

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

Dipartimento di Scienze Biomediche

Corso di Laurea Triennale in Scienze Motorie

Tesi di Laurea

**SINDROME DA ARTO FANTASMA: ESERCIZIO FISICO E  
NUOVE TECNOLOGIE PER IL TRATTAMENTO**

Relatore: Prof. Betti Sonia

Laureando: Ortis Selly

N° di matricola: 1227519

Anno Accademico 2021/2022

Alla mia *none* Marisa,  
che mi ha insegnato quanto coraggio serve per rialzarsi sempre.

INDICE:

**Introduzione**.....2

## **Capitolo 1**

### **Sindrome da arto fantasma**

1.1 Presentazione della patologia.....3

1.2 Prime evidenze storiche .....4

1.3 Basi neurologiche della sindrome.....5

## **Capitolo 2**

### **Terapie non tradizionali e trattamenti**

2.1 TENS – stimolazione elettrica nervosa transcutanea.....7

2.2 GMI – graded motor imagery.....8

2.3 Mirror therapy.....9

## **Capitolo 3**

### **Esercizio fisico**

3.1 La terapia e la sua efficacia.....11

## **Capitolo 4**

### **Nuove tecnologie: Protesi innovative e visori 3D nella cura della sindrome**

4.1 Le protesi ed il loro utilizzo.....14

4.2 Influenze neurologiche della realtà virtuale sui pazienti.....18

## **Capitolo 5**

**Discussione e considerazioni conclusive**.....21

**Bibliografia**.....23

**Ringraziamenti**.....27

## INTRODUZIONE

Il corpo umano è paragonabile ad un macchinario perfettamente funzionante dove ogni ingranaggio è accuratamente oliato e interconnesso con gli altri. Tuttavia, anche un piccolo malfunzionamento o un allarme ritenuto poco importante può portare a complicanze o danni molto gravi. A capo di questa straordinaria “macchina” vi è il cervello con le sue fittissime reti di controllo, quest’ultime governano i meccanismi responsabili della patologia della quale si tratterà in questa tesi. Se provassimo ad immaginare il cambiamento improvviso della strada che percorriamo ogni giorno per andare all’università, se i cartelli stradali che abbiamo sempre visto e riconosciuto cambiassero improvvisamente colore, se le stanze di casa nostra cambiassero ordine, se le persone che conosciamo da tempo avessero d’un tratto tutte un altro nome, ecco che le sensazioni che avremmo sarebbero di confusione e smarrimento, ed ecco quindi ciò che percepisce il nostro cervello quando il corpo che conosce da sempre viene cambiato.

Nel primo capitolo di questa tesi si parlerà della sindrome da arto fantasma, della sua storia e delle basi neurologiche che la caratterizzano. Successivamente, nel secondo capitolo, l’attenzione verrà posta ad alcune terapie utilizzate per la cura della patologia d’interesse, quest’ultime sono ancora oggi oggetto d’indagine e di ricerca e differiscono dal classico approccio farmacologico. Proseguendo nel terzo capitolo si parlerà di esercizio fisico utilizzato ai fini riabilitativi e della sua efficacia, fornendo alcuni esempi tratti da articoli di riferimento. Il quarto capitolo tratterà di protesi e nuove tecnologie utilizzate per la cura della sindrome e come esse sono state inserite e progettate nel protocollo riabilitativo. Infine, la tesi si concluderà con una discussione in merito a quanto emerso nei capitoli precedenti mettendo in risalto i temi centrali.

# CAPITOLO 1

## SINDROME DA ARTO FANTASMA

### 1.1 La patologia

La sindrome da arto fantasma consegue all'amputazione di un arto e/o a lesioni nervose, e consiste nella sensazione che l'arto amputato o mancante sia ancora attaccato al corpo. Questa sindrome costringe circa il 60-80% dei pazienti che ne soffrono a provare il dolore da arto fantasma (in inglese, *Phantom limb pain* o PNP) cioè sensazioni di dolore a organi, arti e tessuti che includono bruciore, dolore pungente, penetrante e sensazioni di calore o gelo (Kaur et al., 2018). L'intervento chirurgico di rimozione dell'arto che può essere alla base della sindrome può avvenire a seguito di diverse malattie come: traumi, tumori, infezioni e patologie vascolari.

La neuroscienziata Tamar R. Makin in un recente articolo pubblicato nel 2021 sulla prestigiosa rivista *Brain* riporta la testimonianza di un paziente affetto da sindrome da arto fantasma e dolore da arto fantasma:

*“To anyone looking at me, I have no arm. But I can feel the entirety of my phantom hand and arm. Imagine you are wearing an elbow length evening glove... everywhere the glove touches your skin it's crushing your arm constantly.... On top of it you get pains like burning pains. It's like when you burn yourself on the grill. Your instinct is to pull your hand away, but with this pain you can't. It's a nerve sensation and it stays there, until “it” decides to pull away.”*

La sensazione descritta dal paziente è molto specifica e denota una particolarità, ovvero la soggettività delle sensazioni. Egli descrive una sensazione persistente lungo tutto l'arto mancante: “come se indossassi un guanto”. Inoltre, riporta un dolore bruciante descritto come implacabile, in quanto il dolore continua senza la possibilità di porci rimedio: “fino a quando esso non decide di allontanarsi”.

Questa condizione è risultata per lungo tempo di difficile comprensione per i medici in quanto le sensazioni descritte dai pazienti risultavano surreali. Infatti, molti soldati dell'epoca della guerra civile, i quali subivano un'amputazione, non erano

presi adeguatamente in considerazione e molto spesso curati come casi di disturbi psichici. I veterani che dimostravano i sintomi della patologia venivano etichettati come pazzi, altri ancora non esponevano la presenza delle problematiche per paura di essere considerati instabili. Successivamente il medico e scrittore statunitense Weir Mitchell, specializzato nella cura dei veterani della guerra civile, diede la giusta attenzione a questi sintomi e pubblicò nei suoi testi la possibile insorgenza di questo dolore nei soldati che avevano subito un'amputazione. Fu il primo medico a tenere in considerazione anche la componente emotiva nel trattamento della sindrome da arto fantasma.

Per quanto riguarda la patologia, essa continua ad essere studiata dai neurologi moderni come una condizione comunemente riportata dagli amputati.

## **1.2 Prime evidenze storiche**

La scoperta della sindrome da arto fantasma avvenne nel XVI secolo con pazienti militari che subivano amputazioni a seguito delle battaglie, il primo studioso a scrivere di tale fenomeno fu Ambroise Paré, un chirurgo che oggi viene considerato padre della chirurgia moderna. Egli dimostrò l'importanza di un'amputazione precisa in previsione dell'applicazione di una protesi, introdusse le operazioni con legatura e unguenti diversi dall'olio bollente per la cicatrizzazione. L'attenzione di Paré si limitò alle sensazioni e alla rete nervosa senza però escludere la componente cerebrale. Successivamente, nel XVII secolo troviamo le testimonianze scritte di René Descartes, filosofo razionale. Egli sostenne la centralità del cervello e della percezione come insieme di coscienza e comprensione, avvicinandosi al tema secondo cui il dolore dato dall'amputazione è governato dal cervello e dall'interazione con l'anima. Proseguendo sulla linea del tempo un'attenzione va posta a Johannes Uller che scrivendo del suo paziente H. dimostrò come le variazioni climatiche incidessero sul dolore da arto fantasma, variandone leggermente la sintomatologia. Inoltre, un ruolo centrale nello studio della sindrome va riconosciuto a Charles Bell che dimostrò che con la stimolazione nervosa si potevano scatenare risposte dolorose nel paziente amputato. Egli, inoltre, introdusse il concetto di propriocezione come sesto senso muscolare e descrisse il circolo nervoso con la presenza di nervi motori e sensoriali che comunicano con il cervello.

