

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO NEUROCIÊNCIAS

LUANA TEIXEIRA BATISTA

**A influência dos componentes do processamento fonológico
na escrita de numerais arábicos e tipos de erros**

BELO HORIZONTE

2021

LUANA TEIXEIRA BATISTA

**A influência dos componentes do processamento fonológico
na escrita de numerais arábicos e tipos de erros**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Neurociências da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos de obtenção do grau de Mestre em Neurociências. Área de concentração: Neuropsicologia do Desenvolvimento

Orientador: Vitor Geraldi Haase

Coorientadora: Júlia Beatriz Lopes Silva

BELO HORIZONTE

2021

043 Batista, Luana Teixeira.

A influência dos componentes do processamento fonológico na escrita de numerais arábicos e seus tipos de erros [manuscrito] / Luana Teixeira Batista. – 2021.

83 f.: il. ; 29,5 cm.

Orientador: Vitor Geraldi Haase. Coorientadora: Júlia Beatriz Lopes Silva.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-graduação em Neurociências.

1. Neurociências. 2. Fonoaudiologia. 3. Numerais. 4. Escrita. 5. Transtornos de Aprendizagem. I. Haase, Vitor Geraldi. II. Silva, Júlia Beatriz Lopes. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. IV. Título.

CDU: 612.8



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM NEUROCIÊNCIAS

FOLHA DE APROVAÇÃO

A influência dos componentes do processamento fonológico na escrita de numerais arábicos e seus tipos de erros

LUANA TEIXEIRA BATISTA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em NEUROCIÊNCIAS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em NEUROCIÊNCIAS, área de concentração NEUROCIÊNCIAS BÁSICAS.

Prof(a). Isabella Starling Alves
UNIVERSITY OF WISCONSIN MADISON

Prof(a). Julia Beatriz Lopes Silva
UFMG

Prof(a). Stela Maris Aguiar Lemos
UFMG

Prof(a). Vitor Geraldi Haase - Orientador
UFMG

Belo Horizonte, 30 de setembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Isabella Starling Alves, Usuário Externo**, em 30/09/2021, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Julia Beatriz Lopes Silva, Membro**, em 30/09/2021, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Geraldí Haase, Presidente de comissão**, em 30/09/2021, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Stela Maris Aguiar Lemos, Professora do Magistério Superior**, em 30/09/2021, às 14:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0989684** e o código CRC **79D618FD**.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me fortalecido e me impulsionado a lutar por este sonho. Várias pessoas foram importantes nessa caminhada e eu não posso deixar de agradecer especialmente:

Ao meu orientador, Professor Vitor Haase, a quem eu admiro como pesquisador e professor. Obrigada, pelo apoio e confiança no meu trabalho. Agradeço pelas aulas, incontáveis reuniões e disposição em ensinar. Além disso, nos tempos em que vivemos, agradeço por sempre expressar verbalmente seu apoio a minha espiritualidade.

À minha coorientadora, Professora Júlia Lopes Silva, por ser meu exemplo desde a iniciação científica. Obrigada pelos conselhos, conversas e admirável conhecimento. Agradeço por acreditar no meu potencial e ser compreensiva nos momentos difíceis.

À minha banca, Professora Stela Lemos e Professora Isabella Starling por aceitarem o meu convite e enriquecerem meu trabalho. Aos Professores Korbinian Moeller e Julia Bahnmüller pela disponibilidade em compartilhar seu conhecimento e contribuir para o desenvolvimento do meu trabalho e para o meu crescimento como pesquisadora.

Aos meus amigos do LND, tenho inúmeros agradecimentos. Foram sete anos de muito crescimento, conversas, amizades, “botocas”, choros e alegrias. Afinal, o que “a base une, ninguém separa”. Obrigada aos eternos “ICs LND”, vocês com certeza marcaram minha trajetória.

Especialmente, agradeço à Annelise por toda minha iniciação científica. Você é um exemplo para mim. Obrigada pelas aulas, reuniões, estágio e cursos que participei. À Bellinha agradeço por ter sido a primeira a acreditar em mim. Te admiro pela sua paciência em ensinar, sua humildade e coragem. Agradeço à Giulia por ter me formado como psicóloga clínica. Me faltam palavras para expressar tudo que vivemos no laboratório. Sou muito grata por tudo que você me ensinou e por todo acolhimento que até hoje você me dá. À Malu agradeço por toda a

formação como pesquisadora. Com você escrevi meu primeiro artigo e treinamos apresentações em inglês. Obrigada por todo apoio em um dos momentos mais difíceis que passei. Sua ajuda foi muito importante para conclusão do meu mestrado. Finalmente, agradeço à Fernanda, por ser minha amiga e minha dupla, por sorrir e chorar comigo durante todos esses anos de laboratório. Obrigada por sempre estar disposta a ajudar, pelas inúmeras conversas e por toda sua amizade.

Por fim, agradeço minha família e amigos por todo o apoio, compreensão e carinho. Agradeço ao meu amor, Flavinho, por ser meu porto seguro em todos os momentos. Sem você essa jornada não teria sido a mesma.

Resumo

Batista, L.T., (2021) A influência dos componentes do processamento fonológico na escrita de numerais arábicos e tipos de erros. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Neurociências, Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

A transcodificação numérica refere-se à habilidade para estabelecer relações e fazer conversões entre representações numéricas verbais e arábicas. É uma habilidade numérica essencial e indica o desempenho matemático posterior. O objetivo principal desta dissertação foi investigar o papel do processamento fonológico na transcodificação de números e seus tipos de erros. Primeiramente, na introdução é descrito o estado atual da literatura, em relação aos modelos cognitivos mais relevantes de transcodificação de números, seu impacto na matemática e a associação entre linguagem e transcodificação numérica. No capítulo 2 uma revisão sistemática da literatura analisou quais são os tipos de erros na escrita de numerais arábicos cometidos por crianças, mais comumente descritos na literatura, o impacto das especificidades idiomáticas das palavras numéricas e a relação dos tipos de erros com mecanismos cognitivos, especialmente o processamento fonológico. Os resultados mostraram que para além de lexical, sintático e combinado há subclassificações dentro dos tipos de erros lexicais e sintáticos. Um tipo de erro importante, encontrado consistentemente pela literatura é o erro de inversão, que ocorre em idiomas em que o sistema numérico verbal é invertido em relação ao arábico. Com relação aos mecanismos cognitivos, os estudos apontam uma associação da transcodificação e os tipos de erros com a memória de trabalho. Entretanto, os resultados ainda são inconclusivos e não há estudos que avaliam os componentes do processamento fonológico na escrita de numerais arábicos e tipos de erros. Considerando os resultados da revisão, no capítulo 3 investigamos a contribuição específica dos três componentes do processamento fonológico (ou seja, memória de trabalho fonológica,

consciência fonêmica e velocidade de acesso lexical), além da memória de trabalho visuoespacial, no desempenho geral da transcodificação e tipos de erros. Os resultados mostraram que o desempenho geral da transcodificação foi associado seletivamente pelos componentes do processamento fonológico, em particular pela consciência fonêmica e velocidade de acesso lexical. Além disso, os erros lexicais foram associados a consciência fonêmica e acesso lexical, enquanto os erros sintáticos e combinados foram associados a consciência fonêmica e memória de trabalho visuoespacial. No capítulo 4 apresentamos a conclusão da dissertação e as implicações teóricas e práticas dos estudos.

Palavras-chave: Transcodificação, escrita de numerais arábicos, processamento fonológico, memória de trabalho, dificuldade de aprendizagem

Abstract

Number transcoding refers to the ability to establish relationships and make conversions between verbal and Arabic numeric representations. It is an essential numerical skill and indicates later mathematical performance. The main objective of this dissertation was to investigate the role of phonological processing in the Arabic number writing and their types of errors. First, the introduction describes the current state of the literature, in relation to the most relevant cognitive models of number transcoding, their impact on mathematics and the association between language and Number transcoding. In chapter 2, a systematic review of the literature analyzed the types of errors in Arabic number writing made by children, most described in the literature, the impact of idiomatic specificities of numerical words and the relationship of the types of errors with cognitive mechanisms, especially the phonological processing. The results showed that, in addition to lexical, syntactic, and combined, there are subclassifications within the types of lexical and syntactic errors. An important type of error consistently found in the literature is the inversion error, which occurs in languages where the verbal number system is inverted in relation to the Arabic one. Regarding cognitive mechanisms, studies point to an association between transcoding and types of errors with working memory. However, the results are still inconclusive and there are no studies that assess the components of phonological processing in the Arabic number writing and types of errors. Considering the results of the review, in chapter 3 we investigate the specific contribution of the three components of phonological processing (ie, phonological working memory, phonemic awareness, and lexical access speed), in addition to visuospatial working memory, on the overall performance of transcoding and types of errors. The results showed that the overall transcoding performance was selectively associated by the components of phonological processing, by phonemic awareness and lexical access speed. Furthermore, lexical errors were associated with phonemic awareness and lexical access, while syntactic and combined errors

were associated with phonemic awareness and visuospatial working memory. In chapter 4 we present the conclusion of the dissertation and the theoretical and practical implications of the studies.

Keywords: Transcoding, Arabic number writing, phonological processing, working memory, learning disability

Lista de figuras

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Diagrama de fluxo das estratégias de seleção dos artigos da revisão sistemática.....31

CAPÍTULO 3

Figure 3.1. Mediation impact of lexical access speed on the relationship between phonemic awareness and ANW68

Figure 3.2. Mediation impact of lexical access speed on the relationship between phonological WM and word spelling.....69

Lista de tabelas

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1. Características gerais dos estudos33

Tabela.2.2 Classificação dos principais tipos de erros encontrados na literatura38

CAPÍTULO 3

Table 3.1. Correlations between neuropsychological measures for all participant65

Table 3.2. Regression models showing the predictive power of WM and phonemic awareness on ANW (left chart) and word spelling (right chart)66

Table 3.3. Regression models showing the predictive power of WM, phonemic awareness, and lexical access speed on ANW (left chart) and word spelling (right chart)67

Table 3.4. Regression models showing the predictive power of WM, phonemic awareness, and lexical access speed on lexical, syntactic and combined errors.....70

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	14
Introdução geral	14
Códigos simbólicos	14
Modelos de transcodificação	15
Influências da linguagem e transcodificação numérica	17
Visão geral da presente dissertação	19
Referências	20
CAPÍTULO 2	24
Além de lexical, sintático e combinado: uma revisão sistemática dos tipos de erros na escrita de numerais arábicos em crianças	24
Introdução	25
Métodos	29
Pesquisa na literatura	29
Análise dos dados	30
Resultados	31
Tipos de erros	35
Influências da linguagem	40
Mecanismos cognitivos	41
Discussão	43
Conclusão	47
Referências	48
CAPÍTULO 3	54
The impact of phonological processing on arabic number writing	54
Introduction	55
The ADAPT model.....	56
Underlying cognitive mechanisms in ANW	57
The present study.....	59
Methods	60
Participants	60
Instruments	61
Statistical Analyses	64
Results.....	65
Correlation Analyses	65
Association between Arabic number writing and phonemic awareness	66
Incremental contribution of lexical access speed on Arabic number writing.....	66
Predictors of lexical and syntactic errors in Arabic number writing.....	69
Discussion	71
Conclusion	76
References	76
CAPÍTULO 4	82
Conclusão	82

CAPÍTULO 1

Introdução geral

As habilidades numéricas são cada vez mais importantes na sociedade. Viver no século 21 exige a capacidade de saber lidar com os números de maneira apropriada. As habilidades matemáticas têm sido associadas a maior empregabilidade, maiores salários, índices de saúde mental, mesmo após a exclusão do efeito da alfabetização (Auerbach et al., 2008, Parsons & Bynner, 2005).

A transcodificação numérica refere-se à habilidade para estabelecer relações e fazer a conversão entre as representações numéricas arábicas e verbais, como por exemplo, escutar a palavra “seis” e escrever o numeral arábico “6” (Deloche & Seron, 1987). Na realização de tarefas do cotidiano como ler o preço de um produto no supermercado ou anotar um número de telefone utilizamos a habilidade de transcodificar. Além de sua relação com atividades diárias a transcodificação está relacionada com desfechos acadêmicos. Na escola, é preditiva de habilidades aritméticas mais complexas aprendidas posteriormente (Moeller, et al., 2011).

Códigos simbólicos

O sistema arábico é translinguístico, o que significa que pode ser lido em qualquer idioma com o qual o leitor esteja familiarizado (Chrisomalis, 2013). É composto por 10 elementos (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9) e um princípio, o valor posicional. Desse modo, o valor de cada dígito dentro do número depende da sua posição na sequência numérica, sendo esse valor aumentado da direita para esquerda através de uma potência de base dez (por exemplo, o número 328 corresponde a $3 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 8 \times 10^0$ ou ainda $300 + 20 + 8$) (Geary, 2000).

Os símbolos numéricos arábicos são universais, mas sistema de palavras numéricas varia de acordo com o idioma. Por isso, o sistema numérico verbal é mais complexo. É composto por um léxico de palavras organizados em diferentes classes lexicais, como unidades, (“um” a “nove”), dezenas (“dez” a “noventa”) e assim por diante. A organização sintática para

representar os números segue regras aditivas (setenta e dois representa setenta mais dois) e multiplicativas (quatrocentos é equivalente a quatro vezes cem) (Geary, 2000). Erros nessas regras resultariam em 702 e 4100, respectivamente.

Modelos de transcodificação

Com o intuito de compreender o processo de Transcodificação Numérica modelos explicativos foram desenvolvidos. Os modelos podem ser divididos em semânticos (pressuposto de que a transcodificação requer acesso a magnitude do número) e asemânticos (pressuposto de que a transcodificação acontece por meio de regras e não requer acesso a magnitude que o número representa). Um modelo semântico pioneiro proposto para explicar o processamento numérico e o cálculo foi o Modular de Rota Semântica Abstrata (McCloskey, Caramazza & Basili, 1985), formulado a partir de observações clínicas e experimentais de pacientes com acalculia. O modelo assume que existem dois sistemas principais: um sistema de cálculo e um sistema de processamento numérico. O sistema de cálculo é composto pelos operadores, conceitos, procedimentos e fatos dos cálculos aritméticos. Já o sistema de processamento numérico é formado por cinco módulos, sendo estes: representação de magnitudes, produção de numerais arábicos, compreensão de numerais arábicos, produção de numerais verbais e compreensão de numerais verbais. Enquanto o sistema arábico é usado para ler o preço de um produto em uma loja por exemplo, são usados os dois sistemas (arábico e o verbal) para assinar um cheque. Dentro desses quatro módulos de produção e compreensão, há diferença entre o processamento lexical e sintático. Enquanto o primeiro permite a produção e/ou compreensão de cada algarismo no número (por exemplo, conhecer os números de 0 a 9), o segundo envolve o processo de relação entre esses elementos (por exemplo, saber o valor posicional do 0 no número 302). O modelo prevê um módulo central de representação de magnitudes, no qual todas as operações de cálculo e de processamento numérico deveriam necessariamente acessar, inclusive a transcodificação numérica (McCloskey, Caramazza &

Basili, 1985).

Um modelo assemântico, e um dos mais proeminentes atualmente, é o ADAPT (modelo desenvolvimental, assemântico e procedural para a transcodificação dos números verbais para a forma arábica) (Barrouillet, et al., 2004). De acordo com o modelo, na primeira etapa da transcodificação, as palavras numéricas são codificadas fonologicamente e mantidas temporariamente em um buffer fonológico. Se a forma lexicalizada está disponível na memória de longo prazo, o numeral arábico é recuperado automaticamente. Caso contrário, a transcodificação de números ocorre processualmente pela implementação de um conjunto de regras. O modelo prevê que o nível de dificuldade em transcodificar é baseado na quantidade dos procedimentos envolvidos. Assim, quanto mais regras de transcodificação forem necessárias para transcodificar um número, mais sujeito a erros o número estará (Barrouillet et al., 2004).

Os tipos de erros na transcodificação numérica podem ser enquadrados em duas categorias: lexicais e sintáticos (Deloche & Seron, 1982a, 1982b; Seron, Deloche, & Noel, 1992). Nos erros lexicais, um algarismo é substituído por outro (“46” ao invés de “quarenta e três”). Nos erros sintáticos, os algarismos estão corretos, mas há a diminuição ou o aumento do comprimento da cadeia de dígitos, principalmente com a inserção de 0s (“20003” ao invés de “dois mil e três”). Os erros combinados ocorrem quando no mesmo item há o erro lexical e o sintático (“20006” ao invés de “dois mil e três”).

Um outro tipo de erro, consistentemente mostrado na literatura, é o erro de inversão (Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Pixner et al, 2011). Em alguns idiomas, por exemplo, a forma como a dezena e a unidade são faladas é invertido do sistema numérico escrito (por exemplo, a palavra numérica em alemão para 24 é “vierundzwanzig” - quatro e vinte). Investigar o padrão de erros, fornece pistas de como a transcodificação é processada e com quais mecanismos ela está envolvida.

Influências da linguagem e transcodificação numérica

Para explicar as influências da linguagem no processamento numérico e matemático, Dowker e Nuerk (2016) propuseram uma taxonomia com base em categorias linguísticas: (1) lexicais, (2) sintáticas, (3) fonológicas (4) visoespacial otográficas (5) semânticas e (6) conceituais. A relação entre as influências linguísticas lexicais e fonológicas e a transcodificação, são o objetivo principal da presente dissertação, por isso serão abordadas mais detalhadamente adiante.

