



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PADOVA**

**Dipartimento di Filosofia, Sociologia,
Pedagogia e Psicologia Applicata (FISPPA)
Corso di laurea in Scienze psicologiche sociali e del lavoro**

**Uno studio di co-registrazione TMS-EEG:
gli effetti dell'allenamento sulla neuroplasticità della corteccia**

A TMS-EEG co-registration study effects of training on cortex neuroplasticity

Relatrice

Prof. Luisa Sartori, DPG

Correlatore

Dott. Antonino Visalli, DNS

Laureando : Manuele De Santis

Matricola: 1221923

Anno accademico 2023/2024

Alla mia famiglia.

INDICE

Abstract	4
Capitolo 1: Introduzione	5
1.0 Ipotesi di ricerca.....	5
1.1 Neuroarcheologia: una nuova disciplina.....	6
1.2 Neuroplasticità.....	7
1.3 Co-evoluzione Cognizione-fabbricazione di utensili.....	8
1.4 Fabbricazione di utensili.....	9
1.5 AON e Sistema Mirror.....	10
1.6 Sistema di monitoraggio degli errori.....	13
1.7 Formazione.....	14
1.8 Movimento.....	15
1.9 Tecniche di lavorazione (ceramica e litica).....	17
Capitolo 2: Materiali e metodi	20
2.1 Partecipanti.....	20
2.2 Apparato sperimentale.....	21
2.2.1 TMS.....	21
2.2.2 Registrazione MEP.....	22
2.2.3 EEG.....	24
2.2.4 Co-registrazione TMS-EEG.....	25
2.3 Procedura.....	26
2.4 Stimoli.....	29
2.5 Pre-processamento dati.....	33
2.6 Analisi dati.....	34
Capitolo 3: Risultati	36
3.1 ANOVA a misure ripetute.....	36
3.2 Modello misto.....	37
Capitolo 4: Discussione	40
Capitolo 5: Conclusioni	41
Riferimenti bibliografici	42

Abstract

Questo lavoro è il risultato di un esperimento pilota svolto in collaborazione con i Dipartimenti dei Beni Culturali (DBC) e di Neuroscienze (DNS) dell'Università di Padova. Lo studio qui descritto pone le basi per lo sviluppo della Neuro-Archeologia, un nuovo ambito di ricerca multidisciplinare che può contribuire alla comprensione delle origini della cognizione. Questa disciplina integra l'interesse delle neuroscienze per lo sviluppo della cognizione con l'orientamento dell'archeologia a indagare l'evoluzione umana mediante l'esplorazione dei contesti e dei reperti. Ai fini di indagare se l'introduzione della lavorazione della ceramica nel Neolitico potrebbe aver modificato la plasticità neurale della corteccia, in questo studio abbiamo esaminato una tecnica di fabbricazione di utensili tipica del Neolitico. Il disegno sperimentale ha previsto la suddivisione dei partecipanti in due gruppi, sperimentale ('esperti') e di controllo ('naive'), e solo il primo gruppo si è sottoposto ad un training nella lavorazione della terracotta chiamato colombino. Al fine di valutare se il training avesse indotto differenze nell'attività cerebrale tra i due gruppi, il protocollo sperimentale era articolato in due sessioni di co-registrazione elettromiografica (EEG) e stimolazione magnetica transcranica (TMS) prima e dopo l'allenamento. I risultati hanno mostrato un effetto di plasticità corticospinale specifico per i soggetti del gruppo sperimentale. Questi risultati rappresentano un punto di partenza prezioso per ulteriori studi più approfonditi in questo ambito di ricerca.

1 INTRODUZIONE

1.0 IPOTESI DI RICERCA

L'impatto dell'avanzamento tecnologico sull'evoluzione della cognizione umana ha contribuito allo sviluppo di svariate abilità cognitive nel corso del tempo. Obiettivo di questa ricerca è esplorare, almeno indirettamente, i cambiamenti funzionali che si sono verificati a livello cerebrale nei primati del Neolitico, durante la transizione dal lavoro con la pietra al lavoro con l'argilla. Il disegno sperimentale prevedeva la divisione casuale dei partecipanti in due gruppi: "esperti" (gruppo sperimentale) e "naive" (controllo). I soggetti sono stati sottoposti a due somministrazioni (pre- e post-) di un test basato su un compito di osservazione di sequenze motorie mediante la riproduzione di video. Le sequenze d'azione riprodotte rappresentavano tecniche di lavorazione della litica e della ceramica per la realizzazione di utensili, tipiche del Neolitico. Nel periodo intercorrente tra la prima e la seconda sessione, il gruppo "esperti" è stato oggetto di una formazione sulle abilità per la fabbricazione di utensili mediante lavorazioni litiche e della ceramica, le medesime oggetto dei video.

L'esperimento prevedeva la registrazione concomitante dell'elettroencefalogramma (EEG) e dei potenziali motori evocati (MEP) indotti dalla stimolazione magnetica transcranica (TMS) durante l'osservazione di sequenze motorie su uno schermo, con l'obiettivo di osservare la differenza di attivazione tra i gruppi, sia a livello corticale sia a livello di pre-attivazione muscolare (mediante rilevazione dei MEP). Sono stati così osservati gli effetti della stimolazione mediante TMS in condizione di maggiore eccitabilità della corteccia motoria, suscitata dall'osservazione delle sequenze d'azione. Si prevedeva che non ci sarebbe stata un'attivazione cerebrale differenziata inter-gruppi durante la riproduzione dei video nella prima sessione. Mentre nella seconda sessione, era

attesa una differenza significativa inter-gruppi in termini di attivazione elettrofisiologica legata all'osservazione delle azioni e al monitoraggio degli errori. Lo studio esplora i segnali elettrofisiologici associati, per ottenere approfondimenti sulla loro interpretazione e indagare sulla coevoluzione della cognizione - fabbricazione di utensili. Ciò si basava sull'aspettativa che la formazione sulle abilità di fabbricazione di utensili per i partecipanti del gruppo sperimentale (esperti) avrebbe causato un'attivazione potenziata dei meccanismi cognitivi sottesi, migliorando la capacità dei partecipanti di monitorare gli errori, risultando in distinte firme neurali rispetto al gruppo di controllo.

Un ulteriore sviluppo è dato dall'osservazione delle differenze intra-gruppo in base alle ore di formazione completate.

1.1 Neuroarcheologia: una nuova disciplina

Il termine “Neuroarcheologia” è nato per designare l'articolato e rapido sviluppo di ricerche interdisciplinari incentrate sulle questioni che emergono dall'analisi dello sviluppo cerebrale e culturale attraverso traiettorie evuzionistiche a lungo termine (Malafouris, 2009). Questa nuova disciplina implica l'applicazione di teorie e metodi neuroscientifici, come ad esempio il *neuroimaging*, per rispondere alle domande formulate nel campo dell'archeologia. Nonostante l'archeologia e la neuroscienza rappresentino due ambiti di studio molto diversi, in modo distinto contribuiscono alla comprensione della mente umana. L'archeologia esplora le società del passato impiegando i resti antichi come fonte principale di dati, con lo scopo di indagare come l'interazione con i diversi materiali di questi manufatti abbia plasmato la cognizione umana e il momento nel passato e il contesto nei quali si sia verificata questa interazione. D'altra parte, la neuroscienza cognitiva si dedica allo studio dei processi neurali alla base della cognizione umana, ponendo particolare enfasi sull'epoca

contemporanea. Il rapido sviluppo nei campi delle neuroscienze sociali e culturali (Han e Northoff, 2008) apre nuove prospettive di ricerca, fornisce fonti di dati inedite e solleva una serie di interrogativi che richiedono l'attenzione dell'archeologia, introducendo la possibilità di una collaborazione proficua tra archeologia e neuroscienze. La Neuroarcheologia rappresenta un tentativo sistematico di indirizzare questo vasto potenziale emergente nella direzione di un programma di ricerca integrato comune mirante all'ampia visione della mente umana e del suo sviluppo nell'evoluzione umana (Renfrew et al., 2008). Si aprono nuove prospettive nella comprensione della relazione tra cultura materiale e sviluppo cognitivo nel corso della storia. Per descrivere l'interrelazione tra plasticità neurale e cambiamenti culturali, la Neuroarcheologia si avvale del concetto di "metaplasticità" (Invitto e Francioso, 2013).

1.2 Neuroplasticità

La neuroplasticità rappresenta la capacità del sistema nervoso di modificarsi, sia a livello funzionale che strutturale, in risposta all'esperienza o all'apprendimento, aumentando la trasmissibilità del segnale che conduce. Ciò può avvenire in modi diversi, implicando cambiamenti nelle connessioni sinaptiche, nella densità delle sinapsi e nella struttura fisica dei neuroni. Quando siamo esposti a nuove esperienze o acquisiamo nuove conoscenze, il nostro cervello è in grado di modificare la sua configurazione interna per adattarsi ai nuovi stimoli.

La neuroplasticità è una testimonianza della straordinaria flessibilità del nostro sistema nervoso, che evidenzia come il cervello sia in grado di plasmarsi e reinventarsi continuamente in risposta alle esperienze che viviamo.

1.3 Co-evoluzione Cognizione-Fabbricazione di utensili

L'ipotesi della co-evoluzione della Cognizione Umana e delle tecnologie primitive sostiene che tale interazione abbia avuto inizio con la fabbricazione degli utensili in pietra, attraverso i quali le persone hanno iniziato a modificare il proprio ambiente (Renfrew, 2008). Gli utensili sono artefatti significativi che riflettono le capacità cognitive dei nostri antenati (Stout, 2002). L'avanzamento tecnologico insito nel corso dell'evoluzione si riduce a fasi di innovazione caratterizzate da eventi o esperienze peculiari, che possono aver innescato lo sviluppo di nuove abilità. Ad esempio l'interazione del nostro antenato Homo Habilis con materiali diversi (come pietra o argilla) lo ha condotto all'apprendimento della fabbricazione di utensili. Questo processo potrebbe aver causato cambiamenti nelle regioni cerebrali associate al controllo motorio e nei sistemi cognitivi responsabili dell'osservazione delle azioni e del monitoraggio degli errori.

