



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI PADOVA**

**Dipartimento di Filosofia, Sociologia, Pedagogia e Psicologia  
Applicata**

**Corso di Laurea in Scienze Psicologiche Sociali e del Lavoro**

**La neuroarcheologia del movimento: uno studio di co-  
registrazione TMS-EEG**

**The neuroarcheology of movement: A TMS-EEG co-registration study**

*Relatrice*

**Prof. Luisa Sartori, DPG**

*Correlatore*

**Dott. Antonino Visalli, DNS**

***Laureanda: Sabrina Cadoni***

***Matricola: 2016087***

Anno Accademico 2022/2023



## Indice

<b>Abstract .....</b>	<b>5</b>
<b>Capitolo 1: Introduzione .....</b>	<b>7</b>
1.1 Il movimento .....	8
1.2 I movimenti della mano .....	10
1.3 Ceramica e litica: le tecniche di lavorazione .....	13
<i>1.3.1 Stimoli sperimentali.....</i>	<i>17</i>
1.4 Sistema Mirror .....	19
<b>Capitolo 2: Metodo .....</b>	<b>23</b>
2.1 I partecipanti .....	23
2.2 Gli strumenti .....	24
2.2.1 EEG .....	24
2.2.2 TMS .....	25
2.2.3 TMS-EEG: una registrazione simultanea .....	26
2.2.4 Ampiezze .....	26
2.3 Procedura: condizioni di somministrazione.....	27
2.4 Preprocessamento dei dati.....	31
2.5 Analisi .....	31
<b>Capitolo 3: Risultati.....</b>	<b>33</b>
3.1 ANOVA a misure ripetute .....	33
3.2 Modello misto .....	34
<b>Capitolo 4: Discussione.....</b>	<b>37</b>
<b>Capitolo 5: Conclusione .....</b>	<b>39</b>
<b>Riferimenti bibliografici.....</b>	<b>41</b>



## Abstract

Questo lavoro è il risultato di un esperimento pilota che va a porre le basi per lo studio multidisciplinare della Neuro-Archeologia, svolto in collaborazione con i Dipartimenti dei Beni Culturali (DBC) e di Neuroscienze (DNS) dell'Università di Padova.

Questo studio riprende i risultati classici emersi in letteratura sulla neuroplasticità cerebrale e sul funzionamento del Sistema specchio e li applica allo studio dell'archeologia sperimentale. L'esperimento qui descritto prevedeva la registrazione concomitante dell'elettroencefalogramma (EEG) e dei potenziali evocati motori (MEP) indotti dalla stimolazione magnetica transcranica (TMS) in due fasi. Nella prima sessione (PRE), ai partecipanti era richiesto di guardare dei video sulle tecniche di lavorazione della litica e della ceramica utilizzate nel Neolitico mentre si sottoponevano alla co-registrazione. Successivamente i partecipanti svolgevano un training pratico dove venivano insegnate loro le stesse tecniche riprese nei video. Infine, tornavano in laboratorio e osservavano nuovamente i video mentre venivano ripetute le co-registrazioni per dar luogo alla seconda fase dell'esperimento (POST) e poter così indagare l'effetto dell'apprendimento. Nello studio è stato incluso anche un gruppo di controllo che non svolgeva il training, per confronto col gruppo sperimentale. Il nostro esperimento ha mostrato un effetto di plasticità corticospinale specifico per i partecipanti sperimentali e ha così permesso alla Neuro-Archeologia di prendere avvio come nuova materia di studio.



## Capitolo 1: Introduzione

In questo esperimento siamo andati a studiare la plasticità della corteccia motoria quando apprendiamo nuovi compiti che richiedono di applicare movimenti specifici e gesti fin mai attuati prima. La plasticità neurale è infatti quella capacità del cervello di cambiare, sia a livello strutturale sia funzionale, come risposta all'esperienza (nel nostro caso) o a delle lesioni quali conseguenze di traumi od incidenti. Il cambiamento dovuto all'esperienza può avvenire su diverse scale:

- a livello funzionale del singolo neurone, in cui migliora la prestazione della membrana o dei ricettori, ma la loro struttura rimane inalterata;
- a livello strutturale del singolo neurone, dove invece si osserva un effettivo aumento dei dendriti, chiamato arborizzazione dendritica, oppure un aumento del numero di sinapsi (*sprouting*);
- a livello di un gruppo di neuroni, per esempio seguendo le regole di Hebb, secondo cui è possibile rafforzare le sinapsi se un neurone pre-sinaptico attiva ripetutamente un neurone post-sinaptico;
- a livello di network di neuroni, vale a dire che potremmo osservare un cambiamento funzionale di un gruppo di neuroni o una modifica strutturale della connettività anatomica tra diverse aree cerebrali.

Studi sull'apprendimento dimostrano come sia possibile una riorganizzazione dell'*homunculus motorio* in seguito all'esperienza (Pascual-Leone, 2001). L'*homunculus motorio* è una rappresentazione della corteccia motoria umana. Le aree dell'*homunculus* sono estremamente diverse dalle parti del corpo effettive. Infatti, le aree del corpo che hanno bisogno di un controllo maggiore sono caratterizzate da un numero maggiore di neuroni. Per questo motivo, la rappresentazione delle varie aree dell'*homunculus motorio* è sproporzionata rispetto alla loro grandezza effettiva. Per esempio, la rappresentazione delle mani nell'*homunculus* richiede una quantità di superficie corticale maggiore, a causa del gran numero di movimenti fini che sono richiesti per i movimenti di *grasping* o di *reaching* (Freberg, L.A. 2007).

Kauffman, Théoret e Pascual-Leone (2002) hanno condotto un esperimento su pazienti sia vedenti che non vedenti per studiarne la neuroplasticità; la lettura Braille nei non vedenti è associata a una serie di cambiamenti neuroplastici, come una maggiore

rappresentazione sensomotora delle dita e l'utilizzo della corteccia occipitale durante la discriminazione tattile. Questo vuol dire che anche durante la lettura Braille sembrerebbe che le persone non vedenti utilizzino la corteccia visiva. Gli autori hanno ipotizzato che una situazione simile potrebbe verificarsi in persone vedenti, bendate, in seguito ad un training intensivo della lettura Braille. I loro risultati dimostrano effettivamente che bendare per cinque giorni i partecipanti migliora la loro capacità di riconoscere i caratteri Braille rispetto ai partecipanti di controllo. Perlopiù, uno studio di risonanza magnetica funzionale (fMRI) ha mostrato che negli stessi soggetti bendati si poteva osservare un'attivazione della corteccia visiva in risposta alla stimolazione tattile. Questa attivazione era particolarmente rilevante il quinto e ultimo giorno di bendaggio, mentre il sesto giorno, dopo che la vista era stata ripristinata da circa venti ore, l'attivazione era scomparsa.

Al fine di poter comprendere al meglio il fulcro del nostro esperimento, in primo luogo tratterò in maniera generale il sistema che controlla il movimento e l'osservazione dell'azione. In secondo luogo, mi soffermerò sui movimenti della mano, in quanto i partecipanti hanno imparato dei movimenti specifici per le due lavorazioni di argilla e selce. Esporrò quindi in cosa consistono queste due tecniche così particolari che si sono sviluppate durante il periodo del Neolitico. Infine, menzionerò il *Sistema Mirror*, fondamentale per comprendere gli effetti corticospinali emersi durante la visione dei video. Spiegherò nei capitoli successivi la metodologia e le condizioni di somministrazione e, in ultima analisi, presenterò i risultati.

## **1.1 Il movimento**

Il movimento può essere definito come il risultato di atti motori che permettono al corpo di spostarsi ed entrare in contatto con l'ambiente esterno. L'avvio del movimento è una procedura complessa, che richiede la cooperazione dei vari sistemi nel nostro cervello. I sistemi motori, infatti, ricevono informazioni sia dai sistemi sensoriali sia dai sistemi percettivi, trasformando l'informazione nervosa in energia fisica. I muscoli si possono così contrarre, permettendo al corpo di spostarsi nello spazio, di raggiungere degli oggetti e, dunque, creare movimento. I sistemi motori seguono un ordine gerarchico ben preciso. I centri superiori, che gestiscono i movimenti volontari, controllano i centri inferiori, i quali invece sono responsabili dei movimenti automatici, ovvero delle risposte



riflesse. In particolare, i sistemi motori si trovano in quattro regioni del sistema nervoso centrale: nel midollo spinale, nel tronco dell'encefalo, nella corteccia motoria e nelle cortecce premotorie. (Làdavas, E., Berti, A., *Neuropsicologia* pp. 63-64).

La corteccia motoria primaria (M1) si trova nel giro precentrale, individuata da Brodmann come area 4. Nella circonvoluzione immediatamente anteriore, invece, troviamo l'area premotoria (PMA) e l'area motoria supplementare (SMA), responsabili della pianificazione, programmazione e controllo dei movimenti.

Roland (1993), in uno studio su come prende avvio il movimento, ha chiesto ai partecipanti di imparare a memoria degli specifici movimenti della mano e, successivamente, di riprodurli. Questi movimenti sono stati studiati tramite la tomografia a emissione di positroni (PET), la quale ha permesso di individuare le parti del cervello che si attivavano durante il movimento. In particolare, le prime aree che sembravano attivarsi erano la corteccia prefrontale e i lobi parietali (Freberg, L.A., 2007, *Psicologia biologica*. Bologna: Zanichelli).

La corteccia prefrontale invia informazioni riguardo la strategia da attuare per compiere un movimento, ovvero ci dice *cosa fare*. Inoltre, anche l'area motoria supplementare (SMA) e l'area premotoria (PMA) si attivano durante l'esecuzione del movimento ed inviano informazioni sulla tattica, ovvero ci dicono *come fare* un movimento. La PMA può di fatto contribuire a "tenere attivo" il piano del movimento fino alla sua messa in atto. All'attivazione della PMA e della SMA fa seguito quella della corteccia motoria primaria, la quale permette l'esecuzione vera e propria dell'azione. I lobi parietali contribuiscono sia alla tattica sia alla strategia, in quanto ci aiutano ad avere una maggiore consapevolezza dell'esterno e una maggiore percezione dell'azione da svolgere.

