



FACULDADE DE MEDICINA  
CENTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO

Av. Prof. Alfredo Balena 190 - sala 533  
Belo Horizonte - MG - CEP 30130-100  
Fone (031) 3409.9641 - FAX (31) 3409.9640

[www.ufmg.br/psg](http://www.ufmg.br/psg)



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de **JÚLIA BEATRIZ LOPES SILVA** nº de registro 2011656391. Às quatorze horas, do dia **vinte e oito de fevereiro de dois mil e treze**, reuniu-se na Faculdade de Medicina da UFMG, a Comissão Examinadora de dissertação indicada pelo Colegiado do Programa, para julgar, em exame final, o trabalho intitulado: **"O PAPEL DA CONSCIÊNCIA FONÊMICA COMO MECANISMO COGNITIVO SUBJACENTE AO PROCESSAMENTO NUMÉRICO"**, requisito final para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências da Saúde: Saúde da Criança e do Adolescente, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde: Saúde da Criança e do Adolescente. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Victor Geraldi Haase, após dar conhecimento aos presentes o teor das Normas Regulamentares do trabalho final, passou a palavra à candidata para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa da candidata. Logo após, a Comissão se reuniu sem a presença da candidata e do público para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações.

Prof. Victor Geraldi Haase - Orientador

Instituição UFMG

Indicação

*MP NOV MDT*

Prof. Jorge Andrade Pinto

Instituição UFMG

Indicação

*aprovado*

Profª Cláudia Cardoso Martins

Instituição UFMG

Indicação

*aprovada*

Pelas indicações a candidata foi considerada

*MP NOV MDT*

O resultado final foi comunicado publicamente a candidata pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a sessão e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 28 de fevereiro de 2013.

Prof. Victor Geraldi Haase - Orientador

*Victor G. Haase*

Prof. Jorge Andrade Pinto

*Jorge Andrade Pinto*

Profª Cláudia Cardoso Martins

*Cláudia Cardoso Martins*

Profª Ana Cristina Simões e Silva /Coordenadora

*Ana Cristina Simões e Silva*

Obs. Este documento não terá validade sem a assinatura e carimbo do Coordenador

Profª Ana Cristina Simões e Silva  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde: Saúde da Criança e do Adolescente  
Faculdade de Medicina - UFMG

CONFERE COM ORIGINAL  
Centro de Pós-Graduação  
Faculdade de Medicina - UFMG





FACULDADE DE MEDICINA  
CENTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO

Av. Prof. Alfredo Balena 190 / sala 533  
Belo Horizonte - MG - CEP 30.130-100  
Fone: (031) 3409.9641 FAX: (31) 3409.9640  
[cpg@medicina.ufmg.br](mailto:cpg@medicina.ufmg.br)



**DECLARAÇÃO**

A Comissão Examinadora abaixo assinada, composta pelos Professores Doutores: Victor Geraldi Haase, Jorge Andrade Pinto, Cláudia Cardoso Martins aprovou a dissertação de mestrado intitulada: **"O PAPEL DA CONSCIÊNCIA FONÊMICA COMO MECANISMO COGNITIVO SUBJACENTE AO PROCESSAMENTO NUMÉRICO"** apresentada pela mestranda **JÚLIA BEATRIZ LOPES SILVA** para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde – Área de Concentração em Saúde da Criança e do Adolescente da Faculdade de Medicina da Universidade Federal de Minas Gerais, realizada em 28 de fevereiro de 2013.

Prof. Victor Geraldi Haase

Orientador

Prof. Jorge Andrade Pinto

Prof<sup>a</sup>. Cláudia Cardoso Martins

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
FACULDADE DE MEDICINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SAÚDE DA CRIANÇA  
E DO ADOLESCENTE

JÚLIA BEATRIZ LOPES SILVA

O PAPEL DA CONSCIÊNCIA FONÊMICA COMO MECANISMO COGNITIVO SUBJACENTE  
AO PROCESSAMENTO NUMÉRICO

BELO HORIZONTE - MG  
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
FACULDADE DE MEDICINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SAÚDE DA CRIANÇA  
E DO ADOLESCENTE

JÚLIA BEATRIZ LOPES SILVA

O PAPEL DA CONSCIÊNCIA FONÊMICA COMO MECANISMO COGNITIVO SUBJACENTE  
AO PROCESSAMENTO NUMÉRICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde da Faculdade de Medicina da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências da Saúde. Área de concentração: Saúde da Criança e do Adolescente.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Geraldi Haase

BELO HORIZONTE - MG  
2013

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos durante o mestrado.

Também agradeço ao Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) / PROBRAL Program (310/08), à FAPEMIG e ao CNPq pelo financiamento do projeto “*Discalculia do desenvolvimento em crianças de idade escolar: triagem populacional e caracterização de aspectos cognitivos e genético-moleculares*”, do qual essa dissertação faz parte.

Em particular, agradeço:

Ao Vitor Geraldi Haase por me conceder o privilégio de ser sua orientanda. Vitor é uma das pessoas mais inteligentes, brilhantes e éticas que eu já tive a honra de conhecer. Além disso, agradeço pela sua disponibilidade incansável, suas contribuições essenciais e pelas sessões de psicoterapia. Fico feliz que nossos interesses de pesquisa foram conciliáveis e espero continuar crescendo com sua orientação.

Ao Guilherme Wood que nos presenteia com sua sabedoria e mudou a nossa forma de produzir conhecimento científico.

Cláudia Cardoso-Martins e Jorge Andrade Pinto por aceitarem fazer parte da banca examinadora. Em especial, agradeço à professora Cláudia por ter me proporcionado uma aproximação com a literatura atual sobre leitura e escrita durante sua disciplina, de uma forma extremamente estimulante e motivadora.

Aos colegas do LND, que me fazem feliz pela sorte de trabalhar entre amigos. Em especial, agradeço ao Ricardo José de Moura, por deixar meu cotidiano mais divertido e por ter sido minha referência e fonte imprescindível de dicas e discussões sobre a transcodificação numérica. A Annelise Júlio-Costa por ser o braço direito na fase final da dissertação e amiga em várias outras fases. A Isabella Starling Alves pela ajuda com a psicofísica e as conversas estimulantes sobre neuropsicologia e poesia. Agradeço especialmente pela ajuda durante a coleta de dados, e pelas danças e botecos.

Aos meus pais e minha irmã que acompanharam as ansiedades e ajudaram com prontidão e efetividade em todas as etapas do processo.

Ao G6 (Igor Rabello, Túlio Fiorini, Fernando Palhares, Maria Clara Magni e Mônica Câmara), fonte de amor incondicional e intimidade.

A Fernanda Mata que é ex-dupla de laboratório e dupla eterna na vida, meu apoio em discussões acadêmicas, dilemas existenciais e nas delícias do dia a dia.

Ao Luiz, meu companheiro, pelo amor que me move.

Aos amigos por compreenderem as ausências e serem ombros, ouvidos, abraços e sorrisos.

## RESUMO

A presente dissertação investiga a relação entre o processamento fonológico e a cognição numérica. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica focada no impacto dos subcomponentes do processamento fonológico (memória de trabalho fonológica, acesso lexical e consciência fonológica) em aspectos da matemática, como resolução de problemas aritméticos, tabuada e transcodificação. Observou-se a ausência de estudos que controlam, simultaneamente, a influência do processamento fonológico e de outros mecanismos cognitivos relevantes, como a memória de trabalho e o senso numérico. A partir dessas constatações, foi realizado um estudo empírico, com crianças de 2ª a 4ª série que diferiam em relação ao desempenho na tarefa de supressão de fonemas, uma medida de consciência fonêmica. As crianças com desempenho abaixo do percentil 25 foram classificadas como *low phonemic awareness* (LPA) e as que tiveram desempenho acima do percentil 25, como *typical phonemic awareness* (TPA). O grupo LPA teve desempenho inferior em tarefas de cálculos simples, problemas matemáticos oralmente formulados e transcodificação numérica, mesmo após o controle da influência da memória de trabalho fonológica e do senso numérico. Na tarefa de ditado de números, a supressão de fonemas foi o melhor preditor neuropsicológico do arco-seno de erros e houve interação entre complexidade dos itens na tarefa de transcodificação e grupo de supressão de fonemas. Pode-se concluir então que a consciência fonêmica está relacionada com aspectos simbólicos da matemática, especialmente com a transcodificação numérica verbal-arábica.

Palavras-chave: processamento fonológico, consciência fonêmica, aritmética, transcodificação numérica

## ABSTRACT

The present thesis investigates the relationship between phonological processing and numerical cognition. At first, we reviewed the literature regarding the impact of the subcomponents of phonological processing (phonological working memory, lexical access and phonological awareness) in aspects of mathematics, such as arithmetic word problems, arithmetical facts and numerical transcoding. It was observed the lack of studies that control, simultaneously, the influence of phonological processing and other relevant cognitive mechanisms, like working memory and number sense. Based on this, we performed an empirical study, with children from 2<sup>nd</sup> to 4<sup>th</sup> grade that differed regarding their performance on a phoneme elision task, a measure of phonemic awareness. Children with performance below the 25<sup>th</sup> percentile were classified as low phonemic awareness (LPA) and the ones with performance above the 25<sup>th</sup> percentile, as typical phonemic awareness (TPA). The LPA group was inferior on simple calculation, mathematical word problems and numerical transcoding, even after controlling for the influence of working memory and number sense. In the number writing task, phoneme elision was the best neuropsychological predictor of the arcsine of errors and there was an interaction between the complexity of the items from the transcoding task and the phoneme elision groups. It can be concluded that phonemic awareness is related to symbolic aspects of mathematics, specially to verbal-Arabic numerical transcoding.

Keywords: phonological processing, phonemic awareness, arithmetics, numerical transcoding



## LISTA DE FIGURAS

Figure 1. Schematic representation of the ADAPT model .....	38
Figure 2. Group interaction on numerical complexity.....	56

## LISTA DE TABELAS

Table 1. Descriptive data of the sample .....	49
Table 2. Descriptive data of the neuropsychological measures for each group.....	51
Table 3. Analysis of variance (ANOVA) and covariance (ANCOVA) of the neuropsychological tasks.....	53
Table 4. Description of the number writing items according to ADAPT rules.....	54
Table 5. Descriptive data for the ADAPT categorization for each group.....	54
Table 6. Analysis of variance (ANOVA) and covariance (ANCOVA) of the transcoding task.....	55
Table 7. Correlations between the neuropsychological variables.....	58
Table 8. Linear regression with arcsine of errors of the total score as dependent variable.....	59
Table 9. Linear regression with arcsine of errors of lexical items as dependent variable.....	60
Table 10. Linear regression with arcsine of errors of complex items as dependent variable.....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SLI	Specific Language Impairment
DD	Developmental Dyscalculia
WISC	Wechsler Intelligence Scale for Children
RAN	Rapid Automatized Naming
WISC-R	Wechsler Intelligence Scale for Children Revised
ALE	Activation Likelihood Estimate
QI	Quoeficiente de Inteligência
w	Internal Weber Fraction
ANS	Approximate Number System
ADAPT	A Developmental Asemantic and Procedural Transcoding Model
WM	Working Memory
KR-20	Kuder–Richardson Formula 20
TDE	Brazilian School Achievement Test
LPA	Low Phonemic Awareness
TPA	Typical Phonemic Awareness
Arcs	Arcsine of errors
DBT	Digit backward total score
LTM	Long-term memory

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Estrutura da dissertação.....	1
1.2. Referências.....	2
2. Objetivos.....	3
3. Processamento fonológico e desempenho em aritmética: uma revisão da relevância para as dificuldades de aprendizagem.....	4
3.1. Discalculia do desenvolvimento.....	6
3.2. Comorbidade entre discalculia e transtornos da linguagem.....	10
3.3. Aprendizagem da matemática e processamento fonológico.....	12
3.3.1. Componentes do processamento fonológico e sua relação específica com a matemática.....	12
3.3.2. O papel do processamento fonológico no desenvolvimento da aprendizagem matemática.....	17
3.3.3. Correlatos anátomo-funcionais.....	19
3.4. Processamento fonológico e aprendizagem da aritmética em crianças com transtornos do desenvolvimento da linguagem.....	20
3.5. Conclusão.....	24
3.6. Referências Bibliográficas.....	25
4. Phonemic awareness as a pathway to number processing.....	34
4.1. Introduction.....	35
4.2. Methods.....	45
4.3. Results.....	50
4.4. Discussion.....	61
4.5. Conclusion.....	66
4.6. References.....	68
5. Considerações finais.....	73

## **1. Introdução**

A realização de cálculos aritméticos, assim como o processamento numérico em geral, está relacionada com a utilização de diversos mecanismos cognitivos (Rubinsten & Henik, 2009, LeFevre, Fast, Skwarchuk, Smith-Chant, Kamawar, Penner-Wilger, 2010) os quais ainda não tem sua influência muito bem delimitada.

A informação numérica pode ser representada em diferentes códigos, como o verbal e o Árábico. O código verbal permite que expressemos quantidades sob a forma de numerais escritos (catorze), ou oralmente apresentados, enquanto o código arábico as representa através de algarismos (14). A habilidade de converter a informação entre estes códigos é conhecida como transcodificação numérica e é uma condição necessária para a o aprendizado da matemática (Geary, 2000; Noël & Turconi, 1999)

O presente estudo objetiva delimitar a influência do processamento fonológico na cognição numérica e, mais especificamente, na transcodificação. O processamento fonológico é tradicionalmente associado à aprendizagem da leitura e escrita (Wagner & Torgesen, 1987) e, recentemente, alguns estudos têm demonstrado sua relação com a matemática, principalmente com os fatos aritméticos (Simmons & Singleton, 2008, 2009; DeSmedt, Taylor, Archibaldi & Ansari, 2010). A revisão de literatura realizada no primeiro artigo dessa dissertação permitiu observar que, apesar de a transcodificação numérica possuir um componente marcadamente verbal, nenhum estudo pesquisou sistematicamente a influência do processamento fonológico nesta habilidade. A partir da identificação desta questão de pesquisa, realizamos uma investigação acerca dos mecanismos cognitivos associados à matemática, tais como a consciência fonêmica, memória de trabalho e o senso numérico e, mais especificamente, suas relações com a transcodificação numérica.

### **1.1. Estrutura da dissertação:**

Seguindo as recomendações do Programa de Pós-graduação em Ciências da Saúde da Faculdade de Medicina da UFMG, este trabalho será apresentado no formato de artigo científico. Dessa forma, compõem a presente dissertação um artigo teórico e um artigo empírico, que corresponde ao estudo principal.



O primeiro deles consiste em uma revisão da literatura intitulada *Processamento fonológico e desempenho em aritmética: uma revisão da relevância para as dificuldades de aprendizagem*. Este artigo teve como principal objetivo descrever os principais trabalhos que abordam a relação entre o processamento fonológico e a matemática, com uma análise crítica metodológica. Submetemos esse artigo para a revista *Temas em Psicologia*, da Sociedade Brasileira de Psicologia, em abril de 2012 e estamos aguardando resposta.

O segundo artigo é intitulado *Phonemic awareness as an alternative pathway to number processing*. Este artigo foi realizado com o intuito de investigar a associação entre consciência fonêmica e o desempenho na aritmética e transcodificação numérica em crianças de segunda a quarta série de escolas públicas. O texto deste artigo será apresentado em inglês, uma vez que existe o objetivo de submetê-lo à revista *Frontiers in Developmental Psychology*.

## 1.2. Referências

- DeSmedt, 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.
- Geary, D. C. (2000). From Infancy to Adulthood: the development of numerical abilities. *European Child & Psychiatry*, 9 (2), 11 – 16.
- Lefevre, J-anne, Fast, L., Skwarchuk, S.-Lynn, Smith-Chant, B., Bisanz, J., Kamawar, D., Penner-Wilger, M. (2010) Pathways to Mathematics: Longitudinal Predictors of Performance. *Child Development*, 81 (6), 1753-1767.
- Nöel, M-P. & Turconi, E. (1999). Assessing number transcoding in children. *European Review of Applied Psychology*, 49(4), 395-302.
- 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.
- Simmons, F., Singleton, C., & Horne, J. (2008). Phonological awareness and visual-spatial sketchpad functioning predict early arithmetic attainment: Evidence from a longitudinal study. *European Journal of Cognitive Psychology*, 20(4), 711-722.
- Rubinsten, O. & Henik, A. (2009). Developmental dyscalculia: heterogeneity might not mean different mechanisms. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(2), 92-99.
- 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.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo do presente estudo é investigar a influência do processamento fonológico, principalmente da consciência fonêmica, na cognição numérica.

### **2.1. Objetivos Específicos**

(a) Realizar uma revisão crítica da literatura a fim de investigar a importância do processamento fonológico para a aprendizagem da matemática em crianças típicas, assim como as dificuldades relacionadas a atrasos de aprendizagem. Além disso, objetivamos investigar a influência específica dos subcomponentes do processamento fonológico e quais aspectos da matemática são mais influenciados por eles.

(b) Analisar perfis de grupos que diferem em relação ao nível de consciência fonêmica em tarefas de matemática, controlando o impacto da memória de trabalho e senso numérico.

(c) Investigar a relação da consciência fonêmica com a complexidade sintática numérica em uma tarefa de ditado de números.

### **3. Processamento fonológico e desempenho em aritmética: uma revisão da relevância para as dificuldades de aprendizagem**

Júlia Beatriz Lopes Silva, Ricardo José de Moura, Guilherme Wood, Vitor Geraldi Haase

#### **RESUMO:**

O processamento fonológico é tradicionalmente associado ao aprendizado da leitura e escrita. Seus componentes - consciência fonológica, memória fonológica e resgate lexical - são os principais preditores do desempenho na leitura e escrita e, déficits nestes domínios estão relacionados com a dislexia. Recentemente, a relação entre a fonologia e a matemática também tem sido demonstrada na literatura. O processamento fonológico está correlacionado, principalmente, com aspectos simbólicos da matemática, como a automatização de fatos aritméticos, resolução de problemas matemática e transcodificação numérica. Os diversos aspectos do processamento fonológico influenciam na aprendizagem dos dígitos e rótulos verbais que representam as magnitudes. Além disso, déficits destes domínios também ocasionam déficits na matemática, como é o caso de crianças disléxicas que também apresentam prejuízos na memorização da tabuada. Analisamos os principais artigos que abordam este tema, suas falhas metodológicas e principais contribuições teóricas. Sugerimos que o processamento fonológico é o principal mecanismo compartilhado entre a discalculia e a dislexia e que se relaciona à comorbidade entre os dois transtornos.

**PALAVRAS CHAVE:** processamento fonológico, discalculia, dislexia, comorbidade

## ABSTRACT:

The phonological processing is traditionally associated with learning to read and write. Its components - phonological awareness, phonological memory and lexical access - are the main predictors of performance in reading and writing and, deficits in these areas are related to dyslexia. Recently, the relationship between the phonology and mathematics has also been demonstrated in the literature. The phonological processing is mainly correlated with the symbolic aspects of mathematics, such as the automation of arithmetic facts, arithmetic problem solving and numerical transcoding. The various aspects of symbolic processing influence the learning of digits and verbal labels that represents magnitudes. In addition, its deficits can also cause impairment in mathematics, such as dyslexic children who also showed worse automation of the multiplication table. We analyze the main articles that address this issue, its methodological flaws and major theoretical contributions. We suggest that phonological processing is the main mechanism shared between dyscalculia and dyslexia, and that it is related to the comorbidity between two disorders.