Un altro nome rilevante per la storia della sindrome fu il medico Silas Weir Mitchell, citato nel paragrafo precedente, il quale coniò il termine “arto fantasma” (Finger et al., 2003). Egli si formò sul campo durante la guerra civile americana come chirurgo per poi specializzarsi in disturbi legati al sistema nervoso. Il primo scritto di Mitchell sull’arto fantasma venne pubblicato alla fine della guerra civile nel 1866 con il titolo “The case of George Dedlow”.

È importante sottolineare il percorso storico che ci ha portati ad oggi, in quanto gli errori del passato hanno permesso studi e innovazioni sempre più avanzate e finalizzate al benessere del paziente e alla personalizzazione del trattamento. Ci basti pensare che prima degli studi di Ambroise Parè, un amputato ad un arto inferiore non poteva recuperare la deambulazione, in quanto le amputazioni erano imprecise e non consideravano l’anatomia e la fisiologia delle articolazioni rendendo impossibile e dolorosa l’applicazione di una protesi. Un altro esempio è Silas Mitchell senza il quale alcuni veterani non avrebbero ricevuto cure adeguate e probabilmente sarebbero continuati ad essere considerati “guariti” nonostante la sindrome. Ancora oggi, dopo cinquecento anni dalla prima descrizione della patologia, gli sviluppi della ricerca finalizzati al miglioramento della terapia per la sindrome dell’arto fantasma seguono le orme di questi grandi studiosi del passato.

### **1.3 Basi neurologiche della sindrome**

La base neurologica della sindrome è molto complessa, e molti aspetti della patologia sono ancora sconosciuti e poco chiari ai ricercatori. Per sottolineare ciò, immaginiamo la nostra rete nervosa come una fitta autostrada intricata dove i mezzi di trasporto partono e arrivano con lo stesso obiettivo finale, raggiungere la meta desiderata. Allo stesso modo, le informazioni afferenti passano attraverso il nostro corpo per raggiungere la corteccia sensoriale primaria situata nel giro post-centrale del lobo parietale. Facendo sempre riferimento alla viabilità stradale possiamo facilmente comprendere quanto disagio comporti l’interruzione improvvisa in una direzione che, nel caso del corpo umano, possiamo considerare un’amputazione.

Collins e colleghi (2018) inseriscono l’immagine corporea alla base dello sviluppo della sindrome da arto fantasma. Questa rappresentazione stabile del corpo, chiamata “neuro matrice” (Melzack, 1990), verrebbe mantenuta da un circuito di

aree cerebrali presente fin dalla nascita, pur essendo influenzabile dall'esperienza. Dopo l'amputazione il conflitto tra rappresentazioni corticali e periferiche intatte e la mancata corrispondenza corporea risulterebbe alla base dell'origine della sindrome.

Pensiamo a quanto risulta strano per ognuno di noi guardarsi allo specchio variando un solo particolare come il taglio di capelli. Come può reagire diversamente il nostro cervello ad un cambiamento così radicale, come la perdita di un arto e la conseguente modifica dell'immagine del corpo così come l'ha sempre conosciuta? La risposta a questa domanda pari risiedere nella riorganizzazione corticale dovuta al cambiamento dato dall'amputazione e all'auto-percezione del proprio corpo che diverge dalla realtà (Browne et al., 2021). Infatti, è stato riportato come l'amputazione porti ad un'estensiva riorganizzazione cerebrale, soprattutto nelle aree somatosensoriali e motorie primarie. Tale riorganizzazione sembra essere correlata al dolore dell'arto fantasma (Flor et al.,1995).

Inoltre, in uno studio di Jiang e colleghi (2015) i ricercatori hanno investigato la differenza strutturale negli amputati sia per quanto riguarda la sostanza grigia cerebrale che quella bianca, rilevando una riduzione della sostanza grigia nel talamo, anche se ciò non correlata con il PLP. Una riduzione di sostanza grigia è stata identificata anche a livello delle cortecce primarie motorie e sensoriali. I ricercatori hanno inoltre scoperto che le cellule gangliari della radice dorsale del nervo diventano più attive e sensibili a seguito di una rimozione chirurgica, aumentando la loro plasticità verso altre aree.

Va inoltre sottolineata l'importanza della noradrenalina e dell'adrenalina nei processi dolorosi della sindrome, in quanto il loro aumento comporta maggior eccitazione delle fibre post-gangliari rendendole maggiormente sensibili e suscettibili (Jensen et al., 1985).

Concludendo questa panoramica sulla sindrome da arto fantasma possiamo notare quanto complessa risulti sia la sua sintomatologia che la sua eziopatogenesi. Quanto detto in questo capitolo ci fa comprendere l'evoluzione negli gli studi e nelle ricerche sulla sindrome. Nel secondo capitolo verranno invece illustrate alcune tecniche utilizzate per la riabilitazione.

## CAPITOLO 2

### TERAPIE NON TRADIZIONALI E TRATTAMENTI

In questo capitolo verranno analizzate alcune delle metodologie impiegate per curare la sindrome da arto fantasma e la loro relativa efficacia. Va precisato che gli studi in questo campo suggeriscono che non esista una cura estendibile a tutti i pazienti ma che la risposta sia soggettiva e molto spesso il miglior risultato ottenibile sia dato dalla combinazione di più terapie. L'approccio farmacologico è il più tradizionale e non verrà approfondito, è noto però che le sostanze come antidepressivi triciclici, oppioidi e FANS siano spesso somministrati a pazienti che soffrono di sindrome da arto fantasma con esiti positivi per quanto riguarda la riduzione del dolore (Kaur et al., 2018).

