=1,77$ se torna muito grande, cerca de $100*(9-5,7)/9=36,7\%$. Observa-se também que Jimenez e Freitas não explicam a origem de K no seu estudo.



4.0 O MODELO EXPERIMENTAL 1 – ME1

4.1 Introdução

A revisão bibliográfica demonstrou que a Física da escalada é bem conhecida desde meados do séc. XX, e permanece sendo aperfeiçoada com artigos publicados posteriormente. Também a interferência dos fenômenos do AUM e da atenuação proporcionada por uma SD são igualmente conhecidas. No entanto, esses dois fatores não aparecem explicitamente nas formas da equação clássica na literatura, embora seja consenso que o atrito no último mosquetão (AUM) existe e está sempre presente numa situação real de escalada em rocha, assim como a inevitável SD com seu alto impacto na atenuação de F_{MAX} .

Neste estudo, a Calculadora de Smith (Seção 2.4) foi o único modelo de cálculo encontrado na literatura que considera o AUM. É também o único que disponibiliza uma forma prática para se obter resultados rápidos, e o que permite contabilizar não somente F_{MAX} , mas também F_{GRA} e a força G sobre o(a) escalador(a). Por outro lado, não expõe a equação na qual se baseia a Calculadora, mas a disponibilizou prontamente para este autor.

4.2 O atrito no Último Mosquetão (AUM)

4.2.1 A última costura

O atrito da corda com o último mosquetão (AUM) é a parte do atrito seco a ser considerada. É sobre a ancoragem da última costura que F_{MAX} se expressa por inteira, onde ocorre a maior força em jogo, porque somam-se as forças máximas para baixo do lado do líder e do lado do assegurador (F_{SEG}). Contrapondo-se às duas, a reação da

ancoragem (Figura 14). A força de atrito (F_{AT}) desenhada na Figura 14 é uma representação esquemática e não realista do resultado de F_{MAX} puxando de um lado e pressionando a corda e da resistência líquida que essa seção da corda impõe ao sistema de forças.

Denomina-se fator de atrito porque não é um coeficiente *stricto sensu*, é o resultado líquido da interação corda-mosquetão. Modelar o coeficiente de atrito é ineficiente. Talvez o ideal fosse que os fabricantes de mosquetões já colocassem em cada modelo de mosquetão o valor do fator de atrito, mas isso poderia encarecer o produto. Além do atrito propriamente dito, existe outra resistência que age como uma força de atrito, no sentido contrário ao movimento, a força de dobramento¹⁹. Ela depende do projeto de cada mosquetão e da corda que se usa. Foi usado o símbolo **M** (μ grego maiúsculo) para realçar que a grandeza não é um coeficiente de atrito *stricto sensu*.

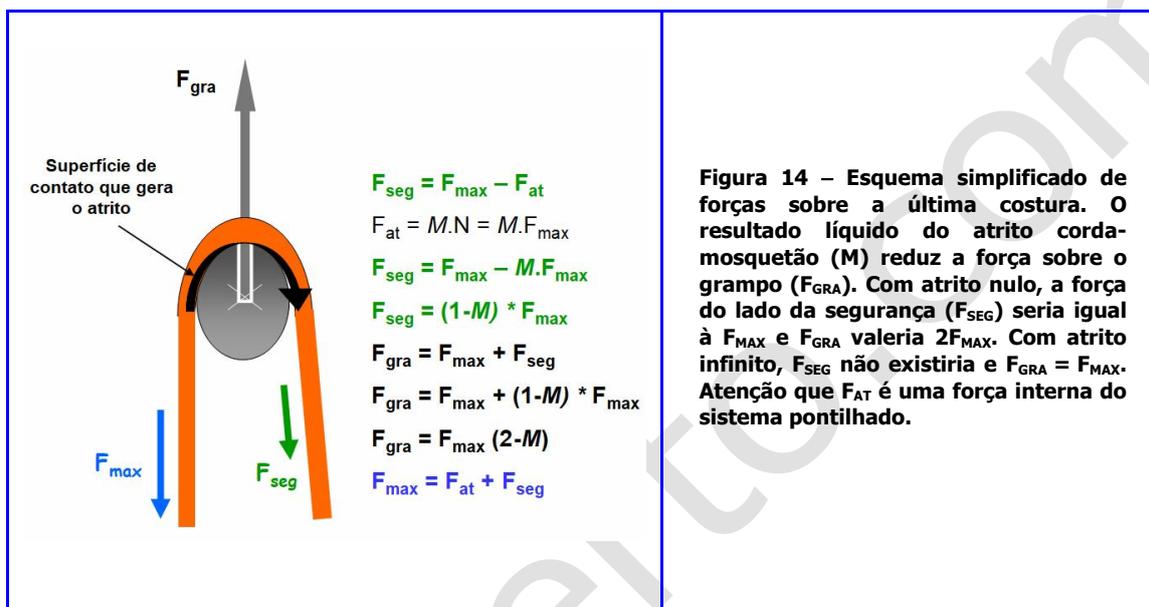


Figura 14 – Esquema simplificado de forças sobre a última costura. O resultado líquido do atrito corda-mosquetão (M) reduz a força sobre o grampo (F_{GRA}). Com atrito nulo, a força do lado da segurança (F_{SEG}) seria igual à F_{MAX} e F_{GRA} valeria $2F_{MAX}$. Com atrito infinito, F_{SEG} não existiria e $F_{GRA} = F_{MAX}$. Atenção que F_{AT} é uma força interna do sistema pontilhado.

A influência do atrito sobre a tensão total no grampo (F_{GRA}) é significativa. Um exercício mental é suficiente para compreender o papel de F_{AT} . Se o atrito no último mosquetão fosse nulo, ele atuaria como uma roldana perfeita de atrito zero. A força do lado da queda seria totalmente transferida para o lado do assegurador, e $F_{SEG} = F_{MAX}$. O grampo teria que suportar $2 \cdot F_{MAX}$, uma de cada lado²⁰, o conhecido efeito roldana.

O que acontece é que o AUM consome parte da energia da queda transformando-a em calor, subtraindo-a do sistema. Como há menos energia para ser resistida por F_{SEG} , reduz-se a soma de $F_{MAX} + F_{SEG}$ e consequentemente F_{GRA} . Para efeitos práticos, o arranjo fornece explicações e resultados numéricos. Conceitualmente:

Mosquetão hipotético sem atrito: $F_{GRA} = 2 \cdot F_{MAX}$
 Mosquetão real com atrito: $F_{GRA} = 2F_{MAX} - M \cdot F_{MAX}$
 $F_{GRA} = F_{MAX} (2-M)$

Um valor típico para **M** é de 0,34 (Petzl, 2005, *apud* Smith, 2017a,b), o que causa uma redução em F_{GRA} de cerca de 17%. Não terminamos aqui, há mais um ponto a ser analisado.

4.2.2 O módulo efetivo da corda

Voltemos ao hipotético mosquetão-roldana com atrito nulo. Toda a energia da queda seria transmitida à corda aberta, e a sua extensão seria alongada por F_{MAX} . Porém, considerando a presença real do AUM²¹, parte de F_{MAX} deixa de ser transmitida para o lado assegurador e, com menos tensão nesse lado, a corda se alonga menos do

¹⁹ Para perceber a força de dobramento, que independe do atrito, basta imaginar que, ao se dobrar uma corda, as fibras internas são comprimidas e as externas esticadas. Para os dois movimentos uma resistência existe, e quanto maior o raio da curva, mais força é necessária para fazer a corda se movimentar.

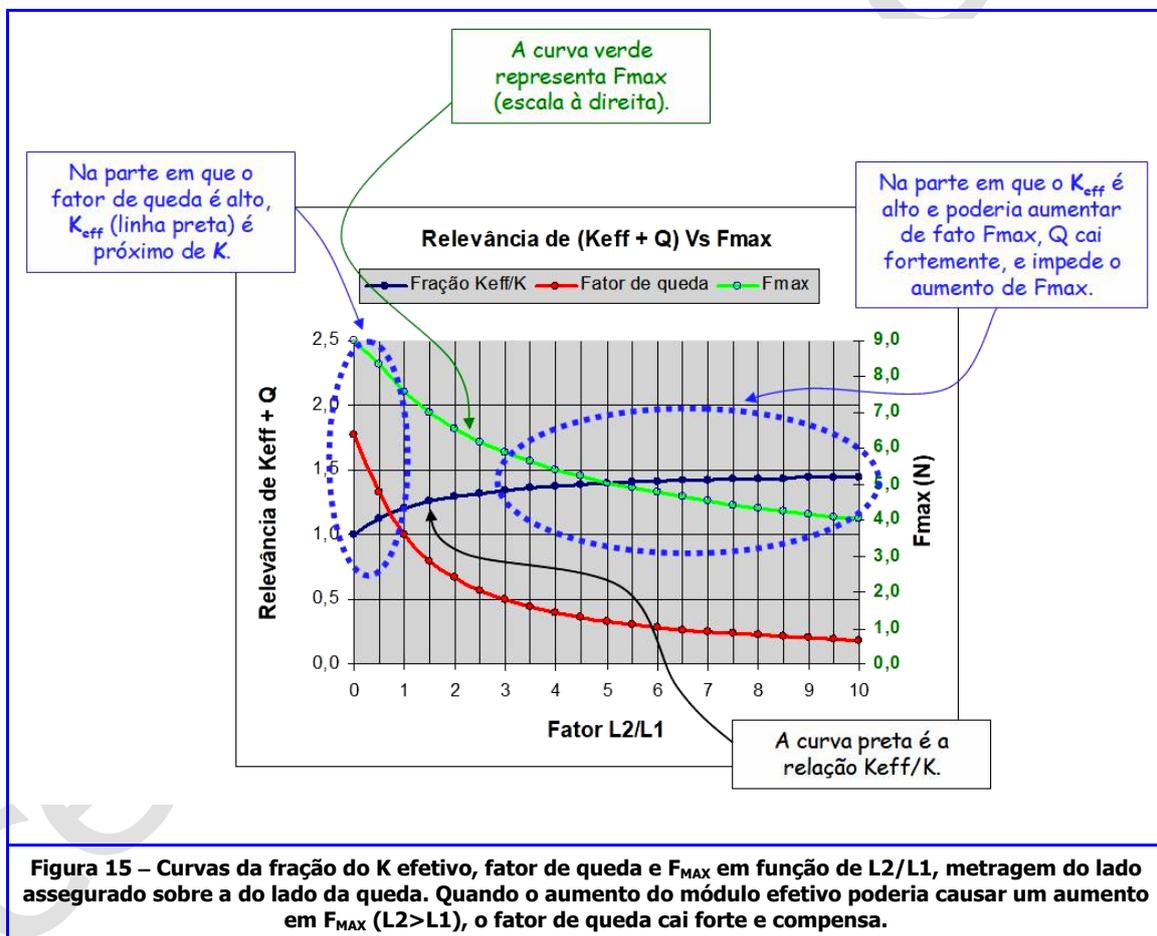
²⁰ Esse é o pior caso, quando as cordas estão paralelas; na prática, grampos sequenciais normalmente não estão na vertical um do outro, e qualquer desvio de F_{SEG} para fora da vertical de F_{max} terá o efeito de reduzir F_{GRA} . Por exemplo, se F_{max} e F_{SEG} fizerem ambos um ângulo de 45° com a vertical, o módulo de F_{GRA} será igual a $1,41 \cdot F_{max}$ e não $2 \cdot F_{max}$, uma redução de 30% só devido à angulação. Esse raciocínio é consistente no limite; se o ângulo entre elas for de 180°, F_{GRA} deixa de existir.