KEY WORDS: phonological processing, dyslexia, dyscalculia, comorbidity

Sabemos que existe comorbidade entre transtornos da aprendizagem da matemática e transtornos do desenvolvimento da linguagem oral e da aprendizagem da leitura e escrita; nos quais o processamento fonológico desempenha um papel importante (Simmons & Singleton, 2008; Landerl & Moll, 2010)

Qual é a natureza dessa conexão? Trata-se apenas de uma comorbidade, ou seja, co-ocorrência aleatória? Ou existe algum compartilhamento de mecanismos? Há evidências de que vários mecanismos podem estar envolvidos na gênese das dificuldades de aprendizagem, tais como déficits na acuidade numérica não-simbólica e na memória de trabalho. Será que déficits no processamento fonológico desempenham algum papel nas dificuldades de aprendizagem da matemática?

Para responder a estas questões, apresentamos uma revisão dos estudos sobre a importância do processamento fonológico para a aprendizagem da matemática em crianças típicas, bem como das evidências para o envolvimento de déficits no processamento fonológico nas dificuldades de aprendizagem de aritmética de crianças com SLI (*specific language impairment*), dislexia e discalculia. Inicialmente, definiremos discalculia e dislexia e aspectos relacionados à comorbidade dos transtornos. Em seguida, analisaremos a contribuição específica de cada componente do processamento fonológico na matemática, correlatos anátomo-funcionais, e perfil de processamento numérico em crianças com transtornos de linguagem.

#### 1. Discalculia do Desenvolvimento:

A discalculia do desenvolvimento (DD) é um transtorno na aquisição de habilidades aritméticas básicas, relacionadas a déficits na representação de numerosidade ou magnitude, no reconhecimento e produção de numerais em suas diversas notações bem como de operadores aritméticos, na capacidade de aprender e resgatar automaticamente os fatos aritméticos, e na capacidade de realizar as quatro operações aritméticas (Geary, 2000, Butterworth, 2005, Shalev, Manor & Gross-Tsur, 1997).

A prevalência da discalculia varia entre 3 a 6% da população em idade escolar e sua origem é genética (Shalev, Auerbach, Manor, & Gross-Tsur, 2000). O diagnóstico exige que as dificuldades sejam persistentes e não possam ser atribuíveis à deficiência mental, deficiências



sensoriais, falta de estimulação ou experiência, métodos ou experiências educacionais inadequados ou a transtornos emocionais e motivacionais (American Psychiatric Association, 2000, Butterworth, 2005). A DD precisa ser diferenciada do baixo rendimento em matemática, uma disciplina notoriamente considerada difícil e que provoca ansiedade em um contingente apreciável da população (Lee, 2009). Os prejuízos exibidos pelas crianças com DD são graves e amplos, não se limitando apenas à execução de cálculos aritméticos. (Geary, Hoard, Byrd-Craven & DeSoto, 2004; Girelli & Seron, 2001). Essas crianças apresentam dentre outras, dificuldades em associar representações internas de magnitude e numerais arábicos (Landerl, Bevan, & Butterworth, 2004); achados neurofuncionais apoiam esta conexão entre discalculia do desenvolvimento e déficits no processamento básico de informação numérica (Rubinsten & Henik, 2006).

A matemática é um domínio complexo que envolve diversas habilidades, como contagem, estimação e compreensão de procedimentos. Os principais mecanismos cognitivos subjacentes, candidatos para explicar as dificuldades apresentadas por crianças com discalculia são: o senso numérico (Dehaene, 1992), o processamento visoespacial (Rourke & Conway, 1997), a memória de trabalho (Geary, 1993, 2010), e o processamento fonológico (Simmons & Singleton, 2008).

O modelo cognitivo que atualmente melhor explica o processamento numérico é o modelo do código triplo (Dehaene, 1992), o qual propõe três tipos de representações de magnitude: analógica, arábica e verbal. A representação analógica está relacionada à idéia de senso numérico, sistema pré-verbal de raciocínio aritmético. Esta representação não-simbólica de magnitude relaciona-se com a compreensão do significado dos números, noção de quantidade e capacidade de estimação. De acordo com esse modelo, as representações analógicas constituem o conteúdo semântico para as representações simbólicas, arábicas e verbais, as quais constituem aquisições desenvolvimentais mais tardias, tanto filogeneticamente quanto ontogenicamente. No que diz respeito ao substrato neuroanatômico, a representação analógica relaciona-se principalmente com porções bilaterais do sulco intraparietal (Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003). O processamento no sistema arábico (*p. ex.*, 45) recruta bilateralmente uma rede neuronal cujo epicentro é o giro fusiforme (Dehaene & Cohen, 1995), sendo importante para a realização de cálculos que envolvem algarismos com vários dígitos. O sistema verbal (*p. ex.*, *quarenta e cinco*) é fundamentado na linguagem e possibilita a

realização de cálculos exatos e problemas apresentados oralmente, tendo o giro angular esquerdo como seu epicentro (Zamarian, Ischebeck & Delazer, 2009).

Estudos recentes sugerem que crianças com discalculia teriam dificuldade com a manipulação de magnitudes não-simbólicas (Landerl, Fussenegger, Moll, & Willburger, 2009; Mussolin, Mejias, & Noel, 2010) e, de modo correlato, apresentariam uma menor acuidade na representação analógica de magnitudes (Piazza, Facoetti, Trussardi., Berteletti, Conte, Lucangeli, Dehaene & Zorzi, 2010). De acordo com Halberda, Mazzocco & Feigenson (2008), diferenças individuais em testes padronizados de matemática podem ser explicadas por diferenças na acuidade do senso numérico.

O processamento viso-espacial influencia o desempenho na matemática principalmente porque se relaciona à habilidade da criança alinhar os números de forma adequada na hora de montar uma operação, ou manipular quantidades na memória de curto-prazo (Geary, 1993, Rourke & Conway, 1997). Zuber, Pixner, Moeller & Nuerk (2009) encontraram correlações significativas ( $r=-0.22$ ,  $p<0.05$ ) entre erros sintáticos de transcodificação numérica e memória viso-espacial (medida pela tarefa de Cubos de Corsi). A amostra utilizada neste estudo era composta de crianças austríacas de 7 anos, as quais utilizam uma regra de inversão na transcodificação numérica (por exemplo: o número 42 é lido como dois e quarenta), o que pode justificar a correlação com a memória viso-espacial.

Estudos longitudinais sugerem que o processamento viso-espacial é crucial nos primeiros anos de aprendizagem da matemática para a representação de modelos mentais de quantidade que não envolvem rótulos verbais (Huttenlocher, Jordan & Levine, 1994; Rasmussen & Bisanz, 2005). De acordo com LeFevre, Fast, Skwarchuk, Smith-Chant, Bisanz, Kamawar & Penner-Wilger (2010), a memória de trabalho viso-espacial é preditora independente do desempenho na matemática em crianças de 4 a 8 anos. A medida de atenção viso-espacial usada pelos autores, análoga à tarefa de Cubos de Corsi, correlacionou-se com medidas simbólicas e não-simbólicas do processamento numérico (leitura de números e comparação de magnitudes) nas crianças pré-escolares. Os autores sugerem que essa relação pode ser mediada pela circuitaria parietal, a qual está envolvida no processamento de magnitudes, assim como no processamento viso-espacial.

Geary (1993) sugere que as dificuldades de aprendizagem matemáticas estariam relacionadas a déficits na memória de trabalho. Segundo o autor, existiriam três subtipos de dificuldades de aprendizagem matemáticas, todas relacionadas a déficits de memória: subtipo procedimental, em que os déficits estariam associados a prejuízos na memória de trabalho verbal; subtipo relacionado à memória semântica, em que a criança apresentaria déficits na recuperação dos fatos aritméticos, e subtipo viso-espacial, em que o indivíduo apresentaria déficits na representação espacial de número.

Nöel (2009) examinou a influência específica dos mecanismos da memória no processamento numérico de crianças pré-escolares. O executivo central foi o melhor preditor do desempenho, seguido pela memória de trabalho viso-espacial.

Em um artigo de revisão recente, Raghubar, Barnes & Hetch (2010) reportaram o efeito robusto da memória de trabalho fonológica (especialmente testes que envolvem estímulos numéricos, como o Dígitos do WISC) na matemática. A memória de trabalho viso-espacial, segundo os autores, tem uma relação menos consistente com a matemática.

Além disso, a habilidade de contagem nos dedos prediz o desempenho na matemática e diferenças individuais: utilizar os dedos para representar quantidades diminui a sobrecarga da memória de trabalho, facilita a transição entre representações simbólicas e não-simbólicas e é uma habilidade prejudicada em crianças com discalculia (Costa et al., 2011). Os déficits na memória não explicam, entretanto, a especificidade dos prejuízos na aritmética (Dehaene, 1992).

A consciência fonológica refere-se a habilidades de manipulação dos sons das palavras e é um dos principais preditores do desempenho na leitura (Vellutino, Fletcher, Snowling & Scanlon, 2004). Estudos recentes estabelecem um paralelo entre a ativação do giro angular esquerdo em tarefas de leitura e tarefas matemáticas que se baseiam em códigos verbais – transcodificação numérica, multiplicação - de acordo com o modelo do código triplo (De Smedt, Taylor, Archibald & Ansari, 2010, Simmons & Singleton, 2008). Esses estudos demonstram a relevância do processamento fonológico principalmente em aspectos verbais da aritmética, como a multiplicação e frações. Para resolver estes problemas aritméticos, a criança deve converter os termos em um código verbal, processar essa informação fonológica e resgatar uma resposta da memória de longo prazo verbal.

## 2. Comorbidade entre discalculia e transtornos da linguagem

Estudos epidemiológicos apontam altas taxas de comorbidade entre discalculia e dislexia: aproximadamente 40% dos disléxicos também apresentam déficits na cognição aritmética (Lewis, Hitch & Walker, 1994) e a prevalência de déficits na leitura e na aritmética é semelhante, por volta de 4 a 7% (Landerl, Fussenegger, Moll & Willburger, 2009). Alguns estudos sugerem taxas de comorbidade de até 70%, valor que pode ser superestimado, dependendo de critérios diagnósticos e dos construtos avaliados pelos testes padronizados de aritmética e leitura (Landerl & Moll, 2010). A comorbidade entre discalculia e dislexia é maior do que seria esperada pelo acaso, se as duas entidades fossem totalmente segregadas de forma independente. Ao mesmo tempo, a comorbidade é relativamente específica, uma vez que numa família cujo caso índice é de discalculia, a probabilidade maior é de que ocorra recorrência para discalculia do que para dislexia. Além disso, questionários respondidos por pais sugerem que a transmissão é específica para cada transtorno e que dificuldades de leitura e matemática apresentam um padrão de co-segregação (Landerl & Moll, 2010).

A dislexia do desenvolvimento caracteriza-se por um déficit específico na aquisição da leitura e acomete cerca de 5 a 17 % de crianças em idade escolar (Shaywitz & Shaywitz, 2005). De acordo com a World Health Organization, a International Dyslexia Association e o National Institute of Child Health dos Estados Unidos, a explicação proeminente em relação às dificuldades apresentadas pelos disléxicos é referente ao déficit central do processamento fonológico. Alguns autores, como Wimmer & Schurz (2010) criticam esse posicionamento devido à hegemonia de pesquisas na língua inglesa, a qual possui uma ortografia irregular. De acordo com Wimmer (2006), as altas taxas de comorbidade entre discalculia e dislexia em idiomas com ortografia mais transparente, como o alemão, podem estar relacionadas com dificuldades de fluência, já que crianças disléxicas alemãs têm como melhor preditor da leitura o desempenho na tarefa de nomeação rápida de estímulos visuais em detrimento do déficit na consciência fonológica. Outras teorias alternativas para a explicação dos déficits da dislexia incluem a hipótese do processamento temporal (Tallal, Miller, Jenkins, & Merzenich, 1997), hipótese cerebelar (Fawcett & Nicolson, 2001; Nicolson & Fawcett, 2001) e hipótese do duplo déficit (Bowers & Wolf, 1993; Wolf & Bowers, 1999; Wolf, Bowers, & Biddle, 2000). Entretanto, nenhuma dessas teorias descarta por completo a dificuldade de crianças disléxicas em tarefas fonológicas (Simmons & Singleton, 2008).

Atualmente, duas hipóteses são proeminentes em relação à especificidade dos déficits cognitivos no caso da comorbidade discalculia/dislexia. Butterworth (2005), Landerl, Bevan, & Butterworth (2004) e Wilson & Dehaene (2007) propõem a hipótese do déficit cognitivo específico de domínio (*domain-specific cognitive deficit account*), segundo a qual prejuízos no módulo numérico, ou no senso numérico, e não em habilidades gerais, como a memória, causariam dificuldades na aritmética. A dislexia, de modo análogo, seria causada especificamente por um déficit no processamento fonológico e o senso numérico estaria intacto em muitos casos. O senso numérico seria então o endofenótipo implicado nas dificuldades da matemática e o processamento fonológico, na leitura.

Landerl et al. (2004) estudaram crianças de 8 e 9 anos que foram categorizadas como 'dificuldade de leitura', 'dificuldade na matemática', 'dificuldade de leitura e matemática' e 'grupo controle'. Segundo os autores, crianças com dificuldades apenas na leitura apresentam desempenho normal em tarefas de processamento numérico, o que apóia a hipótese de que déficits fonológicos não influenciam a aritmética. Entretanto, é possível apontar uma falha metodológica no artigo, já que as crianças que foram classificadas como 'dificuldade na matemática' ou 'dificuldade de leitura e matemática' tiveram desempenho três desvios-padrão abaixo da média em um teste normatizado de aritmética. Em contrapartida, as crianças eram classificadas como 'dificuldade de leitura' quando obtinham desempenho abaixo do percentil 25 em um teste de leitura, o que sugere que as crianças dos outros grupos tinham dificuldades mais graves.

Landerl, Fussenegger, Moll & Willburguer (2009) sugerem que discalculia e dislexia seriam transtornos com perfis neuropsicológicos diferentes e duplamente dissociados. Neste estudo, as pesquisadoras avaliaram crianças entre 8 e 10 anos que foram classificadas como controles, disléxicas, discalcúlicas ou disléxicas e discalcúlicas em relação ao processamento numérico básico, consciência fonológica, memória de trabalho e velocidade de processamento. Segundo as autoras, os déficits encontrados no grupo duplo-déficit teriam caráter aditivo, e não, interativo, o que sugere que discalculia e dislexia são entidades nosológicas específicas.

Além disso, estudos de caso (Tressoldi, Rosati and Lucangeli, 2007) também sugerem uma dupla dissociação entre discalculia e dislexia: a comorbidade entre elas seria consequência da co-ocorrência dos déficits específicos a cada uma, a saber: déficits no processamento fonológica na dislexia e déficits no senso numérico na discalculia.



Por outro lado, a hipótese do déficit comum (*common deficit account*) (Simmons & Singleton, 2008) sugere que a discalculia seria, de alguma forma, causada pelos déficits fonológicos associados à dislexia. Esse pressuposto seria válido para as crianças com quadro comórbido de discalculia e dislexia, já crianças que apresentam apenas dificuldade na matemática teriam outro perfil cognitivo. Simmons & Singleton (2008), em um artigo de revisão sobre representações fonológicas e aritmética, apoiam essa hipótese ao sugerir que o processamento fonológico é preditor do desempenho aritmético e que, crianças com dislexia teriam representações fonológicas pobres que causam impacto negativo na aprendizagem da matemática (*weak phonological representation hypothesis*).

Jordan (2007) considera que as dificuldades de leitura agravam, e não causam, dificuldades na matemática, já que crianças com dislexia/discalculia teriam dificuldades em utilizar os mecanismos compensatórios associados à linguagem. Em seu artigo de revisão, a autora conclui que as crianças com dificuldade de matemática, independentemente da associação com dificuldades de leitura, apresentam déficits no senso numérico. O que diferencia o grupo discalculia e discalculia/dislexia é o fato que o grupo com duplo déficit apresenta maiores dificuldade na resolução de problemas matemáticos, os quais dependem, simultaneamente, da representação verbal e processamento numérico.

### 3. Aprendizagem da aritmética e processamento fonológico

#### 3.1. Componentes do processamento fonológico e sua relação específica com a matemática

O desempenho de crianças em tarefas diversas de processamento fonológico depende da qualidade das suas representações dos códigos fonológicos (Snowling & Hulme, 1994, Simmons & Singleton, 2008). De acordo com Wagner & Torgesen (1987), os principais componentes do processamento fonológico associados à aquisição da leitura são os seguintes: resgate lexical, memória de trabalho/ memória de curto prazo fonológica e consciência fonológica. A seguir, analisamos a relação de cada um destes aspectos com a aprendizagem da matemática.

##### a) Resgate lexical:

O componente de velocidade de nomeação relaciona-se com a hipótese de Geary (1993) de que déficits na representação e recordação de informações semânticas da memória de longo prazo estariam relacionados à comorbidade entre a discalculia e a dislexia. O resgate lexical influencia a fluência de leitura e de cálculos, uma vez que essas habilidades exigem o resgate apropriado de sons ou números e é uma medida da qualidade das representações fonológicas de longo prazo. Além disso, o resgate eficiente de códigos fonológicos permite que as crianças desloquem recursos atencionais para procedimentos de cálculos (Bull & Johnston, 1997; Geary 1993).

Em um estudo com crianças com dificuldades específicas de linguagem (*Specific Learning Impairment – SLI*), (Koponen, Mononen, Räsänen & Ahonen, 2006), a velocidade de resgate lexical foi a única variável linguística que explicou a diferença entre o grupo SLI e controles em tarefas numéricas que tinham algum componente verbal, como a habilidade de resgatar a resposta de fatos aritméticos.

Em relação à especificidade dos déficits em tarefas de nomeação seriada rápida (RAN), Willburger, Fussenegger, Moll, Wood & Landerl (2008) encontraram um padrão inespecífico em crianças disléxicas que foram mais lentas em todas as condições de nomeação (dígitos, letras e quantidades). Já as crianças com discalculia apresentaram um déficit específico de domínio: foram mais lentas apenas na nomeação de quantidades. Esse achado sugere que os discalculicos não apresentam dificuldades proeminentes na transcodificação arábico-verbal, já que obtiveram desempenho dentro da média na nomeação de dígitos. O grupo duplo-déficit, por sua vez, apresentou um padrão de déficits aditivos.

Em contrapartida, Pauly, Linkersdörfer, Lindber, Woerner, Hasselhorn & Lonnemann (2011) encontraram déficits específicos de domínio em tarefas de RAN: crianças em risco de desenvolver problemas de leitura apresentaram déficits na nomeação de letras e objetos; crianças em risco de desenvolver problemas de matemáticas apresentaram déficits na nomeação de pontos e dígitos, e o grupo com risco para ambos os domínios apresentou um padrão aditivo de déficits. Os próprios autores sugerem que a divergência em relação aos achados anteriores pode estar relacionada com o critério de seleção de grupos: as crianças com risco de desenvolver problemas de leitura foram selecionadas a partir do desempenho em tarefas de processamento fonológico, o que pode ter contribuído para que grupos com outras dificuldades de linguagem não tenham sido incluídos na amostra.

## b) Memória de trabalho e memória de curto-prazo fonológica:

De acordo com o modelo inicial de memória de trabalho proposto por Baddeley & Hitch (1974), o executivo central seria responsável pela alocação de recursos atencionais e manipulação de informação; e existiriam dois buffers, de capacidade limitada, que armazenam formas distintas de conteúdos. O buffer viso-espacial mantém informações de caráter viso-espacial e se relaciona com representações posteriores de semântica visual da memória de longo prazo. A alça fonológica (aqui também descrita como 'memória fonológica') é o aspecto do sistema memória de trabalho responsável pela codificação e armazenamento de informações verbais ou sonoras.