#### 2.1 TENS- stimolazione elettrica nervosa transcutanea

La stimolazione elettrica nervosa transcutanea o TENS è una terapia che, abbinata ad altre, viene utilizzata per curare situazioni di dolore cronico o acuto. La TENS consiste nella stimolazione delle fibre nervose periferiche con correnti elettriche pulsate al fine è quello di diminuire le sensazioni dolorose. Le correnti sono generate da un dispositivo alimentato a batteria, il quale, grazie a degli elettrodi che vengono applicati sulla cute integra del paziente, eroga gli stimoli. La sua efficacia è da attribuire all'inibizione delle afferenze nervose che portano informazioni nocicettive, ma anche al rilascio di neuropeptidi come le endorfine. I benefici della TENS nell'ambito della sindrome dell'arto fantasma, ma anche delle situazioni dolorose da amputazione sono riconducibili a:

- inibizione dei neuroni nocicettivi
- aumento del flusso sanguigno
- riduzione degli spasmi muscolari

Tuttavia, non vi sono sufficienti studi che dimostrano l'efficacia esclusiva della TENS come terapia per la sindrome da arto fantasma, la quale viene sempre affiancata ad altre terapie mediche. Inoltre, la frequenza e l'intensità degli impulsi elettrici sono determinanti cruciali della durata e del tipo di effetto analgesico fornito (Peng et al., 2019). L'erogazione di questa terapia è solitamente modulata

in due serie distinte di stimoli: ad alta frequenza (50-100 Hz) e bassa intensità o bassa frequenza (24 Hz) e alta intensità. L'applicazione di questo trattamento è facilitata dall'economicità del dispositivo utilizzato e dalla possibilità di eseguire un'auto-somministrazione da parte del paziente, che tuttavia non è sempre valutabile come aspetto positivo a causa della maggiore inaccuratezza che può caratterizzare la somministrazione.

## **2.2 GMI-immagini motorizzate graduate**

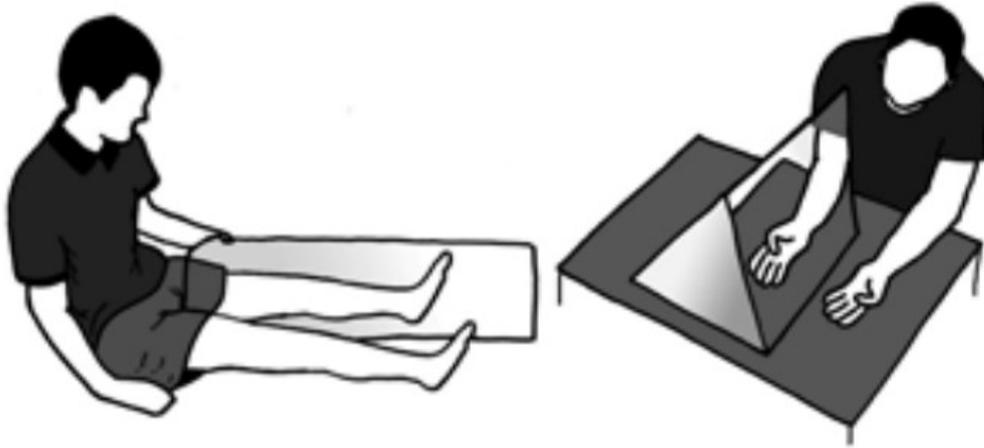
Le immagini motorizzate graduate (dall' inglese *graded motor imagery* o GMI) sono un protocollo utilizzato per attivare sequenzialmente le reti corticali e migliorarne l'organizzazione. L'intervento si basa sul riconoscimento della lateralità (discriminazione tra destra e sinistra) e sull'immaginazione di azioni che favoriscono un'attivazione delle cortecce premotorie. Nel caso di patologie croniche come la sindrome da arto fantasma, gli studiosi hanno dedotto che, lavorando sulle zone implicate nel dolore come quelle motorie e parietali, anche la sintomatologia dovrebbe subire cambiamenti. È anche possibile che i processi di riorganizzazione inizino a livello talamico e si riflettano sulle zone corticali motorie successivamente.

Come riportato da Prignac e colleghi (2011) nella prima fase della terapia viene posta attenzione al riconoscimento degli arti sottoponendo immagini e fotografie al paziente e chiedendogli il riconoscimento dell'arto tra destra e sinistra. Successivamente si chiede al paziente uno sforzo di sola visualizzazione, dapprima una raffigurazione mentale della postura del proprio arto amputato, poi di movimenti prestabiliti e controllati. Quando questo processo avviene senza dolore, l'immaginazione dei gesti può diventare libera e più complessa. L'ultimo step di questo protocollo è il *Mirror visual feedback* e consiste nell'oscurare l'arto che presenta dolore, mentre quello considerato sano viene riflesso in uno specchio ed esegue dei movimenti. Questo permette di "illudere" il nostro cervello suggerendogli che i movimenti avvengano senza dolore alcuno e permettendo quindi di ripristinare schemi motori da tempo persi. Questo ultimo step verrà approfondito nel prossimo paragrafo.

### 2.3 Mirror therapy

la *Mirror therapy* è un approccio non farmacologico utilizzato come trattamento per la sindrome da arto fantasma che fu inventato dal neuroscienziato Vilayanur S. Ramachandran. Egli ebbe l'intuizione che creare una "realtà virtuale" come la *Mirror box* potesse permettere di mandare dei feedback visivi al cervello aiutando la riorganizzazione della corteccia motoria considerata causa del dolore da arto fantasma. Egli, così, sottolineò l'importanza dell'informazione afferente nel dolore da arto fantasma ponendola alla base della sua invenzione. Ramachandran, inoltre, ipotizzò che il dolore fosse dato dalla trasmissione di informazioni tra lobo frontale, cervelletto e lobi parietali che non coincidono con la realtà fisica in quanto l'arto è stato amputato (Ramachandran et al., 1996).

Questa terapia non può essere considerata come unico e primo trattamento per la sindrome da amputazione ma la sua efficacia è sottolineata da numerosi studi. Analizziamo ora in cosa consiste: il paziente, il quale deve essere nello stato emotivo più predisposto e favorevole, si pone davanti a uno specchio focalizzando visivamente il suo riflesso (Figura 1). L'arto sano sarà visibile e riflesso dallo specchio, portandolo così all'illusione della presenza fisica dell'arto amputato. Entrambi gli arti (amputato e non) devono svolgere movimenti simmetrici e controllati. Quanto detto sopra deve essere ripetuto tutti i giorni per un tempo minimo che varia in funzione delle necessità e difficoltà del paziente. Ad esempio, in uno studio di Yıldırım e colleghi (2016), il tempo somministrato per la terapia era di almeno venti minuti al giorno. In questo studio i pazienti sono stati seguiti attentamente nell'esecuzione fino al raggiungimento di una completa autonomia. Una particolarità emersa da quest'analisi è la differenza tra i pazienti che hanno utilizzato abitualmente protesi o meno, in quanto questi dispositivi possono alterare la percezione del movimento dell'arto come costretto o addirittura paralizzato, rallentando la riorganizzazione della porzione corticale del cervello. Tuttavia, anche se questa terapia comporta numerosi benefici e risultati promettenti presenta dei limiti, come la possibilità di essere utilizzata solo da persone con amputazione unilaterale. Inoltre, i risultati degli studi non sono sempre stabili e quindi la ricerca in merito alla *Mirror therapy* e alla sua efficacia continua.



**FIGURA 1.**

Aspetto e posizione dello specchio per l'utilizzo della *Mirror therapy* in persone con amputazione di un arto inferiore (sinistra) e superiore (destra). Immagine tratta da Yildirim et al. (2016).