²¹ Aqui assumindo que não existem outros atritos no caminho; volto a isso mais adiante.

que no lado da queda. Para o(a) escalador(a) que cai, tudo se passa como se a corda se tornasse um pouco mais rígida, como se o módulo da corda tivesse aumentado. Logo, para considerar a corda aberta no cálculo, devemos assumir um módulo da corda maior do que o nominal. Módulo maior significa F_{MAX} maior (veja K na Eq.2), o que redonda numa redução da atenuação causada pelo atrito. Matematicamente:

$$\begin{aligned}
 F'_{GRA} &= F'_{MAX} + F'_{SEG} & -F'_{MAX} \text{ é a } F_{MAX} \text{ que vai ocorrer considerando a mudança no módulo} \\
 F'_{MAX} &= F_{MAX} + \Delta F_{MAX} & -\Delta F_{MAX} \text{ é o incremento devido ao aumento do módulo da corda;} \\
 F'_{SEG} &= F'_{MAX} - M \cdot F'_{MAX} & -F'_{SEG} \text{ é a nova } F_{SEG} \text{ que se ajusta à } F'_{max}; \\
 F'_{GRA} &= (F_{MAX} + \Delta F_{MAX}) + [(F_{MAX} + \Delta F_{MAX}) - M \cdot (F_{MAX} + \Delta F_{MAX})] \\
 F'_{GRA} &= F_{MAX}(2-M) + \Delta F_{MAX}(2-M)
 \end{aligned}$$

Onde F'_{GRA} é a força máxima no último grampo considerando o aumento aparente no módulo da corda. Para sabermos se estamos sobre-estimando a atenuação ao desprezarmos o aumento do módulo efetivo, precisamos avaliar a magnitude do termo $\Delta F_{MAX}(2-M)$ perante $F_{MAX}(2-M)$. Como fazer isso sem desenvolver um modelo específico? Se pudermos estimar a variação do módulo da corda como percebida pelo(a) escalador(a), bastaria entrar na fórmula de F_{MAX} com o novo K'^{22} e calcular F_{MAX} com o K nominal e com o K' aparente. A primeira observação é que claramente a diferença depende da fração de corda no lado do assegurador ($L2$) em relação à do lado da queda ($L1$), porque se a corda no lado assegurador fosse nula, o K nominal seria igual ao aparente.



Podemos avaliar dois limites para essa fração de corda ($L2/L1$): [i] se muito pequena, o fator de queda se aproxima de 2 ($Q2$); e [ii] se próximo a 50%, temos uma queda fator-1 ($Q1$). Esses dois resultados vão nos dar a relevância da alteração do módulo. No primeiro, supus uma fração da corda aberta do lado assegurador da ordem de 5%, e esperava uma variação de K igualmente pequena. Como F_{MAX} depende da raiz quadrada de K , teria uma variação ainda menor. No segundo, $Q1$, há metade da corda de cada lado, e a variação de K deve ser

²² Atenção para os símbolos: o do módulo da corda é K porque é a letra usada pelos autores em geral. A constante elástica da corda é também k , porém minúsculo.

mais significativa, mas é necessário verificar se isso tem impacto relevante em F_{GRA} . Há uma maneira simplificada de verificar isso. Podemos partir da definição básica dos alongamentos, escrevendo:

$$e_{\text{Total}} = e_Q + e_A \quad [\text{Eq.4-1}]$$

onde e_{Total} é o alongamento total de corda aberta, e_Q o alongamento do lado da queda, e e_A o alongamento do lado assegurado. O objetivo é uma expressão para a variação do K_{EF} (K efetivo) sentido pelo(a) escalador(a) em função da fração de corda do lado assegurado. Pela Lei de Hooke (entre parênteses a unidade usada):

$$\begin{aligned} F &= k \cdot e & F &= \text{força (N)}, k = \text{constante elástica da corda (N/m)}, e = \text{alongamento (m)} \\ k &= K / L & K &= \text{módulo da corda (N)}, L = \text{comprimento da corda (m)} \\ \text{Logo } e &= (F \cdot L) / K \end{aligned} \quad [\text{Eq.4-2}]$$

Substituindo a Eq.12 nos termos da Eq.11:

$$\frac{F_{\text{max}} \cdot (L_1 + L_2)}{K_{\text{ef}}} = \frac{F_{\text{max}} \cdot L_1}{K} + \frac{F_{\text{seg}} \cdot L_2}{K} \quad [\text{Eq.4-3}]$$

Substituindo F_{SEG} por $F_{\text{MAX}}(1-M)$, L_2 por uma fração de L_1 e simplificando, chegamos a:

$$K_{\text{ef}} = K \cdot \left[\frac{1+T}{1+T(1-M)} \right] \quad [\text{Eq.4-4}]$$

Onde $T=L_2/L_1$, L_2 é a metragem de corda do lado assegurado – do último mosquetão até o assegurado – e L_1 a metragem do lado da queda. Notar que essa fórmula é uma simplificação e se aplica para uma aproximação da situação descrita. o objetivo aqui é descrever relações conceituais entre K e F_{MAX} que servem ao propósito da conclusão, verdadeiras mesmo usando-se de uma simplificação.

Agora podemos avaliar as duas situações colocadas anteriormente, **Q1** e **Q2**. Numa **Q2**, uma fração típica é $T=0,1$, porque o(a) escalador(a) cai, por exemplo, de um lance de 4,0m, portanto 8,0m de queda, e a fração do lado assegurado tem uma ordem de grandeza de 10%, ou 0,40m. Assumindo um valor típico de $M=0,34$ (Petzl, 2005, *apud* Smith, 2017b), calculamos $K_{\text{EF}}=1,032 \cdot K$, ou 3,2% maior do que o K da corda. Essa variação em K ocasiona uma variação positiva em F_{MAX} de 1,4%.

Numa **Q1**, $T=0,5$, e $K_{\text{EF}}=1,13 \cdot K$, ou 13% maior que K . Aplicando à F_{MAX} , mas lembrando de ajustar o fator de queda, que mudou também ($Q=1,0$), chegamos a uma variação de -13%, porque a redução de Q se sobrepõe ao incremento do módulo da corda efetivo. Qual seria a redução de F_{MAX} se não considerássemos a variação de K_{EF} ? Fazendo a conta de F_{MAX} com o K original da corda, a redução de F_{MAX} devido a Q seria de 22,6% (Figura 15).

Portanto, vemos que para o caso **Q1** a variação de K_{EF} é significativa em reduzir a atenuação de F_{MAX} devido à redução de Q , porém o faz para uma F_{MAX} que já está em rota descendente, e tende a cair progressivamente de valor à medida que o(a) escalador(a) evolui no esticão.

• Discussão

Quando importa, quando haveria potencialmente um risco para as ancoragens, nas quedas de Q alto, a variação positiva de K devido ao aumento do módulo aparente da corda é pequena, e pode ser desprezada. Quando a variação de K é mais significativa, nas quedas de Q baixo, a redução do fator de queda se sobrepõe ao aumento de K , e a variação de F_{MAX} continua sendo negativa.

$$Q' = \frac{2Q}{2 + (Q - 2) \cdot M} \quad [\text{Eq.4-5}]$$

Faltou imaginar no nosso experimento mental o extremo oposto, o que aconteceria se o atrito fosse maior do que F_{MAX} ($F_{\text{AT}} > F_{\text{MAX}}$). Nesse caso, o assegurado não sentiria nada, F_{SEG} seria nula e $F_{\text{GRA}} = F_{\text{MAX}}$. Seria a situação em que F_{GRA} teria sua máxima redução, se fosse possível. Na vida real, $0 < F_{\text{AT}} < F_{\text{MAX}}$, e F_{GRA} é maior que F_{MAX} . Para

ratificar essas conclusões, acrescento os achados de um artigo minucioso de Tanzman (2009), "Incorporating Friction into the Standard Equation for Impact Force"²³, no qual chega à seguinte equação:

Tanzman calcula F_{MAX} de duas formas, com a fórmula clássica e com seu modelo de ajuste para o módulo da corda, que se torna na prática um ajuste no fator de queda, plotando o gráfico para dois valores do fator de atrito, $\mu=0,33$ e $\mu=0,20$. No gráfico da Figura 16 pode-se ver como as conclusões tiradas da equação simplificada se verificam igualmente no modelo mais sofisticado de Tanzman. Fica claro que a variação de K , expressada numa variação aparente do fator de queda, da mesma forma como já observado, é grande quando tem pouca influência sobre F_{MAX} , para valores de Q baixos, e quando importa, na região de valores altos de Q , ela tende a zero.