Em primeiro lugar as influências lexicais, estariam relacionados ao grau em que as palavras numéricas variam para transparecer as características do sistema arábico. Em alguns idiomas, por exemplo, a maneira como os números são falados é consistente como a forma como são escritos. São chamados de sistemas numéricos mais transparentes. Em chinês o número 12 é falado como “dez dois” que reflete a estrutura de base dez dos dígitos escritos. Já em idiomas com sistemas numéricos menos transparentes como o português por exemplo, o número 12 é denominado “doze” sem refletir sua correspondência com a base 10.

Diante disso, o sistema de palavras numéricas de um determinado idioma pode ajudar ou restringir o desenvolvimento da transcodificação com base em quão consistente o nome dos números é com a sua estrutura do sistema numérico escrito. (Dowker, Bala, & Lloyd, 2008). Um dos efeitos mais investigados é a propriedade de inversão de palavras numéricas para a notação arábica. A inversão de palavras numéricas se refere ao sistema de alguns idiomas (alemão, holandês, maltês etc.) em que o dígito da unidade é nomeado primeiro em palavras numéricas de dois dígitos do que a dezena (por exemplo, 24 em alemão é “vierundzwanzig” - quatro e vinte). Foi demonstrado, que a propriedade de inversão leva a dificuldades e causa erros no processo de transcodificação de crianças falantes desses idiomas (Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Pixner et al, 2011).

Em segundo lugar, as influências fonológicas se referem aos efeitos dos processos

fonológicos da linguagem, bem como os efeitos da memória de trabalho verbal (Banhmueller et al., 2021). Fontes importante de variabilidade no desempenho de transcodificação numérica são devidas à memória de trabalho e ao processamento fonológico (Barrouillet et al., 2004, Camos, 2008, Lopes-Silva et al., 2014, Moura et al., 2013; Zuber et al., 2009). O aumento da complexidade numérica foi associado a demandas crescentes de capacidade de memória de trabalho (Moura et al., 2013; Zuber et al., 2009). Além disso, transcodificação eficiente também requer segmentação e manutenção fonêmica na memória de curto prazo, enquanto as operações necessárias são realizadas (Barrouillet et al., 2004).

Um dos principais mecanismos relacionados à aprendizagem da leitura é o processamento fonológico, que é constituído por três componentes: consciência fonológica, acesso lexical e memória fonológica. Tais componentes dizem respeito às habilidades de percepção e manipulação dos fonemas que constituem as palavras, resgate das representações lexicais, bem como retenção temporária de informações de caráter fonológico (Wagner & Torgessen, 1987). Estudos têm demonstrado que seus déficits estão associados a dificuldades na leitura. (Wagner & Torgessen 1987; Castles & Coltheart, 2004; Ziegler et al., 2008).

Recentemente, estudos também focaram na investigação da influência do processamento fonológico na matemática (Landerl, Bevan & Butterworth, 2004; Simmons & Singleton, 2008). A hipótese é que processamento fonológico possa estar mais fortemente associado aos aspectos da matemática que envolvem códigos verbais e representações numéricas arábicas, como fatos aritméticos e transcodificação de números. O processamento fonológico pode então desempenhar um papel no processamento inicial da codificação verbal numérica.

Em estudos anteriores, foi demonstrado que as habilidades de segmentação fonêmica estão associadas às habilidades de transcodificação (Lopes-Silva et al., 2014). Foi observado também que a consciência fonêmica, avaliada pela tarefa de supressão de fonemas, é um

correlato cognitivo compartilhado pela leitura e escrita de palavras e números (Lopes-Silva et al., 2016) o que a torna importante não apenas para o desenvolvimento da linguagem, mas também para o desenvolvimento numérico. Entretanto ainda há poucos estudos que investigam a associação do processamento fonológico com as habilidades de transcodificação. Além disso, não está claro, se existe um papel diferencial dos componentes do processamento fonológico nos diferentes tipos de erros da transcodificação numérica em crianças.

Visão geral da presente dissertação

Seguindo as recomendações do Programa de Pós-Graduação em Neurociências do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Geral, este trabalho será apresentado no formato de artigo científico. Dessa forma, compõe a presente dissertação uma revisão sistemática da literatura e um artigo empírico.

Na revisão sistemática, investigamos quais eram os tipos de erros cometidos por crianças na transcodificação numérica mais comumente relatados na literatura, a associação dos erros com especificidades idiomáticas (influências lexicais no sistema de palavras numéricas) e mecanismos cognitivos (influências fonológicas e da memória de trabalho). Realizamos uma análise de 24 estudos que investigavam tipos de erros na escrita de numerais arábicos em crianças de 5 a 14 anos.

No artigo empírico, investigamos a contribuição específica dos três componentes do processamento fonológico (memória de trabalho fonológica, consciência fonêmica e velocidade de acesso lexical), além da memória de trabalho visuoespacial, no desempenho geral transcodificação numérica e tipos de erro. Seguindo as premissas do modelo ADAPT, esperávamos que esses mecanismos cognitivos explicassem o desempenho na transcodificação, pois seriam importantes durante etapas específicas da transcodificação numérica. Realizamos modelos de regressão que investigaram a contribuição específica desses mecanismos cognitivos no desempenho geral da transcodificação de e nos tipos de erro. No capítulo 4

apresentamos a conclusão da dissertação e as implicações teóricas e práticas dos estudos.

Referências

- Achenbach, T. M., Becker, A., Döpfner, M., Heiervang, E., Roessner, V., Steinhausen, H. C., et al. (2008). Multicultural assessment of children and adolescent psychopathology with ASEBA and SDQ instruments: research findings, applications, and future directions. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 49, 251–275. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2007.01867.x>
- Bahnmueller, Julia, Lopes-Silva, Júlia Beatriz, Haase, Vitor Geraldi, Moura, Ricardo and Moeller, Korbinian. "Ties of math and language: A cognitive developmental perspective: ". *Diversity Dimensions in Mathematics and Language Learning: Perspectives on Culture, Education and Multilingualism*, edited by Annemarie Fritz, Erkan Gürsoy and Moritz Herzog, Berlin, Boston: De Gruyter, 2021, pp. 101-131. <https://doi.org/10.1515/9783110661941-006>
- Barrouillet, P., Camos, V., Perruchet, P., & Seron, X. (2004). ADAPT: A Developmental, Asemantic, and Procedural Model for Transcoding From Verbal to Arabic Numerals. *Psychological Review*, 111(2), 368–394. doi: 10.1037/0033-295X.111.2.368.
- Camos, V. (2008). Low working memory capacity impedes both efficiency and learning of 42 number transcoding in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99(1), 37-57. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.06.006>
- Castles, A. and Coltheart, M. 2004: Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, 91, 77–111. doi:10.1016/S0010-0277(03)00164-1
- Chrisomalis, S. (2013). Constraint, cognition, and written numeration. *Pragmatics & Cognition* Pragmatics and Cognition, 21(3), 552–572. <https://doi.org/10.1075/pc.21.3.08chr>
- Deloche, G., & Seron, X. (1982a). From one to 1: An analysis of a transcoding process by

- means of neuropsychological data. *Cognition*, 12(2), 119-149.
<https://doi.org/10.1093/brain/105.4.719>
- Deloche, G., & Seron, X. (1982b). From three to 3: A differential analysis of skills in transcoding quantities between patients with Broca's and Wernicke's aphasia. *Brain*, 105(4), 719-733. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(82\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0010-0277(82)90009-9)
- Deloche, G., & Seron, X. (1987). Numerical transcoding: A general production model. In G. Deloche & X. Seron (Eds.), *Mathematical disabilities: A cognitive neuropsychological perspective* (pp. 137–179). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum. Retirado de: <https://psycnet.apa.org/record/1987-97773-007>
- Dowker, Ann & Nuerk, Hans-Christoph (2016): Linguistic influences on mathematics. *Frontiers in Psychology* 7, 1035. doi:<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01035>.
- Geary, D. C., Hamson, C. O., & Hoard, M. K. (2000). Numerical and arithmetical cognition: A longitudinal study of process and concept deficits in children with learning disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77(3), 236-263.
<https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2561>
- Landerl, K., Bevan, A., & Butterworth, B. (2004). Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: A study of 8–9-year-old students. *Cognition*, 93(2), 99-125.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.11.004>
- Lopes-Silva, J. B., Moura, R., Julio-Costa, A., Haase, V. G., & Wood, G. (2014). Phonemic awareness as a pathway to number transcoding. *Frontiers in Psychology*, 5, 13. doi: 10.3389/fpsyg.2014.00013.
- Lopes-Silva, J. B., Moura, R., Júlio-Costa, A., Wood, G., Salles, J. F., & Haase, V. G. (2016). What Is Specific and What Is Shared Between Numbers and Words? *Frontiers in Psychology*, 7, 22. doi: 10.3389/fpsyg.2016.00022.
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in numerical

processing and calculation: evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, 4, 171 – 196.

[https://doi.org/10.1016/0278-2626\(85\)90069-7](https://doi.org/10.1016/0278-2626(85)90069-7)

Moeller, K., Pixner, S., Zuber, J., Kaufmann, L., & Nuerk, H. C. (2011). Early place-value understanding as a precursor for later arithmetic performance: A longitudinal study on numerical development. *Research in Developmental Disabilities*, 32, 1837–1851. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.03.012>

Moura, R. J., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K. & Haase, V.G. (2013). Transcoding abilities in typical and atypical mathematics achievers: the role of working memory, procedural and lexical competencies. Submitted to *Journal of Experimental Child Psychology*, 116, 707-727. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.07.008>.

Parsons, S., Bynner, J. (2005) Does numeracy matter more? National Research and Development Centre for adult literacy and numeracy, London. ISBN 1 90 5188 09 9

Pixner, S., Zuber, J., Heřmanová, V., Kaufmann, L., Nuerk, H.-C., and Moeller, K. (2011b). One language, two number-word systems and many problems: numerical cognition in the Czech language. *Research in Developmental Disabilities*, 32, 2683–2689. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.06.004>

Seron, X., Pesenti, M., Noël, M.P., Deloche, G., & Cornet, J.A. (1992). Images of numbers, or "when 98 is upper left and 6 sky blue." *Cognition*, 44, 159-196. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90053-K](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90053-K)

Simmons, F. R., & Singleton, C. (2008). Do weak phonological representations impact on arithmetic development? A review of research into arithmetic and dyslexia. *Dyslexia*, 14(2), 77-94.

Wagner, R. K., & Torgesen, J. K. (1987). The nature of phonological processing and its causal role in the acquisition of reading skills. *Psychological Bulletin*, 101(2), 192-212.

<https://doi.org/10.1002/dys.341>

Wagner, R. K., & Torgesen, J. K. (1987). The nature of phonological processing and its causal role in the acquisition of reading skills. *Psychological Bulletin*, 101(2), 192-212.

<https://doi.org/10.1002/dys.341>

Ziegler, J. C., Castel, C., Pech-Georgel, C., George, F., Alario, F. X., & Perry, C. (2008).

Developmental dyslexia and the dual route model of reading: Simulating individual differences and subtypes. *Cognition*, 107(1), 151-178.

<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.09.004>

Zuber, J., Pixner, S., Moeller, K., & Nuerk, H. C. (2009). On the language specificity of basic

number processing: Transcoding in a language with inversion and its relation to working memory capacity. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102, 60-77.

<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.04.003>

CAPÍTULO 2

Além de lexical, sintático e combinado: uma revisão sistemática dos tipos de erros na escrita de numerais arábicos em crianças

Autores: Luana Teixeira Batista¹, Leidiane da Silva Caldeira², Júlia Beatriz Lopes Silva^{1,2,3}, Vitor Geraldi Haase^{1,2,3}

¹ Programa de Pós-Graduação em Neurociências da Universidade Federal de Minas Gerais; ² Programa de Pós-graduação em Cognição e Comportamento da Universidade Federal de Minas Gerais; ³ Departamento de Psicologia, Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Resumo

A transcodificação se refere a habilidade para fazer conversões entre notações numéricas verbais e arábicas e é considerada um indicador significativo de desempenho matemático posterior. O objetivo da revisão foi analisar quais são os tipos de erros da escrita de numerais arábicos mais comumente descritos na literatura, o impacto das especificidades idiomáticas das palavras numéricas e a relação dos tipos de erros com mecanismos cognitivos, especialmente o processamento fonológico. Os critérios de inclusão foram artigos empíricos, com crianças de 5 a 14 anos que analisassem tipos de erros em uma tarefa de escrita de numerais arábicos. Foram selecionados 24 artigos, 19 artigos através das buscas nos bancos de dados e 4 artigos através de busca manual. Os resultados mostraram que para além de lexical, sintático e combinado há subclassificações dentro dos tipos de erros lexicais e sintáticos. Um tipo de erro importante, encontrado consistentemente pela literatura é o erro de inversão, que ocorre em idiomas em que o sistema numérico verbal é invertido em relação ao arábico. Com relação aos mecanismos cognitivos, os estudos apontam uma associação da transcodificação e os tipos de erros com a memória de trabalho. Entretanto, os resultados ainda são inconclusivos e não há estudos que avaliem os componentes do processamento fonológico na escrita de numerais

arábicos e tipos de erros.

Palavras-chave: Transcodificação, escrita de numerais arábicos, memória de trabalho, cognição numérica

Introdução

A manipulação de numerais arábicos é uma das habilidades numéricas básicas essenciais. A escrita e a leitura de numerais é um dos primeiros passos para a aprendizagem matemática e está relacionado com habilidades aritméticas mais complexas no futuro (Yuan et al., 2019; Habermann et al, 2020). A habilidade para estabelecer relações e fazer conversões entre as representações numéricas verbais e arábicas é chamada de transcodificação numérica (Deloche e Seron, 1987).

Diferentes modelos foram propostos para explicar o processamento da transcodificação. Basicamente, os modelos podem ser classificados como semânticos ou asemânticos. Os modelos semânticos são aqueles que preveem que o acesso à representação de magnitude é uma etapa necessária na transcodificação numérica (McCloskey et al, 1985; Power & Dal Martello, 1990). Os modelos asemânticos preveem que a transcodificação acontece independentemente do acesso a representações da magnitude que o número representa (Barrouillet et al., 2004).

Um modelo semântico clássico da cognição numérica, é Modular de Rota Semântica Abstrata (McCloskey et al., 1985), que foi formulado a partir de observações clínicas e experimentais de pacientes com acalculia. O modelo prevê um módulo central de representação de magnitudes, no qual todas as operações de cálculo e de processamento numérico deveriam necessariamente acessar, inclusive a transcodificação numérica. Ler o numeral “328”, por exemplo, corresponderia a tradução para um sistema semelhante a $3 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 8 \times 10^0$. Posteriormente as unidades lexicais seriam sintaticamente posicionadas para formar a saída adequada. Críticas aos modelos semânticos surgiram, porque análises de erros de pacientes

com afasia mostraram dificuldades na recuperação de unidades lexicais e no gerenciamento de regras algorítmicas para transcodificação (Deloche & Seron, 1982s, 1982b; Seron & Deloche, 1983).

Seguindo uma proposta diferente, os modelos asemânticos presumem que a transcodificação acontece através de regras e algoritmos e não requer o acesso à magnitude que o número representa. Um modelo asemântico e um dos mais proeminentes atualmente, é o ADAPT (modelo desenvolvimental, asemântico e procedural para a transcodificação dos números verbais para a forma arábica, Barrouillet et al., 2004). O ADAPT presume que a evolução dos processos de transcodificação ocorreria por meio da prática. As entradas numéricas são codificadas fonologicamente e os mecanismos de análise subdividem esta sequência em unidades menores para serem processados pelo sistema de produção. Enquanto os números mais familiares são resgatados a partir de um léxico, a transcodificação de números menos familiares depende da aplicação de uma sequência de algoritmos (Barrouillet et al., 2004).

Pesquisas sobre a transcodificação mostraram que os erros podem ser classificados em lexicais, sintáticos ou combinados (Deloche & Seron, 1982a, 1982b; Seron et al., 1992). Os erros lexicais consistem principalmente na substituição de dígitos sem modificação da estrutura sintática do número como um todo (ex. “noventa” → 19). Os erros sintáticos acontecem principalmente com adições ou omissões de 0s que resultam em um aumento ou diminuição no comprimento da sequência de dígitos (ex. “mil e quarenta” → 10040). Os erros combinados são erros que combinam os erros lexicais e sintáticos em um mesmo item (p.ex. “trezentos e quatro” → “3006”, “quatrocentos e cinquenta” → “410060”).

Analisar os padrões de erros é importante porque fornece insights sobre como ocorre o desenvolvimento da transcodificação numérica, quais são suas especificidades e mecanismos cognitivos envolvidos. Por isso, nosso primeiro objetivo é descrever os tipos de erros na escrita

de numerais arábicos cometidos por crianças mais comumente relatados na literatura.