Ao realizar operações aritméticas, a criança deve manter na memória, por exemplo, "um mais um é igual a..." enquanto realiza o problema. A eficiência da memória de trabalho fonológica também pode influenciar o resgate de fatos aritméticos da memória de longo prazo.

De acordo com Ramussen & Bisanz (2005) o buffer fonológico, medido pela tarefa de Dígitos do WISC (ordem direta) correlaciona-se com o desempenho de crianças escolares em todos os tipos de problemas aritméticos (verbais e não-verbais, com ou sem informações irrelevantes). As crianças pré-escolares, em contrapartida, apresentam dificuldades na resolução de problemas aritméticos verbais e seu desempenho em problemas não-verbais correlaciona-se com a memória de trabalho viso-espacial, medida pela ordem direta do Cubos de Corsi. Uma crítica possível a esse artigo é que os autores utilizaram apenas a ordem direta do Cubos de Corsi e Dígitos como medidas de memória de trabalho, as quais não envolvem manipulação on-line de informação, e, conseqüentemente, poderiam ser melhor consideradas medidas de memória de curto prazo. Neste estudo, a ordem inversa da tarefa Dígitos foi utilizada como uma medida fonológica do executivo central e uma tarefa de Counting Span como medida visual do executivo central e o mesmo padrão foi encontrado: o executivo central fonológico se correlacionaria com o desempenho das crianças mais velhas e o visual, com o de crianças pré-escolares.

McKenzie, Bull & Gray (2003) corroboram a sequência desenvolvimental proposta por Rasmussen & Bisanz (2005). Os autores utilizaram testes de interferência fonológica e viso-espacial durante a realização de tarefas aritméticas e concluíram que crianças mais novas

(entre 6 e 7 anos) dependem menos de representações fonológicas para a realização de cálculos comparadas com crianças mais velhas (8 e 9 anos), as quais utilizariam estratégias fonológicas e viso-espaciais.

Meyer, Salimpoo, Wu, Geary & Menon (2010), investigaram os aspectos específicos da memória de trabalho que influenciam no processamento numérico básico, resolução de cálculos e problemas matemáticos em crianças de 2ª e 3ª séries. Segundo os autores, os componentes da memória de trabalho que influenciam no desempenho da matemática variam ao longo do desenvolvimento: o executivo central e o buffer fonológico seriam mais importantes no aprendizado inicial, para o aprendizado da mudança de códigos verbais em formato numérico e, em estágios posteriores, a memória de trabalho viso-espacial seria o subcomponente fundamental. Uma possível fonte de divergência em relação ao modelo de Ramussen & Bisanz (2005) pode se dever ao fato de que as crianças neste estudo eram mais velhas e, além disso, o subteste de problemas matemáticos utilizados por Meyer et al. (2010) continha itens de identificação de formas geométricas e interpretação de gráficos, o que pode estar relacionado com a influência do processamento viso-espacial em crianças mais velhas. Segundo os autores, esses achados sugerem uma mudança da circuitaria pré-frontal para circuitos mediados pelo córtex parietal, ao longo do aprendizado da matemática.

#### c) Consciência fonológica:

A habilidade de percepção e manipulação dos sons da língua prediz o desempenho da leitura e estudos recentes sugerem a importância desse componente do aprendizado da matemática. A consciência fonológica pode ser investigada através de tarefas que exigem a distinção dos sons que formam as palavras; como detecção de rimas e junção de sons isolados para criar palavras (Lewkowicz, 1980). De acordo com Castles & Coltheart (2004), a medida de consciência fonológica que apresenta maior correlação com o aprendizado da leitura e escrita é a consciência fonêmica, a qual envolve análise, manipulação e síntese de fonemas isolados e sua relação com a palavra como um todo.

Leather & Henry (1994) encontraram que 31% da variância do desempenho aritmético em crianças de 7 anos é explicada pela consciência fonêmica (score composto das seguintes tarefas: supressão de fonemas e seqüenciamento de fonemas para formar uma palavra). De acordo com os autores, a natureza da associação entre consciência fonológica e matemática

está relacionada ao fato que manipulações fonológicas exigem processos aritméticos (por exemplo, tarefas de supressão de fonemas exigem, literalmente, a subtração de um som) e envolvem memória de trabalho. Um problema metodológico deste artigo é o fato que o desempenho da matemática foi medido apenas através do subtteste de Aritmética do WISC-R, o qual faz parte da escala de QI verbal e depende, marcadamente, do processamento verbal para a manutenção e resolução do problema e articulação da resposta.

Em um estudo com crianças típicas de 4ª e 5ª séries, De Smedt, Taylor, Archibaldi & Ansari (2010) encontraram que uma medida de consciência fonêmica (tarefa de supressão de fonemas) estava relacionada especificamente com operações aritmética envolvendo a manipulação de pequenas magnitudes, que possuíam resultados menores que 25. Além disso, a consciência fonêmica estava associada com esses cálculos (adição, multiplicação e subtração) mesmo após controlar habilidade de leitura e memória de curto-prazo fonológica.

Hecht et al. (2001) apontam que a consciência fonológica prediz o desempenho da matemática em crianças de idade escolar. Um dos objetivos principais deste estudo foi avaliar a relação específica dos diversos componentes do processamento fonológico com o desenvolvimento da aprendizagem da matemática. No intervalo entre 3ª e 4ª série e entre 4ª e 5ª série, a consciência fonológica foi a única medida do processamento fonológico que explicava parte da variância no desempenho em um teste normatizado de aritmética (6% da variância e 2% da variância, respectivamente), mesmo com o controle da inteligência e conhecimento prévio de matemática. A memória fonológica e velocidade de processamento seriam influentes apenas em crianças mais novas, entre a 2ª e 3ª série. Segundo os autores, os mesmos recursos da memória de trabalho que são utilizados na resolução de problemas matemáticos também são recrutados em tarefas de consciência fonológica.

Simmons, Singleton & Horne (2008) demonstraram que a relação entre a consciência fonológica e o aprendizado da matemática foi independente de medidas de vocabulário e raciocínio não-verbal. Neste estudo longitudinal, os autores demonstraram que a consciência fonológica (medida através de uma tarefa de detecção de rimas) e a memória viso-espacial (medida pela tarefa "Rabbits", versão computadorizada e lúdica da ordem direta do Cubos de Corsi) são capazes de prever o desempenho na aritmética em crianças de 6 anos e apenas a consciência fonológica pode prever, isoladamente, o desempenho na leitura. A medida de desempenho aritmético utilizada neste estudo é de validade questionável, uma vez que é



constituída por 34 problemas oralmente formulados, acompanhados de figuras (ex: Cada cavalo precisa de sapatos novos. Quantos sapatos o fazendeiro precisa comprar ao todo?). Este tipo de tarefa exige manipulação verbal e viso-espacial de informação e não avalia outros aspectos importantes da aritmética, como a automatização de fatos, representação de magnitudes e valor posicional.

É interessante notar que, mesmo em crianças mais novas, como no estudo de Simmons et al. (2008), o processamento fonológico influencia a aprendizagem da matemática e da leitura, mesmo com o controle da inteligência e vocabulário.

Os estudos descritos acima utilizam medidas de aspectos diferentes da consciência fonológica (detecção de rimas, supressão de fonemas), e do processamento numérico (testes padronizados, tarefas experimentais de cálculos) o que dificulta a generalização dos achados.

### 3.2. O papel do processamento fonológico no desenvolvimento da aprendizagem matemática

O modelo desenvolvimental de Rasmussen & Bisanz (2005) sugere que o processamento viso-espacial é essencial para a aprendizagem da matemática para crianças em idade pré-escolar, as quais representam quantidades através de 'tokens'. O processamento fonológico, especificamente a memória fonológica, é mais influente nos anos seguintes, à medida que começam a existir representações verbais de quantidade durante o processo de escolarização formal; e o processamento viso-espacial perderia sua influência, por volta dos 6 anos de idade. Os autores avaliaram 34 pré-escolares e 29 crianças de primeira série que resolveram problemas aritméticos verbais (lidos pelo examinador) e não-verbais (com a manipulação de fichas). As crianças pré-escolares tiveram desempenho superior nos problemas não-verbais e não houve diferença entre os dois tipos de problema nas crianças de 1ª série. Em crianças pré-escolares, o escore na tarefa de Cubos de Corsi foi o melhor preditor do desempenho nos problemas não-verbais e a tarefa de Counting Span - medida do executivo central - nos problemas verbais. Já em crianças de 1ª série, o desempenho na tarefa de Digit Span (ordem direta e inversa) foi o melhor preditor no desempenho dos problemas verbais e nenhuma das medidas de memória de trabalho explicou porcentagem significativa da variância nos problemas não-verbais. Os autores justificam este achado devido ao fato que 24% das crianças de 1ª série desenvolveram estratégias externalizantes exclusivamente pra resolução de

problemas não-verbais como, por exemplo, representar magnitudes nos dedos, o que diminuiria a carga da memória de trabalho.

Por outro lado, o modelo proposto por Krajewski & Schneider (2009) tem como um de seus pressupostos a hipótese de palavras numéricas isoladas (*isolated number words hypothesis*), segundo a qual a consciência fonológica não influenciaria tarefas que exigem a manipulação de quantidades, mas apenas tarefas em que as palavras que representam números são isoladas da representação de quantidade. O processamento fonológico seria importante, especificamente, no aprendizado das palavras referentes aos números, e seu seqüenciamento. Dessa forma, sua influência antecederia a ligação da palavra numérica com a quantidade que ela representa, processo que, por sua vez, dependeria do aprendizado do princípio de cardinalidade e memória viso-espacial. Os autores acompanharam 91 crianças da pré-escola até a terceira série. Na fase pré-escolar, as crianças realizaram testes relacionados ao seqüenciamento de palavras numéricas, transcodificação arábico-verbal, comparação de magnitudes não-simbólicas, correspondência palavra numérica-quantidade e comparação de magnitudes simbólicas (apresentadas oralmente); além de medidas de consciência fonológica (síntese de fonemas e detecção de rimas), memória de trabalho fonológica e viso-espacial (Dígitos do WISC e Cubos de Corsi) e inteligência não-verbal. Na terceira série, elas foram avaliadas através de um teste padronizado de matemática e de escrita. Os padrões de correlação entre as medidas do processamento numérico e consciência fonológica foram similares entre a pré-escola e a terceira série ( $r=0.47$ ,  $r=0.48$ , respectivamente). No modelo de equação estrutural, os autores encontraram que a consciência fonológica influenciava a aquisição de habilidades matemáticas mais básicas, como o nome das palavras numéricas (“um, dois, três”), enquanto a memória de trabalho viso-espacial está relacionada com a ligação posterior das palavras com as quantidades.

A ordenação temporal da participação do processamento fonológico e viso-espacial é, portanto, oposta ao sugerido pelo modelo de Rasmussen & Bisanz (2005), o qual investigou especificamente crianças pré-escolares e de primeira série, enquanto Krajewski & Schneider (2009) fizeram um estudo longitudinal dos 5 aos 8 anos. Além disso, Rasmussen & Bisanz (2005) investigaram especificamente a memória fonológica e problemas aritméticos; enquanto Krajewski & Schneider também avaliaram a consciência fonológica e aspectos mais básicos da matemática; como contagem e comparação de magnitudes.

O modelo de Krajewski & Schneider (2009) confirma apenas parcialmente a hipótese de Simmons & Singleton (2008) em relação ao impacto das representações fonológicas em aspectos verbais da aritmética (*weak phonological representation hypothesis*) já que, neste modelo, déficits na representação fonológica causariam impacto negativo especificamente na aquisição de códigos numéricos verbais. Os déficits fonológicos não influenciaram habilidades numéricas mais sofisticadas ou posteriores, (apenas indiretamente, devido à automação da sequência numérica) mesmo quando há mediação verbal, como no caso de procedimentos de resolução de cálculos por estratégias verbais.

### 3.3. Correlatos anátomo-funcionais:

Estudos de neuroimagem funcional sugerem que a porção horizontal do sulco intraparietal é ativada durante a execução de tarefas não-verbais de matemática, que envolvem a representação semântica de quantidades; e este seria o principal circuito ativado em tarefas de aritmética (Wilson & Dehaene, 2007). No caso de crianças com discalculia, os resultados ainda são inconclusivos: Kaufmann, Vogel, Starke, Kremser, Schocke, Wood (2009) sugerem que haveria um aumento da ativação do sulco intraparietal, enquanto Kucian, Grond, Rotzer, Henzi, Schonmann, Plangger, Gälli, Martin, Von Aster (2011) mostram que crianças discalcúlicas têm diminuição da atividade nessa região. Kaufmann, Wood, Rubinsten & Henik (2011) realizaram uma meta-análise com 5 artigos publicados sobre ressonância magnética funcional em crianças com discalculia do desenvolvimento e/ou dificuldade de aprendizagem da matemática, em tarefas de processamento numérico simbólico e não-simbólico. Os autores utilizaram os mapas *ALE*, que permitem calcular a significância estatística de áreas consistentemente ativadas nos estudos. Os controles produziram maior ativação no pré-cuneo esquerdo e no lobo parietal inferior direito. Já as crianças com dificuldade de aprendizagem da matemática apresentaram maior ativação em áreas fronto-parietais bilaterais. Uma conclusão importante deste estudo é que as crianças com discalculia produzem uma maior ativação da porção anterior do sulco intraparietal em relação aos controles. Os autores sugerem que esta ativação anterior pode estar relacionada à estratégias compensatórias utilizadas pelas crianças com dificuldade de aprendizagem da matemática, como a contagem dos dedos.

Em relação à dislexia, foram encontradas diferenças na ativação de regiões occipitais e temporais no hemisfério esquerdo (Shaywitz & Shaywitz, 2005) entre o grupo clínico e o controle durante a realização de tarefas com componente fonológico. Áreas ventrais e dorsais

são hipo-ativadas em crianças pré-escolares que ainda não aprenderam a ler, como áreas temporo-parietais, occipito-temporais e o giro angular (Simos et al., 2002). Crianças com habilidades de leitura dentro da média apresentam maior ativação em áreas do hemisfério esquerdo, incluindo os giros: frontal inferior, temporal superior, parieto-temporal e em porções anteriores e posteriores do hemisfério direito.

O giro angular esquerdo pode ser considerado o lócus comum entre a matemática e a leitura. Programas de reabilitação da leitura baseados em estratégias fonológicas aumentam a ativação do giro angular esquerdo (Shaywitz, Shaywitz, Blachman, Pugh, Fullbright, Skudlarski, Mencl, Constable, Holahan, Marchione, Fletcher, Lyon & Gore, 2004). Além disso, ele está associado com representações lingüísticas de símbolos numéricos, conceitos e procedimentos de cálculos, e recordação de fatos aritméticos (Rubinsten & Henik, 2009; Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003).

Em um estudo de neuroimagem com adultos, Grabner, Ansari, Koschutnig, Reishofer, Ebner, Neuper (2009) utilizaram uma medida de auto-relato para avaliar estratégias utilizadas na resolução de cálculos. Os autores encontraram maior ativação do giro angular esquerdo em itens de adição exata quando comparados com adição aproximada. Além disso, houve maior ativação em cálculos de multiplicação do que subtração. Os itens que foram solucionados por estratégias procedimentais tiveram maior ativação na circuitaria fronto-parietal, enquanto itens cujas respostas foram resgatadas da memória ativaram o giro angular esquerdo.

Price & Ansari (2011), também em estudo com adultos, encontraram ativação do giro angular esquerdo no processamento de algarismos arábicos, mas apenas durante apresentações longas (500ms), que permitem algum tipo de percepção consciente. Houve maior ativação da porção dorsal do giro angular esquerdo, área relacionada com a identificação conceitual, o que indica que dígitos isolados contêm algum tipo de informação semântica. Não houve ativação desta área quando foram apresentados dígitos distorcidos ou letras.

#### 4. Processamento fonológico e aprendizagem da aritmética em crianças com transtornos do desenvolvimento da linguagem

Sujeitos com dislexia apresentam déficits no processamento fonológico, portanto, a investigação de suas habilidades matemáticas permite a delimitação do papel destes prejuízos

na matemática. Na última década, estudos com crianças e adultos que apresentam dificuldade específica da leitura e desempenho normal em testes padronizados de matemática demonstram que a investigação mais detalhada do processamento numérico de disléxicos, mesmo que com o senso numérico preservado, permite identificar prejuízos específicos da matemática.

Um aspecto da matemática que frequentemente tem sido associado ao processamento fonológico é o resgate de fatos aritméticos, principalmente os de adição e multiplicação, cuja resolução é mais dependente de estratégias verbais. Segundo Dehaene (1992), para resolver um problema matemático, a criança deve transformar os termos e o operador em um código verbal. A memorização da tabuada estaria relacionada à recordação do resultado na memória de longo prazo e, conseqüentemente, dependeria da qualidade das representações fonológicas de longo prazo. A maior parte dos estudos com disléxicos indica que a dificuldade na recordação de fatos aritméticos é o maior prejuízo na matemática deste grupo. (Geary, Hamson, & Hoard, 2000; Simmons & Singleton, 2008; Simmons & Singleton, 2009).

Boets & De Smedt (2010) sugerem que, em crianças de 8 anos, essa dificuldade não é específica para o tipo de operação: o grupo com dislexia teve desempenho inferior aos controles em cálculos de multiplicação e subtração. A amostra de 13 disléxicos e 16 controles realizou uma tarefa experimental de cálculos, cujos itens de multiplicação poderiam ser solucionados por estratégias de recordação e os itens de subtração seriam procedimentais. É interessante notar que a falta de efeito de operação no grupo clínico sugere que os disléxicos não utilizaram estratégias eficientes de recordação dos fatos de multiplicação, já que é esperado que os problemas solucionados por estratégias de recordação sejam resolvidos de forma mais acurada e rápida comparados com os cálculos de subtração. Um problema metodológico neste artigo é que, apesar das crianças disléxicas não terem diagnóstico clínico de discalculia, elas apresentaram desempenho inferior no teste padronizado de matemática quando comparadas com os controles (teste exato de Fischer:  $p < 0.05$ ), o que dificulta excluir possíveis déficits no processamento numérico que influenciariam nos cálculos.

De Smedt, Taylor, Archibaldi & Ansari (2010) também não encontraram este efeito de especificidade do tipo de operação em crianças normais de quarta e quinta séries e sugerem que é ao longo do desenvolvimento e, principalmente na fase adulta, que os indivíduos passam a utilizar códigos e estratégias diferentes para resolver problemas de subtração, por exemplo.

Simmons & Singleton (2009) investigaram as potencialidades e dificuldades de crianças disléxicas, de 10 e 11 anos, no processamento numérico. Segundo os autores, disléxicos não apresentam dificuldades de contagem, apesar de essa habilidade ter, marcadamente, um componente verbal. O grupo clínico também apresentou compreensão normal do princípio do valor posicional. Uma crítica que pode ser realizada ao artigo é que a tarefa de valor posicional envolvia um componente de comparação de magnitude, não sendo, portanto, uma medida pura de transcodificação. Os disléxicos tiveram dificuldades na recordação de fatos aritméticos, o que sugere que os códigos fonológicos da memória de longo prazo estão prejudicados.

Göbel & Snowling (2010), a partir de estudo das habilidades aritméticas em adultos disléxicos, sugerem que as dificuldades verbais da aritmética podem ser consideradas outro endofenótipo da dislexia. Os participantes eram universitários e com inteligência normal (QI > 90) e apresentavam dificuldades restritas aos cálculos exatos. Não houve diferenças significativas no desempenho em tarefas de comparação de algarismos de dois dígitos, cálculos aproximados e julgamento de paridade entre disléxico e controles. As autoras sugerem uma dissociação no desempenho de cálculos aproximados e exatos em adultos disléxicos, o que indica que o prejuízo na matemática neste grupo clínico não sofre influência do processamento analógico de magnitudes, e se limita aos aspectos verbais da aritmética.