I neuroni responsabili della contrazione muscolare sono i *motoneuroni alfa*, i quali sono connessi alle fibre muscolari tramite la giunzione neuromuscolare. In questo modo, se un potenziale d'azione arriva all'assone del motoneurone, allora un potenziale d'azione nella fibra muscolare produrrà un cosiddetto *twitch*, e avverrà la contrazione del muscolo. I motoneuroni alfa ricevono informazioni da due vie principali: la via ventromediale, situata nella parte ventromediale della colonna vertebrale, e la via laterale, che si trova nella parte laterale della colonna vertebrale (Freberg, L.A. 2007).

La via ventromediale controlla i movimenti delle parti più prossimali del corpo, come per esempio il collo o il tronco. È caratterizzata da quattro vie che mandano segnali ai motoneuroni alfa riguardo il mantenimento della postura, la produzione di risposte riflesse ai segnali sensoriali e l'andatura. La via laterale è caratterizzata dal tratto cortico-spinale e dal tratto rubro-spinale. Il primo nasce nella corteccia motoria e le sue fibre sono le più veloci del sistema nervoso centrale. Il tratto rubro-spinale, invece, nasce nel nucleo rosso il quale, a sua volta, riceve informazioni dalla corteccia motoria. Per questo motivo la via laterale ha un controllo diretto e indiretto sui motoneuroni alfa. Le due vie decussano lungo il midollo spinale; perciò, l'emisfero destro controllerà i movimenti della parte sinistra del corpo, mentre l'emisfero sinistro controlla la parte destra del corpo. I motivi per cui il cervello manda segnali alla parte controlaterale del corpo non sono ancora del tutto chiari, anche se sono ben visibili in quei pazienti che presentano lesioni alla corteccia motoria dovuti ad incidenti, infortuni o ictus. La via laterale permette inoltre di controllare i movimenti fini delle parti più distali del corpo, come per esempio le mani (Freberg, L.A. 2007).

Una volta attivata la corteccia primaria, dunque, l'informazione arriva al midollo spinale lungo le vie laterali, seguendo un percorso diretto oppure indiretto tramite il nucleo rosso. Gli assoni delle vie laterali mandano successivamente informazioni ai motoneuroni alfa, dando inizio alle contrazioni muscolari necessarie per eseguire i comandi che manda il cervello.

## **1.2 I movimenti della mano**

Una panoramica generale di come funziona il movimento del corpo umano ci permette di parlare, più nello specifico, dei movimenti della mano, i quali sono uno dei temi centrali del nostro esperimento.

I movimenti della mano sono tra i più variati che si sono potuti studiare, nonché quelli che hanno interessato di più i neuroscienziati. Il modo in cui riusciamo ad afferrare gli oggetti, a manipolarli e ad interagirci ci ha portato a studiare, in particolare, i movimenti di raggiungimento e di prensione, sia nei primati sia negli esseri umani. Possiamo distinguere i movimenti di prensione in *precision grip*, dove le dita sono avvolte all'oggetto come in una morsa, e *power grip*, caratterizzato dalla contrapposizione tra il pollice e una o più dita della mano. Napier (1960) ha svolto un importante lavoro riguardo

i movimenti di prensione, osservando che nonostante il movimento possa variare per un'ampia quantità di aspetti come la forza o la velocità, questo appare sempre fluido.

Gli studi sulla cinematica del movimento (Castiello, U. 2005) sono stati applicati prevalentemente su primati non umani, quali i macachi, in quanto per motivi etici è ancora difficile riuscire a studiare gli esseri umani mediante tecniche invasive. Tuttavia, le nuove tecniche di neuroimmagine, come l'utilizzo della tomografia a emissione di positroni (PET) o della risonanza magnetica funzionale (fMRI) hanno permesso di ipotizzare quali sono le aree principali che sono coinvolte e si attivano durante i movimenti di *reaching* e *grasping*.

Nelle scimmie le aree che sono coinvolte nel movimento sono principalmente la corteccia motoria primaria (F1), la corteccia premotoria (F5) e il solco parietale anteriore (AIP). In particolare, lesioni a carico di F1 producono dei deficit nel controllo della presa. Un'altra area che sembrerebbe avere un ruolo fondamentale nel controllo del movimento è il cervelletto, in quanto le informazioni che, dalla corteccia motoria primaria arrivano al midollo spinale, passano anche per il cervelletto. Per quanto riguarda la corteccia premotoria e il solco parietale anteriore, queste due aree servono in particolar modo per trasformare le proprietà intrinseche dell'oggetto in azioni. La *trasformazione visuo-motoria* è possibile proprio grazie all'area F5 e all'area AIP, le quali codificano le azioni di *grasping* in base al tipo di oggetto che si vuole afferrare. Tuttavia, il solco parietale anteriore manda le informazioni riguardo l'oggetto per tutta la durata del movimento, mentre la corteccia premotoria si limita a codificare un particolare momento dell'azione (Castiello, U. 2005). Ulteriori studi (Rizzolatti, Fogassi e Gallese, 1997) hanno ipotizzato un modello secondo cui AIP invia delle descrizioni strutturali di uno stimolo tridimensionale, dando la possibilità a F5 di decidere varie modalità di afferramento per un oggetto. Successivamente, F5 sceglierebbe il *grasping* più appropriato in base al contesto e alla decisione presa dal soggetto, in quanto è un'area che riceve informazioni anche dalla corteccia prefrontale, coinvolta nel *decision-making* e nell'organizzazione dei movimenti. Il circuito che si va a creare tra queste due aree nel cervello permetterebbe, inoltre, di mantenere in memoria la rappresentazione dell'oggetto più adatta ad uno specifico movimento, anche quando l'oggetto non è visibile o davanti alla persona (Làdavas, E., Berti, A. 2020).

Come già accennato in precedenza, le tecniche di neuroimmagine insieme alla letteratura ci hanno permesso di studiare il movimento nell'essere umano. Così come nelle scimmie, anche nell'essere umano il solco parietale anteriore (AIP) svolge una funzione fondamentale nei movimenti di prensione. Infatti, lesioni a carico di quest'area comportano un deficit particolarmente evidente nella presa, mentre il movimento di raggiungimento (*reaching*) sembrerebbe rimanere intatto. Le altre aree studiate nelle scimmie, come la corteccia motoria primaria e l'area premotoria, sono risultate particolarmente attive anche negli esseri umani, insieme alla corteccia parietale, durante il *precision grip* e il controllo della forza durante il movimento (Castiello, U. 2005).

È bene menzionare che il *grasping*, sia negli esseri umani sia nei macachi, cambia a seconda dell'oggetto con cui ci si interfaccia; sembrerebbe che la presa sia più precisa per oggetti a noi conosciuti, piuttosto che oggetti che non abbiamo mai afferrato prima. In una situazione artificiale come quella del laboratorio, un paziente con lesioni sia alle aree visive secondarie sia al lobulo parietale inferiore (IPL), posto di fronte a degli oggetti neutri, apriva esageratamente le dita della mano e otteneva come risultato una presa imprecisa e maldestra. Tuttavia, se posto di fronte ad oggetti a lui conosciuti, il movimento era più fluido, a dimostrazione del fatto che utilizziamo le nostre conoscenze e la nostra esperienza passata per approcciarci alla realtà anche quando si tratta di compiere dei movimenti. Nella sua rassegna sulla cinematica del movimento, Castiello (2005) afferma che: "Una questione fondamentale che qualsiasi modello di *grasping* deve affrontare è che gli oggetti possono essere afferrati in modi diversi, e la presa che viene scelta dipende dalla proprietà visiva dell'oggetto".

Nel cervello esistono dei percorsi diversi che permettono la percezione degli oggetti: una via ventrale per quanto riguarda la percezione dell'oggetto ed una via dorsale per le azioni che svolgiamo in funzione di un oggetto. La via dorso-dorsale è quel percorso che guida le azioni di *reaching* e *pointing* dell'arto. Queste azioni sono finalizzate, ma spesso inconsapevoli, cioè non dipendono da una pianificazione conscia. La via ventro-dorsale è invece finalizzata per i movimenti di *grasping* e *affordance* (Làdavas, E., Berti, A. 2020).

Il concetto di *affordance* esprime una relazione tra l'oggetto e la manipolazione che attuiamo su di esso. Ogni oggetto possiede delle sue *affordance* specifiche, che ci permettono di sapere quali sono le azioni corrette per manipolarlo. L'*affordance* è data

ulteriormente dal contesto in cui utilizziamo l'oggetto, il quale ci indica la funzione specifica dell'oggetto e il suo utilizzo; dalle capacità cognitive, le quali ci permettono di selezionare il tool più appropriato e di pianificarne l'uso per svolgere un'azione precisa o raggiungere un *goal* che ci siamo prefissati e, ovviamente, dalle capacità motorie per compiere i movimenti adatti all'utilizzo dello strumento. L'utilizzo di *tool* e l'apprendimento di movimenti fini, mirati al raggiungimento di un particolare obiettivo, come la creazione di un vaso o di una lama, sarà ulteriormente approfondito in *Ceramica e litica: le tecniche di lavorazione*.