Mais especificamente, estamos interessados em entender a associação entre os sistemas de palavras numéricas com os tipos de erros na transcodificação. Interessantemente, os sistemas de palavras numéricas podem diferir em vários aspectos ao redor do mundo (por exemplo, base, ordem etc.; Comrie, 2005). Em muitos idiomas, por exemplo (árabe, holandês, dinamarquês, malgaxe, maltês e alemão, bem como parcialmente em tcheco e norueguês) a ordem das dezenas e unidade é invertida no sistema verbal, mas não no sistema arábico. Em alemão, por exemplo, "21" corresponde à palavra numérica "einundzwanzig" (um e vinte). Diante disso, erros de inversão, ou seja, escrita da dezena e unidade de forma invertida, foram observados no desenvolvimento da transcodificação em crianças falantes do alemão (Zuber et al., 2009). Além da propriedade da inversão, palavras numéricas complexas também levam a erros de transcodificação. As dezenas faladas no francês da França, por exemplo, são irregulares devido a mudança de base, (90 é falado como "quatre-vingt dix", correspondendo a quatro vinte dez), enquanto no francês da Bélgica são regulares (90 é falado como "nonante", correspondendo a noventa). As crianças francesas, então, apresentam maiores taxas de erro em comparação com crianças belgas nas dezenas irregulares (Seron et al., 1992). Um estudo posterior, mostrou um padrão de erros cometido pelas crianças francesas em que o numeral escrito correspondia à transcodificação sucessiva de cada um dos primitivos lexicais que compõe a palavra das dezenas complexas (por exemplo, 'Quatre vingt-treize' (93) foi escrito '42013' pela transcodificação sucessiva de 'quatre' por '4', 'Vingt' por '20' e 'treize' por '13', Seron & Fayol, 1994). Desse modo, um segundo objetivo desta revisão é investigar na literatura a influência das especificidades idiomáticas das palavras numéricas nos tipos de erros cometidos na transcodificação.

Além das especificidades idiomáticas, alguns mecanismos cognitivos já foram previamente associados ao desempenho geral da transcodificação, mas os resultados

permanecem inconclusivos. Em idiomas com inversão, por exemplo, a memória de trabalho (MT) visuoespacial desempenha um papel importante na escrita de números, enquanto o impacto diferencial da MT fonológica e visuoespacial em outros sistemas numéricos ainda é inconsistente (Moura et al., 2013; Zuber et al., 2009).

De acordo com o modelo ADAPT, os números são codificados em uma sequência fonológica e então subdivididos em unidades menores para serem processados por um sistema de produção. Dessa forma, habilidades do processamento fonológico, como a consciência fonêmica e a memória de trabalho fonológica poderiam ser requisitadas nesse processo. Visto isso, alguns estudos focaram na investigação da influência do processamento fonológico na matemática (Teixeira & Moura, 2020; De Smedt et al., 2010; Lopes-Silva et al., 2014, 2016). A hipótese é que o processamento fonológico possa estar mais fortemente associado aos aspectos da matemática que envolvem códigos verbais e representações numéricas arábicas, como fatos aritméticos e transcodificação de números. Visto isso, o processamento fonológico pode desempenhar um papel no processamento inicial da codificação verbal numérica. Também foi apontado que as habilidades de segmentação fonêmica estão associadas às habilidades de transcodificação, e que a consciência fonêmica é um correlato cognitivo compartilhado pela leitura e escrita de palavras e números. Sendo assim, a consciência fonêmica é importante não apenas para o desenvolvimento da linguagem, mas também para o desenvolvimento numérico (Lopes-Silva et al., 2014, 2016).

O processamento fonológico também tem sido considerado um dos endofenótipos dos transtornos de aprendizagem. A dislexia e a discalculia apresentam altas taxas de comorbidades (Joyner & Wagner, 2019), que não ocorrem devido a aleatoriedade. A hipótese é que as duas condições compartilham mecanismos cognitivos subjacentes que impactam a aprendizagem. As dificuldades na transcodificação numérica podem ser observadas em crianças com discalculia (Moura et al., 2013; Haase et al., 2014; Kucian, & von Aster, M., 2015).

Igualmente, estudos têm sugerido que crianças com dislexia também podem enfrentar dificuldades para transcodificar, bem como, em outros aspectos da matemática (por exemplo, Teixeira & Moura, 2020; De Clercq-Quaegebeur et al., 2017)

Tanto em crianças com desenvolvimento típico (Lopes-silva et. al., 2014, 2016), quanto em crianças com transtornos de aprendizagem (Teixeira & Moura, 2020; Moura et al., 2013) o desempenho geral da transcodificação já foi associado a diferentes mecanismos cognitivos: MT visoespacial, MT fonológica, consciência fonológica e acesso lexical. Por isso, é importante buscar na literatura a associação desses mecanismos cognitivos com os tipos de erros cometidos na transcodificação numérica.

Em suma, temos como objetivo investigar na literatura os erros mais comumente descritos em crianças no desenvolvimento da transcodificação, dado que a maior parte do conhecimento sobre o padrão de erros foi derivada a partir do estudo de pacientes adultos com lesões cerebrais. Além disso, buscamos entender quais são as influências das especificidades idiomáticas das palavras numéricas nos tipos de erros durante a escrita de numerais arábicos e quais são os mecanismos cognitivos subjacentes aos tipos de erros. Será realizado uma revisão sistemática da literatura com os artigos que analisam tipos de erros na escrita de numerais arábicos em crianças.

Métodos

Pesquisa na literatura

Os artigos foram selecionados por meio da busca das bases de dados Pubmed, PsycINFO, Embase, ERIC, Web of Science e Biblioteca Virtual em Saúde. Os termos de pesquisa foram organizados na seguinte expressão booleana: *transcoding* OR “*number writing*” OR “*number transcoding*” OR “*arabic number*” OR “*number-word system*”. Dentre as bases de dados utilizadas, na Web of Science foi necessário a utilização de filtros de buscas após os resultados encontrados com os descritores acima devido à alta quantidade de artigos

encontrados. Inicialmente, 2.677 artigos foram encontrados na Web of Science e após o uso dos seguintes filtros: *psychology clinical or psychology experimental or neurosciences or psychology or clinical neurology or linguistics or psychology multidisciplinary or education educational research or psychology developmental or behavioral sciences or language linguistics or psychology educational*, restaram 304 artigos.

As análises dos artigos encontrados nos bancos de dados foram organizadas em duas etapas: seleção dos textos baseados no título e resumo utilizando o software Rayyan e leitura completa dos artigos. Ambas as análises foram realizadas de forma independente por dois pesquisadores, visando minimizar possíveis perdas de citações.

Os critérios de inclusão foram: a) artigos empíricos originais; b) participantes em idade escolar entre 5 e 14 anos; c) avaliação da transcodificação numérica verbal arábica com uma tarefa de escrita de numerais arábicos; e d) análise dos tipos de erros da transcodificação. Os critérios de exclusão foram: a) revisões narrativas e b) estudos com adultos, síndromes genéticas, transtornos neuropsiquiátricos adquiridos e demências.

Análise dos dados

Inicialmente, foram encontrados 1594 artigos das bases de dados selecionadas. Foram detectadas 968 duplicatas, restando 626 artigos. Em seguida, uma análise foi realizada através de leitura dos títulos e resumos, utilizando o software Rayyan considerando os critérios de inclusão. Destes, 19 artigos corresponderam a todos os critérios de inclusão estabelecidos e tiveram seus principais dados extraídos e organizados em uma planilha Excel. Além disso, foram adicionados cinco artigos através de busca manual nas listas de referências dos artigos extraídos. No final, foram incluídos na revisão 24 artigos com análises dos tipos de erros cometidos na transcodificação por crianças (Figura 2.1).

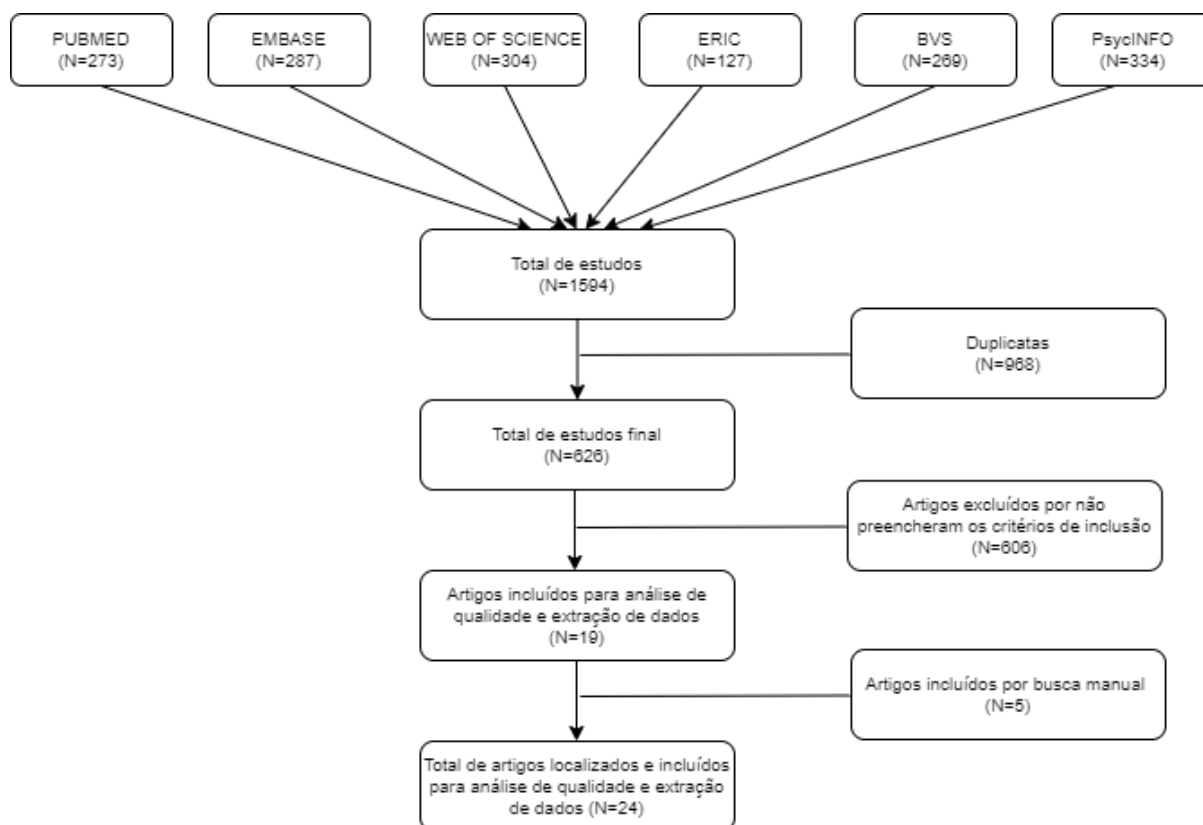


Figura 2.1 Diagrama de fluxo das estratégias de seleção dos artigos da revisão sistemática

Resultados

A apresentação dos resultados será organizada em quatro seções. Inicialmente, serão descritas as características gerais dos estudos, seguidas de seções referentes à análise de cada um dos objetivos específicos: tipos de erros, influências da linguagem e associação com mecanismos cognitivos.

A tabela 2.1 apresenta as principais descrições organizadas por estudo. A amplitude do tamanho amostral variou de 15 participantes, nos estudos transversais (Power & Dal Martello, 1990; Power & Dal Martello, 1997), a 25.620 participantes em um estudo populacional (Van der Ven, Klaiber & Van der Maas, 2016). Foi calculado a tendência central do tamanho amostral, considerando o total de participantes de cada estudo, mediana=79 (para o cálculo foi retirado valores extremos). Nove estudos investigaram tamanhos amostrais iguais ou superiores a 100 participantes.

Em relação a distribuição por sexo, 14 estudos relataram a distribuição da amostra por sexo e nove estudos não relataram. Nenhum estudo analisou diferenças no desempenho da transcodificação quanto ao sexo.

A idade dos participantes entre os estudos variou de 5 a 14 anos (mediana=7 anos; moda=7 anos). Os anos escolares avaliados estavam entre a pré-escola ao sétimo ano do ensino fundamental. Um dos estudos, além da amostra infantil, acrescentou uma amostra com adultos (Zuber et al, 2009). Dezenove estudos foram transversais, três longitudinais e dois foram estudos de caso. Tanto os estudos longitudinais quanto os estudos transversais observaram uma melhora significativa do desempenho ao longo e entre os anos escolares.

Tabela 1. Características gerais dos estudos

Referência	Delineamento	Amostra Total	Idioma(s)	Faixa etária	Ano escolar	Sexo (%feminino)
Power & Dal Martello, 1990	Transversal	15	Italiano	7 anos	2° ano	40%
Seron et al., 1992	Longitudinal	60	Francês e Francês belga	7 e 8 anos	2°ano e 3° ano	50%
Seron & Fayol, 1994	Longitudinal	20	Francês e Valão	7 anos	2° ano	50%
Sullivan, 1996	Estudo de caso	1 participante do estudo de caso e 65 controles	Inglês	Dois grupos de controles:7 a 9 anos e de 12 a 13 anos	3° ano, 4 ano° e 7° ano	-
Power & Dal Martello, 1997	Transversal	15	Italiano	7 anos	2° ano	40%
Barrouillet et al., 2004	Transversal	410	Francês	7 e 8 anos	2° ano e 3° ano	-
Hederich-Martínez et al., 2006	Transversal	118	Espanhol	7 e 11 anos	1° ano ao 4° ano	-
Orozco-Hormaza et al., 2007	Transversal	208	Espanhol	6 a 8 anos	1° ano ao 3° ano	-
Camos, 2008	Transversal	71	Francês	7 anos	2° ano	56,33%
Zuber et al., 2009	Transversal	150	Alemão	6 a 8 anos (crianças) e 22 a 32 (adultos)	1° ano	48 % (crianças) e 50% (adultos)
van Loosbroek et al., 2009	Transversal	29	Holandês	8 a 10 anos	-	-

Moeller et al., 2011	Longitudinal	94	Alemão	6 a 11 anos	1º ano e 3º ano	51,06%
Olsen, 2011	Transversal	40	Japonês e Alemão	5 a 8 anos	1º ano	42,50%
Pixner et al., 2011	Transversal	118	Tcheco	7 anos	1º ano	52,54%
Moura et al., 2013	Transversal	109	Português	7 a 12 anos	1º ao 6º ano	-
Villarroel et al., 2013	Transversal	325	Espanhol	7 a 9 anos	-	-
Haase et al., 2014	Estudo de caso	2 participantes do estudo de caso e 25 controles	Português	9 e 10 anos	3º ano	33,33%
Imbo et al., 2014	Transversal	87	Holandês e Francês	7 anos	2º ano	25,28%
Moeller et al., 2015	Transversal	40	Alemão e japonês	6 e 7 anos	1º ano	42,50%
Muñoz et al., 2015	Transversal	22	Espanhol	6 a 10 anos	1º ano	-
Sanne et al., 2016	Transversal	25.620	Holandês	5 a 12 anos	2º período do jardim de infância até o 6º ano do ensino fundamental	44% na pré-escola; 47% no 1º ano, 48% no 2º ano, 49% no 3º ano, 48% no 4º ano, 49% no 5º ano e 46% no 6º ano
Clayton et al., 2020	Transversal	486	Alemão e Inglês	7 anos (alemão) e 6 anos (inglês)	1º ano	46%
Oancea, 2020.	Transversal	87	Inglês	8 e 9 anos	3º ano	51%
Teixeira & Moura, 2020	Transversal	49	Português	7 a 12 anos	3º ano ao 6º ano	-

Tipos de erros

Power e Dal Martello (1990) foram os primeiros a investigar se as categorias de erros presentes em pacientes com acalculia seriam também encontradas em crianças. Os resultados mostraram, que as crianças em fase de aprendizagem da transcodificação também cometiam erros lexicais e erros sintáticos de forma semelhante aos pacientes. A diferença encontrada foi na frequência relativa de erros sintáticos e lexicais. No estudo de Deloche e Seron (1982), os pacientes com acalculia cometiam 50% de erros sintáticos e 27% de erros lexicais, em comparação, Power e Dal Martello (1990) encontraram 87% de erros sintáticos e menos de 3% de erros lexicais em crianças.

Todos os estudos analisados mostraram que os erros sintáticos, nos quais há adições ou omissões de 0s que resultam em um aumento ou diminuição no comprimento da sequência de dígitos (por exemplo, "*cento e vinte e três*" → 10023) são geralmente mais frequentes no desempenho das crianças do que os erros lexicais (Power & Dal Martello, 1990; Seron et al., 1992; Seron & Fayol, 1994; Sullivan, 1996; Power & Dal Martello, 1997; Barrouillet et al., 2004; Hederich-Martínez et al., 2006; Orozco-Hormaza et al., 2007; Camos, 2008; Zuber et al., 2009; van Loosbroek et al., 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Pixner et al., 2011; Moura et al., 2013; Villarroel et al., 2013; Imbo et al., 2014; Moeller et al., 2015; Muñoz et al., 2015; Sanne et al., 2016; Clayton et al., 2020; Oancea, 2020; Teixeira & Moura, 2020).

Zuber e colaboradores (2009), além de descreverem os erros lexicais e sintáticos, também apresentaram as subclassificações de cada um (tabela 2.2). Para as subclassificações dos erros lexicais, os autores relataram que para os erros dependentes de zeros a taxa de erros foi aproximadamente de 5% e para os erros independente de zeros e erros de classe a taxa de erros foi aproximadamente 1%. Para as subclassificações dos erros sintáticos, foi relatado uma taxa de erros de 15% para composição aditiva, 1% para composição multiplicativa, 5% para inversão, 3% para inversão aplicada erroneamente e aproximadamente 1% para outros erros

sintáticos (Para mais informações sobre a classificação dos erros lexicais, sintáticos e combinados na literatura, consultar a tabela 2.2).

Além dos erros sintáticos gerais, os estudos demonstraram que os idiomas que possuíam a propriedade de inversão também apresentavam erros de inversão (tabela 2). Os erros de inversão se mostraram uma categoria proeminente nas idiomas que apresentam inversão na unidade e dezena (van Loosbroek et al, 2009; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Pixner et al, 2011; Villarroel et al, 2013; Imbo et al., 2014; Moeller et al, 2015; Sanne et al, 2016; Clayton et al, 2020).