## CAPITOLO 3

### ESERCIZIO FISICO

In questo capitolo si tratterà delle diverse forme di esercizio fisico utilizzate nella sindrome da arto fantasma. Molto spesso questa metodologia riabilitativa viene trascurata in quanto si cerca un sollievo immediato e facilmente somministrabile. L'attività fisica, specialmente in situazioni complesse come la sindrome trattata, necessita di un'immagine corporea consolidata e della sua propriocezione, nonché di molte ore di pratica con personale qualificato. Parleremo nel primo paragrafo della terapia somministrata ai pazienti e successivamente della sua efficacia e del confronto con le altre metodiche.

#### **3.1 La terapia**

L'esercizio fisico viene somministrato ai pazienti insieme ad altre terapie come la *Mirror therapy* o la *mental imagery*, permettendo modificazioni a livello corticale, ripristinando collegamenti e processi mentali grazie all'immaginazione. Più precisamente, la *Mirror therapy* e la *mental imagery* è stato riportato influenzino maggiormente il lobo parietale ed occipitale, mentre l'attività fisica è associata a maggior attività nella corteccia motoria e somatosensoriale (Brunelli et al.,2015).

Riguardo ai protocolli utilizzati, in letteratura scientifica se ne trovano di diversi con alcune caratteristiche simili, ma anche specifiche differenze. Prendendo come esempio il recente studio di Zaheer e colleghi (2021), i pazienti sono stati divisi in due gruppi: uno riceveva terapia *con Mirror therapy* associata ad una routine di attività fisica, mentre il secondo gruppo era sottoposto a esecuzione ed immaginazione motoria per l'arto fantasma in aggiunta ad attività fisica adattata.

L'esecuzione motoria per l'arto fantasma (PME) consiste nel movimento immaginario dell'arto mancante e nel suo riconoscimento nello spazio. Dopodiché si chiede ai pazienti di portare l'arto sano nella stessa posizione dell'arto fantasma e di cercare di muoverli insieme in direzioni opposte. In questo studio gli esercizi venivano ripetuti non più di 15 volte in una sessione di allenamento. I soggetti inoltre erano sottoposti a sedute fisioterapiche con il fine di mobilizzare ed allungare i muscoli nel moncherino.

In questo studio è stato evidenziato come la PME abbia portato ad una diminuzione della sensazione di dolore nei pazienti e quindi ad un miglioramento della qualità di vita, anche grazie al maggior controllo del moncone e della muscolatura residua dati dal movimento dell'arto. Inoltre, i cambiamenti positivi riscontrati dagli studiosi possono essere attribuiti alla terapia fisica quale: stretching, rafforzamento statico ed esercizi dinamici che possono facilitare la guarigione delle ferite.

Una caratteristica della sindrome da arto fantasma è la differenza tra la propriocezione corporea e la corrispondenza corporea. Come riportato nell'articolo di De Nunzio e collaboratori (2018) nel movimento di un arto integro i comandi sono regolati da feedback propriocettivi e visivi, cosa che nell'arto fantasma non avviene, generando così impulsi dolorosi. Ciò può essere alleviato dall'attività motoria per il moncone, conferendo maggior sensibilità e propriocezione all'estremità. Inoltre, l'attivazione dei muscoli rimanenti del moncone è compromessa nei pazienti con dolore da arto fantasma e la differenziazione in diverse azioni è minima se non assente. L'attività motoria in queste situazioni ha come obiettivo l'allenamento del controllo motorio, della propriocezione e il rinforzo dei muscoli residui. Nell'articolo di De Nunzio e colleghi (2018), gli studiosi hanno cercato di ideare un nuovo protocollo per ridurre il dolore da arto fantasma negli arti superiori, basato su movimenti volontari dell'arto fantasma, feedback visivi e tattili. Ai partecipanti è stato chiesto di allenare il movimento di polso, dita e mano dell'arto fantasma con specifici movimenti imparando a controllare lo sforzo muscolare. Inoltre, il feedback visivo (*Mirror therapy*) e tattile multimodale è servito anche come rinforzo delle afferenze sensoriali già disponibili a livello del moncone (afferenze propriocettive dall'attività muscolare).

Un altro studio di Ozlem Ulger e colleghi (2009) avvalorava la tesi del beneficio dato dall'attività adattata per dolore da arto fantasma. In questo studio ai pazienti è stato somministrato un protocollo di allenamento basato sul controllo del moncone e dell'arto sano. I risultati hanno dimostrato come la tensione muscolare generata dagli esercizi a livello del moncone abbia diminuito la percezione del dolore dell'arto fantasma e la sua intensità. Inoltre, gli studiosi confermano la teoria più volte espressa in altre ricerche che vede la diminuzione del dolore da arto fantasma

sia dovuta alla riorganizzazione corticale, e quindi alle stimolazioni nervose che ne derivano.

Prendendo in considerazione corridori amputati a livello degli effettori inferiori e dolore da arto fantasma, la riqualificazione dell'andatura assume aspetti rilevanti, in quanto diminuisce i sintomi dati dalla sindrome migliorando la meccanica dei gesti semplici come camminare. Nell'articolo di Santer e collaboratori (2021) viene descritto un protocollo di riabilitazione basato sull'analisi dell'andatura in un'atleta con amputazione trans femorale. A seguito dell'amputazione l'atleta mostrava, oltre ai sintomi comuni della sindrome da arto fantasma, scompensi di forza e debolezza del core (retto dell'addome, obliqui, trasverso dell'addome, muscoli para spinali, quadrato dei lombi, muscoli del pavimento pelvico, glutei, flessori dell'anca, multifido e obliqui interni) nonché adattamenti posturali scorretti, come inclinazione anteriore della lordosi lombare durante l'esecuzione di esercizi riabilitativi. Successivamente, all'analisi del ciclo del passo sono stati prescritti esercizi correttivi bilaterali, di stabilità, di equilibrio, e di rinforzo muscolare. Con l'acquisizione dei prerequisiti si è passati poi ad una situazione dinamica, pur non mettendosi in condizione di far provare dolore all'atleta. Durante la riabilitazione, l'atleta ha dimostrato miglioramenti significativi riguardo ai sintomi del dolore da arto fantasma riportati, e dopo otto settimane i sintomi sono completamente spariti riducendo anche il bisogno della terapia farmacologica. Questi risultati potrebbero essere molto utili per gli atleti che soffrono di sindrome da arto fantasma in quanto dopo un'amputazione risulta difficile l'idea di poter praticare ancora il proprio sport specie se ci si trova in una condizione dolorosa come quella della sindrome.

