

Journal of Exercise and Sport Sciences

**MECANISMOS DE ADAPTAÇÃO AO TREINAMENTO COM
ELETROESTIMULAÇÃO TRANSCUTÂNEA A ALTAS E MÉDIAS
FREQÜÊNCIAS**

**TRAINING ADAPTATION AFTER TRANSCUTANEOUS ELECTRICAL
SIMULATION WITH HIGH AND MEDIUM FREQUENCY**

Alessandro Fromer Piazz

Carlos Ugrinowitsch

Valmor Tricoli

Autor Responsável: Carlos Ugrinowitsch

Instituição: Departamento de Esporte
Escola de Educação Física e Esporte
Universidade de São Paulo

Descritores: Estimulação elétrica, adaptações neurais, adaptações morfológicas.

Inglês: Neural adaptations, morphological adaptations.

Título resumido: Adaptações à Eletroestimulação.

RESUMO

A eletroestimulação transcutânea (ETC) vem sendo utilizada com êxito na reabilitação após períodos de imobilização ou inatividade. Esta técnica de treinamento começou a ser estudada no esporte a partir da década de 70 na União Soviética e mostrou-se capaz de causar ganhos na força muscular em indivíduos atletas e sedentários. Os mecanismos responsáveis por esses ganhos de força ainda não estão totalmente elucidados. Os objetivos do presente trabalho são: 1) discutir as especificidades do treinamento com ETC e 2) identificar os possíveis mecanismos de adaptação responsáveis pelos ganhos de força após treinamento de ETC a médias e altas freqüências. A intensidade de estímulo determina o número de unidades motoras (UM) que são ativadas, quanto maior a intensidade maiores os ganhos de força. A freqüência de estimulação é outro fator que interfere diretamente nos resultados observados. Baixas freqüências (1-49Hz) tornam as fibras musculares mais lentas e resistentes. Já freqüências médias (50-200Hz) e altas (>200Hz) podem causar elevação da força e da velocidade de contração da fibra muscular. A ETC causa um recrutamento preferencial das UM rápidas, o que pode favorecer a obtenção de ganhos de força muscular. Assim como no treinamento com contrações voluntárias, a ETC pode causar adaptações morfológicas ou neurais. Contudo, a temporalidade dessas adaptações deve ser determinada.

ABSTRACT

Electrical stimulation (ES) has been used for rehabilitation and after inactivity periods to recover strength. Its effects started to be studied in athletes and sedentaries in the 70's by the former

Introdução

A eletroestimulação transcutânea (ETC) vem sendo utilizada com êxito na reabilitação após períodos de imobilização ou inatividade. A utilização de corrente elétrica é capaz de atenuar as perdas de força em indivíduos que sofreram intervenção cirúrgica no ligamento cruzado anterior (Snyder-Mackler et al., 1991). Em indivíduos saudáveis, após utilização crônica de corrente elétrica foram observados ganhos na força muscular de até 58,30% (Cabric et al., 1988).

A utilização da ETC como método de treinamento de força para atletas passou a ser estudada a partir da década de 70. Kotz e Chwilow (1971) publicaram um dos primeiros estudos com a utilização de ETC e observaram ganhos de força de até $56,1 \pm 5,9\%$ após 19 sessões de treinamento.

A partir dos expressivos resultados obtidos por Kotz & Chwilow (1971), diversos estudos foram orientados na tentativa de determinar a influência da utilização crônica de corrente elétrica sobre o ganho de força muscular (Eriksson et al., 1981; Mcmiken et al., 1983)

Embora alguns estudos não tenham observado alterações nos parâmetros de força (Fahey et al., 1985; Rich, 1992), a maior parte mostrou ganhos significantes da força em decorrência da utilização crônica de ETC (Cabric & Appell, 1987a; Delitto et al., 1989; Duchateau & Hainaut, 1988; Eriksson et al., 1981) sendo este método de treinamento, em alguns casos, mais eficiente que o treinamento com contrações voluntárias (Henning & Lomo, 1987; Willoughby & Simpson, 1996, 1998).

Apesar de um número considerável de estudos terem evidenciado elevação na força muscular após a utilização de ETC, os mecanismos adaptativos responsáveis por esses aumentos ainda não estão bem estabelecidos.

Alguns autores afirmam que as adaptações residem unicamente na estrutura muscular (Duchateau & Hainaut, 1988; Kotz & Chwilow, 1971; Mcmiken et al., 1983), enquanto outros estudos evidenciam alterações de origem neural (Cabric & Appell, 1987a; Eriksson et al., 1981; Maffiuletti et al., 2000).

O objetivo do presente trabalho é, através de uma revisão de literatura, 1) discutir as especificidades do treinamento com ETC e 2) identificar quais os possíveis mecanismos de adaptação responsáveis pelos ganhos de força após a utilização crônica de ETC a médias e altas freqüências.

Especificidades da Eletroestimulação

Ativação das Unidades Motoras durante a Aplicação de Corrente Elétrica

Durante a realização de ações musculares voluntárias concêntricas ou isométricas, a seqüência de ativação das unidades motoras (UM) ocorre de forma relativamente constante, seguindo o princípio do tamanho (Henneman et al., 1965). As unidades motoras menores (compostas de fibras lentas) são recrutadas inicialmente, pois possuem um baixo limiar de ativação. À medida que a demanda de força aumenta, as unidades de limiar mais elevado (compostas de fibras rápidas) são recrutadas. Mesmo quando a carga a ser vencida é constante este princípio é observado.

Por outro lado, a seqüência de ativação das unidades motoras nas ações musculares excêntricas não parece seguir o princípio do tamanho. Existe uma reversão, as UM rápidas são ativadas primeiro, havendo também uma ativação preferencial destas UM com uma baixa ativação das UM lentas (Nardone & Schieppati, 1988; Nardone et al., 1989).