No sistema numérico verbal do português, Moura et al. (2013) encontrou que as crianças cometiam erros do tipo “estrutura incorreta” (*wrong-frame*) (tabela 2.2). O erro ocorre provavelmente por um desconhecimento das regras de transcodificação e, conseqüentemente, a aplicação de 0s não corresponde a magnitude dos multiplicandos (“2001025” no lugar de “Dois mil cento e vinte e cinco”). Além disso, no português, foi identificada a presença de erros lexicais devido a semelhança fonológica das palavras “três” e “seis”, assim como “setecentos” e “seiscentos” (Haase et al., 2014).

Um outro resultado encontrado nos estudos, foi a presença de erros combinados (tabela 2.2) (Power & Dal Martello, 1990; Sullivan, 1996; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Pixner et al, 2011; Imbo et al., 2014; Moeller et al, 2015; Muñoz et al., 2015; Oancea, 2020). São erros nos quais tanto os primitivos lexicais quanto a ordem de magnitude do número estão alterados, ou seja, observa-se a combinação de erros lexicais e sintáticos em um mesmo item (Deloche & Seron, 1982; Zuber et al., 2009).

Nos primeiros anos escolares, quando as crianças estão adquirindo habilidades de transcodificação, podem também cometer erros que os estudos denominam de “outros” ou “resto” (tabela 2.2). Esses erros não apresentam um padrão reconhecível ou classificável e não podem ser explicados por outras categorias (Power & Dal Martello, 1990; Seron, et al., 1992;

Camos, 2008; Zuber et al, 2009; Olsen, 2011; Moura et al., 2013; Moeller et al, 2015).

Além disso, os estudos mostraram que as taxas de erro são altas no início da escolarização, mas diminuem progressivamente ao longo dos anos escolares (Power e Dal Martello, 1990; Camos, 2008; Zuber et al., 2009; Pixner et al., 2011). Barrouillet e colaboradores (2004), por exemplo, investigaram os erros de transcodificação cometidos por crianças de 7 a 8 anos nos 2º e 3º anos. Os resultados mostraram que os erros sintáticos eram mais frequentes do que os erros lexicais entre as crianças mais novas, e que as crianças de 3º ano fizeram menos erros de transcodificação do que crianças do 2º ano.

Além do efeito desenvolvimental, o treinamento das habilidades de transcodificação também leva a um declínio da taxa de erros cometidos. Um estudo desenvolveu uma intervenção para as dificuldades de transcodificação a partir do modelo Modular de Rota Semântica Abstrata. O participante era um adolescente de 13 anos diagnosticado com discalculia. A intervenção consistia na prática da escrita de numerais arábicos através da instrução explícita do princípio sintático da transcodificação. O foco era na compreensão do valor posicional, de acordo com a ordem e classe do sistema numérico decimal. Um quadro de valor posicional foi utilizado para auxiliar a criança nesse processo. Houve uma melhora na acurácia após a intervenção, com um declínio nos erros sintáticos e lexicais. Os resultados se mantiveram a longo prazo (Sullivan, 1996).

Tabela.2.2. Classificação dos principais tipos de erros encontrados na literatura

Tipo de erro	Descrição	Referência
Erros lexicais		
Erros lexicais	Substituição de dígitos sem modificação da estrutura sintática do número como um todo.	Power & Dal Martello, 1990; Seron, Deloche & Noë, 1992; Seron & Fayol, 1994; Sullivan, 1996; Barrouillet et al., 2004; Hederich-Martínez et al., 2006; Orozco-Hormaza et al., 2007; Camos, 2008; van Loosbroek et al, 2009; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Moura et al., 2013; Villarroel et al, 2013; Imbo et al., 2014; Haase et al, 2014; Moeller et al, 2015; Muñoz et al., 2015; Oancea, 2020; Teixeira & Moura, 2020.
Erros de valor dependente de zero	Zero é substituído por outro dígito, geralmente por 1 ou pelo dígito anterior (103→113)	Zuber et al, 2009; Olsen, 2011; Moeller et al, 2015.
Erros de valor independente de zero	Um primitivo de 1 a 9 é substituído por outro (82→83)	Zuber et al, 2009; Olsen, 2011; Moeller et al, 2015.
Classe	O primitivo em si é correto, mas sua classe não é (90→19)	Seron & Fayol, 1994; Olsen, 2011; Zuber et al, 2009; Moeller et al, 2015.
Outros erros lexicais	Erros lexicais que não se enquadram nestas subcategorias. Estes incluíam omissões de palavras (125 → 120)	Seron, Deloche & Noë, 1992; Olsen, 2011; Villarroel et al, 2013.
Erros sintáticos		
Erros sintáticos	Adições ou omissões de 0s que resultam em um aumento ou diminuição no comprimento da sequência de dígitos.	Power & Dal Martello, 1990; Seron, Deloche & Noë, 1992; Seron & Fayol, 1994; Sullivan, 1996; Barrouillet et al., 2004; Hederich-Martínez, et al., 2006; Camos, 2008; van Loosbroek et al, 2009; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Moura et al., 2013; Imbo et al., 2014; Haase et al, 2014; Moeller et al, 2015;

		Muñoz et al., 2015; Oancea, 2020; Teixeira & Moura, 2020.
Composição aditiva	Acontece devido a uma sobrecarga na memória de trabalho. O número de 0s adicionados corresponde à magnitude dos multiplicados (3791 → 300070091)	Seron, Deloche & Noë, 1992; Seron & Fayol, 1994; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Moura et al 2013; Moeller et al, 2015;
Composição multiplicativa	O dígito 1 é inserido erroneamente, indicando a relação multiplicativa (300 → 3100).	Seron, Deloche & Noë, 1992; Seron & Fayol, 1994; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Moura et al., 2013; Moeller et al, 2015.
Estrutura incorreta	Aplicação de 0s não corresponde a magnitude dos multiplicandos (2125 → 2001025).	Moura et al., 2013.
Erros de inversão	A ordem dos elementos léxicos básicos em sua organização sintática é invertida em notação simbólica e verbal (17 → 71).	van Loosbroek et al, 2009; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Pixner et al, 2011; Villarroel et al, 2013; Imbo et al., 2014; Moeller et al, 2015; Sanne et al, 2016; Clayton et al, 2020.
Inversão aplicada erroneamente	O primeiro número ditado é escrito na última posição, como seria correto para números de dois dígitos (400 → 104).	Zuber et al., 2009; Olsen, 2011.
Outros erros sintáticos	Erros em que todos os dígitos de um número apareceram corretamente, mas sua sequência foi misturada e geralmente continha muitos zeros (106 → 16000).	Seron, Deloche & Noë, 1992; Orozco-Hormaza et al., 2007; Olsen, 2011; Villarroel et al, 2013.

Erros combinados

Erros combinados	São erros em que tanto os primitivos lexicais quanto a ordem de magnitude do número estão alterados, ou seja, observa-se a combinação de erros lexicais e sintáticos em um mesmo item.	Power & Dal Martello, 1990; Sullivan, 1996; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Pixner et al, 2011; Imbo et al., 2014; Moeller et al, 2015; Muñoz et al., 2015; Oancea, 2020.
Outros	Erros que não se encaixavam em nenhuma dessas subcategorias.	Power & Dal Martello, 1990; Seron, et al., 1992; Camos, 2008; Zuber et al, 2009; Olsen, 2011; Moura et al., 2013; Moeller et al, 2015.

Influências da linguagem

Seis artigos investigaram especificamente a influência da linguagem nos tipos de erros da transcodificação (Seron et al., 1992; Seron & Fayol, 1994; Olsen, 2011; Imbo et al., 2014; Moeller et al, 2015; Clayton et al., 2020). Quatro estudos são transversais (Olsen, 2011; Imbo et al., 2014; Moeller et al, 2015; Clayton et al., 2020) e dois longitudinais (Seron et al., 1992; Seron & Fayol, 1994).

Seron e Fayol (1994) foram os primeiros a investigar se propriedades específicas da linguagem influenciavam padrões de erros em crianças no desenvolvimento da transcodificação. Foram avaliadas crianças falantes do francês da França e do francês da Bélgica. Foi observado que as crianças falantes do francês da Bélgica cometeram menos erros em dezenas complexas (70 e 90) do que as crianças falantes do francês da França. Como as dezenas como 70 e 90 são regulares em belga (“septante” 70 e “nonante” 90) e não regulares no francês (“soixante-dix” 60-10 e “quatre-vingt-dix” 4-20-10), os resultados forneceram a primeira evidência da influência das especificidades idiomáticas das palavras numéricas na transcodificação. Esses resultados foram apoiados pelo padrão de erro cometidos, que refletiam os primitivos lexicais verbais usados para expressar as dezenas (por exemplo, 97 → “quatre-vingt-dix-sept” [quatro-vinte e dez-sete] foi escrito como 4217, 42017, 8017).

Entretanto, estudos translinguísticos têm um problema metodológico: os sistemas numérico verbal e arábico são confundidos com a cultura e educação do país. Para responder essa questão, um estudo com crianças tchecas foi realizado (Pixner et al., 2011). Dentro do idioma tcheco dois sistemas numérico são utilizados: as palavras numéricas podem ser invertidas ou não (25 podem ser verbalizado como "pätadvadset" [cinco-e-vinte] ou como "dvadsetpät" [vinte-cinco]). A forma não invertida é usada e ensinada na escola, enquanto a forma invertida é utilizada no dia a dia. Cento e dezoito crianças tchecas com idade média de 7,5 anos foram analisadas. Foram apresentadas a cada criança duas listas de ditado de numerais

arábicos: uma com palavras numéricas invertidas e outra com palavras numéricas não invertidas. Os resultados mostraram que a estrutura do sistema numérico verbal influenciou o desempenho das crianças, mas não como esperado. As crianças apresentaram maiores taxas de erros e mais erros de inversão no ditado de palavras numéricas invertidas. Entretanto, a maior taxa de erros não foi relacionada a erros de inversão, mas a outros erros lexicais e sintáticos.

Além da abordagem de analisar diferentes sistemas numéricos na mesma cultura, uma outra abordagem pode ajudar a diferenciar as influências das especificidades idiomáticas da cultura em geral: analisar as influências idiomáticas dentro do mesmo sistema cultural e educacional. Por exemplo, um estudo comparou crianças holandesas e francesas que viviam no mesmo país (Bélgica) em uma tarefa de transcodificação. Nenhuma das crianças eram bilíngues, então as tarefas foram feitas no idioma das crianças, francês e holandês. Devido ao seu sistema de inversão, as crianças holandesas cometeram mais erros de inversão do que as crianças francesas, mas não diferiram na quantidade geral de erros. As análises mostraram que o idioma foi o único preditor significativo para os erros de inversão (Imbo et.al. 2014). Em contrapartida, Moeller et. al. (2015) comparou crianças japonesas e alemãs e encontrou que as crianças alemãs cometem mais erros no geral na tarefa de transcodificação.

Mecanismos cognitivos

Dos 24 estudos, 10 analisaram a associação da transcodificação com mecanismos cognitivos subjacentes (Barrouillet et al., 2004; Pixner et al., 2011; Zuber et al., 2009; 1; Moura et al., 2013; Camos, 2008; Imbo et al., 2014, Van der Ven et al., 2016; Clayton et al., 2020; Oancea, 2020; Teixeira & Moura, 2020).

O estudo de Camos (2008) mostrou que crianças francesas de 7 anos com baixo span de MT cometeram mais erros de transcodificação do que crianças com alto span MT. Entretanto, foi utilizada uma tarefa geral para avaliar a MT, alcance de contagem, e os componentes da MT não foram diferenciados de acordo com o modelo de três componentes de

Baddeley (Baddeley e Hitch, 1974; Baddeley, 1992).

Em contraste, Zuber et al. (2009), investigaram o impacto dos três componentes da MT (executiva, fonológica e visoespacial) no desempenho da transcodificação em crianças falantes do alemão. Os resultados mostraram que o componente executivo da MT foi o preditor mais forte do desempenho da transcodificação. Quanto maior o desempenho nas tarefas de MT executiva, menor a taxa de erros cometidos pelas crianças. O componente executivo também foi associado a erros de inversão enquanto o componente visoespacial foi associado a outros tipos de erros. O executivo central também foi associado ao desempenho e taxas de erros de alunos do primeiro ano falantes do tcheco no sistema numérico invertido e não invertido (Pixner et al., 2011).

Moura e colaboradores (2013) também descrevem o impacto da MT na transcodificação de números, apresentando que os efeitos da MT são mais fortes em numerais arábicos que possuem uma maior complexidade sintática e que envolvem a manipulação “online” de unidades decimais. Nesse estudo eles utilizam dois tipos de tarefas diferentes: ordem direta e inversa das tarefas de Cubos de Corsi e Span de Dígitos

Ademais, Clayton et al. (2020) além de descreverem que as crianças com uma menor capacidade de armazenamento e manipulação do executivo central cometeram mais erros de inversão nos idiomas alemão e inglês, também apontam que a MT visoespacial foi um preditor mais significativo para os falantes de inglês que cometeram erros de inversão, enquanto, nas crianças falantes de alemão, o raciocínio não verbal foi um preditor mais significativo. Corroborando tal resultado, Van der Ven et al (2017) também encontraram uma influência da MT visoespacial nos erros de inversão, principalmente aqueles que era na forma de unidade invertida. A MT visoespacial também pode compartilhar sua influência nos erros de transcodificação com a MT fonológica (Oancea, 2020).

Entretanto, nenhum dos estudos ainda tinha investigado a influência da memória de

trabalho entre dois idiomas. Imbo e colaboradores (2014) mostraram, em consonância com os estudos anteriores, que o componente executivo foi preditor do desempenho da transcodificação nas crianças holandesas e francesas. Curiosamente, o impacto dos recursos executivos na tarefa de transcodificação não variava em função dos idiomas, o que era esperado, dado que holandês têm um sistema numérico invertido e o francês não. Interessantemente, esse estudo também encontrou que crianças menos habilidosas na transcodificação também possuíam baixo span na MT fonológica. Além disso, para essas crianças, a MT fonológica também foi preditiva da taxa de erros. Diferentemente dos achados do estudo de Zuber et al (2009) a MT visoespacial não foi preditiva dos erros de inversão, sendo previstos apenas pelo idioma.

Crianças brasileiras com dislexia do desenvolvimento e com o desenvolvimento típico foram avaliadas (Teixeira & Moura 2020). Os erros sintáticos foram explicados pelos componentes do processamento fonológico, avaliados pelas tarefas de nomeação seriada rápida, supressão de fonemas e julgamento de rimas. Por outro lado, os erros lexicais para as crianças com dislexia foram explicados pela memória de curto-prazo verbal e nomeação seriada rápida.

Discussão

A manipulação de numerais arábicos desempenha um papel importante na nossa sociedade. Além disso, é fundamental para a compreensão do sistema numérico e desenvolvimento de habilidades aritméticas. Por isso, é crucial entender os processos cognitivos subjacentes e os fatores que influenciam a aquisição dessa competência. Apesar da grande literatura investigando os tipos de erros em adultos, há pouco mais de 20 anos é que se iniciou o interesse na investigação do desenvolvimento da transcodificação em crianças e algumas perguntas ainda permaneciam obscuras. Quais eram os principais erros descritos na literatura do desenvolvimento da transcodificação em crianças? O que já se sabia das

influências das especificidades idiomáticas das palavras numéricas nos tipos de erros durante a escrita de numerais arábicos? E, quais eram os mecanismos cognitivos subjacentes aos tipos de erros? Diante disso, nosso objetivo era buscar na literatura artigos que analisassem os tipos de erros na transcodificação em crianças.

Escrever numerais arábicos pode parecer uma tarefa trivial para adultos. Mas pode ser particularmente difícil para crianças durante a fase de aprendizagem (Barrouillet et al., 2004; Hederich-Martínez, et al., 2006; Camos, 2008; van Loosbroek et al, 2009; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Imbo et al., 2014). No segundo ano escolar, as crianças já dominam a escrita de numerais arábicos de dois dígitos, mas podem apresentar dificuldades para transcodificar números de três ou quatro dígitos (Power & Dal Martello, 1997). A maior parte da sua dificuldade está relacionada à automatização da sintaxe numérica. O desempenho da transcodificação melhora nos primeiros anos escolares, e no terceiro ano já é observado um efeito teto na tarefa para numerais de até quatro dígitos (Seron et al., 1992). Outros estudos mostram que alunos do segundo ano já conseguem dominar a transcodificação de dois dígitos e no terceiro e quarto ano já automatizam a escrita de numerais de três e quatro dígitos (Camos, 2008; Sullivan et al., 1996). Portanto, as habilidades de transcodificação numérica para números de até quatro dígitos parecem estar automatizadas em crianças com desenvolvimento típico após 3 anos de escolarização (Noël & Turconi, 1999).

Crianças no início da escolarização cometem o mesmo padrão de erros que pacientes com acalculia (Deloche e Seron, 1982). Entretanto, a diferença está na frequência em que esses erros são cometidos. Consistentemente, nos estudos foi mostrada uma porcentagem significativamente maior de erros sintáticos do que erros lexicais (Power & Dal Martello, 1990; Seron, Deloche & Noë, 1992; Seron & Fayol, 1994; Sullivan, 1996; Barrouillet et al., 2004; Hederich-Martínez, et al., 2006; Camos, 2008; van Loosbroek et al, 2009; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Moura et al., 2013; Imbo et al., 2014; Haase et al, 2014;

Moeller et al, 2015; Muñoz et al., 2015; Oancea, 2020; Teixeira & Moura, 2020). Além disso, esses erros sintáticos são variados: eles podem ocorrer por uma falha da regra de composição aditiva, ou por uma falha na regra de composição multiplicativa.

