

MÀSTER UNIVERSITARI EN NEUROREHABILITACIÓ

UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

INSTITUT GUTTMANN

L'adhesió d'una tasca propositiva a la teràpia vibratòria per afavorir un procés d'aprenentatge motor en l'espasticitat i la funció motora en ictus crònics: protocol d'un assaig clínic pilot aleatoritzat



Tutor: Sr. Albert Calsada Gómez

Co-tutor: Dr. Josep M. Tormos Muñoz

Autoria: Francesc Xavier Guiu Tula

20-06-2018

ÍNDEX

1	EL CONTROL MOTOR.....	1
1.1	Control de la funció motora per la medul·la espinal	1
1.1.1	Organització de la medul·la espinal	1
1.2	Organització de la informació sensitiva	2
1.2.1.1	Mecanoreceptors especialitzats en la informació tàctil receptiva.	2
1.2.1.1.1	Aferències de Merkel	2
1.2.1.1.2	Aferències de Meissner	3
1.2.1.1.3	Aferències de Paccini	3
1.2.1.1.4	Aferències de Ruffini	3
1.2.1.2	Mecanoreceptors especialitzats en la propiocepció	4
1.2.1.2.1	El fus neuromuscular	4
1.2.1.2.2	Òrgan tendinós de Golgi	6
1.2.1.2.3	Receptors articulars	6
1.2.2	Organització de la informació motora	7
1.2.2.1	Les motoneurons inferiors.....	7
1.2.2.1.1	Motoneurons alfa	7
1.2.2.1.2	Motoneurons gamma	7
1.2.2.2	Les Interneurons	8
1.2.2.3	El control dels músculs	9
1.2.2.3.1	Unitat motora.....	9
1.2.2.3.2	Classificació de les unitats motores.....	9
1.2.2.3.3	Regulació de la força muscular.	10
1.1.1.1.1.1	Reclutament d'unitats motores i el principi del tamany.....	10
1.1.1.1.1.2	Freqüència de potencials d'acció	10
1.2.3	Circuits locals de la medul·la espinal	11
1.2.3.1	Reflex miotàtic.	11
1.2.3.1.1	Component dinàmic	11
1.2.3.1.2	Component estàtic	11
1.2.3.1.3	Control de la intensitat de les respostes per les motoneurons gamma. ...	11
1.2.	Control de la funció motora pel tronc encefàlic.	13
1.2.4	La via rubroespinal	13
1.2.5	La formació reticular	13
1.2.5.1	Antagonisme excitador-inhibidor entre els nuclis reticulars.....	13
1.2.6	La via tectoespinal	14
1.2.7	La via vestibuloespinal	14
1.2.7.1	Nucli vestibuloespinal medial	14
1.2.7.2	Nucli vestibuloespinal lateral.....	15

1.3	Modulació de l'activitat de les motoneurons superiors.....	16
1.3.1	Els ganglis de la base.....	16
1.3.2	El cerebel	17
1.4	Organització del còrtex motor.....	18
1.4.1	Organització motora	18
1.4.1.1	El còrtex motor primari	18
1.4.1.1.1	Característiques de les motoneurons superiors	19
1.4.1.2	Còrtex motor secundari.....	21
1.4.1.2.1	Àrea premotora	21
1.4.1.3	Vies motors descendents.....	22
1.4.1.3.1	La Via piramidal	22
1.4.1.3.2	Via corticobulbar	22
1.4.2	Organització del còrtex sensorial	23
1.4.2.1	El cortex somatosensorial primari.....	23
1.4.2.2	El cortex somatosensorial secundari	23
1.4.2.3	Vies somatosensorials: Sistema columna dorsal-lemnisc medial	24
1.4.2.3.1	Neurones de primer ordre.....	24
1.4.2.3.2	Neurones de segon ordre	24
1.4.2.3.3	Neurones de tercer ordre.....	24
1.4.2.4	Vies somatosensorials: la informació propioceptiva	25
1.4.2.4.1	La informació propioceptiva en les extremitats superiors	25
2	PRINCIPIS D'APRENTATGE MOTOR I MEMÒRIA IMPLÍCITA.....	26
2.1	Aprentatge motor.....	26
2.2	El paradigma reticular de la memòria	26
2.3	La memòria implícita	27
2.4	Aprentatge implícit i el Serial Reaction Time Task.....	28
3	REORGANITZACIÓ I REGENERACIÓ DEL SISTEMA NERVIÓS CENTRAL DESPRÉS D'UNA LESIÓ	30
3.1	Regeneració del sistema nerviós central	30
3.2	Reorganització funcional sense reparació. La neuroplasticitat	30
3.3	Neuroplasticitat després d'un dany cerebral	31
4	EL SÍNDROME DE LA MOTONEURONA SUPERIOR.....	32
4.1	Síndrome de la motoneurona superior associats al moviment.....	32
4.1.1	Distonia espàstica	32
4.1.2	Co-contracció agonista-antagonista i reaccions associades.....	33
4.2	Síndrome de la motoneurona superior associats al repòs	33
4.2.1	Espasmes musculars	33

4.2.2	El signe de Babinsky	33
4.2.3	Clonus	33
4.2.4	L'espasticitat	34
5	FISIOPATOLOGIA DE L'ESPASTICITAT	35
5.1	Components neurològics de l'espasticitat	35
5.1.1	Afectacions a nivell cortical	35
5.1.2	Afectació a nivell de les vies descendents.....	36
5.1.3	Afectació a nivell del tronc encefàlic	36
5.1.3.1	Vies excitatòries	37
5.1.3.2	Vies inhibidores	37
5.1.4	Alteracions a nivell medul·lar.	38
5.1.4.1	Alteracions a nivell de les motoneurons espinals	38
5.1.4.2	Alteracions a nivell del receptor; el fus muscular	38
5.1.4.3	Alteracions a nivell de les aferències del fus muscular (Ia)	38
5.1.4.4	Alteracions a nivell de interneurons	39
5.1.4.4.1	Inhibició presinàptica	39
5.1.4.4.2	Inhibició recíproca.....	39
5.1.4.4.3	Inhibició recurrent	39
5.1.4.4.4	Inhibició autogènica	40
5.2	Components biomecànics de l'espasticitat	40
5.2.1	Alteracions de les propietats dels músculs	40
5.3	Avaluació de l'espasticitat.....	41
5.3.1	Escala modificada d'Ashworth	41
6	VIBRACIÓ.....	42
6.1	Concepte de vibració	42
6.2	Mecanisme d'acció de la vibració.....	43
6.2.1	A nivell dels receptors corporals	43
6.2.2	A nivell espinal.....	43
6.2.2.1	El reflex tònic vibratori	43
6.2.3	A nivell cortical.....	43
6.2.3.1	Il·lusions de moviment	44
6.3	L'ús de la vibració en la rehabilitació de la extremitat superior.	44
6.3.1	Lloc d'aplicació	44
6.3.1.1	A nivell tendinós	45
6.3.1.2	A nivell muscular	45
6.3.1.3	Combinant a nivell muscular i tendinós	45
6.3.2	Factors de variabilitat en la teràpia vibratòria	46

6.3.3	Efectes adversos	46
BIBLIOGRAFIA.....		47
7	JUSTIFICACIÓ	50
8	PROTOCOL DE L'ESTUDI.....	52
8.1	OBJECTIUS.....	52
8.1.1	Objectiu principal	52
8.1.2	Objectius secundaris	52
8.2	Hipòtesis	52
8.2.1.1	Hipòtesis alternativa (Ha)	52
8.2.1.2	Hipòtesis nul·la (Ho).....	52
8.3	Materials i mètodes.....	53
8.3.1	Disseny de l'estudi.....	53
8.3.2	Participants	54
8.3.3	Aleatorització	54
8.3.4	Emmascarament	54
8.3.5	Intervenció	55
8.3.5.1	Procediment	56
8.3.5.2	Vibració	57
8.3.5.3	Tasca prepositiva	57
8.3.6	Anàlisi i mesures	59
8.3.6.1	Homogeneïtat entre grups	59
8.3.6.2	Mètodes estadístics.....	59
8.3.7	Criteris ètics	60
8.4	Discussió	61
9	ANNEXOS	62
9.1	Fugl-Meyer	62

1 EL CONTROL MOTOR

La capacitat del sistema motor en desenvolupar moviments hàbils ve determinada per la organització del còrtex motor, el còrtex sensoriu, els ganglis basals, el cerebel, les vies motores descendents, la medul·la espinal i la connexió neuromuscular. (1,2)

1.1 Control de la funció motora per la medul·la espinal

La gran majoria de les senyals sensibles accedeixen a la medul·la espinal per les arrels posteriors. Un cop dins, poden dirigir-se: 1) a la medul·la espinal on es portarà a terme els reflexes, i 2) als centres superiors del sistema nerviós; el tronc del cervell o el còrtex cerebral.(1)

1.1.1 Organització de la medul·la espinal

La medul·la espinal està organitzada a partir de la substància gris i la substància blanca. La substància gris és el centre d'integració de la medul·la espinal i és on es generen els reflexes. Presenta una distribució somatotòpica de diferents grups de motoneurons (nuclis motors) que s'encarreguen d'innervar un múscul determinat, tant al llarg de la medul·la espinal (distribució columnar) com en la seva organització lateral. Mentre que els grups de motoneurons que innerven la musculatura axial es localitzen a nivell medial, els que innerven les porcions distals de les extremitats es localitzen a nivell lateral. La substància blanca està composta per fibres nervioses i es localitza a la perifèria de la medul·la espinal. Presenta una distribució en tres columnes; anterior, posterior i lateral.

1.2 Organització de la informació sensitiva

La informació somatosensorial es transmet des de la perifèria del cos, a través dels receptors corporals, fins al sistema nerviós central. Les neurones sensibles són de tipus pseudounipolars. La morfologia d'aquestes neurones permet que la informació sensitiva no sempre tingui que dirigir-se als centres superiors, permetent d'aquesta manera, els reflexes. (1,2)

Les característiques estructurals, el diàmetre axonal i el grau de mielinització de les neurones sensibles, vindrà determinat pel tipus d'informació que transporten. La funció principal de la mielinització és la d'establir un aïllament elèctric dels axons. Degut a la conducció saltatòria, a través dels nòduls de Ranvier, es produeix un augment en la velocitat de conducció nerviosa. Per tant, els axons són capaços de transmetre la informació més ràpidament. En funció d'aquestes característiques, la informació viatja a través de diferents tipus de fibres. La informació propioceptiva, de tacte i pressió fi es transmet per fibres aferents Ia, la informació pertanyent al tacte es propaguen per fibres aferents A δ i la informació de dolor i temperatura es transmet per fibres aferents C i A γ . (1,2)

1.2.1.1 Mecanoreceptors especialitzats en la informació tàctil receptiva.

1.2.1.1.1 Aferències de Merkel

Les aferències de Merkel són fibres d'adaptació lenta amb un camp de recepció petit i representen el 25% de les aferències mecanoreceptives de la mà. Per tant, presenten una discriminació espacial molt alta. Majoritàriament es troben localitzades a l'epidermis dels dits i són les més adequades per processar informació sobre la forma i la textura.

1.2.1.1.2 Aferències de Meissner

Les aferències de Meissner són fibres d'adaptació ràpida amb un camp de recepció petit i representen el 40% de les aferències mecanoreceptives de la mà. A causa de la seva proximitat amb la superfície cutània, les aferències de Meissner són 4 vegades més sensibles a la deformació que les aferències de Merkel. No obstant, com que té uns camps receptius molt més grans presenten una resolució espacial reduïda. Els corpuscles de Meissner són eficients en la transducció de la informació vibratòria de baixa freqüència (3-40Hz) i la informació que propaguen és la responsable de detectar el lliscament establert entre la pell i un objecte que s'estigui subjectant amb la mà. Per tant, proporciona informació essencial de retroalimentació per afavorir un control eficient de la prensió.

1.2.1.1.3 Aferències de Paccini

Les aferències de Paccini són fibres d'adaptació ràpida amb un camp de recepció gran i representen el 10-15% de les aferències mecanoreceptives de la mà. Solen localitzar-se en les capes més profundes de la dermis o del teixit subcutani. Les seves propietats permeten detectar vibracions transmeses a través d'objectes que es posen en contacte o que s'agafen amb la mà. Per tant, tenen molta importància en l'ús hàbil de les eines.

1.2.1.1.4 Aferències de Ruffini

Les aferències de Ruffini són fibres d'adaptació lenta amb un camp receptiu gran i representen el 20% de les aferències mecanoreceptives de la mà. Solen localitzar-se en capes profundes de la pell, en lligaments i tendons. El seu eix principal està orientat paral·lelament a les fibres o a les línies d'estirament de la pell. Per tant, són molt sensibles als estiraments cutanis o de les extremitats. La informació proporcionada pels receptors de Ruffini, conjuntament amb els receptors musculars, contribueix a proporcionar una representació exacta de la posició de la mà.

1.2.1.2 Mecanoreceptors especialitzats en la propiocepció

Un bon funcionament muscular no solament depèn del grau d'excitació muscular proporcionat per les motoneurons anteriors sinó que també requereix d'un sistema de retroalimentació permanent. La informació sensitiva procedent dels receptors musculars és la que permet saber l'estat funcional de les extremitats en cada moment.

1.2.1.2.1 El fus neuromuscular

Estructura

El fus muscular es localitza en la gran majoria dels músculs esquelètics. Està constituït per 8-10 fibres musculars intrafusals rodejades per teixit connectiu, paral·lelament al múscul esquelètic i entre fibres esquelètiques. Mentre que els seus extrems tenen capacitat contràctil, la seva part central, que és la porció sensitiva, no és capaç de contraure's.