São inúmeros os autores que sugerem que a ativação muscular durante uma sessão de ETC possui características similares às ações musculares excêntricas, ocorrendo a reversão do princípio do tamanho (Pichon et al., 1995; Poumarat et al., 1992; Sinacore et al., 1990).

Este recrutamento reverso ocorreria, pois, contrariamente à contração voluntária, quando expostos a corrente elétrica exógena, os motoneurônios das UM rápidas apresentam limiar de ativação inferior ao das UM lentas, pois possuem uma menor resistência (Sinacore et al., 1990) ou impedância (Feiereisen et al., 1997; Karba et al., 1990) à passagem de corrente elétrica.

Outro fator poderia explicar a mudança no padrão de recrutamento das unidades motoras. A ETC estimula os receptores cutâneos que ativam os motoneurônios das fibras rápidas inibindo os motoneurônios das fibras lentas (Garnett & Stephens, 1981). Contudo, foi observado o padrão de recrutamento preferencial das UM rápidas mesmo após estimulação direta do nervo motor (Feiereisen et al., 1997). Constatou-se, então, que os motoneurônios mais próximos do campo elétrico foram preferencialmente ativados em relação àqueles mais distantes.

A disposição superficial das fibras musculares IIa e IIb no músculo poderia explicar a ativação preferencial durante a passagem de corrente devido a uma maior proximidade física do campo elétrico (Lexell, et al., 1983). Entretanto, durante a ETC a ação da corrente elétrica estimula principalmente os neurônios motores sendo as fibras musculares ativadas indiretamente (Enoka, 1988a).

Durante um programa de ETC com objetivo de ganhos de força, espera-se que a intensidade da corrente seja a maior possível. A ETC é capaz de gerar torques superiores aos encontrados durante uma contração voluntária máxima (Delitto et al., 1989; Selkowitz, 1985), o que sugere que durante a aplicação de corrente elétrica com intensidades elevadas a totalidade das UM é recrutada (Duchateau & Hainaut, 1988). Nesse caso não existiria um recrutamento preferencial das UM rápidas, mas um recrutamento simultâneo de todas as tipologias de UM, contudo, a contração nas fibras musculares rápidas seria observada com mais precocidade devido à maior velocidade de condução do impulso nervoso ao longo do axônio (Enoka, 1988b).

Portanto, é possível afirmar que o recrutamento das fibras musculares durante a aplicação de corrente elétrica segue um padrão temporal de recrutamento inverso ao da contração voluntária isométrica e céntrica, sendo primeiramente recrutadas as fibras rápidas para posteriormente recrutar-se as fibras lentas.

Por outro lado, um número maior de estudos é necessário para se elucidar os mecanismos responsáveis pela suposta ativação seletiva das fibras rápidas durante a aplicação de corrente elétrica.

Intensidade do Estímulo

Em um treinamento tradicional a intensidade é determinante para o ganho de força (Campos et al., 2002). Quanto mais próxima a intensidade de treinamento da máxima, maiores são os ganhos de força. A intensidade de ativação, ou a quantidade de UM ativas é modulada de acordo com a demanda de força através de mecanismos de controle nos níveis supraespinhal e espinhal (Enoka, 1988b).

Com o uso da ETC a intensidade (amplitude da corrente) é imposta externamente, independentemente da sobrecarga utilizada. Quanto maior a amplitude da corrente, maior a área de atuação do campo elétrico, e consequentemente, maior será a área ativada, ou seja, um número maior de UM será recrutado (Enoka, 1988b).

Dentro de uma sessão de estimulação elétrica direcionada ao ganho de força, espera-se que o maior número possível de unidades motoras seja recrutado, contudo, caso a intensidade se eleve acima dos valores de tolerância à dor, há uma ativação reflexa inibitória da atividade muscular (Poumarat et al., 1992).

A tolerância à dor provocada pela corrente elétrica depende da familiarização prévia ao método e do nível de treinamento do indivíduo. A máxima intensidade suportada por sujeitos sadios não atletas é em média de 70mA (Miller & Thépaut-Mathieu, 1993)

e em atletas de alto nível de até 200mA (Delitto et al., 1989).

Miller & Thépaut-Mathieu (1993) realizaram um estudo com 16 indivíduos que foram submetidos a 15 sessões de ETC com 25 contrações por sessão. De acordo com a elevação do torque voluntário após as 15 sessões, os indivíduos foram divididos em três grupos: grupo I que obteve ganhos de torque inferiores a 10%, grupo II com ganhos que variaram entre 10% e 20% e grupo III com elevação no torque acima de 20%. O grupo III foi o que apresentou maior elevação de intensidade da corrente elétrica ao longo das sessões de treinamento, mostrando que o ganho de força está intimamente relacionado à intensidade do estímulo elétrico e consequentemente à tolerância individual ao mesmo.

Rich (1992) afirmou que para que ocorram adaptações satisfatórias com o uso da ETC a intensidade de corrente utilizada deve ser capaz de gerar torques próximos aos de uma contração voluntária máxima (CVM). Selkowitz (1985) encontrou valores médios de 91% (autor não cita desvio padrão) da CVM durante a aplicação de um protocolo de estimulação elétrica, sendo que alguns indivíduos superaram a CVM de 109% a 165%. Valores maiores que 100% da CVM foram encontrados também por Delitto et al (1989) em um atleta de alto nível. Embora intensidades elevadas de corrente sejam mais eficientes para o ganho de força, são dificilmente encontradas na literatura (Rich, 1992), principalmente devido à amostra utilizada, que na sua maioria é constituída por indivíduos não atletas e/ou não familiarizados com o uso da ETC (Cabric et al., 1987b; Maffiuletti et al., 2002b; Turostowski et al., 1992).