Vale a pena alguns comentários sobre o trabalho de Tanzman. Há afirmações questionáveis. Na página 4, início do Capítulo 3, aparece que "Numa queda fator-2, a queda se dá diretamente sobre o assegurado. A corda não corre através de uma ancoragem acima, logo, não há atrito"²⁴. Uma queda diretamente no assegurado, colocada pelo autor como normal, revela um desconhecimento do asseguramento. A situação descrita, se e quando acontece, é potencialmente perigosa. É óbvio que há atrito, pois a corda está, numa situação esquemática ideal, ou deveria estar, passando pela costura no grampo-base ou numa outra ancoragem próxima.

Além disso, há lacunas; ele não explica que o fator 2 não é real, reconhecido pela própria UIAA e seu padrão de $Q=1,77$, e parece ignorar que o fator de atrito mosquetão-corda é um fator e não um coeficiente como entendido em Física, dado que o representa por μ , como foi feito aqui na Seção 4.2, símbolo usado para coeficientes de atrito. O atrito entre corda e mosquetão tem um resultado líquido, ao qual o autor está se referindo, como indica ao afirmar que "This frictional force is conventionally assumed to be equal to $1/3 F_{MAX}$ ". Ele se refere ao valor de 0,34 que foi publicado uma vez pela Petzl, cuja consequência pode ser interpretada como uma força contrária de cerca de $1/3$ de F_{MAX} . Denominá-lo por μ é portanto inapropriado. Por fim, o fator de atrito embute mais um efeito.

Existe uma segunda resistência na última costura além do atrito devido à força de dobramento, embora ela não seja mencionada mesmo em textos cuidadosos, como os de Attaway (1996; 1999). A publicação encontrada sobre o tema foi a de Titt (2009), com detalhes. Não é difícil perceber sua existência. Basta tomar, por exemplo, uma corda de diâmetro de 11mm e tentar dobrá-la numa curva de raio igual ou menor que 11mm.

Essa resistência é exercida pelas fibras da corda, que se torna significativa em curvas de raio próximo ao seu diâmetro, e aumenta à medida que esse raio diminui ainda mais. As fibras da parte interna resistem a serem estranguladas, e as da parte externa a serem estendidas. Lembro que a curva da corda nos mosquetões modernos, bem mais finos que os antigos, se enquadra nessa situação.

4.3 A Segurança Dinâmica (SD)

4.3.1 Conceito

A segurança dinâmica (SD) é um método de asseguramento que atenua a magnitude das forças envolvidas (F_{MAX} , F_{SEG} , F_{GRA}) em caso de queda de líder da cordada, através da maximização da energia absorvida na frenagem pelo

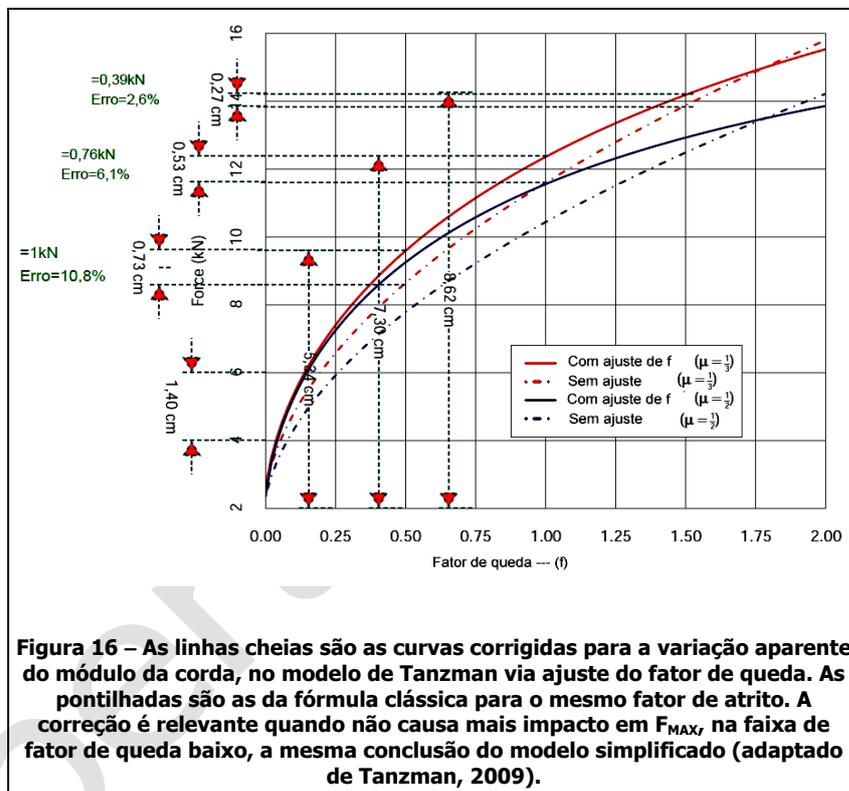


Figura 16 – As linhas cheias são as curvas corrigidas para a variação aparente do módulo da corda, no modelo de Tanzman via ajuste do fator de queda. As pontilhadas são as da fórmula clássica para o mesmo fator de atrito. A correção é relevante quando não causa mais impacto em F_{MAX} , na faixa de fator de queda baixo, a mesma conclusão do modelo simplificado (adaptado de Tanzman, 2009).

²³ "Incorporando o Atrito na Equação Padrão da Força de Impacto".

²⁴ No original, "In a factor-2 fall, the fall is directly onto the belayer. The rope does not run through a top anchor; hence, there is no friction."

sistema e controle do assegurador. Ela se contrapõe à segurança estática (SE), na qual um(a) escalador(a), despreparado e focalizado em imobilizar o líder o mais rápido possível, acaba por interromper a queda de forma brusca, ou que sua inexperiência e uma configuração inadequada causem uma frenagem anormalmente abrupta. Segundo o saite²⁵ do Cragmont Climbing Club (CCC, 2017), num artigo disponível na seção de história, e replicado no saite touchstoneclimbing.com de 2014 (Touchstone, 2014), a SD foi inventada em Indian Rock em 1932 por Dick Leonard, personagem daquele clube. Os escaladores saltavam de uma plataforma e os asseguradores davam uma razoável folga de corda para tornar as quedas mais suaves. Eles usavam cordas estáticas e se protegiam com roupas acolchoadas para evitar queimaduras.

Steve Roper (CCC, 2017, p.1) conta a história que vale replicar:

"Como a segurança era o mais importante na mente de todos, os escaladores do RCS, agora cinquenta e dois sócios, passaram muito tempo entre 1932 e 1933 aprendendo a assegurar e rapelar corretamente. Eles descobriram rapidamente que a segurança de ombro europeia - ou sua variante, a segurança por baixo do braço - não era para eles: era uma técnica grosseira e até mesmo perigosa. Assim, inventaram a segurança de quadril, em que a corda era passada em torno da cintura inferior, proporcionando um centro de gravidade mais estável. Os asseguradores também testavam deixar a corda deslizar um pouco em torno da cintura antes da parada completa numa queda. Esta segurança 'dinâmica' aliviava a tensão sobre os dois escaladores e a própria corda, o elo fraco no sistema²⁶."

Desde então, as cordas de escalar evoluíram muito, e hoje absorvem toda a energia necessária para resistir a uma queda (V. Seção 1.2). Não são mais o "elo fraco" citado por Roper, hoje transferido para a ancoragem. É nesse contexto que a SD se torna importante, por causa de sua capacidade de reduzir F_{MAX} e F_{SEG} , as duas forças que formam a necessária resistência do último grampo, e conseqüentemente reduzir o risco de sua falha. Além disso, numa situação real de escalada, os(as) escaladores(as) podem encontrar-se em um esticão com ancoragens que não parecem à prova de bomba, mas se conhecerem o fenômeno da SD, podem reduzir significativamente seu risco operando um fator que só depende deles.

Embora a SD seja de conhecimento universal, se perguntarmos a diferentes escaladores(as), obteremos diferentes versões. Até hoje a UIAA não se pronunciou estabelecendo uma referência padronizada de assegurar de forma dinâmica e segura. No entanto, como veremos, mesmo uma segurança despadronizada ainda é dinâmica, pois é virtualmente impossível, numa escalada real, evitar de todo a atenuação. Pretendo argumentar que uma segurança estática ou mesmo perto de estática numa escalada real não existe.

Uma SE seria como uma corda sem folgas, presa na ponta assegurada enrolada várias vezes num tubo cilíndrico (atrato infinito) e fixo, semelhante ao teste da UIAA (Figura 2), porém com ponto fixo rígido (V. obs. sobre teste UIAA na Seção 2.1). Esse modo de prender a corda garante que o asseguramento seja estático, e que a atenuação da queda se dará somente pelo alongamento da corda, uma situação que pode ser criada em laboratório.

4.3.2 Uma simplificação ilustrativa

É importante para um(a) escalador(a) entender a Física que relaciona o tempo e a distância de frenagem de uma queda com a magnitude das forças em jogo. Sabe-se que, para dissipar determinada quantidade de energia não redutível, quanto menor o tempo para dissipá-la, maiores terão que ser as forças intervenientes. Uma analogia ajuda. Se alguém quiser frear

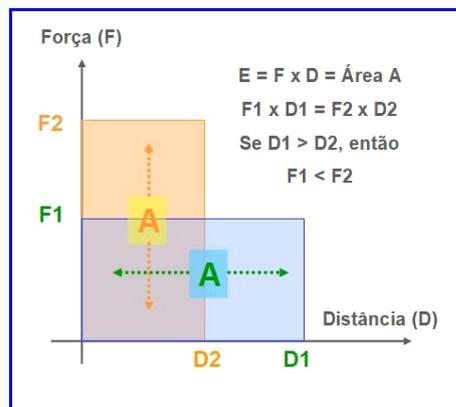


Figura 17 – O gráfico mostra a energia como o produto da força pela distância, representada pela área A. Podemos consumir a mesma energia E de duas formas: usando uma força maior numa distância menor (tempo menor); ou usando uma força menor numa distância maior (tempo maior).