La capacitat contràctil del fus muscular està regulada per les motoneurons gamma. Els canvis de tensió intrafusals, malgrat que no aportin força apreciable a la contracció muscular, tenen un impacte sobre la sensibilitat de les aferències fusals respecte els canvis de longitud muscular.

Innervació sensitiva del fus muscular

Terminacions primàries (Ia)

Les terminacions primàries (Ia) presenten axons sensitius de gran diàmetre i es localitzen enroscats a la porció central de cada fibra intrafusar (Terminacions primàries autoespiralades). Proporcionen respostes d'adaptació ràpida als canvis de longitud muscular (informació sobre la dinàmica de les extremitats; velocitat i direcció del moviment).

Terminacions secundàries (II)

Les terminacions secundàries (II) presenten axons amb característiques molt similars a les terminacions primàries i solen anomenar-se: “en ram de flors”. Presenten característiques d’adaptació lenta i produeixen respostes mantingudes a longituds musculars constants (Solen proporcionar informació sobre la posició estàtica).

Estimulació del fus muscular

1. L’allargament muscular provoca un estirament de la part intermitja del fus que provoca l’estimulació del receptor.
2. La contracció de les porcions finals de les fibres intrafusals generen un estirament de la porció central del fus i, conseqüentment, l’estimulen.

Respostes de les terminacions en funció de la longitud del receptor.

Resposta dinàmica.

La resposta dinàmica ve determinada per les terminacions primàries (Ia). Un canvi brusc de longitud del fus a nivell de les terminacions primàries genera un estímul potent que perdura durant el moviment. No obstant, un cop s’atura i el múscul comença a escurçar-se, la freqüència dels potencials d’acció disminueix considerablement. Per tant, les terminacions primàries envien constantment senyals, positives o negatives, per comunicar qualsevol canvi que s’esdevingui a nivell del fus muscular. Mentre els estiraments incrementen la seva activitat, els escurçaments la disminueixen.

Resposta estàtica

La resposta estàtica ve determinada per les fibres secundàries (II). Durant un estirament mantingut del fus muscular, el número d'impulsos transmesos per les terminacions primàries i secundàries és proporcional al grau d'elongació muscular i perduren durant uns minuts. Per tant, durant un estirament mantingut les diferents terminacions envien impulsos nerviosos.

1.2.1.2.2 Òrgan tendinós de Golgi

L'òrgan tendinós de Golgi és l'encarregat d'informar al sistema nerviós central dels canvis de tensió muscular i està format per les aferències del grup Ib. Aquestes estan distribuïdes paral·lelament entre les fibres de col·lagen dels tendons.

1.2.1.2.3 Receptors articulars

Els Receptors articulars tenen poca contribució en la propiocepció de les extremitats. No obstant, són importants per la percepció posicional dels dits de la mà.

1.2.2 Organització de la informació motora

Les motoneurons inferiors són la via final comuna per transmetre la informació neural al múscul esquelètic i s'originen a la medulla espinal i al tronc encefàlic. El conjunt de motoneurons que innerva un mateix múscul es conegut com a “pool de motoneurons”.

1.2.2.1 Les motoneurons inferiors

1.2.2.1.1 Motoneurons alfa

Les Motoneurons alfa són fibres motores grans que s'encarreguen d'innervar les fibres extrafusals del múscul esquelètic a través dels nervis o dels nervis cranials. La seva funció és generar la força necessària per mantenir la postura i realitzar el moviment. (1,2)

- **Mn alfa petites** solen constituir les unitats motores S. Per tant, tenen un comportament tònic i solen encarregar-se d'innervar fibres musculars del tipus I.
- **Mn alpha intermitjes** solen constituir les unitats motores FR. Tenen un comportament tònic i solen innervar fibres musculars IIa.
- **Mn alfa grans** solen constituir les unitats motores FF. Tenen un comportament fàsic i solen innervar fibres musculars IIb.

1.2.2.1.2 Motoneurons gamma

Les motoneurons gamma són fibres motores més petites que s'encarreguen d'innervar les fibres intrafusals del múscul esquelètic a través dels nervis o dels nervis cranials. La seva funció és mantenir una longitud adequada de les fibres intrafusals.

Gamma dinàmics

Les fibres gamma dinàmiques estableixen connexió amb les fibres de la bossa nuclear del fus muscular i ajuden a potenciar la resposta dinàmica. Per tant, davant d'un estímul generen respostes intenses i fàsiques.

Gamma estàtics

Les fibres gamma estàtiques estableixen connexió amb les fibres de la cadena nuclear del fus muscular i potencien la resposta estàtica. Per tant, davant d'un estímul provoquen respostes més dèbils i tòniques.

1.2.2.2 Les Interneurones

Les interneurones es localitzen a totes les regions de la substància de la medul·la espinal (anterior, posterior i la zona intermitja). Són neurones molt petites que presenten un alt grau d'excitabilitat. En part, presenten múltiples interconnexions, entre les quals poden establir contacte directe amb les motoneurones anteriors. La seva funció és primordial en la integració de la informació sensomotora de la medul·la espinal.

Interneurones inhibidores Ia són les responsables de produir la inhibició recíproca a partir de la integració de la informació procedent del fus muscular, receptors sensitius o estímuls corticoespinal. La seva funció és facilitar el moviment.

Interneurones inhibidores II són les responsables de diverses respostes reflexes a partir de la informació procedent del fus muscular i de les vies reticuloespinals.

Les interneurones inhibidores Ib són les responsables de produir la inhibició autogènica a partir de la integració de la informació procedents de receptors cutanis, articulars o de Golgi. La seva funció és frenar el moviment.

Interneurones d'inhibició pre-sinàptica són les responsables de mantenir un control inhibitori a nivell dels diversos circuits reflexes espinals. La seva activitat està regulada per vies corticals descendents.

Interneurones de Renshaw reben connexions col·laterals de motoneurones i neurones sensibles. Aquestes són cèl·lules inhibidores que transmeten la informació d'aquest tipus a motoneurones adjacents. Per tant, l'estimulació de motoneurones tendeix a inhibir motoneurones contigües mitjançant la inhibició lateral. La seva funció és afinar el moviment.

1.2.2.3 El control dels músculs

Les sinapsis que s'estableixen entre les neurones motores inferiors de la medulla espinal i del tronc encefàlic amb els músculs permeten el control dels moviments.

1.2.2.3.1 Unitat motora

Els axons de les motoneurones es ramifiquen en l'interior dels músculs per sinaptar amb les fibres musculars. El total de fibres musculars innervades per un axó rep el nom d'unitat motora. Cada motoneurona és capaç d'establir un rang ampli d'unions neuromusculars amb les fibres musculars que pot variar de 3 a 2000 fibres musculars. Les unitats motores són la unitat bàsica funcional i la seva capacitat funcional determina el total de fibres amb les que connecta.

1.2.2.3.2 Classificació de les unitats motores

Les **unitats motores de contracció lenta (S)** connecten amb poques fibres musculars i solen caracteritzar-se per innervar fibres vermelles. Provoquen forces relativament petites i seran resistents a la fatiga. Per tant, proporcionen tensió.

Les **unitats motores de contracció ràpida (FR)** innerven un gran nombre de fibres musculars i solen caracteritzar-se per innervar fibres musculars blanques.

Permeten generar forces musculars més elevades tot i que no són resistents a la fatiga. Proporcionen la força necessària per caminar i córrer.

Les **unitats motores de contracció intermitja (FF)** solen generar el doble de força que una unitat motora lenta i són substancialment resistents a la fatiga. Permeten realitzar tasques més exigent com el salt. (1,2)

1.2.2.3.3 Regulació de la força muscular.

La força realitzada per un múscul està determinada per la quantitat d'unitats motores activades. L'activació d'aquestes motoneurons vindrà determinada per diversos mecanismes.

1.1.1.1.1.1. Reclutament d'unitats motores i el principi del tamany

El reclutament de les motoneurons inferiors s'esdevé amb un ordre fix. Per tant, es produeix una graduació progressiva de la força muscular. Les estimulacions sinàptiques primerament estimulen les unitats motores més petites. És a dir, les que presenten un llindar d'estimulació més baix.

1.1.1.1.1.2. Freqüència de potencials d'acció

L'increment de la força es produeix amb un augment de la freqüència de potencials d'acció que reflexa la suma de contraccions musculars successives. Les fibres musculars s'activen pel següent potencial d'acció abans que puguin relaxar-se per complet. No obstant, altes freqüències d'estimulació augmenten la quantitat de força augmentada fins a un límit; el tètanus fusionat. En aquesta situació, la tensió produïda per les unitats motores individuals, no presenten ni pics ni descensos.

1.2.3 Circuits locals de la medul·la espinal

Els circuits locals de la medul·la espinal estan constituïts pels reflexes. Un reflex és una resposta automàtica, no planificada i estereotipada que sorgeix com a resposta a un estímul sensitiu determinat.(3)

1.2.3.1 Reflex miotàtic.

El reflex miotàtic està constituït per la contracció del múscul agonista en resposta a un estirament muscular, mentre que paral·lelament es produeix la inhibició de la musculatura antagonista.

1.2.3.1.1 Component dinàmic

Durant un estirament muscular, el del fus provoca la contracció reflexa del múscul agonista a l'estirament i la inhibició del múscul antagonista. És un mecanisme de defensa del múscul davant d'un estirament excessiu i permet regular la longitud muscular durant el moviment.

1.2.3.1.2 Component estàtic

La resposta dinàmica desapareix segons després de l'estirament muscular. En aquest moment s'activa la resposta estàtica, de caràcter més dèbil, creant un grau de contracció muscular mantingut en el temps. És un mecanisme que permet mantenir el to i la longitud muscular adient.

1.2.3.1.3 Control de la intensitat de les respostes per les motoneurons gamma.

La funció del sistema gamma col·labora en la realització del moviment i el control del to muscular.

Coactivació de les motoneurones alfa i gamma

L'activació de les motoneurones alfa i gamma permet que s'estableixi un correcte funcionament del fus muscular. És a dir, que aquest proporcioni informació permanent a nivell del sistema nerviós central en les diferents longituds musculars que un múscul es pugui trobar durant la realització d'un moviment. Per tant, regula el nivell de repòs de les fibres aferents (Ia) i estableix el grau d'activitat de les motoneurones alfa en absència d'estirament muscular (en posicions d'escurçament). Les motoneurones gamma ens permeten regular el grau d'excitabilitat muscular a partir de les fibres intrafusals.

La seva funció és evitar una variació de la longitud de la porció receptora del fus muscular durant la realització d'una contracció muscular completa. Per tant, la coactivació impedeix que el reflex miotàtic muscular s'oposi a la contracció muscular.

1.2. Control de la funció motora pel tronc encefàlic.

Els nuclis del tronc encefàlic són els encarregats de realitzar moviments automàtics i apresos, entre els quals s'inclou la regulació de la postura i la orientació de la mirada, a partir de la utilització de la musculatura axial i de les parts proximals de les extremitats.(1,4)

1.2.4 La via rubroespinal

Nucli vermell està molt relacionat amb la via corticoespinal i rep un gran nombre de fibres procedents del còrtex motor. La via rubroespinal creua al costat oposat en la part inferior del tronc encefàlic i, conjuntament amb la via piramidal descendeix per les columnes laterals de la medul·la espinal i estableix contacte directe sobre les motoneurons anteriors o sobre neurones de circuit local.

Malgrat que el nucli vermell és un camí accessori per a la transmissió de la senyal procedent del còrtex motor cap a la medul·la espinal, la seva existència i comportament en el control motor dels éssers humans encara no és del tot clara.

1.2.5 La formació reticular

La formació reticular és un conjunt de circuits neuronals. Entre les múltiples funcions que exerceix, permet regular el grau d'activitat reflexa del tronc i de les parts proximals de les extremitats.

1.2.5.1 *Antagonisme excitador-inhibidor entre els nuclis reticulars.*

Els nuclis reticulars constitueixen un sistema d'equilibri entre elements excitadors i inhibitoris que està principalment influenciat pel còrtex motor i ens permet regular el grau de contracció muscular en funció de la tasca a realitzar.

Nuclis reticular pontinus reben aferències dels nuclis vestibulars i dels nuclis profunds del cerebel. Aquests presenten un alt grau d'excitabilitat i transmeten les senyals excitadores en sentit descendent a la medul·la espinal a través del fascicle reticuloespinal pontinu situat a la columna anterior fins a les

motoneurons anteriors que activaran els músculs axials antiogravitatòris que corresponen a la columna vertebral i als extensors de les extremitats.

Nucli reticular bulbar, rep aferències del fascicle coreticoespinal, rubroespinal, i altres vies motores. Aquest és l'encarregat de transmetre senyals inhibidores a les motoneurons anteriors a través del fascicle reticuloespinal bulbar a nivell de la columna lateral de la medulla espinal. La seva activació, de caràcter inhibidora, permet contrarestar l'activitat excitadora de la regió pontina. L'equilibri d'aquests dos sistemes permet que en condicions normals la musculatura del cos tingui un grau de tensió normal.

1.2.6 La via tectoespinal

La via tectoespinal s'origina en el colicle superior del mesencèfal i s'encarrega de sincronitzar els moviments generats amb el coll en consonància amb els ulls.

1.2.7 La via vestibuloespinal

Nuclis vestibulars reben informació procedent del VIII par cranial, dels conductes semicirculars i dels otòlits. Actuen en consonància amb els nuclis reticulars pontins per controlar la musculatura antigravitatòria. La principal funció d'aquests nuclis és controlar selectivament l'equilibri com a resposta a les senyals procedents de l'aparell vestibular.

1.2.7.1 Nucli vestibuloespinal medial

El nucli vestibuloespinal medial transmet la informació pel tracte vestibuloespinal medial i s'encarrega de regular la posició del cap en funció de les acceleracions rotacionals del cap.