Freqüência do Estímulo

Em uma contração muscular voluntária, a freqüência de disparo dos motoneurônios é modulada de acordo com a demanda de força (Feiereisen et al., 1997). A baixas freqüências, as fibras musculares não produzem tensão máxima. À medida que a freqüência de chegada dos impulsos nervosos se eleva, o grau de tensão gerado se torna maior até que se atinja a tetania completa, ponto este em que uma elevação adicional da freqüência não gera elevação de tensão (Enoka, 1988b). As UM rápidas entram em tetania completa a freqüências mais elevadas que as UM lentas (Rome & Lindstedt, 1998).

Quando utilizada ETC a freqüência de estímulo é modulada externamente sem que haja interferência direta do sistema nervoso central.

A freqüência de estimulação pode ser programada de 2 formas distintas: a primeira refere-se a alternância simples de ciclos de corrente como mostra a figura 1. De acordo com o número de ciclos que se repetem

por segundo determina-se a freqüência. Por exemplo, se durante um segundo são realizados 50 ciclos, diz-se que a freqüência é de 50Hz. A segunda forma refere-se à utilização de uma freqüência elevada, mas com interrupções periódicas da corrente, como mostra a figura 2. Nesse exemplo a freqüência programada é de 2500Hz com modulação de 50Hz, ou seja, a cada 10ms a corrente elétrica é interrompida por um período de 10ms.

Durante contrações eletroinduzidas os maiores torques são gerados a freqüências de estímulo superiores a 50Hz (Martin et al., 1994; Pichon et al., 1995). Edwards et al. (1977) utilizando freqüência de 50Hz observaram torques superiores a 60% da CVM isométrica, em contra partida, utilizando ETC a 10Hz o torque obtido foi de 30 a 40% daquele observado a 50Hz. Foram observadas contrações eletroinduzidas

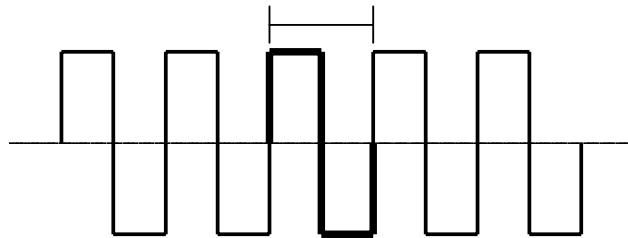


Figura 1 – Exemplo de alternância simples de corrente com freqüência de 50Hz. São observados 50 ciclos de 20ms por segundo.

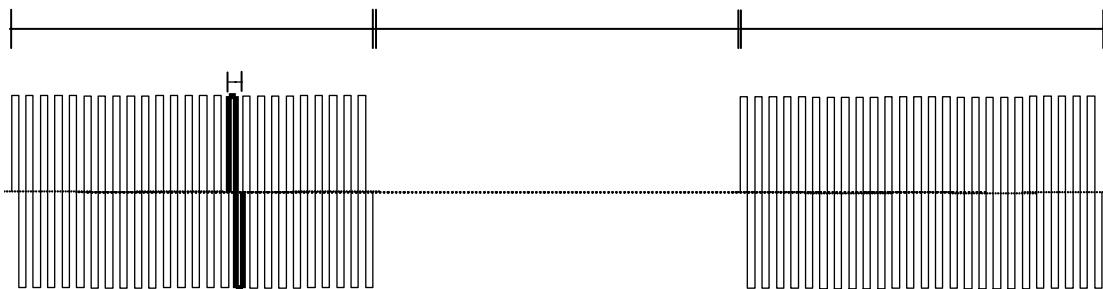


Figura 2 – Exemplo de freqüência com modulação. A corrente elétrica é programada para uma freqüência de 2500Hz com ciclos de 0,04ms e modulação a 50Hz, ou seja, para cada 10ms de passagem de corrente existe 10ms de silêncio elétrico sendo este fato repetido 50 vezes em um segundo.

com torque superior ao da CVM quando utilizadas freqüências de 2200Hz (Selkowitz, 1985) e 2500Hz modulada a 75Hz (Delitto et al., 1989).

Dentro da presente revisão bibliográfica os diferentes níveis de freqüências de estimulação foram arbitrariamente divididos em baixas freqüências (1-49Hz), médias freqüências (50-200Hz) e altas freqüências (>200Hz).

A ETC crônica com média e alta freqüência é capaz de produzir elevação na força muscular (Cabric et al., 1988; Martin et al., 1993; Portmann & Monpetit, 1991; Stefanovska & Vodovnik, 1985), na velocidade de contração das fibras musculares (Karba et al., 1990), no torque concêntrico gerado a altas velocidades (Maffiuletti et al., 2000; Poumarat et al., 1992) no torque excêntrico (Rich, 1992) e na impulsão vertical (Kotz & Chwilon, 1971; Maffiuletti et al., 2002a; Risaliti & Marella, 1999).

Em estudos com animais, após estimulação por várias semanas, com baixa freqüência, as fibras rápidas se tornaram mais lentas e resistentes (Brown et al., 1976; Pette et al., 1973). Por outro lado, Henning & Lomo (1987) estimulando fibras de ratos a altas freqüências observaram que a velocidade de contração destas fibras aumentou. Neste mesmo estudo quando utilizadas altas freqüências de estimulação em músculos sem inervação observou-se que todas as fibras lentas se transformaram em rápidas enquanto que para músculos intactos, aproximadamente 45% das fibras lentas se transformaram em fibras rápidas.