Aproximadamente 7% de crianças em idade escolar apresentam dificuldades específicas da linguagem (*specific language impairments - SLI*) (Bishop, 1997). Estas crianças apresentam prejuízo na linguagem oral e inteligência não-verbal dentro ou superior à média (Cowan, Donlan, Newton, Lloyd, 2005). Apesar das dificuldades apresentadas por essas crianças serem, por definição, específicas na linguagem, o desempenho na matemática também é prejudicado (Donlan, 2007). No que diz respeito aos déficits no processamento numérico, é possível hipotetizar que o desempenho destas crianças seja marcadamente inferior em aspectos verbais; como contagem, recordação de fatos aritméticos e transcodificação, e que as crianças não apresentem dificuldades em tarefas relacionadas à representação aproximada de magnitudes, como comparação e estimativa numérica. Koponen et al. (2006) encontraram resultados divergentes: o grupo SLI, de crianças entre 9 e 11 anos, teve desempenho abaixo da média em tarefas matemáticas que não exigiam manipulação de informações verbais, como comparação de multidígitos e linha numérica e em tarefas que envolviam aspectos verbais, como adição. Segundo os autores, tal resultado pode ter ocorrido devido a diferenças entre o

grupo SLI e os controles em relação ao raciocínio não verbal e a heterogeneidade do grupo clínico. É importante notar que as tarefas consideradas pelos autores como 'não-verbais' envolviam a manipulação do código simbólico, o qual pode estar relacionado com a linguagem à medida que envolve a ligação de um código com sua representação semântica e fonológica.

Donlan & Gourlay (1999) investigaram a noção de valor posicional e comparação de magnitudes em crianças SLI. O grupo clínico de 13 crianças de 8 anos foi comparado com dois grupos controles: um foi pareado por idade e outro por habilidades linguísticas. As crianças com SLI acertaram 100% dos itens de comparação de magnitude quando os estímulos eram números de um dígito, sendo este desempenho superior ao do grupo controle pareado por nível de linguagem. Na tarefa de comparação de algarismos multidígitos, o grupo SLI também teve desempenho de acordo com o esperado para sua faixa etária.

Cowan et al. (2005) investigaram o processamento numérico de crianças SLI entre 7 e 9 anos de idade com o objetivo de investigar as especificidades das dificuldades da matemática dessas crianças. As correlações entre os testes de matemática, como contagem e transcodificação, com as tarefas de compreensão oral de linguagem foram maiores que as correlações das tarefas aritméticas com a memória de trabalho (medida por uma tarefa de repetição de pseudopalavras). O grupo SLI que estudava em escola regular teve desempenho abaixo dos controles da mesma faixa etária nas tarefas de contagem, cálculos, problemas matemáticos e comparação de magnitudes simbólicas. Entretanto, este estudo apresenta alguns problemas metodológicos: a tarefa de transcodificação continha apenas 8 itens; cálculos e problemas foram apresentados oralmente, o que pode ter causado uma sobrecarga da memória de trabalho fonológica das crianças. Além disso, os autores não controlaram a habilidade de leitura dos controles. Apesar de habilidades de linguagem oral e escrita serem correlacionadas, é importante investigar a influência específica de cada uma no desempenho da matemática de crianças SLI.

É necessário que esse grupo clínico seja melhor investigado em pesquisas relacionadas às habilidades matemáticas com tarefas não-simbólicas para que o papel da linguagem no processamento numérico seja melhor delimitado.

## 5. Conclusão

Os estudos revisados demonstram que déficits no processamento fonológico são fatores de risco para dificuldades de leitura e matemática. Sua importância já é bem demarcada na pesquisa de dislexia, mas o interesse do papel deste mecanismo cognitivo na aprendizagem da aritmética é relativamente recente.

Alguns achados ainda são inconclusivos, devido às diferenças metodológicas entre os estudos, que dificultam a comparação dos dados. Existem poucas medidas de processamento fonológico que são padronizadas. Os pesquisadores então, se veem obrigados a desenvolver tarefas experimentais que não podem ser comparadas entre si e, frequentemente, medem aspectos diferentes do processamento fonológico (consciência fonêmica, percepção de rimas).

Além disso, nenhum estudo controlou, simultaneamente, os mecanismos cognitivos candidatos a influenciar o processamento numérico como a memória de trabalho, senso numérico, processamento viso-espacial e consciência fonológica. Deste modo, é difícil controlar a influência específica de cada um deles.

Apesar destas lacunas, o presente artigo demonstrou que diversos estudos apoiam a hipótese de mecanismos compartilhados na aprendizagem da leitura e da matemática. De acordo com o modelo de déficits múltiplos proposto por Pennington (2006), a comorbidade entre dois transtornos está relacionada ao compartilhamento de fatores etiológicos e mecanismos cognitivos. No caso da discalculia e dislexia, a partir dos estudos revisados, podemos sugerir que o giro angular esquerdo é o lócus comum à aprendizagem habilidades de leitura e escrita e que o processamento fonológico é o principal mecanismo cognitivo cujo déficit pode causar impacto em ambos os transtornos. Déficits no processamento fonológico são, então, condição suficiente, mas não necessária, para dificuldades de aprendizagem da matemática. É importante que crianças com dislexia ou dificuldades específicas de linguagem também recebam intervenções voltadas ao processamento numérico, especialmente no que diz respeito à memorização da tabuada e interpretação dos problemas matemáticos.



## Referências Bibliográficas:

American Psychiatric Association. (2000). Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders. (Apa, Eds.)DSM IV4th ed Washington DC American Psychiatric Association 1997 (Vol. 4, p. 886). American Psychiatric Association

Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. A. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (pp. 47-89). New York: Academic Press.

Bishop, D.V.M. (1997) *Uncommon understanding: development and disorders of language comprehension in children*. Hove, UK: Psychology Press.

Boets, B., & De Smedt, B. (2010). Single-digit arithmetic in children with dyslexia. *Dyslexia*, 16(2), 183-191.

Bowers, P. G., & Wolf, M. (1993). Theoretical links among naming speed, precise timing mechanisms and orthographic skill in dyslexia. *Reading and Writing*, 5(1), 69-85.

Bull, R., & Johnston, R. S. (1997). Children's arithmetical difficulties: contributions from processing speed, item identification, and short-term memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, 65(1), 1-24.

Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 46(1), 3-18.

Castles, A., & Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, 91(1), 77-111.

Costa, A. J., Silva, J. B. L., Pinheiro-Chagas, P., Krinzinger, H., Lonnemann, J. Willmes, K., Wood, G. & Haase, V. G. (2011). A hand full of numbers: a role for offloading in arithmetics learning? *Frontiers in Cognition*, 2, 1-12.

Cowan, R., Donlan, C., Newton, E., & Lloyd, D. (2005). Number skills and knowledge in children with specific language impairment. *Journal of Educational Psychology*, 97(4), 732-744.

De Smedt, B., Taylor, J., Archibald, L., and Ansari, D. (2010). How is phonological processing related to individual differences in children's arithmetic skills? *Developmental Science*, 13, 508-520.

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42.

Dehaene, S., and Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Math. Cognition* 1, 83-120.

Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., and Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology* 20, 487-506.

Donlan, C. (2007). Mathematical development in children with specific language impairments. In D. B. Berch & M. M. M. Mazzocco (Eds.), *Why is math so hard for some children?* (pp 151-172). Baltimore, MD: Brooks.

Donlan, C., & Goulay, S. (1999). The importance of non-verbal skills in the acquisition of place-value knowledge: Evidence from normally-developing and language-impaired children. *British Journal of Developmental Psychology*, 17(1), 1-19.

Fawcett, A. J., & Nicolson, R. I. (2001). Dyslexia: The role of the cerebellum. In A. J. Fawcett (Ed.), *Dyslexia theory and good practice* (pp. 192-214). London: Whurr.

Geary, D. C. (1993). Mathematical disabilities: cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin*, 114(2), 345-362.

Geary, D. C. (2000). From infancy to adulthood: the development of numerical abilities. *European child adolescent psychiatry*, 2(22), 111-116.

Geary, D. C. (2010). Mathematical Disabilities: Reflections on Cognitive, Neuropsychological, and Genetic Components. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 130.

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.

Geary, D. C., Hoard, M. K., Byrd-Craven, J., & DeSoto, M. C. (2004). Strategy choices in simple and complex addition: Contributions of working memory and counting knowledge for children with mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 88(2), 121-151.

Girelli, L., & Seron, X. (2001). Rehabilitation of number processing and calculation skills. *Aphasiology*, 15(7), 695-712.

Göbel, S. M., & Snowling, M. J. (2010). Number-processing skills in adults with dyslexia. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(7), 1361-1373.

Grabner, R. H., Ansari, D., Koschutnig, K., Reishofer, G., Ebner, F., & Neuper, C. (2009). To retrieve or to calculate? Left angular gyrus mediates the retrieval of arithmetic facts during problem solving. *Neuropsychologia*, 47(2), 604-608.

Halberda, J., Mazocco, M. M., and Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455, 665-668.

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.

Huttenlocher, J., Jordan, N. C., & Levine, S. C. (1994). A Mental Model for Early Arithmetic. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123(3), 284-296.

Jordan, N. C. (2007). Do Words Count? Connections between reading and mathematics difficulties. In D. B. Berch & M. M. M. Mazocco (Eds.), *Why Is Math So Hard for Some Children* (pp. 107-120). Baltimore, MD: Brooks.

Kaufmann, L., Vogel, S. E., Starke, M., Kremser, C., Schocke, M., & Wood, G. (2009). Developmental dyscalculia: compensatory mechanisms in left intraparietal regions in response to nonsymbolic magnitudes. *Behavioral and brain functions*, 5(1), 35.

Kaufmann, L., Wood, G., Rubinsten, O., & Henik, A. (2011). Meta-analyses of developmental fMRI studies investigating typical and atypical trajectories of number processing and calculation. *Developmental Neuropsychology*, 36(6), 763-787.

Koponen, T., Mononen, R., Räsänen, P., & Ahonen, T. (2006). Basic numeracy in children with specific language impairment: heterogeneity and connections to language. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 49(1), 58-73.

Krajewski, K., & Schneider, W. (2009). Exploring the impact of phonological awareness, visual-spatial working memory, and preschool quantity-number competencies on mathematics achievement in elementary school: findings from a 3-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4), 516-531.

Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F., Gälli, M., Martin, E., von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 57(3), 782-795.

Landerl, K., & Moll, K. (2010). Comorbidity of learning disorders: prevalence and familial transmission. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 51(3), 287-294.

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.

Landerl, K., Fussenegger, B., Moll, K., and Willburger, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia: two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103, 309-324.

Leather, C. V., & Henry, L. A. (1994). Working memory span and phonological awareness tasks as predictors of early reading ability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 58(1), 88-111.

Lee, J. (2009). Universals and specifics of math self-concept, math self-efficacy, and math anxiety across 41 PISA 2003 participating countries. *Learning and Individual Differences*, 19(3), 355-365.

LeFevre, J.A., Fast, L., Skwarchuk, S.L., Smith-Chant, B.L., Bisanz, J., Kamawar, D., Penner-Wilger, M. (2010). Pathways to mathematics: longitudinal predictors of performance. *Child Development*, 81, 1753-1767.

Lewis, C., Hitch, G. J. and Walker, P. (1994). The prevalence of specific arithmetic difficulties and specific reading difficulties in 9- to 10-year-old boys and girls. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 35, 283-292.

Lewkowicz, N. K. (1980). Phonemic awareness training: What to teach and how to teach it. *Journal of Educational Psychology*, 72(5), 686-700.

Mckenzie, B., Bull, R., & Gray, C. (2003). The effects of phonological and visual-spatial interference on children's arithmetical performance. *Educational and Child Psychology*, 20(3), 93-108.

Meyer, M. L., Salimpoo, V. N., Wu, S. S., Geary, D. C., & Menon, V. (2010). Differential contribution of specific working memory components to mathematics achievement in 2nd and 3rd graders. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 101-109.

Mussolin, C., Mejias, S., & Noël, M.-P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, 115(1), 10-25.

Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2001). Dyslexia as a learning disability. In A. J. Fawcett (Ed.), *Dyslexia: Theory and good practice* (pp. 141–160). London: Whurr.

Noël, M.-P. (2009). Counting on working memory when learning to count and to add: a preschool study. *Developmental Psychology*, 45(6), 1630-43.

Pauly, H., Linkersdörfer, J., Lindberg, S., Woerner, W., Hasselhorn, M., & Lonnemann, J. (2011). Domain-specific Rapid Automatized Naming deficits in children at risk for learning disabilities. *Journal of Neurolinguistics*, 24(5), 602-610.

Pennington, B. F. (2006). From single to multiple deficit models of developmental disorders. *Cognition*, 101(2), 385-413.

Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Dehaene, S., and Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, 116, 33-41.

Price, G. R., & Ansari, D. (2011). Symbol processing in the left angular gyrus: evidence from passive perception of digits. *NeuroImage*, 57(3), 1205-1211.

Rasmussen, C., & Bisanz, J. (2005). Representation and working memory in early arithmetic. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91(2), 137-157.

Rhaghubar, K. P., Barnes, M. A. & Hecht, S. (2010). Working memory and mathematics: a review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences* 20, 110-122.

Rourke, B. P., & Conway, J. A. (1997). Disabilities of arithmetic and mathematical reasoning: perspectives from neurology and neuropsychology. *Journal of Learning Disabilities*, 30(1), 34-46.

Rubinsten, O., & Henik, A. (2006). Double dissociation of functions in developmental dyslexia and dyscalculia. *Journal of Educational Psychology*, 98(4), 854-867.

Rubinsten, O., and Henik, A. (2009). Developmental dyscalculia: heterogeneity might not mean different mechanisms. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 92-99.

Shalev, R. S., Manor, O., & Gross-Tsur, V. (1997). Neuropsychological aspects of developmental dyscalculia. *Mathematica Cognition*, 3, 105-120.

Shalev, R. S., Auerbach, J., Manor, O., & Gross-Tsur, V. (2000). Developmental dyscalculia: prevalence and prognosis. *European child adolescent psychiatry*, 9 Suppl 2(Dc), II58-64.

Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Blachman, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., Mencl, W. E., Constable, T., Holahan, J., Marchione, K., Fletcher, J., Lyon, G. R., Gore, J. C.. (2004). Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically- based Intervention. *Biological Psychiatry*, 55(9), 926-933.

Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2005). Dyslexia (Specific Reading Disability). *Biological Psychiatry*, 57, 1301-1309.

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.

Simmons, F. R., & Singleton, C. (2009). The mathematical strengths and weaknesses of children with dyslexia. *Journal of Research in Special Educational Needs*, 9(3), 154-163.

Simmons, F., Singleton, C. and Horne, J. (2008). Phonological awareness and visual-spatial sketchpad functioning predict early arithmetic attainment: Evidence from a longitudinal study. *European Journal of Cognitive Psychology* 20, 711-722.

Simos, P. G., Fletcher, J. M., Bergman, E., Breier, J. I., Foorman, B. R., Castillo, E. M., Davis, R. N., et al.. (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, 58(8), 1203-1213.

Snowling, M. J., & Hulme, C. (1994). The development of phonological skills. *Philosophical Transactions of the Royal Society Series B*, 346, 21–28.

Tallal, P., Miller, S. L., Jenkins, W. M., & Merzenich, M. M. (1997). The role of temporal processing in developmental language-based learning disorders: Research and clinical implications. (B. Blachman, Ed.) *Foundations of Reading Acquisition and Dyslexia Implications for Early Intervention*, (3), 49-66. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers.

Tressoldi, P. E., Rosati, M., and Lucangeli, D. (2007). Patterns of developmental dyscalculia with or without dyslexia. *Neurocase* 13, 217-225.

Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J., & Scanlon, D. M. (2004). Specific reading disability (dyslexia): what have we learned in the past four decades? *The Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 45(1), 2-40.

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.

Willburger, E., Fussenegger, B., Moll, K., Wood, G., & Landerl, K. (2008). Naming speed in dyslexia and dyscalculia. *Learning and Individual Differences*, 18(2), 224-236.

Wilson, A. J., & Dehaene, S. (2007). Number sense and developmental dyscalculia. In D. Coch, G. Dawson & K. Fischer (Eds.), *Human behavior, learning, and the developing brain: atypical development* (pp. 212–238). New York: Guilford.

Wimmer, H. (2006) Don't neglect reading fluency! *Developmental Science*, 9 (5), 447-448.

Wimmer, H., and Schurz, M. (2010). Dyslexia in regular orthographies: manifestation and causation. *Dyslexia*, 16, 283-299.

Wolf, M., & Bowers, P. G. (1999). The Double-Deficit Hypothesis for Developmental Dyslexias. *Journal of Educational Psychology*. 91, 1–24.

Wolf, M., Bowers, P. G., & Biddle, K. (2000). Naming-Speed Processes, Timing, and Reading: A Conceptual Review. *Journal of Learning Disabilities*, 33(4), 387-407.



Zamarian, L., Ischebeck, A., & Delazer, M. (2009). Neuroscience of learning arithmetic--evidence from brain imaging studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(6), 909-925.

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.

#### 4. Phonemic awareness as a pathway to number processing

Júlia Beatriz Lopes Silva, Ricardo José de Moura, Annelise Júlio-Costa, Guilherme Wood, Vitor Geraldi Haase

##### Abstract

Number transcoding is the ability to convert a numerical representation (i.e. verbal and Arabic) into other. No study so far has investigated the association between phonemic awareness and transcoding skills while controlling for other factors, such as working memory and number sense, which might also have an impact on number processing. We examined children from 2nd to 4th grades, dividing them into two groups: a) low phonemic awareness (n=31) and b) typical phonemic awareness (TPA) (n=58). Differences between groups were found regarding school achievement, arithmetical facts, arithmetic word problems and transcoding. The items of transcoding task were grouped according to the number of transcoding rules or whether they were lexically retrieved. TPA children were significantly better on lexical and 3-4-5 rules items, but not on 6-7 rules items. Furthermore, hierarchical multiple regression analyses revealed that phonemic awareness, intelligence and age, but not working memory and number sense, may be the cognitive mechanisms that underlie number transcoding. Thus, our study presents supporting evidence for the association between phonemic awareness and numerical cognition, especially number transcoding.

*Keyword: phonemic awareness, transcoding, arithmetic, working memory*

## INTRODUCTION

The mastery of reading and writing numbers, in their verbal and Arabic form is an essential skill (Lochy & Censabella, 2005). Daily activities require the communication of numerical information, such as registering a telephone number or performing calculations. Besides that, being able to manipulate numbers is one of the first steps on children's mathematical learning and it starts to be formally trained in Kindergarten. The ability to establish a relationship between the verbal and Arabic representations of numbers, when a conversion of numerical symbols from one notation to the other is necessary, is called number transcoding (Deloche & Seron, 1987). In spite of its importance, only few studies have investigated the cognitive mechanisms that underpin numerical processing in children. To address this gap, we will investigate the underlying aspects of mathematics and, more specifically, of number transcoding.