Os estudos também analisaram os tipos de erros cometidos em idiomas que possuem a propriedade de inversão. Foi encontrado um padrão de erros de inversão dezena/unidade em idiomas que são invertidos (van Loosbroek et al, 2009; Zuber et al, 2009; Moeller et al., 2011; Olsen, 2011; Pixner et al, 2011; Villarroel et al, 2013; Imbo et al., 2014; Moeller et al, 2015; Sanne et al, 2016; Clayton et al, 2020).

Entretanto, comparar o desempenho numérico entre diferentes idiomas significa comparar diferentes sistemas de palavras e numéricas bem como comparar as diferenças culturais e educacionais. Pensando nesta questão, um estudo comparou dentro da mesma cultura, dois sistemas de palavras numéricas: um invertido e o outro não invertido no idioma tcheca. Os resultados mostraram que as crianças cometeram maiores taxas de erros e mais erros de inversão no ditado de palavras numéricas invertidas. Entretanto, a maior taxa de erros não foi relacionada a erros de inversão, mas a outros erros lexicais e sintáticos. Isso mostra que a transcodificação foi afetada não só pela propriedade de inversão, mas também pelas características do sistema numérico como um todo.

Em vários idiomas asiáticos, como o japonês, o sistema de palavras numéricas é muito transparente. As crianças japonesas precisam memorizar os nomes dos números de um a nove e os multiplicadores “juu” (“dez”), “hyaku” (“cem”) e “sen” (“mil”), etc. Dezenas são formadas por composição multiplicativa (ex. 40 é "yon-juu", "quatro-dez") e outros números combinam composição multiplicativa e aditiva (48 é "yon-juu-hachi", "quatro-dez- oito"). Um dos estudos comparou o desempenho da transcodificação de crianças japonesas e alemãs. As crianças alemãs cometeram mais erros e mais erros sintáticos no geral do que as crianças japonesas. A alta taxa de erros de inversão em crianças alemãs encontrada no estudo mostra que a

intransparência do sistema de palavras numéricas alemão afeta de forma significativa a compreensão do valor posicional no desenvolvimento da transcodificação.

Desse modo, a revisão mostrou que o desenvolvimento da transcodificação não depende apenas de diferenças educacionais, mas está relacionado à transparência do sistema de palavras numéricas. Nesse sentido, os estudos mostrados nesta revisão fornecem evidências de uma ligação entre a cognição numérica e os idiomas. Existe um papel crucial da transparência do sistema de ordem das dezenas e unidades que afeta significativamente o desenvolvimento da transcodificação das crianças. Diante disso, uma tarefa numérica simples como escrever numerais arábicos, mostrou ser influenciada de forma confiável por propriedades específicas do idioma, como a inversão. Além disso, a compreensão do valor posicional é mais difícil em idiomas com palavras numéricas invertidas e em idiomas com estruturas de palavras numéricas complexas, como no Francês, em que 80 é denominado “quatre-vingt”, correspondendo a “quatro-vinte” em português.

Assim como para o desempenho geral da transcodificação, a associação dos tipos de erros com os mecanismos cognitivos necessita de mais estudos. Dentre os principais resultados, os estudos mostram que quanto maior é a complexidade sintática, maiores são as taxas de erros (Moura et al, 2013; Camos, 2008; Barrouillet et al., 2004). Visto isso, crianças com baixo span na MT podem ter mais dificuldade para transcodificar numerais verbais em arábicos, principalmente aqueles que são sintaticamente mais complexos (Camos, 2008). Semelhantemente, mas considerando os três componentes da MT, Zuber et al. (2009) investigou a associação da MT com os tipos de erros. O efeito da complexidade foi encontrado, principalmente para números invertidos. Um indicador de complexidade sintática são as regras do Modelo ADAPT, dessa forma, a complexidade adicional da inversão de palavras numéricas pode sobrecarregar a memória de trabalho das crianças e prejudicar a eficiência de execução de outras regras de transcodificação (Camos, 2008; Imbo et al., 2014; Pixner et al., 2011).

Existe uma predominância de estudos que investigam os tipos de erros na transcodificação numérica e a memória de trabalho (Barrouillet et al. 2004; Camos, 2008, Moura et al., 2013; Imbo et al., 2014; Pixner et al., 2011). No entanto, estudos que apresentam essa relação com o processamento fonológico ainda são escassos. Teixeira e Moura (2020) argumentam sobre a influência dos componentes do processamento fonológico nos erros sintáticos e lexicais nas crianças com dislexia.

Conclusão

As crianças no início da escolarização cometem erros na escrita de numerais arábicos porque ainda estão aprendendo a transcodificar. Esses erros podem estar associados a influências do sistema de palavras numéricas que são específicos do idioma e dificultar esse processo de aprendizagem inicial. Além disso, as habilidades cognitivas importantes para esse processo, como a memória de trabalho, vão impactar na aquisição dessa habilidade, podendo gerar outros erros. Esse conhecimento só foi possível através das análises de dos padrões de erros cometidos pelas crianças. Por isso, entender esses padrões fornece insights para entendermos como a transcodificação é processada e com quais fatores ela está associada.

Para o futuro, é importante que os próximos estudos investiguem propriedades específicas de outros idiomas. No português, por exemplo, as centenas não têm uma clara correspondência verbal como no inglês (“200” no português “duzentos” e no inglês “two hundred”). Outro ponto, é que os resultados ainda são inconsistentes com relação ao impacto dos mecanismos cognitivos nos erros de transcodificação numérica. Somente um estudo (Teixeira, et.al., 2020) investigou a associação dos componentes do processamento fonológico na transcodificação. É necessário, que mais estudos foquem na investigação da relação dos mecanismos cognitivos subjacentes à aprendizagem da transcodificação em diferentes sistemas linguísticos e em diferentes fases do desenvolvimento.

Por fim, as implicações educacionais desse estudo apontam que a escrita de numerais

arábicos precisa ser treinada com mais afinco em sistemas numéricos verbais menos transparentes. Esse treinamento também precisa ser direcionado para crianças com transtornos de aprendizagem da matemática e da leitura (discalculia e dislexia) que podem ter dificuldades persistentes nessa habilidade acarretando outros prejuízos.

Referências

- Barrouillet, P., Camos, V., Perruchet, P., & Seron, X. (2004). ADAPT: a developmental, asemantic, and procedural model for transcoding from verbal to Arabic numerals. *Psychological Review*, *111*(2), 368-394. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.2.368>
- Camos, V. (2008). Low working memory capacity impedes both efficiency and learning of number transcoding in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *99*, 37-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jecp.2007.06.006>
- Clayton, F. J., Copper, C., Steiner, A. F., Banfi, C., Finke, S., Landerl, K., & Göbel, S. M. (2020). Two-digit number writing and arithmetic in Year 1 children: Does number word inversion matter?. *Cognitive Development*, *56*, 100967. <https://doi.org/10.1080/01443410.2016.1150421>
- Cohen Kadosh, R., Bahrami, B., Walsh, V., Butterworth, B., Popescu, T., & Price, C. J. (2011). Specialization in the human brain: The case of numbers. *Frontiers in Human Neuroscience*, *5*, 1-9. doi:10.3389/fnhum.2011.00062
- Comrie, B. (2005). Endangered numeral systems. In J. Wohlgemuth & T. Dirksmeyer (Eds.), *Bedrohte Vielfalt: Aspekte des Sprach(en)tods [Endangered diversity: Aspects of language death]*. Berlin: Weißensee Verlag.
- De Clercq-Quaegebeur, M., Casalis, S., Vilette, B., Lemaitre, M. P., & Vallée, L. (2018). Arithmetic abilities in children with developmental dyslexia: Performance on French ZAREKI-R test. *Journal of learning disabilities*, *51*(3), 236-249. <https://doi.org/10.1177%2F0022219417690355>

- De Smedt, B., Taylor, J., Archibald, L., & Ansari, D. (2010). How is phonological processing related to individual differences in children's arithmetic skills?. *Developmental science*, 13(3), 508-520. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00897.x>
- Deloche, G., & Seron, X. (1982a). From one to 1: An analysis of a transcoding process by means of neuropsychological data. *Cognition*, 12(2), 119-149. <https://doi.org/10.1093/brain/105.4.719>
- Deloche, G., & Seron, X. (1982b). From three to 3: A differential analysis of skills in transcoding quantities between patients with Broca's and Wernicke's aphasia. *Brain*, 105(4), 719-733. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(82\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0010-0277(82)90009-9)
- Deloche, G., & Seron, X. (1987). Numerical transcoding: A general production model. In G. Deloche & X. Seron (Eds.), *Mathematical disabilities: A cognitive neuropsychological perspective* (pp. 137–179). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Göbel, S. M., Watson, S. E., Lervåg, A., & Hulme, C. (2014). Children's arithmetic development: It is number knowledge, not the approximate number sense, that counts. *Psychological Science*, 25, 789–798. <https://doi.org/10.1177/0956797613516471>
- Haase, Vitor G.; Júlio-Costa, Annelise; Lopes-Silva, Júlia B.; Starling-Alves, Isabella; Antunes, Andressa M.; Pinheiro-Chagas, Pedro; Wood, Guilherme (2014). Contributions from specific and general factors to unique deficits: two cases of mathematics learning difficulties. *Frontiers in Psychology*, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00102>
- Habermann, S., Donlan, C., Göbel, S. M., & Hulme, C. (2020). The critical role of Arabic numeral knowledge as a longitudinal predictor of arithmetic development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 193, 104794. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104794>
- Hederich-Martínez, C., Camargo-Uribe, A., & Avalo-Azcárate, A. (2016). Transcodificación de numerales verbales a formato arábigo en educación básica primaria. *Magis, Revista Internacional de Investigación en Educación*, 8(17), 27-46.

<https://doi.org/10.11144/Javeriana.m8-17.tnfv>

- Imbo, I., Vanden Bulcke, C., De Brauwer, J., & Fias, W. (2014). Sixty-four or four-and-sixty? The influence of language and working memory on children's number transcoding. *Frontiers in Psychology, 5*, 313. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00313>
- Joyner Rachel E.; & Wagner Richard K. (2019): Co-Occurrence of Reading Disabilities and Math Disabilities: A Meta-Analysis, *Scientific Studies of Reading*, DOI: 10.1080/10888438.2019.1593420
- Kucian, K., & von Aster, M. (2015). Developmental dyscalculia. *European journal of pediatrics, 174*(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00431-014-2455-7>
- Lopes-Silva, J. B., Moura, R., Júlio-Costa, A., Wood, G., Salles, J. F., & Haase, V. G. (2016). What is specific and what is shared between numbers and words?. *Frontiers in psychology, 7*, 22. <https://dx.doi.org/10.3389%2Ffpsyg.2016.00022>
- Lopes-Silva, J., Moura, R., Júlio-Costa, A., Haase, V. G., & Wood, G. (2014). Phonemic awareness as a pathway to number transcoding. *Frontiers in Psychology, 5*, e13. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00013>
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in numerical processing and calculation: evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition, 4*, 171 – 196. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(85\)90069-7](https://doi.org/10.1016/0278-2626(85)90069-7)
- Moeller, K., Pixner, S., Zuber, J., Kaufmann, L., & Nuerk, H. C. (2011). Early place-value understanding as a precursor for later arithmetic performance: A longitudinal study on numerical developmental. *Research in Developmental Disabilities, 32*(5), 1837-1851. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ridd.2011.03.012>
- Moeller, K., Zuber, J., Olsen, N., Nuerk, H. C., & Willmes, K. (2015). Intransparent German number words complicate transcoding—a translingual comparison with Japanese. *Frontiers in Psychology, 6*, 740. <https://dx.doi.org/10.3389%2Ffpsyg.2015.00740>

- Moura, R., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K., & Haase, V. G. (2013). Transcoding abilities in typical and atypical mathematics achievers: The role of working memory and procedural and lexical competencies. *Journal of experimental child psychology*, 116(3), 707-727. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.07.008>
- Muñoz, Y. B., Guerrero, D. F., & García, J. F. (2015). Transcodificación numérica y comprensión del valor de posición: una débil relación teórica y empírica. *Psicología desde el Caribe*, 32(3), 393-409. <http://dx.doi.org/10.14482/psdc.32.3.6015>
- Oancea, S. (2020). *Number transcoding for First and Second Language Learners* (Doctoral dissertation, Carleton University).
- Olsen, N. A. (2011). *Better Teach Your Children Japanese Number Words: A Trans-cultural Comparison of German and Japanese First Grade Children's Transcoding Performance* (Doctoral dissertation, Hochschulbibliothek der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen).
- Orozco-Hormaza, M., Guerrero-Lopez, D. F., & Otalora, Y. (2007). Syntactic errors when writing higher-order numerals. *Infancia y Aprendizaje*, 30(2), 147-162. <https://doi.org/10.1174/021037007780705210>
- Pixner, S., Zuber, J., Heřmanová, V., Kaufmann, L., Nuerk, H.-C., and Moeller, K. (2011b). One language, two number-word systems and many problems: numerical cognition in the Czech language. *Research in Developmental Disabilities*, 32, 2683–2689. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.06.004>
- Power, R. J. D., & Dal Martello, M. F. (1990). The dictation of Italian numerals. *Language and Cognition*, 5, 237–254. <https://doi.org/10.1080/01690969008402106>
- Power, R. J., & Dal Martello, M. F. (1997). From 834 to eighty thirty four: The reading of arabic numerals by seven-year-old children. *Mathematical Cognition*, 3(1), 63-85.

<https://doi.org/10.1080/135467997387489>

- Seron, X., & Deloche, G. (1983). From 4 to four: A Supplement to “From three to 3”. *Brain*, 106(3), 735-744. <https://doi.org/10.1093/brain/106.3.735>
- Seron, X., & Fayol, M. (1994). Number transcoding in children: A functional analysis. *British Journal of Developmental Psychology*, 12(3), 281-300. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1994.tb00635.x>
- Seron, X., Deloche, G., & Noël, M.-P. (1992). Number transcribing by children: Writing Arabic numbers under dictation. In J. Bideaud, C. Meljac, & J.-P. Fischer (Eds.), *Pathways to number: Children's developing numerical abilities* (pp. 245–264). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Sullivan, K. S. (1996). Remediation of Arabic numeral processing in a case of developmental dyscalculia. *Neuropsychological rehabilitation*, 6(1), 27-54. <https://doi.org/10.1080/713755495>
- Teixeira, R. M., & Moura, R. (2019). Arabic number writing in children with developmental dyslexia. *Estudos de Psicologia (Campinas)*, 37. <https://doi.org/10.1590/1982-0275202037e180179>
- van der Ven, S. H., Klaiber, J. D., & van der Maas, H. L. (2017). Four and twenty blackbirds: How transcoding ability mediates the relationship between visuospatial working memory and math in a language with inversion. *Educational Psychology*, 37(4), 487-505. <https://doi.org/10.1080/01443410.2016.1150421>
- van Loosbroek, E., Dirx, G. S. M. A., Hulstijn, W., & Janssen, F. (2009). When the mental number line involves a delay: The writing of numbers by children of different arithmetical abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102, 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.07.003>
- Villarroel, R., Jiménez, J. E., Rodríguez, C., Peake, C., & Bisschop, E. (2013). El rol de la

escritura de números en niños con y sin dificultades de aprendizaje en matemáticas. *European Journal of Education and Psychology*, 6(2), 105-115.
<http://dx.doi.org/10.30552/ejep.v6i2.94>

Yuan, L., Prather, R. W., Mix, K. S., & Smith, L. B. (2019). Preschoolers and multi-digit numbers: A path to mathematics through the symbols themselves. *Cognition*, 189, 89–104.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.03.013>

Zuber, J., Pixner, S., Moeller, K., and Nuerk, H.-C. (2009). On the language specificity of basic number processing: transcoding in a language with inversion and its relation to working memory capacity. *Journal of Experimental Child Psychology* 102, 60–77.
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.04.003>

CAPITULO 3

The impact of phonological processing on Arabic number writing

Authors: Luana Teixeira Batista¹, Mariuche Rodrigues de Almeida Gomides², Gabriella Koltermann³, Julia Bahnmueller^{4 5 6}, Korbinian Moeller^{4 5 6}, Jerusa Fumagalli de Salles³, Vitor Geraldi Haase^{1 2}, Ricardo Moura⁷, Júlia Beatriz Lopes-Silva²

¹Graduate Program in Neuroscience, Universidade Federal de Minas Gerais; ²Graduate Program in Psychology; Cognition and Behavior, Universidade Federal de Minas Gerais; ³Institute of Psychology, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; ⁴Centre for Mathematical Cognition, School of Science, Loughborough University; ⁵Leibniz-Institut für Wissensmedien; ⁶LEAD Graduate School & Research Network, University of Tübingen; ⁷Institute of Psychology, Universidade de Brasília.

Abstract

Number transcoding describes the ability to make conversions between verbal and Arabic digit numerical notations and was found to be a significant predictor of later math achievement. Therefore, it is important to better understand predictors of transcoding performance. Different aspects of working memory (including phonological working memory) have been repeatedly observed to drive transcoding performance in children. However, the relationship with others - specifically phonological processing abilities - remains less clear. As such, the present study investigated the predictive value of three abilities of phonological processing (i.e., phonological working memory, phonemic awareness, and lexical access speed) for children's transcoding performance. In particular, we were interested in potentially differential associations of phonological processing abilities with specific transcoding error types (i.e., lexical, syntactic, and combined errors). In total, 357 children aged 7 to 11 years were assessed. Results demonstrated that number transcoding performance was selectively predicted by phonological processing abilities, in particular phonemic awareness and lexical access speed. Furthermore, lexical errors were predicted best by phonemic awareness and lexical

access speed, syntactic and combined errors were predicted by phonemic awareness. Taken together, these results corroborate and further specify the contribution of phonological processing abilities for number transcoding. We provided evidence of shared cognitive mechanisms in the learning of mathematical and spelling skills, which might explain the high comorbidity between dyslexia and dyscalculia.