1.2.7.2 Nucli vestibuloespinal lateral

El nucli vestibuloespinal lateral transmet la informació pel tracte vestibuloespinal lateral i s'encarrega de l'activació de la musculatura antigravitatòria quan es produeixen desequilibris de la postura.

1.3 Modulació de l'activitat de les motoneurons superiors

1.3.1 Els ganglis de la base

Els ganglis de la base són un conjunt de nuclis del prosencèfal que contribueixen en el control motor ajustant la força a realitzar en cada moviment.

Els ganglis de la base modulen el moviment d'origen cortical mitjançant dos vies, una directa i una indirecta. Les vies convergeixen en la part interna del globus pàl·lid (GPi), al mateix temps, aquest projecta al tàlem i aquest al còrtex. La projecció que s'estableix del tàlem al còrtex s'encarrega de modular la força o amplitud del moviment que produeix el còrtex motor. No obstant, aquesta projecció talàmica al còrtex està influenciada pel GPi. Per tant, si l'activitat de la via inhibidora (via directa) dels ganglis de la base és superior a la excitatòria predominarà la inhibició del GPi i el tàlem serà lliure per excitar el còrtex, de tal manera que s'amplificarà el moviment. Al contrari, si l'activitat de la via excitatòria (via indirecta) és superior respecte la inhibidora predominarà la excitació del GPi i s'inhibirà l'activitat del tàlem, i consegüentment la del còrtex produint una disminució de la força dels moviments. (1,2)

1.3.2 El cerebel

El cerebel és una estructura essencial en l'adquisició, el manteniment i la correcció d'una habilitat motora. Aquest es pot dividir anatòmicament en varies regions especialitzades en diferents aspectes del control motor. Un petit lòbul anomenat flòcul s'encarrega del control de l'equilibri i dels moviments oculars. Per altra banda, els hemisferis cerebel·losos són els encarregats de controlar els moviments corporals. Cadascuna de les regions presenta una organització topogràfica on les regions més medials s'hi representa la línia mitja del cos i les zones més laterals les extremitats i els dits. (1,2)

El cerebel desenvolupa un paper durant la sincronització dels moviments. Sembla ser que té una influència en la percepció del temps i dels moviments. Per altra banda, s'encarrega de la precisió dels moviments. Durant la realització d'una acció, al mateix temps que el còrtex envia la informació a través de la medul·la, per executar un moviment, el cerebel rep una còpia d'aquesta acció a través del nucli olivar. Un cop realitzat el moviment, novament el cerebel rep informació procedent del sistema sensorial per tal de codificar el moviment que s'ha realitzat. Per tant, a partir de la informació rebuda és capaç de calcular l'error que s'ha pogut originar entre el que es volia fer i que s'ha fet, i informar al còrtex de com s'ha d'establir la correcció. Finalment, aquesta correcció s'incorporarà en la nova execució del moviment per tal de fer-lo més precís. (1,2)

1.4 Organització del còrtex motor

1.4.1 Organització motora

L'inici dels moviments ve determinat per l'activació de les neurones motores superiors localitzades al lòbul frontal del còrtex. L'àrea prefrontal planifica les conductes complexes. Per tant, s'encarrega de determinar l'objectiu sobre el qual es dirigiran els moviments. L'àrea premotora realitza les seqüències motores complexes i el còrtex motor primari s'encarrega de la execució dels moviments. (1,2)

1.4.1.1 El còrtex motor primari

El còrtex motor primari (M1) es localitza a el solc precentral i forma part de l'àrea 4 segons la classificació de Brodmann. La substància gris del còrtex motor presenta una organització columnar. Les columnes s'organitzen en VI capes en funció de la profunditat, i en cada una d'elles s'hi localitzen diferents grups cel·lulars.

Les àrees cerebrals presenten una organització somatotòpica de la musculatura contralateral del cós. Aquesta organització és coneguda amb el nom d'homuncle de Penfield i es caracteritza perquè en la seva representació cortical s'observa una desproporció de les àrees del còrtex motor en comparació a les del cos real, on les àrees corporals de menys control tenen una representació cortical molt menor en comparació amb les que requereixen una major habilitat. Per altra banda, les representacions corporals a nivell del còrtex presenten diferent distribució que en el cós real.

El mapa motor cortical és dinàmic, flexible i si codifiquen paràmetres de moviments per coordinar múltiples grups musculars amb la finalitat de realitzar moviment útils des del punt de vista conductual. L'estimulació d'àrees del còrtex motor provoca l'activació de varis músculs i conseqüentment permet obtenir un moviment particular. A més, durant estimulacions perllongades s'obtenen moviments ben definits que engloben múltiples articulacions (obtenint moviments de la mà a la boca o moviments de posicionament de la mà en l'espai central).

Per tant, els mapes somatotòpics representen moviments organitzats més que músculs individuals.

1.4.1.1.1 Característiques de les motoneurones superiors

Les neurones motores superiors s'anomenen cèl·lules piramidals i solen localitzar-se a la capa cortical V. Entre elles, es destaquen les cèl·lules de Betz, que són les més grans del sistema nerviós central. Malgrat que representen un percentatge molt petit, desenvolupen un paper molt important en l'activació de les motoneurones inferiors.

La **planificació i iniciació del moviments**. Les motoneurones són capaces de generar potencials d'acció abans de realitzar un moviment. Per tant, no solament tenen la capacitat d'iniciar els moviments, si no també de planificar-los.

La **freqüència de potencials d'acció** de les motoneurones superiors determina la magnitud i la direcció dels moviments.

La magnitud de força que el cós ha de generar, ve determinada per la freqüència de descàrrega de les motoneurones superiors. A més freqüència, més força.

La direcció d'un moviment provoca un augment o disminució de l'activitat de les motoneurones en funció de si s'apropen o es desvien de la seva direcció de preferència. Si una motoneurona genera potencials d'acció màximament quan es realitza un moviment cap anterior també pot abolir la seva activitat quan el moviment es dirigeix en direcció contrària, és a dir, cap endarrere.

La **codificació de la direcció del moviment**. Una motoneurona superior aïllada genera potencials d'acció en múltiples direccions. No obstant, es pot observar una major freqüència de potencials d'acció abans de realitzar un moviment en la direcció de preferència de la pròpia motoneurona. A partir de la combinació simultània de tota l'activitat de la població s'obté un vector poblacional que permet determinar la direcció del moviment.

Els **campes musculars** són el conjunt de músculs que la seva activació es facilitada degut a la influència d'una motoneurona superior. La mida de cada camp muscular varia en funció de la regió muscular.

1.4.1.2 Còrtex motor secundari

1.4.1.2.1 Àrea premotora

L'àrea promotora és un conjunt d'interconnexions multisensitives de diverses àrees cerebrals. La seva influència sobre el control motor pot ser de manera directa, a través de la via corticoespinal o corticobulbar, o de manera indirecta, a través de la seva connectivitat amb el còrtex motor primari. A partir de la informació rebuda d'altres àrees, el còrtex pre-motor s'encarrega de seleccionar els moviments més adequats en funció de l'acció que s'hagi de desenvolupar.

L'àrea premotora lateral s'encarrega de codificar la intenció del moviment. A partir de la interpretació d'esdeveniments externs s'encarrega de seleccionar els moviments més adequats.

Les neurones mirall són un subgrup de neurones que estan agrupades en la porció ventrolateral del cortex premotor. S'encarreguen de preparar l'execució dels moviments i de l'aprenentatge per imitació.

L'àrea de broca, localitzada en l'hemisferi esquerre; àrees 44 i 45 de Brodmann, és l'àrea encarregada de l'expressió, és a dir, de la producció de les paraules.

L'àrea premotora medial també s'encarrega de la selecció dels moviments. No obstant, està més especialitzada en iniciar moviments a partir de la codificació de senyals internes (moviments autoiniciats).

1.4.1.3 Vies motors descendents

Els axons de les motoneurons superiors descendeixen del còrtex i les vies difereixen entre si en funció de si es dirigeixen al tronc encefàlic o a la medul·la espinal.

1.4.1.3.1 La Via piramidal

La via piramidal és la més important per a la motricitat voluntària. S'origina a la capa V del còrtex pre-motor, el còrtex motor i el còrtex sensorial. Des del seu inici, podem diferenciar-ne dos porcions que descendeixen en una via en comú pròxima per la capsula interna i difereixen en el seu recorregut, en funció de la seva destinació. Les fibres corticoespinals descendeixen fins les motoneurons anteriors o les neurones de circuit local de la medul·la espinal.

En el tracte corticoespinal lateral el 80% de fibres de la via piramidal decusen al costat oposat a nivell de les piràmides del bulb raquidi. Aquestes descendeixen pels cordons laterals de la medul·la espinal fins les motoneurons inferiors i neurones de circuit local. Aquesta via està destinada als moviment dels músculs de les extremitats i dels dits.

En el tracte corticoespinal anterior el 20% dels axons que descendeixen ipsilateralment pels cordons anteriors de la medul·la espinal i decusen al mateix nivell on sinapten amb les motoneurons inferiors. La gran majoria d'aquestes motoneurons establiran contacte amb neurones de circuit local que coordinen les activitats de les motoneurons inferiors. Aquesta via està destinada al moviment dels músculs de la línia mitja del cos.

1.4.1.3.2 Via corticobulbar

La via corticobulbar descendeix fins als tronc encefàlic per establir contacte amb diversos nuclis continguts en aquella zona, entre els quals hi han els nervis cranials i la formació reticular, entre d'altres. (1,2)

1.4.2 Organització del còrtex sensorial

1.4.2.1 *El cortex somatosensorial primari*

El còrtex somatosensorial primari (S1) és la principal àrea de processament de la informació sensitiva del cos i està localitzada en el gir postcentral del lòbul parietal. Presenta una organització somatotòpica on la representació espacial de cada regió corporal està determinada en funció de la densitat de receptors.

El còrtex S1 envia projeccions a nivells de diverses àrees, però sobretot a nivell de les àrees motores i premotores. Les projeccions del còrtex parietal amb el còrtex motor són de gran importància per integrar la informació sensitivomotora. Per exemple, mitjançant la informació procedent de les vies propioceptives, s'encarrega de senyalar l'estat actual d'activitat de les contraccions musculars que inicien els moviments voluntaris.

1.4.2.2 *El cortex somatosensorial secundari*

El cortex somatosensorial secundari (SII) està situat en el marge superior del solc lateral. Aquest rep projeccions convergents de l'àrea S1 i envia projeccions a nivell de les estructures límbiques, com l'amígdala i l'hipocamp. Aquestes solen tenir un paper molt important en l'aprenentatge i la memòria tàctil. Per altra banda, l'àrea somatosensiva secundària, és l'encarregada de porta a terme la integració de la informació visual. Per tant, ens permet realitzar els moviments més adequats en funció dels nostres objectius.

1.4.2.3 Vies somatosensorials: Sistema columna dorsal-lemnisc medial

1.4.2.3.1 Neurones de primer ordre

Les neurones de primer ordre són prolongacions axòniques molt llargues que s'originen les extremitats i els seus cossos cel·lulars es localitzen als ganglis de les arrels dorsals i dels nervis cranials. S'encarreguen de transmetre els impulsos nerviosos procedents dels receptors sensitius en direcció a la medul·la espinal (a través de nervis espinals) o al tronc encefàlic (a través dels nervis cranials). Dins la medul·la espinal ascendeixen homolateralment a través de les columnes dorsals (cordons posteriors) fins a la part inferior del bulb raquidi. La informació respecte el tacte epicrític i la propiocepció conscient procedent de les extremitats inferiors anirà al nucli gràcil, mentre que la procedent de les extremitats superiors, del coll i del tronc anirà al nucli cuneïforme.

1.4.2.3.2 Neurones de segon ordre

Les neurones de segon ordre en els nuclis de les columnes dorsals envien la seva informació al tàlem. Els axons que surten dels seus nuclis s'anomenen fibres arciformes internes. Aquestes creuen la línia mitja i originen el tracte del lemnisc medial. Els axons del lemnisc medial faran sinapsis amb les neurones talàmiques localitzades en el nucli ventral posterolateral.

1.4.2.3.3 Neurones de tercer ordre

Les neurones de tercer ordre es localitzen en el nucli ventral posterolateral del tàlem envien els seus axons a través de la càpsula interna fins al gir postcentral (SI) i al solc lateral (SII).

1.4.2.4 Vies somatosensorials: la informació propioceptiva

La informació propioceptiva accedeix a la medul·la espinal a través de les arrels dorsals i comparteixen gran part del trajecte amb les vies de la informació cutània.

En la medul·la espinal les fibres propioceptives es bifurquen en fibres ascendents i descendents, les quals, també estableixen connexions a diferents segments medul·lars. D'aquesta manera, permeten la regulació reflexa del control motor i en la percepció. La informació propioceptiva és important, no per la capacitat de percepció de la posició de les nostres extremitats, sinó per les funcions del cerebel.

1.4.2.4.1 La informació propioceptiva en les extremitats superiors

Les neurones de primer ordre de les extremitats superiors tenen un recorregut similar a les vies dels mecanoreceptors cutanis. Entren a la medul·la espinal i ascendeixen homolateralment a través de la columna dorsal (fascicle cuneïforme) fins al bulb raquidi, on establiran connexió amb els nuclis de les columnes dorsals.

Les neurones de segon ordre envien decusen i s'uneixen al lemnisc medial. Finalment ascendeixen fins al nucli ventral posterolateral del tàlem.