### 1. Number transcoding and the symbolic codes:

One influent neurocognitive model of numerical cognition is the "Triple Code Model" proposed by Dehaene (1992) and Dehaene & Cohen (1995). It postulates three representational codes: analogical, Arabic and verbal. The analogical representation would be related to the concept of "number sense": a pre-verbal system that imprecisely represents magnitudes and is innate. It allows for the comparison between different magnitudes and the grasping of the amount of objects in a certain set (Dehaene, 2009). Analogical number processing can be described by Weber's law ( $w$ ) (Izard & Dehaene, 2008), according to which the variation that can be discriminated in the stimulus intensity is a constant fraction of the stimulus initial value. The Arabic and verbal codes, on the other hand, are culturally learned. The Arabic code (*45*) is the symbolic representation of magnitudes and it allows for exact arithmetic operation with multidigit numbers. It is related to the fusiform gyrus, on both hemispheres (Dehaene & Cohen, 1995). The verbal code (*forty-five*), supported by language skills, enables the comprehension of orally presented arithmetic problems and is related to the activation of the left angular gyrus (Zamarian, Ischebeck & Delazer, 2009).

The Verbal number system is linguistically structured and, despite the fact it may differ among languages, there are some common basic principles and regularities (Fayol & Seron, 2005). It is composed by a lexicon of single words that designates a few quantities (like *five*, *eleven*, *seventy* and *hundred*), and by a syntax that organizes these lexical units in order to represent

any possible quantity. The two basic syntactic principles are the relations of addition and multiplication. In this sense, numbers are represented as sum relationships (e. g.: *eighty one* means *eighty plus one*) and product relationships (e. g.: *three hundred* means *three times hundred*).

The Arabic code is more complex and it is acquired later on development (Geary, 2000). Its lexicon is composed only by a small set of different symbols (digits from 0 to 9), and the basic syntactic principle that combines them to form all numbers is the positional value (or place-value). According to this principle, the digit's value depends on its position on the numerical string and is given by a power of base ten. So, the first digit (from right to the left) is multiplied by  $10^0$ , the second to  $10^1$  and so on. The number 124, for example, represents a quantity equals to  $1 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 4 \times 10^0$ , (or  $100 + 20 + 4$ ). The digit 0 has a special syntactic role once it denotes the absence of a given power of ten, as occurs in number with internal zeros, for example the number 406 ( $4 \times 10^2 + 0 + 6 \times 10^0$ ).

Transcoding requires the engagement of domain-general cognitive skills, such as working memory and some cognitive models claim that access to the numerical magnitude is unnecessary in transcoding large numbers (Deloche & Seron, 1987; Barrouillet et al., 2004). The verbal and Arabic systems are symbolic in the sense that we use a specific lexicon to represent them. In the specific case of numbers, a small amount of lexical primitives are arranged according to syntactic rules of addition and multiplication and to the position of a digit in the number (i.e. place value) (Lochy & Censabella, 2005; Camos, 2008).

Transcoding between verbal and Arabic notations imposes some difficulties in the sense that each of these numerical codes has specificities regarding their lexicon and syntax (Deloche & Seron, 1987). These difficulties are more salient in children on early schooling, who are not completely familiar with the Arabic notation yet, particularly with its place-value syntax (Geary, 2000; Camos, 2008). As transcoding abilities require the use of verbal/phonological codes, they may be especially prone to dysfunction in children with developmental dyslexia or comorbid developmental dyslexia plus dyscalculia.

#### 1.1. Neuropsychological and cognitive models of number transcoding:

The cognitive models of number transcoding differ mainly regarding the role they attribute to semantic access while converting between different notations. "Semantic" models predict that

the magnitude representation may bypass transcoding operations while “asemantic” models predict that transcoding is independent of the magnitude representation.

The first important cognitive model of number transcoding was proposed by McCloskey, Caramazza & Basili (1985). According to this model, all numerical inputs are translated through the access to an amodal and abstract representation of quantity. This representation of quantity does not vary regardless of the type of numerical notation (whether the output is verbal or Arabic). Reading the number “5329”, for instance, involves the translation into a thousand/hundreds/tens/units system, similar to  $[5]10^3$ ,  $[3]10^2$ ,  $[2]10^1$ ,  $[9] 10^0$ . After this process, the adequate lexical units are allocated in their respective places to formulate the adequate output. This is, thus, a semantic model due to the fact it postulated the mediation of a quantitative representation in order to produce the Arabic numerals.

Power & DalMartello (1990) propose a slightly different lexical-semantic model according to which the access to the numerical magnitude would occur through a verbal code, instead of by means of the base-10 system proposed by McCloskey, Caramazza & Basili (1985). These semantic models have not been sufficient to explain the performance of brain-damaged patients that have intact number comprehension (measured, for example, by number comparison tasks) but yet present transcoding problems (Sokol, Macaruso e Gollan, 1994, Cipolotti & Butterworth, 1995).

Asemantic models admit that the conversion between the source code and the Arabic one is an algorithm-based procedure. The first asemanitic model was proposed by Deloche & Seron (1987) based on evidences from neuropsychological case studies. It relies on four functional processing components (parsing, categorization of primitives, transcoding and production) to transcode numbers to their Arabic forms. The aim of these processes is to fill slot frames with the correct digits based on lexical information and more general transcoding rules, such as place value knowledge. This model, though, cannot account for learning and developmental processes since it does not place importance on the acquisition of a declarative knowledge which would expand the lexical primitives and create associations in long-term memory.

The ADAPT model (Barrouilet et al., 2004), on the other hand, is A Developmental, Asemantic and Procedural model for Transcoding from verbal to Arabic numerals. It accounts for the evolution of transcoding processes through practice: the experience would lead to an expansion of the numerical lexicon and improvement of conversion rules. The inputs, regardless of their

numerical complexity, are codified into a phonological sequence and, then, the parsing mechanisms subdivide this sequence into smaller units to be processed by the production system (Figure 1). This production system is related to rules devoted to retrieval of information from long-term memory (LTM) (called P1 rules, responsible for retrieving “3” from its verbal form), to manage the size of digital chains (P2 and P3 rules; in “2003”, these rules create a frame of three slots) and to fill these slots (if there are any empty slots, P4 rules will fill them with 0s). Separators, such as thousands and hundreds, are used to identify the number of slots and once every segment is placed in its digital form in the chain, it is transcribed. Working memory (WM) plays an important role in number transcoding according to ADAPT model (Camos, 2008; Zuber et al., 2009). It is involved in the temporal storage of verbal information, lexical retrieval, and execution of the manipulations needed to generate the Arabic output. WM representations also consist of a sequence of digits and possibly blank spaces to be filled with subsequent procedures. The impact of WM, though, might be overestimated due to influences of phonological processing that have not been controlled for in these studies.

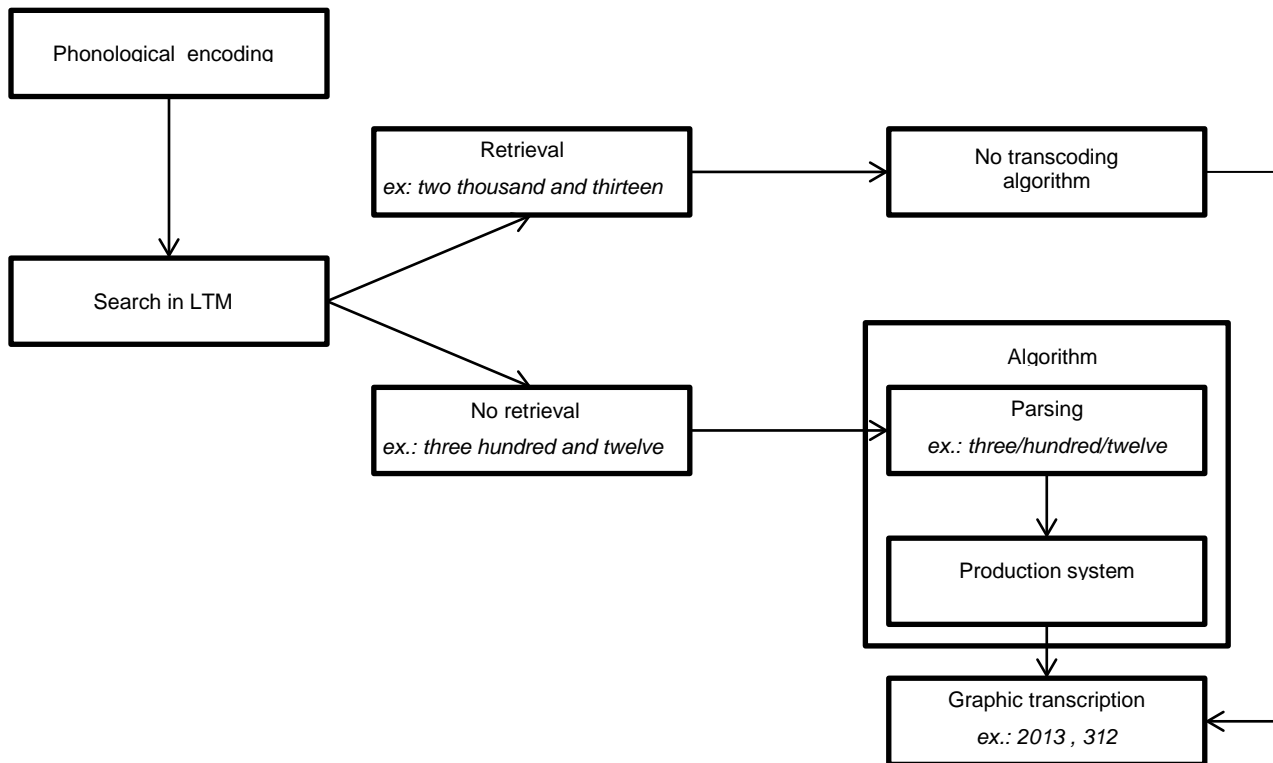


Figure 1. Schematic representation of the ADAPT model (Barrouillet et al., 2004)

Connectionist networks are a viable alternative to algorithm-based models. Verguts & Fias (2006) developed a connectionist model of Arabic number reading which was successful with multi-digit numbers. The network was able to generalize learning from previously trained to non-trained stimuli, to simulate workings of a lexical and syntactic route, as well as their dissociation after network lesions without the need of explicit rules.

It is not possible yet to definitively decide for a more parsimonious or correct transcoding model (Lochy et al., 2002). There is the need for more studies that aim to investigate the role of semantic representations, as well as the other possible cognitive mechanisms involved in transcoding procedures. In this study, our focus will be on the ADAPT model. It can be considered a classical model of information processing. As such, it can be more easily operationalized in terms of cognitive-neuropsychological constructs, hence there is a growing body of neuropsychological literature based on the ADAPT model (Camos, 2008; Pixner et al., 2011, Zuber et al., 2009)

## 2. Cognitive mechanisms underlying arithmetics

Much is known about the basic prereading competences that influence learning to read and write in school, for instance, the importance of phonemic awareness; but less is known about the competencies that influence math learning (Fuchs et al., 2010). To be able to perform calculations and transcoding procedures, one need to engage some cognitive mechanisms, such as memory, magnitude representation and language, which are instantiated in different areas of the brain (Zamarian, Ischebeck & Delazer, 2009). Longitudinal and transversal studies have identified the following cognitive variables as major influences on arithmetics outcome:

### a. Approximate number system (ANS) acuity

The approximate number system is responsible to direct attention towards the spontaneous extraction of an approximate number of objects in sets and it is present in several species (Piazza, 2010). Its functioning can be described according to the Weber Law, in other words, it represents numbers in an approximate and compressed manner, in a way that two sets can only be discriminated if they differ by a certain numerical ratio.

Some authors argue that ANS development is a precondition for the acquisition of meaning comprehension from symbolic numbers because it interacts with symbolic numerical

representation in a way that allows for performance of exact arithmetic (Piazza, 2010). (Gallistel & Gelman, 1992; Dehaene & Changeux, 1993; Piazza, 2010). The accuracy of ANS is associated with mathematics achievement in kindergarten (Libertus, Feigenson & Halberda, 2011) as well as in elementary school (Halberda, Mazocco & Feigenson, 2008; Inglis, Attridge, Bachelor & Gilmore, 2011).

Impairments in the ANS are described as the core deficit in children with mathematical learning disabilities. It can be thought as the domain-specific mechanism that underlies arithmetic learning. Impairments in the ANS would lead to difficulties in learning the symbolic system and, consequently, problems with arithmetics (Dehaene, 2009; Piazza, 2010; Piazza et al., 2010). Piazza et al. (2010) found that children with mathematical learning disabilities presented poorer ANS acuity (which was operationalized by means of the Weber Fraction).

Even though the ANS is important for symbolic aspects of mathematics, it does not seem to play a crucial role on number transcoding. Cognitive models (Barrouillet et al., 2004; Camos, 2008) claim that changing from one numerical notation to the other is an asemantic process, in other words, does not require access to the numerical magnitude, especially in the case of more familiar and large numbers.

#### b. Working memory

Working memory (WM) is involved in different abilities, among them the mathematical cognition (Geary, 1993; Rotzer et al., 2009; Fuchs et al. 2010). Working memory (WM) refers to the cognitive capacity responsible for the temporary storage and processing of information (Baddeley, 2000). The multi-component model postulates that working memory consists of interacting sub-systems: phonological loop, visual–spatial sketchpad, episodic buffer and central executive (Baddeley, 2000, 2001). The phonological loop is responsible for the temporary retention of auditory–verbal material, and the visual–spatial sketchpad is responsible for the temporary retention of visual–spatial material (Simmons, Willis & Adams, 2012). The first may be evaluated using Digits, a WISC subtest, and the second may be measure by Corsi blocks, for instance. The episodic buffer is responsible for holding episodes while information is integrated across space and potentially extended across time (Baddeley, 2000). Finally, the central executive coordinates activities from the other systems but also draws resources from long-term memory (LTM) when the capacity of these other system is overloaded (Baddeley & Logie, 1999).



Geary (1993, 2006) proposed that the storage capacity related to phonological loop, as well as inhibitory mechanisms, are associated with the acquisition and consolidation of arithmetic facts. In a longitudinal study, it was verified that phonological loop is related, more specifically, to basic operations when children use retrieval as the strategy for resolution, instead of counting, for example (Geary, Hoard & Nugent, 2012). Moreover, it was noted that in number transcoding tasks (changing the type of numerical representation, for example: 2→two) children with higher span in phonological working memory presented superior performance compared to those with lower span and that this task was also correlated with the complexity of the items to be transcoded (Camos, 2008). Another study of 7 year-old German children suggested that visuospatial working memory predicts the performance in transcoding tasks (Zuber, Pixner, Nuerk & Moeller, 2009). Fayol, Barrouilet & Renaud (1996) demonstrated that the number of syllables of the number dictated could account for 33% of the variance on a number writing task and they argue that this result could be associated to the limited capacity of working memory. The role of WM in transcoding tasks can be thus systematized in the following steps: encoding the number to be transcoded; monitoring the application of transcoding rules and the production of the numeral (Lochy & Censabella, 2005).

Finally, in a regression analysis, Passolunghi and Cornoldi (2008) demonstrated that one of the best predictors of mathematical performance was the span of Corsi Blocks, both in the group of typically developing children as well as in the group of children with mathematics difficulties. In a recent study, we found that in children with and without math difficulties, even without group differences in working memory, there is an overloading in WM while they are solving arithmetic word problems that can be compensated by the use of fingers (Costa et al., 2011).

It is also important to notice that many of these studies described above did not control other phonological processing skills that might also demand working memory.

### c. Phonological processing

Phonological processing is traditionally associated to reading and writing acquisition. According to Wagner & Torgesen (1987), at least three phonological skills are involved in word reading: a) phonological awareness, which means the ability to perceive and manipulate phonemes that constitute words; b) phonological working memory, involved in temporary retaining of sound-based representations; and c) lexical access, which is related to the retrieval of a written word from its lexical referent through the recoding into a sound-based representational system. These

skills play a pivotal role in the development of reading and increasing interest has also been directed to the possibility that it may be a factor constraining the development of both reading and mathematics.

An important evidence that supports this association between reading and mathematics is the difficulties in mathematics presented by children with dyslexia, who have deficits in their phonological processing skills (Griffiths & Snowling, 2001; Vellutino, Fletcher, Snowling, & Scanlon, 2004). Approximately 40% of dyslexic children also have difficulties in arithmetics (Lewis, Hitch & Walker, 1994) and the prevalence of reading and mathematical difficulties is similar, around 4 to 7% (Landerl et al., 2009). It is assumed that the phonological representations of dyslexic children are weak, which leads to an impairment in cognitive processes that utilize phonological codes. The finding that dyslexic children are impaired on tasks that require the manipulation, retrieval and retention of phonological codes is consistent with a core deficit in representing phonological information (Snowling, 2000; Vellutino et al., 2004). There are alternative theories that aim to explain the difficulties presented by dyslexic children, such as the temporal processing hypothesis (Tallal, Miller, Jenkins, & Merzenich, 1997) and the cerebellum impairment hypothesis (Fawcett & Nicolson, 2001; Nicolson & Fawcett, 2001), but, in general, the phonological deficits are still the most hegemonic and accepted point of view.

“Mathematical cognition” is a more general term that encompasses verbal (e.g. counting, arithmetic fact retrieval) and nonverbal domains (e.g. subitizing, nonsymbolic magnitude comparison) (Simmons & Singleton, 2008; De Smedt et al., 2010). Recent studies have focused on the influence of phonological processing in mathematical achievement (Landerl, Bevan, & Butterworth, 2004; Simmons & Singleton, 2008; Landerl, Fussenegger, Moll, & Willburger, 2009) and it is hypothesized that phonological processing may be more strongly connected to the aspects of mathematics that involve verbal codes as well as Arabic number representations.

Simmons, Singleton & Horne (2008) reported that phonological awareness (by means of a rhyming task) measured at 5 years old predicted arithmetic and reading attainment one year after. Similarly, Leather and Henry (1994) also reported that 31% of the variance in 7-year-old children’s arithmetic performance could be explained by a composite score of phonological awareness tasks.

Hecht, Torgesen, Wagner e Rashotte (2001) investigated the influence of these subcomponents in a longitudinal study with children from 7 to 11 years old. They concluded that phonological processing skills measured on 2<sup>nd</sup> grade strongly predicted mathematical outcomes in 5<sup>th</sup> grade even when controlling for the autoregressor effect of prior math ability. Moreover, phonemic awareness was the only subcomponent that influenced mathematical outcome growth on 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> grade. According to the authors, the influence of phonological memory and rate of access may be limited to the second- to the third- grade time interval.

Some authors claim that the influence of phonological processing in arithmetic could be due to shared demands with working memory, since these effects can be eliminated when partialling out the influence of working memory (Swanson & Sachse-Lee, 2001; Swanson, 2004). It is important to notice that the relationship between working memory and phonological processing could vary according to the instruments used.

According to Castles & Coltheart (2004) and Stanovich, Cunningham, & Cramer (1984) phonemic awareness is a subcomponent of phonological processing that reliably predicts performance in reading and writing. Many studies in numerical processing, such as the one described above (Hecht et al., 2001) and others (Simmons & Singleton, 2008; Simmons, Singleton & Horne, 2008; De Smedt, Taylor, Archibald, & Ansari, 2010) also demonstrate that phonemic awareness is an important predictor of numerical processing and thus, we decide to focus on this component in the present study.

Regarding number transcoding, specifically Arabic number writing, the input is verbal, hence one must be able to differentiate between sounds of language to correctly comprehend the verbal number that will be transcoded into the Arabic form. Despite this possible impact of phonological skills in the transcoding performance, no study has simultaneously and systematically investigated the relationship between these two variables. Transcoding requires the engagement of domain-general cognitive skills, such as working memory and cognitive models claim that access to the numerical magnitude is unnecessary in transcoding large numbers (Barrouillet et al., 2004; Camos, 2008).