Di fatto l'interazione tra utensili e cognizione sembra abbia instaurato un processo di mutua influenza, in cui abilità cognitive complesse stimolano la produzione di utensili più sofisticati. Questi a loro volta influenzano l'evoluzione delle abilità cognitive, come una sorta di ciclo virtuoso (Jeffares, 2010). Inoltre, nel passaggio del materiale impiegato (da pietra ad argilla) per la fabbricazione di utensili, emerge un aumento dell'ingegno nelle strategie di produzione.

“Attendiamo con interesse di scoprire la possibilità che la chiave di volta dell'evoluzione cerebrale del genere umano e delle sue straordinarie capacità cognitive non risieda esclusivamente nel cervello, bensì nelle sue connessioni con il mondo esterno, di cui ignoriamo totalmente l'esistenza e le potenzialità” (Bruner, 2010). Malafouris (2019) sostiene che la mente umana non può essere localizzata nel cervello ma al contempo non può essere vista come qualcosa di isolato nel corpo; dovrebbe piuttosto essere pensata come

un processo sempre in corso che diviene reale nell'interazione con i materiali e l'ambiente. In simil modo la visione della "mente estesa" della cognizione sostiene che il cervello non sia l'unico luogo della mente; piuttosto, la mente si estende dal cervello al corpo e l'interazione tra corpo e ambiente costituisce la cognizione (Stout e Chaminade, 2007). Attualmente, nella letteratura scientifica, un indicatore di cognizione avanzata non si basa sulle dimensioni assolute del cervello, ma sulle sue dimensioni relative rispetto all'intero corpo (Horik ed Emery, 2011). Studi recenti hanno evidenziato che, tra tutti i mammiferi, gli esseri umani si distinguono per le dimensioni relative del cervello più sviluppate, seguiti dagli altri primati e dai delfini (Roth e Dicke, 2005).

1.4 Fabbricazione di utensili

La fabbricazione di utensili è una procedura complessa finalizzata ad utilizzare questi strumenti per uno scopo specifico. L'uomo progetta, fabbrica e impiega utensili come estensione del proprio corpo e del proprio cervello (Dini, 2010). La definizione di "uomo costruttore di utensili" può indicare la più importante abilità che ci rende tanto diversi dagli altri abitanti del pianeta. La mano di Homo habilis rivela già la capacità per la fabbricazione di utensili, la cui presenza è ben documentata: Homo habilis (Leakey et al., 1964), è noto come il primo ominide che ha realizzato utensili duraturi e li ha impiegati efficacemente. Tali abilità di fabbricazione e impiego di utensili possono averlo portato allo sviluppo di nuove capacità cognitive che non erano presenti nei primati precedenti. Gli utensili più antichi che si ritiene i nostri antenati abbiano creato, erano in pietra (Semaw et al, 1997). La loro produzione coinvolgeva il processo di percussionismo, mediante il quale venivano colpite due pietre l'una contro l'altra. Questo procedimento mirava a generare schegge di

selce, ottenute attraverso il distacco controllato di piccoli frammenti dal nucleo di pietra, al fine di ottenere lame sufficientemente affilate.

Il successivo momento decisivo nell'evoluzione della fabbricazione di utensili si compie con l'utilizzo dell'argilla per la manifattura di recipienti, grazie alla cottura e destinati alla conservazione degli alimenti (Kuzmin, 2013). I manufatti archeologici come utensili di pietra e vasi in ceramica possono fornire spunti per comprendere il momento e le ragioni dell'evoluzione della cognizione umana (Wynn, 2002). Di fatto queste diverse strategie di produzione di utensili hanno radici in epoche storiche differenti e hanno contribuito in modo significativo all'evoluzione delle capacità cognitive e delle abilità motorie nei nostri antenati, che sono poi passate a noi.

1.5 AON e Sistema 'Mirror'

L'*Action Observation Network* (in italiano "rete di osservazione dell'azione") rappresenta un sistema che consente agli esseri umani di comprendere le intenzioni legate alle azioni osservate e imitare con precisione tali azioni (Caspers et al., 2010). Diversi studi hanno indicato che i paradigmi di osservazione dell'azione possono essere indagati per identificare i substrati neurali per la comprensione e l'apprendimento dell'azione (Grèzes e Decety, 2001). Tali esperimenti individuano un insieme distinto di regioni cerebrali attive sia durante l'osservazione che durante l'esecuzione di azioni, denominato "sistema dei neuroni specchio" o, in termini più generali, "rete di osservazione dell'azione". Dai risultati di altri studi incentrati sull'indagine dei substrati neurali corticali dell'apprendimento, fisico e osservativo (Barzouka et al., 2007), emerge l'ipotesi che l'osservazione di sequenze motorie e l'esecuzione pratica condividano meccanismi cognitivi comuni. Il processo di apprendimento motorio potrebbe trarre vantaggio da un approccio integrato che coinvolge

sia la visualizzazione delle azioni che la loro esecuzione pratica. L'osservazione attenta e la comprensione visiva delle sequenze di movimenti potrebbero contribuire in modo significativo al processo di apprendimento motorio, lavorando sinergicamente all'effettiva esecuzione pratica delle azioni stesse.

In uno studio Calvo-Merino e colleghi (2005) hanno impiegato la risonanza magnetica funzionale (fMRI) per studiare le differenze nell'attività cerebrale tra l'osservazione di un'azione appresa e una che non si è appresa, al fine di valutare se i processi cerebrali di osservazione dell'azione siano modulati dal repertorio motorio dell'individuo. I partecipanti, esperti di balletto classico, esperti di capoeira e soggetti di controllo (inesperti), hanno osservato video di azioni di balletto o capoeira. Analizzando l'attività cerebrale durante l'osservazione del proprio stile di danza piuttosto che l'altro stile, si rivela quindi l'influenza dell'esperienza motoria sull'osservazione dell'azione. Gli autori hanno riferito che quando i ballerini guardavano i movimenti del proprio repertorio, è stata trovata evidenza di risonanza dell'azione basata sulla pura esperienza motoria, nella corteccia parietale inferiore, premotoria e cerebellare. Dunque l'effettiva esperienza fisica precedente è un prerequisito necessario per una forte attivazione in queste aree dell'AON (Cross et al., 2009).

I neuroni specchio sono stati segnalati per la prima volta nella corteccia premotoria ventrale del macaco o area F5 (Adornetti, 2012) utilizzando la registrazione di un singolo neurone, mentre una scimmia osservava ed eseguiva semplici azioni. La loro caratteristica distintiva è l'attivazione neuronale sia quando gli individui eseguono una determinata azione sia quando osservano qualcuno eseguire l'azione medesima (di Pellegrino et al., 1992). L'importanza dei neuroni specchio risiede nel ruolo svolto nella comprensione dell'azione (Adornetti, 2012). Dopo i primi esperimenti sui primati, i circuiti specchio sono stati

localizzati anche nelle aree motorie umane (Rizzolatti et al., 1996). In particolare, le funzioni dell'area F5 dei macachi sembrano corrispondere a quelle dell'area 44 di Brodmann.

Come il cervello umano crea queste rappresentazioni interne delle azioni e dà un senso alle intenzioni e agli obiettivi sottostanti di tali azioni è un argomento di studio prominente e ampiamente dibattuto nel campo delle neuroscienze cognitive. Questo sistema di specchiatura prende parte al processo di osservazione dell'azione, aiutando gli esseri umani a monitorare le azioni motorie degli altri in modo che impariamo semplicemente osservando, non commettiamo gli stessi errori e ci esibiamo meglio in compiti motori, come la fabbricazione di utensili.

In uno studio (Fadiga et al., 1995) che utilizza la stimolazione magnetica transcranica (TMS) per stimolare la corteccia motoria, è stato dimostrato che quando gli esseri umani osservano un'azione eseguita da altri, i neuroni nella corteccia motoria degli osservatori diventano più facilmente eccitabili: processo che viene chiamato 'risonanza motoria'. Nel nostro studio dunque, il compito di osservazione di sequenze motorie cui i partecipanti sono sottoposti, permette di registrare l'attività elettromiografica del cervello in condizioni di alta eccitabilità. Riconoscere il ruolo dei neuroni specchio nel funzionamento delle reti di osservazione dell'azione può aiutare i ricercatori a comprendere alcune patologie caratterizzate da una carenza nella comprensione degli obiettivi delle azioni motorie degli altri, come i disturbi dello spettro autistico (Rizzolatti e Fabbri-Destro, 2008). Inoltre, gli studi con EEG e fMRI su bambini hanno mostrato che il sistema di corrispondenza osservazione-esecuzione dell'azione si sviluppa prima di quanto si pensasse in precedenza (Dapretto et al., 2006). Questi risultati supportano l'idea che il sistema di neuroni specchio, designato alla comprensione delle azioni degli altri, non è un sistema sviluppato con

l'interazione con l'ambiente; piuttosto, è un sistema intrinseco del cervello umano che si è evoluto nei nostri antenati più antichi.