2 PRINCIPIS D'APRENTATGE MOTOR I MEMÒRIA IMPLÍCITA

2.1 Aprentatge motor

L'aprenentatge motor fa referència al procés de com s'adquireix o es modifica el moviment en resposta a una experiència. Sol definir-se com: “un conjunt de processos associats a la pràctica o a la experiència que implica canvis relativament permanents en la capacitat de produir una acció permanent”.(5,6)

Durant un procés d'aprenentatge primerament es produeix l'activació de connexions silents i un reforçament de connexions prèviament establertes. Finalment, a conseqüència d'aquest reforçament, s'estableix la formació de noves connexions.(6)

Les experiències permeten modificar els circuits neuronals existents establint canvis en les dendrites, tant a nivell de les connexions com en la seva morfologia que, conseqüentment, repercutiran en la organització sinàptica. La modificació dels circuits neuronals que s'esdevenen són canvis locals dins d'una determinada regió i poden establir-se entre neurones prèviament connectades o amb noves neurones.(2)

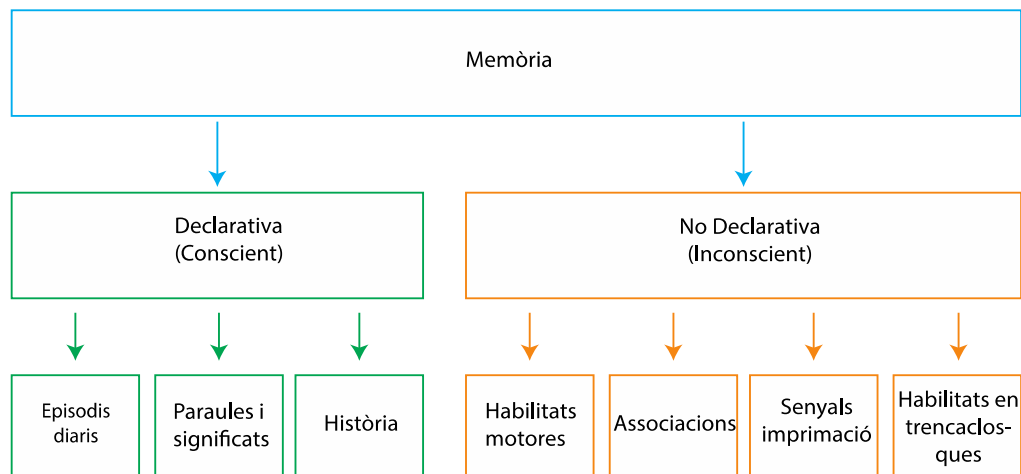
2.2 El paradigma reticular de la memòria

Al llarg dels anys fins l'actualitat s'ha modificat el paradigma de com la memòria s'emmagatzema en el còrtex cerebral. Inicialment es contempla que la memòria s'emmagatzema de manera modular on cada regió cerebral s'encarrega d'una determinada tipologia d'informació. No obstant, el model actual planteja que la memòria es un conjunt de reds neuronals interconnectades entre elles mateixes. L'element en comú entre aquestes reds neuronals és el “cògnito”. El “cògnito” fa referència a una unitat de coneixement localitzada en el cortex cerebral i es el punt d'interconnexió de les diferents reds neuronals que estan relacionades amb aquell fet, acció o esdeveniment.(7)

2.3 La memòria implícita

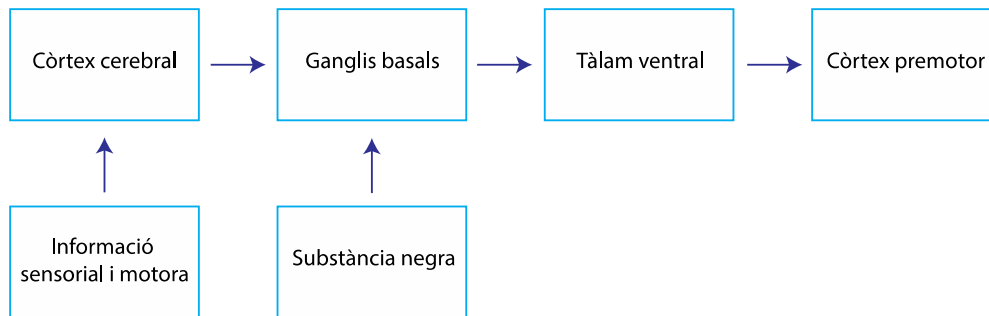
La memòria és la capacitat de recordar o reconèixer una experiència prèvia. Qualitativament es distingeixen dos tipus de memòria, la memòria explícita o declarativa i la memòria implícita o no declarativa. La memòria declarativa s'encarrega d'emmagatzemar "material conscient", el que pot expressar-se amb el llenguatge. Per altra banda, la memòria no declarativa no està disponible per a la consciència. Fa referència a les habilitats i associacions que s'adquireixen i es recuperen a un nivell inconscient.(1,2)

Fig 3. Principals categories qualitatives de la memòria



La principal diferència entre els dos tipus de memòria són els circuits neurals involucrats en cada una d'elles. Mentre que la regió involucrada en la memòria explícita és l'hipocamp, la regió cerebral involucrada en la memòria implícita són els ganglis de la base. La connexió que s'estableix entre els ganglis de la base i el còrtex és de manera unidireccional. Per tant, el còrtex rep de manera indirecta l'activitat procedent dels ganglis de la base. Aquest fet determina el caràcter inconscient de la memòria implícita (Fig 3).

Fig 3. Circuit neuronal de la memòria implícita



2.4 Aprenentatge implícit i el Serial Reaction Time Task

Les tasques de temps de reacció en sèrie conegudes amb el nom de “Serial Reaction Time Task” (SRTT) són testos que inicialment s'utilitzaven en animals per l'estudi de l'atenció.(8) Actualment, també s'utilitzen en l'obtenció d'estratègies, tant d'aprenentatge implícit com d'aprenentatge explícit.(9)

El funcionament del SRTT és el següent: en una pantalla d'ordinador, es presenten diversos estímuls visuals on els subjectes han de respondre'ls mitjançant un dispositiu extern; un teclat o una palanca. Les tasques, organitzades en blocs, contenen un determinat nombre d'estímuls visuals i els subjectes han de respondre el més ràpidament possible. Inicialment, es presenten els estímuls en ordre aleatori. En aquesta fase, on s'incentiva un procés d'aprenentatge implícit, es produeix una activació massiva de diverses àrees corticals del hemisferi contralateral de la musculatura implicada en la tasca. En els blocs següents, es presenten els estímuls en ordre semialetori i amb una seqüència fixa. En aquesta fase, quan els subjectes es donen compte que l'aparició dels estímuls visuals és de caràcter seqüencial es produeix un procés d'aprenentatge explícit. En aquest moment, disminueix el grau d'activitat cortical cedint l'execució de la tasca als ganglis de la base. Per tant, durant el procés d'aprenentatge explícit es produeix una modulació de les connexions entre les estructures corticals i subcorticals per automatitzar els gestos de la tasca. Conseqüentment, poden respondre de manera més eficient, a les demandes d'informació explícita, referents a l'ordre d'aparició dels estímuls visuals. La ràpida modulació dels circuits neuronals durant aquest procés

d'aprenentatge es relaciona amb l'ús de connexions prèviament silents. Finalment, aquestes modificacions cerebrals s'observen en el moviment. Quan la tasca es proporciona de manera seqüencial disminueix el temps de realització en comparació a quan la tasca és aleatòria. Fet que permet obtenir una mesura indirecta d'aprenentatge implícit.(9)

Mentre que subjectes sans són capaços de donar-se compte del caràcter repetitiu de la tasca, sense estar informats, els pacients que han sofert un ictus no solen donar-se compte del fet. No obstant, si la tasca es reforça amb una indicació, abans d'iniciar l'activitat, informant que la tasca presenta un ordre seqüencial repetit en algun moment del seu desenvolupament, els subjectes són capaços de trobar la seqüència, i conseqüentment, s'afavoreix el procés d'aprenentatge implícit.(10)

3 REORGANITZACIÓ I REGENERACIÓ DEL SISTEMA NERVIÓS CENTRAL DESPRÉS D'UNA LESIÓ

3.1 Regeneració del sistema nerviós central

La capacitat de regeneració del sistema nerviós central (SNC) és limitada. La dificultat en el procés de regeneració ve determinada per les conseqüències de la lesió local, el dèficit de creixement axonal i la pròpia dificultat del SNC en dividir-se, migrar i diferenciar-se.

A conseqüència directa d'una lesió del teixit encefàlic es genera la lesió primària que es caracteritza per la mort cel·lular necròtica en la regió afectada i, conseqüentment induirà la mort cel·lular secundària. La mort cel·lular secundària modifica l'activitat del gen antiapoptòtic Bcl-2 i, a partir d'aquest moment, es generen respostes cel·lulars d'estrès oxidatiu. S'allibera citocrom c de les mitocòndries al citoplasma i, conseqüentment, es facilita l'activació de la caspasa-3 provocant la fragmentació del DNA, canvis a nivell de la membrana i el citoesquelet, i finalment, la mort cel·lular.

Les respostes cel·lulars i moleculars que es generen després d'una lesió encefàlica inhibeixen el creixement axonal. Tot i que la microglia s'encarrega de degenerar la mielina de la regió afectada i la del seu voltant, la seva acció, conjuntament amb els oligodendròcits i els astròcits, afavoreix la producció de factors inhibitoris de creixement axònic i la formació de la cicatriu glial. La cicatriu glial en si mateix és una barrera física. A més, els components cel·lulars del seu interior, entre ells els oligodendròcits, la glicoproteïna MAG o el NogoA generen un efecte inhibitori en el creixement axonal.

3.2 Reorganització funcional sense reparació. La neuroplasticitat

La neuroplasticitat és un mecanisme intrínsec del cervell i representa la evolució humana del sistema nerviós. Aquesta propietat implica canvis continuats, a diferents nivells cerebrals, que poden donar-se en qualsevol moment de la vida

i que estan imposats per les experiències, les adaptacions i els aprenentatges que s'esdevenen com a conseqüència de la interacció amb l'entorn. No obstant, no sempre aquests mecanismes comporten l'aparició de noves capacitats, sinó que també poden ser causa de disfunció.(11) Quan els canvis plàstics que s'han originat a nivell cortical són els adequats parlem de plasticitat adaptativa, mentre que si els canvis de reclutament neuronal que s'estableixen no són els adequats parlem de plasticitat maladaptativa. Malgrat que la plasticitat és una propietat que es manté al llarg del temps, la seva eficiència disminueix al llarg del anys.(5)

3.3 Neuroplasticitat després d'un dany cerebral

La neuroplasticitat després d'una lesió encefàlica és un mecanisme de resposta cerebral per promoure la recuperació o compensació de la pèrdua de funcionalitat.(11)

Després d'un dany cerebral s'activen diversos mecanismes que actuen paral·lelament per disminuir la fase de "shock" i solucionar les zones de penombra. La inhibició transcallora és un d'aquests mecanismes. Es caracteritza per un augment de l'excitabilitat cerebral de l'hemisferi no afectat per reduir les demandes d'oxigen i glucosa del hemisferi afectat per evitar l'expansió de la lesió. Per tant, en una fase inicial es produeix un desequilibri en l'excitabilitat cortical interhemisfèrica. Aquest mecanisme de recuperació, permetent observar processos de recuperació espontània, en fases inicials, després d'haver sofert un ictus. No obstant, també poden ser l'origen de canvis disfuncionals a llarg plaç.

Un cop estabilitzada la lesió, augmenta l'excitabilitat cortical de l'hemisferi afectat, facilitant els imputs excitatòris descendents, per maximitzar les capacitats de les neurones preservades a partir de processos de re-aprenentatge.(11)

4 EL SÍNDROME DE LA MOTONEURONA SUPERIOR

El síndrome de la motoneurona superior (SMS) fa referència al conjunt de símptomes originats com a conseqüència d'una lesió de les neurones motores superiors en qualsevol punt del seu trajecte. Una lesió de les motoneurons superiors sol cursar una fase d'hipotonia inicial durant la fase de "shock" i és el reflex de la pèrdua d'aferències supraespinals a nivell de la medulla espinal. Després d'unes setmanes, per diversos mecanismes de recuperació, es manifesten un conjunt de signes i símptomes que poden classificar-se en dos grans grups: els fenòmens negatius i els fenòmens positius.(1)

Els síndromes negatius de la motoneurona superior manifesten la pèrdua d'influències supraespinals a nivell de la medulla espinal. Les manifestacions clíniques més comunes cursen amb debilitat, fatigabilitat i la pèrdua de moviments hàbils. Per altra banda, els fenòmens positius solen cursar amb un increment dels reflexes tendinosos amb irradiació, clonus, Babinsky i espasticitat.(12)

4.1 Síndrome de la motoneurona superior associats al moviment

4.1.1 Distonia espàstica

La distonia espàstica és un trastorn del moviment que cursa amb contraccions musculars mantingudes que afecta en la realització del moviment.(12)

Els patrons posturals més comuns en les extremitats superiors i inferior en l'hemiplegia són els següents:

- El patró postural més comú en l'hemiplegia de la extremitat superior es caracteritza per la flexió, adducció, rotació interna del braç, pronació del avant-braç, flexió a nivell del canell i de les metacarpofalàngiques.

- El patró postural més comú en l'hemiplegia de l'extremitat inferior es caracteritza per l'extensió, rotació interna, adducció de la cama, flexió plantar i inversió.