²⁵ A palavra "saite" para designar um sítio da Internet é a internalização da palavra "site" do inglês, que segue a regra não escrita da nossa cultura que absorve o som e modifica a palavra, como pode se ver em abajur, sanduíche, etc. Como ela é escrita, "site", deve ser pronunciada segundo as regras da língua, como "cite". A tradução para a ortografia "saite", similar ao som da palavra na língua inglesa, foi sugerida pelo escritor Millôr Fernandes, considerado o maior tradutor da língua portuguesa falada no Brasil. Millôr enquanto vivo chamou a atenção para evitar a destruição da estrutura da língua fazendo a tradução correta. Este autor adota o padrão sugerido pelo grande intelectual Millôr.

²⁶ No original: "Since safety was uppermost in everyone's mind, the RCS climbers, now numbering fifty-two, spent much of 1932 and 1933 learning to belay and rappel properly. They quickly discovered that the European shoulder belay--or its variant, the under-the-arms belay--wasn't for them: it was a crude and even dangerous technique. So they invented the hip belay, in which the rope was placed around the lower waist, thus affording a more stable center of gravity. The belayers also experimented with letting the rope slip slightly around the waist when bringing a falling leader to a stop. This 'dynamic' belay eased the strain on the two humans and the rope itself, the weak link in the equipment chain."

um carro em velocidade numa distância curta terá que exercer mais força nos freios do que se dispor de uma distância maior para parar o carro.

Essa correlação negativa entre rapidez (ou distância) de interrupção da queda e as forças envolvidas (F_{MAX} , F_{SEG} , F_{GRA}) pode ser demonstrada numa simplificação ilustrativa, para não entrar no rigor físico da especificidade de uma queda realista, o que foge ao escopo deste artigo. Quanto mais curto o tempo de frenagem, menor a distância de corrida da corda. Como a quantidade de energia necessária para a frenagem não se altera, a força terá que atingir um valor maior. Podemos ilustrar com um modelo simples para transmitir a ideia.

A Física diz que a energia necessária para realizar o trabalho de mover um corpo sólido unidirecionalmente pode ser expressa pelo produto da força necessária pelo deslocamento. Para facilitar a visualização, vamos presumir uma força constante durante a frenagem. Essa ideia (Figura 17) pode ser colocada da seguinte forma:

$$E = F \cdot D$$

Onde **E** é a energia, **F** a força, e **D** o deslocamento desde o início da hipotética “queda” até o repouso completo. A área **A** na Figura 17 representa a energia necessária para interromper a queda. Se aumentarmos a distância e o tempo de frenagem, como a energia é conservada, a altura do retângulo diminui de modo a manter a área constante, o que causa uma redução na força máxima necessária, e portanto em todas as forças atuando sobre o sistema²⁷.

4.3.3 O mundo real

Foi afirmado que “uma segurança rigorosamente estática numa escalada real não existe”. Rigorosamente, toda segurança contém uma dose de dinamismo porque escalar assim o exige. A queda de um(a) escalador(a) não tem como ser interrompida instantaneamente. Existem sempre extensões do tempo e da distância de frenagem causadas por fatores diversos, que atuam individualmente ou em conjunto, dos quais destacam-se:

- [i] As folgas da corda em toda a sua extensão aberta – porque nenhum(a) escalador(a) escala com uma corda tensionada – que numa queda vão causar extensão do tempo e consumo de energia também no atrito dinâmico com o ambiente (rocha, fitas, mosquetões, grampos), aumentando progressivamente desde o(a) escalador(a) em queda até o assegurado à medida que o sistema se tensiona;
- [ii] Tempo para ajustar as folgas entre o freio no baudrier e a costura no grampo-base (ancoragem da parada entre dois esticões) e dentro do próprio freio, como um ATC²⁸;
- [iii] Içamento de parcela do peso do assegurado após as folgas terem sido eliminadas;
- [v] Tempo de tensionamento do baudrier no corpo do assegurado;
- [vi] Tempo que o assegurado leva entre sentir o puxão na corda e efetivamente freá-la completamente;
- [vii] Tempo que leva para os nós de encordamento dos(as) escaladores(as) serem apertados até a paralisação.

Observar que esses fatores são simultâneos, todos intervêm para alongar o tempo e a distância de frenagem, e assim atenuar F_{MAX} . Na década de 1970, falando das escaladas organizadas nos clubes de excursionismo no Rio de Janeiro, houve algumas tentativas de aplicação de uma suposta SD, da qual se ouvia falar, mas não havia padrão adotado. Tentativas relatadas dão conta de assegurares ousados que tiveram mãos e/ou braços queimados buscando a então desconhecida segurança dinâmica. Atualmente, mesmo na ausência de um padrão formal, uma pesquisa na literatura e a opinião de escaladores(as) fornecem base para uma proposta de arranjo básico.

4.3.4 O trabalho de Czermin *et al.*

Um artigo encontrado que apresenta resultados objetivos sobre a capacidade da SD de atenuar as forças em jogo, o de Czermin *et al.* (2007; Figura 18a). O gráfico na figura representa as forças medidas em um experimento realizado pelos autores. Comparando-se a soma das forças com e sem SD, então a diferença entre a soma das forças F_{MAX} e F_{SEG} – com e sem segurança dinâmica – representa a redução das forças devido ao efeito que a SD gera no sistema²⁹. As medidas mostram uma redução de 32,7% para a soma de F_{MAX} e F_{SEG} (i.e. F_{GRA}) sem SD e

²⁷ Num caso real, nem a força ou a velocidade de frenagem são constantes; mas continua valendo que se a distância se alonga, uma força menor é demandada pelo sistema.

²⁸ A sigla “ATC” significa “Air Traffic Control”, o nome que a empresa Black Diamond deu ao produzir o primeiro dispositivo desse tipo. Fez sucesso e se tornou o nome de todos os dispositivos semelhantes, que são os mais usados hoje para asseguramento e rapel. Na prática, pode ser substituído por qualquer outra técnica de asseguramento.

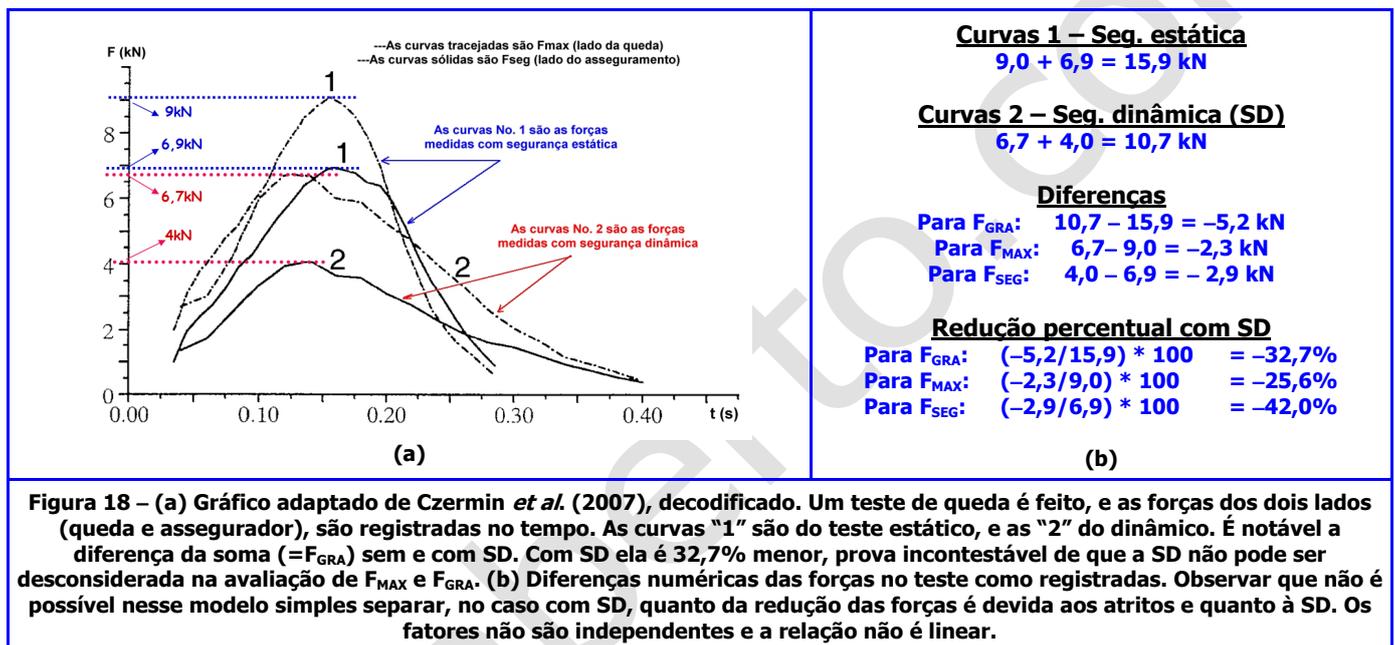
²⁹ Na verdade, uma parcela da redução total se deve à força de atrito também presente nos dois casos, e como sua relação não é linear, não podemos deterministamente. SD está presente, mas isso é uma questão interna ao processo, e não é relevante nessa análise. A diferença no teste da Figura 17a é medida, logo, é o resultado líquido da aplicação da SD, independentemente de outros fatores.

com SD. Isso significa que a última ancoragem terá que resistir a uma força 32,7% menor com segurança dinâmica, o que é notável.