1.6 Sistema di monitoraggio degli errori

Per apprendere la realizzazione corretta di uno strumento, i nostri antenati non solo necessitavano di osservare una serie di azioni motorie, ma probabilmente dovevano anche monitorare, individuare e ricordare gli errori commessi durante la fabbricazione di tale strumento. Tuttavia, gli esseri umani commettono spesso errori, rischiando di danneggiare il processo di trasmissione della conoscenza alle generazioni future. Pertanto gli osservatori dovrebbero essere in grado di differenziare quali atti motori sono appropriati e quali no per eseguire questi movimenti motori in modo più efficiente. Dunque è importante sviluppare un sistema cognitivo responsabile del monitoraggio e della rilevazione degli errori motori degli altri. Il sistema di monitoraggio degli errori e il sistema di osservazione dell'azione operano congiuntamente nel monitoraggio delle prestazioni umane (Pezzetta et al., 2018). Falkenstein e colleghi (1991) hanno individuato due componenti potenziali correlate agli errori, alla loro rilevazione e alla relativa consapevolezza negli esseri umani, e li hanno denominati 'Ne' (o ERN - Negatività dell'Errore) e 'Pe' (Positività dell'Errore). 'Ne' è definita come un aumento dell'ampiezza negativa sopra gli elettrodi centrali-frontali del cuoio capelluto che raggiunge il picco intorno a 20-100 ms dopo l'errore e si ritiene rappresenti un correlato della rilevazione dell'errore con un sistema interno probabilmente senza alcuna consapevolezza, mentre 'Pe' consiste in un incremento dell'ampiezza positiva registrato sugli elettrodi parietali-occipitali, che raggiunge il picco approssimativamente nell'intervallo 200-500 ms dopo l'errore. 'Pe' riflette il fatto che gli errori sono consapevolmente rilevati dall'individuo. Tuttavia nuovi dati (Vidal et al., 2000) hanno

rivelato una piccola negatività simile alla 'Ne' anche dopo le risposte corrette. Dunque è plausibile che la 'Ne' rifletta questo processo di confronto stesso piuttosto che il suo risultato. Ricerche ulteriori hanno evidenziato che gli esseri umani codificano gli errori commessi dagli altri attivando gli stessi meccanismi con cui codificano i propri errori. In entrambe le situazioni infatti, i segnali elettrofisiologici sono riflessi attraverso le medesime componenti ERP (*Event-Related Potential*) (Bates et al., 2005). Recentemente è stato ipotizzato che i gangli della base svolgano un ruolo cruciale nel rilevamento degli errori (Falkenstein et al., 2001).

Una metanalisi che ha incluso dati da 104 diversi studi di neuroimaging che utilizzavano fMRI o PET e prevedevano un compito di osservazione di azioni motorie, ha evidenziato che l'attivazione nell'area di Brodmann 44 (BA 44, area di Broca) e 6 (BA 6, area premotoria) era fortemente associata all'osservazione di azioni. In particolare, l'attivazione di BA 6 era più strettamente associata all'osservazione di movimenti delle mani, mentre l'attivazione di BA 44 era più strettamente associata all'osservazione di azioni non-manuali (Caspers et al., 2010).

1.7 Formazione

La formazione è un essenziale strumento che gli esseri umani hanno per acquisire una nuova competenza o per coltivare ulteriormente una competenza già acquisita. Quando si confrontano le capacità di diversi individui secondo specifiche abilità, ci si aspetta che coloro che hanno ricevuto una formazione dimostrino una performance superiore rispetto a individui totalmente inesperti. Da una prospettiva neuroscientifica, è cruciale comprendere quali meccanismi cognitivi siano coinvolti nella formazione.

Nel contesto dei compiti motori, la formazione è un processo che potenzia la reattività delle aree motorie nel cervello. Per valutare l'impatto della formazione sulle risposte neurali si può osservare se i segnali cerebrali per una specifica attività, come ad esempio l'osservazione di azioni, differiscono dopo la formazione.

1.8 Il Movimento

Sin dai primi piccoli passi che muoviamo, il nostro cervello si trasforma e si evolve in risposta a ogni esperienza che viviamo. Il movimento si costituisce di atti motori che permettono al corpo di spostarsi nello spazio ed entrare in contatto con l'ambiente esterno. L'avvio del movimento è una procedura complessa, che richiede la cooperazione dei sistemi corticali deputati. Nel perseguire la comprensione di questo fenomeno, il presente capitolo si propone di esplorare le implicazioni neuroscientifiche coinvolte nell'avvio del movimento.

I sistemi motori sono organizzati secondo un ordine gerarchico: i centri superiori, deputati alla gestione dei movimenti volontari, controllano i centri inferiori, i quali invece sono responsabili dei movimenti automatici e delle risposte riflesse. La corteccia motoria primaria (M1) è situata nel giro precentrale e individuata da Brodmann come area 4. E' la principale responsabile del movimento volontario in quanto da essa partono i comandi per i motoneuroni del tronco encefalico e del midollo. In particolare, i sistemi motori si trovano in quattro regioni del sistema nervoso centrale: nel midollo spinale, nel tronco encefalico, nella corteccia motoria e nelle corteccie premotorie, ma sono implicate nel movimento anche le corteccie parietali, che hanno l'importante compito di tenere informate le aree motorie delle conseguenze delle loro attività (Làdavas e Berti, 2020). Nella circonvoluzione anteriore troviamo l'area premotoria (PMA) e l'area motoria supplementare (SMA),

responsabili della pianificazione, programmazione e controllo dei movimenti. All'attivazione della PMA e della SMA fa seguito quella della corteccia motoria primaria (M1), la quale permette l'esecuzione vera e propria dell'azione. I lobi parietali contribuiscono ad aumentare la nostra consapevolezza dell'ambiente e migliorare la percezione dell'azione da svolgere.

I neuroni responsabili della contrazione muscolare sono i motoneuroni alfa, i quali sono connessi alle fibre muscolari. Quando un potenziale d'azione raggiunge l'assone del motoneurone, si genera un potenziale motorio nella fibra muscolare, che produrrà un cosiddetto *twitch*, provocando la contrazione del muscolo.

Una delle caratteristiche più evidenti di M1 è la sua organizzazione somatotopica: ciò significa che le diverse parti del corpo hanno una loro rappresentanza all'interno della corteccia motoria, la quale è proporzionale alla densità di unità motorie in ogni parte del corpo. Le parti designate ai movimenti più fini, come la mano o il volto, hanno una rappresentazione corticale maggiore rispetto a quelli meno sofisticati, come ad esempio il torso, al quale è dedicato uno spazio di tessuto corticale ridotto rispetto alla sua grandezza. Una rappresentazione grafica dell'organizzazione somatotopica di M1 è data dall'Homunculus motorio di Wilder Penfield, dove le diverse aree del corpo sono rappresentate nel cervello in modo distorto nelle dimensioni rispetto alle loro proporzioni corporee (Làdavas e Berti, 2020). La rappresentazione somatotopica di M1 possiede una certa capacità di plasmarsi e di riorganizzarsi. Ciò significa che la parte della corteccia che corrisponde a un determinato muscolo può espandersi grazie all'esperienza. Un esempio di questa proprietà di M1 si può riscontrare in un normale soggetto che si allena a eseguire una sequenza complessa di movimenti delle dita: quando il soggetto diventa esperto

nell'esecuzione di quello specifico movimento, il territorio corticale dove quel dito è rappresentato si espande.

1.9 Le tecniche di lavorazione

Il periodo “Neolitico” rappresenta un periodo soggetto a grandi cambiamenti. Ai fini di questo studio risulta particolarmente significativa la transizione dalla lavorazione della pietra alla modellazione dell'argilla. Le tecniche di fabbricazione degli utensili giocano un ruolo centrale nella comprensione delle abilità che i nostri antenati hanno sviluppato durante il processo evolutivo, come frutto dell'interazione con l'ambiente e con i materiali. Questo studio si rifà alle tecniche di lavorazione degli utensili come tradizione risalente al Neolitico. La prima industria litica preistorica risale a circa due milioni e mezzo di anni fa ed è associata ad *Homo habilis*, che utilizzava la “tecnica del Modo olduvaiano”, in cui un oggetto viene impiegato per modificarne un altro, al fine di conferirne efficienza per un successivo utilizzo come strumento (Adornetti, 2012). In particolare la lavorazione olduvaiana consiste nella scheggiatura del margine di un ciottolo per ottenere un bordo abbastanza affilato. Per la lavorazione della litica venivano scelte risorse in base alla loro provenienza, quantità ed abbondanza nel territorio, qualità della pietra, scopo a cui erano destinate, durezza e facilità di lavorazione. Le rocce, inoltre, presentano un indice di facilità/difficoltà alla lavorazione, con scaglie più o meno complicate da ottenere.

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). I nostri partecipanti hanno imparato a lavorare la selce esclusivamente mediante la tecnica di percussione diretta, colpendo il nucleo di

selce con un percussore osseo in palco di cervo o con un ciottolo in pietra di forma tondeggiante. Il percussore in palco di cervo è più morbido mentre il ciottolo è un percussore più duro.

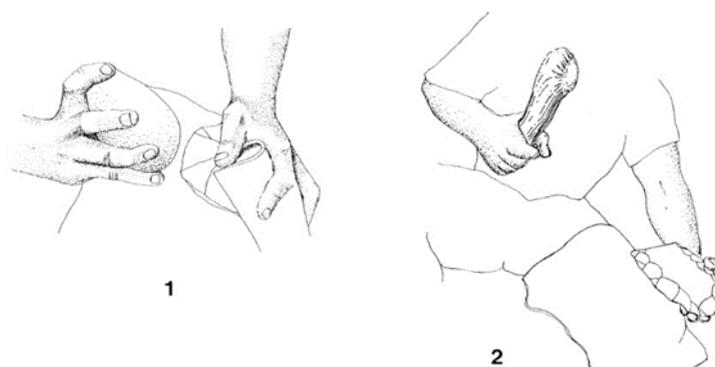


Fig. 1. Tecniche di scheggiatura (Inizan et al., *Technology and Terminology of Knapped Stone*. 1999). La prima tecnica illustra una percussione diretta mediante un martello di pietra. La seconda tecnica mostra, invece, una percussione diretta con un palco di cervo.