4.1.2 Co-contracció agonista-antagonista i reaccions associades

Lesions de la motoneurona superior generen que s'estableixi una coordinació inapropiada entre les contraccions de la musculatura agonista i l'antagonista. Per tant, es produeixen moviments desequilibrats i poc harmònics. A més, durant la realització d'un moviment pot acompanyar-se de reaccions associades.(12)

4.2 Síndrome de la motoneurona superior associats al repòs

4.2.1 Espasmes musculars

Els patrons d'espasmes més comuns que solen originar-se en el SMS són els espasmes flexors, i els espasmes extensors. Aquests poden aparèixer de manera espontània o incentivats per una gran variabilitat d'estímuls.(12)

4.2.2 El signe de Babinsky

Una lesió pot afavorir l'aparició de reflexes primitius. L'estimulació tàctil de la planta del peu, mitjançant un procediment específic, produeix una extensió del dit gros del peu amb una obertura en ventall de la resta dels dits.(1)

4.2.3 Clonus

El clonus és un fenomen del síndrome de la motoneurona superior que es caracteritza per l'aparició de contraccions musculars rítmiques que s'esdevenen com a resultat d'un estirament muscular ràpid.(12)

4.2.4 L'espasticitat

L'espasticitat és un trastorn motor d'origen multifactorial que forma part dels components positius del síndrome de la motoneurona superior. Presenta hipertonia muscular, hiperactivitat dels reflexes d'estirament, espasmes i clonus. Els principals problemes que presenta l'espasticitat fan referència a que la musculatura afectada tendeix a l'escurçament i que la tensió exercida pels teixits provoca una restricció del moviments. (12)

5 FISIOPATOLOGIA DE L'ESPASTICITAT

L'aparició d'hipertonia muscular després d'un dany cerebral esta influenciada per dos grans factors: 1) els components neurològics i 2) els components biomecànics, secundaris a les característiques intrínseques de les estructures musculars.(12,13)

5.1 Components neurològics de l'espasticitat.

5.1.1 Afectacions a nivell cortical

Durant el moviment, el còrtex motor s'encarrega d'executar ordres de moviments voluntaris i paral·lelament, s'encarrega de facilitar la via inhibidora de la formació reticular, localitzada a la porció bulbar, per controlar el to muscular i, d'aquesta manera, facilitar el moviment. Per tant, lesions a nivell de còrtex motor o de la capsula interna causen una disminució d'inputs motors a diferents nivells, originant, en la majoria dels casos, el signes positius del síndrome de la motoneurona superior.(13)

Afectacions a nivell del còrtex motor primari (àrea 4 de Brodmann) sol cursar amb paràlisi flàccida manifestant-se amb hipotonia i hiperreflèxia de la musculatura contralateral del hemisferi afectat. (12,13)

Afectacions a nivell del còrtex premotor (àrea 6 de Brodmann) solen presentar espasticitat amb un baix grau de paràlisi. A més, lesions bilaterals solen cursar amb un grau d'espasticitat més elevat. (12,13)

Lesions situades entre el col·licle superior i l'inferior solen incrementar del to extensor, provocant la rigidesa per descerebració. En aquest tipus de lesió sol preservar-se els tractes vestibuloespinals i es caracteritza per la rigidesa en extensió dels braços i les cames, la mandíbula tancada i el coll retraïgut. (1,12)

5.1.2 Afectació a nivell de les vies descendents

Lesions pures a nivell dels tractes piramidal es manifesten amb dèficits motors lleus, especialment amb afectació de la motricitat fina. No obstant, no solen presentar espasticitat. Afectacions a nivell del tracte piramidal lateral, a nivell medul·lar, cursa amb els mateixos símptomes. L'espasticitat sorgeix quan la lesió a nivell medul·lar afecta més extensió del funicle lateral. (12,13)

Lesions a nivell de les vies corticobulbars afectaran el funcionament d'alguns dels nuclis localitzats en el tronc encefàlic. Les vies procedents del còrtex motor cursen amb debilitat de la musculatura de la cara, mentre que les vies procedents del còrtex premotor, que estan involucrades en la facilitació de la formació reticular, provocaran desequilibris entre les vies inhibidores i excitatòries, i conseqüentment espasticitat.(12,13)

5.1.3 Afectació a nivell del tronc encefàlic

L'equilibri que s'estableix entre les vies excitatòries i inhibidores procedents del tronc encefàlic permet una bona regulació del to muscular i que els moviments puguin desenvolupar-se de manera harmònica.(13)

5.1.3.1 Vies excitatòries

Les vies excitatòries, a diferència de les inhibidores, no estan tant influenciades pel còrtex.

La via reticuloespinal medial prové de la regió pontina de la formació reticular i és l'encarregada de mantenir un to muscular adient.

La via vestibuloespinal és l'encarregada de moviment posturals i d'equilibri. Malgrat que lesions en aquesta via sol provocar la rigidesa per descerebració,(12) sembla ser que no està involucrada en la producció d'espasticitat.(13)

5.1.3.2 Vies inhibidores

La via reticuloespinal lateral és procedent de la regió bulbar de la formació reticular i descendeix pròximament a la via piramidal i rubroespinal pels cordons laterals de la medulla espinal. Per tant, una lesió a nivell del fascicle lateral cursarà amb un gran desequilibri entre les vies inhibidores i excitatòries generant espasticitat i hiperreflexia i una possible afectació piramidal.(12,13)

5.1.4 Alteracions a nivell medul·lar.

Els canvis de funcionament sensitiu i motor que es produeixen a nivell espinal són canvis plàstics conseqüents d'una lesió a nivell supraespinal. (13)

5.1.4.1 Alteracions a nivell de les motoneurones espinals

Les motoneurones espinals, després d'una lesió supraespinal solen presentar un augment del seu llindar d'estimulació. Per tant, durant l'execució d'un moviment es reclutaran un percentatge d'unitats motores més elevat que en condicions normals. Aquesta modulació està determinada per diverses influències, entre les quals s'observa la participació de vies aminèrgiques, supraespinals i reflexes. Per tant, s'observarà hiperactivitat a nivell de les motoneurones α i γ . (13)

5.1.4.2 Alteracions a nivell del receptor; el fus muscular

La freqüència de descàrrega del fus muscular es manté conservada en músculs espàstics. Per tant, es descarta la seva participació en l'augment de l'excitabilitat de les motoneurones espinals. (13)

5.1.4.3 Alteracions a nivell de les aferències del fus muscular (la)

Les aferències procedents del fus muscular estan disminuïdes en pacients que cursen espasticitat, tant d'origen medul·lar com cerebral. (13)

5.1.4.4 Alteracions a nivell de interneurons

5.1.4.4.1 Inhibició presinàptica

La inhibició presinàptica està mediada per via supraespinal i es realitza a través d'una connexió axo-axònica mitjançant el neurotransmissor GABA. Parèsies espàstiques, tant d'origen cerebral o espinal, presenten una disminució de la inhibició pre-sinàptica de les aferents (Ia) incrementant l'activitat reflexa i l'espasticitat. Per tant, alteracions en aquest nivell cursen amb distonia espàstica o espasticitat.(13)

5.1.4.4.2 Inhibició recíproca

Diverses patologies poden presentar una disminució de l'activitat de les interneurons (Ia), les quals són les encarregades d'inhibir la musculatura antagonista. Per tant, una alteració en aquest nivell cursarà amb hiperreflexia, espasticitat i co-contracció dels músculs antagonistes.(13)

5.1.4.4.3 Inhibició recurrent

La inhibició recurrent està mediada per les interneurons de Renshaw. En lesions supraespinals i espinals, presenten un comportament normal en repòs. No obstant, el seu grau d'activitat augmenta durant moviments voluntaris. Per tant, sembla no estar involucrada en l'aparició de l'espasticitat.(13)

5.1.4.4 Inhibició autogènica

La inhibició autogènica està mediada per les aferències (Ib). El seu grau d'activitat en pacients hemiplègics tant pot ser augmentat com disminuït. No obstant, no s'ha observat cap alteració en casos d'hiperreflexia sense distonia espàstica.(13)

5.2 Components biomecànics de l'espasticitat

5.2.1 Alteracions de les propietats dels músculs

En les fases inicials després d'un ictus, la majoria dels subjectes, solen cursar amb llargs períodes d'immobilització. El mal posicionament articular durant aquestes fases, facilitaria l'aparició d'escurçaments musculars, generant diverses alteracions musculars entre les quals s'observa pèrdua de sarcòmers, canvis estructurals de les unitats motores i les fibres musculars i un augment del teixit conjuntiu i adipós.(12,13)

5.3 Avaluació de l'espasticitat.

5.3.1 Escala modificada d'Ashworth

L'escala modificada d'Ashworth és una escala d'avaluació clínica de caràcter subjectiu àmpliament utilitzada en mesurar l'espasticitat muscular a partir de valorar el grau de resistència passiva al estirament muscular. La puntuació està estructurada en 5 categories que varien del 0-4. Puntuacions altes fan referència a graus d'espasticitat més severos.

0	No hi ha un increment en el to muscular
1	Lleu increment del to muscular observat amb una mínima resistència al final de rang de moviment
1+	Lleu increment del rang articular observat amb una parada breu i una mínima resistència en menys de la meitat del rang de moviment
2	Increment del to muscular accentuat a través de tot el rang de moviment.
3	Increment considerable del to muscular, dificultat durant el moviment passiu
4	Rigidesa del membre afectat que pot donar-se en flexió o extensió

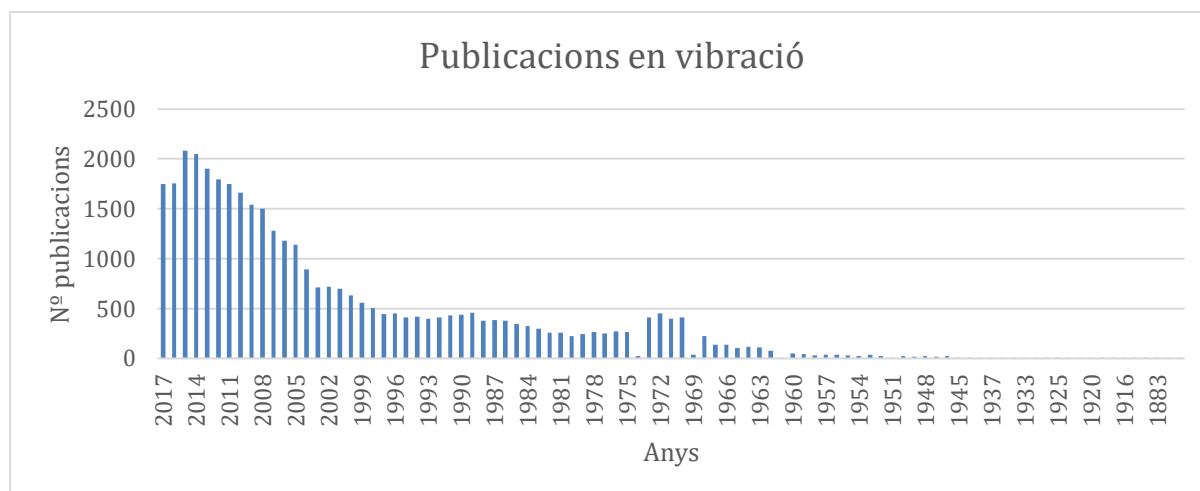
6 VIBRACIÓ

6.1 Concepte de vibració

La vibració és un moviment oscil·latori constant caracteritzat per una amplitud i freqüència determinada. La magnitud fa referència al grau d'oscil·lació del moviment (mesurat en mm) i la freqüència és el total de cicles vibratoris per segon (mesurat en Hz).(14)

L'origen de la vibració s'inicia a partir de l'observació del reflex tònic vibratori per part dels autors Eklund i Hagbarth en el 1969. A partir d'aquest moment fins l'actualitat, s'han incrementat el número de publicacions científiques (Gràfic 1) i el seu ús s'ha generalitzat en diverses patologies dins l'àmbit de la neurorehabilitació.(15)

Gràfic 1. Publicacions en vibració al llarg del anys (Pubmed)



6.2 Mecanisme d'acció de la vibració

6.2.1 A nivell dels receptors corporals

La vibració permet estimular la globalitat de receptors cutanis i musculars que presenta el cos humà i en funció de la freqüència, es determinarà el grau de participació dels receptors sensorials. Freqüències d'estimulació de 5 a 25Hz permeten estimular els mecanoreceptors de Merkel, les de 20 a 50Hz permeten estimular els corpuscles de Meissner, les de 80Hz el fus muscular, les de 60 a 400 Hz permeten estimular els corpuscles de Paccini (60-400Hz) i les freqüències per sobre dels 150Hz solen involucrar termoreceptors i nociceptors.(15,16)

6.2.2 A nivell espinal

Els efectes de la vibració són capaços d'actuar tant a nivell segmental com a diferents nivell medul·lars generant canvis d'excitabilitat, inclús en el generador central de patrons.(15)

6.2.2.1 *El reflex tònic vibratori*

L'aplicació d'una vibració, a nivell musculotendinos, a 100 HZ i a baixes amplitud (3mm) genera una contracció de la musculatura agonista que permet desplaçar l'extremitat contra resistència. Un cop eliminat l'estímul vibratori, en pocs segons cedeix la contracció muscular. Si la vibració s'aplica en un múscul espàstic genera un augment del seu to. No obstant, si es realitza a nivell del seu antagonista s'aconsegueix una relaxació de la musculatura espàstica com a resultat de la inhibició recíproca.(15)

6.2.3 A nivell cortical

La vibració permet una major integració de la informació propioceptiva a nivell cortical. La seva utilització incrementa el grau d'excitabilitat cortical facilitant el reclutament de vies silents augmentant els inputs sensitius. A demés, permet disminuir el llindar d'estimulació, reduir la inhibició i augmentar la facilitació cortical tant en el múscul

vibratori com en el seu antagonista. Finalment la vibració permet mantenir els canvis d'activació cortical i d'activitat motora immediatament després de la seva aplicació.