### **1.3 Ceramica e litica: le tecniche di lavorazione**

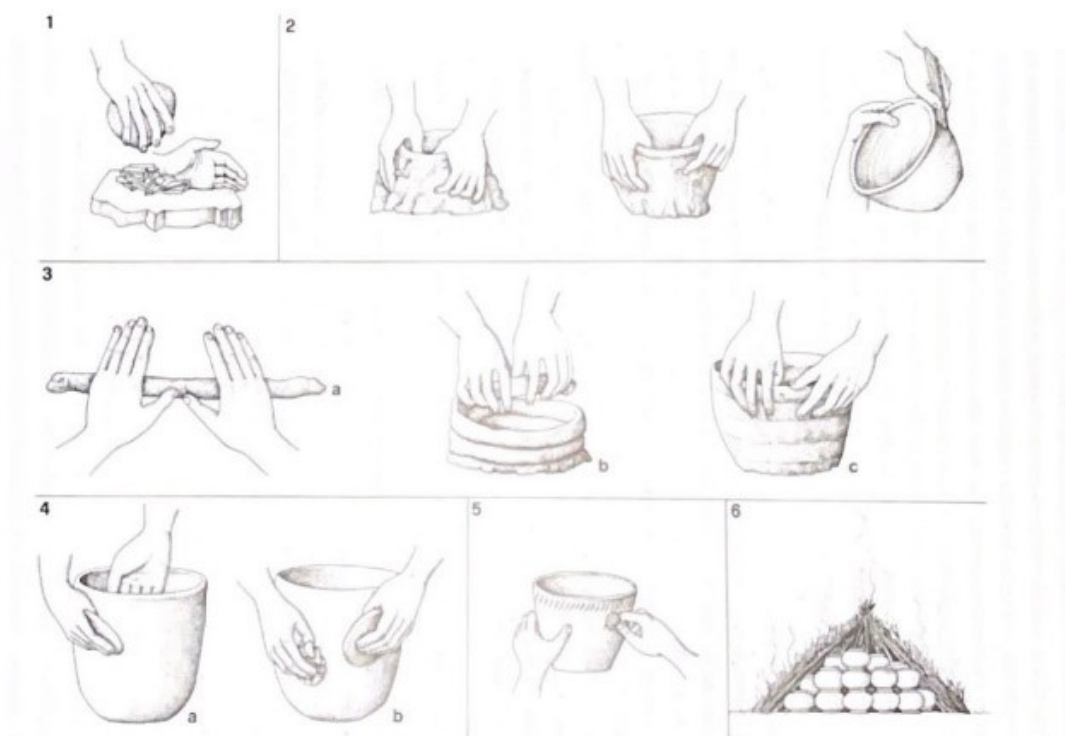
Il termine "Neolitico" indica quel periodo della preistoria di cambiamento e nuove invenzioni, tra cui la ceramica e l'utilizzo di strumenti ricavati dalla lavorazione della pietra. Questo periodo è caratterizzato dal passaggio dell'economia tradizionale a quella produttiva, dove si iniziano a coltivare varie specie di piante e ad addomesticare gli animali. Le comunità del Neolitico commerciavano diversi tipi di materie prime. La selce veniva utilizzata per costruire le asce nell'Europa settentrionale così come l'ossidiana, un materiale vulcanico anche questo utilizzato per la scheggiatura, faceva parte dell'economia di scambio del Neolitico. Una delle innovazioni più importanti riguarda le attività industriali, in particolare la lavorazione della ceramica.

La ceramica apparso nel Vicino Oriente e in Grecia nel VI millennio. Ad essa si riconosce un ruolo socio-culturale importante, in quanto la variabilità delle creazioni ritrovate, la forma dei vasi e le loro decorazioni, hanno permesso di classificare e differenziare le varie culture del Neolitico (Daniela Cocchi Genick, 1994).

Roux (2016) svolge un'analisi della lavorazione della ceramica, trattando delle azioni principali che sottendono la creazione di un manufatto e, dunque, la trasformazione della materia prima in un prodotto vero e proprio. Dopo aver raccolto e preparato il materiale, si passa alla modellazione, alla finitura, alla decorazione e alla cottura, che garantisce rigidità al prodotto finale. L'ordine di queste azioni è universale e, dunque, non può essere cambiato.

Nel Neolitico la ceramica veniva lavorata a mano, in quanto non era stato ancora inventato il tornio, lo strumento che permette di lavorare con maggiore facilità e velocità il manufatto su un disco che gira in senso rotatorio, sia manualmente sia, attualmente,

tramite alimentazione elettrica. La materia prima utilizzata era l'argilla che poteva essere lavorata con l'aggiunta di acqua e poi cotta nel fuoco. Le tecniche della lavorazione dell'argilla sono varie: si può modellare la materia prima manualmente o utilizzare la tecnica "a colombino", che consiste nel creare delle forme cilindriche e impilarle una sull'altra come mostrato nella Figura 1 (Daniela Cocchi Genick, 1994).



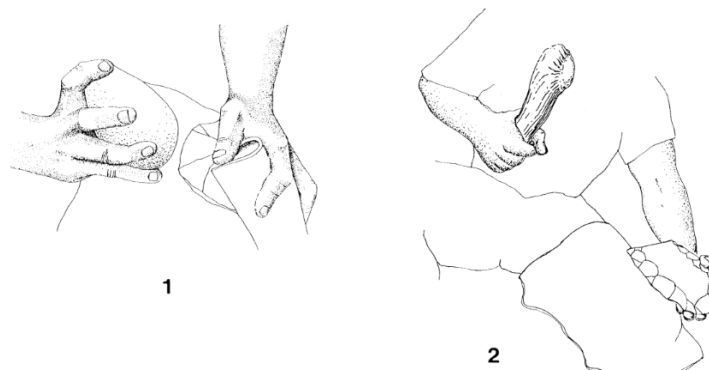
**Figura 1.** Immagine di Daniela Cocchi Genick, *Manuale di preistoria, II. Neolitico*, 1994.

La figura mostra la lavorazione della ceramica nelle sue varie fasi. In particolare, si può osservare la modellazione manuale (2) a confronto con la modellazione a colombino (3). Si passa successivamente alla rifinitura del manufatto mediante un utensile (4), alla decorazione (5) e alla cottura (6).

La produzione della litica comprende la creazione di vari tipi di strumenti realizzati con tecniche diverse. La scheggiatura comporta il distacco di schegge e frammenti e permette la creazione di strumenti come i bulini, dei manufatti che servono per incidere a mano il materiale lavorato. La levigatura, anche se già presente nel Paleolitico, inizia ad essere utilizzata solo successivamente nel Neolitico per la creazione di gioielli e ornamenti ma, soprattutto, per strumenti di lavoro come le asce, che erano

fondamentali per l'agricoltura, l'allevamento e la lavorazione di altri materiali come il legno (Daniela Cocchi Genick, 1994).

Per la lavorazione della litica venivano scelte materie prime in base alla loro provenienza, quantità ed abbondanza nel territorio, qualità della pietra, l'uso che se ne poteva fare, durezza e facilità di lavorazione. Le rocce, oltre ad essere classificate in base ai tipi più comuni, possono essere ulteriormente classificate in base a quanto sono adatte per essere lavorate: le rocce che son "semplici da lavorare" e le rocce che sono "difficili da lavorare", dove le scaglie sono estremamente complicate da rimuovere. Queste categorizzazioni sono dovute al fatto che le proprietà di alcune rocce permettono ottimi risultati con l'applicazione di determinate tecniche o pochissimi risultati quando se ne si applicano delle altre. Per esempio, si possono realizzare a mano delle asce ricavate dalla *sanukite*, un tipo di roccia ignea proveniente dal Giappone, ma risulterebbe praticamente impossibile l'utilizzo di altre tecniche quale la percussione. Un manufatto in pietra può essere definito tale solo dai segni da asportazione. Questi segni sono il risultato della pressione o dalla percussione applicata alla roccia ed obbediscono sempre alle stesse leggi fisiche, indipendentemente dal fatto che l'asportazione sia intenzionale o meno. Infatti, per comprendere se la scheggiatura sia stata intenzionale, bisogna andare a studiare l'organizzazione dell'asportazione, il contesto e la posizione in cui è stato trovato il manufatto, e il numero di schegge trovate. Le principali tecniche di scheggiatura sono la *percussione* e la *pressione*. La percussione può essere diretta, dove il blocco di pietra è colpito direttamente con un percussore osseo, di pietra o di legno, o indiretta, per cui la pietra viene lavorata interponendo un intermezzo tra la pietra e lo scalpello (Inizan et al. 1999).



**Figura 2.** Tecniche di scheggiatura (Inizan et al., *Technology and Terminology of Knapped Stone*. 1999). La prima tecnica illustra una percussione diretta mediante un martello di pietra. La seconda tecnica mostra, invece, una percussione diretta con un palco di cervo.

La tecnica della pressione è invece esercitata tramite uno strumento appuntito di legno, metallo o osseo e, come la percussione indiretta, permette di creare lame molto lunghe. I prodotti che derivano dalla scheggiatura sono, in senso lato, le scaglie della pietra e sono noti come i prodotti di *débitage*. Il *débitage* è un'operazione che consiste nella frattura di una materia prima al fine di produrre i pezzi grezzi (in inglese *blanks*). Ogni scaglia presenta delle caratteristiche distintive che permettono di essere mentalmente collocate in una delle fasi che caratterizzano la lavorazione della materia prima, chiamata *chaîne opératoire* (Inizan et al. 1999).

I nostri partecipanti hanno imparato a lavorare la selce solamente mediante la tecnica di percussione diretta, colpendo il nucleo di selce sia con un percussore osseo in palco di cervo sia con un ciottolo. Quest'ultimo è sempre un utensile che funge da percussore per colpire il blocco di selce e staccare una scheggia o una lama. Il percussore in palco di cervo è più morbido mentre il ciottolo è un percussore più duro. La differenza tra i due percussori è data dalla forma, dimensione e durezza diversa, e vengono scelti in base a cosa si vuole produrre; per esempio, è preferibile utilizzare un percussore in palco di cervo se l'intenzione è quella di creare delle lame. Nel nostro caso, i partecipanti hanno svolto una prima esperienza con un percussore in pietra, ovvero dei ciottoli di forma tondeggianti che hanno raccolto lungo un torrente, e poi sono passati al distacco di lame utilizzando dei percussori in palco di cervo.