La tecnica della pressione prevede la rimozione di schegge da una pietra madre attraverso la pressione applicata su un punto specifico della roccia. In questa tecnica viene impiegato un punteruolo di legno, metallo o osseo, per applicare una forza concentrata su un punto specifico della superficie della pietra. Come la percussione indiretta, permette di creare lame molto lunghe. Le schegge vengono poi lavorate ulteriormente per ottenere utensili come raschiatoi o punte di freccia. La differenza tra i due percussori è data dalla forma, dimensione e durezza diversa. Nel nostro caso, i partecipanti hanno svolto una prima esperienza con un percussore in pietra, ovvero dei ciottoli di forma tondeggiante, poi sono passati al distacco di lame utilizzando dei percussori in palco di cervo.

Le prime prove di contatti degli ominidi con l'argilla risalgono al tardo Pleistocene (2,58 milioni di anni fa) sino all'odierno Olocene, l'epoca geologica più recente (iniziata 11.700 anni fa) (Cohen et al., 2013). Questi reperti rappresentano riproduzioni di forme animali, figurine umane e contenitori in ceramica ottenuti mediante la cottura dell'argilla. Nel Neolitico la ceramica veniva lavorata a mano, in quanto non era stato ancora inventato il tornio. 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 dupplici: "rifinitura", ad esempio mediante l'utilizzo di una spatola e "a colombino", che consiste nel creare delle forme cilindriche e impilarle una sull'altra (Figura 2) (C. Genick, 1994).

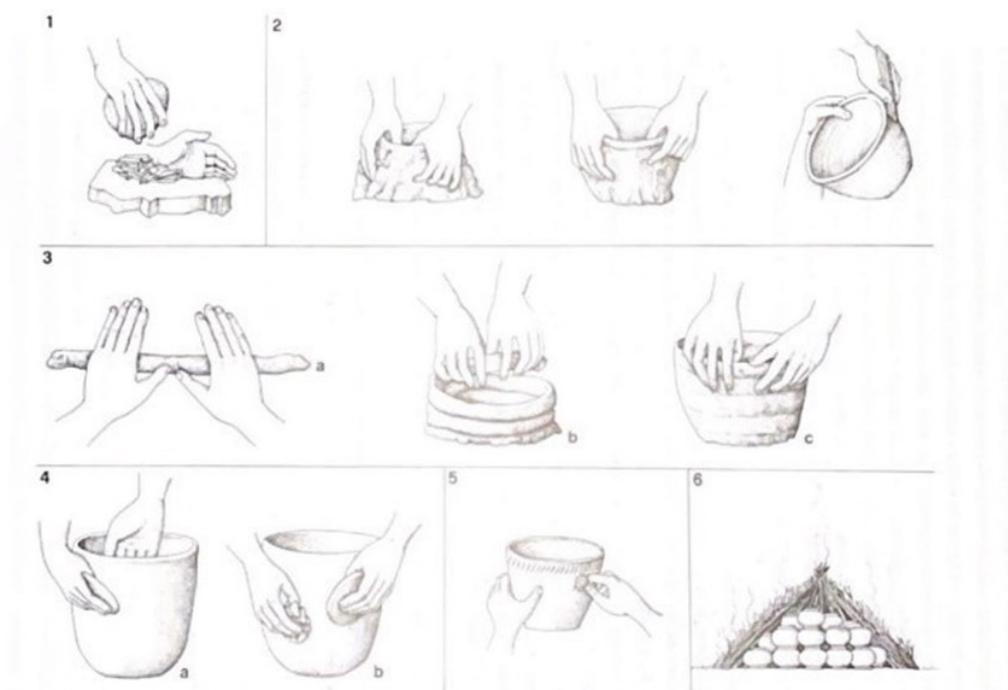


Fig. 2. Immagine di Cocchi Genick, D. (1994). Manuale di Preistoria, II: Il Neolitico.

La figura mostra la lavorazione della ceramica nelle sue varie fasi. 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).

2 MATERIALI E METODI

Il disegno di ricerca prevedeva l'introduzione di una formazione per il gruppo sperimentale (esperti) al fine di osservarne gli effetti sui soggetti, in termini di attivazione differenziata sia a livello corticale sia a livello di pre - attivazione muscolare (ottenendo una misurazione dei potenziali motori evocati-PEM) tra il gruppo "naïve" e il gruppo "esperti".

A tal fine è stato implementato un corso di formazione per studenti di archeologia volontari inesperti presso il Laboratorio di Archeologia Sperimentale e Ricerca sulla Tecnologia presso l'Università di Padova, per la fabbricazione di utensili in pietra e vasi in ceramica. La formazione aveva l'obiettivo di replicare le materie prime, le tecniche e le condizioni di trasferimento delle conoscenze simili a quelle del periodo neolitico. La formazione sulle abilità di fabbricazione di utensili è stata l'unica differenza sistematica tra i due gruppi.

2.1 PARTECIPANTI

I partecipanti reclutati per lo studio sono 26 studenti e dottorandi del Dipartimento di Archeologia dell'Università di Padova (13M: 13F) di età compresa tra i 19 e 32 anni (F età media = 21,80 SD = 3,38 anni; M età media = 21,46 SD = 1.26 anni) di cui 12 hanno partecipato alla ricerca come gruppo sperimentale ed i restanti 14 come gruppo di controllo. Tutti i partecipanti ignoravano l'obiettivo della ricerca. Nessuno aveva abilità pregresse nel manipolare pietra o ceramica. Prima di iniziare lo studio hanno firmato il consenso informato e compilato due questionari: un questionario per valutare l'idoneità alla TMS e l'Edinburgh Handedness Inventory per la dominanza manuale, che consiste in una Scala Likert da 1 a 5 dove 1 corrisponde a "Sempre sinistra" e 5 corrisponde a "Sempre destra". Il paradigma è stato approvato dal comitato etico di Area Psicologica (parere n. 4917).

2.2 Apparato sperimentale

Per questo esperimento è stata impiegata la tecnica di stimolazione magnetica transcranica, detta TMS, sistemi di rilevazione dei potenziali motori evocati (MEP) e l'elettroencefalogramma (EEG).

2.2.1 TMS

La stimolazione magnetica transcranica (TMS) rappresenta una tecnica di indagine non invasiva e indolore usata sia in ambito di ricerca che in contesti clinici, per esplorare il cervello umano. Il suo funzionamento si basa sul principio dell'induzione elettromagnetica o Legge di Faraday, che afferma che una corrente elettrica indotta da una bobina è in grado di produrre un campo magnetico che, a sua volta, induce un flusso secondario di corrente elettrica nel tessuto corticale sottostante. Tale corrente porta ad una depolarizzazione dei neuroni, in cui gli ioni positivi vengono spinti verso una cellula nervosa, elevando il suo potenziale al punto di generare un potenziale d'azione (Sartori et al., 2013). Pertanto l'attività cerebrale viene così manipolata tramite una breve ma intensa scarica elettrica, che può influenzare l'attività neuronale nella zona bersaglio, anche offrendo un potenziale beneficio terapeutico.

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 rappresenta l'intensità minima di TMS che riesce ad elicitarne un potenziale d'azione (MEP) nel muscolo controlaterale dell'area stimolata (Hernandez-Pavon et al., 2023). Per esempio, stimolando l'area che corrisponde al muscolo che controlla il pollice (*Opponens Pollicis*, OP), è stato osservato un lieve movimento involontario del pollice controlaterale alla zona

elicitata in M1 ed è stato così possibile registrare un potenziale motorio. 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. La TMS può essere considerata una tecnica precisa, che offre una buona risoluzione sia a livello spaziale che temporale. In questo studio abbiamo utilizzato una TMS a impulso singolo (spTMS)– solitamente impiegata nelle neuroscienze cognitive – con un condensatore Magstim BiStim2 (Magstim Company Ltd., Whitland, Dyfed, UK) e una bobina grande 70 mm a forma di otto.



Fig. 3: a sinistra la bobina, a destra il condensatore

2.2.2 REGISTRAZIONE MEP

L'impiego della TMS è stato finalizzato alla registrazione dei MEP di due muscoli della mano: *First Dorsal Interosseous* (FDI) e *Opponens Pollicis* (OP). È stato utilizzato un sistema a montaggio bipolare di elettrodi Ag-AgCl a coppetta con diametro di 9 mm. Gli elettrodi, realizzati in argento (Ag) sono rivestiti da cloruro d'argento (AgCl). Tale rivestimento è importante perché crea una superficie conduttiva stabile e riduce le potenziali derivate dalla polarizzazione elettrochimica. La coppetta è un dispositivo che ospita gli elettrodi e può contenere un gel conduttivo o una soluzione elettrolitica per

garantire un buon contatto tra gli elettrodi e la pelle. Tale contatto è fondamentale per un'adeguata rilevazione dei MEP.

In questo studio è stato impiegato un montaggio bipolare, che coinvolge due elettrodi e prevede la registrazione della rispettiva differenza di potenziale.