Como as características das fibras musculares estão intimamente relacionadas ao tipo de estímulo que recebem dos seus respectivos motoneurônios (Pette & Vrbová, 1985), uma fibra lenta estimulada com freqüências próximas daquelas específicas de uma fibra rápida poderia adquirir características de uma fibra muscular rápida. Karba et al. (1990) após estimulação

elétrica em humanos com freqüência de 100Hz observaram redução no período de latência (tempo entre estímulo e início da contração muscular) de $14,2 \pm 12\%$ e redução no período entre o início da contração e o pico de tensão de $16,5 \pm 9\%$, mostrando que os músculos estimulados tiveram a velocidade de contração aumentada.

Portanto, um protocolo de ETC cujo objetivo seja a elevação da força e/ou da velocidade de contração muscular deve utilizar freqüências de estímulo elevadas.

Mecanismos de Adaptação

Adaptações Morfológicas

A ETC, assim como o treinamento com contrações voluntárias, é capaz de alterar a estrutura morfológica (Bigard et al., 1993) e a distribuição percentual dos diferentes tipos de fibras (Delitto et al., 1989).

Um dos primeiros estudos realizados em humanos com o objetivo de observar os ganhos de força decorrentes de um protocolo de ETC crônica foi conduzido por Kotz & Chwilon (1971) na antiga União Soviética. Para tanto utilizou-se um protocolo com aplicação de corrente elétrica a uma freqüência de 50Hz com 10 segundos de estimulação e 50 segundos de recuperação. A intensidade utilizada foi a máxima suportada pelos indivíduos.

Após 9 sessões de treinamento observou-se elevação da CVM isométrica dos flexores do cotovelo de $27 \pm 3,9\%$ para G1, (grupo que treinou em dias alternados) e de $29,8 \pm 2,4\%$ para G2 (grupo que treinou diariamente). Após 19 sessões de treinamento observou-se elevação de $38,4 \pm 3,6\%$ para G3 (grupo que treinou diariamente durante 19 sessões). No grupo que realizou treinamentos diários do tríceps sural (G4) os ganhos foram de $56,1 \pm 5,9\%$ na CVM isométrica no movimento de flexão plantar e de $11,1\%$ na impulsão vertical após 19 sessões de treinamento. Em todos os grupos foi observada elevação na circunferência do membro estimulado.

Apesar da imprecisão da metodologia de avaliação utilizada essa elevação na circunferência dos membros estimulados levou os autores a sugerirem que as modificações nos parâmetros de força foram consequência de alterações morfológicas.

Em um estudo realizado em animais (Bigard et al., 1993), 8 macacos rhesus foram submetidos a um protocolo de ETC do tríceps braquial durante 3 semanas. Foi utilizada freqüência de estímulo de 60Hz. As sessões com 1 hora de duração foram efetuadas 5 vezes por semana. A intensidade utilizada foi a máxima possível que não causasse desconforto aparente aos animais com uma relação de 5s de estímulo e 10s de recuperação.

Após a interrupção do treinamento não foram observadas alterações na distribuição percentual das fibras musculares do tipo I, IIa e IIb. Contudo, observou-se aumento da área de secção transversa de todos os tipos de fibra. Nas fibras do tipo I foi encontrado aumento da área de secção transversa nas biópsias realizadas na região proximal e distal do músculo (34,20% e 45,64%, respectivamente). As fibras do tipo IIa apresentaram padrão similar de modificações, 25,95% na região proximal e 34,91% na região distal. Nas fibras do tipo IIb, o aumento da área de secção transversa foi estatisticamente significante apenas para as amostras obtidas na região distal do músculo (25,71%). Estes dados estão de acordo com Narici et al. (1996) que encontraram hipertrofia específica para diferentes regiões musculares (distal, média, proximal) após treinamento em humanos com contrações voluntárias.

Embora oriundos de pesquisa realizada com animais, estes dados mostram que os parâmetros de estimulação elétrica utilizados foram capazes de causar hipertrofia, mesmo no curto período de treinamento efetuado (3 semanas). A hipertrofia foi observada em todos os tipos de fibras musculares sem que ocorresse uma adaptação preferencial das fibras do tipo II o que não está de acordo com o que preconizam diversos autores (Sinacore et al., 1990).

Paralelamente à hipertrofia muscular, foi observada uma maior atividade de enzimas mitocondriais em todas as fibras musculares, sobretudo, nas fibras de tipo II. Esse fato pode ser consequência da escolha da relação de 5s de estímulo por 10s de recuperação, o que não permitiria uma recuperação completa dos fosfatos intramusculares, estimulando assim, a adaptação de enzimas do metabolismo aeróbio (Selkowitz, 1989).

Em um estudo de caso realizado com um sujeito levantador de peso de alto nível com 11 anos de experiência (Delitto et al., 1989), foi utilizado um protocolo de ETC constituído de 3 sessões de treinamento semanais durante o período de um mês. Em cada sessão foram realizadas 10 contrações eletroinduzidas sobre o músculo quadríceps femoral a uma freqüência de 2500Hz modulada a 75Hz, com 11s de contração por 180s de recuperação. Segundo os autores, pelo fato do atleta estar habituado ao desconforto do treinamento da modalidade e estar com um nível de motivação elevado, foi possível atingir intensidades de corrente próximas de 200mA o que acarretou em contrações que excediam 100% da contração voluntária máxima (CVM). Juntamente com o protocolo de ETC foi mantido um programa de treinamento específico da modalidade. Após o período de um mês observou-se elevação da força muscular no movimento de agachamento (+20kg). Embora seja um estudo que não tenha utilizado grupo controle e a amostra seja constituída de um único sujeito, estes

resultados podem ser considerados de grande importância, pois Häkkinen et al. (1987) conduziram um treinamento com contrações voluntárias de um ano com levantadores de peso de elite e não encontraram alteração significante na força isométrica máxima, o que sugere que essa população possui um potencial de ganho de força limitado.