#### AIM OF THE STUDY:

While there is growing evidence for a relationship between phonemic awareness and numerical cognition, an important limitation of the existing studies is that they do not simultaneously control for the influence of working memory and number sense. Besides that, phonological

processing has been consistently related to arithmetical facts (Simmons, Singleton & Horne, 2008; Simmons & Singleton, 2008; Desmids, et al., 2010) and no study on number transcoding investigated the specific impact of phonemic awareness in numerical processing.

Phoneme elision requires a certain amount of working memory in the sense that the participant must hold a word in mind while determining the phonological information to be deleted (De Smedt et al., 2010). Hence, it is important to partial out the influence of phonological working memory to examine the possibility that the association of phonemic awareness and mathematics is due to shared demands with working memory. Additionally, there is also evidence that semantic manipulation of numerical magnitude is related to arithmetic proficiency (Halberda et al., 2008; Piazza et al., 2004, 2010; Costa et al. 2011), thus we aimed to control for its influence through a measure of the approximate number system acuity. To investigate these questions, the specific influence of phonemic awareness on arithmetical tasks and number processing will be determined by removing the effects of working memory and approximate number system.

Moreover, the impact of WM might have been overestimated in former studies because of influences of phonological processing that have not been controlled for. To investigate that point, transcoding items with different levels of complexity will be examined in an experimental number writing task. Phonemic awareness should be recruited independently of the level of complexity of transcoding items once it is, according to the ADAPT model, a primary step on transcoding procedures, before the use of algorithm rules and retrieval from LTM. Besides that, phonological processing deficits should lead to poor phonological representations and thus impact negatively the transcoding of lexical as well as syntactic items. For the age range of the children examined in this study, difficulties in the lexical items may have already been overcome.

In view of the above, we predicted that phonemic awareness would have an impact on number transcoding that can be distinguished from the impact of working memory and number sense on this ability. Interestingly, phonemic awareness is in part determined by the capacity to manipulate information in the central executive. Therefore, it is possible that some of the effect of phonemic awareness on transcoding performance is mediated by working memory capacity. These indirect effects should become evident when transcoding more complex items. In this case, the effect of phonemic awareness might be magnified by larger demands on working memory capacity.

## METHODS

### *Participants*

The study was approved by the ethics committee of the Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil (COEP–UFMG). Children participated only after informed consent was obtained in written form from parents, and orally from themselves. We invited 487 children from 5 randomly selected public schools in Belo Horizonte, Brazil. Two hundred and seven (42%) children, from 2nd to 4th grades, accepted taking part of this study. To reduce the time required for data collection children were evaluated in two distinct phases: a) group assessment of school achievement, intelligence and transcoding skills; and b) individual neuropsychological assessment, including phonological processing, working memory measures and numerical cognition tasks.

### *Measures*

#### 1. Group assessment

##### a. Arabic number writing task:

Children were instructed to write the Arabic form of dictated numbers. This task is constituted by 40 items, up to 4 digits (3 one-digit numbers, 9 two-digit numbers, 10 three-digit numbers and 18 four-digit numbers). The one- and two- digit numbers were classified as “lexical items” (12 items) and the other 28 items were subdivided according to the number of transcoding rules based on the ADAPT model (Barrouillet et al., 2004, Camos, 2008). There were six numbers which require 3 rules, nine numbers of 4 rules, six numbers of 5 rules, five numbers of 6 rules and two numbers of 7 rules. Numbers of 6 and 7 rules were further grouped together. The internal consistency of this task is 0.96 (KR-20 formula).

##### b. Brazilian School Achievement Test (TDE):

The TDE (Stein, 1994) is the most widely used standardized test of school achievement in Brazil, with different norms available from the first to the sixth grades (Stein, 1994; Oliveira-Ferreira et al., 2012). It comprises three subtests: arithmetics, single-word spelling, and single-

word reading. In the screening phase, we used the arithmetics and spelling subtests, which can be applied in groups. The arithmetics subtest is composed of three simple verbally presented word problems (e.g., which number is larger, 28 or 42?) and 35 written arithmetic calculations of increasing complexity (e.g., easy:  $4-1=?$ ; intermediate:  $1230+150+1620=?$ ; hard:  $823\times 96=?$ ;  $3/4+2/8=?$ ). Specific norms for each school grade were used to characterize children's individual performance. The spelling subtest consists of dictation of 34 words of increasing syllabic complexity (e.g., *toca*; *balanço*; *crystalização*). The single-word reading subtest of the TDE consists of 75 stimuli, which must be loud read by the proband. The reading subtest was used in the individual assessment. Reliability coefficients (Cronbach  $\alpha$ ) of TDE subtests are 0.87 or higher. Children are instructed to work on the problems to the best of their capacity, without time limits.

### c. Raven's colored progressive matrices

General intelligence was assessed with the age-appropriate Brazilian validated version of Raven's Colored Matrices (Angelini et al., 1999). The analyses were based on z-scores calculated from the manual's norms.

## 2. Individual Neuropsychological Assessment

### a. Memory:

*Digit Span*: Verbal short-term memory was assessed with the Brazilian WISCIII Digits subtest (Figueiredo, 2002). Performance in the forward order was considered a measure of phonological short-term memory (Figueiredo & Nascimento, 2007) and the backward order was used to assess verbal working memory (Figueiredo & Nascimento, 2007) We evaluated the span (longest sequence correctly repeated before two successive failures) as well as the total score (correct trials x span) in the forward and the backward orders.

*Corsi Blocks*: This test is a measure of the visuospatial component of working memory. It is constituted by a set of nine blocks which are tapped, in a certain sequence, by the examiner. The test starts with sequences of two blocks and can reach a maximum of nine blocks. We used the forward and backward Corsi span tasks according to Kessels et al. (2000). In the forward condition, the child is instructed to tap the blocks on the same order as the examiner, in the backward condition, in the inverse order. We also evaluated span and total scores.

b. Phonemic Awareness:

*Phoneme Elision:* This is a widely accepted measure of phonemic awareness (Wagner & Torgesen, 1987, Castles & Coltheart, 2004). The child hears a word and must say what the word would be if a specified phoneme in the word were to be deleted. (e.g. “*filha*” without /f/ is “ilha” [in English it would be similar to “cup” without /k/ is “up”). The test comprises 28 items: in 8 of them the child must delete a vowel and in the other 20, a consonant. The consonants to be suppressed varied according to place and manner of articulation. The phoneme to be suppressed could be in different positions of the words, which ranged from 2 to 3 syllables. The internal consistency of the task is 0.92 (KR-20 formula).

c. Mathematical Cognition:

*Arabic number reading task:* Twenty eight Arabic numbers printed in a booklet were presented one at a time, to the children, who were instructed to read them aloud. The item set consists of numbers up to 4 digits (3 one-digit numbers, 9 two-digit numbers, 8 three-digit numbers and 8 four-digit numbers). There were 12 numbers that could be lexically retrieved, 5 numbers which required three transcoding rules in order to be correctly read, 6 numbers with four rules and 5 numbers with more than five rules. The internal consistency of the task is 0.90 (KR-20 formula).

*Basic arithmetic operations:* This task consisted of addition (27 items), subtraction (27 items), and multiplication (28 items) operations for individual application, which were printed on separated sheets of paper. Children were instructed to answer as fast and as accurate as they could, time limit per block being 1 min. Arithmetic operations were organized in two levels of complexity and were presented to children in separated blocks: one consisted of simple arithmetic table facts and the other of more complex ones. Simple additions were defined as those operations with the results below 10 (e.g., 3+5), while complex additions with the results between 11 and 17 (e.g., 9+5). Tie problems (e.g., 4+4) were not used for addition. Simple subtraction comprised problems in which the operands were below 10 (e.g., 9-6), while for complex subtractions the first operand ranged from 11 to 17 (e.g., 16-9). No negative results were included in the subtraction problems. Simple multiplication consisted of operations with results below 25 and with the number 5 as one of the operands (e.g., 2×7, 5×6), while for the complex multiplication, the result of operands ranged from 24 to 72 (6×8). Tie problems were not used. Reliability coefficients were high (Cronbach's  $\alpha > 0.90$ ) (Costa et al., 2011).

*Arithmetic Word Problems:* Twelve arithmetical word problems were presented to the child on a sheet of paper while the examiner read them aloud simultaneously to avoid reading proficiency bias. There were six addition and six subtraction items, all of them with single-digit operands and results ranging from 2 to 9 (e.g., “*Júlia has 9 cents. She gives 3 to Fernanda. How many cents does Júlia have now?*”). The child had to solve the problems mentally and write the answer down in Arabic format as quickly as possible, and the examiner registered the time taken for each item. Cronbach’s  $\alpha$  of this task was 0.83 (Costa et al., 2011).

*Non-symbolic magnitude comparison task:* In the non-symbolic magnitude comparison task, the participants were instructed to compare two simultaneously presented sets of dots, indicating which one contained the larger number. Black dots were presented on a white circle over a black background. On each trial, one of the two white circles contained 32 dots (reference numerosity) and the other one contained 20, 23, 26, 29, 35, 38, 41, or 44 dots. Each magnitude of dot sets was presented eight times. The task comprised 8 learning trials and 64 experimental trials. Perceptual variables were varied such that in half of the trials individual dot size was held constant, while in the other half the size of the area occupied by the dots was held constant (see exact procedure descriptions in Dehaene et al., 2005). Maximum stimulus presentation time was 4,000 ms, and inter-trial interval was 700 ms. Before each trial, a fixation point appeared on the screen – a cross, printed in white, with 30mm in each line. If the child judged that the right circle presented more dots, a predefined key localized in the right side of the keyboard should be pressed with the right hand. On the contrary, if the child judged that the left circle contained more dots, then a predefined key on the left side had to be pressed with the left hand (Costa et al., 2011). As a measure of the Approximate Number System (ANS) acuity, the *internal Weber fraction* (thereafter  $w$ ) was calculated for each child based on the *Log-Gaussian model* of number representation (Dehaene, 2007), with the methods described by Piazza et al. (2004).

### *Procedure*

Testing was conducted in the children’s own schools. The different tasks were presented in four different pseudo-random orders during one session that lasted approximately one hour.

We excluded 84 children from the sample, whose z-scores on the Raven were above 1 ( $n=80$ ) or below -1 ( $n=4$ ). We also excluded 5 children who scored below the 25th percentile only in the Spelling subtest of the TDE because the aim of this study was not to evaluate children with pure reading/writing disorders. Three children did not complete the whole battery and were also



excluded from the analysis. Twenty six children were excluded from further analyses because either they had a poor  $R^2$  on the fitting procedure to calculate their *internal Weber fraction* on the nonsymbolic comparison task ( $R^2 < 0.2$ ), and/or they showed an *internal Weber fraction* that exceeded the limit of discriminability of the nonsymbolic magnitude comparison task ( $w > 0.6$ ), and/or were outliers and extreme cases on this measure, which might suggest they were not able to do the task or were not paying adequate attention to it. The final sample consisted of 89 children. There were 31 children from 2st grade, 36 children from the 3rd and 22 children from the 4th.

The children were further classified in two groups based on their phonemic awareness: a) low phonemic awareness (LPA): below the 25th percentile on the phoneme elision task (n=31) and b) typical phonemic awareness (TPA): above the 26th percentile (n=58). The 25th percentile was calculated for each grade separately. The two groups were matched by age and intelligence.

Table 1. Descriptive data of the sample

	<b>LPA (n=38)</b>		<b>TPA (n=51)</b>		<b>X<sup>2</sup></b>	<b>df</b>	<b>p</b>
Sex (%female)	61.29%		55.17%		0.309	1	0.578
	<b>Mean</b>	<b>sd</b>	<b>Mean</b>	<b>sd</b>	<b>F</b>	<b>df</b>	<b>p</b>
Raven (z score)	0.24	0.52	0.29	0.49	2.201	1;87	0.142
Age (months)	111.84	8.22	115.45	12.12	0.19	1;87	0.664
Phoneme elision	10.36	4.74	22.5	3.46	190.965	1;87	<0.001

Note: TPA: typical phonemic awareness; LPA, low phonemic awareness

### Analyses

First, the differences between LPA and TPA were examined using separate ANOVA models for each task. Afterwards, we ran a series of ANCOVAs to control for the effects of phonological working memory (Digits Backward total score) and number sense ( $w$ ) on the arithmetical tasks, since these variables are also related to arithmetical achievement.

To investigate the specific impact of phonemic awareness on number transcoding, we performed ANOVAs to determine whether LPA and TPA differ according to the syntactic complexity of the numbers, measured accordingly to ADAPT rules. We also did a 2 x 2 repeated measure ANOVA with number complexity (lexical retrieval or algorithmically produced) as a within-factor and group as between-factor to investigate the main effects of numerical complexity and its interaction with phonemic awareness. Hierarchical multiple regression

analyses were also performed to investigate the cognitive mechanisms that underlie number transcoding.

## RESULTS

We investigated differences in cognitive and numerical abilities between children with typical phonemic awareness and children with low phonemic awareness in the following neuropsychological variables: arithmetic achievement, Digit Span, Corsi Blocks, number reading, number writing, arithmetic word problems, basic arithmetic operations, as well as nonsymbolic magnitude comparison task. Table 2 describes the sample sizes, means and SD of the two groups, separately, for each measure. As can be seen in Table 2, the complex multiplication task was very difficult: the accuracy rate for both groups was low even though they spent the maximum amount of time possible. The reason why this happened is possibly because children on the 2nd grade are still learning the more complex multiplication facts. Hence, this task will be excluded from further analysis.

Table 2. Descriptive data of the neuropsychological measures for each group

Tasks	LPA (n=31)		TPA (n=58)	
	Mean	SD	Mean	SD
TDE_arithmetics	11.71	4.27	15.31	4.52
TDE_spelling	17.58	6.68	23.38	5.46
TDE_reading	55.97	7.57	63.24	5.07
Digits WISC (forward span)	4.45	0.72	4.66	0.76
Digits WISC (backward span)	2.97	0.58	3.14	0.71
Digits WISC (forward total)	28.90	13.14	31.24	10.84
Digits WISC (backward total)	9.65	3.59	12.16	5.45
Corsi Blocks (forward span)	4.81	1.01	4.91	0.78
Corsi Blocks (backward span)	4.10	1.22	4.48	1.17
Corsi Blocks (forward total)	32.81	15.33	34.26	10.94
Corsi Blocks (backward total)	22.42	12.40	27.00	14.25
Number reading	23.19	4.98	26.24	2.58
Number writing	29.01	10.46	34.50	6.92
Simple addition (total)	9.58	2.93	10.69	2.89
Simple addition (time)*	52418.71	9882.55	46020.00	12617.62
Complex addition (total)	6.90	3.91	8.90	3.67
Complex addition (time)*	59958.71	229.90	58798.28	3556.55
Addition total	16.48	6.33	19.59	5.645
Simple subtraction (total)	7.61	3.77	8.93	2.99
Simple subtraction (time)*	56414.52	7640.28	53220.69	10867.63
Complex subtraction (total)	2.74	3.09	4.55	3.38
Complex subtraction (time)*	60000.00	0.00	59000.77	1000.77
Subtraction total	10.35	6.07	13.48	5.38
Simple multiplication (total)	3.32	3.94	7.05	5.08
Simple multiplication (time)*	60000.00	0.00	57395.44	6428.89
Complex multiplication (total)	0.61	0.96	1.41	1.71
Complex multiplication (time)*	60000.00	0.00	60000.00	0.00
Multiplication total	3.94	4.65	8.47	6.48
Arithmetic word problems	6.71	3.13	9.14	2.6
W	0.28	0.08	0.28	0.07

Notes: TPA: typical phonemic awareness; LPA, low phonemic awareness, w, weber fraction. \* time in milliseconds

### *Group comparisons*

Significant statistical differences between TPA and LPA groups were found in all of the three spelling reading and arithmetics subtests of the TDE, the largest difference being in reading (Table 3). The only significant difference in the memory tasks was found on phonological working memory, more precisely, on the total score (correct trials x span) on the Digits WISC.

Regarding arithmetic operations, there were significant differences on the time of single addition, the total score of complex addition, the total score of complex subtraction and simple multiplication. The LPA group was also below TPA on the arithmetic word problems and number transcoding and the two groups did not differ on the Weber Fraction (Table 3).

After controlling for the impact of phonological working memory (by means of the Digit backward total score - DBT) and Weber Fraction, all of these differences remained significant, even though effect sizes were reduced. The only exceptions were the total score of simple addition and complex subtraction, which were no longer statistically different after adding the two covariates to the model (Table 3).

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) and covariance (ANCOVA) of the neuropsychological tasks

Tasks	ANOVA				ANCOVA (co-variates: DBT + w)			
	F	df	p	$\eta^2$	F	df	p	$\eta^2$
TDE_arithmetic	13.32	1;87	<0.001	0.133	8.90	1;85	0.004	0.095
TDE_spelling	19.43	1;87	<0.001	0.183	14.18	1;85	<0.001	0.143
TDE_reading	29.25	1;87	<0.001	0.252	23.10	1;85	<0.001	0.214
Digits WISC (forward span)	1.49	1;87	0.230	0.017	-	-	-	-
Digits WISC (backward span)	1.42	1;87	0.240	0.016	-	-	-	-
Digits WISC (forward total)	0.81	1;87	0.370	0.009	-	-	-	-
Digits WISC (backward total)	5.32	1;87	0.020	0.058	-	-	-	-
Corsi Blocks (forward span)	0.31	1;87	0.580	0.004	0.10	1;85	0.750	0.001
Corsi Blocks (backward span)	2.13	1;87	0.150	0.024	0.66	1;85	0.420	0.008
Corsi Blocks (forward total)	0.27	1;87	0.610	0.003	0.14	1;85	0.720	0.002
Corsi Blocks (backward total)	2.28	1;87	0.140	0.026	0.84	1;85	0.360	0.010
Number reading	14.53	1;87	<0.001	0.142	10.71	1;85	0.002	0.112
Number writing	8.75	1;87	0.004	0.091	5.73	1;85	0.020	0.063
Simple addition (total)	2.95	1;87	0.090	0.033	1.51	1;85	0.220	0.017
Simple addition (time)*	5.99	1;87	0.020	0.064	4.15	1;85	0.050	0.047
Complex addition (total)	5.70	1;87	0.020	0.061	3.51	1;85	0.070	0.040
Complex addition (time)*	3.28	1;87	0.070	0.036	1.51	1;85	0.220	0.017
Addition total	5.60	1;87	0.020	0.060	3.23	1;85	0.080	0.037
Simple subtraction (total)	3.27	1;87	0.070	0.036	1.39	1;85	0.240	0.016
Simple subtraction (time)*	2.11	1;87	0.150	0.024	0.75	1;85	0.390	0.009
Complex subtraction (total)	6.15	1;87	0.020	0.066	2.99	1;85	0.090	0.034
Complex subtraction (time)*	0.53	1;87	0.470	0.006	0.71	1;85	0.400	0.008
Subtraction total	6.24	1;87	0.010	0.067	3.04	1;85	0.090	0.035
Simple multiplication (total)	12.63	1;87	0.001	0.127	8.51	1;85	0.010	0.091
Simple multiplication (time)*	4.99	1;87	0.030	0.054	4.05	1;85	0.050	0.047
Arithmetic word problems	15.26	1;87	<0.001	0.149	9.96	1;85	0.002	0.105
W	0.01	1;87	0.920	0.000	-	-	-	-

Notes: \*time in milliseconds; DBT: Digits WISC (backward total); w: Weber fraction

### *Number writing and ADAPT rules*

We decided to further investigate the impact of phonological awareness in number writing through the analysis of items according to the number of transcoding rules proposed by the ADAPT model (Barrouillet et al., 2004, Camos, 2008). By doing so, we could delimitate the influence of phonological awareness concerning numerical complexity.