4.3.5 Como quantificar a SD?

Quantificar a SD de forma analítica não é possível porque as variáveis são incontáveis, e mesmo que não fossem, não existe um padrão de SD, o que causa atenuações diferentes. Para uma avaliação de F_{GRA} que considere a SD o caminho mais curto é uma modelagem semi-empírica, mas usando dados conhecidos. Uma modelagem baseada em experimentos de campo especificamente com esse propósito ainda não se tem conhecimento.

Este estudo levantou uma forma de segurança dinâmica baseada em três pilares: [i] O relato de autores de outros países (Corrigan, 2016; Zanantoni, 2000; Titt, 2009); [ii] A experiência dos grupos com os quais escalo desde 1977 envolvidos em quedas de diversas naturezas; e [iii] Os princípios e achados da Engenharia de Confiabilidade no estado da arte da virada do século.



Não se trata de algo inédito ou muito diferente do que muitos(as) escaladores(as) já fazem, apenas explicita-se uma sistematização da postura, a busca por uma referência padronizada que em tese tende a aumentar a segurança. A declividade da via ou do lance e outros aspectos ambientais podem apontar necessidades de adaptação da postura apresentada. Porém, mais importante do que a postura sugerida são os princípios nos quais se baseia, que podem ser usados em quaisquer posturas. Dentre muitas configurações possíveis, a forma sugerida é apenas uma configuração razoável que atende aos requisitos construídos sobre os três pilares citados no parágrafo anterior, chamada aqui de segurança dinâmica experimental (SDE), esquematizada na Figura 19.

4.3.6 Pontos importantes

Para uma postura de assegurador ser dita segura, precisa atender a um princípio de estabilidade. Uma queda não deve desestabilizar o assegurador, porque isso imporia o risco de o sistema desmontar em caso de ele(a) perder o controle da segurança. Qualquer força que desestabilize a posição e tire do controle o assegurador impõe um risco de choque com a rocha, os mosquetões, as costuras, e abre oportunidade de as mãos dele(a) serem atingidas. São suas mãos que garantem uma queda segura do líder, portanto devem ser protegidas. Assim, uma postura correta é aquela que faz a força de impacto trabalhar a favor da maior absorção de energia.

A SDE proposta (Figura 19), com as marcações explicadas abaixo, contrariamente a diversas definições de SD encontradas em sites da rede (e.g. Stifler, 2017; Hellberg *et al.*, 2014), não inclui nenhuma ação ativa do assegurador, apenas atende a conhecimentos da Engenharia de Confiabilidade, aqui denominados princípios.

O primeiro princípio é o de que *quanto mais rápida for necessária uma resposta humana numa situação de emergência, maior a probabilidade de a resposta estar errada*. Numa queda, os eventos se sucedem rapidamente, da ordem de décimos de segundo, logo, ações ativas numa emergência, que impactam diretamente na segurança do(a) escalador(a) que cai, não devem se basear em práticas que dependem de habilidade específica a ser executada em um intervalo tão curto de tempo, e assim mais passível de falhar. Lembremos que à medida que o tempo passa e o número de escaladores(as) em atividade aumenta, a probabilidade de ocorrer uma falha aumenta.

O segundo princípio é que *quanto mais passiva uma defesa, maior sua probabilidade de sucesso*. As defesas passivas são as mais seguras que existem. Elas vão funcionar porque estão lá. São os prédios de contenção em volta de reatores nucleares (as redomas), os casos duplos de navios petroleiros, o excedente de pista de rolagem nos aeroportos, a separação ampla entre sentidos nas autoestradas, e muitos outros. Uma defesa ativa é aquela que depende da operação de um sistema elétrico ou mecânico para entrar em ação, e esse sistema de resposta não operar, a defesa não funciona. Esses têm uma chance de falhar não desprezível, diferentemente da chance nas defesas passivas, que é virtualmente nula.

Pode-se observar uma queda como um acidente, para a qual sugere-se uma postura passiva, onde o assegurado só tem que permanecer nela. Sem ação adicional, que não seja ficar parado, e portanto sem a possibilidade de errar numa ação, ele será capaz de produzir uma frenagem firme no líder em queda, dinâmica o bastante para atenuar F_{MAX} e F_{GRA} o suficiente, e ao mesmo tempo eficaz, para não deixar o líder cair mais do que o necessário.

Uma observação final é que acrescentar elementos a um sistema de segurança em geral significa aumento da probabilidade de falha, pois há mais elementos para falhar. Esse acréscimo pode acarretar em aumento de segurança se ele for cirúrgico, como acrescentando-se redundâncias que aumentam a confiabilidade. Portanto, toda ação de adicionar elementos a um sistema de segurança precisa ser analisada para evitar o indesejado aumento de possibilidades de falha. No caso da SD, se eliminarmos a "ação ativa do assegurado", estaremos aumentando a confiabilidade. Em relação à Figura 19, os pontos em azul são explicados a seguir.

Ponto 1: A questão central da SD é que ela proporciona duas situações fundamentais, espaço para o assegurado trabalhar e, mais importante, fazer a força de queda ter que içar parte significativa do peso do assegurado. O ângulo de 45° é um bom compromisso entre [i] espaço de trabalho, [ii] conforto do assegurado, [iii] visão do líder, e [iv] contrapeso para a SD. Conforto para o assegurado se concentrar na segurança, requisito básico. O ângulo de 45° demanda, numa queda, que a força erga (escalador(a) de 70kg), cerca de $70 \cdot \sin(45)$, e vença o atrito na costura da base, aqui estimada em cerca de $1/4$ (45° contra 180° do AUM), podendo chegar a 600N ou 61kgf.

Ponto 2: O braço hábil (a maioria é destra) deve estar abaixo, segurando a corda entrando no ATC, para ter mais capacidade de sustentar o impacto. O braço inábil (o esquerdo, na maioria) deve segurar a corda saindo do ATC, indo para o(a) escalador(a). Essa posição dos braços atende o princípio do equilíbrio numa queda porque proporciona ao assegurado controlar a entrada e a saída da corda simultaneamente.

Ponto 3: A mão da saída do ATC se coloca em posição supinada, o que permite extensão máxima do braço inábil quando puxado para cima. A mão de entrada do ATC, o braço hábil, se coloca numa posição oposta, pronada; esta garante força e extensão máximas do braço hábil do assegurado. Uma alternativa válida é em queda livre de alto impacto, no instante em que o assegurado perceber a queda trazer a mão de cima para ajudar a de baixo.

Ponto 4: O ATC fica preso ao elo do bodriê do assegurado. Esse local garante que o ATC se mantenha numa distância acessível ao assegurado, além de proporcionar controle do aparelho. A corda passando pelo aparelho durante a ascensão do líder não deve ficar justa no aparelho, mas com uma folga que permita o movimento sem esforço do assegurado. Essa folga contribui para uma SD de maior qualidade. Em caso de queda, ela aumentará a dinamicidade, causando maiores distância e tempo na frenagem e reduzindo as forças em jogo.

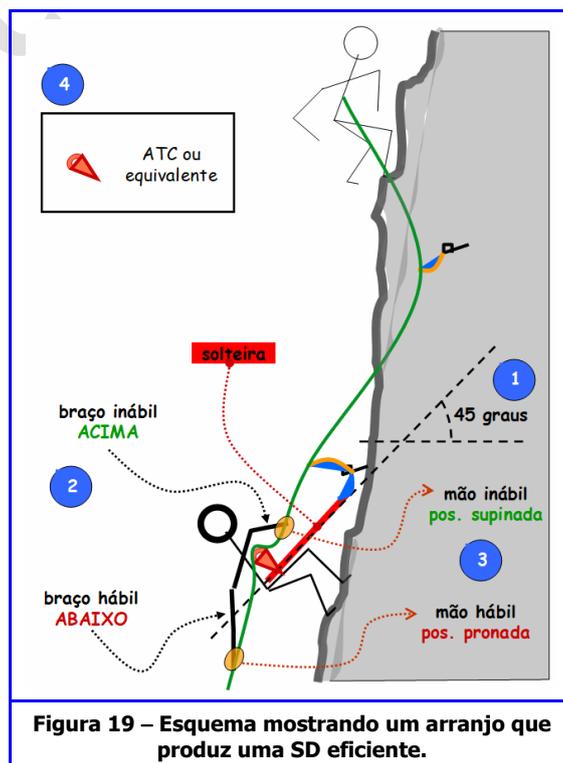


Figura 19 – Esquema mostrando um arranjo que produz uma SD eficiente.

4.3.7 Os riscos

A SD embute dois riscos. Ao proporcionar um alongamento da distância até a frenagem, aumenta-se a chance de o(a) escalador(a) atingir obstáculos na trajetória descendente que poderiam ser evitados. Quase sempre atenuar as forças será mais benéfico do que não atenuar, considerando-se que a questão maior é garantir menor estresse na ancoragem, e assim menores chances de falha crítica³⁰. Mas situações especiais podem apontar uma necessidade contrária, a de reduzir a distância da queda em vez de aumentá-la. Uma delas é a iminência de o(a) escalador(a) se chocar contra um obstáculo abaixo, como um platô rochoso, e isso é um risco maior do que estressar o sistema de segurança. Os(As) escaladores(as), em especial o assegurado, devem julgar o que cada situação exige. É parte intrínseca do esporte a vigilância contínua dos riscos situacionais.

O segundo risco é a perda do controle da queda pelo assegurado. Na SD, é suposto que ele se coloque numa postura adequada, que inclui depositar parte de seu peso na solteira, e que a frenagem da corda seja progressiva até que as folgas entre assegurado e costura da base, e as internas do ATC sejam eliminadas. Porém, o grau de progressividade é controverso. Deixar propositadamente a corda correr alguns metros é recomendado em alguns textos, mas numa escalada tradicional, assunto deste artigo, a disciplina de Análise de Riscos mostra que uma ação que exige habilidade e além disso tem que ser realizada num curto espaço de tempo adiciona um risco desnecessariamente significativo de se perder o controle do evento com consequências potencialmente graves.