No estudo de Delitto et al. (1989) observou-se que após o período de treinamento com ETC houve queda no percentual de fibras do tipo I e elevação no percentual de fibras do tipo IIa e IIb. Contudo, quando analisado o valor médio da área de secção transversa de cada tipo de fibra, observou-se aumento de 13% nas fibras tipo I e redução de 25% e 33% nas fibras de tipo IIa e IIb, respectivamente. A elevação da força muscular e do percentual das fibras do tipo II com a concomitante redução de sua área de secção transversa, segundo os autores, pode ser explicado por uma possível conversão de fibras do tipo I em fibras do tipo II, fato esse observado também após treinamento voluntário (Adams et al., 1993).

Turostowski et al. (1992), dividiu 20 estudantes de educação física em dois grupos: o grupo controle realizou um treinamento constituído de 30 contrações voluntárias dinâmicas separadas por 15 segundos de recuperação. O grupo experimental realizou treinamento com ETC a 60Hz com sessões de duração de 10 minutos com contração de ambos quadríceps femurais. As contrações possuíam 5s de duração intercaladas por 15s de pausa, somando um total de 30 repetições. O protocolo de treinamento teve duração de 5 semanas para ambos os grupos. Foi analisada a área de secção transversa do quadríceps antes e após o treinamento por meio de tomografia computadorizada. No teste pós-treinamento verificou-se elevação significante da área de secção transversa em relação ao teste pré-treinamento de 8% para o grupo eletroestimulado e 2% para o grupo controle. A maior hipertrofia encontrada após treinamento com ETC pode ser consequência da solicitação de um maior número de unidades motoras, sobretudo as de contração rápida (Feiereisen et al., 1997; Sinacore et al., 1990).

Moreau et al. (1995), após ETC do quadríceps a 70Hz observaram maior nível de concentração plasmática das enzimas creatino quinase e lactato desidrogenase que no grupo que treinou com contrações concêntricas. O grupo eletroestimulado apresentou também maiores níveis de dor muscular. Segundo os autores, a ETC causa maior lesão na fibra muscular, fato este que poderia contribuir para uma maior capacidade de gerar hipertrofia.

O treinamento voluntário de força com intensidades elevadas pode causar danos à estrutura celular do músculo. Para que ocorra a regeneração desses danos, as células satélite se proliferarem e migram para o in-

terior da fibra muscular aumentando a quantidade de material genético disponível para síntese protéica, podendo desencadear o processo de hipertrofia (Vierck et al., 2000).

Após ETC cotidiana do músculo tríceps sural por 21 dias, com freqüências de 50Hz para o grupo I (GI) e 2500Hz para o grupo II (GII) (Cabric et al., 1987b), foram observadas elevações significantes do número de núcleos por área de secção transversa de 36,5% e 30,7% para GI e GII respectivamente, sem diferença significante entre os grupos. Observou-se igualmente aumento do tamanho médio dos núcleos para ambos os grupos. Por outro lado, quando analisada a densidade nuclear, o número de núcleos por fibra muscular e a área de secção transversa das fibras, apenas o grupo que utilizou o protocolo de estimulação a 50Hz mostrou alterações significantes (21,2%, 58,6% e 16%, respectivamente). Portanto, o treinamento com ETC é capaz de gerar alterações na quantidade de material genético intracelular e na síntese protéica, sendo que estas alterações podem responder diferentemente de acordo com a freqüência de estimulação utilizada.

Os mecanismos intracelulares responsáveis pela hipertrofia muscular decorrente da utilização crônica de corrente elétrica a médias e altas freqüências ainda não estão bem estabelecido, contudo, é possível que possuam grande semelhança com aqueles encontrados após um treinamento com contrações voluntárias (Cabric et al., 1987b).

Adaptações Neurais

Segundo Enoka (1988b), as primeiras adaptações causadas pelo treinamento de força voluntário são obtidas por meio de adaptações neurais, sendo que as modificações morfológicas tornam-se mais evidentes em longo prazo.

Devido ao possível não envolvimento direto do sistema nervoso central durante a realização de contrações musculares induzidas eletricamente (Kotz & Chwilow, 1971), há autores que afirmam que os ganhos de força relacionados ao treinamento com ETC são exclusivamente obtidos por meio de alterações periféricas ligadas à estrutura das fibras musculares (Duchateau & Hainaut, 1988; Mcmiken et al., 1983). Contudo, apesar da existência de alterações morfológicas do tecido muscular ser bem fundamentada (Delitto et al., 1989; Moreau et al., 1995; Turostowski et al., 1992), mesmo em períodos inferiores a 3 semanas de treinamento (Bigard et al., 1993; Cabric et al., 1987b), grande número de estudos mostra adaptações do sistema nervoso quando da utilização de um protocolo de treinamento com ETC (Eriksson et al., 1981; Maffiuletti et al., 2000).

Miller & Thépaut-Mathiel (1993), realizaram um

estudo de 5 semanas com protocolo de ETC com frequência de 2500Hz modulada a 90 Hz. A intensidade de estímulo variou de 1 a 100 mA. Os treinamentos foram realizados três vezes por semana. A CVM sofreu elevação média de 15,6% com variação interindividual de -5 a 49%. Devido ao curto período de treinamento (5 semanas) e à expressiva melhora da força (até 49%) os autores sugeriram que as adaptações ocorridas foram consequência de modificações no sistema nervoso, o que está de acordo com Enoka (1988b).