Keywords: Arabic number writing, number transcoding, phonological processing, spelling.

Introduction

The ability to write Arabic digit numbers to dictation is one major building block in children's numerical development (McLean & Rusconi, 2014). In particular, it has been argued that mastering the correspondence between number words and the Arabic digit notation provides a pathway to understanding the Arabic number system (Habermann et al., 2020), which is considered to be an early predictor of later arithmetic performance (Habermann et al., 2020; Göbel et al., 2014, Moeller et al., 2011). Thus, it is crucial to identify and understand the cognitive mechanisms underlying successful Arabic numberwriting (ANW). While previous research already found a significant influence of both short-term and working memory (WM) on ANW (Camos, 2008; Moura et al., 2013; Zuber et al., 2009), less is known about influences of phonological abilities (see Lopes- Silva et al., 2014; 2016). Addressing this research gap, the present study aims at systematically investigating the specific influences of different phonological processing abilities (phonological WM, phonemic awareness, and lexical access speed) on ANW performance within one comprehensive study.

In the following paragraphs, we will first introduce the ADAPT model of ANW (Barrouillet et al., 2004) from which we then derive our predictions. Second, we will briefly summarize previous studies that investigated the cognitive mechanisms underlying ANW performance before we specify the goals of the present study.

The ADAPT model

Different models were proposed to specify processes underlying number transcoding (Barrouillet et al. 2004; McCloskey, Caramazza & Basili, 1985; Power & DalMartello, 1990). For the present study, we specifically considered the ADAPT model (A Developmental Asemantic and Procedural model for Transcoding; Barrouillet et al. 2004). The ADAPT model proposes that transcoding number words into the Arabic digit notation proceeds asemantically by implementing a set of rules. Thus, the model assumes that processing the magnitudes reflected by each digit of a given number, for instance, 362 (300, 60, 2) is not mandatory for transcoding it correctly.

According to the ADAPT model, in the first step of number transcoding, number words are phonologically encoded and temporarily maintained in a phonological buffer. In cases where a corresponding lexicalized form is available in long-term memory, the Arabic digit form is automatically retrieved (referred to as following P1 rules in the model). Otherwise, number transcoding occurs procedurally by the implementation of a set of other rules. In this case, numbers are decomposed into smaller units. Then, rules responsible for the creation of slots corresponding to the necessary place-value stacks (i.e., P2 and P3 rules for hundreds and thousands, respectively) are triggered by the identification of separators (i.e., the word hundred or thousand). After all slots are filled with the corresponding Arabic digits retrieved by P1 rules, a last set of rules (P4 rules) is responsible for filling any empty slot(s) with zero and ending the process.

Essentially, the ADAPT model proposes that numbers can be transcribed either by lexical retrieval or by implementing procedural rules. On the one hand, through practice and experience, phonological and Arabic forms of small and frequent numbers (e.g., two-digit numbers) but also familiar numbers (the current year, year of birth, certain important dates in history, etc.; see Moura et al., 2021 for a deeper discussion) should be lexicalized. These

numbers are available in long term memory (LTM) and are successfully transcoded by direct memory retrieval (henceforth referred to as lexical route). On the other hand, larger and infrequent numbers are transcoded by the application of a set of rules (henceforth referred to as procedural route).

Moreover, according to the ADAPT model, difficulties with implementing both routes will result in different kinds of errors. In lexical errors, a lexical primitive is replaced by another one without affecting the length of the digit chain (e.g., writing "1952" instead of "1962" when dictated one thousand nine hundred sixty-two; Deloche & Seron, 1982). Those errors are assumed to occur due to problems while retrieving the Arabic forms, representing a difficulty along the lexical route (i.e., affecting P1 rules). In contrast, in syntactic errors, lexical primitives are retrieved correctly, but the composition of the digit chain is incorrect. For instance, additional zeros may be inserted into the digit chain (e.g., writing down "20018" instead of "218" when dictated two hundred and eighteen; Deloche & Seron, 1982). As such, syntactic errors reflect difficulties along the procedural transcoding route (i.e., P2, P3 and P4 rules).

Underlying cognitive mechanisms in ANW

The ADAPT model explicitly recognizes the relevance of different cognitive abilities, particularly working memory (WM), on number transcoding. It assumes that the intermediate storage and manipulation of information necessary in transcoding imposes considerable demands on both phonological and visuo-spatial WM (Barrouillet et al., 2004; Camos, 2008; Moura et al., 2013; Lopes-Silva et al., 2014). On the one hand, phonological WM is assumed to be relevant for the representation and processing of phonological based information. On the other hand, visuo-spatial WM is assumed to be more specifically involved in managing place-value stacks (Zuber et al., 2009). However, previous studies have also shown results inconsistent with these assumptions.

Initially, Camos (2008) demonstrated that children with low phonological WM

capacity were outperformed by children with high WM capacity in an ANW task, in particular when transcoding more complex numbers. Expanding these findings, Zuber and colleagues (2009) investigated the influence of the central executive, as measured by the combination of phonological and visuo-spatial backward span, on ANW performance of seven-year-old German-speaking children. The authors argued that demands on WM should be especially high for German-speaking children because of the inversion property of German number words (e.g., the number word for 24 is "vierundzwanzig" which translates to "four-and-twenty"). Results indicated that the central executive predicted overall transcoding performance and in particular the number of inversion-related errors. Moura and colleagues (2013) found a different pattern when analyzing ANW performance in a sample of Portuguese-speaking Brazilian children from first to sixth grades (aged 7 to 12). Although both phonological and visuo-spatial WM were correlated with ANW performance only phonological WM was a significant predictor of overall transcoding performance in the regression models for the group of early elementary school children (1st and 2nd graders; 7 to 8-year-old). However, in the group of middle elementary school children (3rd and 4th graders; 9 to 12-year-old) phonological and visuo-spatial WM did not significantly predict ANW anymore. Results from the studies by Zuber et al. (2009) and Moura et al. (2013) indicated that the influence of phonological and visuo-spatial WM components on ANW do not seem consistent in the literature. Inconsistencies in the contribution of WM modalities may be related to syntactic complexity of ANW tasks (low vs. high complex numbers), language specificities (inversion vs. non-inversion languages), and development (younger vs. older children).

In addition to the role of phonological WM, one may argue that other phonological processing abilities are involved in very early steps of ANW. In particular, both phonemic awareness and lexical access speed may contribute to ANW. Phonemic awareness is essential for the perception and manipulation of phoneme sounds and is considered to be an index of the

strength of phonological representations (Simmons & Singleton, 2008). In line with this assumption, Lopes-Silva and colleagues (2014) demonstrated that phonemic awareness, assessed through a phoneme elision task, mediated the impact of phonological WM on ANW. In a further study, Lopes-Silva and colleagues (2016) observed that phonemic awareness significantly predicted ANW performance even when controlling for phonological and visuo-spatial WM.

Moreover, lexical access speed, usually assessed by tasks such as rapid automatized naming (RAN), is associated with the retrieval of previously stored phonological information (Wagner & Torgesen, 1987). One important assumption of the ADAPT model is that more frequent numbers (i.e., one- and two-digit numbers), would be transcoded primarily via the lexical route (Barrouillet et al., 2004). This seems to imply influences of lexical access speed on ANW. However, the role of lexical access speed in ANW has received considerably less attention than influences of WM and phonemic awareness. More recently, Teixeira and Moura (2020) showed that lexical access speed, along with phonemic awareness, predicted ANW performance in general but also the frequency of both lexical and syntactic transcoding errors in particular in a small sample of typically developing and dyslexic children. Nonetheless, this study did not consider influences of phonological or visuo-spatial WM in the analyses.

The present study

Previous studies suggested that both visuo-spatial and phonological WM components are associated with ANW performance - even though results were inconsistent with respect to specific contributions (Barrouillet et al., 2004; Camos, 2008; Moura et al., 2013; Zuber et al., 2009). Importantly, however, contributions of other cognitive skills have received less research interest so far. Based on the ADAPT model, we hypothesized that cognitive skills associated with phonological encoding and retrieval, namely phonemic awareness and lexical access speed, should also be significant predictors of transcoding performance. Accordingly, the aim of the

present study was to expand the findings of Lopes-Silva and colleagues (2016) by also considering lexical access speed as a predictor of ANW, controlling for the effects visuo-spatial and phonological WM and phonemic awareness. Thus, the present study is the first to comprehensively assess all three abilities of phonological processing (i.e., phonological WM, phonemic awareness, and lexical access speed), in addition to visuo-spatial WM, in one study.

Overall, we expected a result pattern similar to the one observed by Lopes-Silva and colleagues (2016). In particular, we expected to replicate the significant contribution of visuo-spatial working memory as well as phonological working memory and phonemic awareness to ANW performance. Additionally, because the ADAPT model predicts that numbers' lexical information is retrieved from long-term memory, we further expected lexical access speed to be a significant predictor of overall ANW performance.

The second aim of the current study was to evaluate whether the cognitive predictors considered in the present study (i.e., visuo-spatial and phonological WM, phonemic awareness, and lexical access speed) may be specifically predictive of lexical or syntactic aspects of transcoding as reflected by respective error types. In particular, syntactic errors reflecting problems within the procedural route of the ADAPT model should be predicted specifically by phonological and visuo-spatial WM. In contrast, because lexical errors reflect problems along the lexical route of the ADAPT model requiring lexical retrieval of phonological number representations, lexical errors should be predicted primarily by phonemic awareness and lexical access speed.

Methods

Participants

Four hundred and fifty-four 3rd and 4th graders from state-run schools in Belo Horizonte and Porto Alegre, Brazil, participated in the study. Data collection took place in schools. Data from 24 children had to be excluded from the analysis because they did not

complete all tests. Additionally, data of 73 children were excluded because non-verbal reasoning scores were more than 1 SD below the mean using Raven's CPM test (Raven et al., 2018). The final sample consisted of 357 children (51% female) with an age range of 7 to 11 years ($M_{age}=8.82$ years, $SD=0.77$).

The study was approved by the local research ethics committees of the Universidade Federal de Minas Gerais and the Universidade Federal do Rio Grande do Sul, respectively (CAEE:15070013.1.0000.5149 and Protocol number 1.023.371). Children participated only after written informed consent was obtained from parents or surrogates. Additionally, oral assent was obtained from children prior to testing.

Instruments

Children completed an ANW task, as well as tests of non-verbal reasoning and word spelling which were administered in small groups of approximately five children. Subsequently, children were individually assessed for phonemic awareness, lexical access speed, and WM. Group assessment sessions and individual assessment sessions lasted approximately one hour each. In the following, instruments will be described in more detail.

Arabic Number Writing (ANW): To evaluate number transcoding, children were instructed to write down verbally dictated numbers in Arabic digit notation. The task comprised 81 items, with 1- to 4-digit numbers (i.e., 2 one-digit numbers, 6 two-digit numbers, 19 three-digit numbers, and 54 four-digit numbers). Items were controlled for syntactic complexity considering the number of transcoding rules required to transcode the respective number correctly as proposed by the ADAPT model (Barrouillet et al., 2004; Camos, 2008). There were 8 two-rule numbers, 11 three-rule numbers, 20 four-rule numbers, 24 five-rule numbers, 10 six-rule numbers, and 8 seven-rule numbers. The examiner dictated the numbers only once and children had to write it down on a sheet of paper. There was no stop criterion applied and no time limit. One point was awarded for each correct answer. The internal consistency was very

high (Cronbach's $\alpha = .99$; see Gomides et al., in press).

Word Spelling Task (Tarefa de escrita de palavras e pseudopalavras-TEPP; adapted from Rodrigues & Salles, 2013; Rodrigues et al., 2017): In the word spelling task, children had to write down a list of 24 words and 24 pseudowords that were dictated by an examiner. The examiner read aloud the word only once and children had to write it down on a sheet of paper. Words were chosen to reflect different levels of lexicality, word length, and word regularity, as well as effects of concreteness and grammatical class. Pseudowords were created from words that exist in Brazilian Portuguese by exchanging or omitting letters and / or syllables. For example: “fopel” was derived from “papel” (i.e., paper), “veziona” is derived from “veneziana” (i.e., shutter). One point was awarded for each correctly written word. Internal consistency of the test was very high (Cronbach's $\alpha = .94$; see Rodrigues et al., 2017).

Phoneme Elision Task (PET; Barbosa-Pereira et al., 2020): To measure phonemic awareness a phoneme elision task was used. Children hear 28 words and have to state the resulting word when a specific phoneme is omitted. All resulting words were real words from Brazilian Portuguese. For example: in Brazilian Portuguese “perua” without /u/ gives “pera”, etc. Similar examples in English would be “farm” without /f/ giving “arm” and “cup” without /k/ giving “up”. The length of the words ranged from two to three syllables. Eight words require the omission of a vowel, and 20 words require the omission of a consonant. Also, omitted phonemes varied according to position within the words (i.e., initial: “filha” without /f/, middle: “atlas” without /l/ and, final: “cruz” without /z/). One point was awarded for each correct answer. Again, internal consistency was very high (Cronbach's $\alpha = .91$; see Barbosa-Pereira et al., 2020).

Rapid Automated Naming (RAN; Van der Sluis et al., 2004): lexical access speed was assessed using a rapid automated digit naming task. The digits one to four were randomly allocated in 5 rows and 8 columns, thus making 40 digits in total. The task starts with a training phase to ensure that children are able to correctly name the respective digits. Afterwards, children

have to name all digits as fast and as accurately as possible. The time spent to complete the task was used as an independent variable in the analyses, with longer naming time indicating worse performance. The internal consistency was moderate in a sample of Brazilian children (Cronbach's $\alpha = 0.76$; see Lima et al., 2019).

Corsi Blocks (Kessels et al; 2000): The backward condition measures the visuo-spatial component of WM. In the backward condition, the experimenter taped a number of blocks on a board and the child was instructed to tap the blocks in reversed order. Sequence length increases from two to a maximum of nine blocks with two trials per sequence length. The task was interrupted when the child made two consecutive errors in the trials of the same sequence length. visuo-spatial WM span is determined by the longest sequence correctly repeated. The total score (correct trials x span) in backward order was used to reflect visuo-spatial WM capacity in the analyses (see Kessels et al., 2000). Internal consistency of the test was moderate (Cronbach's $\alpha = 0.69$; see Kessels et al., 2000).

Digit Span (Figueiredo, 2002; Figueiredo & Nascimento, 2007): The backward condition measures the phonological component of WM. The Digit span task was administered according to the Brazilian WISC-III subtest (see Figueiredo, 2002). The procedure is comparable to the Corsi blocks task. The experimenter named a sequence of digits and the child was instructed to repeat the sequence in the inverse order. Sequence length increases from two to a maximum of nine digits with two trials per sequence length. The task was interrupted when the child made two consecutive errors in the trials of the same sequence length. Backward digit span is determined by the longest sequence correctly repeated. The total score (i.e., correct trials x span) was used as an index of phonological WM in the analyses. The internal consistency was low (Cronbach's $\alpha = 0.50$; see Figueiredo & Nascimento, 2007).

Raven's Coloured Progressive Matrices (Raven's CPM; Raven et al., 2018): The Raven's CPM was used to assess non-verbal reasoning. The task consists of 36 matrices or

drawings with a missing part. Children were instructed to choose the part that completes the figure appropriately from six possibilities. One point is given for each item answered correctly. The Brazilian validated version was used and the analyses were based on z-scores calculated from the manual's norms. Internal consistency of the test was high (Cronbach's $\alpha = .82$; see Raven et al., 2018).

Statistical Analyses

Pearson correlations were used to explore the pattern of associations among variables of interest. Next, a hierarchical regression approach was chosen to investigate the predictive power of phonemic awareness and WM for both number transcoding and word spelling (cf. Lopes-Silva et al., 2016). For the regression model predicting number transcoding, non-verbal reasoning as measured by Raven's CPM and word spelling, as measured by TEPP, were included in the first block. Visuo-spatial WM as measured Corsi Blocks, phonological WM as measured Digit Span, phonemic awareness as measured by PET were included in the second block of the regression model. The regression model predicting word spelling was performed using the same approach, however, word spelling was replaced by number transcoding in the first block.

Afterwards, in a latter regression model, we investigated the impact of the lexical access speed in ANW. Lexical access speed, as measured by RAN, was included in the second block of predictors in this regression model together with visuo-spatial WM, phonological WM and phonemic awareness.

At last, we also aimed at investigating the influence of the components of phonological processing and visuo-spatial WM on different types of transcoding errors. Separate regression models were conducted for each error type (i.e., lexical, syntactic, and combined) including predictors in the same hierarchical manner using the stepwise method as described above. The absolute error rate (in percent) of each error type was used as the criterion in the regression

models.

Results

Results are presented following the procedure steps presented above.

Correlation Analyses

Table 3.1 shows that performance in the ANW task was positively associated with non-verbal reasoning, word spelling, visuo-spatial WM, phonological WM, phonemic awareness, and lexical access speed was negatively associated with ANW. This indicated that better performance in the transcoding task was associated with better performance in all the other tasks. The correlation analyses with specific error types revealed that Raven's CPM, phonological WM, visuo-spatial WM, and phonemic awareness were negatively associated with all error types, indicating that better performance on these tests was associated with fewer errors of all error types. Lexical access speed was positively correlated with lexical and combined errors, but not with syntactic errors. Moreover, there was no significant association between lexical and syntactic errors. Overall, correlations were small to moderate in size.