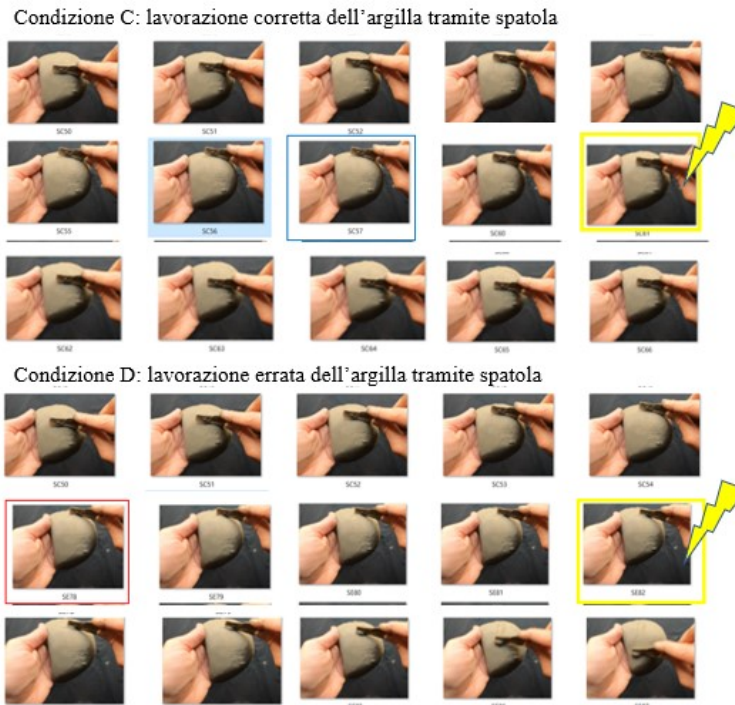
### 1.3.1 Stimoli sperimentali

Le figure 3 e 4 mostrano le prime due tecniche che sono state replicate nel nostro esperimento: la tecnica del colombino e la rifinitura delle superfici tramite l'aiuto di una spatola (così come possiamo osservarle nelle immagini 3 e 4 in Fig. 1) per la lavorazione dell'argilla.

Le figure 5 e 6 illustrano la lavorazione della litica, anche in questo caso divisa in quattro condizioni sperimentali, ovvero in lavorazioni corrette e lavorazioni errate. I video mostrano la lavorazione della litica tramite l'utilizzo di due percussori diversi: un ciottolo ed un percussore osseo in palco di cervo (così come possiamo osservarli nelle immagini 1 e 2 in Figura 2).



**Figura 3.** Condizioni sperimentali A e B. I *frame* in alto mostrano la lavorazione corretta dell'argilla tramite la tecnica a colombino. Nelle immagini si può osservare come le dita delle mani siano sempre ben distese, svolgendo dei movimenti che partono dal centro del colombino fino alle estremità per poi tornare al centro. Le immagini in basso mostrano la lavorazione errata dell'argilla tramite la tecnica del colombino. Le mani lavorano in maniera non omogenea la materia prima. In particolare, il riquadro giallo evidenzia il momento in cui l'indice della mano destra schiaccia l'argilla, creando un solco nel materiale, e la TMS fa partire l'impulso sincronizzato in quell'istante.



**Figura 4.** Condizioni sperimentali C e D. I *frame* in alto mostrano una rifinitura corretta dell'argilla tramite l'utilizzo della spatola, mentre quelli in basso una lavorazione errata dell'argilla, dove la mano destra taglia il materiale in basso e verso sinistra.



**Figura 5.** Condizioni E ed F. La lavorazione della litica tramite l'utilizzo di un ciottolo. I riquadri gialli evidenziano i momenti in cui la TMS manda l'impulso. La condizione di errore comprende un'errata rotazione del polso ed una forza eccessiva impressa al colpo.



**Figura 6.** Condizioni G e H. La lavorazione della litica servendosi di un palco di cervo come strumento a percussione diretta. Come nelle condizioni precedenti, il riquadro giallo evidenzia l'esatto *frame* in cui la TMS mandava l'impulso. Anche in questa condizione di errore la pietra era colpita dal percussore osseo con una forza eccessiva.

### 1.4 Sistema Mirror

La nostra natura di “animali sociali” ci spinge ad essere, fin dalla nascita, in contatto con gli altri e, in particolare, di avvicinarci ed imparare da chi consideriamo dei modelli di riferimento. Se applichiamo questa teoria all'apprendimento di un qualcosa di nuovo, vedremo che molto spesso impariamo una determinata azione seguendo la guida di qualcun altro e, dunque, attraverso l'osservazione di un modello. La persona a cui ci affidiamo diventa a tutti gli effetti la nostra guida, che ci permette non solo di imparare più velocemente, ma svolge un ruolo fondamentale anche nella trasmissione della cultura. Grazie all'aiuto dell'esperto, faremo nostra (in inglese si utilizza il termine di *embodied* proprio per sottolineare la profonda internalizzazione dell'azione che si ha imparato) la nuova conoscenza acquisita, in quanto abbiamo assimilato le abilità necessarie per produrre un oggetto o uno strumento. Inoltre, avremo ulteriormente un'immagine mentale di come si produce quello specifico oggetto e, difficilmente, riusciremo a ricrearlo in maniera diversa da quanto insegnato (Roux, 2017).

Da un punto di vista neuropsicologico, la scoperta dei neuroni specchio da parte del gruppo di studio di Giacomo Rizzolatti, ci permette di spiegare quanto detto finora. Il Sistema Mirror racchiude quell'insieme di neuroni che si attivano non solo quando si compie un gesto di afferramento (*grasping*), ma anche quando si osserva un'azione compiuta da qualcun altro. Questi neuroni sono stati individuati nella corteccia premotoria ventrale delle scimmie e, successivamente, anche nel lobulo parietale inferiore. Inoltre, sembrerebbe che questo sistema, negli esseri umani, comprenda un insieme di funzioni molto più ampio rispetto alle scimmie, dovuto probabilmente all'evoluzione più complessa. Queste funzioni comprendono non solo l'osservazione e l'esecuzione dei movimenti, propri e altrui, ma anche l'apprendimento per imitazione, la comprensione delle azioni e perfino la loro previsione, l'intenzione ed il linguaggio (Erhan Oztop, Mitsuo Kawato, Michael A. Arbib, 2013).

Gli esseri umani mostrano risposte muscolari evento-correlate alla stimolazione magnetica transcranica (TMS) sulla corteccia motoria durante l'osservazione di azioni. Infatti, l'osservazione di un'azione che coinvolge un particolare muscolo suscita una risposta più forte nello stesso muscolo dell'osservatore rispetto all'osservazione di un'azione incongruente. Questa risposta è generalmente associata al sistema specchio. Catmur e collaboratori (2007), hanno dimostrato che questo sistema di *action-observation* nell'uomo può essere alterato. I ricercatori hanno utilizzato la TMS e la rilevazione dei potenziali motori evocati (MEP) per studiare le risposte che i partecipanti davano durante la visione di un video di una mano in movimento, in particolare il movimento dell'indice e del mignolo. Quando il partecipante osservava il movimento dell'indice nel video, i MEP del suo dito indice erano maggiori rispetto al mignolo. Al contrario, quando nel video era il mignolo a muoversi, il MEP del muscolo del mignolo risultava più elevato. In altre parole, i MEP di un determinato muscolo erano più grandi quando il partecipante osservava un movimento che deve essere eseguito da quel muscolo preciso. Successivamente, ad un gruppo di partecipanti si chiedeva di muovere il mignolo ogni qualvolta vedessero l'indice muoversi nel video o, al contrario, si chiedeva di muovere l'indice quando osservavano un movimento del mignolo. Ad un altro gruppo di partecipanti si chiedeva invece di compiere dei movimenti delle dita *coerenti* con quelli che guardavano nei video, ovvero riprodurre i movimenti osservati. Dopo l'addestramento, entrambi i gruppi sono stati testati per verificare la loro risposta ai

movimenti delle dita osservati. Il gruppo che compiva i movimenti coerenti con quelli osservati nei video ha mantenuto la proprietà dello specchio: l'osservazione del movimento del dito indice, rispetto all'osservazione del mignolo, ha generato una risposta più elevata nel muscolo che permette il movimento del dito indice. Questo fenomeno è stato completamente invertito nel gruppo incongruente. Le azioni osservate si rispecchiano così in termini motori: ciò è dovuto al fatto che l'esecuzione motoria crea sempre stimoli visivi congruenti (un comando motorio di muovere l'indice muove l'indice) che vengono sperimentati nel corso della vita dell'organismo. (Erhan Oztop, Mitsuo Kawato, Michael A. Arbib, 2013).

La corteccia motoria sembrerebbe dunque replicare le azioni di qualcun altro come se fossero eseguite dall'osservatore stesso. In questo tipo di studi, la stimolazione magnetica transcranica (TMS) è uno strumento utile per studiare l'eccitabilità corticospinale e quei cambiamenti di eccitabilità che avvengono quando si osserva qualcun altro compiere un'azione (Sartori, L., Betti, S., Castiello, U. 2013).



## Capitolo 2: Metodo

### 2.1 I partecipanti

I partecipanti sono studenti e studentesse del Dipartimento di Archeologia dell'Università di Padova (13 femmine e 13 maschi) di cui 12 hanno partecipato alla ricerca come gruppo sperimentale ed i restanti 14 come gruppo di controllo, con un'età compresa tra i 19 ed i 30 anni. Tutti i partecipanti ignoravano l'obiettivo dello studio. Ognuno di loro, prima di iniziare lo studio, ha firmato il consenso informato e ha compilato due questionari: l'*Edinburgh Handedness Inventory* per la dominanza manuale, che consiste di una Scala Likert da 1 a 5 dove 1 corrisponde a "Sempre sinistra" e 5 corrisponde a "Sempre destra", e un questionario per valutare l'idoneità alla TMS.

Il paradigma è stato approvato dal comitato etico di Area Psicologica (parere n. 4917).