Nos fóruns de discussão de escaladores(as) existem opiniões diversas sobre o comportamento do assegurado, incluindo ações sem bases técnicas ou científicas, como recolher a corda apressadamente (o que causaria um aumento significativo do fator de queda), até algumas mais intuitivas, como deixar propositadamente a corda deslizar alguns metros para reduzir F_{MAX} (Zanantoni, 2000). Esta última pode estar relacionada com uma questão discutida por Lima-e-Silva (2019b), que é o fato de que a morfologia das montanhas no Hemisfério Norte e nas áreas mais frias do planeta é composta de grande quantidade de paredes verticais, concomitante com o uso mais comum de ancoragens móveis, menos confiáveis do que um grampo de expansão. Naqueles casos, o risco de perder o controle pode ser menor do que o das ancoragens falharem.

Como a morfologia brasileira é menos verticalizada – vias com declividade em geral positiva – a ancoragem é maciçamente composta de grampos-P de 1/2", que ostentam um inigualável registro de zero falhas catastróficas. A sugestão de propositadamente deixar a corda correr alguma distância aumenta significativamente o risco de perda de controle, o que já ocorreu na década de 1970 no CEC (Fontenelle, 2017), pelos motivos já descritos. Em tese, sob o ponto de vista da segurança do esporte, essa ideia vai na direção da insegurança.

Ações ativas do assegurado também contribuem para a subjetividade e redução de sistematização, o que numa população crescente de escaladores(as), potencialmente levarão a aumento do risco social e aumento do número de acidentes. Agora podemos acrescentar aos argumentos contra ações ativas do assegurado a alta ocorrência de paredes positivas e as ancoragens historicamente confiáveis dos grampos-P.

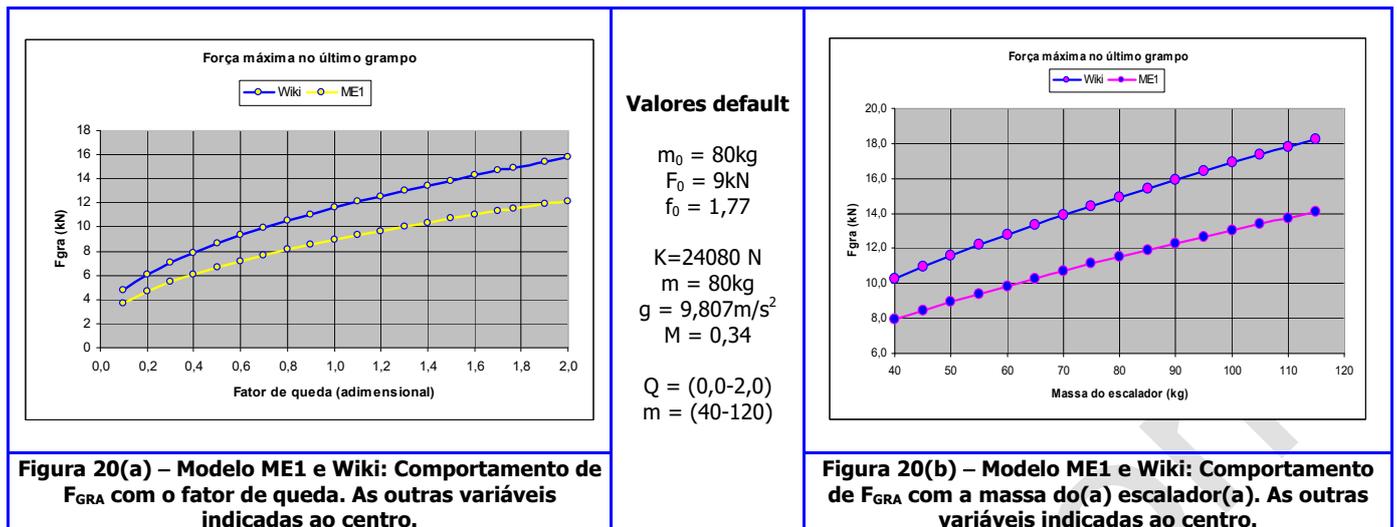
A postura atenta e posicionalmente segura como a da Figura 19, associada ao movimento natural do assegurado, levará ao consumo de energia pela elevação do corpo do assegurado. Somada a outros fatores atenuantes dos atritos e amortecimentos do resto do sistema de segurança formam uma SD eficaz e eficiente. Aguardamos que outros pesquisadores venham a testar e detalhar que SD foi utilizada nos testes, ou que novos experimentos sejam feitos, as forças mensuradas, uma SD definida, e aí um consenso da atenuação da SD poderá emergir.

4.4 A Equação ME1

O modelo ME1 buscou incorporar fatores importantes na queda, ausentes das fórmulas clássicas, visando um modelo mais realista, e possibilitando simular no computador as forças com valores arbitrários das muitas variáveis de modo menos teórico. Os fenômenos abordados foram o atrito no último mosquetão (AUM) e a atenuação da segurança dinâmica (SD). A fórmula é dita especial porque só abrange quedas livres, e apesar de dar um passo na direção de uma avaliação mais realista, ainda está longe de considerar todos os fenômenos intervenientes.

Nas Figuras 20a e 20b são mostrados dois exemplos ilustrativos do uso do ME1 versus Wikipedia para avaliar como F_{GRA} varia em função da massa do(a) escalador(a) e fator de queda, mantendo-se os outros parâmetros constantes como indicado em cada figura. Na Figura 20a, variou-se o fator de queda (0,0-2,0), e na Figura 20b, a massa do(a) escalador(a) (40-120), mantendo-se os outros parâmetros *default*.

³⁰ Rompimento da corda de segurança e/ou do apoio principal.



Assumiu-se um padrão *default* para as demais variáveis na elaboração dos gráficos. Os gráficos também são um indicador de como o ME1 pode ser usado para se explorar os valores que F_{GRA} pode assumir conforme cada um de seus parâmetros variam. Para resultados específicos, devem-se realizar cálculos apropriados. Os valores *default* (i.e. assumidos se nada dito ao contrário) foram: massa do(a) escalador(a) (**80kg**); aceleração da gravidade (**9,807m/s²**); fator de queda (**1,77**); Atenuação da segurança dinâmica (**0,70**); fator de atrito na última costura (**0,34**); força máxima no teste UIAA (**9kN**) (corda Mammut 9,8mm Transformer, 2017).

Como só foi encontrada uma fonte de dados medidos da SD (Czermin et al., 2007), devemos esperar mais testes para consolidar os valores. Também deverá ser enfrentado o desafio de uma padronização de asseguramento para o conceito de segurança dinâmica. Como aproximação inicial, adotou-se o princípio da hipóteses conservadora e arredondei para baixo os números de Czermin *et al.*, como uma precaução até que haja uma confirmação. Neste estudo, para efeito das análises, foram assumidos os valores nominais de 20% de redução em F_{MAX} devido à sinergia SD/AUM, 30% em F_{GRA} e 40% em F_{SEG} , em face dos valores, respectivamente, de 25,6%, 32,7% e 42,0% de Czermin *et al.* Por outro lado, vale citar que Leuthäusser (2017) aponta para notáveis 40% de atenuação potencial da SD em F_{GRA} . Lembremos também que outros amortecimentos adicionais são comuns numa escalada real. A dedução clássica da equação de F_{MAX} do ME1 sem os amortecimentos está no APÊNDICE 1, células 3 e 4, e o acréscimo das propostas de atenuação do ME1, discutidas e justificadas acima, nas células 5 e 6.

Para o AUM, um valor amplamente usado é 0,34 (Petzl, 2005, *apud* Smith, 2017a,b) para o fator de atrito, que acarreta em uma redução de F_{GRA} de cerca de 17% (o conhecido fator de 1,66 deriva dessa avaliação). Porém, não podemos esquecer que as atenuações da SD e do AUM são sinérgicas, e desconhecemos suas funções de correlação. Utilizando-se a Equação ME1 com esses valores, e os demais valores na fórmula de F_{MAX} para o pior caso, uma queda "fator-2" (na verdade, $Q=f=1,77$), podemos agora comparar referencialmente a força no último grampo com e sem os fatores de atenuação como propostos. Se F_{MAX} para uma corda é de 9,0kN, um limite superior típico nas atuais cordas de escalar, e considerando a influência SD/AUM, temos:

$$F_{\text{GRA}} = 9 \cdot 2 \cdot 0,7 = 12,6\text{kN}$$

Um valor significativamente abaixo dos valores de resistência dos grampos calculados por Jimenez e Freitas (1999), considerados subdimensionados, de 1.300kgf. Essa redução expressiva de F_{GRA} não pode ser ignorada, expondo um estresse ao sistema de segurança para além dos custos razoáveis. Também causa desequilíbrio e ineficiência ao se pagar preços elevados e injustificados por serviços e equipamentos devido ao simples desconhecimento das necessidades reais de segurança. Pode-se fazer uma analogia sem receio de exagerar: colocar cinco cintos de segurança não vai aumentar a segurança de ninguém, vai encarecer a atividade artificialmente e aumentar a probabilidade de, como ocorre muitas vezes, aumentar o risco em vez de reduzi-lo.

Tabela 4 – Resumo das equações de F_{MAX} e F_{GRA} nas versões Clássica e Modelo Experimental 1, semi-empírico, com seus fatores de atenuação. Variáveis com subíndice zero vêm do teste da UIAA da corda considerada. A numeração das equações segue sua aparição no texto. (*) As atenuações da SD são baseadas na pesquisa de Czermin *et al.* e no princípio da hipótese conservadora.