Table 3.1. Correlations between neuropsychological measures for all participants

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Non-verbal reasoning (1)	.22**	.37**	.23**	.31**	-.09	.19**	-.15**	-.19**	-.13*
ANW (2)	1	.32**	.27**	.38**	-.33**	.49**	-†	-†	-†
Visuo-spatial WM (3)		1	.23**	.28**	-.16**	.26**	-.19**	-.20**	-.22**
Phonological WM (4)			1	.32**	-.23**	.31**	-.19**	-.16**	-.14*
Phonemic awareness (5)				1	-.27**	.57**	-.32**	-.26**	-.30**
Lexical access speed (6)					1	-.40**	.19**	-.06	.16**
Word spelling (7)						1	-.42**	-.31**	-.44**
Lexical errors (8)							1	-.09	.23**
Syntactic errors (9)								1	.58**
Combined errors (10)									1

Note: ANW = Arabic Number Writing; WM = Working Memory.

†Correlations between error types and the overall performance in the task were omitted to avoid redundancy.

*Correlation is significant at the .05 level (2-tailed); **Correlation is significant at the .01 level (2-tailed).

Association between Arabic number writing and phonemic awareness

In an attempt to replicate results of the study by Lopes-Silva and colleagues (2016), the first regression model used ANW as the criterion variable and included non-verbal reasoning and word spelling in the first block as well as visuo-spatial WM, phonological WM and phonemic awareness in the second block. The final model explained about 32% of ANW variance, $R^2=.33$, $R^2_{adjusted}=.33$, $F(1, 319)=3.88$, $p=.05$, with beta weights indicating that better performance on word spelling, visuo-spatial WM and phonemic awareness predicting better transcoding performance.

Next, we performed a regression model considering word spelling as the criterion variable. The model included non-verbal reasoning and ANW in the first block and visuo-spatial WM, phonological WM, and phonemic awareness in the second block. The model accounted for 46% of the variance, $R^2=.47$, $R^2_{adjusted}=.46$, $F(1, 316)=4.65$, $p=.03$. Inspection of beta weights indicated that better performance on ANW, phonemic awareness, and phonological WM significantly predicted better performance on word spelling (see Table 3.2).

Table 3.2. Regression models showing the predictive power of WM and phonemic awareness on ANW (left chart) and word spelling (right chart)

Predictor	ANW ($R^2_{adj}=.34$)			Word spelling ($R^2_{adj}=.45$)		
	Beta	t	ΔR^2	Beta	t	ΔR^2
Intercept		5.59***			5.30***	
Non-verbal reasoning	.03	0.51		-.03	-0.79	
ANW	-	-	.30	.32	7.07***	.29
Word spelling	.42	7.35***		-	-	
Visuo-spatial WM	.17	3.54***	.03	.02	0.48	Excluded
Phonological WM	.07	1.48	Excluded	.10	2.16	.01
Phonemic awareness	.11	1.97*	.01	.46	9.67***	.18

Nota: * $p<.05$, ** $p<.01$, *** $p<.001$.

Incremental contribution of lexical access speed on Arabic number writing

Expanding the results presented above, the regression model included non-verbal reasoning, and word spelling in the first block, and visuo-spatial WM, phonological WM,

phonemic awareness, and lexical access speed in the second block. The final model explained 34% of variance in the ANW, $R^2=.35$, $R^2_{\text{adjusted}}=.34$, $F(1, 319)=10.15$, $p<.001$. Inspection of beta weights indicated that better performance on word spelling, visuo-spatial WM and lexical access speed predicted better transcoding performance (see Table 3.3). Importantly, the inclusion of lexical access speed in the model led to the exclusion of phonemic awareness.

Table 3.3. Regression models showing the predictive power of WM, phonemic awareness, and lexical access speed on ANW (left chart) and word spelling (right chart)

Predictor	ANW ($R^2_{\text{adj.}}=.34$)			Word spelling ($R^2_{\text{adj.}}=.45$)		
	Beta	t	ΔR^2	Beta	t	ΔR^2
Intercept		6.51***			-0.03	
Non-verbal reasoning	.05	1.07		.01	0.30	
ANW	-	-	.30	.25	5.31***	.26
Word spelling	.40	7.55***		-	-	
Visuo-spatial WM	.18	3.59***	.03	.05	0.97	Excluded
Phonological WM	.07	1.38	Excluded	.07	1.65	Excluded
Phonemic awareness	.11	1.87	Excluded	.43	9.13***	.17
Lexical access speed	-.16	-3.19**	.02	-.20	-4.38***	.03

Nota: * $p<.05$, ** $p<.01$, *** $p<.001$.

When lexical access speed was added to the regression model, the influence of phonemic awareness was no longer significant. Rather than being an effect of collinearity between these two predictors (because they presented a weak correlation; VIF of phonological WM=1.15; VIF of phonemic awareness=1.64), this pattern of results seemsto suggest that the influence of phonemic awareness on transcoding performance might be mediated by lexical access speed. To test this hypothesis directly, we conducted a mediation analysis using the PROCESS macro (Hayes, 2007), which is an extension of SPSS software (Statistics, 2013).

As shown in Figure 3.1, the mediation effect of lexical access speed on the contribution of phonemic awareness on ANW was significant, $\beta=.07$, BCa CI 95% [.03,14]. However, the contribution of phonemic awareness on ANW remained significant after controlling for the effect of lexical access speed, $b=.35$, CI 95% [.25, .45], $p<.001$.

We estimated the percentage of variance mediated by lexical speed on the impact of

phonemic awareness on ANW by dividing the standardized coefficients of the direct effect (i.e., c') by the total effect (i.e., C). Then, the resultant value was subtracted by one. The calculated estimative showed that lexical access speed mediated 12% of the variance of the relationship between phonemic awareness and ANW.

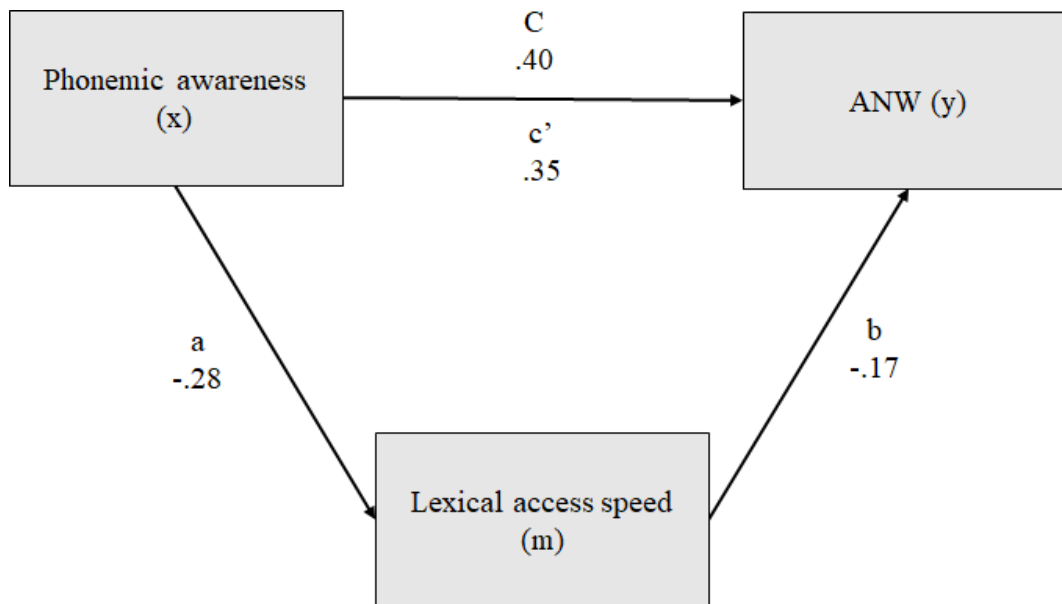


Figure 3.1. Mediation impact of lexical access speed on the relationship between phonemic awareness and ANW.

Legend: ANW = Arabic Number Writing; x = predictor variable; y = dependent variable; m = mediator variable; C = total effect; c' = direct effect; a = impact of phonemic awareness on lexical access speed; b = impact of lexical access speed on ANW.

We also included the contribution of lexical access speed for word spelling using the same approach of the previous regression model. The final model explained 45% of variance in the word spelling, $R^2=.46$, $R^2_{adjusted}=.45$, $F(1, 316)=19.13$, $p<.001$. Inspection of beta weights indicated that better performance on ANW, phonemic awareness, and lexical access speed predicted better word spelling performance (see Table 3.3). Importantly, the inclusion of lexical access speed in the model led to the exclusion of phonological working memory. Similar

to the models for ANW, this pattern suggests that the influence of phonological WM on word spelling might be mediated by lexical access speed.

Figure 3.2 shows the analyses of mediation of lexical access speed on the contribution of phonological WM on word spelling. The mediation effect was significant, $\beta=.07$, BCa CI 95% [.02, .13]. However, the contribution of phonological WM on word spelling remained significant after controlling for the effect of lexical access speed, $b=.69$, CI 95% [.25, 1.13], $p<.001$. The lexical access speed mediated 31% of the variance of the relationship between phonological WM and word spelling.

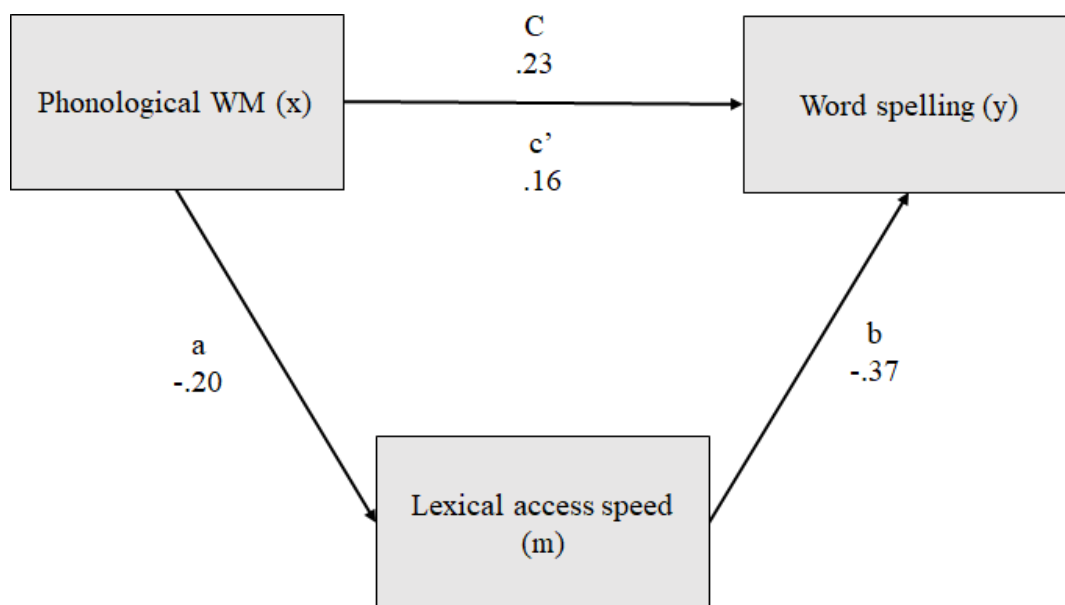


Figure 3.2. Mediation impact of lexical access speed on the relationship between phonological WM and word spelling.

Legend: x =predictor variable; m =mediator variable; y =dependent variable; C =total effect; c' =direct effect; a =impact of phonological WM on lexical access speed; b =impact of lexical access speed on ANW.

Predictors of lexical and syntactic errors in Arabic number writing

The same approach used in the former regression models was used to investigate the

predictive power of visuo-spatial WM, phonological WM, phonemic awareness and lexical access speed on transcoding error types. The final regression model for *lexical errors* accounted for 10% of the variance, $R^2=.11$, $R^2_{adjusted}=.10$, $F(1, 353)=4.02$, $p=.05$, with phonemic awareness and lexical access speed being significant predictors of lexical errors. Inspection of beta weights indicated that worse performance on phonemic awareness and lexical access speed predicted higher error rates of lexical errors (see Table 3.4).

The final model for *syntactic errors* explained 7% of the variance, $R^2=.08$, $R^2_{adjusted}=.07$, $F(1, 353)=3.89$, $p=.05$. phonemic awareness and visuo-spatial WM were the only significant predictors. Consideration of beta weights indicated that worse performance on visuo-spatial WM and phonemic awareness predicted higher rates of syntactic errors (see Table 3.4).

The model for combined errors explained 9% of variance, $R^2=.10$, $R^2_{adjusted}=.09$, $F(1, 353)=6.70$, $p=.01$, with visuo-spatial WM and phonemic awareness being significant predictors of combined errors. Beta weights indicated that worse performance on visuo-spatial WM and phonemic awareness predicted higher rates of combined errors (see Table 3.4).

Table 3.4. Regression models showing the predictive power of WM, phonemic awareness, and lexical access speed on lexical, syntactic and combined errors

Predictor	Lexical errors ($R^2_{adj}=.10$)			Syntactic errors ($R^2_{adj}=.07$)			Combined errors ($R^2_{adj}=.09$)		
	Beta	t	ΔR^2	Beta	t	ΔR^2	Beta	t	ΔR^2
Intercept		4.08***			7.51***			8.01***	
Non-verbal reasoning	-.05	-0.91	.02	-.09	-1.55	.03	-.01	-0.09	.02
Visuo-spatial WM	-.10	-1.71	Excluded	-.11	-1.97*	.01	-.14	-2.59*	.02
Phonological WM	-.08	-1.53	Excluded	-.06	-1.12	Excluded	-.03	-0.46	Excluded
Phonemic awareness	-.27	-4.84***	.08	-.18	-3.23***	.04	-.24	-4.36***	.06
Lexical access speed	.11	2.00*	.01	-.03	-0.47	Excluded	.06	1.15	Excluded

Nota: * $p<.05$, ** $p<.01$, *** $p<.001$.

Discussion

The present study aimed to investigate the specific influence of phonological processing abilities (i.e., phonological WM, phonemic awareness, and lexical access speed) on overall transcoding performance as well as the frequency of specific error types. Based on the assumptions of the ADAPT model, we hypothesize that phonological processing abilities contribute selectively to specific steps of number transcoding. In particular, we hypothesize that i) phonemic awareness should be important in the phonological encoding of numbers in the initial step of transcoding; ii) phonological WM should be important for the storing and manipulation of information, and iii) lexical access speed should be important in the retrieval of Arabic numbers' lexical information.

Furthermore, we expected a selective pattern of contribution of these variables to lexical and syntactic errors, reflecting specific difficulties in the implementation of lexical and procedural routes of the ADAPT model. Thus, difficulties in the procedural route, resulting in syntactic errors, should be predicted by phonological and visuo-spatial WM. In turn, difficulties in the lexical route, resulting in lexical errors, should be predicted by phonemic awareness and lexical access speed.

Additionally, by replicating the same approach of Lopes-Silva and colleagues (2016), we compared the predictive power of phonological processing abilities in ANW and word spelling. We aimed to investigate if the contribution of phonological processing abilities is shared by ANW and word spelling.

Generally, our results are in line with, but also extend, the findings of Lopes-Silva and colleagues (2016) meaningfully. These authors showed that next to visuo-spatial WM, phonemic awareness is an important correlate of ANW. However, the current results indicate that when lexical access speed was considered as well, phonemic awareness was no longer a significant predictor of ANW. This suggested that the influence of phonemic awareness on

ANW might be mediated by lexical access speed, which was substantiated by a subsequent mediation analysis. Moreover, specific analyses on separate error types revealed that lexical errors were indeed predicted best by phonemic awareness and lexical access speed selectively. In contrast, syntactic and combined errors were predicted best by phonemic awareness and visuo-spatial WM. The word spelling was predicted by phonemic awareness and phonological WM. However, when lexical access speed was entered in the regression model, phonological WM was no longer a significant predictor of word spelling.

In the following paragraphs, we discuss the relative role of different phonological processing abilities and visuo-spatial WM in the overall ANW performance and in the frequency of specific error types.

Previous studies investigated the association between phonological processing and numerical skills such as arithmetic fact retrieval (DeSmedt & Boets, 2010; Hecht et al, 2001). Simmons and Singleton (2008) argued that deficits in phonological WM and lexical access speed should impair the strength of phonological representations and, consequently, affect aspects of numerical cognition that involve the manipulation of a verbal code. Even though phonological WM and lexical access speed draw on phonological representations alongside with phonemic awareness, the latter may tap more on phonological representations (see Boada & Pennington, 2006; Elbro, 1996).

Accordingly, we proposed that phonemic awareness should be important for the initial phonological encoding of the verbal input on number transcoding prior to the implementation of any lexical and/or procedural mechanisms. Therefore, it is expected that difficulties in this initial stage should hinder the transcoding process. Although Barrouillet and colleagues (2004) did not assume a contribution for phonemic awareness on ANW, they argued that this phonological encoding stage would be affected by the degree of phonological similarity between number words. Thus, one can argue that phonemic awareness might be important to

discriminate number words with similar phonemes such as “sessenta” and “setenta” (i.e., sixty and seventy) or “três” and “seis” (i.e., three and six).