Freqüències d'estimulació compreses entre 50 i 150 Hz solen obtenir un patró d'activació de les àrees motores molt similar durant l'estímul vibratori. Vibracions compreses entre els 70-80Hz augmenten l'input propioceptiu a nivell del sistema nerviós central i estimulen diverses àrees cerebrals, entre les quals s'observa, el còrtex somatosensorial, el còrtex motor, còrtex premotor, l'àrea motora suplementària i l'àrea motora cingulada. Per altra banda, es capaç de modificar l'excitabilitat cortical a partir de canvis locals en el neurotransmissor gaba i conseqüentment facilitar el control de la musculatura antagonista a partir d'un millor control del reflex d'inhibició recíproca.(15)

6.2.3.1 Il·lusions de moviment

La utilització de la vibració pot induir il·lusions de moviment inclús en absència de moviment voluntari per part de l'extremitat involucrada i està relacionant amb un increment de l'activitat de les aferències (1a). La combinació dels paràmetres de freqüència i amplitud determinarà l'aparició de les il·lusions.

La utilització de mitges freqüències (80Hz) conjuntament amb baixes amplituds (0.5mm) no solen generar il·lusions de moviment. No obstant, si es combina conjuntament amb altes amplituds (1-1.5mm) s'observa l'aparició d'il·lusions de moviment.(17) Per altra banda, la utilització d'altres freqüències (100Hz) conjuntament amb baixes amplituds (0.5mm) també solen generar il·lusions de moviment.(18)

6.3 L'ús de la vibració en la rehabilitació de la extremitat superior.

6.3.1 Lloc d'aplicació

L'aplicabilitat de la vibració en el cós humà és variable i no hi ha un consens establert entre els estudis. Els llocs més freqüents de col·locació són a nivell tendinós(19–21) i a nivell del ventre muscular.(22–26)

6.3.1.1 A nivell tendinós

Els paràmetres d'estimulació a nivell tendinós utilitzen baixes amplituds i una freqüència de 70Hz.(19–21) Anàlisis cinemàtics i electromiogràfics determinen que la vibració a nivell tendinós aporta efectes immediats en el control motor durant la realització d'una tasca a diferents nivells articulars millorant l'estabilitat proximal, l'harmonia del moviment i la disminució de l'activitat electromiogràfica muscular en moviments planars, de traçada o en superfícies inestables. Els guanys de millora observats durant la vibració perduren, tot i que en menor mesura, immediatament després de la retirada del estímul. Per contra, aquest canvis no es mantenen en el temps.(19,20)

6.3.1.2 A nivell muscular

Paràmetres d'estimulació a nivell muscular utilitzen baixes amplituds de desplaçament i freqüències compreses entre els 80-120Hz.(22–26)

L'ús d'un estímul vibratori aïllat posicionat en un segment muscular millora la funció motora però no interfereix en el grau d'espasticitat.(22) Si s'aplica seguidament d'una sessió de fisioteràpia millora aspectes qualitatius del control motor durant moviments planars,(23,24) en la funció, l'espasticitat i la força muscular.(25) Per altra banda, si s'adjunta durant tasques concretes de moviments, malgrat que s'observen millores a curt i llarg plaç en la disminució d'espasticitat, la millora de la funció, la funcionalitat i en els aspectes qualitatius del control motor després de la intervenció, la comparació establerta entre el grup intervenció i el grup control no és del tot clara.(26)

6.3.1.3 Combinant a nivell muscular i tendinós

Els paràmetres d'estimulació utilitzats, momentàniament, a nivell tendinós com a nivell del ventre muscular són de baixa amplitud amb una freqüència de 91Hz.(27,28)

L'ús d'un estímul vibratori aïllat permet disminuir el grau d'espasticitat després de la intervenció i mantenir-ne un grau de millora inferior durant 30 minuts en l'escala modificada d'Ashworth(27) i paràmetres d'ona F.(28) No obstant, no s'observen canvis rellevants a nivell de la funció motora.(27)

6.3.2 Factors de variabilitat en la teràpia vibratòria

Els factors de variabilitat interpersonal poden provocar que uns mateixos paràmetres de vibració puguin evocar diferents efectes entre les persones. A més, també s'ha de tenir en compte la variabilitat intrapersonal, en la que una mateixa persona, en funció de la situació, pot percebre de diferent manera els efectes de la vibració.(16)

6.3.3 Efectes adversos

La vibració és un mètode d'intervenció segur que no provoca efectes adversos severos.(16,29) L'ús d'altres freqüències poden generar irritacions, augment de la temperatura i dolor. Per altra banda, s'ha de tenir cura quan hi hagi un risc de trombosis. El seu funcionament facilitaria el despreniment del material trombòtic a la sang.

BIBLIOGRAFIA

1. Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, Hall WC, LaMantia A-S, White LE, et al. Neurociencia. 2016.
2. Kolb B, Whishaw IQ. Cerebro y conducta: un introducción. Madrid: McGraw-Hill; 2002.
3. Tortora GJ, Derrickson B, Tzal K, Gutiérrez M de los Á, Klajn D. Principios de anatomía y fisiología. México: Editorial Médica Panamericana; 2013.
4. Hall JE. Guyton y Hall: tratado de fisiologia medica. Elsevier; 2016.
5. Cano de la Cuerda R, Martínez Piédrola RM, Miangolarra Page JC. Control y aprendizaje motor: fundamentos, desarrollo y reeducación del movimiento humano. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2016.
6. Krakauer JW. Motor learning: its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation. Curr Opin Neurol. 2006 Feb;19(1):84–90.
7. Fuster JM. [The reticular paradigm of cortical memory]. Rev Neurol. 2010 Mar 3;50 Suppl 3:S3-10.
8. Fizet J, Cassel J-C, Kelche C, Meunier H. A review of the 5-Choice Serial Reaction Time (5-CSRT) task in different vertebrate models. Neurosci Biobehav Rev. 2016 Dec;71:135–53.
9. Pascual-Leone A, Tarazona F, Keenan J, Tormos JM, Hamilton R, Catala MD. Transcranial magnetic stimulation and neuroplasticity. Neuropsychologia. 1999 Feb;37(2):207–17.
10. Boyd LA, Winstein CJ. Implicit motor-sequence learning in humans following unilateral stroke: the impact of practice and explicit knowledge. Neurosci Lett. 2001 Jan 26;298(1):65–9.
11. Pascual-Leone A, Amedi A, Fregni F, Merabet LB. The plastic human brain cortex. Annu Rev Neurosci. 2005;28:377–401.
12. Barnes MP, Johnson GR, editors. Upper motor neurone syndrome and

spasticity: clinical management and neurophysiology. 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press; 2008. 253 p.

13. Juan García FJ. Evaluación clínica y tratamiento de la espasticidad. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana; 2009.

14. Griffin MJ. Handbook of Human Vibration. St. Louis: Elsevier Science; 2014.

15. Murillo N, Valls-Sole J, Vidal J, Opisso E, Medina J, Kumru H. Focal vibration in neurorehabilitation. Eur J Phys Rehabil Med. 2014 Apr;50(2):231–42.

16. Poenaru D, Cinteza D, Petrusca I, Cioc L, Dumitrascu D. Local Application of Vibration in Motor Rehabilitation - Scientific and Practical Considerations. Maedica. 2016 Sep;11(3):227–31.

17. Mancheva K, Rollnik JD, Wolf W, Dengler R, Kossev A. Vibration-Induced Kinesthetic Illusions and Corticospinal Excitability Changes. J Mot Behav. 2017 Jun;49(3):299–305.

18. Goodwin GM, McCloskey DI, Matthews PB. Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: contribution by muscle spindles to perception? Science. 1972 Mar 24;175(4028):1382–4.

19. Conrad MO, Scheidt RA, Schmit BD. Effects of Wrist Tendon Vibration on Targeted Upper-Arm Movements in Poststroke Hemiparesis. Neurorehabil Neural Repair. 2011 Jan;25(1):61–70.

20. Conrad MO, Scheidt RA, Schmit BD. Effects of wrist tendon vibration on arm tracking in people poststroke. J Neurophysiol. 2011 Sep;106(3):1480–8.

21. Conrad MO, Gadhoke B, Scheidt RA, Schmit BD. Effect of Tendon Vibration on Hemiparetic Arm Stability in Unstable Workspaces. van Beers RJ, editor. PLOS ONE. 2015 Dec 3;10(12):e0144377.

22. Caliandro P, Celletti C, Padua L, Minciotti I, Russo G, Granata G, et al. Focal muscle vibration in the treatment of upper limb spasticity: a pilot randomized controlled trial in patients with chronic stroke. Arch Phys Med Rehabil. 2012 Sep;93(9):1656–61.

23. Tavernese E, Paoloni M, Mangone M, Mandic V, Sale P, Franceschini M, et al.

Segmental muscle vibration improves reaching movement in patients with chronic stroke. A randomized controlled trial. *NeuroRehabilitation*. 2013;32(3):591–9.

24. Paoloni M, Tavernese E, Fini M, Sale P, Franceschini M, Santilli V, et al. Segmental muscle vibration modifies muscle activation during reaching in chronic stroke: A pilot study. *NeuroRehabilitation*. 2014;35(3):405–14.

25. Celletti C, Sinibaldi E, Pierelli F, Monari G, Camerota F. Focal Muscle Vibration and Progressive Modular Rebalancing with neurokinetic facilitations in post- stroke recovery of upper limb. *Clin Ter*. 2017 Feb;168(1):e33–6.

26. Calabrò RS, Naro A, Russo M, Milardi D, Leo A, Filoni S, et al. Is two better than one? Muscle vibration plus robotic rehabilitation to improve upper limb spasticity and function: A pilot randomized controlled trial. Nordez A, editor. *PLOS ONE*. 2017 Oct 3;12(10):e0185936.

27. Noma T, Matsumoto S, Etoh S, Shimodozono M, Kawahira K. Anti-spastic effects of the direct application of vibratory stimuli to the spastic muscles of hemiplegic limbs in post-stroke patients. *Brain Inj*. 2009 Jan;23(7–8):623–31.

28. Noma T, Matsumoto S, Shimodozono M, Etoh S, Kawahira K. Anti-spastic effects of the direct application of vibratory stimuli to the spastic muscles of hemiplegic limbs in post-stroke patients: A proof-of-principle study. *J Rehabil Med*. 2012;44(4):325–30.

29. Casale R. Focal, local or segmental vibration? *Eur J Phys Rehabil Med*. 2015 Aug;51(4):507–8.

7 JUSTIFICACIÓ

L'espasticitat és un trastorn motor d'origen multifactorial que forma part dels components positius del síndrome de la motoneurona superior. Presenta hipertonía muscular, hiperactivitat dels reflexes d'estirament, espasmes i clonus a causa de l'alteració en l'excitabilitat de les motoneurons espinals. Aquestes alteracions són canvis a nivell de la motoneurona inferior que es produeixen a conseqüència de lesions a nivell supraespinal.

Quan es produeix un dany cerebral, amb afectació en el còrtex premotor o en la seva via, es produeix un dèficit d'estimulació a nivell de la formació reticular, concretament en la porció bulbar. A conseqüència de la disminució de referències corticals, es produeix un desequilibri amb predominança d'activitat motora excitatòria respecte la inhibidòria. La influència constant d'aquest desequilibri en el temps, generarà els canvis pertinents a nivell de la motoneurona inferior.

La vibració és un mètode d'intervenció no invasiu utilitzat en l'àmbit de la neurorehabilitació que, amb unes freqüències d'estimulació de 70-80Hz i baixes amplituds, permeten augmentar l'input propioceptiu i facilitar el reclutament de vies silents cerebrals. Conseqüentment, s'obtenen millores a nivell del grau d'activitat muscular disminuint la rigidesa i millorant l'harmonia dels moviments de l'extremitat superior en diferents plans i trajectòries. Les millores es relacionen amb un augment de la inhibició pre-sinàptica que s'origina a nivell de les vies inhibidòries de la formació reticular. No obstant, malgrat que la vibració es combini amb una tasca, els beneficis no perduren en el temps.

L'aprenentatge implícit és un procés que fa referència a l'adquisició d'una habilitat motora. Una tasca que permet avaluar la obtenció d'un aprenentatge implícit és el "Serial Reaction Time Task". Durant la realització d'una tasca qualsevol es produeix un augment de l'activitat cortical. De tota manera, quan es produeix un procés d'aprenentatge els ganglis de la base s'encarreguen de la realització de l'activitat i el traspàs d'informació de nivell cortical a subcortical solament es produeix sobre les estructures que s'utilitzen. És a dir, si es realitza un aprenentatge on solament s'utilitza la flexió dels dits, els ganglis de la base, solament reclutaran aquesta musculatura.

Sabent que la vibració ens permet controlar el grau d'espasticitat i l'harmonia del moviment a partir del reclutament de noves vies neuronals que permeten la facilitació de les vies presinàptiques la, durant un instant de temps, inclús un cop havent cedit l'estímul vibratori i que la tasca propositiva permet adquirir un procés d'aprenentatge implícit en subjectes afectats d'ictus crònics, la combinació d'aquestes dos teràpies permetria mantenir les millors d'espasticitat i consegüentment de control motor de l'extremitat superior en el temps.

8 PROTOCOL DE L'ESTUDI

8.1 OBJECTIUS

8.1.1 Objectiu principal

Avaluar la disminució de l'espasticitat en les extremitats superiors mantinguts en el temps quan es combina una tasca propositiva amb teràpia vibratòria.

8.1.2 Objectius secundaris

Avaluar els efectes de millora del control motor en les extremitats superiors mantinguts en el temps quan es combina una tasca propositiva amb teràpia vibratòria.

Determinar quantes sessions d'intervenció són necessàries per a beneficiar-se de la teràpia vibratòria conjuntament amb la tasca propositiva.