	1: "Sempre sinistra"	2: "Di solito sinistra"	3: "Nessuna preferenza"	4: "Di solito destra"	5: "Sempre destra"
Scrive					
Lancia un oggetto					
Usa le forbici					
Usa lo spazzolino da denti					
Usa il coltello					
Usa il cucchiaio					
Accende un fiammifero					
Usa il mouse del computer					

**Tabella 1.** Esempio di questionario per la dominanza manuale che i partecipanti hanno compilato. Ventiquattro partecipanti su ventisei hanno risposto di essere destrorsi (a tutte le domande hanno risposto "sempre destra"). Un partecipante (gruppo di controllo) era mancino, mentre un partecipante (gruppo di controllo) era ambidestro (a 6 domande su 8 ha risposto "Nessuna preferenza", ad una domanda ha risposto "Di solito destra" e ad una domanda ha risposto "Sempre sinistra").

## 2.2 Gli strumenti

### 2.2.1 EEG

L'elettroencefalogramma (EEG), inventato nel 1929 da Hans Berger, permette lo studio dell'attività elettrica del cervello tramite l'applicazione degli elettrodi sul cuoio capelluto. Ha un'alta risoluzione temporale e relativamente bassa risoluzione spaziale (Làdavas, E., Berti, A. 2020) ed è una delle tecniche non invasive più utilizzate per studiare il cervello. Negli anni successivi alla sua invenzione, l'EEG ha permesso di descrivere varie alterazioni corticali di molte malattie. Da allora, l'EEG è diventato un esame di riferimento per l'analisi dei processi elettrofisiologici alla base dell'epilessia, così come di molte altre malattie del sistema nervoso centrale (André-Obadia, P. Sauleau, F. Cheliout-Heraut et al. 2014) e rimane un'indagine fondamentale per i disturbi del sonno e della coscienza. Inoltre, la sua risoluzione temporale ed accessibilità rendono l'EEG uno strumento fondamentale per le neuroscienze cognitive (Gavaret, A. Iftimovici, E. Pruvost-Robieux, 2023).

L'EEG misura le differenze di potenziale elettrico tra coppie di elettrodi posizionati sul cuoio capelluto. Il segnale registrato è dovuto principalmente ai potenziali postsinaptici piuttosto che ai potenziali d'azione, in quanto questi ultimi hanno una durata minore rispetto ai potenziali postsinaptici. L'attività postsinaptica di un network di neuroni che si attiva simultaneamente genera così un campo elettrico extracellulare (Gavaret, A. Iftimovici, E. Pruvost-Robieux, 2023) che permette la registrazione della risposta corticale a livello dello scalpo (J.C. Hernandez-Pavon, D. Veniero, T.O. Bergmann et al. 2023).

I segnali EEG sono il risultato di molteplici processi cerebrali e di artefatti biologici e ambientali. Per identificare le risposte cerebrali rispetto ad un compito specifico si possono utilizzare i potenziali legati agli eventi (ERP, *event-related potentials*). Gli ERP sono quindi ottenuti elaborando i frammenti dell'EEG in più *trial*. Per registrarli vengono ripetuti più volte degli stimoli al fine di calcolare una risposta media. Dopo alcune fasi di elaborazione dove si escludono i segnali rumorosi, le registrazioni EEG vengono suddivise in periodi della stessa durata. Questi periodi sono poi mediati off-line per rivelare le risposte cerebrali specifiche del compito svolto. In questo modo si possono controllare i *marker* degli stimoli per definire il livello degli



artefatti e si possono eseguire analisi statistiche degli ERP ottenuti (Gavaret, A. Iftimovici, E. Pruvost-Robieux, 2023).

### 2.2.2 TMS

Nel 1980, Merton e Morton riuscirono a stimolare la corteccia utilizzando la stimolazione elettrica transcranica (TES) e, a seconda dell'area stimolata, si poteva osservare un *twitch* del muscolo controlaterale. Tuttavia, la TES era estremamente dolorosa e solo alcune correnti elettriche riuscivano a sorpassare lo scalpo e arrivare effettivamente alla corteccia, mentre la maggior parte provocavano una contrazione al muscolo del cuoio capelluto, che causava il dolore. Nel 1985, Baker e colleghi proposero di rimpiazzare la TES con la stimolazione transcranica magnetica (TMS, *Transcranical Magnetic Stimulation*). (Wanalee Klomjai, Rose Katz, Alexandra Lackmy-Vallée, 2015).

La TMS è una tecnica di indagine non invasiva e non dolorosa che si basa sul principio dell'induzione elettromagnetica o Legge di Faraday (Rossi S, Hallett M, Rossini PM, Pascual-Leone A. 2009), secondo cui una corrente elettrica indotta da un *coil* è in grado di produrre un campo magnetico che, a sua volta, induce un secondo flusso di corrente elettrica nel tessuto corticale. Questa corrente porta ad una depolarizzazione dei neuroni, dove gli ioni positivi vengono spinti verso una cellula nervosa, innalzando il suo potenziale al punto di generare un potenziale d'azione (Sartori, L., Betti, S., Castiello, U. 2013). L'attività cerebrale viene in questo modo manipolata tramite una breve, ma forte scarica elettrica, provocando un'alterazione comportamentale.

Il metodo più comune per determinare una risposta motoria è andare a cercare la soglia motoria in un muscolo a riposo (rMT, *Resting motor threshold*). La soglia motoria è solitamente definita come l'intensità minima di TMS che riesce ad elicitarne un potenziale d'azione (MEP, *Motor Evoked potential*) nel muscolo controlaterale all'area stimolata (J.C. Hernandez-Pavon, D. Veniero, T.O. Bergmann et al. 2023). Per esempio, stimolando l'area che corrisponde al muscolo che controlla l'indice (*First dorsal interosseous*, FDI), abbiamo osservato un lieve movimento, involontario, dell'indice controlaterale alla zona elicitata nella corteccia motoria primaria ed è stato così possibile registrare un potenziale motorio. Dunque, quando viene applicata sulla corteccia motoria, la TMS induce una scarica corticospinale che produce uno spasmo involontario del

muscolo che corrisponde alla parte del corpo rappresentata nel cervello dall'homunculus motorio (Jean-François Lepage, Dave Saint-Amour, Hugo Théoret. 2008).

La direzione e la forza del campo elettrico che vengono generati dalla TMS dipendono da diversi fattori come la forma d'onda dell'impulso magnetico, la forma e l'orientamento del *coil*, l'intensità e la frequenza di stimolazioni o i neuroni eccitabili. Inoltre, la TMS può essere a singolo impulso – solitamente utilizzata nelle neuroscienze cognitive – oppure ad impulsi ripetitivi (rTMS) (Wanalee Klomjai et al. 2015), il cui effetto si protrae anche dopo l'utilizzo, motivo per cui si stanno studiando i possibili benefici in pazienti con disturbi come la dipendenza.

### *2.2.3 TMS-EEG: una registrazione simultanea*

La co-registrazione dell'elettroencefalogramma (EEG) durante la TMS permette di ricavare informazioni preziose sulle caratteristiche della corteccia cerebrale e la sua connettività; la risposta corticale che deriva dalla stimolazione della TMS può essere così registrata dall'EEG (C. Bonato, C. Miniussi, P.M. Rossini. 2006).

È stato particolarmente utile per il mappaggio del cervello con la TMS orientarci tramite gli elettrodi dell'EEG. Infatti, localizzare la stessa identica area che si intende stimolare, in soggetti diversi, può essere una procedura lunga e complessa, dato che l'anatomia del cervello tra singoli individui è molto variabile. Tuttavia, se si sfrutta la posizione degli elettrodi dell'elettroencefalogramma si può osservare una sovrapposizione affidabile tra l'area corticale che si vuole studiare e la posizione degli elettrodi dell'EEG (Pantelis Lioumis, Mario Rosanova. 2022).

Più nello specifico, queste due tecniche utilizzate insieme sono molto utili, in quanto l'EEG permette di avere un'immagine più globale dell'attività cerebrale che viene generata dal campo magnetico della TMS (Hernandez-Pavon JC et al., 2023).

### *2.2.4 Ampiezza*

I parametri utilizzati per la rilevazione di MEP significativi sono le ampiezze e le latenze. In particolare, l'ampiezza misura la distanza tra il picco minimo e il picco massimo di un MEP. Quando la TMS viene utilizzata per stimolare un'area della corteccia motoria attiva i motoneuroni nel sistema nervoso centrale, provocando una contrazione dei muscoli e, conseguentemente, un MEP (Wanalee Klomjai et al., 2015).

L'ampiezza di un MEP riflette l'eccitabilità della corteccia motoria e, in particolare, del muscolo in studio (J.H. Kindred, J.J. Cash, J.B. Ertle, C.C. Charalambous, E.C. Wonsetler, M.G. Bowden. 2021). La risposta del muscolo che viene misurata dall'ampiezza picco-picco del MEP è una rappresentazione del numero di neuroni piramidali attivati e depolarizzati dall'impulso della TMS, dove un'ampiezza più grande corrisponde ad una eccitabilità maggiore delle cellule piramidali oppure ad un numero maggiore di cellule depolarizzate (Nitsche and Paulus, 2000; Ridding and Rothwell, 1997; Michael Pellegrini, Maryam Zoghi, Shapour Jaberzadeh, 2018). L'ampiezza del MEP, inoltre, varia a seconda dell'intensità dell'impulso della TMS, ma è sensibile anche ad altri fattori che possono influenzare l'eccitabilità corticospinale (Pascual-Leone et al., 1998).

Quando la stessa intensità è mantenuta in condizioni sperimentali, la variazione dell'ampiezza dei MEP riflette un aumento o una diminuzione dell'eccitabilità della corteccia motoria (M1). Fadiga e collaboratori (1995) hanno dimostrato come le ampiezze dei MEP aumentassero notevolmente in situazioni dove i partecipanti osservavano passivamente i movimenti di una mano, ipotizzando una sorta di *matching* nella corteccia motoria tra osservazione ed esecuzione di movimenti o azioni. Inoltre, sembrerebbe che l'osservazione di un'azione non è necessaria per elicitarla la corteccia motoria, in quanto anche solo l'immaginazione di un gesto è sufficiente per aumentare l'eccitabilità corticospinale (Jean-François Lepage, Dave Saint-Amour, Hugo Théoret, 2008).