Martin et al. (1994) realizaram um estudo de 4 semanas que consistiu na estimulação elétrica do músculo tríceps sural de estudantes de educação física. A frequência utilizada foi de 70 Hz, com tempo de contração de 5s por 15s de pausa. Não foram encontradas modificações na área de secção transversa muscular, contudo, observou-se melhorias estatisticamente significantes tanto no torque em situação isométrica como dinâmica. A ausência de hipertrofia mostra evidências de que este aumento pode ter sido consequência de alterações neurais. Esta afirmação está de acordo com Araújo et al. (1993) que encontraram elevação no sinal eletromiográfico de até 36,71% após treinamento com ETC.

Em um estudo de 4 semanas com frequência de 4 sessões de treinamento semanais, foi utilizado um protocolo de estimulação elétrica sobre os músculos flexores plantares de 8 indivíduos que realizaram contrações isométrica. As 16 sessões de treinamento foram constituídas de 25 contrações cada com frequência de 75Hz e relação de 4s de estimulação por 20s de recuperação. A intensidade de corrente utilizada foi a máxima tolerada pelos indivíduos e variou de 30-90mA (Maffiuletti et al., 2002a).

Após o período de treinamento observou-se elevação significante no torque em condição isométrica e em condição excêntrica para as duas velocidades avaliadas (120°/s e 60°/s), sem que tenham sido observadas alterações no torque concêntrico. Paralelamente ao ganho de força foi observada elevação no nível de ativação voluntária. Estes fatos evidenciam a existência de adaptações neurais. Contudo, estas adaptações mostram-se específicas uma vez que existiu uma diferenciação no padrão de evolução da força nos distintos tipos de ação muscular analisados.

Segundo Selkowitz (1989), existe a possibilidade do sistema nervoso central receber informações sensoriais (*feedback*) induzidas pela passagem de corrente elétrica nos nervos aferentes, o que favoreceria o au-

mento do torque gerado na contração voluntária máxima como consequência de uma maior ativação e sincronização das unidades motoras (Martin et al., 1994).

Uma das adaptações neurais ao treinamento de força voluntário é a redução da co-ativação dos músculos antagonistas (Carolan & Cafarelli, 1992). Contudo, no estudo conduzido por Maffiuletti et al. (2002a), apesar de ter-se observado elevação do sinal eletromiográfico durante um teste isométrico máximo no grupo muscular estimulado, não houve alteração na co-ativação dos antagonistas. Portanto, embora a ETC seja capaz de modificar os parâmetros referentes à coordenação intramuscular, nas condições deste estudo não se mostrou eficiente para causar alterações na coordenação intermuscular.

Cabric & Appell (1987a) utilizaram um protocolo experimental de 21 dias de estimulação elétrica do tríceps sural apenas de um membro. As sessões de treinamento ocorreram com intensidade de corrente que variou de 40 a 45mA. Dois parâmetros distintos de frequência foram utilizados, 50Hz para o grupo I (GI) e 2000Hz para o grupo II (GII). Após as 21 sessões houve elevação da força voluntária máxima isométrica de 50,3% para GI e de 58% para GII, sendo que a diferença entre os grupos não foi significante. Estes resultados mostram uma melhora de força muito acentuada para o período de treinamento, o que sugere um grande grau de adaptações neurais. Reforçando a hipótese da existência de adaptações neurais, foi observado ganho de força no membro contra-lateral (não estimulado) de 39,7% para GI e 32,2% para GII, sem diferença significante entre os dois grupos. Após treinamento voluntário do músculo quadríceps femural de um membro também foi observada elevação significante da força muscular e do sinal eletromiográfico no membro contra-lateral (Hortobagyi et al., 1999). Nesse mesmo estudo, após treinamento de 6 semanas com ETC os autores encontraram elevação dos níveis de força isométrica e excêntrica no membro não estimulado, sendo que o efeito de educação cruzada foi maior do que no grupo que treinou com contrações voluntárias.

Segundo Teixeira & Caminha (2003), a transferência bilateral de força (educação cruzada) está relacionada a mecanismos de aprendizagem motora, mostrando que o sistema nervoso central está envolvido no ganho de força através da ETC. Isto confirma a hipótese de que esta técnica de treinamento pode causar adaptações não só periféricas, mas em níveis hierárquicos superiores do sistema nervoso central.

CONCLUSÃO

Na maioria dos estudos o treinamento com ETC mostrou-se eficiente para induzir ganhos de força muscular. Este ganho de força foi observado em diversos protocolos que utilizaram um grande número de parâmetros de treinamento.

Torna-se uma tarefa extremamente complexa comparar os resultados obtidos nos diferentes estudos, pois os mesmos utilizaram parâmetros de estimulação distintos como: freqüência, intensidade, duração do estímulo e tempo de recuperação, número de sessões, duração das sessões, duração do treinamento, músculo estimulado e população utilizada como amostra.

Embora a ETC com médias e altas freqüências cause algumas adaptações semelhantes àquelas observadas após treinamento com ações musculares voluntárias, este método mostrou algumas especificidades. Segundo Hainaut e Duchateau (1992), a ETC é um método complementar ao treinamento voluntário, pois causa ativação das unidades motoras rápidas, fato esse dificilmente observado durante contrações voluntárias sub-máximas.

Ficou evidente que o treinamento com ETC é capaz de causar adaptações morfológicas e funcionais tanto na estrutura muscular como no sistema nervoso central. A temporalidade dessas adaptações ainda não está estabelecida. Observou-se adaptações morfológicas (Bigard et al., 1993) e alterações na quantidade de material genético da fibra muscular (Cabric et al., 1987b) após somente 3 semanas de treinamento. Neste mesmo período, observou-se adaptações significantes na função do sistema nervoso central, sobretudo quando analisada a ocorrência de educação cruzada (Cabric et al., 1987a). Contudo, os efeitos da estimulação prolongada com médias e altas freqüências ainda não são conhecidos, pois grande parte dos estudos em humanos analisados utilizou períodos de treinamento inferiores a 6 semanas. Portanto um número maior de estudos, além da utilização de protocolos de treinamento mais longos e uniformes, poderia levar a um maior conhecimento dos mecanismos de adaptação decorrentes de treinamento com ETC a médias e altas freqüências.