8.2 Hipòtesis

8.2.1.1 Hipòtesis alternativa (H_a)

L'adhesió d'una tasca propositiva amb teràpia vibratòria és un mètode d'intervenció eficaç per a mantenir les millores d'espasticitat en l'extremitat superior en el temps.

8.2.1.2 Hipòtesis nul·la (H_0)

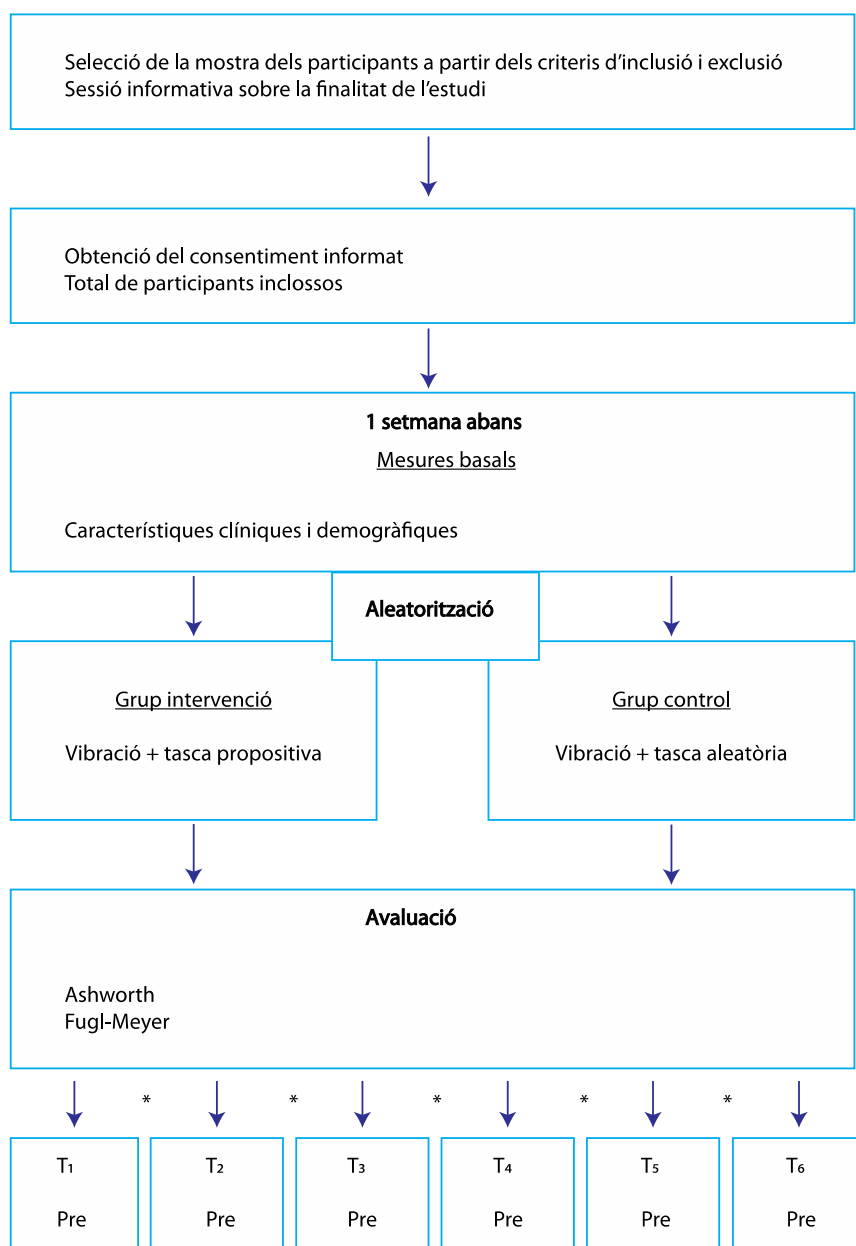
L'adhesió d'una tasca propositiva amb teràpia vibratòria no és un mètode d'intervenció eficaç per a mantenir les millores d'espasticitat en l'extremitat superior en el temps.

8.3 Materials i mètodes

8.3.1 Disseny de l'estudi

Es realitzarà un assaig clínic pilot aleatoritzat paral·lel, triple cec amb dos grups comparatius; grup intervenció i grup control (Fig 1). Els participants es distribuïran de manera aleatòria (1:1) en cada un dels grups.

Fig1. Diagrama de desenvolupament



*: avaluació del número de pèrdues en cada fase.

8.3.2 Participants

Tots els participants seran procedents del hospital de neurorehabilitació; Institut Guttmann i solament s'inclouran els que presentin els criteris d'inclusió establerts (Taula 1). A més, de cada participant s'extrauran dades clíniques i demogràfiques pertinents a edat, sexe, tipus d'ictus, hemisferi afectat, temps després de l'ictus, puntuació Fugl-Meyer i puntuació Ashworth. Finalment, es detallaran les dades clíniques i demogràfiques anterior de tots els participants per a cadascun dels grups d'intervenció per tal d'observar-ne el seu grau d'homogeneïtat.

Taula 1. Criteris d'inclusió i exclusió

Criteris d'inclusió	Criteris d'exclusió
• Ictus en fase crònica (>6 mesos) • Fugl Meyer ($p > 22/66$ motors) • Ashworth (2-3) • Estabilitat mèdica en el tractament d'espasticitat	• Limitacions articulars • Absència de sensibilitat propioceptiva • Dèficits d'atenció

8.3.3 Aleatorització

Es realitzarà un procés d'aleatorització estratificat 1:1 en cadascun dels grups mitjançant un sistema informatitzat. L'estadista proporcionarà els resultats de l'aleatorització a l'investigador principal via telefònica. Seguidament, l'investigador principal serà l'encarregat de distribuir els participants en els grups pertinents.

8.3.4 Emmascarament

Es realitzarà un emmascarament triple. L'emascarament recaurà a nivell dels pacients, l'avaluador clínic i l'estadista. Els participants no seran conscients en quin dels dos grups estaran distribuïts. El fisioterapeuta encarregat en l'avaluació de les escales de mesura estarà absent en quin dels grups hauran participat els subjectes. Finalment, els resultats obtinguts en aquestes avaluacions es transmetran al servei

d'estadística, on un estadista diferent al que ha realitzat el procés d'aleatorització, s'encarregarà de realitzar el anàlisis comparatiu escaient en cada cas.

8.3.5 Intervenció

El procediment d'intervenció es portarà a terme en l'hospital de neurorehabilitació; institut Guttmann i el realitzaran fisioterapeutes especialitzats en l'àmbit de la neurorehabilitació durant un període de dos setmanes (fig 2).

Fig 2. Cronograma

Setmana 1

Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
Avaluació Pre	Descans	Mesures Pre	Descans	Mesures Pre	Descans	Descans
GI		GI		GI		
GC		GC		GC		

Setmana 2

Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Dia 13	Dia 14
Mesures Pre	Descans	Mesures Pre	Descans	Mesures Pre	Descans	Descans
GI		GI		GI		
GC		GC		GC		

GI: Grup intervenció, GC: Grup control, Pre: Mesures pre-intervenció.

8.3.5.1 Procediment

Prèviament a la intervenció, els fisioterapeutes seran instruïts en el funcionament de la tasca i en proporcionaran les instruccions de funcionament als participants mitjançant ordres verbals. En els dos grups s'informarà que s'haurà de realitzar la tasca el més ràpidament possible. Addicionalment, en el grup intervenció, s'informarà que la tasca a desenvolupar tindrà, en algun moment del seu desenvolupament, una seqüència repetida. No obstant, no s'informarà sobre l'ordre d'aparició dels estímuls.

Els participants es distribuïran de manera aleatòria en un grup intervenció (vibració + tasca propositiva) i un grup control (Vibració + tasca aleatòria). Els subjectes romandran assentat davant del monitor, amb control de tronc, on es realitzarà la tasca. La tasca propositiva tindrà l'estructura de treball segons el "Serial Reaction Time Task" (SRTT) (fig 3).

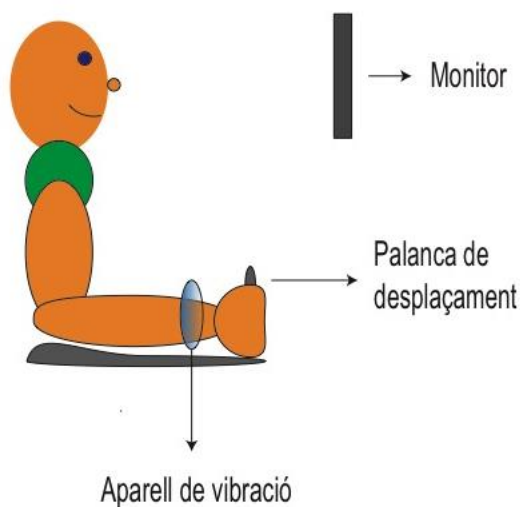


Fig 3. Representació de l'àmbit de treball.

Els participants romandran assentats davant del monitor encarregat de proporcionar els estímuls visuals i guiar l'activitat.

La palanca de desplaçament permetrà executar les respostes motores als estímuls conseqüents.

L'aparell de vibració es situarà a nivell dels flexors de canell i s'activarà tant bon punt comenci l'activitat.

8.3.5.2 Vibració

L'estímul vibratori s'aplicarà a nivell tendinós, concretament als flexors de canell de l'extremitat afectada mitjançant un dispositiu de vibració cassola (fig 3). Per tal d'assegurar una bona transmissió de l'estímul vibratori, el transductor es col·locarà, amb cert nivell de pressió, perpendicularment a la zona d'aplicació. La pressió permetrà assegurar que s'estableixi un bon contacte entre el capçal i la zona tendinosa. A més, permetrà evitar desplaçaments elevats durant la intervenció. L'aparell de vibració s'activarà just en el moment d'inici de l'activitat i romandrà encès fins al final de l'activitat.

Els paràmetres a utilitzar faran referència a amplituds baixes (0.1-0.5mm) i una freqüència de 80Hz. Degut a que la variabilitat intrapersonal i interpersonal pot interferir en la percepció de la vibració, durant la seva utilització es tindrà en compte que les persones no desencadenin el reflex tònic vibratori ni il·lusions de moviment. En el cas d'aparició d'alguns d'aquests fenòmens es reduirà la freqüència o l'amplitud d'utilització.

8.3.5.3 Tasca prepositiva

La tasca propositiva seguirà l'estructura de treball del SRTT. Els estímuls visuals apareixeran en ordre aleatori, semi aleatori i amb una seqüència repetida (Fig 4-5). Primerament, per tal de familiaritzar els subjectes amb la tasca, es presentarà les series de forma aleatòria. Aquest fet, permetrà familiaritzar els subjectes amb la tasca i millorar-ne el seu rendiment basal. Els blocs següents es presentaran un ordre-semialeatòri. A partir d'aquest moment, es procedirà a realitzar l'anàlisi cinemàtic del moviment. Finalment, els blocs presentaran els estímuls de manera seqüenciada. Cada bloc es repetirà la seqüència unes 10 vegades. Un cop s'observi una millora dels paràmetres de realització en l'anàlisi cinemàtic de la tasca amb una seqüència repetida respecte la tasca aleatòria es finalitzarà la sessió (Fig 4).

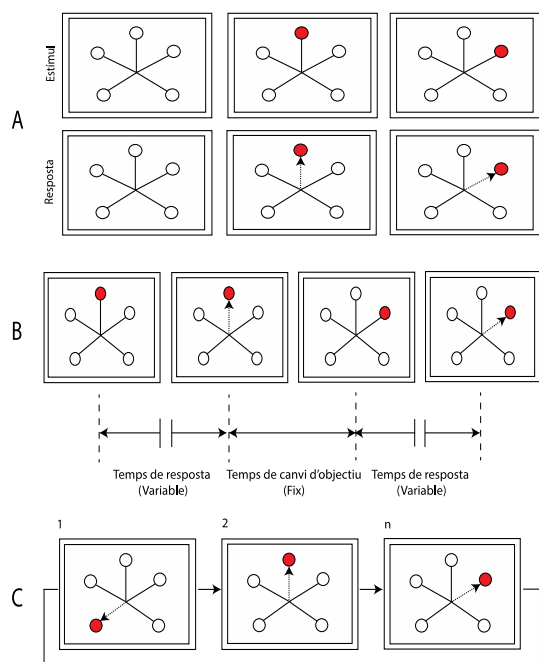


Fig 4. Esquema del funcionament de la Tasca propositiva a partir del SRTT.

(A) Un cop apareix l'estímul visual els subjectes hauran de respondre el més ràpid possible en la direcció establerta.

(B) L'estímul visual desapareixerà un cop s'hagi encertat la direcció, i conseqüentment apareixerà el següent en un temps d'aparició fix.

(C) Al llarg de la sessió l'aparició dels estímuls visuals seguirà una seqüència d'aparició fixada que serà desconeguda pels pacients.

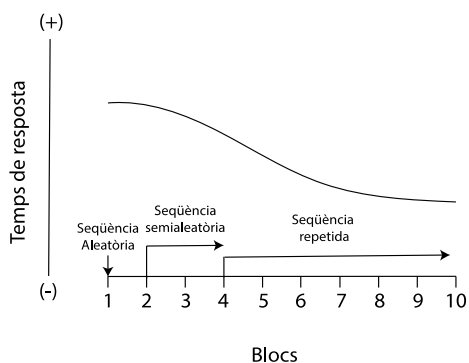


Fig 5. Organització de la tasca propositiva.

Els subjectes realitzaran 10 blocs de tasques. Els estímuls es presentaran de forma aleatòria, semialeatòria i finalment amb una seqüència repetida. A mesura que els subjectes es donen compte de la seqüència s'observarà una disminució en el temps de realització de la tasca. Fet que permet avaluar de manera indirecta un aprenentatge implícit.