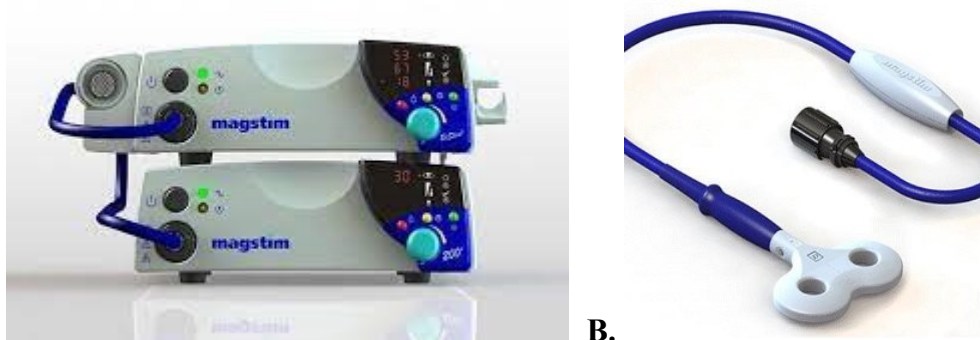
### **2.3 Procedura: condizioni di somministrazione**

Il partecipante si è accomodato su una sedia di fronte allo schermo di un computer. Successivamente, sono state prese le misure della testa per scegliere l'*EasyCap* della grandezza migliore. L'*EasyCap* è una cuffia caratterizzata dai cosiddetti elettrodi *C-ring*, ovvero a forma di anello. Infatti, i comuni elettrodi dell'EEG non possono essere usati con la TMS, in quanto l'impulso magnetico produce le cosiddette *correnti di eddy* (correnti che circolano in un circuito chiuso) che causano un surriscaldamento degli elettrodi. Un'alternativa sono dunque gli elettrodi *C-ring*, nonché i più usati negli studi di TMS-EEG (Hernandez-Pavon JC et al., 2023).

Una volta posta la cuffia sul cuoio capelluto del partecipante, si inizia la preparazione dell'EEG per l'esperimento, che consiste in uno scrub (*NuPrep*) al cuoio capelluto nello spazio interno degli elettrodi e la successiva applicazione di una pasta conduttiva per diminuire l'impedenza.

Allo stesso modo si prepara la mano destra del partecipante per l'applicazione degli elettrodi sui muscoli del pollice e dell'indice. Per trovare il muscolo del pollice (OP, *Opponens Pollicis*) si chiede al partecipante di muovere lentamente il pollice fino a toccare il mignolo e, analogamente per l'individuazione del muscolo dell'indice (FDI, *First Dorsal Interosseus*), si chiede di premere la punta dell'indice contro quella del pollice. Così facendo, il muscolo si contrae ed è possibile individuarlo tramite palpazione, pulire la zona in maniera più precisa e posizionare l'elettrodo direttamente sopra il muscolo interessato.

Un *coil* a forma di otto, che invia gli impulsi elettromagnetici della TMS (*Magstim BiStim2*), è stato successivamente posizionato sullo scalpo del partecipante, il quale è coperto dalla cuffia dell'EEG. Il manico del *coil* è orientato a circa 45°, perpendicolare allo scalpo e bloccato da un supporto meccanico per garantirne la fermezza. La testa del partecipante è appoggiata alla sedia e sorretta ulteriormente da un cuscino per assicurarne la stabilità, mentre la sua mano è appoggiata sul bracciolo della sedia sopra un cuscino, per garantire ai muscoli della mano di essere completamente rilassati per tutta la durata dell'esperimento.



**Figura 7.** Gli strumenti utilizzati per l'invio degli impulsi elettromagnetici. Il coil a forma di otto mostrato nell'immagine B, era connesso ad un Magstim Bistim2, come mostrato nell'immagine A.

Siamo dunque andati a localizzare l'area motoria della mano destra, mappando la corteccia motoria controlaterale e, successivamente abbiamo trovato l'*hotspot*, ovvero

l'area della rappresentazione corticale che si vuole sollecitare, che comprende sia il muscolo FDI sia il muscolo OP. Si è identificato l'rMT, necessario per produrre un MEP. La soglia minima viene identificata dopo che un potenziale motore è elicitato almeno tre volte su cinque nella stessa prova. L'intensità di stimolazione utilizzata durante l'esperimento è stata successivamente alzata al 110% del rMT di ogni singolo soggetto per tutta la durata dei video, i quali sono riprodotti sullo schermo del computer posizionato davanti al partecipante. La scarica elettrica produce un campo magnetico che, una volta attraversato lo scalpo, induce una corrente elettrica nella zona della corteccia motoria interessata, producendo dei potenziali d'azione (Làdavas, E., Berti, A. 2020).

Una volta preparati gli strumenti e avviata la registrazione dell'EEG e della TMS, inizia la visione dei video. I video sono mostrati in quattro blocchi diversi, con una breve pausa tra un blocco e l'altro. In questo modo il partecipante può riposarsi se lo trova necessario o avvisare eventuali problemi o sensazioni spiacevoli. Ogni video inizia e termina con una croce di fissazione, per la durata di otto stimolazioni TMS totali di baseline, quattro all'inizio e quattro alla fine, e 24 impulsi per ogni blocco, per un totale di 96 impulsi. Nei video vengono mostrate le due lavorazioni principali dell'esperimento: la lavorazione della ceramica e la lavorazione della litica.



**Figura 8.** Nell'immagine si può osservare la procedura di somministrazione. Il partecipante, seduto comodamente sulla sedia, aveva davanti a sé lo schermo del computer dove venivano mostrati i video.

Il partecipante osserva la lavorazione dell'argilla mediante la modellazione a colombino e la rifinitura del materiale tramite l'utilizzo di una spatola. La selce viene invece lavorata mediante percussione diretta, utilizzando un ciottolo o un percussore

osseo. La particolarità di alcuni video, nonché una delle condizioni fondamentali dell'esperimento, è che in alcune scene viene mostrata una lavorazione errata delle due tecniche: in alcune immagini gli errori sono più evidenti, in altre sono riconoscibili solo da un occhio più esperto.

I video dove viene mostrata la lavorazione dell'argilla sono codificati dalla lettera A alla lettera D, e prevedono:

- La lavorazione di un colombino, dove la condizione A corrisponde alla lavorazione corretta, mentre la condizione B presenta un errore: il colombino viene schiacciato più del dovuto, creando un solco nel materiale.
- La rifinitura dell'argilla tramite una spatola, dove la condizione C è corretta e la condizione D è un errore.

I video della lavorazione della litica sono codificati dalla lettera E alla lettera H, dove i partecipanti guardano:

- La scheggiatura corretta tramite l'utilizzo di un ciottolo, codificata come condizione E, e la lavorazione sbagliata, codificata come condizione F.
- La lavorazione corretta della selce con un percussore osseo nella condizione G ed errata condizione H.

In totale l'esperimento prevede un totale di otto condizioni sperimentali.

Tutti i partecipanti hanno visto gli stessi video della lavorazione dell'argilla e della selce in due fasi distinte: PRE e POST-TEST. L'esperimento prevede una registrazione iniziale nella quale si sottopongono i partecipanti alla visione dei suddetti video, una sospensione di circa un mese e mezzo, nella quale solo il gruppo sperimentale ha svolto un training sulla lavorazione della ceramica e della litica, ed un'ultima registrazione che permette di stabilire se esiste una differenza significativa tra il gruppo sperimentale ed il gruppo di controllo.

La durata della sessione varia in base al tempo richiesto per il montaggio dei macchinari, che può impiegare anche più di 45 minuti. I video mostrati durante l'esperimento durano circa 3-4 minuti ciascuno, per un totale di circa 15 minuti; durante la loro visione è stato chiesto ai partecipanti di rimanere fermi e rilassati, con la mano destra a riposo e appoggiata con il palmo rivolto verso il basso. Il loro unico compito era quello di guardare i video sullo schermo del computer. Per tutta la durata dell'esperimento

i partecipanti sono stati collegati sia all'elettroencefalogramma (EEG) sia alla stimolazione magnetica transcranica (TMS).

## 2.4 Preprocessamento dei dati

I dati raccolti sono stati analizzati in primo luogo tramite l'utilizzo di due programmi: Brain Vision Analyzer 2.0 (Brain Products GmbH) e Excel. Il primo è un software che ci ha permesso di analizzare le ampiezze e le latenze dei MEP. In particolare, siamo andati ad identificare la differenza tra il minimo e il massimo picco di ogni MEP e, successivamente, la corrispondente latenza, ovvero la differenza tra lo stimolo della TMS e l'onset del MEP tra lo stimolo e il massimo picco.

I dati sono stati esportati in Excel per la pulizia, il calcolo della media e della deviazione standard. Sia le ampiezze dei MEP sia le latenze di ogni partecipante sono state accoppiate con le rispettive condizioni. I dati, per essere analizzati, sono stati in primo luogo ridimensionati in numeri più piccoli per permettere il calcolo, sia trasformati in numeri assoluti, qualora necessario. È stato così possibile calcolare i valori dei picchi e scartare gli *outliers*, ovvero i valori più distanti dalla media.

## 2.5 Analisi

In seguito alla lavorazione dei dati grezzi, abbiamo analizzato i dati aggregati tramite un'analisi ANOVA per misure ripetute. L'esperimento comprende una vasta quantità di dati, in quanto le condizioni totali sono otto. Tuttavia, in questo elaborato mi soffermerò in particolare sulle ampiezze MEP del muscolo FDI che fanno riferimento alle analisi con la tecnica del colombino.