REFERÊNCIAS

Adams GR; Hather BM; Baldwin KM; Dudley GA. Skeletal muscle myosin heavy chain composition and resistance training. **J Appl Physiol**. 1993; 74(2):911-5.

Araújo RC; Amadio AC; Furlani, J. **Estudo sobre as alterações na relação eletromiografia-força pelo treinamento com estimulação elétrica neuromuscular**. Santa Maria. 1993; 5. Congresso Brasileiro de Biomecânica.

Bigard A; Lienhard F; Merino D; Serrurier B; Guezzennec CY. Effects of surface electrostimulation on the structure and metabolic proprieties in monkey skeletal muscle. **Med Sci Sports Exerc**. 1993; 25(3): 355-62.

Brown MD; Cotter MA; Hudlicka O; Vrbová G. The effects of different patterns of muscle activity on capillary density, mechanical proprieties and structure of slow and fast rabbit muscle. **Pflugers Arch**. 1976; 361:241-50.

Cabric M; Appell HJ. Effect of electrical stimulation of high and low frequency on maximum isometric force and some morphological characteristics in men. **Int J Sports Med**. 1987a; 8(4): 256-60.

Cabric M; Appell HJ; Resic A. Effects of electrical stimulation of different frequencies on the myonuclei and fiber size in human muscle.

Int J Sports Med. 1987b; 8(5):323-6.

Cabric M; Appell HJ; Resic A. Fine structural changes in electrostimulated human skeletal muscle. Evidence for predominant effects on fast muscle fibres. **Eur J Appl Physiol Occup Physiol**. 1988; 57(1):1-5.

Campos GE; Luecke TJ; Wendeln HK; Toma K; Hagerman FC; Murray TF *et al.* Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: Specificity of repetition maximum training zones **Europ J Appl Physiol**. 2002; 88(1-2):50-60.

Carolan B; Cafarelli E. Adaptations in coactivation after isometric resistance training. **J Appl Physiol**. 1992; 73(3):911-17.

Delitto A; Brown M; Strube MJ; Rose SJ; Lehman RC. Electrical stimulation of quadriceps femoris in an elite weight lifter: a single subject experiment. **Int J Sports Med**. 1989; 10(3):187-91.

Duchateau J; Hainaut K. Training effects of sub-maximal electrostimulation in a human muscle. **Med Sci Sports Exerc**. 1988; 20(1):99-104.

Edwards RH; Young A; Hosking GP; Jones, DA. Human skeletal muscle function: description of tests and normal values. **Clin Sci Mol Med**. 1977; 52(3):283-90.

Eriksson E; Haggmark T; Kiessling KH; Karlsson J. Effect of electrical stimulation on human skeletal muscle. **Int J Sports Med**. 1981 2(1):18-22.

Enoka RM. **Neuromechanical basis of kinesiology**. Champaign: Human Kinetics, 1988a.

Enoka RM. Muscle strength and its development. New perspectives. **Sports Med**. 1988b 6(3):146-68.

Fahey TD, Harvey M, Schroeder RV, Ferguson F. Influence of sex differences and knee joint position on electrical stimulation-modulated strength increases. **Med Sci Sports Exerc**. 1985; 17(1): 144-7.

Feiereisen P; Duchateau J; Hainaut K. Motor unit recruitment order during voluntary and electrically induced contractions in the tibialis anterior. **Exp Brain Res**. 1997; 114(1):117-23.

Garnett R; Stephens JA. Changes in the recruitment threshold of motor units produced by cutaneous stimulation in man. **J Physiol (London)**. 1981; 311: 463-73.

Hainaut K; Duchateau J. Neuromuscular electrical stimulation and voluntary exercise. **Sports Med**. 1992; 14(2): 100-13.

Häkkinen K; Komi PV; Alén M; Kauhanen H. EMG, muscle fiber and force production characteristics during a one year training period in elite weight lifters. **Eur J Appl Physiol**. 1987; 56: 419-427.

Henneman E; Somjen G; Carpenter DO. Functional significance of cell size in spinal motoneurons. **J Neurophysiol**. 1965; 28:560-80.

Henning R; Lomo T. Effect of chronic stimulation on the size and speed of long term denervated and innervated rat fast and slow skeletal muscle. **Acta Physiol Scand**. 1987;130:115-31.

Hortobágyi T; Scott K; Lambert J; Hamilton G; Tracy J. Cross-education of muscle strength is greater with stimulated than voluntary contractions. **Motor Control**. 1999; 3(2): 205-19.

Karba R; Stefanovska A; Dordevic S. Human skeletal muscle: phasic type of electrical stimulation increases its contractile speed. **Ann Biomed Eng.** 1990; 18(5): 479-90.

Kotz, YM; Chwilon BA. Entraînement de la force musculaire par la méthode d'electrostimulation **Teorija i praktika fisiceskoi kul'tury** (tradução do russo) 1971; 4: 66-73.

Lexell J; Henriksson-Larsen K; Sjostrom M. Distribution of different fibre types in human skeletal muscles. A study of cross-sections of whole m. Vastus lateralis. **Acta Physiol Scand.** 1983; 117(1): 115-22.

Maffiuletti NA; Cometti G; Amirdis IG; Martin A; Pousson M; Chatard JC. The effects of electromyostimulation training and basketball practice on muscle strength and jumping ability. **Int J Sports Med.** 2000; 21(6): 437-43.