Nome referencial	Equação	Parâmetros	Valores referenciais
Equação clássica (Wexler, 1950). Também na Wikipedia (<i>Fall factor</i>).	<p>Força máxima no escalador – Modelo clássico</p> $F_{MAX} = mg + mg \cdot \sqrt{1 + \frac{2KQ}{mg}}$ <p>[Eq.2-1]</p>	<p>Q – fator de queda = $f = h/L$ F_{MAX} – Força máxima no(a) escalador(a) m – massa do(a) escalador(a) g – aceleração da gravidade</p>	Grandezas com subíndice zero têm os valores do teste da UIAA da corda em análise.
Equação clássica, Ref. Wikipedia (<i>Fall factor</i>), que não usa K e usa os valores publicados da UIAA (rev. em 2019)	<p>Força máxima no escalador – Wiki – [Eq.2-10]</p> $F_{MAX} = mg + \sqrt{(mg)^2 + F_0(F_0 - 2m_0g) \cdot \frac{g}{g_0} \cdot \frac{m}{m_0} \cdot \frac{Q}{Q_0}}$		<p>$F_0 \sim 7,5-10,5kN$ g_0 – aceleração da gravidade no teste da UIAA = $9,807m/s^2$ $Q_0 = 1,77$ $m_0 = 80kg$</p>
Equação do ME1 derivada da clássica para F_{MAX} , incluindo a segurança dinâmica.	<p>Força máxima no escalador – ME1 – Formato original – [Eq.4-6]</p> $F_{MAX}^{ME1} = mg \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2KQ}{mg}} \right] \cdot R_{SD}^{MAX}$		<p>Ref. Czermin <i>et al.</i> (2007) $F_{MAX} = -25,6\%$ R = Redução devido à sinergia SD+AUM Este estudo adotou $R(SD)_{MAX} = 0,80$</p>
Módulo K da corda, caso ele não seja fornecido, mas se conheça os dados do teste UIAA.	<p>Módulo da corda – [Eq.2-9]</p> $K = \frac{F_0(F_0 - 2 \cdot m_0 \cdot g_0)}{2 \cdot m_0 \cdot g_0 \cdot f_0}$	As equações 14 a e b estão em formatos diferentes. No formato Wiki, o módulo da corda K, um dado normalmente não fornecido, é substituído. O formato clássico exige o valor de K, porém tem a vantagem de ser mais simples e rápido para obter resultados numéricos. A conversão de um formato no outro pode ser feita com a fórmula à esquerda.	Grandezas com subíndice zero têm os valores do teste da UIAA da corda em análise.
Equação do ME1 derivada da clássica para F_{MAX} incluindo a segurança dinâmica.	<p>Força máxima no escalador – ME1 – Formato Wiki – [Eq.4-8]</p> $F_{MAX}^{ME1} = \left[mg + \sqrt{(mg)^2 + F_0(F_0 - 2m_0g) \cdot \frac{g}{g_0} \cdot \frac{m}{m_0} \cdot \frac{f}{f_0}} \right] \cdot R_{SD}^{MAX}$		Grandezas com subíndice zero têm os valores do teste da UIAA da corda em análise.
Equação do ME1 derivada da clássica para F_{SEG} incluindo a segurança dinâmica. Importante: V. 4.2.1 sobre M	<p>Força máxima no assegurado – ME1 – Formato original – [Eq.4-9]</p> $F_{SEG}^{ME1} = mg \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2KQ}{mg}} \right] \cdot R_{SD}^{SEG}$		<p>Ref. Czermin <i>et al.</i> (2007) $F_{SEG} = -42,0\%$ Este estudo adotou $R(SD)_{SEG} = 0,60$ Ref. Petzl (<i>apud</i> Smith, 2017a) para M = 0,34</p>
Equação do ME1 para F_{GRA} , com AUM e SD	<p>Força máxima no grampo – ME1 – [Eq.4-7]</p> $F_{GRA}^{ME1} = mg \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2KQ}{mg}} \right] \cdot R_{SD}^{GRA}$		<p>Ref. Czermin <i>et al.</i> (2007) $F_{GRA} = -32,7\%$ Este estudo adotou $R(SD)_{GRA} = 0,70$</p>

5.0 CONCLUSÃO

• Síntese

Este artigo procurou realizar um resgate histórico da Física da escalada através dos diferentes sabores da fórmula da força máxima de impacto numa queda. Ele buscou uma proposta mais completa, o Modelo Experimental 1, para as forças máximas numa queda no(a) escalador(a) e na última costura, a partir do modelo clássico de Wexler (1950). O ME1 procurou incorporar fatores que afetam de forma significativa F_{MAX} e F_{GRA} , discutidos e citados em diversos artigos, mas não presentes nas fórmulas clássicas da literatura científica desde Wexler.

Além disso, propôs-se a buscar objetivos secundários: [a] confrontar os modelos de cálculo clássicos com o fenômeno real, buscando explicações das aparentes contradições entre os valores calculados, a resistência das ancoragens e a ausência de acidentes com falha dessas ancoragens no país; e [b] identificar os fatores importantes ausentes da formulação clássica, analisar a viabilidade e modelar esses fatores na fórmula do ME1.

Ainda há um longo caminho para uma definição mais apurada das variáveis, mas os objetivos foram alcançados. O resgate histórico da Física da escalada mostra que a equação clássica é mais antiga do que a maioria supõe (e.g. Jimenez e Freitas, 1999). Ao mesmo tempo, a revisão mostrou como até hoje a segurança dinâmica, conhecida há pelo menos 72 anos, permanece sem uma padronização do posicionamento ou expressão matemática na literatura.

• Críticas

A UIAA até hoje não emitiu uma orientação sobre a segurança para um líder de cordada. Embora haja princípios básicos de conhecimento geral, uma sistematização não surgiu. Vale dizer que uma tal sistematização não é necessária para escalar, e não existe uma solução certa para qualquer situação. No entanto, a UIAA tem uma responsabilidade como certificador internacional, e uma padronização da segurança dinâmica, com explicitação de atributos básicos de um método seguro, ajudaria a evolução e disseminação de assegureamentos de qualidade, reduzindo os acidentes, objetivo central para um esporte que se dá ousando muito longe do chão.

• Respostas

O Modelo Experimental 1 produz resultados quantitativos de F_{MAX} e F_{GRA} muito abaixo daqueles da formulação clássica, e baseados em evidências objetivas, que incluem a consideração do atrito na última costura e da segurança dinâmica. Se a resistência dos grampos-P usados pela grande maioria dos(as) escaladores(as) é, segundo Jimenez e Freitas (1999), de 1.300kgf, pergunta-se, como F_{MAX} , segundo aqueles autores, pode ser "próxima de 2.000kgf"? Mesmo considerando-se a falta de rigor metodológico, a pergunta se mantém: se nossos grampos-P de mais de um século de uso têm a metade da resistência dos grampos-E (expansão) usados nos outros países, por que não há um correspondente registro de acidentes com falhas de grampos?

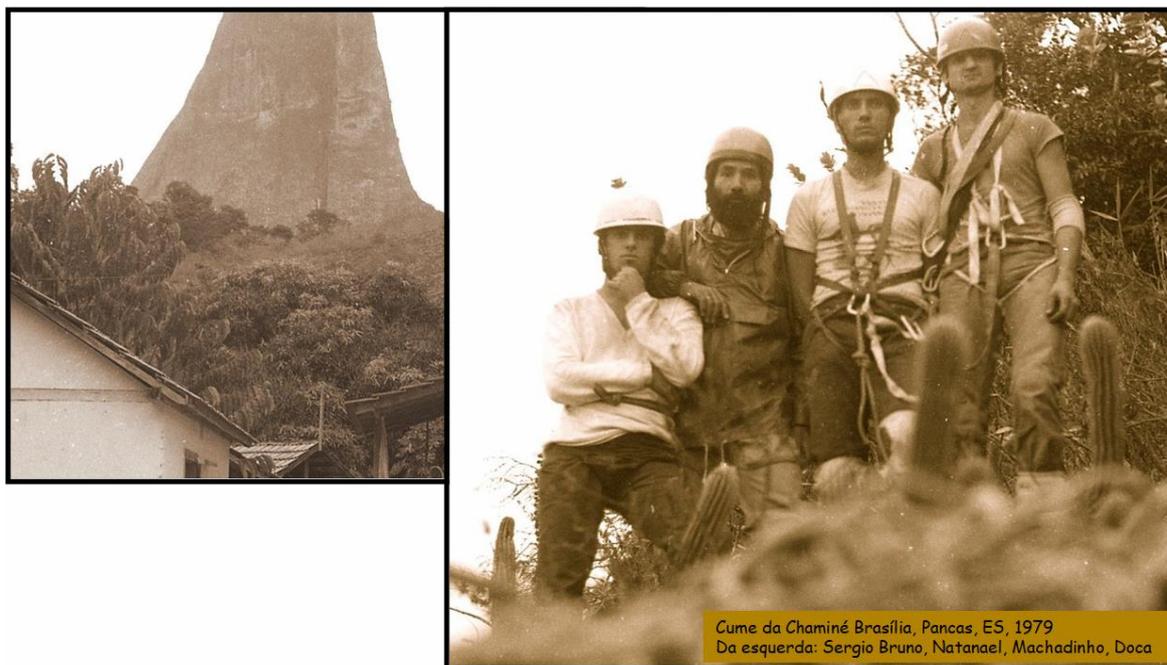
A formulação do ME1, ao expor valores de F_{GRA} bem abaixo da resistência dos grampos descrita por Jimenez e Freitas, abre uma possibilidade explicativa para responder à questão que deu origem a este estudo. Sob o ponto de vista da análise da força máxima, pode-se dizer que as atenuações numa queda real são decisivas para reduzir derrubar o valor de F_{GRA} perante os valores gerados pela teoria clássica. Lima-e-Silva (2019c, no prelo) se propõe a elucidar o papel de um fator específico que se soma às atenuações, o fator de queda, como contribuinte da ausência de acidentes com falha de grampos-P em território nacional usando análise probabilística.