Sono state analizzate tre variabili dipendenti: l'ampiezza, la latenza e la durata dei MEP registrati. Con ampiezza si intende la distanza tra il picco minimo e il picco massimo raggiunto dal MEP. La latenza indica la distanza tra la stimolazione tramite TMS e l'inizio del MEP (detto *onset*) e la durata rappresenta la distanza tra *onset* e picco massimo. 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. L'ampiezza dei MEP riflette l'eccitabilità della corteccia motoria e, in particolare, del muscolo in oggetto. 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. 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). Quando le persone osservano azioni che coinvolgono un particolare gruppo di muscoli, le risposte alla TMS in quegli stessi muscoli sono specificamente facilitate (Calvo-Merino et al., 2005). Tuttavia sembrerebbe che l'osservazione di un'azione non è necessaria per elicitarne la corteccia motoria, in quanto anche solo l'immaginazione di un gesto è sufficiente per aumentare l'eccitabilità corticospinale (Lepage et al., 2010).

2.2.3 EEG

L'elettroencefalogramma, o EEG, è una tecnica di registrazione non invasiva e sicura che misura l'attività elettrica corticale. Questa tecnica fornisce una rappresentazione grafica dei potenziali elettrici generati dai neuroni del cervello, sebbene la sua risoluzione spaziale sia limitata rispetto a metodi più avanzati, come la risonanza magnetica (MRI). Esistono diverse tipologie di EEG: gli elettrodi possono essere a coppetta o piatti, preamplificati o meno. Il montaggio può avvenire direttamente sullo scalpo o tramite cuffia e può essere bipolare (ogni elettrodo fa riferimento a un altro elettrodo attivo) o monopolare (ogni elettrodo fa riferimento a un elettrodo neutro). Per questo studio si è optato per un montaggio monopolare.

Le cellule nervose coinvolte sono dette cellule piramidali. Queste si presentano come neuroni di grandi dimensioni, in grado di produrre un voltaggio di 30-50 mV.

L'EEG si compone di elettrodi conduttivi, che vengono posizionati sulla superficie del cuoio capelluto e registrano le fluttuazioni di tensione prodotte dalle attività elettriche delle cellule cerebrali sottostanti. Gli elettrodi registrano i segnali elettrici provenienti da diverse regioni del cervello, che vengono poi amplificati e registrati come tracce su un computer. Le registrazioni dell'EEG mostrano diverse frequenze di onde cerebrali, come *alfa*, *beta*, *delta*, *gamma* e *theta*, ciascuna associata a diversi stati di attività cerebrale.

E' necessario applicare degli elettrodi sul capo secondo il Sistema Internazionale 10-20, secondo il quale gli elettrodi vengono posizionati a distanze proporzionali standard lungo l'ipotetica linea che collega l'Inion al Nasion e lungo quella trasversale che collega le due depressioni auricolari (Klem et al., 1999) (*Figura 4*).

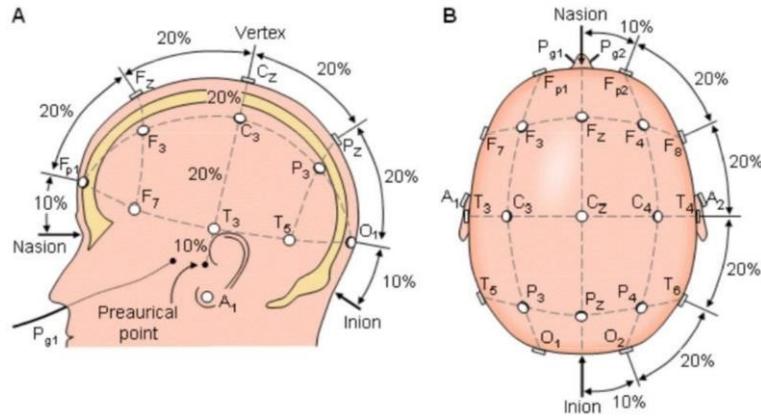


Fig. 4, Linee guida per l'applicazione EEG. (Shriram et al., 2012)

L'EEG è utilizzato nella ricerca scientifica e in campo medico e diagnostico per valutare l'attività cerebrale in varie condizioni cliniche.

2.2.4 CO-REGISTRAZIONE TMS-EEG

La stimolazione magnetica transcranica (TMS) evoca l'attività neuronale nella corteccia bersaglio e nelle regioni cerebrali collegate. La risposta corticale evocata può essere misurata con l'EEG. La TMS combinata con l'EEG è ampiamente utilizzata per studiare la reattività corticale e la connettività ad alta risoluzione spaziotemporale (Hernandez-Pavon et al, 2023). Più nello specifico, queste due tecniche utilizzate insieme sono utili, in quanto l'EEG permette di avere un'immagine più globale dell'attività cerebrale che viene generata dal campo magnetico della TMS.

2.3 PROCEDURA

I partecipanti venivano accolti in laboratorio. E' stato chiesto loro di lavarsi accuratamente le mani e togliere eventuali piercing o orecchini. Il soggetto veniva quindi fatto accomodare su una poltrona di fronte al monitor di un computer, a distanza di circa un metro dallo schermo. La testa era appoggiata alla sedia e sorretta da un cuscino, per assicurarne la stabilità e agevolare un completo rilassamento durante la durata dell'esperimento. A questo punto iniziava la preparazione dell'EEG, che consisteva in uno scrub ('NeuroPrep') al cuoio capelluto attraverso la fessura degli elettrodi della cuffia dell'EEG e la successiva applicazione di una pasta conduttiva per diminuire l'impedenza. Per adeguare la cuffia EEG alle dimensioni del capo del partecipante, sono state effettuate misurazioni della testa per individuare la taglia ottimale. In concomitanza alla preparazione dell'EEG veniva operata una leggera abrasione sulla mano destra, mediante un cottonfioc e della pasta abrasiva "Neuroprep", nelle 4 aree designate al posizionamento degli elettrodi. Per individuare il muscolo del pollice (OP) si chiedeva al partecipante di muovere lentamente il pollice fino a toccare il mignolo e, analogamente per l'individuazione del muscolo dell'indice (FDI), era necessario esercitare pressione tra la punta dell'indice e quella del pollice. Questo movimento provoca la contrazione del rispettivo muscolo, grazie alla quale è possibile individuarlo tramite palpazione. E' necessario pulire la zona in modo accurato ed è essenziale l'esatta detezione del muscolo per posizionare l'elettrodo in corrispondenza di esso. Come per l'EEG, si applicava una pasta conduttiva negli spazi interni degli elettrodi, per poi collocarli nelle aree designate e fissarli con garze adesive. Veniva connesso il plug degli elettrodi al corrispettivo box di ingresso ExG portatile (Sartori et al., 2013) isolato, collegato all'amplificatore EMG. Mediante il programma "Brain Recording" di *BrainVision* è stato possibile controllare l'impedenza del segnale degli elettrodi. Venivano ripetuti i passaggi precedenti finché l'impedenza di ciascun elettrodo non si stabilizzava entro un

certo intervallo (tra 0 e 10 su 100 kOhm). Una volta raggiunto tale risultato veniva chiesto al partecipante di rilassarsi mentre teneva le mani sui braccioli della poltrona.

Si avviava la ricerca della soglia rMT, ovvero l'intensità minima di TMS che riesce ad elicitare un potenziale d'azione (MEP) nel muscolo controlaterale dell'area stimolata. Localizzare la medesima area corticale che si intende stimolare, in soggetti diversi, può risultare una procedura lunga e complessa. Perciò è stato particolarmente utile, per trovare l'*hotspot* (zona target della stimolazione) con la TMS, l'orientamento tramite gli elettrodi dell'EEG. Veniva applicato un adesivo di forma circolare e diametro di circa 50 millimetri sulla cuffia EEG, in corrispondenza dell'area corticale designata alla stimolazione, ovvero l'intersezione delle aree di rappresentazione di OP e FDI nella corteccia motoria. Quindi iniziava il processo di localizzazione dell'area motoria della mano destra (mappando la corteccia motoria controlaterale), trovando l'*hotspot*. Una volta accesa la TMS, veniva delicatamente posizionata la bobina sullo scalpo, coperto dalla cuffia dell'EEG. Il manico del coil era orientato a circa 45° rispetto alla scissura interemisferica, perpendicolare allo scalpo e facendo attenzione che il centro combaciasse con l'adesivo posto sulla cuffia. In questa fase la bobina era fissata ad un supporto meccanico (treppiede) in modo flessibile, consentendo di ruotarla o spostarla con facilità.

Si avviava così l'applicazione degli impulsi. La soglia minima veniva identificata dopo che un MEP era stato elicitato almeno 5 volte su 10 tentativi, sia in corrispondenza del muscolo OP sia in FDI. Una volta trovati l'*hotspot* e la soglia rMT, veniva fissata la bobina saldamente al treppiede e incrementato il voltaggio al valore di stimolazione usato durante l'esperimento, pari al 110% del valore di soglia.

A questo punto aveva inizio la registrazione simultanea dell'EEG e della TMS e il partecipante veniva sottoposto alla visione degli stimoli, riprodotti sullo schermo del

computer.

I video utilizzati erano organizzati in quattro blocchi distinti, intervallati da una breve pausa per consentire al partecipante di riposarsi, o se necessario, di segnalare eventuali disagi. Ciascun video iniziava e terminava con una croce di fissazione, coprendo in totale otto stimolazioni TMS di baseline, (in sede di analisi la media tra le baseline prima e dopo le condizioni viene usata per normalizzare i valori delle attivazioni), quattro all'inizio e quattro alla fine. Ogni blocco comprendeva 24 impulsi, per un totale di 96 impulsi durante l'intera sessione. Oggetto dei video erano le sequenze motorie relative alle tecniche di modellazione dell'esperimento, focalizzate sulla lavorazione della ceramica e della litica.