Maffiuletti NA; Pensini M; Martin A. Activation of human plantar flexor muscles increases after electromyostimulation training. **J Appl Physiol.** 2002a; 92(4): 1383-92.

Maffiuletti NA; Dugnani S; Folz M; Di Pierno E; Mauro F. Effect of combined electrostimulation and plyometric training on vertical jump height. **Med Sci Sports Exerc.** 2002b; 34(10): 1638-44.

Martin L; Cometti G; Pousson M; Morlon B. Effect of electrical stimulation training on the contractile characteristics of the triceps surae muscle. **Eur J Appl Physiol Occup Physiol.** 1993; 67(5): 457-61.

Martin L; Cometti G; Pousson M; Morlon B. The influence of electrostimulation on mechanical and morphological characteristics of the triceps surae. **J Sports Sci.** 1994; 12(4): 377-81.

Mcmiken DF; Todd-Smith M; Thompson C. Strengthening of human quadriceps muscles by cutaneous electrical stimulation. **Scand J Rehabil Med.** 1983; 15(1): 25-8.

Miller C; Thepaut-Mathieu C. Strength training by electrostimulation conditions for efficacy. **Int J Sports Med.** 1993; 14(1): 20-8.

Moreau D; Dubots P; Boggio V; Guilland JC; Cometti G. Effects of electromyostimulation and strength training on muscle soreness, muscle damage and sympathetic activation. **J Sports Sci.** 1995; 13(2): 95-101.

Nardone A; Schieppati M. Shift of activity from slow to fast muscle during voluntary lengthening contractions of the triceps surae muscles in humans.

J Physiol. 1988; 395: 363-81.

Nardone A; Romano C; Schieppati M. Selective recruitment of high-threshold human motor units during voluntary isotonic lengthening of active muscles. **J Physiol.** 1989; 409: 451-71.

Narici MV; Hoppeler H; Kayser B; Landoni L; Claassen H; Gavardi C *et al.* Human quadriceps cross-sectional area, torque and neural activation during 6 months strength training. **Acta Physiol Scand.** 1996; 157(2): 175-86.

Pette D; Smith ME; Staudte HW; Vrbová G. Effect of long-term electrical

stimulation on some contractile and metabolic characteristics of fast rabbit muscle. **Pflugers Arch.** 1973; 338: 257-72.

Pette D; Vrbová G. Neural control of phenotypic expression in mammalian muscle fibers. **Muscle Nerve.** 1985; 8: 676-89.

Pichon F; Chatard JC; Martin A; Cometti G. Electrical stimulation and swimming performance. **Med Sci Sports Exerc.** 1995; 27(12): 1671-6.

Portmann, M. e R. Monpetit. Effets de l'entraînement par électrostimulation isométrique et dynamique sur la force de contraction musculaire. **Science & Sport.** 1991; 6: 193-203.

Poumarat G; Squire P; Lawani M. Effect of electrical stimulation superimposed with isokinetic contractions. **J Sports Med Phys Fitness.** 1992; 32(3): 227-33.

Rich, N. C. Strength training via high frequency electrical stimulation. **J Sports Med Phys Fitness.** 1992; 32(1): 19-25.

Risaliti M; Marella M. L'elettrostimolazione: metodica integrativa di potenziamento muscolare. 1999; 45-63. **Atti del 6º Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana Preparatori Atletici di Calcio della Federazione Italiana Giuoco Calcio.**

Rome LC; Lindstedt SL. The quest for speed: muscles built for high-frequency contractions. **News Physiol Sci.** 1998; 13: 261-8.

Selkowitz DM. Improvement in isometric strength of the quadriceps femoris after training with electrical stimulation. **Phys Ther.** 1985; 65: 186-196.

Selkowitz DM. High frequency electrical stimulation in muscle strengthening. A review and discussion. **Am J Sports Med.** 1989; 17(1): 103-11.

Sinacore DR; Delitto A; King DS; Rose SJ. Type II fiber activation with electrical stimulation: a preliminary report. **Phys Ther.** 1990; 70(7): 416-22.

Snyder-Mackler L; Ladin Z; Schepsis AA; Young JC. Electrical stimulation of the thigh muscles after reconstruction of the anterior cruciate ligament. Effects of electrically elicited contraction of the quadriceps femoris and hamstring muscles on gait and on strength of the thigh muscles. **J Bone Joint Surg Am.** 1991; 73(7): 1025-36.

Stefanovska A, Vodovnik L. Change in muscle force following electrical stimulation. Dependence on stimulation waveform and frequency. **Scand J Rehabil Med.** 1985; 17(3): 141-6.

Teixeira LA; Caminha LQ. Intermanual transfer of force control is modulated by asymmetry of muscular strength. **Exp Brain Res.** 2003; 149(3): 312-9.

Turostowski J; Cometti G; Cordano M. **Influence of electrostimulation on human quadriceps femoris muscle strength and muscle mass.** Mi-lão; 1992. 10th symposium of the International Society of Biomechanics in Sport..

Vierck J; O'Reilly B; Hossner K; Antonio J; Byrne K; Bucci L *et al.* Satellite cell regulation following myotrauma caused by resistance exercise. **Cell Biol**

Int. 2000; 24(5): 263-72.

Willoughby DS; Simpson S. The effects of combined electromyostimulation and dynamic muscular contractions on the strength of college basketball players. **J Strength Cond Res.** 1996; 10(1): 34-39.

Willoughby DS; Simpson S. Supplemental electromyostimulation and dynamic weight training: Effects on knee extensor strength and vertical jump of female collegiate athletes. **J Strength Cond Res.** 1998; 12(3): 131-137.