• Limitações do ME1 e expectativas

O ME1 considerou fatores relevantes numa escalada real, mas ainda há perguntas a responder. Há pelo menos mais três desconsiderados neste estudo, e que afetam as forças em jogo: o atrito seco e os dois que ocorrem em vias com declividade positiva, que é a menor aceleração gravitacional na queda em um plano inclinado e o consequente atrito do corpo do(a) escalador(a) com a rocha. Ambos os últimos efeitos são analisados em artigo específico, onde é deduzida uma equação mais geral que engloba os fatores da declividade (Lima-e-Silva, 2019b).

O atrito seco é considerado por alguns autores como responsável por tanta atenuação quanto o AUM ou a SD, mas de quantificação difícil. Ele pode em situações extremas fazer o fator de queda se elevar à medida que o líder progride. Ele está relacionado com a segurança e será abordado em artigo futuro (Lima-e-Silva, 2019f, no prelo).

Este também faz conjecturas e levanta questões. Sugere uma forma padrão de assegureamento e conjectura que a não existência de acidentes graves com os grampos-P decorre das fortes atenuações desconsideradas na fórmula clássica. Também sucinta a questão de por que os registros de quedas fator-2 são tão raros. Espera-se que experimentos de campo com metodologia científica venham responder essas e outras questões, e também que a experiência dos(as) escaladores(as) sejam coletadas, compiladas e analisadas, de modo a disseminarmos esse conhecimento, algo que ainda está para acontecer.

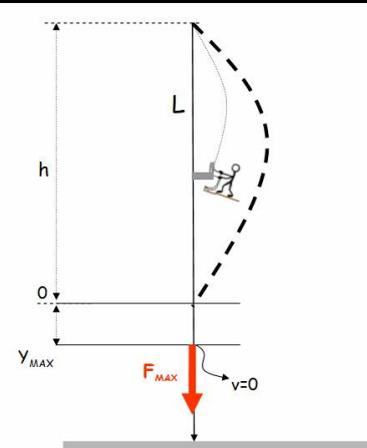


6. BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA

- Attaway, S.W, (1999). The Mechanics of Friction in Rope Rescue. International Technical Rescue Symposium (ITRS-99). pp.16.
- Attaway, S.W. (1996). Rope System Analysis. Copyright 1996 by Stephen W. Attaway. <http://lamountaineers.org/> Acesso [04/02/2017 01:50:50].
- Beal (2004). What it's necessary to know about the rope. [Url:www.impact-force.info/anglais/impact.html](http://www.impact-force.info/anglais/impact.html). Acesso [11/25/2004 7:03:29 PM].
- BSI-EN (2012). Mountaineering equipment - Dynamic mountaineering ropes - Safety requirements and test methods. British implementation of EN 892:2012, European Standard. Complemento à UIAA-101 (2016).
- CCC (2017). History. Cragmont Climbing Club. www.cragmontclimbingclub.org/history. Acesso [26/05/2017 06:53:46].
- Corrigan, K. (2016). Unbelayvable: Burned at the Anchor. Climbing Magazine, 01/Feb/2016.
- Czermin, T., Dullnig, P., Mathelitsch, L., Schneider, W. (2007 version). Bergsteigen und Klettern – was sagt die Physik dazu? Physik in unserer Zeit 2.
- Fontenelle, L.C.W. (2017). Comunicação particular. Eng. Civil e escalador, Guia do CEC no período 1970-1990. Contato em contato@ceu-aberto.com.
- Hellberg, F., Hummel, C., Steinmüller, S. (2014). Alpine Safety Research, German Alpine Club. English translation of the German publication (Panorama 03/2014, Journal of the German Alpine Club), by Renate Dübell.
- Jarvis, A. (2017). Comunicação particular. Consultor da UIAA. Delegate of Mountain Club of South Africa in UIAA Safety Commission. Acesso em arjarvis.warthog@gmail.com.
- Jimenez, M.R., Freitas, M. (1999). Estudo sobre as Proteções Fixas utilizadas no Brasil (Grampos). Clube Excursionista Carioca (CEC). Curso de Formação de Guias 1998-1999. [Url:www.carioca.org.br/doc_tecnicos.html](http://www.carioca.org.br/doc_tecnicos.html). Acesso [14/02/2017].
- Leuthäusser (2017). Comunicação particular. [Url:www.SigmaDeWe.com](http://www.SigmaDeWe.com).
- Leuthäusser (2016a). The omnipresent impact force formula for a climbing rope. [Url:www.SigmaDeWe.com](http://www.SigmaDeWe.com). Acesso em [10/03/2017].
- Leuthäusser, U. (2016b). The physics of a climbing rope under a heavy dynamic load. Journal of Sports Engineering and Technology. 1–11 IMechE 2016. DOI: 10.1177/1754337116651184. Considerado 1-de-3 pelo autor.
- Leuthäusser, U. (2016c). Physics of climbing ropes: impact forces, fall factors and rope drag. [Url:www.SigmaDeWe.com](http://www.SigmaDeWe.com). 13pp. Acesso [12/02/2017]. Considerado 2-de-3 pelo autor.
- Leuthäusser, U. (2011). Physics of climbing ropes: impact forces, fall factors and rope drag. Retrieved 2011-01-15.
- Lima-e-Silva, P.P. (2019b). A Fórmula Geral da Força Máxima de Impacto. [Url:www.ceu-aberto.com](http://www.ceu-aberto.com). Contato em contato@ceu-aberto.com.

- Lima-e-Silva, P.P. (2019c, no prelo). Fator de Queda: verdades e mitos. Url:www.ceu-aberto.com. Contato em contato@ceu-aberto.com.
- Lima-e-Silva, P.P. (2019f, no prelo). O Peso do Atrito Seco. Url:www.ceu-aberto.com. Contato em contato@ceu-aberto.com.
- Mumford, R. (2017). YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=iZX-yKOkwd8>. R=22,2kN. Acesso [12/05/2019 17:00].
- Nature (2005). Internet encyclopaedias go head to head. Nature Publishing Group. Vol. 438:15 Dec 2005, p.900.
- Reeve, D. (2019). Comunicação pessoal. ACAQ. Contato em drscientific@powerup.com.au.
- Smith, C. (2019). Comunicação pessoal. Contato em csmith@media.mit.edu.
- Smith, C. (2017a). Fall Force Calculator. Url:junkfunnel.com/fallforce. Acesso em [22/03/2017].
- Smith, C. (2017b). Comunicação pessoal. Contato em csmith@media.mit.edu, [28/03/2017 14:17]
- Stifler, E. (2017). Should You Clip the Belay As Your First Lead Pro? Letter to Rock and Ice journal. January 2017.
- Tanzman, J. (2009). Incorporating Friction into the Standard Equation for Impact Force. Url:<http://jt512.dyndns.org/impact-force-rev1.pdf>. Acesso [14/06/2013].
- Titt, J. (2009). Belay Device Theory, Testing and Practice. Url:www.bolt-products.com.
- Touchstone (2014). Dynamic belay. Touchstone Climbing. Url:touchstoneclimbing.com/dynamic-belaying/.
- UIAA (2016). Dynamic Ropes. Union Internationale des Associations D'Alpinisme. Standard No.101. Complementada pela BSI-EN (2012).
- Wexler A. (1950). The theory of belaying. American Alpine Journal, Vol. VII:4.
- Wikipedia (2017). Fall Factor. Referências: Leuthäusser (2016a), Leuthäusser (2016b), Goldstone (2006), Rockfax (2007), vCalc.com (2016). Acesso [01/03/2017].
- Zanantoni, C. (2000). Analysis of Belaying Techniques: A Typical UIAA Activity. UIAA, 3/2000.

APÊNDICE 1 – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO para F_{MAX} MODELOS CLASSICO E ME1

Dedução da equação da força máxima de impacto (F_{MAX}) para o modelo ME1 segundo o modelo clássico, ainda sem os fatores de atenuação. A dedução usa o princípio de conservação de energia para extrair uma expressão para F_{MAX} .	
0	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>$mg =$ peso do(a) escalador(a), força gravitacional na superfície</p> <p>$y_{MAX} =$ deformação da "mola" vista do eixo vertical (m)</p> <p>$L =$ metragem de corda aberta</p> <p>$h =$ altura da queda</p> <p>$K =$ módulo da corda</p> <p>$Q =$ fator de queda = h/L</p> <p>Conservação de energia em $v=0$</p> <p>ENERGIA POTENCIAL TOTAL = ENERGIA ARMAZENADA NA "MOLA"</p> <p>$mg(h + y_{MAX}) = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y_{MAX}^2$</p> </div> </div> <div style="margin-left: 20px; margin-top: 10px;"> $mg \cdot (h + y_{max}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{K}{L} y_{max}^2$ $mgh + mgy_{max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{K}{L} y_{max}^2$ <p>Rearrmando a equação</p> $\frac{1}{2} \cdot \frac{K}{L} y_{max}^2 - mg \cdot y_{max} - mgh = 0$ </div>
1	<p>Usando a Lei de Hooke</p> $F_{MAX} = k \cdot y_{max} = \frac{K}{L} \cdot y_{max} \quad \therefore y_{max} = \frac{K}{L} \cdot F_{MAX}$
2	<p>Substituindo na equação quadrática y_{MAX} por F_{MAX}, e multiplicando a equação por K/L para simplificar</p> $\frac{1}{2} \cdot F_{MAX}^2 - mg \cdot F_{MAX} - \frac{K}{L} mgh = 0$
3	<p>Resolvendo para F_{MAX} e lembrando que $h/L=Q$</p> $F_{max} = mg + \sqrt{(mg)^2 + 2KQ \cdot mg}$
4	<p>Simplificando</p> $F_{max} = mg \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2KQ}{mg}} \right]$
5	<p>Adicionando a proposta do ME1 para F_{MAX} [Eq.4-6],</p> $F_{MAX}^{ME1} = mg \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2KQ}{mg}} \right] \cdot R_{SD}^{MAX}$
6	<p>..e adicionando a proposta do ME1 para F_{GRA} [Eq.4-7]</p> $F_{GRA}^{ME1} = mg \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2KQ}{mg}} \right] \cdot R_{SD}^{GRA}$