## **CAPITOLO 4**

### **PROTESI INNOVATIVE E VISORI 3D PER LA CURA DELLA SINDROME**

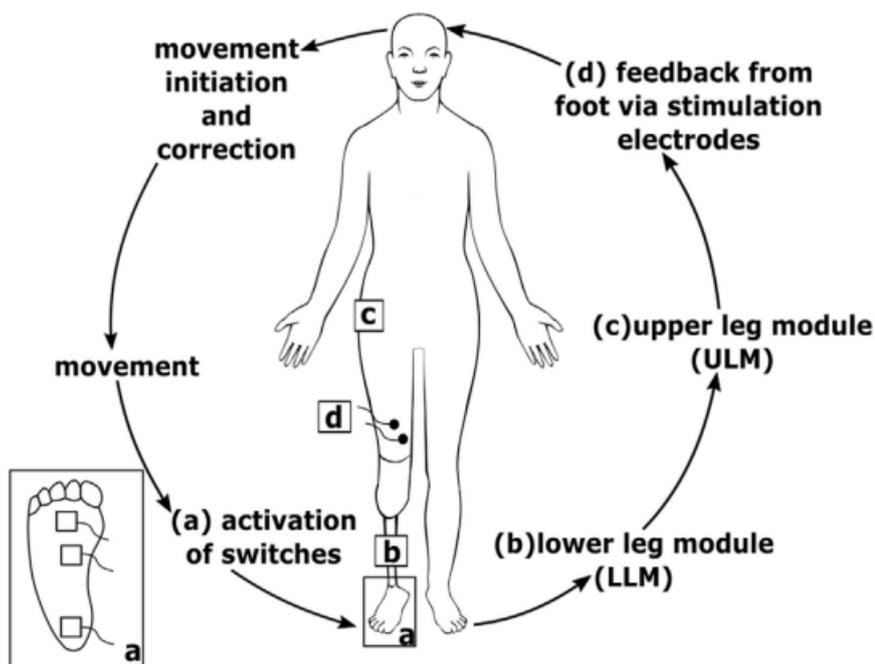
In questo capitolo verranno presentate le innovazioni nel campo delle protesi ed il loro utilizzo per la cura della sindrome da arto fantasma. Inoltre, verranno trattati dei protocolli di allenamento utilizzati con questi dispositivi al fine di migliorare la vita dei pazienti nei movimenti quotidiani. Successivamente, l'attenzione verrà posta alle ultime ricerche tecnologiche e più nello specifico al ruolo dei visori 3D nella terapia per il dolore da arto fantasma.

#### **4.1 Le protesi ed il loro utilizzo**

A seguito di un'amputazione, ai pazienti può essere consigliato l'utilizzo di una protesi, e se soffrono di sindrome da arto fantasma il processo di riabilitazione con questi dispositivi può essere doloroso. Questo aspetto interessa l'attenzione di numerosi studi e ricerche che lavorano per porvi rimedio perfezionandosi nel ricreare un movimento quanto più "naturale" possibile.

Nello studio di Dietrich e collaboratori (2018) la domanda d'indagine era se fosse possibile modificare la riorganizzazione neurale alla base della sindrome da arto fantasma con l'utilizzo di protesi con feedback somatosensoriale. Per determinare ciò sono state utilizzate protesi di Sauerbruch. Esse hanno un dispositivo meccanico collegato al muscolo del moncone tramite cavi che azionano un'asta che termina all'estremità prossimale in un tunnel creato chirurgicamente. Gli studiosi hanno testato precedentemente l'utilizzo di queste protesi su amputati agli arti superiori, avendo successo nella riduzione della sindrome da arto fantasma (Dietrich et al. 2012). Il funzionamento di queste protesi sui pazienti si basa sui movimenti innescati dalla contrazione muscolare del moncone che provoca la flessione delle dita della protesi e quindi la messa in atto di una presa, con forza differente a seconda dell'intensità della contrazione muscolare. Successivamente, il rilassamento del muscolo apre le dita e rilascia la presa. Esiste quindi un controllo motorio diretto ed un feedback somatosensoriale della mano protesica che ha origine nei muscoli del moncone. Tuttavia, Dietrich e collaboratori riportano la

mancanza di materiale riguardo all'utilizzo di queste protesi per le amputazioni agli arti inferiori ponendosi dunque l'obiettivo di ricerca che ora verrà illustrato. La protesi utilizzata per testare i pazienti era quella estetica a cui veniva applicato un sistema a feedback somatosensoriale. Il sistema comprendeva tre sensori di pressione e interruttori fissati alla pianta del piede della protesi (tallone, superficie esterna centrale e alluce valgo) in corrispondenza della linea di carico del piede della protesi. Le pressioni degli interruttori venivano trasmesse al moncone tramite un modulo a connessione bluetooth che erogava stimoli elettro cutanei. (Figura 2). I pazienti presi in esame sono stati sottoposti ad un allenamento su terreno irregolare di varia natura e con varie inclinazioni. È stato quindi valutato il movimento del piede protesico ed è stata utilizzata una camminata semplice in piano tra due piloni posti a venticinque metri per la durata di due minuti, registrando poi la distanza percorsa in metri. Gli esiti dello studio sono stati positivi, in quanto i pazienti hanno riportato una diminuzione dei sintomi dovuti alla sindrome da arto fantasma nonché un miglioramento nella funzionalità dei movimenti con la protesi.

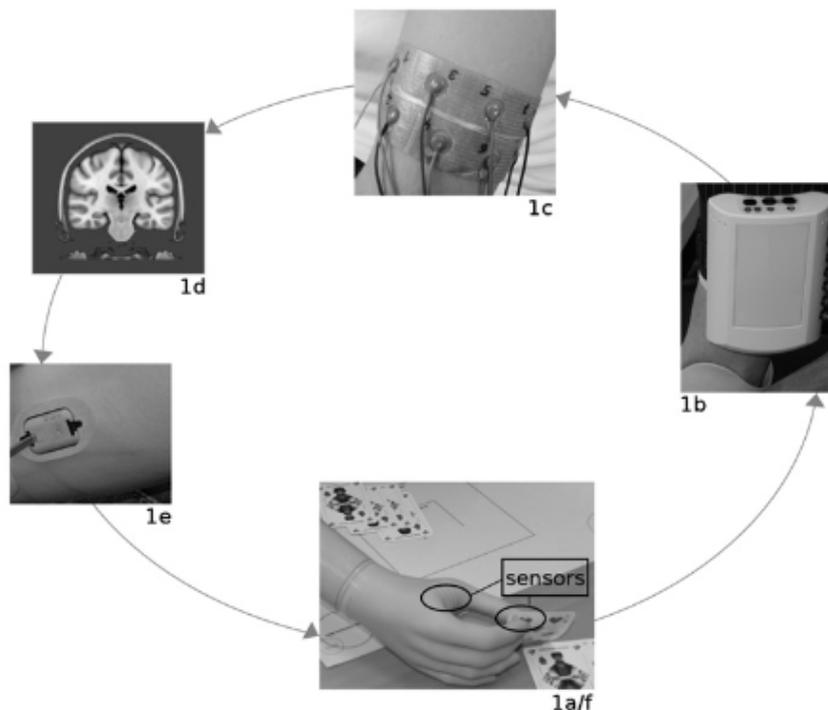


**FIGURA 2.**

Schema del sistema tecnico utilizzato nello studio di Dietrich et al. (2018). (a) I sensori sulla protesi del piede rilevano il contatto con il suolo e inviano un segnale al modulo della gamba inferiore