8.3.6 Anàlisi i mesures

8.3.6.1 Homogeneïtat entre grups

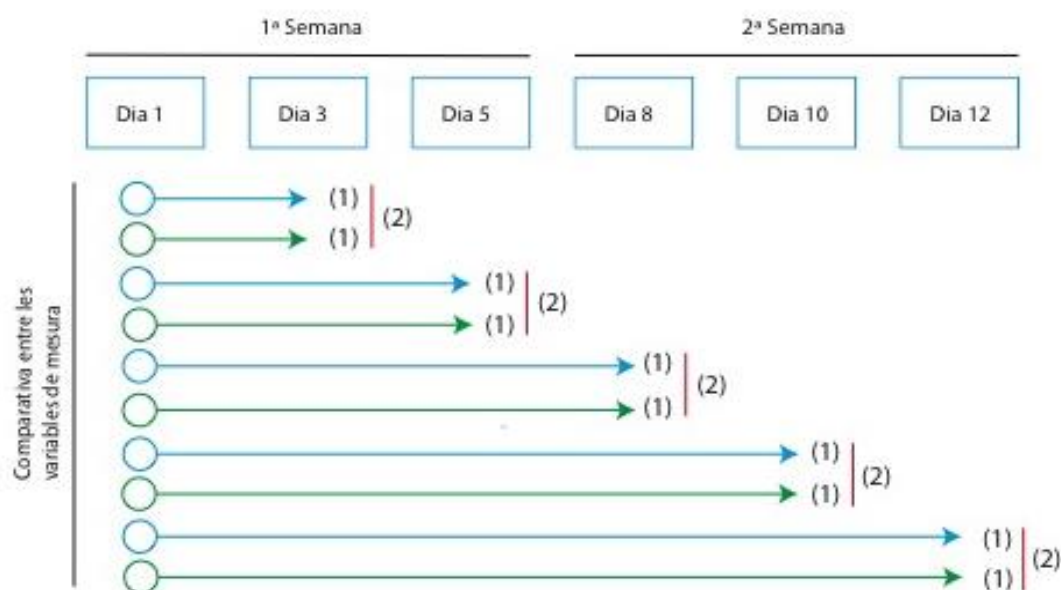
Durant l'assignació dels subjectes en el grup intervenció i el grup control després del procés d'aleatorització es realitzarà un anàlisi descriptiu de les característiques clíniques i demogràfiques dels pacients per quantificar el grau d'homogeneïtat entre els dos grups.

8.3.6.2 Mètodes estadístics

La variable d'anàlisi per la variable principal es l'escala modificada d'Ashworth mentre que la utilitzada per a la variable secundària és la Fugl-Meyer. Les dos són variables qualitatives categòriques nominals. Per tant, l'anàlisi estadístic procedirà de la mateixa manera en ambdós casos. Les mesures s'obtidran durant els dies de realització de la teràpia, prèviament a la realització de la intervenció (fig 4). Posteriorment, es realitzarà una comparativa entre el primer dia respecte els següents. Aquesta comparativa es realitzarà mitjançant una diferència de mitjanes i el valor s'acompanyarà de la desviació típica. Per altra banda, la comparativa entre grups, es procediria a realitzar mitjançant el test estadístic U de Mann Whitney. Finalment, en el cas de trobar resultats significativament diferents entre el grup intervenció i el control es realitzaria un anàlisi posthoc per quantificar en quin moment en el temps s'observen més diferències. Conseqüentment, permetria determinar el número d'intervencions necessàries per beneficiar-se del seu ús.

Fig 4. Anàlisi comparatiu entre les variables d'estudi.

L'anàlisi de variables es realitzarà entre les mesures establertes abans de realitzar la intervenció i es compararà el primer dia respecte tots els altres. Aquesta distribució ens permetrà: 1) observar l'evolució en el temps de les variables i 2) quantes sessions de fisioteràpia són necessàries per a obtenir els millors guanys funcionals en el temps.



Blau: grup intervenció, verd: grup control, (1) comparativa en el temps; diferència de mitjanes, (2) comparativa entre grups; U de Mann Whitney.

8.3.7 Criteris ètics

L'estudi pilot està dissenyat en consonància les declaracions de Helsinki i rebrà l'aprovació del comitè d'ètica assistencial de l'hospital de neurorehabilitació; institut Guttmann. Tots els participants seran informats respecte la intencionalitat de l'estudi i hauran firmat el consentiment informat.

8.4 Discussió

L'objectiu d'aquest estudi serà poder mantenir els efectes de la vibració combinada amb una tasca propositiva per mantenir les millores d'espasticitat i de control motor en el temps. Resultats favorables a nivell de la intervenció permetran reforçar la utilitat, en el marc de la neurorehabilitació. Malgrat que l'ús de la vibració és creixent en la literatura científica, la seva utilització, en el control motor i l'espasticitat, en centres de rehabilitació no és del tot clara. A més, seria interessant utilitzar aquesta mètode d'intervenció combinat, durant etapes inicials d'ingrés en els pacients, per tal de normalitzar l'activitat motora dels pacients amb espasticitat i que, un cop normalitzats els patrons, els pacients continuessin amb el circuit habitual de rehabilitació.

La realització d'un estudi pilot, malgrat ens permet veure el grau d'associació que hi pot haver entre dos variables, presenten una validesa externa reduïda. Per tant, dificultarà l'extrapolació dels resultats a la població general.

La vibració, en els últims anys ha incrementat el número d'articles científics en l'àmbit de la neurorehabilitació. A nivell de futures investigacions seria interessant poder establir unes bases d'utilització fermes amb uns procediments homogenis i ben contrastats. Els aparells de vibració consten d'una gran variabilitat de factors intrínsecs que s'haurien de concretar per tal de facilitar la reproductibilitat dels resultats proporcionats pels estudis. Entre aquests hi trobem els paràmetres físics com la intensitat, freqüència i temps d'aplicabilitat i les pròpies característiques dels dispositius. Es a dir, el tipus de transductors i ones a utilitzar. Finalment, aquest protocol d'estudi està enfocat a determinar com l'adhesió d'una tasca propositiva és capaç de facilitar un procés d'aprenentatge. Tanmateix, també seria interessant fer un protocol d'estudi amb un plantejament invers. La teràpia vibratòria és capaç de facilitar un procés d'aprenentatge motor?

9 ANNEXOS

9.1 Fugl-Meyer

Rehabilitation Medicine, University of Gothenburg

FUGL-MEYER ASSESSMENT UPPER EXTREMITY (FMA-UE) Assessment of sensorimotor function

ID:
Date:
Examiner:

Fugl-Meyer AR, Jaasko L, Leyman I, Olsson S, Steglind S: The post-stroke hemiplegic patient. A method for evaluation of physical performance. Scand J Rehabil Med 1975, 7:13-31.

A. UPPER EXTREMITY, sitting position				
I. Reflex activity		none	can be elicited	
Flexors: biceps and finger flexors		0	2	
Extensors: triceps		0	2	
Subtotal I (max 4)				
II. Volitional movement within synergies, without gravitational help		none	partial	full
Flexor synergy: Hand from contralateral knee to ipsilateral ear. From extensor synergy (shoulder adduction/ internal rotation, elbow extension, forearm pronation) to flexor synergy (shoulder abduction/ external rotation, elbow flexion, forearm supination). Extensor synergy: Hand from ipsilateral ear to the contralateral knee	Shoulder retraction	0	1	2
	elevation	0	1	2
	abduction (90°)	0	1	2
	external rotation	0	1	2
	Elbow flexion	0	1	2
	Forearm supination	0	1	2
	Shoulder adduction/internal rotation	0	1	2
	Elbow extension	0	1	2
	Forearm pronation	0	1	2
Subtotal II (max 18)				
III. Volitional movement mixing synergies, without compensation		none	partial	full
Hand to lumbar spine	cannot be performed, hand in front of SIAS hand behind of SIAS (without compensation) hand to lumbar spine (without compensation)	0	1	2
Shoulder flexion 0°-90° elbow at 0° pronation-supination 0°	immediate abduction or elbow flexion abduction or elbow flexion during movement complete flexion 90°, maintains 0° in elbow	0	1	2
Pronation-supination elbow at 90° shoulder at 0°	no pronation/supination, starting position impossible limited pronation/supination, maintains position complete pronation/supination, maintains position	0	1	2
Subtotal III (max 6)				
IV. Volitional movement with little or no synergy		none	partial	full
Shoulder abduction 0 - 90° elbow at 0° forearm pronated	immediate supination or elbow flexion supination or elbow flexion during movement abduction 90°, maintains extension and pronation	0	1	2
Shoulder flexion 90° - 180° elbow at 0° pronation-supination 0°	immediate abduction or elbow flexion abduction or elbow flexion during movement complete flexion, maintains 0° in elbow	0	1	2
Pronation/supination elbow at 0° shoulder at 30°-90° flexion	no pronation/supination, starting position impossible limited pronation/supination, maintains extension full pronation/supination, maintains elbow extension	0	1	2
Subtotal IV (max 6)				
V. Normal reflex activity evaluated only if full score of 6 points achieved on part IV				
biceps, triceps, finger flexors	0 points on part IV or 2 of 3 reflexes markedly hyperactive 1 reflex markedly hyperactive or at least 2 reflexes lively maximum of 1 reflex lively, none hyperactive	0	1	2
Subtotal V (max 2)				
Total A (max 36)				

B. WRIST support may be provided at the elbow to take or hold the position, no support at wrist, check the passive range of motion prior testing		none	partial	full
Stability at 15° dorsiflexion elbow at 90°, forearm pronated shoulder at 0°	less than 15° active dorsiflexion dorsiflexion 15°, no resistance is taken maintains position against resistance	0	1	2
Repeated dorsiflexion / volar flexion elbow at 90°, forearm pronated shoulder at 0°, slight finger flexion	cannot perform volitionally limited active range of motion full active range of motion, smoothly	0	1	2
Stability at 15° dorsiflexion elbow at 0°, forearm pronated slight shoulder flexion/abduction	less than 15° active dorsiflexion dorsiflexion 15°, no resistance is taken maintains position against resistance	0	1	2
Repeated dorsiflexion / volar flexion elbow at 0°, forearm pronated slight shoulder flexion/abduction	cannot perform volitionally limited active range of motion full active range of motion, smoothly	0	1	2
Circumduction	cannot perform volitionally jerky movement or incomplete complete and smooth circumduction	0	1	2
Total B (max 10)				

C. HAND support may be provided at the elbow to keep 90° flexion, no support at the wrist, compare with unaffected hand, the objects are interposed, active grasp		none	partial	full
Mass flexion from full active or passive extension		0	1	2
Mass extension from full active or passive flexion		0	1	2
GRASP				
A – flexion in PIP and DIP (digits II-V) extension in MCP II-V	cannot be performed can hold position but weak maintains position against resistance	0	1	2
B – thumb adduction 1-st CMC, MCP, IP at 0°, scrap of paper between thumb and 2-nd MCP joint	cannot be performed can hold paper but not against tug can hold paper against a tug	0	1	2
C – opposition pulpa of the thumb against the pulpa of 2-nd finger, pencil, tug upward	cannot be performed can hold pencil but not against tug can hold pencil against a tug	0	1	2
D – cylinder grip cylinder shaped object (small can) tug upward, opposition in digits I and II	cannot be performed can hold cylinder but not against tug can hold cylinder against a tug	0	1	2
E – spherical grip fingers in abduction/flexion, thumb opposed, tennis ball	cannot be performed can hold ball but not against tug can hold ball against a tug	0	1	2
Total C (max 14)				

D. COORDINATION/SPEED after one trial with both arms, blind-folded, tip of the index finger from knee to nose, 5 times as fast as possible		marked	slight	none
Tremor		0	1	2
Dysmetria	pronounced or unsystematic slight and systematic no dysmetria	0	1	2
		> 5s	2 - 5s	< 1s
Time	more than 5 seconds slower than unaffected side 2-5 seconds slower than unaffected side maximum difference of 1 second between sides	0	1	2
Total D (max 6)				

TOTAL A-D (max 66)	
---------------------------	--

H. SENSATION, upper extremity blind-folded, compared with unaffected side		anesthesia	hypoesthesia dysesthesia	normal
Light touch	upper arm, forearm palmar surface of the hand	0	1	2
		0	1	2
		absence less than 3/4 correct	3/4 correct considerable difference	correct 100% little or no difference
Position small alterations in the position	shoulder	0	1	2
	elbow	0	1	2
	wrist	0	1	2
	thumb (IP-joint)	0	1	2
Total H (max12)				

J. PASSIVE JOINT MOTION, upper extremity				J. JOINT PAIN during passive motion, upper extremity		
Sitting position, compare with unaffected side	only few degrees (less than 10° in shoulder)	decreased	normal	pronounced constant pain during or at the end of movement	some pain	no pain
Shoulder						
Flexion (0° - 180°)	0	1	2	0	1	2
Abduction (0°-90°)	0	1	2	0	1	2
External rotation	0	1	2	0	1	2
Internal rotation	0	1	2	0	1	2
Elbow						
Flexion	0	1	2	0	1	2
Extension	0	1	2	0	1	2
Forearm						
Pronation	0	1	2	0	1	2
Supination	0	1	2	0	1	2
Wrist						
Flexion	0	1	2	0	1	2
Extension	0	1	2	0	1	2
Fingers						
Flexion	0	1	2	0	1	2
Extension	0	1	2	0	1	2
Total (max 24)				Total (max 24)		

A. UPPER EXTREMITY	/36
B. WRIST	/10
C. HAND	/14
D. COORDINATION / SPEED	/6
TOTAL A-D (motor function)	/66

H. SENSATION	/12
J. PASSIVE JOINT MOTION	/24
J. JOINT PAIN	/24