First, the 40 items of the number writing task were grouped by the number of rules or whether they were lexically retrieved. The items which are 1 and 2 digit-numbers are usually directly recovered (Camos, 2008). Because there were only 5 items of 6 rules and 2 items of 7 rules, they were included in the same complexity category (Table 4).

Table 4. Description of the number writing items according to ADAPT rules

<b>N° of rules</b>	<b>items</b>	<b>Total</b>
2 (lexical)	4, 7, 1, 11, 40, 16, 30, 73, 13, 68, 80, 25	12
3	200, 150, 700, 8000, 190, 1100	6
4	109, 101, 643, 1002, 951, 1015, 1300, 1060, 215	9
5	2140, 1107, 902, 7013, 3112, 5147	6
6 and 7	2609, 3791, 4701, 6513, 7105, 4870, 8844	7

We ran a series of ANOVAs to investigate if there were differences between the two groups on the errors of each rule-category. In order to approximate a normal distribution, all error rates were arcsine (Arcs) transformed in this study. Table 5 shows the arcsine transformed error rates.

Table 5. Descriptive data for the ADAPT categorization for each group

<b>Errors rates</b>	<b>LPA (n=31)</b>		<b>TPA (n=58)</b>	
	<b>Mean</b>	<b>SD</b>	<b>Mean</b>	<b>SD</b>
Arcs_total	0.47	0.36	0.29	0.27
Arcs_lexical	0.05	0.11	0.00	0.00
Arcs_3 rules	0.40	0.46	0.14	0.25
Arcs_4 rules	0.54	0.48	0.25	0.32
Arcs_5 rules	0.73	0.69	0.43	0.51
Arcs_6 and 7 rules	0.77	0.67	0.53	0.57

Note: Arcs: arcsine

There were significant differences between groups on the lexical items [ $F(1,87) = 10.90$ ,  $MSE=0.05$ ,  $p=0.001$ ,  $\eta^2 = 0.111$ ]; on the items with 3 transcoding rules [ $F(1,87)= 11.197$ ,  $MSE=1.307$ ,  $p=0.001$ ,  $\eta^2 = 0.114$ ]; with 4 rules [ $F(1,87)= 11.14$ ,  $MSE=1.63$ ,  $p=0.001$ ,  $\eta^2=0.114$ ] and also on the ones with 5 rules [ $F(1,87)=5.81$ ,  $MSE=1.92$ ,  $p=0.018$ ,  $\eta^2=0.063$ ]. There was no statistically significant difference on the 6 and 7 rules items [ $F(1,87) = 3.15$ ,  $MSE=1.18$ ,  $p=0.079$ ,  $\eta^2 = 0.035$ ]. After including phonological working as a covariate, the difference on the 5 rules-items was no longer significant (Table 6).

Table 6. Analysis of variance (ANOVA) and covariance (ANCOVA) of the transcoding task

Errors rates	ANOVA				ANCOVA (co-variate: DBT)			
	F	df	p	$\eta^2$	F	Df	p	$\eta^2$
Arcs_lexical	10.90	1;87	0.001	0.111	8.77	1;86	0.004	0.093
Arcs_3 rules	11.20	1;87	0.001	0.114	6.86	1;86	0.01	0.074
Arcs_4 rules	11.14	1;87	0.001	0.114	7.58	1;86	0.007	0.081
Arcs_5 rules	5.81	1;87	0.02	0.063	2.93	1;86	0.09	0.033
Arcs_6 and 7 rules	3.15	1;87	0.08	0.035	1.08	1;86	0.30	0.012

Note: DBT: Digits WISC (backward total); Arcs: arcsine

In order to characterize these results more precisely, a 2 (numerical complexity) vs. 2 (group) ANOVA was also run. There were 2 levels of numerical complexity: the arcsine of errors from items that could be lexically retrieved (12 items) (complexity 1) and items that required algorithmic procedures to be transcoded (the remaining 28 items) (complexity 2). For all of the cases on which sphericity assumption was not satisfied, Greenhouse-Geisser corrected coefficients are reported.

In the more complex items, the LPA group exhibited more errors than the TPA, as evidenced by an interaction between group and number complexity [ $F(1,87)= 4.94$ ;  $MSE=0.35$ ;  $p=0.029$ ,  $\eta^2=0.054$ ]. There was also a main-effect of number complexity that reflects the higher performance of both groups in the lexical items [ $F(1,87)= 117.69$ ;  $MSE=8.43$ ;  $p<0.001$ ,  $\eta^2=0.575$ ] (Figure 1).

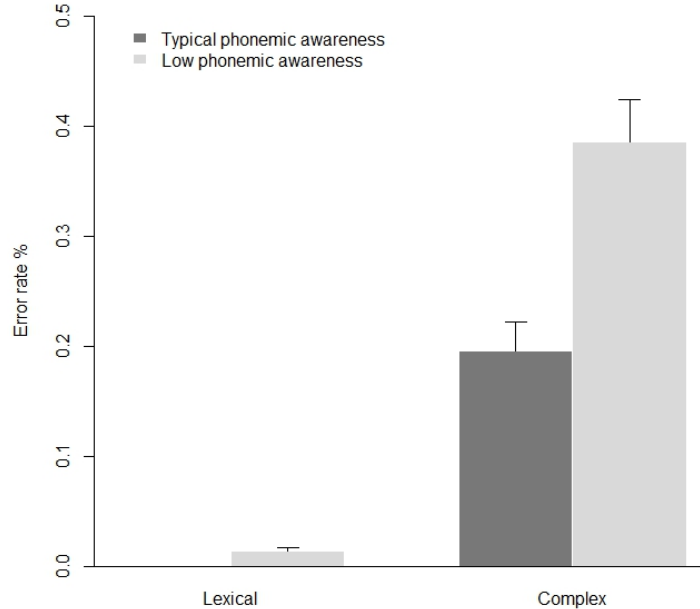


Figure 2. Group interaction on numerical complexity

We repeated this analysis, this time including phonological working memory (DBT) as a covariate. The main-effect of number complexity remained significant [ $F(1,86)=61.00$ ;  $MSE=3.93$ ;  $p<0.001$ ,  $\eta^2 =0.415$ ], though its effect size decreased. There was an interaction between number complexity and phonological working memory [ $F(1,86)=10.80$ ;  $MSE=0.70$ ;  $p=0.001$ ;  $\eta^2=0.112$ ] and the previous interaction between number complexity and group was no longer significant [ $F(1,86)=2.21$ ;  $MSE=0.14$ ;  $p=0.141$ ;  $\eta^2=0.025$ ].

#### *Association of neuropsychological measures and number writing*

Another aim of this study was to investigate which of the neuropsychological variables examined would be more strongly related to transcoding performance. In order to explore that, we did separate regression models for the arcsine of errors of the whole task, and also models for the arcsine of errors of lexical items and the more complex ones.

Firstly, we examined the general association between these measures through Pearson's correlations.



Inspection of Table 7 reveals that the phoneme elision score correlated with all three subtests of the TDE, as well as with working memory, phonological processing and arithmetic tasks. Moreover, all arithmetic tasks correlated moderately or strongly with each other. However, w did not correlate with the arithmetic tasks, with the exception of subtraction. Number writing did not correlate with the Corsi Blocks.

Table 7. Correlations between the neuropsychological variables

Tasks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.TDE Arithmetic	1													
2.TDE Spelling	.636**	1												
3.TDE Reading	.547**	.779**	1											
4. Digit WISC (forward total)	.228*	.379**	.185	1										
5. Digit WISC (backward total)	.390**	.394**	.390**	.139	1									
6. Corsi Block (forward total)	.231*	.125	.219*	.097	.115	1								
7. Corsi Block (backward total)	.277**	.081	.129	.147	.296**	.375**	1							
8.Phoneme elision	.523**	.554**	.666**	.158	.351**	.245*	.276**	1						
9.Number reading	.611**	.615**	.688**	.146	.350**	.236*	.177	.545**	1					
10. Number writing	.690**	.638**	.603**	.237*	.356**	.173	.144	.485**	.822**	1				
11.Addition	.642**	.485**	.441**	.284**	.319**	.262*	.259*	.388**	.432**	.523**	1			
12. Subtraction	.626**	.524**	.539**	.180	.449**	.333**	.317**	.477**	.545**	.502**	.640**	1		
13. Multiplication	.781**	.481**	.500**	.198	.393**	.264*	.290**	.496**	.562**	.571**	.580**	.663**	1	
14. Arithmetic word problems	.644**	.472**	.449**	.307**	.427**	.241*	.367**	.551**	.511**	.609**	.476**	.553**	.543**	1
15. Weber fraction	-.125	-.126	-.128	-.038	-.130	-.240*	-.102	-.064	-.186	-.214*	-.162	-.226*	-.193	-.059

Secondly, we run hierarchical regressions in order to investigate the variables that would be more strongly related to number writing. Age and intelligence were included in the 1st block, using the “enter” method, and phoneme elision, Weber fraction, Digit backward total and Corsi Blocks backward total were included in the 2nd block using “stepwise” method. Even though the Corsi Blocks did not correlated with number writing, we decided to include it in the regression analyses to test if this variable would have any influence, as found in previous studies (Zuber, Pixner, Moeller, Korbinian, Nuerk, 2009; Pixner, et al., 2011).

In the first model, we used the arcsine of errors of the whole task as the dependent variable. Afterwards, we wanted to investigate if phoneme elision would influence in a different way the lexical items and the more complex ones, so we separated regression models for their arcsine of errors.

Overall, phoneme elision was systematically associated to number writing in children from 2nd to 4th grade, even after controlling for the effects of age, intelligence, number sense and working memory. Phonological working memory was marginally significant.

Table 8. Linear regression with arcsine of errors of the total score as dependent variable

<b>Measures</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b>t</b>	<b>p</b>
Age	-0.39	-4.54	<0.001
Phoneme elision	-0.34	-3.84	<0.001
Intelligence	-0.23	-2.75	0.007
Digits WISC (backward total)	-0.18	-1.97	0.052
Weber Fraction	0.08	0.88	0.384
Corsi Blocks (backward total)	0.02	0.22	0.823

Results show that variance in the total score of the number writing task could be significantly predicted by the model which comprised age, intelligence and phoneme elision (adjusted  $R^2=0.38$   $F(3, 85) = 19.28$ ,  $p<0.001$ ). The insertion of phoneme elision in the model accounted for an increase of 0.10 in the  $R^2$  value.

Table 9. Linear regression with arcsine of errors of lexical items as dependent variable

<b>Measures</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b>t</b>	<b>p</b>
Phoneme elision	-0.41	-4.18	<0.001
Intelligence	-0.18	-1.93	0.058
Corsi Blocks (backward total)	-0.11	1.02	0.311
Age	-0.06	-0.67	0.504
Weber Fraction	0.05	0.48	0.629
Digits WISC (backward total)	0.02	0.16	0.873

For the lexical items, phoneme elision was the only statistically significant variable and the model had a weaker explanatory power (adjusted  $R^2=0.21$ ,  $F(3, 85)=9.16$ ,  $p<0.001$ ). Intelligence was also marginally significant. After phoneme elision was included in the model, an increase of 0.16 was observed in the  $R^2$  values.

Table 10. Linear regression with arcsine of errors of complex items as dependent variable

<b>Measures</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b>t</b>	<b>p</b>
Age	-0.39	-4.47	<0.001
Phoneme elision	-0.34	-3.88	<0.001
Intelligence	-0.25	-2.92	0.004
Digits WISC (backward total)	-0.17	-1.95	0.055
Weber Fraction	0.07	0.81	0.421
Corsi Blocks (backward total)	0.03	0.33	0.740

At last, regarding the items that require algorithmic procedures in order to be transcoded, phoneme elision was also the strongest predictor, along with age and intelligence (adjusted  $R^2=0.39$ ,  $F(3, 85) = 19.58$ ,  $p<0.001$ ). In this group of items, phonological working memory was also marginally significant. Again, phoneme elision had an important role, increasing the model's adjusted  $R^2$  in 0.10.

## DISCUSSION

In the present study the impact of phonemic awareness on arithmetical achievement and, more specifically, on number transcoding was examined in a sample of children with (LPA) and without (TPA) difficulties on a phoneme elision task.

The LPA group performance on the mathematical tasks is substantially lower than TPA. This difference could not be attributed to general deficits in cognitive development, since these groups did not differ regarding general intelligence. After removing the effect of working memory and acuity of the ANS (w), the differences between LPA and TPA on addition and subtraction operations disappeared. On the other tasks investigated, (oral problems and transcoding tasks) differences remained significant.

This is, to our knowledge, the first study that systematically and simultaneously evaluated the impact on working memory, number sense and phonemic awareness in number transcoding. No study has investigated yet the impact of phonological skills in a number writing task with items from different levels of complexity. Most of the previous studies on number transcoding (Landerl, Bevan, Butterworth, 2004; Rouselle & Noël, 2007) used simple number writing tasks, with a limited range of numbers. LPA presented more errors on the Arabic number writing task compared to the TPA group. They presented more errors regardless of the numerical complexity, with the exception of the items with more than 6 production rules, which were equally difficult for both groups. There was an interaction between group and numerical complexity, suggesting that LPA group had more difficulty on the more complex items. When we included phonological working memory as a covariate, this interaction between group and complexity was no longer significant. We also examined neuropsychological variables that could be related to number writing and it turns out that phonemic awareness, along with intelligence and age, could account for nearly 40% of its variance. In the following, these results will be discussed in more detail.

### a. Group differences on the neuropsychological variables

Our results corroborate previous findings (Jordan, Wylie, Mulhern, 2010; Simmons & Singleton, 2008) in the sense that children with low phonemic awareness have difficulties also on mathematical tasks. The LPA children presented lower performances on all subtests of the TDE, which suggests that phonemic awareness

can also have an impact on simple arithmetic operations, such as the ones that constitute this study. The differences, though, were more preeminent on the reading and spelling subtests. This finding is in line with what Boets & DeSmedt (2010) reported in children with dyslexia who also presented lower scores on an arithmetic standardized test which could be considered analogous to the TDE.

There was a lack of statistically significant differences in the memory tasks, namely Corsi Blocks and Digits WISC. The only exception was on the total score (correct trials x span) on the backward order of the Digits. This may be a more reliable measure than just the analysis based on the span because it takes into account the performance on both trials of an equal length (Kessels et al, 2000). Besides that, the forward order can be considered a measure of attention whereas the backward order would be more connected to working memory processes (Strauss, Sherman, Spreen, 2006). Gathercole, Alloway, Willis, Adams (2006) also suggested that the forward order is a measure of short-term memory and that the backward is related to complex memory skills; and that these two constructs are associated because complex memory also rely on short-term memory skills in storage and retrieval. In this study, Gathercole et al. (2006) found that working memory was associated to both reading and mathematics and that complex memory was the strongest predictor of mathematics abilities. Findings concerning the memory profile of children with poor phonological awareness skills are still inconclusive (Jeffries & Everatt, 2004) and we provided further support that general working memory impairments are not always present in these children.

According to Swanson (2004), although developmental increases in WM can co-occur in phonological processing (e.g. phoneme elision), these two processes operate independently. Swanson (2004) argues that WM contributes to arithmetic problem solving beyond phonological processing in children between 8 and 11 years old. Our results show a slightly different pattern. Even after partialling out the influence of phonological working memory and number sense, the differences between groups remained significant. One possible explanation for these deviant results is that the phoneme elision task of Swanson (2004) might have been too easy for the children because they had to delete the beginning and final phoneme, whereas, in our task, children also had to delete phonemes in the middle of the words. Hence, the task used by this other study could be insufficiently sensitive and specific to identify phonological deficits. Another possible reason for the different results is that the items of the problem task used by Swanson (2004) were more complex than ours, in the sense that they had extraneous information [an example extracted from her paper: "Darren found 15

pinecones (assignment). He threw 5 pines cones back (assignment). Darren uses pine cones to make ornaments (extraneous). How many pine cones did Darren keep (question)?”], which may involve other executive functions, such as inhibition of irrelevant information or monitoring components of WM (manipulation and recombination of material).

The LPA group presented lower scores in all of the arithmetical tasks (addition, subtraction, and multiplication and arithmetic word problems). This finding is consistent with other studies which argue that phonemic awareness is related to operations with small operands and results (Boets & DeSmedt, 2010). An interesting finding is the significant difference on the subtraction operations. Dehaene et al (2003) claims that single-digit operations might rely on different codes: multiplication would be more strongly related to the verbal code, whereas subtraction would require manipulations of quantity. Our findings indicate that low phonemic awareness skills cause an impact on all arithmetical operations. After removing the effects of phonological working memory and the Weber fraction, the only difference that remained significant was on the multiplication operations and on the arithmetic word problems. This might indicate that multiplication facts would rely more strongly on retrieval of results from LTM, and thus, be more linked to the verbal code compared to the other operations. Another possible explanation was suggested by Boets & DeSmedt (2010), who also found similar relationships between phonological awareness and small problems in children, regardless of the type of operations. The authors argue that the operation-specificity effect might emerge throughout the development and that the different reliance on specific codes may only arise in adults.

#### b. Phonological awareness and number transcoding

The main focus of the study was to examine number transcoding in children with different levels of phonemic awareness performance, and to our concern, this was the first study to investigate transcoding abilities in such groups.

In regard to the numerical complexity, we found a significant main-effect in the repeated measures ANOVA. The numerical complexity was calculated based on the quantity of rules necessary for transcoding, as defined by the ADAPT model (Camos, 2008; Barrouillet et al., 2004). This finding suggests that the items which involved transcoding algorithms were more difficult than those retrieved lexically. Another important result was the interaction between group and complexity, which indicates that

children with low phonemic awareness skills presented more difficulty in the more complex items. Lexical items have already been mastered by children of this age range, which is compatible with previous studies (Camos, 2008; Zuber et al, 2009). Hence, we could replicate previous findings that transcoding performance is influenced by the syntactical complexity of items (Camos, 2008).

One possible reason for the interaction between group and numerical complexity can be the hypothesis of weak phonological representations in dyslexic children who, similarly to the sample of our study, also present phonemic awareness deficits (Vellutino, Fletcher, Snowling, & Scalon, 2004). According to it, poorly specified nature of phonological representations could lead to poor performance on tasks that involve the retention, retrieval or manipulation of phonological codes. Because number writing requires the access to the verbal codes that represent numbers, it is logical to suggest that children's phonological processing abilities will also influence their transcoding attainment.

The best neuropsychological predictor of the transcoding errors on the Arabic number writing task was the phoneme elision score. Along with age and intelligence, this model could account for 38% of the variance. Besides that, in our study, we found that number transcoding and phoneme elision are moderately correlated ( $r=0.485$ ,  $p=0.01$ ), so we can assume that this linguistic skill may be associated to number writing. It is interesting to note that working memory was marginally significant on the regressions with the total errors as well as with the errors of the complex items. Working memory could partially moderate the influence of phonemic awareness in number processing. A moderator can be thought as variable that influences the strength or the direction of a relationship between a predictor variable and a criterion variable. In our study, after including phonological working memory (total score of the digit span) as a covariate, differences between groups on the less complex items remained constant, though there was a decrease in their effect size. Including phonological working memory as a covariate in the repeated measures ANCOVA also had an important impact: the interaction between groups and numerical complexity was no longer significant. This is in line with findings from Camos (2008) and Barrouillet et al. (2004), according to which working memory is important to construct the procedures that are consisted of an ordered sequence of digits and blank frames to be filled by the subsequent procedures.

A possible limitation of our study is that we did not evaluate lexical access; another subcomponent of phonological processing that may be related to number transcoding, more specifically to the items that are lexically retrieved from long-term memory.