(LLM) (b); LLM invia informazioni al modulo della gamba superiore (ULM) (c) tramite connessione Bluetooth. ULM genera segnali di stimolazione elettro cutanea che vengono applicati tramite gli elettrodi di stimolazione sulla coscia

Un altro interessante studio della ricercatrice Preißler e collaboratori (2017) prende in analisi l'utilizzo delle protesi con feedback somatosensoriale, applicandolo ad uno specifico allenamento finalizzato al miglioramento dell'utilizzo funzionale delle protesi, ad una plasticità morfologica neurale delle strutture cerebrali, ed a una riduzione del dolore da arto fantasma. L'allenamento proposto dagli studiosi aveva una durata di dieci giorni lavorativi con sedute da tre ore e mezza, ed in caso di necessità con recuperi di 20 minuti. L'attività motoria proposta comprendeva un esercizio di precisione come l'infilare quanti più oggetti possibile in ogni piccolo foro di una parete in un minuto, il secondo compito era una variazione del gioco "Torre di Hanoi" (rompicapo matematico), dove si chiedeva al paziente di infilare i dischi di legno da un'asticella all'altra, da destra a sinistra in trenta secondi. Ad ogni allenamento ai pazienti veniva chiesta un'autovalutazione dell'utilizzo della protesi con punteggio numerico. Le protesi agli arti superiori utilizzate per questo protocollo hanno permesso di misurare la forza della presa attraverso otto sensori di pressione situati nelle fessure tra pollice e indice della mano protesica. La forza del soggetto veniva trasformata in segnali elettrici attraverso la componente di stimolazione del dispositivo che successivamente venivano trasmessi al moncone in stimoli elettro cutanei. (Figura 3).



**FIGURA 3.**

I sensori nella piega tra pollice e indice misurano la forza della presa (a). Queste informazioni vengono inviate a un microcontrollore che converte i dati di pressione in schemi di stimolo elettrico (b). Stimoli elettrici vengono applicati alla pelle dell'arto residuo (c). Il paziente impara a interpretare questo feedback (d) e a utilizzare queste informazioni per il controllo motorio della protesi (e), realizzato misurando la contrazione muscolare con i mioelettrodi sulla superficie cutanea. Immagine tratta da Dietrich et al. (2012).

Nello studio di Preißler et al. (2017), pazienti hanno dimostrato una notevole riduzione del dolore dovuto alla sindrome da arto fantasma e un significativo miglioramento nell'utilizzo funzionale delle protesi, nonché piccole modificazioni dello spessore corticale del giro post centrale nell'emisfero omolaterale all'estremità allenata e nelle aree dei flussi visivi che i ricercatori ipotizzano sia dovuto all'allenamento. Gli studiosi suppongono che questo miglioramento avvenga grazie agli stimoli che vengono applicati sul moncone creando un'"illusione" per il sistema nervoso centrale della presenza effettiva dell'arto. Inoltre, considerano anche la possibilità che l'attenzione del soggetto sia spostata dal dolore alla percezione degli stimoli, e ciò di conseguenza comporti una riduzione dei sintomi dolorosi percepiti.

## 4.2 Influenze neurologiche della realtà virtuale sui pazienti

L'utilizzo della realtà virtuale per la cura della sindrome da arto fantasma si basa sugli stessi concetti della *Mirror Therapy* trattata nei capitoli precedenti. L'effetto positivo della terapia avviene fornendo un mezzo per collegare i sistemi visivo e motorio per aiutarli a ricreare un'immagine corporea coerente e ad aggiornare i modelli interni di controllo motorio (Murray et al., 2007). Tuttavia, la *Mirror Therapy* presenta delle limitazioni in quanto il paziente non può muoversi liberamente ma deve mantenere una posizione statica dipendente dallo specchio, inoltre il paziente deve ignorare l'arto intatto per concentrarsi sul suo riflesso. Una soluzione a queste problematiche può essere la *realtà virtuale immersiva (IVR)* che può essere utilizzata come terapia analoga alla *Mirror therapy*, ma che permette di creare un'illusione di movimento dell'arto fantasma in uno spazio fenomenico.

Gli obiettivi di Murray e collaboratori (2007) erano quelli di provare come lo sviluppo di questa tecnologia comportasse una riduzione del dolore da arto fantasma. Per generare l'immagine corporea all'interno della realtà virtuale sono stati applicati dei sensori alle articolazioni del gomito e del polso o del ginocchio e della caviglia in base alla tipologia di amputazione. Un rilevatore di movimento ha monitorava i movimenti della testa e delle braccia e delle gambe. Un ambiente virtuale minimo rappresentava il partecipante all'interno di una stanza, da un punto di vista incarnato (Figura 4).

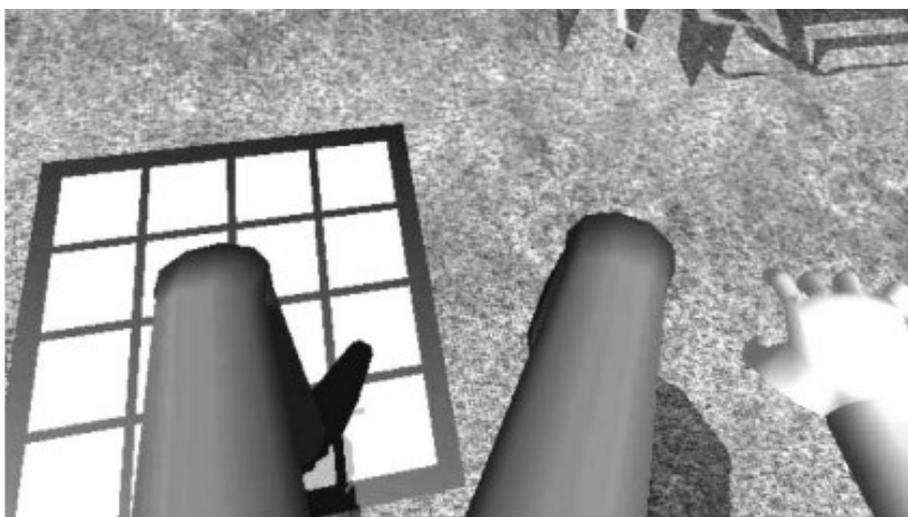


FIGURA 4.

Una possibile visuale dei pazienti amputati all'interno della realtà virtuale utilizzata nello studio di Murray et al., (2007)

Il protocollo di allenamento consisteva nell'utilizzo del sistema IVR per un periodo di 30 minuti, completando diversi compiti. È stata fornita ai partecipanti una rappresentazione corporea virtuale completa ed una dell'arto fantasma resa possibile grazie alla trasposizione dell'arto non amputato. I compiti ai quali erano sottoposti i pazienti erano ad esempio, di collocare l'arto virtuale su piastrelle colorate in sequenza o calciare una palla virtuale seguendo il movimento con gli occhi. I risultati di questo studio sono risultati contrastanti in quanto non tutti i pazienti hanno provato sollievo dal dolore dato dalla sindrome. Gli studiosi considerano come possibile causa la frequenza di sessioni di allenamento relativamente bassa ed evidenziano i dati promettenti che alcuni pazienti hanno riportato, come un miglioramento del sonno durante tutta l'applicazione della terapia e la diminuzione del dolore dato dalla sindrome. Inoltre, il passato clinico dei pazienti e il tempo in cui hanno sofferto di dolore da arto fantasma influiscono moltissimo sul risultato, in quanto poche sedute non possono compensare un dolore ripetuto per anni.