Only a few studies focused on investigating the specific association between phonological processing abilities and ANW (see Lopes-Silva et al., 2014, 2016). Lopes-Silva and colleagues (2016) investigated the contribution of phonemic awareness, phonological WM and visuo-spatial WM on the ANW skills of 7 to 11-year-old children. The regression model indicated that only phonemic awareness predicted the performance on ANW. Using a similar approach, the current study replicated this previous finding by demonstrating a significant contribution of phonemic awareness on ANW, even when the effects of working memory were considered. We expanded this previous study by also considering the contribution of lexical access speed. The results indicated that the effect of phonemic awareness on ANW is no longer significant when lexical access speed is simultaneously considered in the model. In addition, mediation analyses substantiated that lexical access speed partially mediated the influence of phonemic awareness on ANW. Given that phonemic awareness and lexical access speed tap the same latent variable, namely phonological processing, and that phonemic awareness tasks encompasses the influence of working memory and lexical retrieval, the specific contribution of each ability on ANW might be hard to disentangle (see Cunningham et al., 2015).

In addition to that, phonemic awareness was associated with all three types of errors. We proposed that initial difficulties in the phonological encoding of numbers, which should be associated with phonemic awareness, should be common to all types of errors. Alternatively, these results might be driven by the fact that the phonemic elision task used to measure phonemic awareness skills in the present study also involves manipulation of verbal information. It is possible to assume that this task also encompasses phonological WM skills, which could potentially explain why worse performance on the phoneme elision task was associated with higher error rates of all types.

Lexical errors were specifically predicted by lexical access speed (and phonemic awareness). The ADAPT model postulates that lexical errors would occur due to difficulties in retrieving lexical units from LTM, which would be implemented by P1 rules. In favor of this hypothesis, Barrouillet and colleagues (2004) found a positive association between the number of P1 rules that need to be applied when transcoding a number and the rate of lexical errors. The results of the present study suggest that children with less efficient lexical access speed made more lexical errors, which in turn reflects impairments in the application of P1 rules.

According to the ADAPT model, WM maintains the verbal units and organizes the output during number transcoding. In fact, significant associations between transcoding performance and phonological and visuo-spatial components of WM have been consistently reported in the literature. Here we further substantiated the association between ANW and both visuo-spatial and phonological WM by revealing how each WM component influences ANW performance alone and in addition to other variables. Specifically, we corroborated previous findings relating verbal and visuospatial WM to general performance in ANW (e.g., Camos, 2008; Imbo et al., 2014; Lopes-Silva et al., 2014, 2016; Moura et al., 2013; Zuber et al., 2009). More importantly, our results also indicated that phonemic awareness, as measured by a phoneme elision task, accounts for a shared part of variance also explained by phonological, but not visuo-spatial WM. This finding may be attributable to similarities between the tasks used to measure phonological WM and phonological awareness (digit span and phoneme elision, respectively). As mentioned before, our phoneme elision task required the retention and manipulation of phonological information. Also, as suggested by Lopes-Silva et al. (2014) and discussed above, verbal processes in number transcoding can be assigned to, or mediated by, phonemic awareness.

More in-depth analyses on different error types also shed some light on the role of working memory in ANW. The specific association between visuo-spatial WM and syntactic

errors, but also combined errors, supports the idea of a visuo-spatial processing of the place-value structure of the Arabic code (see Zuber et al., 2009). This result indicates that children with lower visuo-spatial WM would be more susceptible to face problems in the procedural route of the ADAPT model. However, it is worth noting that the same association was not found by Lopes-Silva and colleagues (2016) when investigating the influence of phonological processing and visuo-spatial WM on transcoding. We hypothesize that the use, in the present study, of a transcoding task with more syntactically complex numbers may have put higher demands on visuo-spatial WM resources and, thus, increased its association with number transcoding. This is, however, a post hoc explanation and should be tested further by directly manipulating number complexity in the same study.

The present findings showed that similar cognitive processes seem to be shared between word reading/writing and number writing. Regression models assessing the predictive power of phonological processing abilities on word spelling demonstrated that better performance on phonemic awareness and phonological WM predicted better performance on word spelling. However, the contribution of working memory is partially mediated by lexical access speed. Byrbaert (2005) pointed out the parallels between word reading and single-digit numbers recognition. In both cases, processing words and numbers initially occurs in a sequential manner, demanding the implementation of algorithm-based conversion rules. Later on, more holistic/parallel and automatized processing takes place. Both forms of processing were operationalized as being different routes in the models of word reading/writing (Coltheart et al., 2001) and number writing (Barrouillet et al., 2004). The parallel route is primarily used to process frequent and familiar words and numbers, while the sequential route is most likely used to process infrequent and unfamiliar words and numbers. Additionally, less proficient students rely exclusively on the procedural route, whereas more proficient achievers may expand their word and number lexicon, being able to use both the procedural and lexical routes concurrently.

Conclusion

Altogether, the results of the present study suggest that different phonological processes play specific roles in ANW. In particular, we observed that lexical access speed mediated the previously reported influence of phonemic awareness on transcoding. Additionally, selective influences were found for phonological processing abilities and specific transcoding error types. While all error types were predicted significantly by phonemic awareness, lexical errors were specifically predicted by lexical access speed. In contrast, syntactic and combined errors were predicted significantly by visuo-spatial working memory and phonemic awareness.

The findings of this study have important theoretical implications. The ADAPT model explicitly assumes the involvement of working memory during ANW. However, it does not consider the involvement of other cognitive processes in transcoding. Here, we substantiated that phonemic awareness and visuo-spatial WM, and first demonstrated that lexical access speed significantly predicted transcoding performance. Based on the observed pattern of results, we hypothesize that these processes contribute selectively to specific steps of number transcoding, as follows: i) phonemic awareness should be important in the phonological encoding of numbers in the initial step of transcoding; ii) phonological WM should be important for the storing and manipulation of information, and iii) lexical access speed should be important in the retrieval of Arabic numbers' lexical information.

References

- Barbosa-Pereira, D., Martins, P. S. R., Guimarães, A. P. L., Silva, E. de O., Batista, L. T., Haase, V. G., & Lopes-Silva, J. B. (2020). How Good Is the Phoneme Elision Test in Assessing Reading, Spelling and Arithmetic-Related Abilities? *Archives of Clinical Neuropsychology*, 00, 1–16. <https://doi.org/10.1093/arclin/acz085>.
- Barrouillet, P., Camos, V., Perruchet, P., & Seron, X. (2004). ADAPT: A Developmental, Asemantic, and Procedural Model for Transcoding From Verbal to Arabic Numerals.

- Psychological Review, 111(2), 368–394. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.2.368>.
- Boada, R., & Pennington, B. F. (2006). Deficient implicit phonological representations in children with dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 95(3), 153-193. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2006.04.003>.
- Brysbaert, M. (2005). Number recognition in different formats. In J. I. D. Campbell (ed.) *The handbook of mathematical cognition* (pp. 23-42). New York: Psychology Press.
- Camos, V. (2008). Low working memory capacity impedes both efficiency and learning of number transcoding in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99(1), 37-57. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.06.006>.
- Cunningham, A. J., Witton, C., Talcott, J. B., Burgess, A. P., & Shapiro, L. R. (2015). Deconstructing phonological tasks: The contribution of stimulus and response type to the prediction of early decoding skills. *Cognition*, 143, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.06.013>.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological review*, 108(1), 204. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.1.204>.
- Deloche, G., & Seron, X. (1982). From one to 1: An analysis of a transcoding process by means of neuropsychological data. *Cognition*, 12(2), 119–149. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(82\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0010-0277(82)90009-9).
- De Smedt, B., & Boets, B. (2010). Phonological processing and arithmetic fact retrieval: evidence from developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 48(14), 3973-3981. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.10.018>.
- Elbro, C. (1996). Early linguistic abilities and reading development: A review and a hypothesis. *Reading and Writing*, 8(6), 453-485. <https://doi.org/10.1007/BF00577023>.
- Figueiredo, V. D. (2002). WISC-III: Escala de Inteligência Wechsler para Crianças-adaptação

brasileira da 3a edição. São Paulo: Casa do Psicólogo.

- Figueiredo, V. L. M. de, & Nascimento, E. do. (2007). Desempenhos nas duas tarefas do subteste dígitos do WISC-III e do WAIS-III. *Psicologia: Teoria e Pesquisa*, 23(3), 313–318. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-37722007000300010>.
- Göbel, S. M., Watson, S. E., Lervåg, A., & Hulme, C. (2014). Children's arithmetic development: It is number knowledge, not the approximate number sense, that counts. *Psychological Science*, 25, 789–798. <https://doi.org/10.1177/0956797613516471>.
- Gomides, M. R. A., Lopes-Silva, J. B., Moura, R., de Salles, J. S. & Haase, V. G. (in press). Bateria de avaliação do processamento numérico e cálculo - PRONUMERO. *Vetor*.
- Habermann, S., Donlan, C., Göbel, S. M., & Hulme, C. (2020). The critical role of Arabic numeral knowledge as a longitudinal predictor of arithmetic development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 193, 104794. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104794>.
- Hayes, A. F. (2017). *Introduction to mediation, moderation, and conditional process analysis: A regression-based approach*. Guilford publications.
- Hecht, S. A., Torgesen, J. K., Wagner, R. K., & Rashotte, C. A. (2001). The relations between phonological processing abilities and emerging individual differences in mathematical computation skills: A longitudinal study from second to fifth grades. *Journal of Experimental Child Psychology*, 79(2), 192-227. <https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2586>.
- Kessels, R. P. C., van Zandvoort, M. J. E., Postma, A., Kappelle, L. J., & de Haan, E. H. F. (2000). The Corsi Block-Tapping Task: Standardization and Normative Data. *Applied Neuropsychology*, 7(4), 252–258. https://doi.org/10.1207/S15324826AN0704_8
- Lima, M., Piccolo, L. R., Basso, F. P., Júlio-Costa, A., Lopes-Silva, J. B., Haase, V. G., Salles, J. F. (2019). Neuropsychological and environmental predictors of reading performance in Brazilian children. *Applied Neuropsychology Child*, 18, 1-12. <https://doi.org/10.1080/21622965.2019.1575737>

- Lopes-Silva, J. B., Moura, R., Julio-Costa, A., Haase, V. G., & Wood, G. (2014). Phonemic awareness as a pathway to number transcoding. *Frontiers in Psychology*, 5, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00013>.
- Lopes-Silva, J. B., Moura, R., Júlio-Costa, A., Wood, G., Salles, J. F., & Haase, V. G. (2016). What Is Specific and What Is Shared Between Numbers and Words? *Frontiers in Psychology*, 7, 22. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00022>.
- Michalick-Triginelli, M. F., & Cardoso-Martins, C. (2015). The role of phonological awareness and rapid automatized naming in the prediction of reading difficulties in Portuguese. *Psicologia: Reflexão e Crítica*, 28(4), 823–828. <https://doi.org/10.1590/1678-7153.201528421>
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and cognition*, 4(2), 171-196. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(85\)90069-7](https://doi.org/10.1016/0278-2626(85)90069-7).
- McLean, J. F. & Rusconi, E. (2014). Mathematical difficulties as decoupling of expectation and developmental trajectories. *Frontiers in Human Neuroscience* 8, 44. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00044>.
- Moeller, K., Pixner, S., Zuber, J., Kaufmann, L., & Nuerk, H.-C. (2011). Early place-value understanding as a precursor for later arithmetic performance – a longitudinal study on numerical development. *Research in Developmental Disabilities*, 32, 1837-1851. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.03.012>
- Moura, R. J., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K. & Haase, V.G. (2013). Transcoding abilities in typical and atypical mathematics achievers: the role of working memory, procedural and lexical competencies. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116, 707-727. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.07.008>.
- Moura, R., Haase, V., Lopes-Silva, J., Batista, L., Rocha de Freitas, F., Bahnmueller, J. &

- Moeller, K. (2021). Reading and writing words and numbers: Similarities, differences, and implications. In A. Fritz, E. Gürsoy & M. Herzog (Ed.), *Diversity Dimensions in Mathematics and Language Learning* (pp. 291-312). Berlin, Boston: De Gruyter.
- Power, R.; Dal Martello, M. (1990). The dictation of Italian numerals. *Language and Cognitive Processes*, 5, 237-254. <https://doi.org/10.1080/01690969008402106>.
- Raven, J., Raven, J. C., Court, J. H., Paula, J. J., Alves, G. A. S., Malloy-Diniz, L. F. & Schlottfeldt C. G. M. F. (2018). *CPM RAVEN - Matrizes Progressivas Coloridas de Raven: validação e normatização brasileira (1ª ed)*. São Paulo: Pearson.
- Rodrigues, J. C. & Salles, J. F. (2013). Tarefa de escrita de palavras/pseudopalavras para adultos: abordagem da neuropsicologia cognitiva. *Letras de Hoje*, 48(1), p. 50-58. Retrieved from <https://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/fale/article/view/11960>.
- Rodrigues, J. C., Miná, C. S., Salles, J. F. (2017). *Coleção Anele 3 - Tarefa de Escrita de Palavras e Pseudopalavras - TEPP*. Editora Vetor.
- Simmons, F. R., & Singleton, C. (2008). Do weak phonological representations impact on arithmetic development? A review of research into arithmetic and dyslexia. *Dyslexia*, 14(2), 77–94. <http://dx.doi.org/10.1002/dys.341>.
- Statistics, I. S. (2013). IBM Corp. Released 2013. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 22.0. Armonk, NY: IBM Corp. Google Search.
- Teixeira, R. M., & Moura, R. (2020). Arabic number writing in children with developmental dyslexia. *Estudos de Psicologia*, 37, e180179. <http://dx.doi.org/10.1590/1982-0275202037e180179>.
- Van der Sluis, S., de Jong, P. F., & van der Leij, A. (2004). Inhibition and shifting in children with learning deficits in arithmetic and reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87(3), 239-266. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2003.12.002>.
- Wagner, R. K., & Torgesen, J. K. (1987). The nature of phonological processing and its causal

role in the acquisition of reading skills. *Psychological Bulletin*, 101(2), 192–212.
<https://doi.org/10.1037/0033-2909.101.2.192>.

Zuber, J., Pixner, S., Moeller, K., & Nuerk, H.-C. (2009). On the language specificity of basic number processing: Transcoding in a language with inversion and its relation to working memory capacity. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102(1), 60–77.
<https://doi:10.1016/j.jecp.2008.04.003>.

CAPÍTULO 4

Conclusão

Na presente dissertação, abordamos como diferentes influências linguísticas impactam o desenvolvimento da transcodificação numérica. Com relação as influências lexicais mostramos através da revisão sistemática a associação dos tipos de erros com especificidades idiomáticas. Os estudos apresentados fornecem evidências de que a representação cognitiva dos números é moldada e difere entre os idiomas. As influências relacionadas a linguagem, não apenas fornecem a compreensão do processamento numérico, mas podem ter valor diagnóstico (Bahnmüller et al., 2021). O número de erros da transcodificação, pode prever o desempenho aritmético futuro e indicar transtornos de aprendizagem (Moeller et.al., 2011, Moura et.al.,2013, 2015, Teixeira & Moura 2020). Sendo assim, compreender os aspectos específicos da linguagem no desenvolvimento da transcodificação pode ajudar na identificação de crianças com dificuldades matemáticas e leitoras no início da escolarização.

Em segundo lugar, examinamos a influências dos componentes do processamento fonológico no desempenho geral da transcodificação numérica e nos tipos de erros. Os resultados mostraram que o desempenho de transcodificação de número foi predito seletivamente por habilidades de processamento fonológico, em particular pela consciência fonêmica e velocidade de acesso lexical. Além disso, os erros lexicais foram associados a consciência fonêmica e velocidade de acesso lexical, enquanto os erros sintáticos e combinados foram associados a consciência fonêmica e memória de trabalho visoespacial.

Os resultados deste estudo têm implicações teóricas e práticas. Hipotetizamos que as habilidades de processamento fonológico seriam importantes durante a implementação de etapas específicas do modelo ADAPT (Barrouillet et al., 2004). Além disso, demonstramos que a transcodificação numérica e a escrita de palavras compartilham mecanismos cognitivos.

Esses achados contribuem para a explicação, da alta comorbidade entre dificuldades de matemática, leitura e escrita.

Referências

- Bahnmueller, Julia, Lopes-Silva, Júlia Beatriz, Haase, Vitor Geraldi, Moura, Ricardo and Moeller, Korbinian. "Ties of math and language: A cognitive developmental perspective: ". *Diversity Dimensions in Mathematics and Language Learning: Perspectives on Culture, Education and Multilingualism*, edited by Annemarie Fritz, Erkan Gürsoy and Moritz Herzog, Berlin, Boston: De Gruyter, 2021, pp. 101-131. <https://doi.org/10.1515/9783110661941-006>
- Barrouillet, P., Camos, V., Perruchet, P., & Seron, X. (2004). ADAPT: A Developmental, Asemantic, and Procedural Model for Transcoding From Verbal to Arabic Numerals. *Psychological Review*, *111*(2), 368–394. doi: 10.1037/0033-295X.111.2.368.
- Moeller, K., Pixner, S., Zuber, J., Kaufmann, L., & Nuerk, H.-C. (2011). Early place-value understanding as a precursor for later arithmetic performance – a longitudinal study on numerical development. *Research in Developmental Disabilities*, *32*, 1837-1851. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.03.012>
- Moura, R. J., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K. & Haase, V.G. (2013). Transcoding abilities in typical and atypical mathematics achievers: the role of working memory, procedural and lexical competencies. Submitted to *Journal of Experimental Child Psychology*, *116*, 707-727. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.07.008>.
- Teixeira, R. M., & Moura, R. (2020). Arabic number writing in children with developmental dyslexia. *Estudos de Psicologia*, *37*, e180179. <http://dx.doi.org/10.1590/1982-0275202037e180179>.