No study has investigated the specific impact of phonemic awareness in number transcoding yet. Rosseli, Matute, Pinto & Ardila (2006) investigated children with different subtypes of dyscalculia, including children with both dyscalculia and reading difficulties which, theoretically, could also be thought as having phonemic awareness deficits. The groups did not differ on their number writing task. One possible reason for this lack of statistical difference is that the transcoding task had only 8 items, and 2 of them could be lexically retrieved (numbers 1 and 7), so it probably was too easy for 11 years-old children. Another study that investigated transcoding skills in children with reading difficulties was conducted by Simmons & Singleton (2009). They investigated the mathematical profile of children with dyslexia and concluded that they did not have difficulties in place value understanding. According to the authors, place value requires children to learn rules which link the position of digits with values and is less reliant on phonological processing. The main problem of this result is that the place value task was mainly a symbolic magnitude comparison task and, thus, was not a measure of number transcoding *per se*.

Recently, LeFevre and coworkers (2013), investigated the impact of language skills and executive functions in mathematical knowledge in children from 2nd and 3rd grade. The authors created a composite score of mathematical knowledge which was constituted of number knowledge (understanding of concepts of quantity, order and place value in a number reading task) and procedural knowledge (basic arithmetic operations). In a regression analysis with children from 2nd grade, both phonemic awareness and executive functions were significant predictors ( $\beta=0.20$ ,  $p=0.028$ , and  $\beta=0.31$ ,  $p<0.001$ , respectively), whereas vocabulary was not. Even though this task was not exactly comparable to the one used in our study, it may be considered another evidence regarding the role of phonemic awareness in numerical processing.

Hecht et al. (2001) reported that second-grader's phonological awareness could account for 10% of the variance in fifth grader's mathematical computation skills. Even though they used composite scores in a longitudinal design, it is interesting to note that, in our study, phonemic awareness explained nearly the same amount of variance in the number writing task.

One important point that deserves further discussion is the fact that the nonsymbolic magnitude accuracy indexed by the internal Weber fraction ( $w$ ) is not associated to performance in transcoding tasks. Lack of association between  $w$  and transcoding abilities has important theoretical implications for models of developmental dyscalculia. There are currently two competing models of math-cognitive specific deficits in

developmental dyscalculia. Both predict that the establishment of an Arabic lexicon and development of verbal-Arabic transcoding processes should be impaired in developmental dyscalculia, but for different reasons. According to the core representational deficit hypothesis, developmental dyscalculia is caused by fuzzier nonsymbolic magnitude representations or inaccuracy of an approximate number system (Mazzocco et al., 2011, Piazza et al., 2010). The core representational deficit hypothesis predicts that knowledge of the Arabic system and transcoding abilities should be associated to lack of accuracy in discriminating nonsymbolic magnitudes. The access deficits hypothesis proposes, otherwise, that the primary difficulty is related to the building of Arabic representations and automatization of their connections to the nonsymbolic representations of magnitude (Noël & Rousselle, 2011, Rousselle & Noël, 2007). In this latter case, inaccuracy in magnitude estimation and comparison is secondary to unreliable symbolic representations. Dissociation between impaired transcoding abilities and approximate number system accuracy clearly favors the access deficit hypothesis.

## CONCLUSION

Our findings are supporting evidence for the association between phonemic awareness and numerical cognition, especially number transcoding. It represents a contribution to the literature on number transcoding in children, which is relatively scarce (Barrouillet et al., 2004, Camos, 2008, Noël & Turconi, 1999, Power & Dal Martello, 1990, Sullivan, Macaruso & Sokol, 1996, Zuber et al., 2009, Pixner et al., 2011). Less interest for research on transcoding in children may be traced to the fact that children learning is relatively fast (Geary et al., 1999) or to the linguistic peculiarities. For example, two-digit numbers transcoding may be of special significance in French (“quatre-vingt un” = “81”) or other languages like German (“Einundachtzig” = “81”) characterized by Decade-Unit inversions. Nonetheless our study shows that oral verbal to Arabic transduction may be of considerable interest in the context of math learning difficulties presented by Brazilian Portuguese native speakers.

LeFevre et al (2010) investigated the cognitive precursors that are involved in mathematical competencies. Arithmetic is a complex field and it is composed by several subcomponents and processes. The authors investigated longitudinally children from 4.5 to 7.5 years of age and found that we can establish three independent pathways: linguistic, quantitative and spatial attention. The role of each of

these pathways depended on the mathematical outcome, for instance, the linguistic one was more related to number naming compared to processing of numerical magnitude. It is essential to investigate the underlying skills that contribute to specific mathematical domains.

Previous studies have focused on the associations between phonological processing and arithmetical facts or oral problems (Simmons & Singleton, 2008, 2009; Boets & DeSmedt, 2010). We have found strong evidence regarding the association between phonological processing and verbal-Arabic number transcoding, which is a task that also has verbal demands.

It is undeniable that phonemic awareness may have an important role in numerical cognition and further studies should investigate more precisely what is the mathematical profile of children with phonological deficits. It would be important, for instance, that neuroimaging studies explore this association at the neural level and search for comparable activations in the left temporo-parietal areas and angular gyrus during phoneme elision and transcoding tasks.

Regarding clinical purposes, our study demonstrates the importance of also focusing on the phonological skills while evaluating arithmetical achievement. In addition, it is important to include training of phonological skills in dyscalculia rehabilitation and in classroom activities, because mastering these skills may help children to ameliorate the learning problems associated to them.

## REFERENCES

- American Psychiatric Association. (2000). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (4th ed.). Washington, DC: American Psychiatric Association.
- Angelini, A. L., Alves, I. C. B., Custódio, E. M., Duarte, W. F. & Duarte, J. L. M. (1999). *Matrizes Progressivas Coloridas de Raven: Escala Especial*. Manual. São Paulo: CETEPP.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417-423.
- Baddeley, A. (2001). Is working memory still working? *European Psychologist*, 7(2), 85-97.
- Baddeley, A. D., & Logie, R. H. (1999). The multiple-component model. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 28–61) Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press.
- 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.
- Boets, B., & DeSmedt, B. (2010). Single-digit arithmetic in children with dyslexia. *Dyslexia Chichester England*, 16(2), 183-191.
- 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.
- Castles, A., & Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, 91(1), 77-111.
- Cipolotti, L., & Butterworth, B. (1995). Toward a Multiroute Model of Number Processing: Impaired Number Transcoding With Preserved Calculation Skills. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124(4), 375-390.
- Costa, A.J., Silva, J.B.L., Chagas, P.P., Krinzinger, H., Lonneman, J., Willmes, K., Wood, G. & Haase, V.G. (2011). A hand full of numbers: a role for offloading in arithmetics learning? *Frontiers in Psychology*, 2,368. doi: 10.3389/fpsyg.2011.00368.
- DeSmedt, 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.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1-2), 1-42.
- Dehaene, S. (2009). Origins of Mathematical Intuitions: the Case of Arithmetic. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1156, 232-259.
- Dehaene, S., & Changeux, J.-P. (1993). Development of elementary numerical abilities: A neuronal model. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5(4), 390-407.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1(1), 83-120.
- Dehaene, S., Izard, I., & Piazza, M. (2005). Control Over Non-Numerical Parameters in Numerosity Experiments. Available at: [www.unicog.org/docs/DocumentationDotsGeneration.doc](http://www.unicog.org/docs/DocumentationDotsGeneration.doc)
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3), 487-506.

- Deloche, S. & Seron, X. (1982). From one to 1: An analysis of a transcoding process by means of neuropsychological data. *Cognition*, 12(2), 119-149.
- Deloche, G. & Seron, X. (1987). Numerical transcoding: a general production model. In G. Deloche & C. Seron (Orgs.) *Mathematical disabilities. A cognitive neuropsychological perspective* (pp. 137-170). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Fayol, M., & Seron, X. (2005). About numerical representations. In J. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of mathematical cognition* (pp. 3–22). New York: Psychology Press.
- Fayol, M., Barrouillet, P., & Renaud, A. (1996). Mais pourquoi l'écriture des grands nombres est-elle aussi difficile? *Revue de Psychologie de l'Éducation, Numéro spécial "Le Nombre"*, 3, 87-107.
- Fawcett, A. J., & Nicolson, R. I. (2001). Dyslexia: The role of the cerebellum. In A. Fawcett (Ed.), *Dyslexia: Theory and good practice* (pp. 89–106). London: Whurr.
- Figueiredo, V. L. M. (2002). *WISC-III: Escala de Inteligência Wechsler para Crianças. Manual Adaptação e Padronização Brasileira*. São Paulo: Casa do Psicólogo.
- Figueiredo, V. L. M., Nascimento, E. (2007). Desempenhos nas duas tarefas do subteste dígitos do WISC-III e do WAIS-III. *Psicologia: Teoria e Pesquisa*, 23(3), 313-318.
- Fuchs, L. S., Geary, D. C., Compton, D. L., Fuchs, D., Hamlett, C. L., & Bryant, J. D. (2010). The contributions of numerosity and domain-general abilities to school readiness. *Child Development*, 81(5), 1520-1533.
- Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, 44(1-2), 43-74.
- Gathercole, S.E., Alloway T.P., Willis, C & Adams, A.M. (2006) Working memory in children with reading disabilities. *Journal of Experimental Child Psychology*. 93(3), 265-281.
- Geary, D. C. (1993). Mathematical disabilities: cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin*, 114(2), 345-62.
- Geary, D. C. (2000). From Infancy to Adulthood: the development of numerical abilities. *European Child & Psychiatry*, 9 (2), 11 – 16.
- Geary, D. C. (2006). Development of mathematical understanding. In D. Kuhl & R. S. Siegler (Eds.), *Cognition, perception, and language*, (Vol 2, pp. 777–81). New York: John Wiley & Sons.
- Geary, D. C., Hoard, M. K., & Hamson, C. O. (1999). Numerical and arithmetical cognition: patterns of functions and deficits in children at risk for a mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74(3), 213-239.
- Geary, D. C., Hoard, M. K., & Nugent, L. (2012). Journal of Experimental Child Independent contributions of the central executive, intelligence , and in-class attentive behavior to developmental change in the strategies used to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, 113(1), 1-17.
- Griffiths, Y. & Snowling, M. (2001) Auditory word identification and phonological skills in dyslexic and average readers. *Applied Psycholinguistics*, 22 (3). 419-439.
- Halberda, J., Mazocco, M. M. M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455(7213), 665-668.
- 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.

- Inglis, M., Attridge, N., Batchelor, S., & Gilmore, C. (2011). Non-verbal number acuity correlates with symbolic mathematics achievement: but only in children. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(6), 1222-1229.
- Izard, V., & Dehaene, S. (2008). Calibrating the mental number line. *Cognition*, 106(3), 1221-47.
- Jeffries, S., Everatt, J. (2004) Working Memory: Its Role in Dyslexia and Other Specific Learning Difficulties. *Dyslexia*, 10, 196-214.
- Jordan, J.-A., Wylie, J., & Mulhern, G. (2010). Phonological awareness and mathematical difficulty: a longitudinal perspective. *The British Journal of Developmental Psychology*, 28, 89-107.
- Kessels, R. P. C., Van Zandvoort, M. J. E., Kapelle, L. J., Postma, A., & De Haan, E. H. (2000). The Corsi block-tapping task: standardization and normative data. *Applied Neuropsychology*, 7, 252-258.
- 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.
- Landerl, K., Fussenegger, B., Moll, K., & Willburger, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia: two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(3), 309-324.
- Leather, C. V., & Henry, L. A. (1994). Working memory span and phonological awareness tasks as predictors of early reading ability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 58(1), 88-111.
- Lefevre, J.-anne, Fast, L., Skwarchuk, S.-Lynn, Smith-Chant, B., Bisanz, J., Kamawar, & D., Penner-Wilger, M. (2010) Pathways to Mathematics: Longitudinal Predictors of Performance. *Child Development*, 81 (6), 1753-1767.
- Lefevre, J.-anne, Berrigan, L., & Vendetti, C. (2013). The role of executive attention in the acquisition of mathematical skills for children in Grades 2 through 4. *Journal of Experimental Child Psychology*, 114, 243-261.
- Lewis, C., Hitch, G. J., & Walker, P. (1994). The prevalence of specific arithmetic difficulties and specific reading difficulties in 9- to 10-year-old boys and girls. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 35(2), 283-292.
- Libertus, M. E., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschool acuity of the approximate number system correlates with school math ability. *Developmental Science*, 14(6), 1292-1300.
- Lochy, A., Pillon, A., Zesiger, P., & Seron, X. (2002). Verbal structure of numerals and digits handwriting: new evidence from kinematics. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55A(1): 263-288.
- Lochy, A., Censabella, S. (2005) Le système symbolique arabe: acquisition, évaluation, et pistes rééducatives. In Marie-Pascale Noël (Ed.) *La Dyscalculie* (pp 77-104). Solal : Marseille.
- Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability (dyscalculia). *Child Development*, 82(4), 1224-1237.
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in numerical processing and calculation: evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, 4, 171 – 196.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2001). Dyslexia as a learning disability. In A. Fawcett (Ed.), *Dyslexia: Theory and good practice* (pp. 141–160). London: Whurr.

- Noël, M. P., & Turconi, E. (1999). Assessing number transcoding in children. *European Review of Applied Psychology*, 49, 295–302.
- Oliveira-Ferreira, F., Costa, D., Micheli, L., Oliveira, L., Pinheiro-Chagas, P., & Haase, V. (2012). School Achievement Test: Normative data for a representative sample of elementary school children. *Psychology & Neuroscience*, 5(2).
- Passolunghi, M. C., & Cornoldi, C. (2008). Working memory failures in children with arithmetical difficulties. *Child neuropsychology a journal on normal and abnormal development in childhood and adolescence*, 14(5), 387-400.
- Piazza, M. (2010). Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12), 542-551.
- Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Dehaene, S., & Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, 116(1), 33-41.
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., LeBihan, D., & Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human parietal cortex. *Neuron*, 44(3), 547-555.
- Pixner, S., Zuber, J., Hermanová, V., Kaufmann, L., Nuerk, H. C., & Moeller, K. (2011). One language, two number-word systems and many problems: numerical cognition in the Czech language. *Research in Developmental Disabilities*, 32(6), 2683-2689.
- Power, R., & Dal Martello, M. F. (1990). The dictation of Italian numerals. *Language and Cognitive Processes*, 5(3), 237–254.
- Rosselli, M., Matute, E., Pinto, N., & Ardila, A. (2006). Memory abilities in children with subtypes of dyscalculia. *Developmental Neuropsychology*, 30(3), 801-818.
- Rotzer, S., Loenneker, T., Kucian, K., Martin, E., Klaver, P., & Von Aster, M. (2009). Dysfunctional neural network of spatial working memory contributes to developmental dyscalculia. *Neuropsychologia*, 47(13), 2859-2865.
- Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: a comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102(3), 361-395.
- Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2011). Developmental Changes in the Profiles of Dyscalculia: An Explanation Based on a Double Exact-and-Approximate Number Representation Model. *Frontiers in human neuroscience*, 5, 165. doi: 10.3389/fnhum.2011.00165.
- Seron, X., & Deloche, G. (1983). From 4 to four: A Supplement to “From three to 3”. *Brain*, 106(3), 735-744.
- 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.
- Simmons, F.R., & Singleton, C. (2009) The mathematical strengths and weaknesses of children with dyslexia. *Journal of Research in Special Education Needs*, 9(3), 154-163.
- Simmons, F. R., Willis, C., & Adams, A.-M. (2012). Different components of working memory have different relationships with different mathematical skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 111(2), 139-55.
- Simmons, F., Singleton, C., & Horne, J. (2008). Phonological awareness and visual-spatial sketchpad functioning predict early arithmetic attainment: Evidence from a longitudinal study. *European Journal of Cognitive Psychology*, 20(4), 711-722.
- Snowling, M.J. (2000). *Dyslexia*. Oxford: Blackwell.

- Sokol, S. M., Macaruso, P., & Gollan, T. H. (1994). Cognitive neuropsychology and developmental dyscalculia. (C. Donlan, Ed.) *Developmental Neuropsychology*, 10(4), 413-441.
- Stanovich, K. E.; Cunningham, A.E., & Cramer, B.B. (1984) Assessing phonological awareness in kindergarten children: Issues of task complexity. *Journal of Experimental Child Psychology*, 28(3), 127-154.
- Stein, L. M. (1994). *TDE. Teste de desempenho escolar. Manual para aplicação e interpretação*. São Paulo: Casa do Psicólogo.
- Strauss, E., Sherman, & E. Spreen, O. (2006) A Compendium of Neuropsychological Tests: Administration, Norms, and Commentary. Third Edition. Oxford ; New York : Oxford University Press.
- Sullivan, K. S., Macaruso, P., & Sokol, S. M. (1996). Remediation of arabic numeral processing in a case of developmental dyscalculia. *Neuropsychological Rehabilitation*, 6(1), 27-53.
- Swanson, H. L., & Sachse-Lee, C. (2001). Mathematical problem solving and working memory in children with learning disabilities: both executive and phonological processes are important. *Journal of Experimental Child Psychology*, 79(3), 294-321.
- Swanson, H.L., (2004) Working memory and phonological processing as predictors of children's mathematical problem solving at different ages. *Memory & Cognition*, 32 (4), 648-661.
- Tallal, P., Miller, S. L., Jenkins, W. M., & Merzenich, M. M. (1997). The role of temporal processing in developmental language-based disorders: Research and clinical implications. In B. A. Blachman (Ed.), *Foundations of reading acquisition and dyslexia: Implications for early interventions*. Mahwah, NY, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Vellutino, F. R.; Fletcher, J. M.; Snowling, M. J; & Scanlon, D. M (2004). Specific reading disability (dyslexia): what have we learned in the past four decades? *Journal of child psychology and psychiatry, and allied disciplines*, 45(1), 2-40.
- Verguts, T., & Fias, W. (2006). Lexical and syntactic structures in a connectionist model of reading multi-digit numbers. *Connection Science*, 18(3), 265-283.
- 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.
- Zamarian, L., Ischebeck, A., & Delazer, M. (2009). Neuroscience and Biobehavioral Reviews: Neuroscience of learning arithmetic — Evidence from brain imaging studies. *Biobehavioral Reviews*, 33(6), 909-925.
- 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.



## 5. Considerações finais

O principal objetivo da presente dissertação foi investigar a contribuição do processamento fonológico na aritmética e na transcodificação numérica. Foi realizada uma revisão de literatura acerca dos componentes do processamento fonológico e suas associações com a matemática e identificamos a necessidade de explorar a associação com a transcodificação. Para tal, desenvolvemos uma tarefa de escrita de numerais arábicos que procurou controlar índices de complexidade sintática, de acordo com o sugerido pelo modelo ADAPT (Barrouillet et al, 2004) e uma tarefa de supressão de fonemas para avaliação da consciência fonêmica. Nossos resultados mostraram que grupos com distintos níveis de consciência fonêmica diferem-se em relação ao desempenho escolar e a medidas de aritmética e transcodificação. Além disso, a consciência fonêmica foi o melhor preditor do desempenho da tarefa de leitura de números.

Ao que sabemos, este foi o primeiro estudo que investigou a associação da consciência fonêmica com a transcodificação numérica, controlando simultaneamente a influência de outros mecanismos cognitivos, como a memória de trabalho e o senso numérico.

Além da consciência fonêmica, estudos futuros devem investigar a relação de outros subcomponentes do processamento fonológico com a transcodificação numérica para que sejam planejadas estratégias educacionais e diagnósticas mais precisas e efetivas.

### 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.