In primo luogo bisogna normalizzare i dati di FDI, dividendoli per le baseline. Otterremo così la variabile dipendente *FDI corretto (FDI<sub>c</sub>)*, che corrisponde alla percentuale di ampiezza del *trial* sulla sua baseline. Dunque, le variabili che prenderemo in considerazione saranno:

- La sessione, la quale è composta da due livelli: la sessione PRE-TEST e la sessione POST-TEST.
- La correttezza delle condizioni: precedentemente abbiamo visto come ogni tecnica è composta da due condizioni, quindi anche in questo caso la variabile è composta da due livelli. Nella tecnica del colombino la condizione A

corrisponde alla lavorazione corretta dell'argilla, mentre la condizione B corrisponde all'errore della lavorazione.

- Il gruppo, composto ulteriormente da due livelli: il gruppo sperimentale, che abbiamo chiamato *esperti*, e il gruppo di controllo.

Il disegno che utilizziamo per svolgere un ANOVA a misure ripetute sarà dunque un disegno 2x2x2. Nelle analisi ANOVA abbiamo escluso dei soggetti siccome mancavano delle celle. In particolare, nel gruppo degli esperti è stato escluso un partecipante, mentre nel gruppo di controllo sono stati esclusi due partecipanti.

Le analisi ANOVA per misure ripetute sono state condotte utilizzando il software Jamovi (The jamovi project, 2022).

In quanto non abbiamo potuto considerare tutto il campione tramite ANOVA, abbiamo ulteriormente utilizzato un modello misto tramite il pacchetto lme4 di R per poter testare i vari contrasti considerando l'intero campione (R Core Team, 2021).

Nel nostro disegno sperimentale si osserva che alcuni soggetti hanno tanti MEP per condizioni e altri che, invece, ne hanno di meno. Dunque, il modello misto può aiutare a tenere conto di questo sbilanciamento.

Come sopracitato, le analisi dei dati di FDI in questo elaborato sono state approfondite in riferimento alla tecnica del colombino. Pertanto abbiamo preso in considerazione solamente i *trial* che hanno come materia lavorata l'argilla. La variabile dipendente (FDIc) deve essere spiegata dal fattore "correttezza", prendendo in considerazione la condizione in cui viene mostrato l'errore, dal fattore "tecnica", dal fattore "sessione", dal fattore "gruppo" e dalle loro interazioni. Il modello è, dunque, specificato come segue:

$$\text{FDIc} \sim \text{Errore} * \text{Tecnica} * \text{Sessione} * \text{Gruppo} + (1 | \text{ID})$$



## Capitolo 3: Risultati

### 3.1 ANOVA a misure ripetute

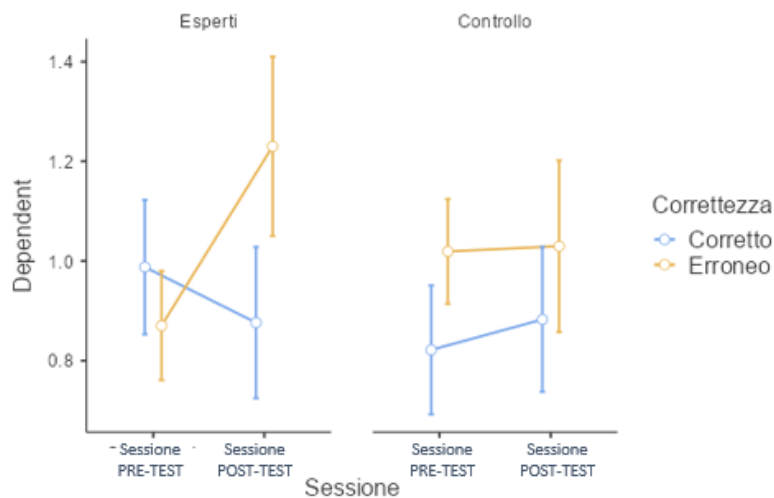
La tabella 2 mostra i risultati ottenuti tramite ANOVA. Dato che questo studio è un pilota, nel descrivere i risultati utilizzeremo un *alpha-level* di .1, rispetto allo standard .05. Otteniamo così un'interazione significativa tra la sessione, la correttezza e il gruppo.

**Tabella 2**

Effetti entro i Soggetti

	Somma dei Quadrati	gdl	Media Quadratica	F	p
Sessione	0.1470	1	0.1470	0.412	0.528
Sessione * Gruppo	0.0449	1	0.0449	0.126	0.726
Residui	7.4880	21	0.3566		
Correttezza	0.4842	1	0.4842	3.492	<b>0.076</b>
Correttezza * Gruppo	0.0168	1	0.0168	0.121	0.731
Residui	2.9119	21	0.1387		
Sessione * Correttezza	0.2539	1	0.2539	2.582	0.123
Sessione * Correttezza * Gruppo	0.3907	1	0.3907	3.973	<b>0.059</b>
Residui	2.0651	21	0.0983		

Nota. Tipo 3 Somma dei quadrati



**Figura 9.** Come si può osservare nel grafico, sono stati testati i MEP nei due gruppi (esperti e di controllo). Le linee verticali corrispondono alla “correttezza” delle condizioni: le linee blu si riferiscono alla condizione in cui i video presentavano una lavorazione corretta dell’argilla. Le linee arancioni corrispondono alla condizione in cui i video mostravano la lavorazione con l’errore. Il gruppo degli esperti presenta dei MEP con un’ampiezza maggiore nella sessione POST-TEST quando vengono presentati i video con la condizione di errore. Si è anche osservata una maggiore attivazione per i *trial* non corretti.

### 3.2 Modello misto

La tabella 3 prende come livello di referenza la tecnica del colombino e mostra i seguenti predittori:

- Intercetta. È la media tra i soggetti di FDIc nella condizione in cui non è presente l’errore, la tecnica è il colombino, la sessione è PRE-TEST e il gruppo è di controllo.
- Errore. Corrisponde a quanto si sposta il valore di FDI rispetto all’intercetta quando si hanno dei trial con l’errore.
- Tecnica [spatola]. Equivale a quanto si sposta il valore dell’intercetta (soltanto con il colombino) quando c’è la spatola.
- Sessione [POST-TEST]. Significa quanto si sposta il valore dell’intercetta rispetto alla sessione PRE-TEST.
- Gruppo [esperti]. Si osserva quanto si sposta il valore dell’intercetta quando è presente il gruppo sperimentale.

Da questi fattori si otterranno le varie interazioni. I risultati mostrano un effetto significativo dato dall'interazione tra l'errore per la sessione POST-TEST per il gruppo sperimentale.

I risultati (Tabella 3) hanno mostrato una significativa interazione tra Tecnica, Sessione e Gruppo.

**Tabella 3**

<i>Predittori</i>	<b>FDIc</b>		
	<i>Stime</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>
(Intercetta)	0.84	0.61 – 1.07	<b>&lt;0.001</b>
Errore	0.25	-0.01 – 0.52	<b>0.059</b>
Tecnica [spatola]	0.08	-0.17 – 0.34	0.531
Sessione [POST-TEST]	0.19	-0.10 – 0.47	0.209
Gruppo [esperti]	0.12	-0.21 – 0.45	0.471
Errore × Tecnica [spatola]	-0.22	-0.60 – 0.15	0.240
Errore × Sessione [POST-TEST]	-0.12	-0.53 – 0.29	0.561
Tecnica [spatola] × Sessione [POST-TEST]	-0.07	-0.47 – 0.33	0.715
Errore × Gruppo [esperti]	-0.33	-0.70 – 0.03	<b>0.075</b>
Tecnica [spatola] × Gruppo [esperti]	-0.08	-0.44 – 0.28	0.668
Sessione [POST-TEST] × Gruppo [esperti]	-0.29	-0.70 – 0.11	0.150
(Errore × Tecnica [spatola]) × Sessione [POST-TEST]	0.36	-0.20 – 0.93	0.209
(Errore × Tecnica [spatola]) × Gruppo [esperti]	0.45	-0.09 – 0.99	0.105
(Errore × Sessione [POST-TEST]) × Gruppo [esperti]	0.60	0.04 – 1.17	<b>0.036</b>

(Tecnica [spatola] × Sessione [POST-TEST]) × Gruppo [esperti]	0.01	-0.54 – 0.57	0.962
(Errore × Tecnica [spatola] × Sessione [POST-TEST]) × Gruppo [esperti]	-0.68	-1.49 – 0.13	0.100

### Random Effects

$\sigma^2$	0.79
$\tau_{00}$ ID	0.06
ICC	0.07
$N_{ID}$	26
<hr/>	
Osservazioni	1241
Marginal $R^2$ / Conditional $R^2$	0.023 / 0.094



**Figura 10.** Il grafico mostra come la visione del video corrispondente alla condizione di errore ha portato ad un'attivazione del potenziale motorio evocato e ad un'ampiezza del MEP maggiore nel gruppo sperimentale durante la sessione POST-TEST rispetto all'altra condizione, dove i partecipanti guardavano il video di una lavorazione corretta.

## Capitolo 4: Discussione

L'obiettivo di questo studio è stato quello di investigare sia la plasticità neurale del nostro cervello, in situazioni in cui è possibile imparare nuove operazioni, sia il ruolo fondamentale che il Sistema Specchio sembrerebbe avere nelle nostre vite e nella rilevazione di informazioni.

Per questa ragione, abbiamo stimolato la corteccia motoria (M1) tramite una co-registrazione di due tecniche di neuroimmagine differenti: l'EEG e la TMS. In particolar modo, quest'ultima tecnica ci ha permesso di sollecitare una precisa area di M1 che include sia FDI sia OP durante la visione di particolari video, i quali mostrano la lavorazione dell'argilla e della litica.

I video sono stati studiati in maniera tale che i partecipanti vedessero due condizioni diverse all'interno di ogni lavorazione: una condizione che presentava un errore di lavorazione e una condizione corretta.

In seguito, i partecipanti del gruppo sperimentale hanno potuto lavorare sulle tecniche osservate nei video sopracitati in maniera attiva tramite un training pratico.