Alcune differenze rilevanti tra *Mirror Therapy* e realtà virtuale possono essere date dalla risposta individuale che i pazienti presentano alla prima terapia. Infatti, alcune caratteristiche demografiche, l'intensità con la quale si presentano i sintomi della sindrome e il sesso possono comportare diverse risposte al trattamento (Rothgangel et al., 2019). Dunque, gli studiosi hanno superato alcuni vincoli della *Mirror Therapy* sostituendo l'immagine speculare dell'arto amputato con una sua rappresentazione grafica dal computer, sia nella realtà aumentata (AR), in cui elementi virtuali vengono aggiunti all'ambiente reale, che nella realtà virtuale (VR) in cui l'ambiente è completamente virtuale. Tuttavia, mancano studi clinici controllati e la maggior parte degli studi pubblicati finora sono casi di studio o serie di casi. La maggior parte degli studi si è concentrata su amputati dell'arto superiore, tuttavia, dato che la maggior parte degli amputati soffre di perdita dell'arto inferiore, Rothgangel e colleghi (2017) hanno sviluppato un'applicazione mobile che utilizza

la telecamera integrata di un dispositivo elettronico (es. tablet) per rilevare i movimenti dell'arto inferiore intatto e li visualizza sullo schermo come movimenti dell'arto fantasma, replicando in maniera digitale l'effetto della *Mirror Therapy*. Questo studio ha dimostrato benefici per quanto riguarda i sintomi da sindrome da arto fantasma ma è stato contestato in alcuni articoli. Sebbene il realismo visivo della realtà virtuale sia in continuo sviluppo la vividezza e il realismo di un arto specchiato sono ancora ineguagliabili (Rothgangel et al., 2019). Come già detto più volte all'interno di questa tesi non vi è una terapia unica e funzionale per ogni individuo ma le caratteristiche soggettive intervengono in modo importante sull'efficacia.

Gli studiosi cercano una soluzione per favorire l'autosomministrazione di una terapia efficace e funzionale con costi accessibili che si basi anche sull'utilizzo delle nuove tecnologie in commercio. Tuttavia, i pazienti devono essere istruiti e seguiti nel primo approccio agli strumenti così come avviene nella *Mirror Therapy*.

Questa è la direzione verso la quale si muove la ricerca nell'ambito della realtà virtuale per la riabilitazione da sindrome da arto fantasma. Tuttavia non vi sono sufficienti studi per poter applicare concretamente la terapia in autonomia e in modo efficace.

## **CAPITOLO 5**

### **CONCLUSIONI**

Concludendo quanto esaminato in questa tesi possiamo affermare che la sindrome da arto fantasma continua ad essere oggetto di numerose ricerche, anche grazie alle particolarità che la contraddistinguono. Infatti, in questa patologia non vi sono sintomi tangibili e visibili da parte dello specialista, ma la diagnosi viene fatta basandosi su quanto riportato dal singolo paziente. Quest'ultima caratteristica per molto tempo è stata la causa di ricoveri ingiustificati come malattia mentale, soprattutto nel periodo della guerra civile americana (Finger et al., 2003). Inoltre, come più volte riportato nel testo, l'individualità di ogni paziente fa sì che non vi sia una terapia risolutiva per tutti, ma che ognuno abbia specifiche esigenze e di conseguenza protocolli adattati (Collins et al., 2018). A sostegno di ciò sono state precedentemente trattate alcune delle terapie non tradizionali per la cura dell'arto fantasma come la stimolazione elettrica nervosa transcutanea, le immagini motorizzate graduate e la Mirror therapy. Questi sono alcuni dei protocolli impiegati nella cura della sindrome da arto fantasma che si pongono il medesimo obiettivo: rendere la vita del paziente amputato quanto più semplice e funzionale possibile. Inoltre, all'interno di questo elaborato è stata evidenziata l'importanza dell'attività fisica per un recupero più rapido ed efficiente, in quanto una muscolatura attiva aiuta il paziente nella riabilitazione e gli conferisce più stabilità e sicurezza nelle azioni svolte con la protesi (Zaheer et al., 2021). È stata presa in analisi anche la componente dell'immaginazione motoria in quanto il movimento parte dall'intenzione e quindi dalla pianificazione di esso, ma non è concretamente realizzabile. Infatti, nella sindrome presa in analisi la componente riorganizzativa della corteccia motoria è considerata possibile causa della sintomatologia (Flor et al., 1995) e quindi l'immaginazione del movimento dell'arto fantasma può aiutare a ricreare un'immagine corporea adeguata ai fini di ridurre il dolore.

Questa tesi nasce dall'interesse di chi la scrive per la riabilitazione dei pazienti che manifestano i sintomi della sindrome da arto fantasma e dall'inserimento dell'attività motoria ai fini di migliorarne la sintomatologia. Infatti, nonostante sia una condizione comune a molti amputati ci sono ancora alcune zone d'ombra che i

ricercatori cercano di chiarire per comprendere al meglio la sintomatologia e la terapia più efficace. Il progresso e il lavoro della ricerca nel settore delle protesi sono in continuo mutamento così come la riabilitazione per pazienti amputati. L'introduzione di tecnologie sempre più avanzate e specializzate, consente al mondo della medicina di sviluppare nuovi protocolli d'intervento e terapie per diverse patologie, come la sindrome da arto fantasma.

## Bibliografia

Browne, J. D., Fraiser, R., Cai, Y., Leung, D., Leung, A., & Vaninetti, M. (2022). Unveiling the phantom: What neuroimaging has taught us about phantom limb pain. *Brain and behavior*, *12*(3), e2509. <https://doi.org/10.1002/brb3.2509>

Brunelli, S., Morone, G., Iosa, M., Ciotti, C., De Giorgi, R., Foti, C., & Trallesi, M. (2015). Efficacy of progressive muscle relaxation, mental imagery, and phantom exercise training on phantom limb: a randomized controlled trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, *96*(2), 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.09.035>

Collins, K. L., Russell, H. G., Schumacher, P. J., Robinson-Freeman, K. E., O'Connor, E. C., Gibney, K. D., Yambem, O., Dykes, R. W., Waters, R. S., & Tsao, J. W. (2018). A review of current theories and treatments for phantom limb pain. *The Journal of clinical investigation*, *128*(6), 2168–2176. <https://doi.org/10.1172/JCI94003>

De Nunzio, A. M., Schweisfurth, M. A., Ge, N., Falla, D., Hahne, J., Gödecke, K., Petzke, F., Siebertz, M., Dechent, P., Weiss, T., Flor, H., Graitmann, B., Aszmann, O. C., & Farina, D. (2018). Relieving phantom limb pain with multimodal sensory-motor training. *Journal of neural engineering*, *15*(6), 066022. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aae271>