Il disegno di ricerca prevedeva due fasi distinte di esposizione al compito di osservazione di sequenze motorie: PRE e POST-TEST. Inizialmente i partecipanti sono stati sottoposti alla visione dei video (PRE-). Successivamente il gruppo sperimentale ha svolto un training sulla lavorazione della ceramica e della litica lungo un periodo di circa un mese e mezzo. Infine è stata effettuata una seconda registrazione (POST-) allo scopo di rilevare la presenza di una differenza significativa di attivazione neurale tra il gruppo sperimentale ed il gruppo di controllo.

Il processo di preparazione dei macchinari poteva richiedere oltre 45 minuti, in relazione alle caratteristiche fisiologiche dei partecipanti, che potevano inficiare la preparazione (ad esempio la sudorazione della mano). I video mostrati durante l'esperimento avevano una durata di circa 3-4 minuti ciascuno, per un totale di circa 15 minuti. Durante la 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 consisteva nel guardare i video sullo schermo del computer. Per tutta la durata dell'esperimento, tutti e 31 i partecipanti sono stati collegati sia all'EEG sia alla TMS.

2.4 STIMOLI

Gli stimoli sperimentali consistevano in otto video della durata di pochi secondi, contrassegnati da lettere (A, B, C, D, E, F, G, H, I) e riproducono manipolazioni di materiali di pietra o argilla secondo la prospettiva del punto di percezione visuale del soggetto ripreso. In particolare sono rappresentate 4 tecniche di lavorazione: scheggiatura (fig. 7) e percussione ossea (fig. 8) concernenti la litica, spatola (fig. 6) e colombino (fig. 5) per quanto riguarda l'argilla. Inoltre il disegno sperimentale prevedeva la manipolazione della 'correttezza' della tecnica mostrata: una condizione "corretta" in cui i video presentano la corretta esecuzione dei gesti e una condizione di "errore", in cui la mano destra compie movimenti erronei. Ad esempio nella condizione "errore" della tecnica del colombino veniva mostrata una pressione eccessiva che andava a inficiare la struttura del manufatto. I video sono stati randomizzati e raggruppati in quattro blocchi, tutti della stessa durata (3-4 minuti). Allo stesso modo anche i blocchi venivano presentati in modo randomizzato, seguendo una numerazione progressiva (ad esempio, se a un partecipante vengono mostrati i blocchi nell'ordine 1, 2, 3, 4 al successivo verranno presentati nell'ordine 2, 3, 4, 1).

All'inizio e al termine di ogni blocco veniva presentato lo schermo nero con una croce di fissazione al centro, per calcolare il valore di baseline del soggetto, ovvero i MEP in assenza di stimolazione (in sede di analisi la media tra le baseline prima e dopo le condizioni viene usata per normalizzare i valori delle attivazioni). Al termine dell'ultimo blocco veniva interrotta la riproduzione dei video e salvate le registrazioni. Inoltre venivano rimossi gli elettrodi e la cuffia dal soggetto. Il tutto aveva una durata complessiva compresa tra i 60 e i 200 minuti, a seconda delle caratteristiche fisiologiche del partecipante (ad esempio la sudorazione della mano, che aumentava l'impedenza).

L'esperimento prevedeva un totale di otto condizioni sperimentali. 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.

Condizione A: lavorazione corretta dell'argilla tramite colombino

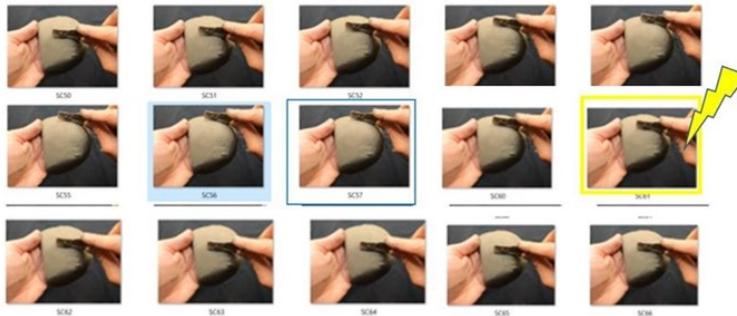


Condizione B: lavorazione errata dell'argilla tramite colombino



Fig. 5: Colombino

Condizione C: lavorazione corretta dell'argilla tramite spatola



Condizione D: lavorazione errata dell'argilla tramite spatola

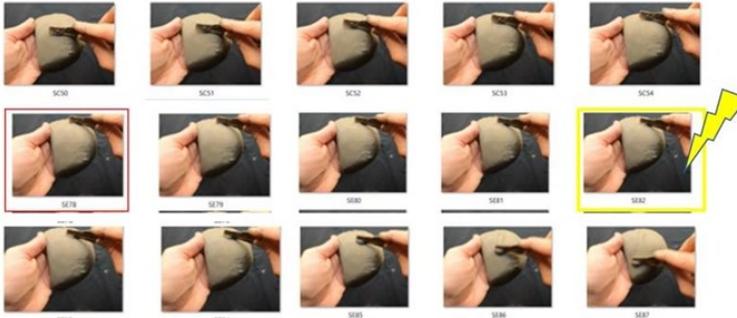
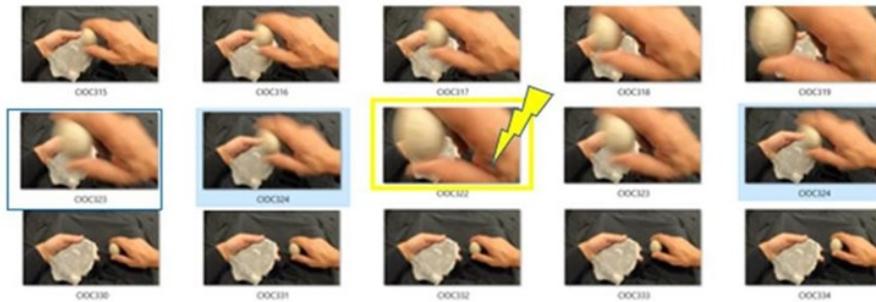


Fig. 6: Spatola

Condizione E: lavorazione corretta della litica tramite ciottolo



Condizione F: lavorazione errata della litica tramite ciottolo

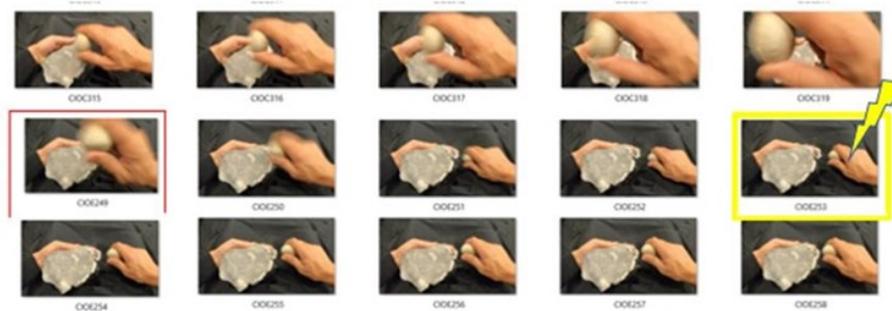


Fig. 7: Scheggiatura

Condizione G: lavorazione corretta della litica con palco di cervo



Condizione H: lavorazione errata della litica con palco di cervo



Fig. 8: Percussione

2.5 PREPROCESSAMENTO DEI DATI

Inizialmente sono stati analizzati i dati raccolti tramite l'utilizzo di due programmi: Brain Vision Analyzer 2.0 (Brain Products GmbH) ed Excel. Il primo è un software che consente di analizzare le ampiezze e le latenze dei MEP. Quindi sono state identificate le differenze tra il minimo e il massimo picco di ogni MEP e, successivamente, la corrispettiva latenza, ovvero la differenza tra lo stimolo della TMS e l'onset del MEP. La procedura di analisi dell'ampiezza dei MEP prevedeva inizialmente l'individuazione di un MEP prototipico nel tracciato EMG del partecipante. Una volta selezionata la finestra temporale del MEP, ossia la distanza dall'impulso di TMS, questo dato veniva inserito come *input* e l'algoritmo provvedeva a identificare tutti i MEP successivi agli impulsi di TMS nel tracciato continuo. Si eseguiva quindi un controllo manuale per eliminare eventuali errori del software (ad es. MEP mancanti o MEP preceduti da attivazioni muscolari). Si procedeva poi con l'esportazione dei picchi massimo e minimo dell'ampiezza di ciascun MEP. Per l'analisi delle latenze, invece, si procedeva con l'iniziale correzione della Baseline. Il segnale veniva poi rettificato e la latenza del MEP veniva calcolata. Per analizzare i dati, una volta esportati gli indici di ampiezza e di latenza per ogni muscolo (OP, FDI) e appaiati ai rispettivi blocchi di video, questi venivano inseriti in una macro di Excel per il pre-processamento. I valori venivano quindi trasformati in numeri assoluti e si calcolava la media per ogni blocco. Si procedeva poi a normalizzare queste medie sulla baseline. Sono stati esclusi gli *outliers*, ovvero i valori più distanti dalla media, in quanto probabilmente risultanti da un aumento nell'impedenza, come interferenze durante la registrazione dei dati. Infine sono stati isolati i valori dei picchi ed evidenziati quelli nuovamente più distanti dalla media.

2.6 ANALISI DATI

In seguito alla lavorazione dei dati grezzi, sono stati analizzati i dati aggregati tramite un'analisi ANOVA per misure ripetute. L'esperimento comprendeva una vasta quantità di dati, in quanto le condizioni totali sono otto. Tuttavia, questo elaborato si sofferma in particolare sulle ampiezze MEP del muscolo FDI che fanno riferimento alle analisi con la tecnica del colombino. In primo luogo venivano normalizzati i dati di FDI, dividendoli per le rispettive baseline. I valori così ottenuti rappresentano la variabile dipendente FDI corretto (FDI_c), che corrisponde alla percentuale di ampiezza del trial sulla sua baseline. Dunque, le variabili prese in considerazione sono 3:

- La sessione, la quale è composta da due livelli: le sessioni PRE-TEST e POST-TEST.
- La correttezza delle condizioni: caratterizzata anch'essa da due livelli, video della tecnica con errore e video che mostrano movimenti corretti.
- Il gruppo, composto ulteriormente da due condizioni: gruppo sperimentale (esperti) e gruppo di controllo (*naive*).