Questo esperimento ha permesso inoltre di confermare i risultati degli studi sul sistema di *action-observation* già presenti in letteratura, mostrando come l'osservazione di un'azione che coinvolge un determinato muscolo causi l'attivazione dello stesso muscolo nell'osservatore (Catmur et al., 2007).

Inoltre, ulteriore scopo di questo esperimento è stato quello di gettare le fondamenta per una nuova disciplina: *la Neuro-Archeologia*. È stato così possibile approfondire due ambiti diversi e unirli in uno studio multidisciplinare, creando una base per sviluppi e studi futuri.

Le analisi condotte in questo studio hanno dimostrato che c'è una differenza significativa nel gruppo sperimentale tra la sessione PRE e POST-TEST nella condizione che presenta l'errore. Si osserva quindi come la detezione dell'errore comporti un'attivazione precoce del tratto corticospinale nel gruppo degli esperti, mentre il gruppo di controllo non ha sviluppato questa stessa capacità di predire l'errore.

È bene osservare che l'esperimento, in quanto pilota, potrebbe essere migliorato e, dunque, portare a risvolti positivi. Ad esempio l'utilizzo di un campione più ampio potrebbe condurre a dei risultati più attendibili. Analogamente, l'affinazione della tecnica

così come un training approfondito e più lungo per imparare la lavorazione dell'argilla e della litica potrebbero portare a risultati di spicco.

Future ricerche potrebbero chiarire il funzionamento della plasticità cerebrale in condizioni di apprendimento sia in partecipanti sani, come nel nostro studio, sia in pazienti con deficit motori o neurodegenerativi per comprendere maggiormente quali sono le aree coinvolte e lesionate in seguito ai suddetti traumi.

## Capitolo 5: Conclusione

Alla fine di questo studio sulla Neuro-Archeologia del movimento possiamo fare varie constatazioni e considerazioni.

In primo luogo questo studio multidisciplinare permette di prendere in considerazione non solo le neuroscienze, ma alcune delle sue branche come la psicologia cognitiva, la neuropsicologia, la psicobiologia con lo studio più approfondito del movimento, unendoli ad altri rami quali l'archeologia ed i beni culturali.

Gli obiettivi principali di questo studio pilota sono, senza dubbio, creare delle fondamenta per la Archeologia sperimentale, in quanto nuova materia di studio con pochi, se non assenti, riferimenti letterari e teorici. Altro punto centrale è stato l'approfondimento delle funzioni cerebrali con particolare attenzione alla corteccia motoria, riprendendo la letteratura passata in merito alla neuroplasticità e al Sistema specchio e utilizzando tecniche di neuroimmagine avanzate.

I partecipanti, distribuiti tra un gruppo sperimentale ed un gruppo di controllo, hanno osservato dei video sulla lavorazione della ceramica e della litica con le principali tecniche utilizzate nel Neolitico, durante una co-registrazione EEG-TMS. In seguito ad una prima visione, solamente il gruppo sperimentale – rinominato *esperti* – ha potuto iniziare un training per imparare ed affinare le stesse tecniche osservate durante la visione dei video. Questi ultimi erano caratterizzati da quattro esempi di lavorazione corretta del materiale e da quattro esempi con un errore nella lavorazione del materiale. In seguito, è stato chiesto loro di prendere visione degli stessi video in una seconda ed ultima sessione.

I risultati sono promettenti in quanto gli esperti mostrano di rilevare la condizione di errore più facilmente nella sessione POST-TEST rispetto al PRE-TEST. Infatti, l'ampiezza dei MEP risulta maggiore così come il muscolo dell'indice (FDI) e del pollice (OP) presentano un'attivazione del muscolo più o meno forte nell'osservatore in base alla tecnica osservata.

Tuttavia, bisogna tenere in considerazione che lo studio, essendo un pilota, presenta dei limiti. In primo luogo, un campione piccolo come quello preso in analisi lascia inevitabilmente troppa incertezza che non può essere completamente spiegata. Inoltre, le procedure per interfacciare i sistemi hanno richiesto una cospicua quantità di tempo, riducendo la finestra temporale per la somministrazione del test a soli tre mesi.

In conclusione, è ipotizzabile che questo esperimento possa servire da lancio per studi e sviluppi futuri, dove il campione di partecipanti sia più ampio, il tempo maggiore e le tecniche più affinate.



## Riferimenti bibliografici

- André-Obadia, P. Sauleau, F. Cheliout-Heraut, P. Convers, R. Debs, M. Eisermann, M. Gavaret, J. Isnard, J. Jung, A. Kaminska, N. Kubis, M. Lemesle, L. Maillard, L. Mazzola, V. Michel, A. Montavont, S. N’Guyen, V. Navarro, D. Parain, B. Perin, S.D. Rosenberg, H. Sediri, C. Soufflet, W. Szurhaj, D. Taussig, A. Touzery – de Villepin, L. Vercueil, M.D. Lamblin, *Recommandations françaises sur l’électroencéphalogramme*, Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology, 2014, pp. 515-612, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2014.10.001>
- C. Bonato, C. Miniussi, P.M. Rossini, *Transcranial magnetic stimulation and cortical evoked potentials: A TMS/EEG co-registration study*, Clinical Neurophysiology, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.05.006>
- Castiello, U., 2005. *The neuroscience of grasping*. Nature Reviews Neuroscience, 6 (9), 726-736
- Catmur, V. Walsh, C. Heyes, *Sensorimotor learning configures the human mirror system*, Current Biology 17 (2007) 1527–1531
- Daniela Cocchi Genick, *Manuale di preistoria, II. Neolitico*, 1994
- Erhan Oztop, Mitsuo Kawato, Michael A. Arbib, *Mirror neurons: Functions, mechanisms and models*, Neuroscience Letters, 2013, pp. 43-55 doi: <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2012.10.005>
- Fadiga L, Fogassi L, Pavesi G, Rizzolatti G. *Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study*. J Neurophysiol 1995;73:2608–11
- Freberg, L.A., 2007, *Psicologia biologica*. Bologna: Zanichelli
- Gavaret, A. Iftimovici, E. Pruvost-Robieux, *EEG: Current relevance and promising quantitative analyses*, Revue Neurologique, 2023, pp. 352-360, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2022.12.008>
- Hernandez-Pavon JC, Veniero D, Bergmann TO, Belardinelli P, Bortoletto M, Casarotto S, Casula EP, Farzan F, Fecchio M, Julkunen P, Kallioniemi E, Lioumis P, Metsomaa J, Miniussi C, Mutanen TP, Rocchi L, Rogasch NC, Shafi MM, Siebner HR, Thut G, Zrenner C, Ziemann U, Ilmoniemi RJ, *TMS combined with EEG:*

- Recommendations and open issues for data collection and analysis*, Brain Stimulation (2023), doi: <https://doi.org/10.1016/j.brs.2023.02.009>
- J.H. Kindred, J.J. Cash, J.B. Ergle, C.C. Charalambous, E.C. Wonsetler, M.G. Bowden, *Comparing cortico-motor hotspot identification methods in the lower extremities post-stroke: MEP amplitude vs. latency*, Neuroscience Letters, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2021.135884>
- Inizan et al., *Technology and Terminology of Knapped Stone*. 1999
- Jean-François Lepage, Dave Saint-Amour, Hugo Théoret, *EEG and neuronavigated single-pulse TMS in the study of the observation/execution matching system: Are both techniques measuring the same process?*, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2008.07.021>
- Kauffman, Thomas; Théoret, Hugo; Pascual-Leone, Alvaro<sup>CA</sup>. *Braille character discrimination in blindfolded human subjects*. NeuroReport 13(5): p 571-574, April 16, 2002
- Làdavas, E., Berti, A. (2020) *Neuropsychologia*. Bologna: il Mulino
- Michael Pellegrini, Maryam Zoghi, Shapour Jaberzadeh, *The effect of transcranial magnetic stimulation test intensity on the amplitude, variability and reliability of motor evoked potentials*, Brain Research, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2018.09.002>
- Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2000). Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. Pt 3 J. Physiol. 527 (Pt 3), 633–639.
- Pantelis Lioumis, Mario Rosanova, *The role of neuronavigation in TMS–EEG studies: Current applications and future perspectives*, Journal of Neuroscience Methods, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2022.109677>
- Pascual-Leone A. *The brain that plays music and is changed by it*. Ann N Y Acad Sci. 2001 Jun; 930:315-29. doi: [10.1111/j.1749-6632.2001.tb05741.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb05741.x)
- Pascual-Leone A, Tormos JM, Keenan J, Tarazona F, Cañete C, Catalá MD. *Study and modulation of human cortical excitability with transcranial magnetic stimulation*. J Clin Neurophysiol 1998; 5:333–43

- M.C. Ridding, J.C. Rothwell, *Stimulus/response curves as a method of measuring motor cortical excitability in man*, Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Electromyography and Motor Control, 1997, pp 340-344
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Rizzolatti, G., Fogassi, L. e Gallese, V. 1997, *From sight to action*, in Current Opinion Neurobiology, 7, pp. 562-567
- Rossi S, Hallett M, Rossini PM, Pascual-Leone A; Safety of TMS Consensus Group. *Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research*. Clin Neurophysiol. 2009 Dec;120(12):2008-2039. doi: 10.1016/j.clinph.2009.08.016
- Sartori, L., Betti, S., Castiello, U. *Corticospinal Excitability Modulation During Action Observation*. *J. Vis. Exp.* (82), e51001, doi: 10.3791/51001 (2013)
- The jamovi project (2022). jamovi. (Version 2.3) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>.
- Valentine Roux, *Ceramic Manufacture: The chaîne opératoire Approach*, The Oxford Handbook of Archaeological Ceramic Analysis, 2017
- Wanalee Klomjai, Rose Katz, Alexandra Lackmy-Vallée, *Basic principles of transcranial magnetic stimulation (TMS) and repetitive TMS (rTMS)*, Annals of Physical and Rehabilitation Medicine, 2015