Dietrich, C., Walter-Walsh, K., Preissler, S., Hofmann, G. O., Witte, O. W., Miltner, W. H., & Weiss, T. (2012). Sensory feedback prosthesis reduces phantom limb pain: proof of a principle. *Neuroscience letters*, *507*(2), 97–100. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2011.10.068>

Dietrich, C., Nehrlich, S., Seifert, S., Blume, K. R., Miltner, W., Hofmann, G. O., & Weiss, T. (2018). Leg Prosthesis With Somatosensory Feedback Reduces Phantom Limb Pain and Increases Functionality. *Frontiers in neurology*, *9*, 270. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00270>

Finger, S., & Hustwit, M. P. (2003). Five early accounts of phantom limb in context: Paré, Descartes, Lemos, Bell, and Mitchell. *Neurosurgery*, *52*(3), 675–686. <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000048478.42020.97>

Flor, H., Elbert, T., Knecht, S., Wienbruch, C., Pantev, C., Birbaumer, N., Larbig, W., & Taub, E. (1995). Phantom-limb pain as a perceptual correlate of cortical reorganization following arm amputation. *Nature*, 375(6531), 482–484. <https://doi.org/10.1038/375482a0>

Jensen, T. S., Krebs, B., Nielsen, J., & Rasmussen, P. (1985). Immediate and long-term phantom limb pain in amputees: incidence, clinical characteristics and relationship to pre-amputation limb pain. *Pain*, 21(3), 267–278. [https://doi.org/10.1016/0304-3959\(85\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0304-3959(85)90090-9)

Jiang, G., Yin, X., Li, C., Li, L., Zhao, L., Evans, A. C., Jiang, T., Wu, J., & Wang, J. (2015). The Plasticity of Brain Gray Matter and White Matter following Lower Limb Amputation. *Neural plasticity*, 2015, 823185. <https://doi.org/10.1155/2015/823185>

Kaur, A., & Guan, Y. (2018). Phantom limb pain: A literature review. *Chinese journal of traumatology = Zhonghua chuang shang za zhi*, 21(6), 366–368. <https://doi.org/10.1016/j.cjtee.2018.04.006>

Makin T. R. (2021). Phantom limb pain: thinking outside the (mirror) box. *Brain*, 144(7), 1929–1932. <https://doi.org/10.1093/brain/awab139>

Melzack R. (1990). Phantom limbs and the concept of a neuromatrix. *Trends in neurosciences*, 13(3), 88–92. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(90\)90179-e](https://doi.org/10.1016/0166-2236(90)90179-e)

Murray, C. D., Pettifer, S., Howard, T., Patchick, E. L., Caillette, F., Kulkarni, J., & Bamford, C. (2007). The treatment of phantom limb pain using immersive virtual reality: three case studies. *Disability and rehabilitation*, 29(18), 1465–1469. <https://doi.org/10.1080/09638280601107385>

Peng, W. W., Tang, Z. Y., Zhang, F. R., Li, H., Kong, Y. Z., Iannetti, G. D., & Hu, L. (2019). Neurobiological mechanisms of TENS-induced analgesia. *NeuroImage*, 195, 396–408. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.03.077>

Preißler, S., Thielemann, D., Dietrich, C., Hofmann, G. O., Miltner, W., & Weiss, T. (2017). Preliminary Evidence for Training-Induced Changes of

Morphology and Phantom Limb Pain. *Frontiers in human neuroscience*, 11, 319. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00319>

Priganc, V. W., & Stralka, S. W. (2011). Graded motor imagery. *Journal of hand therapy: official journal of the American Society of Hand Therapists*, 24(2), 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2010.11.002>

Ramachandran, V. S., & Rogers-Ramachandran, D. (1996). Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors. *Proceedings. Biological sciences*, 263(1369), 377–386. <https://doi.org/10.1098/rspb.1996.0058>

Rothgangel, A., & Bekrater-Bodmann, R. (2019). Mirror therapy versus augmented/virtual reality applications: towards a tailored mechanism-based treatment for phantom limb pain. *Pain management*, 9(2), 151–159. <https://doi.org/10.2217/pmt-2018-0066>

Rothgangel, A., Braun, S., Smeets, R., & Beurskens, A. (2017). Design and Development of a Telerehabilitation Platform for Patients With Phantom Limb Pain: A User-Centered Approach. *JMIR rehabilitation and assistive technologies*, 4(1), e2. <https://doi.org/10.2196/rehab.6761>

Santer, J., MacDonald, S., Rizzone, K., Biehler, S., & Beiswenger, T. (2021). Strategies for Gait Retraining in a Collegiate Runner with Transfemoral Amputation: A Case Report. *International journal of sports physical therapy*, 16(3), 862–869. <https://doi.org/10.26603/001c.23671>

Ulger, O., Topuz, S., Bayramlar, K., Sener, G., & Erbahçeci, F. (2009). Effectiveness of phantom exercises for phantom limb pain: a pilot study. *Journal of rehabilitation medicine*, 41(7), 582–584. <https://doi.org/10.2340/16501977-0380>

Yıldırım, M., & Kanan, N. (2016). The effect of mirror therapy on the management of phantom limb pain. *Agri : Agri (Algoloji) Dernegi'nin Yayin organidir = The journal of the Turkish Society of Algology*, 28(3), 127–134. <https://doi.org/10.5505/agri.2016.48343>

Zaheer, A., Malik, A. N., Masood, T., & Fatima, S. (2021). Effects of phantom exercises on pain, mobility, and quality of life among lower limb amputees; a randomized controlled trial. *BMC neurology*, *21*(1), 416. <https://doi.org/10.1186/s12883-021-02441-z>

## RINGRAZIAMENTI

Ringrazio per primi i miei genitori *Lidia e Verner* senza i quali questo percorso non sarebbe stato possibile. Vi sono immensamente grata per tutto quello che avete cercato di trasmettermi e perché nemmeno per un secondo, nella mia breve vita, mi sono mancate le cose più importanti ovvero l'amore, il sostegno da parte vostra e la serenità nel crescere. Non basterebbe un'altra tesi per esprimere quello che rappresentate per me.

Ringrazio tutta la mia famiglia che, anche se dall'altra parte del telefono, è stata presente per appoggiarmi.

Ringrazio i miei amici, perché senza di loro sarebbe stato tutto molto più difficile se non impossibile. In particolare, ringrazio *Silvia*, mia compagna di viaggio dal primo giorno di questa esperienza veneta e dalla quale ho imparato la dolcezza che si nasconde dietro i momenti più semplici, e *Lorenzo* che mi ha sempre fatta sentire importante ad ogni ritorno a casa.

Ringrazio il dottor. *Andrea Fabello* che per me è sempre stato ed è tutt'ora una figura di riferimento, nonché il motivo per cui ho deciso di intraprendere il percorso nelle scienze motorie.

Ringrazio le persone che ritengo importanti nella mia vita che, in un modo o nell'altro, riguardano anche il mio percorso universitario, non vi nominerò tutti perché infondo non sarà un nome su una tesi a fare un legame.