Il disegno impiegato per svolgere un ANOVA a misure ripetute era dunque un disegno 2x2x2. Nelle analisi ANOVA sono stati esclusi dei soggetti poichè 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.

Nel nostro disegno sperimentale si osserva che alcuni soggetti hanno tanti MEP per condizione e altri che, invece, ne hanno di meno. Il modello misto può aiutare a tenere conto di questo sbilanciamento. Poiché non è stato possibile considerare tutto il campione tramite

ANOVA, è stato ulteriormente utilizzato un modello misto tramite il pacchetto lme4 di R per poter testare i vari contrasti considerando l'intero campione.

Le analisi dei dati di FDI in questo elaborato sono state approfondite in riferimento alla tecnica del colombino. Pertanto i trial presi in considerazione hanno come materia lavorata esclusivamente 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:

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

Tramite l'utilizzo di Jamovi R e del software Rstudio è stata eseguita un'analisi statistica inferenziale attraverso un ANOVA a Misure Ripetute e un Modello Misto semplice.

Capitolo 3: Risultati

3.1 ANOVA a misure ripetute

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

Tabella 1

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	0.076
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	0.059
Residui	2.0651	21	0.0983		

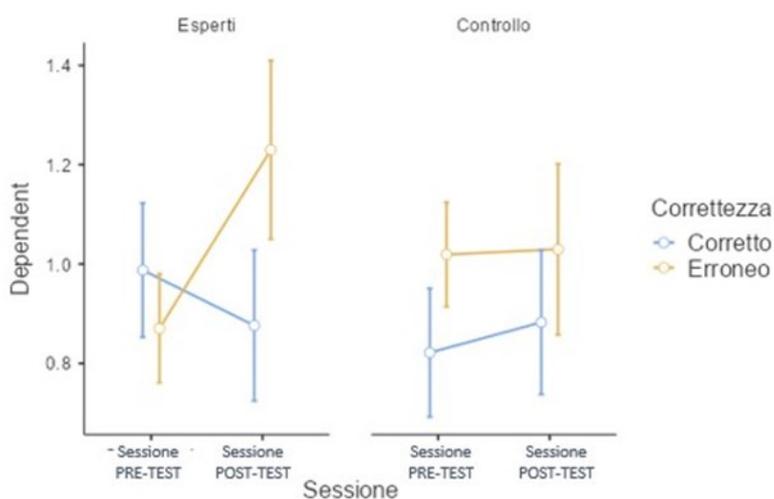


Fig. 9. Come si può osservare nel grafico, sono stati testati i MEP nei due gruppi (esperti e di controllo). Le linee verticali corrispondono alla “correttezza” delle condizioni:

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 ha mostrato dei MEP con un'ampiezza maggiore nella sessione POST-TEST quando venivano presentati i video con la condizione di errore.

3.2 Modello misto

La *tabella 2* 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 sono articolate le varie interazioni. I risultati (*Tabella 2*) hanno mostrato un effetto significativo dato dall'interazione tra l'errore per la sessione POST-TEST per il gruppo sperimentale.

Tabella 2

<i>Predittori</i>	FDIc		
	<i>Stime</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>
(Intercetta)	0.84	0.61 – 1.07	<0.001
Errore	0.25	-0.01 – 0.52	0.059
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 × Session [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	0.075
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	0.036
(Tecnica [spatola] × Sessione [POST-TEST]) × Gruppo [esperti]	0.01	-0.54 – 0.57	

(Errore × Tecnica [spatola] × Sessione [POST-TEST]) × Gruppo [esperti] -0.68 -1.49 – 0.13

Random Effects

σ^2 0.79
 τ_{00} ID 0.06
 ICC 0.07
 N ID 26

Osservazioni 1241
 Marginal R² / Conditional R² 0.023 / 0.094

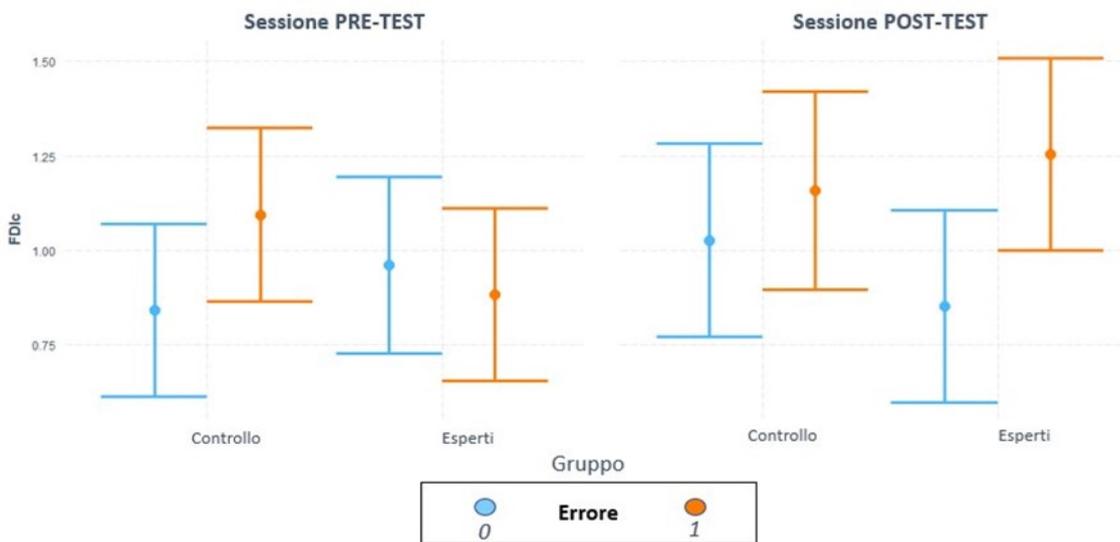


Fig. 10. Il grafico mostra come la visione del video corrispondente alla condizione di errore ha portato ad un’attivazione del potenziale motorio evocato e ad un’ampiezza dei MEP maggiore nel gruppo sperimentale, durante la sessione POST-TEST rispetto all’altra condizione, dove i partecipanti guardavano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

4. Discussione

E' stata stimolata la corteccia motoria (M1) tramite TMS in un punto del tessuto corticale che interconnette le reti neurali responsabili del movimento dei muscoli della mano OP e FDI. Sono stati osservati i segnali elettrofisiologici del cervello in una condizione di maggiore eccitabilità della corteccia motoria, suscitata dall'osservazione delle sequenze motorie su uno schermo. L'esperimento prevedeva la registrazione concomitante dell'EEG e dei potenziali motori evocati (MEP) indotti dalla TMS, per individuare se il processo della formazione possa portare a un'attivazione cerebrale differenziata durante un compito di osservazione di sequenze motorie. A tal fine è stata implementata una prima manipolazione sperimentale dividendo i partecipanti in due gruppi (esperti e *naive*). I soggetti sono stati sottoposti a due somministrazioni (PRE- e POST-) di un compito di osservazione per evidenziare gli effetti della formazione nei soggetti 'esperti'. A tal proposito sono stati elargiti gli stimoli sperimentali ai partecipanti: 8 video sulle tecniche di fabbricazione degli utensili, secondo le tradizioni della litica e della ceramica tipiche del Neolitico. I video-stimolo erano differenziati non solo per il tipo di materiale impiegato (pietra o argilla), bensì anche per la condizione di 'errore'. Tale manipolazione sorgeva dalla constatazione che durante l'evoluzione, nel processo di tramandamento delle conoscenze sulle tecniche di fabbricazione di utensili, gli ominidi hanno dovuto sviluppare un sistema di detezione degli errori, per estirpare questi ultimi dal processo di trasmissione della conoscenza.

Come da aspettative, le analisi condotte hanno mostrato una differenza significativa nel gruppo sperimentale tra la sessione PRE e POST-TEST nella condizione che presenta l'errore. Ciò delineava un'attivazione a livello corticale e muscolare potenziata per il gruppo 'esperti' nella condizione 'errore' del POST-TEST, rispetto al PRE-.

E' stato rilevato anche un effetto di differenziazione intra-gruppo ('esperti') dell'attivazione corticale in relazione alle ore di formazione svolte.

5. Conclusioni

In questo lavoro è stato evidenziato che la formazione sulle abilità di fabbricazione di utensili può influenzare le abilità cognitive coinvolte nell'attività di osservazione di azioni, modulando l'attività corticale così come l'ampiezza dei MEP elicitati dalla TMS, che rappresentano l'attivazione muscolare dell'indice (FDI) e del pollice (OP).

Tuttavia, essendo un pilota, lo studio presenta dei limiti. Le dimensioni ridotte del campione introducono un grado significativo di incertezza, che non può essere completamente spiegato. Inoltre, le procedure di interfacciamento dei sistemi hanno richiesto una cospicua quantità di tempo, riducendo la finestra temporale disponibile per la somministrazione del test a soli tre mesi. L'obiettivo 'di sfondo' di questo studio pilota è creare delle fondamenta per l'Archeologia sperimentale.

In conclusione, diversi aspetti della ricerca in esame potrebbero essere migliorati, per ottenere risultati più attendibili e significativi. E' ipotizzabile che questo esperimento possa servire da lancio per studi e sviluppi futuri, con un campione di partecipanti più ampio e una formazione più rigorosa.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Adornetti, I. (2012). Gesti e strumenti nell'evoluzione umana. Un'ipotesi cognitiva sull'origine del linguaggio. *B@ belonline*, 12, pp. 1-9.

Barzouka, K., Bergeles, N., Hatziharistos, D. (2007). Effect of simultaneous model observation and self-modeling of volleyball skill acquisition. *Perceptual and motor skills*, 104, pp. 32-42. Doi: <https://doi.org/10.2466/pms.104.1.32-42>

Bates, A. T., Patel, T. P., Liddle, P. F. (2005). External behavior monitoring mirrors internal behavior monitoring: Error-related negativity for observed errors. *Journal of Psychophysiology*, 19, pp. 281-288. Doi: <https://doi.org/10.1027/0269-8803.19.4.281>

Bruner, E. (2010). Evoluzione e paleoneurologia, *Antrocom: Online Journal of Anthropology*, 6, pp. 91-99.

Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grèzes, J., Passingham, R. E., Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cerebral cortex*, 15, pp. 1243-1249. Doi: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi007>

Caspers, S., Zilles, K., Laird, A. R., Eickhoff, S. B. (2010). ALE meta-analysis of action observation and imitation in the human brain. *Neuroimage*, 50, pp. 1148-1167. Doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.12.112

Cocchi Genick D. (1994) Manuale di preistoria, Neolitico, 2.

Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.-X. (2013) Chronostratigraphic Chart. *The ICS International Chronostratigraphic Chart*, pp. 199-204. URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2023-09.pdf>

Cross, E. S., Kraemer, D. J., Hamilton, A. F., Kelley, W. M., Grafton, S. T. (2009). Sensitivity of the action observation network to physical and observational learning, *Cerebral Cortex*, 19, pp. 315-326, Doi: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn083>

Dapretto, M., Davies, M. S., Pfeifer, J. H., Scott, A. A., Sigman, M., Bookheimer, S. Y., Iacoboni, M. (2006). Understanding emotions in others: mirror neuron dysfunction in children with autism spectrum disorders. *Nature Neuroscience*, 9, pp. 28-30. Doi: <https://doi.org/10.1038/nn1611>

- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, 91, pp. 176-180. Doi: [10.1007/BF00230027](https://doi.org/10.1007/BF00230027)
- Dini, M. (2010). Fabbricazione e uso di utensili: una peculiarità umana, in: Pacini Fazzi M.. *La scheggiatura della pietra nel Paleolitico*, pp. 41-46. Lucca. URL: <https://www.torrossa.com/en/resources/an/2972110>
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of neurophysiology*, 73, pp. 2608-2611. Doi: <https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.6.2608>
- Falkenstein, M., Hielscher, H., Dziobek, I., Schwarzenau, P., Hoormann, J., Sundermann, B., Hohsbein, J. (2001). Action monitoring, error detection, and the basal ganglia: an ERP study. *Neuroreport*, 12, pp. 157-161.
- Falkenstein, M., Hohsbein, J., Hoormann, J., Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 78, pp. 447-455. doi: [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(91\)90062-9](https://doi.org/10.1016/0013-4694(91)90062-9).
- Grèzes, J., Decety, J. (2001). Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: A meta-analysis. *Human Brain Mapping*, 12, pp. 1-19. Doi: [https://doi.org/10.1002/1097-0193\(200101\)12:1<1::AID-HBM10>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/1097-0193(200101)12:1<1::AID-HBM10>3.0.CO;2-V)
- Han, S., Northoff, G. (2008) Culture-sensitive neural substrates of human cognition: a transcultural neuroimaging approach, *Nature Reviews Neuroscience*, 9, pp. 646–654. Doi: <https://doi.org/10.1038/nrn2456>
- Hernandez-Pavon, J. C., Veniero, D., Bergmann, T. O., Belardinelli, P., Bortoletto, M, Casarotto, S., Casula E. P, Farzan, F., Fecchio, M., Julkunen, P., Kallioniemi, E., Lioumis, P., Metsomaa, J., Miniussi C., Mutanen T. P., Rocchi, L., Rogasch, N., Shafi, M., Siebner, H., Thut, G., Zrenner, C., Ziemann, U., Ilmoniemi, R. J. (2023), TMS combined with EEG: 42 Recommendations and open issues for data collection and analysis, *Brain Stimulation*, 16, pp. 567-593. doi: <https://doi.org/10.1016/j.brs.2023.02.009>
- Inizan, M. L., Reduron-Ballinger, M., Roche, H., Tixier, J. (1999). Technology and Terminology of Knapped Stone, *Cercle de recherches et d'études préhistoriques*.

- Invitto, S., Francioso, A. (2013). Neuroarcheologia musicale: musica come protolinguaggio. *Psychofenia: Ricerca ed Analisi Psicologica*, 16, pp. 35-72. Doi: [10.1285/i17201632vXVIn28p35](https://doi.org/10.1285/i17201632vXVIn28p35)
- Klem, G. H., Lüders, H. O., Jasper, H. H., Elger, C. (1999). The ten-twenty electrode system of the International Federation. *The International Federation of Clinical Neurophysiology. Electroencephalography and clinical neurophysiology.*, 52, pp. 3–6.
- Jeffares, B. (2010). The co-evolution of tools and minds: cognition and material culture in the hominin lineage. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 9, pp. 503-520. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11097-010-9176-9>
- Kuzmin, Y. V. (2013). Origin of Old World pottery as viewed from the early 2010s: when, where and why?. *World archaeology*, 45, pp. 539-556. Doi: <https://doi.org/10.1080/00438243.2013.821669>
- Làdavass, E., Berti, A. (2020). Neuropsicologia. Quarta edizione. *Società editrice il Mulino, Bologna*.
- Leakey, L., Tobias, P., Napier, J.(1964). A new species of the genus Homo from Olduvai Gorge. *Nature*, 202, pp. 7-9. Doi: <https://doi.org/10.1038/202007a0>
- Lepage, J. F., Tremblay, S., Théoret, H. (2010). Early non-specific modulation of corticospinal excitability during action observation. *European Journal of Neuroscience*, 31, pp. 931-937. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2010.07121.x>
- Malafouris L. (2009) "Neuroarchaeology": exploring the links between neural and cultural plasticity. *Progress in Brain Research*, 178, pp. 253–261, doi: [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(09\)17818-4](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(09)17818-4)
- Malafouris, L. (2019). Mind and material engagement. *Phenomenal Cognitive Sciences*, 18, pp. 1–17 <https://doi.org/10.1007/s11097-018-9606-7>
- Pezzetta, R., Nicolardi, V., Tidoni, E., Aglioti, S. M. (2018). Error, rather than its probability, elicits specific electrocortical signatures: a combined EEG-immersive virtual reality study of action observation. *Journal of Neurophysiology*, 120, pp. 1107-1118. Doi: <https://doi.org/10.1152/jn.00130.2018>
- Renfrew, C. (2008). Neuroscience, evolution and the sapient paradox: the factuality of value and of the sacred. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences*, 363, pp. 2041-2047. Doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0010>

- Renfrew, C., Frith, C., Malafouris, L. (2008). Introduction. The sapient mind: archaeology meets neuroscience. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences*, 363, pp. 1935-1938. Doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0016>
- Rizzolatti, G., Fabbri-Destro, M. (2008). The mirror system and its role in social cognition. *Current Opinion in Neurobiology*, 18, pp. 179-184. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conb.2008.08.001>
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3, pp. 131-141. Doi: [https://doi.org/10.1016/0926-6410\(95\)00038-0](https://doi.org/10.1016/0926-6410(95)00038-0)
- Roth, G., Dicke, U. (2005). Evolution of the brain and intelligence. *Trends in cognitive sciences*, 9, pp. 250-257. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.03.005>
- Cadoni S. (2023) “La neuroarcheologia del movimento: uno studio di co-registrazione TMS-EEG”. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12608/47209>
- Sartori, L., Betti, S., Castiello, U. (2013) Corticospinal Excitability Modulation During Action Observation, *Journal of visualized experiments: JoVE*, 82, e51001, doi: <https://doi.org/10.3791/51001>
- Semaw, S., Renne, P., Harris, J. W., Feibel, C. S., Bernor, R. L., Fesseha, N., Mowbray, K. (1997). 2.5-million-year-old stone tools from Gona, Ethiopia. *Nature*, 385, pp. 333-336. Doi: <https://doi.org/10.1038/385333a0>
- Shriram, R., Sundhararajan, M., Daimiwal, N. (2012). EEG Based Cognitive Workload Assessment for Maximum Efficiency. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE). URL: <https://info.tmsi.com/blog/the-10-20-system-for-eeeg>
- Stout, D. (2002). Skill and cognition in stone tool production: an ethnographic case study from Irian Jaya. *Current anthropology*, 43, pp. 693-722.
- Stout, D., Chaminade, T. (2007). The evolutionary neuroscience of tool making. *Neuropsychologia*, 45, pp. 1091-1100. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.09.014>
- van Horik, J., Emery, N. J. (2011). Evolution of cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 2, pp. 621-633.
- Vidal, F., Hasbroucq, T., Grapperon, J., Bonnet, M. (2000). Is the ‘error negativity’ specific to errors? *Biological psychology*, 51, pp 109-128. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(99\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(99)00032-0)
- Wynn, T. (2002). Archaeology and cognitive evolution. *Behavioral and brain sciences*, 25, pp. 389-402. Doi: 10.1017/S0140525X02000079

Yildirim M. (2023) The Effects of Training on Action Observation: A Neuroarchaeological Investigation using EEG. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12608/48192>